

Antti Laakso

Tuotekehitysprosessi mekaniikkasuunnittelussa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

2.10.2017

Tekijä Otsikko	Antti Laakso Tuotekehitysprosessi mekaniikkasuunnittelussa
Sivumäärä Aika	74 sivua 2.10.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Konetekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Koneautomaatio
Ohjaajat	Lehtori Janne Nuotio Projekti-insinööri Timo Eskelinen
<p>Työssä keskityttiin kokonaisvaltaisesti mekaniikkasuunnittelun suunnittelu- ja tuotekehitysprosessin eri osa-alueisiin. Teoriaosuudessa esiteltiin laajasti kirjallisuudessa kuvattu järjestelmällinen lähestymistapa kyseisiin prosesseihin. Käsittely sisälsi sekä eri metodologioiden yleiskatsauksen että useiden yksittäisten probleemien ratkaisuun soveltuvien metodien esittelyn. Suunnittelutyön tuloksellisuuteen ja luovuuteen vaikuttavia tekijöitä tarkasteltiin myös kognitiivisen tieteen näkökulmasta, koska ihmismielen kyvyt ja rajoitteet ovat suunnittelun onnistumisen ytimessä.</p> <p>Työn käytännön osuus oli jaettu kolmeen tehtävään, joiden tilaajana oli Enmac Oy. Ensimmäinen tehtävä oli putoamissuojien tuotekehityksen dokumentoinnin kehittäminen yrityksen tarpeisiin sopivaksi. Toisena tehtävänä oli putoamissuojan pystysuuntaisten lineaarijohteiden puristumisvaaran eliminointiin soveltuvan konseptin kehittäminen. Kolmantena ja laajimpana tehtävänä oli vaakasuunnassa liikuteltavan putoamissuojan lineaarijohteiden uuden konseptin kehittäminen. Tämän osion tavoitteina oli johteiden valmistuskustannusten alentaminen ja käyttövarmuuden sekä asennettavuuden parantaminen edelliseen malliin verrattuna.</p> <p>Käytännön osuuden toteuttamisessa hyödynnettiin työn teoriaosuudessa esiteltyä järjestelmällistä lähestymistapaa sekä eri metodeja. Tavoitteiden saavuttaminen onnistui tilaajalta saadun palautteen mukaan erinomaisesti. Mekaniikkasuunnittelun konseptivaiheesta edettiin edelleen toteutussuunnitteluvaiheeseen ja alustavien valmistuspiirustusten sekä osaluetteloiden laadintaan. Työn kulku käytännössä ja teoriaosuudessa kuvattu järjestelmällinen lähestymistapa olivat monissa kohden työtä yhdenmukaisia, mikä avasi uusia näkemyksiä suunnitteluprosessien tulokselliseen läpiviemiseen.</p> <p>Työkaluina käytännön osuudessa käytettiin konseptivaiheesta lähtien tunnistettujen rajoitteiden listausta, muisti- ja tarkistuslistoja, ratkaisuehdotusten arviointimenetelmiä, 3D-mallinnusta sekä teknistä laskentaa FEM-lujuusanalyytit mukaan lukien. Alustavien konseptien joukosta valittiin pääkonsepti, joka vietiin toteutussuunnitteluvaiheeseen. Toimivien ratkaisujen löytämiseksi eri suoritusvaiheiden välillä tehtiin iteraatiota.</p>	
Avainsanat	Tuotekehitysprosessi, mekaniikkasuunnittelu

Author(s) Title	Antti Laakso Product Development Process in Mechanical Engineering
Number of Pages Date	74 pages 2 October 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Machine Automation
Instructor(s)	Janne Nuotio, Senior Lecturer Timo Eskelinen, Project Engineer
<p>This Bachelor's thesis examines a product development and design process. In theoretical analysis marked attention was paid to a systematic approach in design including cognitive aspects as described in literature. For solving various problems in engineering design different universal methodologies and methods were presented. A cognitive aspect was considered essential in problem solving and hence discussed in this thesis. The thesis was commissioned by Enmac Oy.</p> <p>This thesis had three practical tasks. First, the development of a documentation system for product design and development in the fall protection department was pursued. The second task was designing a concept for a protective barrier that would prevent limb crushing in a linear guide system of a fall protection cage. The third and widest task was the conceptual design of a novel horizontal linear guide system for a fall protection carriage. In this section, the main goals were to design a robust and easy-to-install linear guide system with lower production costs compared to the previous model.</p> <p>A systematic approach and related methods were utilized in reaching the aforementioned goals. According to feedback from Enmac Oy, the objectives in all three tasks were reached with distinction. Mechanical design was extended from a conceptual phase to the embodiment design phase. Preliminary drawings and part lists were compiled for production cost evaluation. In finding solutions, both heuristic and discursive methods were applied as suggested in literature. Using a systematic approach in this study gave a new insight into product development and engineering design in mechanical engineering.</p> <p>A variety of tools were used in the design and development process. From the very beginning, essential constraints were listed and with the help of check lists and evaluation methods suitable preliminary concepts were generated. After selecting the principal concept, the work progressed into the embodiment design phase. Rough sketches, 3D-modelling, technical calculations and FEM structural analysis were utilized from an early stage in the design process.</p>	
Keywords	Product development process, mechanical engineering

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Tuotesuunnittelun ja -kehityksen ominaispiirteet	4
2.1	Tuotesuunnittelun ja tuotekehityksen tavoitteet	4
2.2	Tuotesuunnittelun ja tuotekehityksen vaiheet	4
2.3	Tuotesuunnittelun metodologia	9
2.4	Systemaattinen lähestymistapa	12
2.4.1	Ongelmanratkaisuprosessi	12
2.4.2	Taitavien ongelmanratkaisijoiden ominaisuudet	15
2.4.3	Henkilökohtaisten ominaisuuksien kehittämismahdollisuudet	17
2.4.4	Ongelmanratkaisu tiedonkäsittelyprosessina	20
2.4.5	Dokumentoinnin merkitys suunnittelu- ja tuotekehitysprosesseissa	21
2.4.6	Yleinen työskentelyn metodologia	22
2.5	Tuotteiden suunnittelu ja ratkaisujen löytäminen	25
2.5.1	Ratkaisujen löytämisen menetelmät	25
2.5.2	Ratkaisujen valinnan ja arvioimisen menetelmät	28
2.6	Tuotekehitysprosessi	32
2.6.1	Suunnittelutehtävän selventäminen ja tekniset määrittäet	34
2.6.2	Konseptisuunnittelun vaiheet	38
2.6.3	Toteutussuunnittelun vaiheet	40
2.6.4	Prototyypit	45
2.7	Tuotteen valmistuskustannuksien määräytyminen	46
3	Tuotesuunnittelua ja tuotekehitystä ohjaava lainsäädäntö ja standardit	47
3.1	Koneiden turvallisuutta käsittelevät standardit ja riskienhallinta	47
3.2	Putoamissuojien suunnittelua ohjaavat standardit	51
3.3	Esimerkkejä lineaariliikkeisen putoamissuojan turvallistamisesta	51
4	Tuotekehityksen dokumentoinnin toteutus	53
5	Pystyjohteiden turvallistamisen suunnittelu	55

6	Putoamissuojan vaakajohteiden suunnittelu ja tuotekehitys	58
6.1	Johteiden ja kelkkojen lujuusanalyysi	59
6.1.1	Johteiden käyttövarmuus, jännitykset ja taipumat	59
6.1.2	Rullakelkkojen jännitykset ja taipumat	63
6.2	Johteiden toimintavarmuuden analyysi	68
6.3	Putoamissuojan vaakajohteiden kustannusten arviointi ja optimointi	69
7	Yhteenveto	72
	Lähteet	74

Lyhenteet

FEM Finite Element Method – lujuuslaskentamenetelmä

ATEX ATmosphere EXplosibles – räjähdysvaaralliset tilat

1 Johdanto

Työturvallisuus ja siihen panostaminen ymmärretty entistä tärkeämmäksi jo muutaman vuosikymmenen ajan kehittyneissä teollisuusmaissa. Tämänkin insinööriyön tarve nousee työturvallisuuden kehittämisestä ja erityisesti vakaviin pysyviin vammoihin ja jopa kuolemaan johtavien onnettomuuksien tehokkaasta ehkäisystä. Insinööriyön tilannut suunnittelutoimisto Enmac Oy toimii hyvin laaja-alaisesti toteuttaen toimeksiantoja putkisto- ja teräsrakennesuunnittelusta aina asiakkaan tarpeiden mukaan räätälöityihin robottisoluihin. Enmac Oy on myös lanseerannut omina tuotteina valmistettavat säiliöautojen ja junien lastaus- ja purkupaikoille kohteen mukaan räätälöidyt putoamissuojaratkaisut. Putoamissuojat estävät erittäin tehokkaasti vakavat putoamisesta johtuvat onnettomuudet ja lisäävät sen lisäksi merkittävästi säiliöautojen sekä säiliövaunujen purku- ja täyttönopeutta turvallisen ja toimivan ympäristön kautta. Erityisvaatimuksena ko. toimintaympäristöissä on räjähdysuojaus, koska palavien nesteiden käsittelyssä muodostuu lähiympäristöön räjähdyskelpoisia kaasuseoksia. ATEX-hyväksytyillä laitteilla ja ratkaisuilla syttymislähteet on poistettu tai eristetty vaadittavan tilaluokan mukaisesti. Putoamissuojaratkaisut on esitelty verkkosivustolla (Enmac Oy 2017). Kuvassa 1 seuraavalla sivulla nähdään putoamissuojaratkaisu, jota tässä työssä kehitetään.

Tälle insinööriyölle asetettiin kolme tehtävää, joiden kokonaislaajuus on hieman tavanomaista suurempi. Haaste vaikutti kuitenkin sopivalta ottaen huomioon insinööriyön tekijän vuosien kokemuksen tuotekehitystehtävien parissa sekä aiemman työskentelyn Enmac Oy:n putoamissuojien parissa. Työn ensimmäisenä tehtävänä oli kehittää putoamissuojien tuotekehityksen dokumentointi tehokkaaksi ja toimivaksi. Enmac Oy:n omina tuotteina myytävät putoamissuojaratkaisut ovat uusi tuote, jonka ensimmäiset kappaleet on toimitettu asiakkaille 2014. Koska putoamissuojat eivät ole alun perin olleet yrityksen päätoimiala, on tuotekehitystä tehty suurelta osin toimitusprojektien yhteydessä. Tämä on jättänyt kehitettävää tuotekehityksen dokumentointiin ja sen tehokkaaseen hyödyntämiseen.

Toiseksi tehtäväksi asetettiin suunnittelutehtävä, jossa uudentyypisille pystysuuntaisille lineaarijohteille valittiin sopiva suojauskonsepti raajan puristumisriskin poistamiseksi. Konseptista edelleen jatkettiin detaljisuunnitteluun.

Työn kolmantena ja laajimpana tehtävänä oli säiliöauton päällä pituussuunnassa liikuttavan putoamissuojan johderatkaisun kehittäminen. Ensimmäisen toimitusprojektin johderatkaisun kustannukset olivat putoamissuojan kokonaiskustannukseen nähden suuret ja käytettävyydessä sekä asennettavuudessa havaittiin parannettavaa. Tämän osan tavoitteeksi asetettiin johderatkaisun kustannustason alentaminen merkittävästi ja asennettavuuden sekä vaativien talviolosuhteiden käyttövarmuuden parantaminen.



SIDEWAYS MOVEMENT FOR EASY BOTTOM LOADING

Fall-protection structures that can be moved sideways are ideal for loading and unloading trucks or cars from the bottom of the car or container.

SUITABLE IN EXPLOSIVE ENVIRONMENTS

The Enmac fall-protection structures can also be used in the explosive environments referred to in the ATEX legislation (ATEX Directive 2014/34/EU).

MOVEMENT FOR THE ENTIRE LENGTH OF THE TRUCK OR CAR

Fall protection which can be moved sideways enables safe working on top of the truck or car without having to move the vehicle or detach the hoses during loading.

Kuva 1. Pysty- ja pituussuunnassa liikuteltava putoamissuoja säiliöautojen lastaamiseen ja purkamiseen (Enmac Oy 2017).

Työn teoriaosuudessa käsitellään suunnittelu- ja tuotekehitysprosessia, esitellen hyväksi havaittuja metodologioita. Mitä laajempia suunnittelutehtävät ovat, sitä tärkeämpi on järjestelmällinen lähestymistapa hyvien tuloksien saavuttamiseksi. Järjestelmällinen lähestymistapa on tuotesuunnittelijalla ja -kehittäjällä erittäin tärkeä toimintatapa, joka mahdollistaa hyvien ratkaisujen löytämisen. Taitavat suunnittelijat hyödyntävät metodologioita mukauttaen ne käsillä olevaan tehtävään soveltuviksi. Siksi erityisesti luku 2.4 alalukuineen, jossa järjestelmällinen lähestymistapa esitellään, on tämän työn teoriaosuuden kiinnostavimpia. Yrityksien näkökulmasta globaaleilla työmarkkinoilla on erityisen tärkeää panostaa työntekijöiden motivaatioon ja mahdollisuuksiin kehittyä ja siten kasvattaa yritysten henkistä pääomaa sekä yritysten kykyä tuoda markkinoille huipputuotteita. Suunnittelun metodiikkaan sekä suunnittelijan kehitettäviin ominaisuuksiin luodaan

katsaus juuri tästä syystä. Parhaat suunnittelijat tiedostavat kehittymisen tärkeyden ja tähtäävät saavuttamaan täyden potentiaalin osaamisessaan. Tässä osiossa tarkastellaan myös kognitiotieteiden ja positiivisen psykologian avaamia näkymiä suunnittelijan oman osaamisen ja motivaation kehittämiseen.

Luvussa 3 esitellään koneensuunnittelua ohjaavaa lainsäädäntöä, direktiivejä ja standardeja, jotka ovat olennaisia putoamissuojien suunnittelussa. Standardien mukaan suunnitellut tuotteet toteuttavat varmasti lainsäädännön ja ylemmän tason ohjeistuksen vaatimukset ja ovat siten erinomainen apuväline turvallisten ja käyttövarmojen laitteiden suunnittelussa. Putoamissuojien osalta turvallisuus on ensiarvoisen tärkeää, joten standardien käyttö on hyvin keskeistä.

Työn käytännön osuuden suoritus ja tulokset esitellään luvuissa 4, 5 ja 6. Luvussa 4 kuvataan tuotekehityksen dokumentoinnin kehitykset tulokset. Luvussa 5 esitellään pystyjohteiden turvallistaminen ja luvussa 6 vaakalineaarijohteiden parissa tehty suunnittelu- ja kehitystyö. Työn tekemisessä on hyödynnetty monipuolisesti teoriaosuudessa esiteltyjä menetelmiä.

2 Tuotesuunnittelun ja -kehityksen ominaispiirteet

2.1 Tuotesuunnittelun ja tuotekehityksen tavoitteet

Ensimmäisenä luodaan katsaus siihen, miten kirjallisuudessa tarkastellaan suunnittelu- ja tuotekehitystehtävien tavoitteita ja käytettävissä olevia keinoja. Erittäin kattavat tiedot suunnittelu- ja kehitysprojektien alkumetreistä aina tuotteen elinkaaren loppuun tarjoavat Pahl ym. (2007) sekä Ulrich & Eppinger (1995).

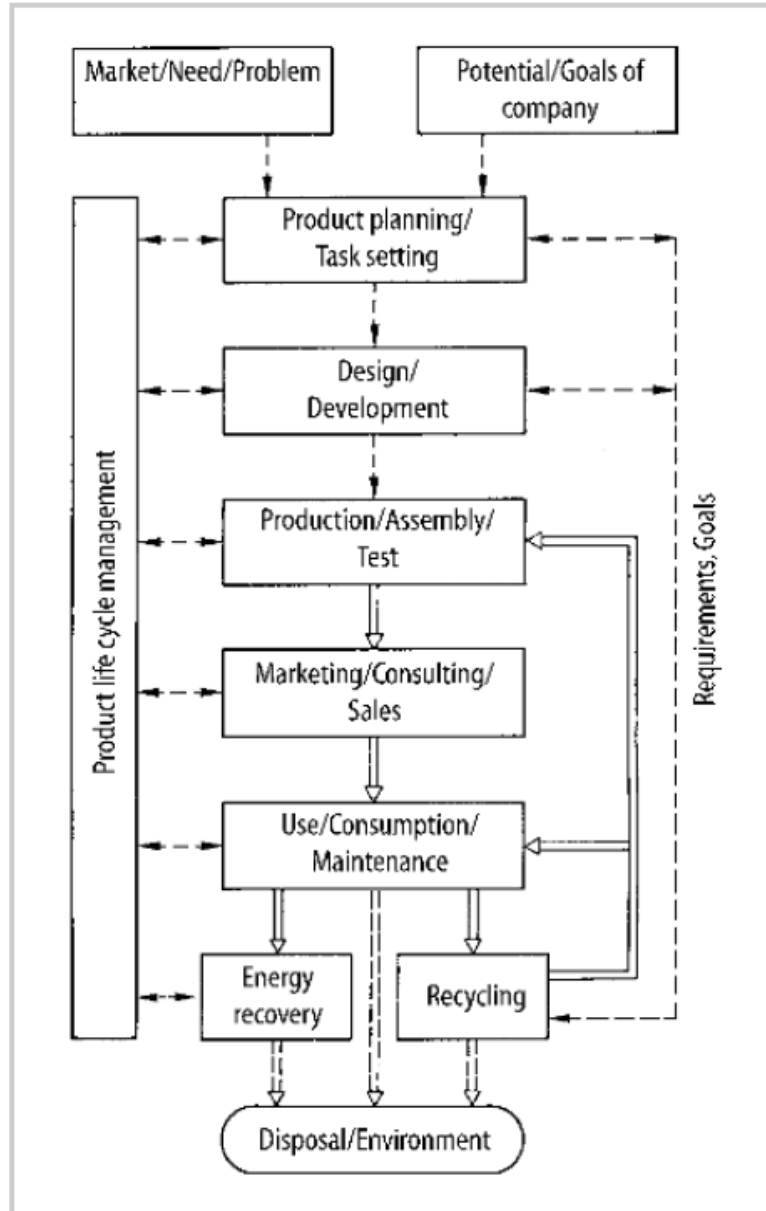
Suunnittelu- ja tuotekehitysinsinöörien tehtävinä on etsiä ratkaisuja teknisiin ongelmiin hyödyntäen tieteellistä sekä insinööriosaamista. Edelleen tehtävänä on optimoida ratkaisuja huomioiden rajoitteet, jotka liittyvät materiaaliin, teknologiaan, taloudellisuuteen, lainsäädäntöön, ympäristöön tai ihmisiin. Insinöörien työ vaikuttaa kaikilla elämänoilla; tiede ja lainsäädäntö ohjaavat työtä, joka rakentuu erikoisosaamiselle ja mahdollistaa ideoiden toteuttamisen fyysisessä todellisuudessa. Insinööriytyö vaatii ammattitaitoa ja vastuullisuutta. (Pahl ym. 2007: 1–3)

Designer-sanalla tarkoitetaan (Pahl ym. 2007: 2) suunnittelu- ja tuotekehitysinsinööriä, joiden tehtävänä on luoda uuden tuotteen konsepti ja toimintaperiaatteet. Kirjoittajat luokittelevat tuotteen fyysisen toteutettavuuden tuotantoinsinööreille. Käytännössä monissa pienemmissä yrityksissä samat henkilöt tekevät sekä uusien tuotteiden konseptisuunnittelua että rakenteellista detaljisuunnittelua ja valmistuskustannusten optimointia. Suomessa tehtävänkuvien nimikkeet vaihtelevat hieman epätarkasti tuotesuunnittelijan ja tuotekehitysinsinöörin välillä organisaatiosta riippuen.

2.2 Tuotesuunnittelun ja tuotekehityksen vaiheet

Kuvassa 2 on esitetty kaavio tuotteen koko elinkaaresta lähtien liikkeelle asiakastarpeesta ja markkinoinnista sekä yrityksen potentiaalista ja tavoitteista (Pahl ym. 2007: 3). Tällaisen kaavion tarkastelu voi suunnittelijana tuntua ensi näkemältä triviaalilta verrattuna mekaanisten rakenteiden, lujuus- ja materiaaliominaisuuksien, käyttöjen sekä detaljisuunnittelun tärkeyteen. Kuitenkin perustuen tämän työn tekijän kokemuksen erilaisista tutkimus- ja tuotekehitystehtävistä, nähdään kokonaisvaltaisen ymmärryksen tuotteen elinkaaresta olevan erittäin tärkeä uuden tuotteen suunnitteluprosessissa. Tästä johtuen tämän insinööriytyön teoriaosuudessa perehdytään tarkasti mm.

tekijöiden Pahl ym. (2007) Engineering Design – A Systematic Approach -kirjan johdattamana tuotesuunnittelun ja tuotekehityksen metodiikkaan ja järjestelmällisyyden vaikutukseen hyvien tuloksien aikaansaamisessa.



Kuva 2. Elinkaari uuden tuotteen luomisesta käyttööän loppuun ja loppusijoitukseen (Pahl ym. 2007:3).

Seuraavassa pohditaan kuvassa 2 esitetyn kaavion vaiheiden sisältöä, perustuen kokemukseen suunnittelu- ja tuotekehitysprojekteissa. Kaavion esittämässä uuden tuotteen suunnittelun kulussa lähdetään liikkeelle toisaalta markkinoiden tarpeesta uudelle tuotteelle ja toisaalta yrityksen potentiaalista ja tavoitteista. Jommankumman puuttues-

sa tuotteen suunnittelu ei kannata. Joko suunnitellaan hieno tuote, jolle ei ole markkinoita tai sitten yrityksen potentiaali ei riitä suunnittelemaan sellaista tuotetta, joka pysyisi vastaamaan markkinoiden tarpeisiin. Tässä on lopulta kyse projektin vetäjien ja yksittäisten suunnittelijoiden osaamisesta tehtävän vaatimilla osa-alueilla sekä riittävien resurssien varaamisesta sekä ajallisesti että taloudellisesti. Kaksi usein kuultua sanontaa on hyvä pitää mielessä. *Ammattilainen tekee sutta nopeasti* on sanonta, joka pitää paikkansa silloin, kun uuden tuotteen suunnittelussa ei ole ehditty miettiä kaikkia tuotteen toimivuuteen vaikuttavia tekijöitä. Kokemuksen mukaan yksi aivoriihi tai muutama päivä kovan aikataulupaineen alla ei riitä kaikkien asioiden huomioimiseen ja suunnitteluvirheiden riski kasvaa olennaisesti. Erityisen tärkeää on viedä tuotteen mentaalinen suunnitteluprosessi loppuun asti silloin, kun prototyyppinen valmistaminen ja testaaminen ei ole mahdollista, ja tuotteen valmistaminen mallien ja laskennan perusteella täytyy onnistua kerralla. Riittävän pitkä aikajänne on tässä vielä tärkeämpää kuin suunnittelutuntien määrä, koska ideoiden kypsyminen ottaa aikaa niin yksittäisen suunnittelijan ajatuksissa kuin projektiryhmän osalta. Aikarajoite tulee toisinaan vastaan, ja näistä projekteista saadun kokemuksen perusteella saatetaan joutua tekemään erittäin kalliita takuukorjauksia

Kaavion ensimmäisessä vaiheessa *Product planning / Task setting* tuotetta aletaan ideoida konseptisuunnittelun keinoin ja määritellään, millaisia tehtäviä sen tulee toteuttaa. Seuraava vaihe on suunnittelu ja kehitys (*Design / Development*), ja jäljempänä kuvataan ko. toimien luonnetta riippuen tuotteen valmistussarjan suuruudesta. Näiden jälkeen seuraa valmistus, kokoonpano ja testaus (*Production / Assembly / Test*), jolloin varmistutaan tuotteen toimivuudesta ennen asiakkaalle myyntiä. Markkinointi ja myynti on seuraava vaihe, jossa sijoitetut panokset saadaan takaisin. Jos suunnittelu on onnistunut hyvin, tehdään voittoa. (Pahl ym. 2007: 3–4).

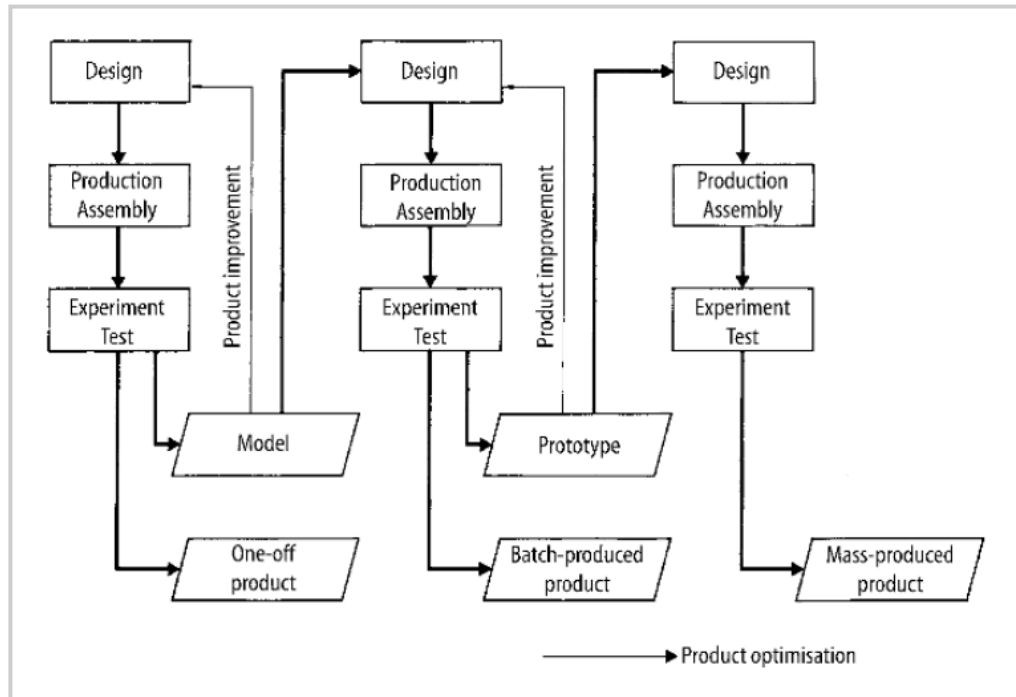
Asiakkaan voi ryöstää vain kerran, on eräs voimalaitospolttimien myyntipäällikkö todennut. Jos tuote on selvästi kalliimpi kuin kilpailijoiden vastaavat tuotteet, voi ensimmäisen kaupan saada aikaiseksi. Asiakkailla teollisuudessa on kuitenkin kokemukseni mukaan tapana selvittää pitkällä tähtäimellä edullisimmat ratkaisut, joilla tarvittavat vaatimukset voidaan toteuttaa. Toisinaan paikallisuus on lisäarvoa ja kilpailuetua merkittävästi kasvattava tekijä.

Jäljempänä tuotteen käyttövaiheessa (*Use / Consumption / Maintenance*) valmistajalla on mahdollisuus saada asiakkaalta tärkeää palautetta tuotteen jatkokehittämistä varten

sekä tuloja määräaikaishuolloista sekä kuluvien varaosien myynnistä. Tämä on hyvä keino saada lisäarvoa tuotteelle. Käyttäessään laadukasta tuotetta asiakas on valmis ostamaan varaosia hyvään hintaan. Hyvässä suunnittelussa on ennakoitu jo viimeinenkin vaihe, eli tuotteen elinkaaren loppu. Ennalta tiedetään mikä on tuotteen käyttöikä ja miten kierrätys tai loppusijoitus hoidetaan. (Pahl ym. 2007: 3–4).

Organisaation rakenteella on myös suuri merkitys työn kulkuun ja projektinhallintaan. Pahl ym. (2007: 3–5) luokittelee yritykset tuotesuuntautuneisiin sekä probleemasuuntautuneisiin. Tuotteisiin suuntautuneet yritykset kehittävät ja valmistavat tuotteen tyyppiin keskittyen (esim. kompressoridivisioona ja lisävarustedivisioona). Probleemasuuntautuneet yritykset puolestaan jakavat vastuun kokonaistavoitteen pilkkomisen mukaisesti vaikkapa mekaaniseen suunnitteluun, ohjaujärjestelmiin, materiaalivalintaan ja lujuusanalyysiin. Jälkimmäisessä toimintatavassa projektin vetäjän tarvitsee olla erityisen huolellinen työn liikkua eri osa-alueiden välillä.

Kuvassa 3 esitetään tuotteen polku yksittäiskappaleiden tuotannosta massatuotantoon. Tehtaessa yksittäiskappaleita ja räätälöityjä tuotteita ei usein ole taloudellista valmistaa erillisiä kehitysprototyyppejä, joita ei voida myydä asiakkaalle. Tällöin vaaditaan erityisen huolellista yksityiskohtien ja käytettävyyden suunnittelua riskien minimoimiseksi. Suunnittelun painopiste onkin usein tuotteen varmatoimisuudessa ja luotettavuudessa taloudellisen optimoinnin sijaan. Suuremmissa erissä tai massatuotantona tehtävien tuotteiden tekniset ja taloudelliset ominaisuudet tulee olla täysin varmistetut ennen tuotannon aloittamista. Tässä käytetään hyväksi mm. prototyyppejä. (Pahl ym. 2007: 4).



Kuva 3. Tuotteen kehitysvaiheet yksittäiskappaleista massatuotantoon (Pahl ym. 2007: 5).

Laajan tehtäväkentän hoitamiseksi suunnittelijoiden tarvitsee omaksua erilaisia lähestymistapoja hyödyntäen kattavaa taito- ja työkaluvalikoimaa ja konsultoida erityisasiantuntijoita tietyissä probleemissa. Pahl ym. (2007: 6) luokittelee tuotesuunnittelun eri vaiheissa toteutettavat toiminnot karkeasti seuraavalla tavalla:

- Konseptisuunnittelu, jossa etsitään periaateratkaisuja.
- Tuotteen toteutussuunnittelu. Tässä vaiheessa valitaan alustava muotoilu ja kaikkien komponenttien materiaalit.
- Detaljisuunnittelu, jossa viimeistellään tuote ja toiminnan yksityiskohdat.
- Laskentavaihe, projektin esittely sekä tiedon kerääminen. Näitä kaikkia tehdään kaikissa suunnitteluprosessin vaiheissa.

Edellä esitetyistä vaiheista käydään läpi kaikki tämän insinööriyön tekemisen aikana. Työn tuloksissa tullaan jäljempänä kuvaamaan kolmen osatavoitteen toteuttamisen askeleet ja käytetty metodiikka suunnittelun eri vaiheissa.

2.3 Tuotesuunnittelun metodologia

Rationaalinen lähestymistapa sisältää laskennan ja laadun kustannukset alusta lähtien. Mitä varhaisemmassa vaiheessa saadaan tehtyä nopeita ja tarkkoja laskelmia, tämän työn yhteydessä lujuus- ja kustannuslaskelmia, sitä nopeammin pystytään tunnistamaan ratkaisumallien heikot kohdat. Tämän toteuttamiseksi vaaditaan systemaattista suunnittelun dokumentointia (Pahl ym. 2017: 10).

Tuotesuunnittelun metodologian täytyy siten toimia seuraavasti (Pahl ym. 2017: 10):

- Probleema-suuntautunut lähestyminen on mahdollista.
- Ylläpitää innovatiivisuutta ja ymmärrystä ts. mahdollistaa optimaalisten ratkaisujen etsimisen.
- On yhteensopiva eri konseptien, metodien ja löydösten osalta suunnittelun eri aloilla.
- Ei nojaa ratkaisujen löytämiseen sattumalta.
- Mahdollistaa tunnettujen ratkaisujen soveltamisen käsillä oleviin tehtäviin.
- On yhteensopiva sähköiseen tiedonkäsittelyyn.
- On helposti opetettavissa ja omaksuttavissa.
- Hyödyntää modernia kognitiivista psykologiaa ja johtamistiedettä ts. vähentää työkuormaa, säästää aikaa, vähentää inhimillisten virheiden mahdollisuutta ja ylläpitää aktiivista kiinnostusta.
- Helpottaa tiimityöskentelyä ja johtamista suunnittelun eri haarojen välillä tuotekehitysprojekteissa.
- Ohjaa tuotekehitystiimien vetäjien toimintaa.

Pahl ym. (2007: 14–20) esittelee kolme metodologiaa suunnitteluun. Systemiteoria ja arvoanalyysi ohitetaan tämän työn kannalta vähemmän olennaisina ja seuraavassa keskitytään erityisesti koneensuunnitteluun soveltuviin suunnittelumetodeihin. VDI guideline 2221 on saksalaisten kokoneiden insinöörien kokoama yleiskäyttöinen suunnittelumetodologia. Suunnitteluohje on muotoiltu siten että se soveltuu laajasti erilaisiin suunnittelutehtäviin, eikä ainoastaan johonkin tiettyyn suunnittelualaan. Erityisesti menetelmässä korostetaan prosessin iteratiivista luonnetta, jolloin eri vaiheisiin palataan useampia kertoja suunnitteluprosessin aikana jalostaen ideaa ja kehittämien tuotetta. Seuraavalla sivulla kuvassa 4 on esitetty prosessi vaiheittain. (VDI/Wallace, 1987).

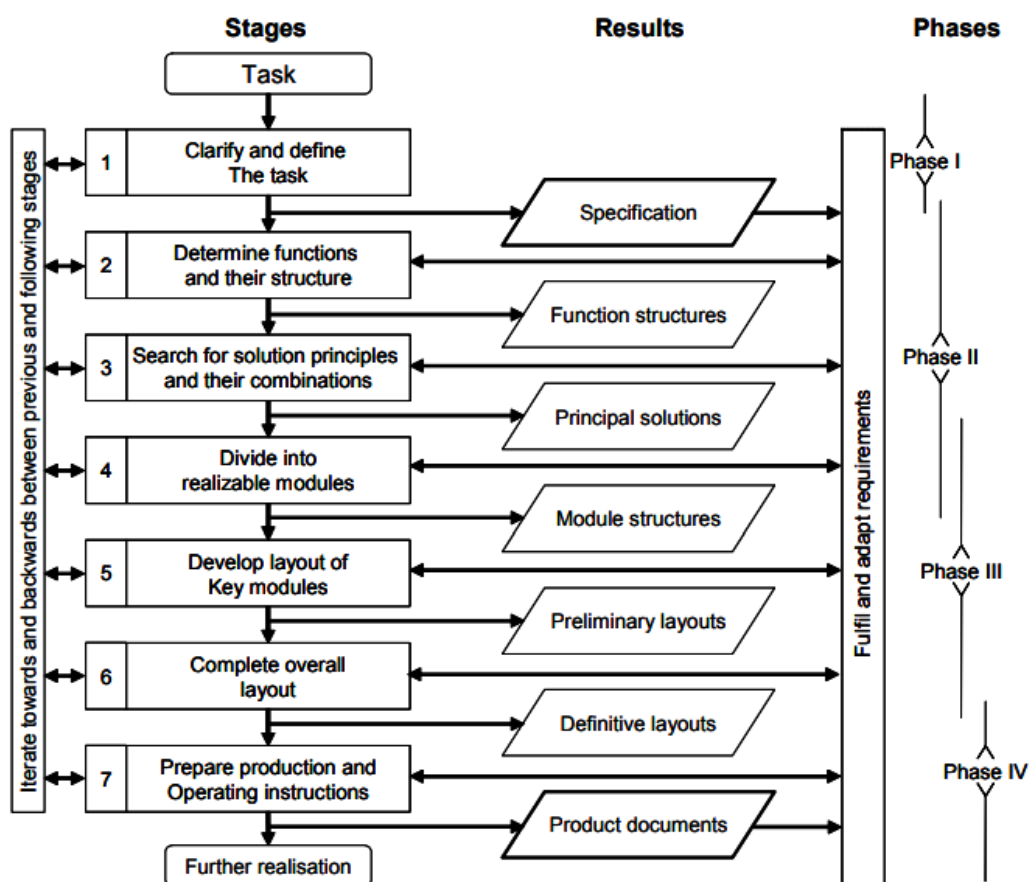


Figure 4. Guideline VDI 2221

Kuva 4. Tuotteen suunnittelun vaiheet (VDI/Wallace, 1987).

Teknisten tehtävien ratkaisun määrittävät yleiset tavoitteet ja rajoitteet. Tekninen toiminta, taloudellinen toteutus ja turvallisuusnäkökulmien huomiointi sekä ihmisten että ympäristön suhteen ovat yleisiä tavoitteita. Suunnittelutehtävän ratkaisun täytyy toteuttaa myös tiettyjä yleisiä tai tehtäväkohtaisia vaatimuksia, jotka voidaan luokitella seuraavasti (Pahl ym. 2007: 43–44):

- Turvallisuus - huomioiden luotettavuus ja saavutettavuus
- Ergonomia - ihminen - kone – kokonaisuus estetiikka huomioiden
- Tuotanto - tuotantotilat ja tuotannon tyyppi
- Laadunvarmistus - koko suunnittelu- ja tuotantoprosessin läpi
- Kokoonpano - osien valmistuksen aikana ja jälkeen
- Kuljetus - valmistuspaikan sisällä ja sieltä ulos
- Käyttö - tarkoituksenmukainen käyttö ja käsittely
- Huolto - ylläpito, tarkastukset ja korjaukset
- Kustannusrakenne - kustannukset ja aikataulut
- Kierrätys - uudelleenkäyttö, käytöstä poisto ja loppuvarastointi

Yllä olevista rajoitteista johdettavat vaatimukset vaikuttavat toimintaan ja konstruktion sekä ovat vuorovaikutteisia keskenään. Näitä tulisi pitää *ohjenuorina* koko suunnittelu- prosessin läpi ja tarkentaa toteutussuunnittelun kaikissa vaiheissa.

2.4 Systemaattinen lähestymistapa

2.4.1 Ongelmanratkaisuprosessi

Systemaattisen lähestymistavan tarkastelussa Pahl ym. (2007: 45) lähtee liikkeelle kognitiivisen psykologian ja yleisen metodiikan perusteista, joiden avulla voidaan muotoilla ehdotetut proseduurit hyödynnettäviksi suunnittelutehtävissä. Ei ole yllätys että suunnittelutoimintaa kehittävät metodit pureutuvat ihmisen ajattelun ominaisuuksiin, kapasiteettiin sekä rajoituksiin.

Ongelmanratkaisun metodiikkaan pureudutaan tässä työssä melko syvällisesti siitä yksinkertaisesta syystä, että juuri ongelmanratkaisukyky on hyvän tuotesuunnittelun kulmakivi. Uuden tuotteen suunnittelu käsittää lukuisia vaiheita, joissa aiempia ratkaisuja ei ole itsestään selvästi sovellettavissa käsillä olevaan probleemaan. Ongelmanratkaisukyvyyn lisäksi suunnittelijan tarvitsee omata laajat faktatiedot tarkasteltavan aihepiirin ympärillä. Erityisesti moderneissa suunnittelutehtävissä korostuu poikkitieteellisyys, vaikkapa sovellettaessa robotiikkaa avustamaan hoitohenkilökuntaa sairaaloissa. Tällöin pelkillä koneensuunnittelun tiedoilla ei päästä hyvään lopputulokseen, jossa ergonomian on oltava suunnittelun lähtökohtana. Ergonomialla on luonnollisesti erittäin tärkeä merkitys Enmac Oy:n putoamissuojaratkaisujen suunnittelussa.

Ongelmanratkaisuprosessi on luonteeltaan pitkäkestoinen, jossa ratkaisu ei ole löydetävissä välittömästi. Pahl ym. (2007: 45-50) esittelemät ongelmanratkaisuprosessia käsittelevät näkökulmat pohjautuvat laajasti psykologi Dietrich Dörnerin tutkimuksiin.

Probleemalla on kolme osaa:

1. ei-toivottu lähtötilanne
2. tavoiteltava lopputilanne, jossa tavoitteet on realisoitu
3. esteet joista johtuen ei-toivottu tilanne ei muutu tavoitetilaksi.

Ratkaisun löytymisen voi estää useat tekijät, kuten keinojen puute tai niiden suuri lukumäärä, jolloin ongelman systemaattinen käsittely ei ole mahdollinen. Tavoitteiden epämääräisyys on myös tyypillinen este ratkaisua etsittäessä. Ongelmaa tyypillisesti

kuvailevat monimutkaisuus sekä epävarmuus, kuten esimerkiksi vaatimusten epätäydellisyys tai muutokset. Tehtävällä tarkoitetaan ongelmanratkaisussa niitä henkisiä vaatimuksia, joiden avuksi on olemassa lukuisia avustavia keinoja. (Pahl ym. 2007: 45–46).

Probleemat ja tehtävät eivät erotu itsestään selvästi suunnitteluprosessin alussa. Suuretkin suunnittelutehtävät voidaan jakaa osatehtäviin, joissa voi ilmetä yllättävän vaikeita aliprobleemia (Pahl ym. 2007: 45–46). Tämän työn puitteissa voidaan mainita esimerkkinä suunnittelutehtävä putoamissuojan vaakalinearijohteen osalta, jossa ympärivuotinen toimintavarmuus on tärkeänä tavoitteena. Alkuun yksinkertaiselta vaikuttava ratkaisu eli sääsuojakatoksen suunnittelu johteelle sisältääkin varsin monimutkaisen aliprobleeman: Mitkä kaikki sääolosuhteet voivat kerryttää arktisessa satamassa jäätä vaaka-asennossa olevan lineaarijohteen päälle estäen suojavaunun herkän liikkeen? Tämä kysymys heräsi, koska sääsuojaa ei ole mahdollista tehdä niin tiiviiksi koteloksi rakenteen ympärille, että jään kertyminen voitaisiin estää varmasti. Lisäksi korjaavan ratkaisun löytäminen voi osoittautua vaikeaksi jälkeinpäin, mikäli probleemaan ei löydetä toimivaa ratkaisua ennen tuotteen valmistusta. Kyseessä on tuotteen käytön kannalta kriittisestä toimintavarmuustekijästä. Kuten edellä todettiin, toimintavarmuus on yksi merkittävistä vaatimuksista, ja vaikuttaa sekä autonlastauksen taloudellisuuteen sekä turvallisuuteen.

Ääriolosuhteiden huomioiminen ei ole suunnittelussa aina mieluinen tehtävä, koska suunnitteluohjeet eivät välttämättä pysty huomioimaan äärimmäisiä olosuhteita erillisten laitteiden osalta. Rakennusten ja rakenteiden tai vaikkapa nostolaitteiden osalta asia on hyvin hoidossa. Lujuuslaskennassa huomioidaan rakenteiden osalta poikkeukselliset tuuli- ja lumikuormat riittävillä varmuuskertoimilla. Nostolaitteilla taas poikkeavat kuormitusyhdistelmät on määritelty monipuolisesti, mahdolliset törmäykset ja dynaamiset kuormitukset huomioiden. Yksittäisten laitteiden toimintavarmuuden osalta sääolot asettavat hankalia vaatimuksia etenkin kun suunnitellaan uutta tuotetta ympäristön olosuhteisiin, jotka eivät ole ennalta hyvin tunnetut.

Erilaisten ongelmien ratkaisua käsitellessä Pahl ym. (2007: 46) toteaa, että ajatusprosessit pohjautuvat muistiin ja tarkemmin sanottuna sinne tallennettuun ratkaistavaa problemaa käsittelevään faktatietoon. Inhimillinen ajatustoiminta hyödyntää proseduuria ja metodeja ongelmien tehokkaassa ratkaisussa. Esimerkkinä ajatustoiminnan heuristisesta ulottuvuudesta ovat vaikkapa intuitio, yritys- ja erehdys -menetelmä sekä

erilaiset nyrkkisäännöt. Muisti voidaan puolestaan erotella lyhyt- ja pitkäkestoiseen muistiin, jossa lyhytkestoisessa (työmuistissa) voi olla enintään seitsemän argumenttia tai faktaa samanaikaisesti.

Omakohmainen ammattitaidon kertyminen suunnittelu- ja tuotekehitystehtävissä näkyy erilaisten faktojen ja syy-yhteyksien tallentumisena pitkäaikaiseen muistiin. Ajatustoiminnan tavoittamien abstraktien ratkaisumallien laajuus ja löytämiskyky kehittyy siten huomattavasti työuran aikana. Olennaista on myös tehokkaiden ongelmanratkaisuproseduurien ja intuition monipuolinen hyödyntäminen.

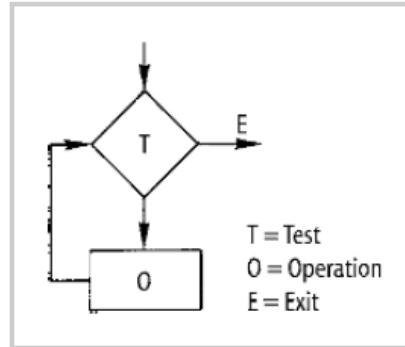
Pahl ym. (2007: 47) kuvaa intuitiivisen ajattelun kytkeytyvän voimakkaasti inspiraatioon. Varsinainen ajatusprosessi tapahtuu paljolti alitajuisesti. Oivallukset nousevat tietoiseen mieleen yhtäkkiä, esimerkiksi mielleyhtymän myötä. Tästä puhutaan primäärinä luovuutena, johon sisältyy monimutkaisten yhteyksien prosessointi. Oivallusten taustalla on usein *hiljaista tietoa*, johon kuuluu yleistä sekä taustojen ymmärrystä.

Tämän työn tekijän kokemus vahvistaa Pahlin väitteen siitä, että yleisesti vaaditaan häiriötöntä ja alitajuisia ”ajattelua” ennen kuin yhtäkkisiä oivalluksia voi syntyä. Hautumisen vaatimaa aikaa ei voi määrittää ennalta. Esimerkiksi paperille piirrettyjen hahmotelmien tai karkean mallinnuksen keinoin voi keskittää huomiota kohteeseen jättäen kuitenkin tilaa alitajuiselle prosessoinnille (Pahl ym. 2007: 47).

Diskursiivinen ajattelu on puolestaan tietoinen prosessi, jota on mahdollista kommunikoida ja johon voi vaikuttaa. Faktoja ja yhteyksiä analysoidaan, vaihdellaan, yhdistellään uusilla tavoilla, tarkistetaan, hylätään ja jatkojalostetaan. Tässä yhteydessä käytetään käsitettä sekundääri luovuus. Tällainen ajattelu vaatii tarkkaa ja tieteellistä tietämystä sekä tietorakenteen kasvattamista aiemman perustan päälle. Ero intuitiiviseen ajatteluun on prosessin hitaudessa ja useiden tietoisten ja pienten askelten ottamisessa. Usein ongelmanratkaisutehtävien parissa toimivat ihmiset näyttävät aloittavan ilman suunnitelmaa toivoen löytävänsä ratkaisun nopeasti ja helposti oman tietotaitonsa avulla. Vasta eo. strategian pettäessä siirrytään suunnitelmalliseen ja systemaattiseen sekvenssiin ajatusprosessissa. (Pahl ym. 2007: 48).

Seuraavassa esitellään TOTE-malli joka on perussekvenssi ongelmanratkaisun ajatteluprosessissa. Kuvassa 5 nähdään vaiheet, jossa ensimmäisenä (*Test*) analysoidaan nykytila. Vasta sen jälkeen muokataan ajatusta (*Operation*) ja testataan uudestaan.

Tätä kiertoa jatketaan, kunnes tulos on tyydyttävä, jolloin poistutaan syklistä. Monimutkaisemmissa ajatusprosesseissa TOTE-sekvenssit ovat linkittyneet ketjuksi, mutta pohjimmiltaan ajatusketjut redusoituvat TOTE-malliin.



Kuva 5. TOTE-mallin käyttö ongelmanratkaisussa (Pahl ym. 2007: 48).

2.4.2 Taitavien ongelmanratkaisijoiden ominaisuudet

Edelleen Pahl ym. (2007: 49) seuraa D. Dörnerin tutkimuksia, joissa on tarkasteltu ongelmanratkaisussa tarvittavia ominaisuuksia. Ensimmäisenä pohditaan älykkyyttä ja luovuutta. Älykkyydellä ymmärretään yleisesti tiettyä nokkeluutta, joka yhdistyy ymmärrykseen ja arviointikykyyn. Analyttisiä lähestymistapoja korostetaan usein. Luovuudella tarkoitetaan inspiraatiota, joka tuottaa uusia ideoita ja yhdistelee olemassa olevia johtaen syvempään ymmärrykseen. Luovuus myös usein yhdistyy intuitiiviseen lähestymistapaan.

Edellä olevat piirteet ovat persoonaan kytkettyjä, joiden mittaaminen ei ole yksinkertaista. Kuitenkin ongelmanratkaisussa voidaan nähdä tarvittava älykkyyden minimitaso, ja tutkimusten perusteella korkea älykkyydosamäärä yhdistyy jossain määrin ongelmanratkaisukykyyn. ÄO-mittaukset eivät itsessään anna luotettavaa käsitystä henkilön ongelmanratkaisukykyä. Myös luovuustestit toteutetaan usein niin matalalla luovuuden tasolla, etteivät ne kuvaa monimutkaisten ongelmien ratkaisukykyä. Tämän lisäksi insinööriydessä luovuus suuntautuu tiettyyn tavoitteeseen, joten pelkkä ideoiden runsas kehittäminen voi jopa hidastaa ongelmanratkaisuprosessia. (Pahl ym. 2007: 49).

Toisena taitavan ongelmanratkaisijan toiminnassa näkyy Pahl ym. mukaan (2007: 50) tapa tehdä päätöksiä. Faktatietojen ja systemaattisen lähestymistavan lisäksi tarvitaan kyky tehdä päätöksiä, missä seuraavat mentaaliset toimintatavat ja taidot ovat olennaisia:

- Monimutkaisissa systeemeissä eri elementit ovat riippuvaisia toisistaan ja onkin olennaista tunnistaa sekä riippuvuudet että niiden vahvuudet. Osaprobleemoja ratkaistaessa tarvitsee nähdä ratkaisujen vaikutukset kokonaisuuteen.
- Tärkeyden ja kiireellisyyden arviointi on olennaista, jotta osataan keskittyä niihin tekijöihin, jotka juuri nyt vievät prosessia eteenpäin kohti asetettuja virstanpylväitä. On tärkeää myös tyytyä epätäydellisiin ratkaisuihin niiden asioiden osalta jotka eivät ole primäärejä tavoitteita. Hyvät ongelmanratkaisijat osaavat arvioiden myös aikataulun, joka on vaativa, muttei mahdoton. Tutkimukset osoittavat että positiivinen (siedettävä) stressitaso edistää myös luovuutta, ja realistisen aikataulun luomat paineet ovat usein katalyytti ratkaisujen löytymiselle.
- Jatkuvuus ja joustavuus ilmenevät tavassa, jolla tavoitteisiin pyritään. Jatkuvuus tarkoittaa pyrkimistä määrätietoisesti kohti tavoitteita, mutta liika määrätietoisuus voi tehdä lähestymistavasta jäykän. Joustavuus tarkoittaa taas kykyä muokata prosessin aikana muuttuviin tavoitteisiin. Taitavilla ongelmanratkaisijoilla on sopiva tasapaino jatkuvuuden ja joustavuuden välillä ja he pitäytyvät asetuissa tavoitteissa hidasteiden ja vaikeuksien kohdatessa. Heidän mieleensä sekä intuitiiviset menetelmät, proseduurit että ohjeet toimivat ensisijaisesti ohjenuorina eivätkä jäykkinä määräyksinä. Intuition sekä muiden heurististen menetelmien (esim. nyrkkisäännöt) käyttöä tulee myös kehittää eikä antaa niiden muuttua automaattisiksi proseduureiksi.
- Epäonnistumisia ei voida välttää monimutkaisten systeemien parissa, koska sisäiset riippuvuudet ovat vahvoja eikä aina ole mahdollista tunnistaa osatekijöiden yhteisvaikutuksia. Epäonnistumisten kohdatessa suhtautuminen niihin on ensiarvoisen tärkeää. Joustavuus on ratkaisevaa kuten myös kyky tehdä päätöksiä korjaavista toimenpiteistä.

2.4.3 Henkilökohtaisten ominaisuuksien kehittämismahdollisuudet

Tämän työn tekijän kokemuksesta opittuna edelliseen lukuun 2.4.1 on hyvä lisätä vielä sisäisen asennoitumisen ja sisäisen puheen merkitys epäonnistumisista ja suunnittelun vaikeuksista oppimiselle. Tähän näkökulmaan kiinnitetään insinööritieteissä valitettavan vähän huomiota, vaikka se on suunnittelijan henkilökohtaisen täyden potentiaalin saavuttamisessa erittäin tärkeä. Viimeiset kognitiotieteen tutkimustulokset osoittavat miten olennaista on kannustava ja myötämielinen asenne itseä kohtaan vaikeuksien kohdatessa (Williams & Kuyken, 2012: 359–360). Tämä lisää resilienssiä eli kykyä ylläpitää joustavuus ja toimia tehokkaasti myös vaikeuksien ja paineen alla (Työterveyslaitos, 2017). Kuvassa 6 on esitetty työterveyslaitoksen näkemys resilienssistä ja sen kehittämisestä työyhteisötasolla. Suomessa vallitsee edelleen laajasti kulttuuri, jossa virheiden tekeminen on häpeällistä. Kulttuurieroista puolestaan kertoo myös hollantilainen sanonta, jonka mukaan mies joka ei ole tehnyt virheitä, ei ole tehnyt mitään muutaakaan.

Tieteellisesti tutkittuja ja vaikutuksiltaan todennettuja menetelmiä ovat stressinhallintamenetelmistä mm. MBSR (*Mindfulness Based Stress Reduction*) ja MBCT (*Mindfulness Based Cognitive Therapy*). Näiden menetelmien teho perustuu olemassa olevien vaikeuksien ja vastoinkäymisten hyväksymiseen, keskittymiskyvyn kehittämiseen säännöllisellä harjoituksella ja näin vapautuvien voimavarojen suuntaamiseen hyödylliseen ja eteenpäin vievään toimintaan. Harjoittelu vastaa fyysisen lihaskunnan harjoittamista ”mielen lihaksille” eli keskittymiskyvylle ja mielenhallinnalle. Edellä esitellyt ohjelmat ovat rakenteellisia kahdeksan viikon mittaisia harjoittelujaksoja, joiden aikana opittuja taitoja kehitetään ja harjoittelua jatketaan omassa toiminnassa. MBSR ja siitä johdetut menetelmät on kehitetty jo 1980-luvulla, mutta kognitiotieteiden ja lääketieteen valtavirtaan ne ovat tulleet vasta 2000-luvulla, jolloin asennoitumisen ja myötämielisen sisäisen puheen merkitys on ymmärretty yhdistää hyvinvointiin, tehokkaaseen sisäiseen toiminnanohjaukseen sekä kykyyn sietää vastoinkäymisiä ja epäonnistumisia (Williams & Kuyken 2012: 359–360). Mindfulness-pohjaisia stressinhallintamenetelmiä käytetään keskittymiskyvyn kehittämiseen Time-lehdessä julkaistun artikkelin mukaan hyvin erilaisissa ympäristöissä, jopa USA:n merijalkaväen koulutuksessa, jossa Mindfulness Based Mind Fit Training –ohjelman on todettu lisäävän stressinsietokykyä taistelutilanteissa (Pickert 2014: 34–38).



Kuva 6. Resilienssin määrittely ja edistäminen työyhteisötasolla (Työterveyslaitos, 2017).

Myös positiivinen psykologia on kehittynyt 2000-luvulla lisäten ymmärrystä onnistumisen taustalla olevista tekijöistä ja kyvystä kehittää ominaisuuksia jotka rakentavat osaamista ja motivaatiota. Pekkarinen ja Niemelä (2011: 21–27) käsittelevät positiivisen psykologian yhteyttä ja hyödynnettävyyttä yrittäjyydessä. Julkaisussa esitetään positiivisen psykologian potentiaaliksi sellaisten keinojen tunnistaminen ja kouluttaminen yritysten henkilöstölle, jotka edistävät fyysistä terveyttä, subjektiivista hyvinvointia sekä toimivia ryhmiä ja instituutioita. Lisäksi Pekkarinen ja Niemelä tuovat esille tutkimustuloksia, joissa onnellisuuden on havaittu tuovan mukanaan korkeampia tuloja, korkeampaa työn laatua, vahvaa sosiaalista tukea ja vähäisempää stressiä. Tutkimuksissa käy ilmi myös, että onnellisuuden vaikutukset hyödyttävät yksilön lisäksi perhettä, yhteiskuntaa ja yhteisöjä. Tämä itsestään selvältä kuulostava seikka ei ole sitä työyhteisöissä organisaatioissa, joissa yritetään jatkuvasti saada lisää tuottavuutta vähemmällä panoksilla. Osansa tällaisesta jatkuvasta paineesta saavat sekä esimiehet että työntekijät. Tämä voi johtaa tilanteeseen, jossa niin sanotusti soudetaan niin kovaa eteenpäin, ettei huomata käynnistää perämootoria.

Pahl ym. (2007: 51) vetää yhteen hyvien ongelmanratkaisijoiden ominaisuudet:

- Omaavat vahvan ja rakenteellisen teknisen tietopohjan ja sen mukaiset mallit mielessään.
- Löytävät sopivan tasapainon konkretian ja abstraktien käsittelytapojen välillä tilanteesta riippuen.
- Voivat käsitellä epävarmuutta ja epämääräistä tietoa.
- Jatkuvasti keskittyvät tavoitteiden saavuttamiseen käyttäen samalla joustavaa päätöksentekoa.

Myös Pahl ym. (2007: 51) korostaa henkilökohtaisia ominaisuuksia, mutta samalla mahdollisuuksia kehittää henkistä pääomaa harjoittelemalla erilaisten probleemien parissa. Hyvien tuotesuunnittelijoiden toiminnassa ilmenevät seuraavat käyttäytymismallit:

1. Tavoitteet analysoidaan tehtävän alussa tarkasti ja tätä jatketaan läpi suunnitteluprosessin osatavoitteiden muotoilussa.
2. Ennen konkreettisten ratkaisujen suunnittelua konseptivaiheessa kehitetään ja tunnistetaan sopivimmat ratkaisuperiaatteet.
3. Alussa hyödynnetään laajaa etsintää ilman liian monia muuttujia ja varsin nopeasti konvergoidaan tulokset pieneen määrään ratkaisumalleja. Sopivan konkretian tason löytäminen ja joustava liikkuminen eri tasoissa abstraktien käsitteiden ja konkretian välillä on olennaista.
4. Ratkaisumalleja arvioidaan säännöllisesti soveltaen kattavaa kriteeristöä välttämällä korostamasta henkilökohtaisia mieltymyksiä.
5. Lähestymistapaa reflektoidaan jatkuvasti sovittaen sitä käsillä olevaan tilanteeseen.

2.4.4 Ongelmanratkaisu tiedonkäsittelyprosessina

Myöhemmin tässä työssä käsiteltävät lähestymistavat suunnitteluun pyrkivät rakentamaan edellä esiteltyjä toimintamalleja. Ongelmanratkaisu on myös tiedonkäsittelyprosessi. Tästä näkökulmasta tarkastellen ja omaan kokemukseen pohjautuen on olennaista muistaa, mikä on ihmismielen rajoitus tietovirran suhteen. Tutkimukset osoittavat sisään tulevan tiedon ja sen varastoimisen pitkäkestoiseen muistiin olevan pullonkaula aivojen tiedonkäsittelyprosessissa (Työterveyslaitos, 2017). Tässä vaiheessa korostuu riittävä hyvälaatuisen unen määrä, jolloin tietorakenteet järjestyvät aivoissa. Pullonkaulan seurauksena on, että uuden työympäristön tai aihealueen sisäistäminen ottaa oman aikansa, jota ei voi kiirehtiä liikaa ylikuormittamatta aivoja.

Pahl ym. (2007: 54) edellä viittasi sopivan stressitason olevan merkittävä tekijä täyden henkilökohtaisen potentiaalin saavuttamisessa, mutta myös vastakkainen ilmiö on mahdollinen. Pahlin ym. mukaan liian vähäiset haasteet johtavat ajavan voiman puuttumiseen ja seurauksena on ennen pitkää jämähtäminen ja alisuoriutuminen. Tässä kohtaa sekä ulkoiset (johtaminen, organisaatorakenne, toimintakenttä) että ihmisen sisäiset tekijät (oma toiminnanohjaus, omat tavoitteet ja kyky haastaa itseä) ovat vaikuttavia asioita. Usein olennaista tavoitteiden saavuttamisessa on keskittyä asioihin, joihin voi vaikuttaa. Seuraavassa pohditaan omaan kokemukseen perustuen yksilön mahdollisuuksia kehittää omaa toimintaansa ja hyödyntää koko potentiaaliaan, koska nämä ovat ensiarvoisen tärkeitä taitavaksi suunnittelijaksi kehittämisessä.

Aikataulun laatiminen on suunnittelijalla usein henkilökohtainen työ, vaikka laajemmat kehykset tulevatkin ulkopuolelta. Joka tapauksessa suunnittelijan on laadittava henkilökohtainen aikataulu osatehtävien ratkaisemiseen. Kommunikaatio projektin johdon kanssa aikataulun pitävyyden osalta on tärkeää. Aikataulun seuranta on motivoiva tekijä, joka lisää positiivista stressiä samalla vähentäen ylikuormittumista asioista, joihin ei voi vaikuttaa. Aikataulun laatiminen on luontevaa, jos kokonaistehtävässä on riittävästi haastetta.

Toisaalta vähemmän haastavaan työtehtäväänkin voi saada positiivista toimintaa tehostavaa stressiä laatimalla haastavan aikataulun osatehtävien suorittamiseen. Samalla tulee mahdollisuus kehittää omaa työtötään ja kartuttaa taitoja suunnittelijana sekä etsiä uusia ratkaisuja toteuttaa tehtävät uudella tavalla, joka on aiempaa tehokkaampi ja mielekkäämpi. Sen lisäksi, että itsensä haastaminen on toimintamallina omaa hen-

kistä pääomaa lisäävä ja samalla yrityksen pääomaa kasvattavaa toimintaa, se on myös omaehtoista toimintaa. Yleisesti tiedetään, että yksilön vaikutusmahdollisuudet työssä ovat eräs työviihtyvyyteen olennaisesti liittyvä tekijä, ja tällainen toiminta lisää juuri työviihtyvyyttä.

Muita tapoja kehittää taitojaan suunnittelijana ja kasvattaa omaa potentiaalia on tunnistaa mahdollisuus oppia jatkuvasti uusia asioita ja työtapoja. Organisaation sisällä tämä mahdollistaa hiljaisen tiedon siirtymisen kokeneemmilta tekijöiltä tuoreemmille tekijöille ja tällaista toimintaa yritysten johdon ja esimiesten tulisi edistää toimillaan. Jokaisen suunnittelijan täyden potentiaalın hyödyntäminen ja kasvattaminen lisää kilpailukykyä ja tuloksellisuutta sekä lisää sitoutuneisuutta työhön. Suunnittelijan oma-aloitteisuus on tässäkin asiassa keskiössä, koska yrityksen sisäinen kouluttautuminen ja hiljaisen tiedon siirto ei ole kallista suhteessa ulkoisiin koulutuksiin. Toisinaan kouluttautuminen organisaation ulkopuolella on tarpeen juurikin uusien ideoiden ja toimintamallien tuomiseksi ja organisaation todellisen kasvun mahdollistamiseksi.

2.4.5 Dokumentoinnin merkitys suunnittelu- ja tuotekehitysprosesseissa

Suunnittelu- ja tuotekehitysprosessien järjestelmällinen dokumentointi mahdollistaa:

1. Olennaisen tiedon tallentamisen muualle kuin yksittäisten henkilöiden muistin varaan.
2. Hyväksi todettujen ratkaisumallien tehokkaan ja monipuolisen hyödyntämisen suunnittelu- ja tuotekehitysprosesseissa.

Harmillisen usein suunnittelutoimistoissa projekteista ei pidetä suunnittelulokia, joiden avulla voidaan esimerkiksi siirtää tietoa projektin henkilöiden vaihtuessa. Toiseksi suunnitteluloki tai muistio on olennainen toteutettaessa myöhemmin samankaltaista suunnitteluprojektia, jolloin edellisen vastaavan projektin suunnittelussa opitut asiat ovat hyödynnettävissä eikä samoja virheitä tarvitse toistaa uudestaan. Esimerkki kommunikaation puutteesta yrityksen sisällä ja puutteellisesta tuotekehityksen dokumentoinnista on erään liikkuvan porrassetypin, joka hylättiin, kulku vahingossa osaksi toimitusprojektia vuotta myöhemmin. Yrityksen toisessa yksikössä oli todettu portaiden mallin olevan liian kallis ja epävarma, ja tarjouskyselyn jälkeen malli oli hylätty. Kuitenkin 3D-malli oli tallennettu yhteisiin kehityskansioihin siten, että yrityksen toisessa toi-

mistossa oli löydetty ko. 3D-malli ja käytetty sitä suunnitteluprojektissa. Yksiselitteinen tieto mallin heikkouksista ei kulkenut eri toimistojen välillä, kuten olisi pitänyt.

Tässä työssä on laadittu dokumentointimalli tuotekehityksen eri tuotteiden kehitysvaiheiden ja kerättyjen kokemusten ja tiedon tallentamiseksi yksinkertaiseen muotoon. Tulokset on esitetty luvussa 4.

2.4.6 Yleinen työskentelyn metodologia

Kuten edellä on esitetty, yleisen metodologian tulisi olla sovellettavissa eri aloille laajasti. Pahl ym. (2007: 53) vetää yhteen ehdot, jotka jokaisen systemaattista lähestymistapaa käyttävän tulee täyttää:

- *Määrittele tavoitteet* muotoilemalla kokonaistavoite, erilliset alitavoitteet ja niiden tärkeysjärjestys. Näin ylläpidetään motivaatiota suorittaa tehtävä ja tuetaan näkemysten löytymistä ongelmaan.
- *Selvennä reunaehdot* määrittelemällä alku- ja reunarajoitteet.
- *Hälvennä ennakkoluulo* varmistaaksesi mahdollisimman laaja-alainen ratkaisujen etsintä ja välttääksesi loogiset virheet
- *Etsi varioituja ratkaisuja* ja niiden yhdistelmiä, joista parhaat voidaan valita.
- *Arvioi etenemistä* perustuen tavoitteisiin ja ehtoihin.
- *Tee päätöksiä.* Objektiiivinen arviointi mahdollistaa tämän. Ilman päätöksiä ja niiden seurausten havainnointia ei voi tapahtua edistystä.

Jotta edellä esitetyt yleiset keinot saadaan toimimaan, on ajattelussa ja toiminnassa huomioitava ensinnäkin merkityksellinen ajattelu ja toiseksi yksilölliset työskentelytavat. Ajattelussa intuitiolla on suuri merkitys, mutta se ei useinkaan yksin riitä optimaalisten ratkaisujen löytämiseen. Se on suuresti riippuvainen yksilön lahjoista ja taidoista, ja intuition varassa toimiessa ratkaisujen etsiminen voi ohjautua henkilökohtaisen erityisosaamisen johtamana ennalta määrätulle reitille. Tästä syystä ajattelun tulisi olla vai-

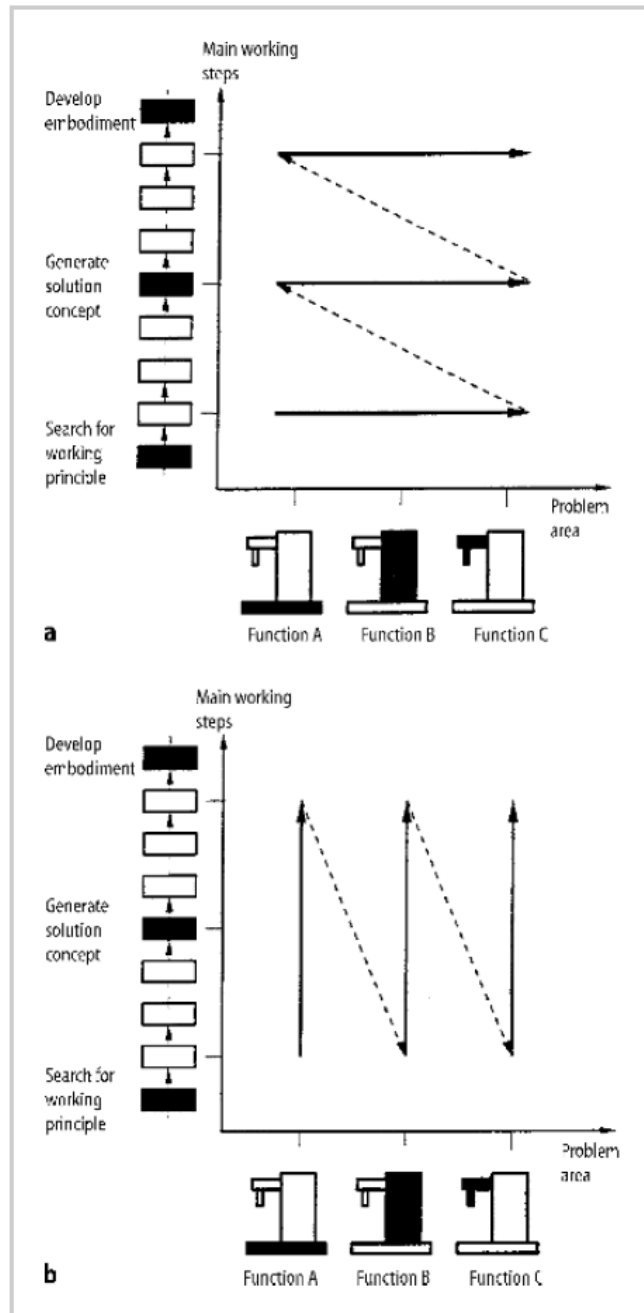
heittaista ja diskursiivista sekä sisältää viestintää ja mahdollisuus muutokseen. On kuitenkin korostettava, että intuitiivinen ja diskursiivinen ote ajatteluun eivät ole vastakkaisia, vaan toisiaan täydentäviä. (Pahl ym. 2007: 54).

Lisäksi tuloksellisen ajatustoiminnan osalta on muistettava, että luovuutta estäviä tekijöitä ovat mm. liiallinen pinnistely ratkaisun löytämiseksi. Intuitiivisen ajattelun edistämiseksi onkin annettava aikaa myös hautumiselle. Systemaattinen lähestymistapa samalla ruokkii intuitiivista toimintaa ja antaa mahdollisuuden uusille oivalluksille. Lisäksi realistinen aikataulus lisää motivaatiota ja luovuutta. (Pahl ym. 2007: 54).

Yksilöllisestä työskentelytavasta Pahl ym. (2007: 54) ottaa esille monia näkökulmia ja esimerkkejä pitäen asiaa hyvin tärkeänä. Tuotesuunnittelijoiden tulee saada jonkin verran vapautta valitessaan työskentelytapansa ja löytäessään itselleen optimoidun työskentelyn tyylin. Suunnittelijoiden tulisi olla vapaat valitsemaan omat suosimansa menetelmät, työn etenemisen järjestys ja käyttämänsä lähteet joita he haluavat konsultoida. Sikäli oman tontin hallinta ja ohjaus sekä vastuu tulee antaa tuotesuunnittelijoille, luonnollisesti pitäen työkalut ja järjestelmät yhteensopivina organisaation kanssa.

Kokemattomien ja kokeneiden tuotesuunnittelijoiden erona on se, että kokemattomat pyrkivät hyödyntämään prosessorientoitunutta ja kokeneet ongelmaorientoitunutta lähestymistapaa. Kuvassa 7 on havainnollistettu prosessorientoitunut (a) ja ongelmaorientoitunut (b) lähestymistapa. Kokemus auttaa valitsemaan laajasta valikoimasta mahdolliset ratkaisut aliongelmiin ja siten pääsemään konkreettiseen lopputulokseen nopeasti. Tämä lähestymistapa toimii, jos aliongelmat eivät ole uudella tavalla riippuvaisia toisistaan. Jos taas ovat, ongelmaksi muodostuu myöhäinen riippuvuuksien tunnistus eri toiminnallisten alueiden välillä. Lisäksi on mahdollista toistaa epätaloudellisia ratkaisuja, jotka ovat aiempien mallien kanssa samankaltaisia. (Pahl ym. 2007: 55).

Prossessorientoitunut lähestymistapa mahdollistaa edellisten ongelmien välttämisen kuitenkin ottaen enemmän aikaa kuin ongelmaorientoitunut lähestymistapa, systemaattisen ja laajan lähestymistavan seurauksena. Käytännössä kumpaakaan menetelmää ei esiinny puhtaana, vaan erilaisina yhdistelminä riippuen ratkaistavan ongelman luonteesta. Prossessorientoitunutta lähestymistää suositellaan, kun aliprobleemat ovat voimakkaasti riippuvaisia toisistaan ja liikutaan uudella maaperällä. Probleemaorientoitunut lähestymistapa toimii hyvin, kun tunnetaan ennalta ratkaisuja aliongelmiin ja eri aliongelmiin riippuvuus toisistaan on vähäistä. (Pahl ym. 2007: 55).



Kuva 7. Kuvassa nähdään esimerkki teenkeittimen eri funktionaalisten osa-alueiden kehittämisestä. Yllä vaihtoehdossa a on esitetty systemaattinen, vaiheittainen ja prosessorientoitunut lähestymistapa, jossa alusta pitäen viedään kaikkia toiminnallisia alueita samojen vaiheiden läpi. Alempana kuvassa b esitetään probleemaorientoitunut lähestymistapa, jossa funktionaalisten alueiden konkreettiset ratkaisut etsitään yksi kerrallaan riippumattomina toisistaan. (Pahl ym. 2007: 56).

2.5 Tuotteiden suunnittelu ja ratkaisujen löytäminen

Pahl ym. (2007) esittelevät kirjassaan metodeja tarjoten kattavan työkaluvalikoiman ratkaisujen etsimiseen ja valintaan. Tässä työssä valikoima esitellään lyhyesti, ja kiinnostunut lukija voi halutessaan perehtyä metodiikkaan tarkemmin. Muutama menetelmä esitellään yksityiskohtaisemmin.

Tuotteen suunnittelun vaiheet on esitetty seuraavasti (Pahl ym. 2007: 66–77):

1. Tehtävä ja yleinen lähestyminen
2. Tilanteen analyysi
3. Kartoitusstrategioiden muotoilu
4. Tuoteideoiden löytäminen
5. Tuoteideoiden valinta
6. Tuotteiden määrittäminen
7. Tuotteen suunnittelu käytännössä

2.5.1 Ratkaisujen löytämisen menetelmät

Systemaattisen lähestymistavan suurin etu on siinä, ettei suunnittelijoiden tarvitse odottaa hyvän ratkaisun syntyvän oikealla hetkellä. Sen sijaan ratkaisut voidaan etsiä käyttäen sopivia metodeja, jotka esitellään seuraavassa. Jaottelu on tehty perinteisiin, intuitiivisiin sekä diskursiivisiin menetelmiin. Menetelmät listataan seuraavassa, ja niistä kiinnostunut lukija löytää tarkemmat kuvaukset kirjasta Engineering Design (Pahl ym. 2007: 77–104).

Perinteiset menetelmät

1. Tiedonkeruu
2. Luonnossa esiintyvien ilmiöiden analysointi
3. Olemassa olevien teknisten järjestelmien analysointi
4. Analogiat
5. Mittaukset ja malleilla tehtävät testit

Intuiiiviset menetelmät

1. Brainstorming
2. Method 635
3. Gallery Method
4. Delphi Method
5. Syntetics

Diskursiiviset menetelmät

1. Fysikaalisten prosessien systemaattinen tarkastelu
2. Systemaattinen haku luokittelujen avulla
3. Suunnitteluohjeistuksen hyödyntäminen

Kuvassa 8 on esitetty esimerkkinä *VDI*:n laatimia suunnitteluohjeita, joiden valikoima on kattava. Myös yritysten omat suunnitteluohjeet ovat erittäin tarpeellisia suunnittelijoiden apuvälineinä.

Table 3.2. Available design catalogues

Application	Object	Author and reference
General	Construction of catalogues	Roth [3.62]
	List of available catalogues and solutions	Roth [3.62]
Principle solutions	Physical effects	Roth [3.62]
	Solutions to functions	Koller [3.39]
Connections	Types of connections	Roth [3.62]
	Connections	Ewald [3.14]
	Fixed connections	Roth [3.62]
	Welded joints for steel profiles	Wölse and Kastner [3.75]
	Riveted joints	Roth [3.62], Kopowski [3.41], Grandt [3.26]
	Adhesive joints	Fuhrmann and Hinterwalder [3.18]
	Clamping elements	Ersoy [3.13]
	Principles of threaded joints	Kopowski [3.41]
	Threaded fasteners	Kopowski [3.41]
	Elimination of backlash in threaded joints	Ewald [3.14]
	Elastic joints	Gießner [3.24]
	Shaft-hub connections	Roth [3.62], Diekhöner and Lohkamp [3.9], Kollmann [3.40]
	Guides and bearings	Linear guides	Roth [3.62]
Rotational guides		Roth [3.62]
Plain and roller bearings		Diekhöner [3.8]
Power generation, power transmission	Bearings and guides	Ewald [3.14]
	Electric motors (small)	Jung and Schneider [3.32]
	Drives (general)	Schneider [3.65]
	Power generators (mechanical)	Ewald [3.14]
	Effects to generate power	Roth [3.62]
	Single-stage power multiplication	Roth [3.62], VDI 2222 [3.70]
	Lifting mechanisms	Raab and Schneider [3.57]
	Screw drives	Kopowski [3.41]
	Friction systems	Roth [3.62]
	Kinematics, mechanisms	Solving motion problems using mechanisms	VDI 2727, part 2 [3.72]
Chain drives and mechanisms		Roth [3.62]
4-bar mechanisms		VDI 2222, part 2 [3.70]
Logical inverse mechanisms		Roth [3.62]
Logical conjunctive and disjunctive mechanisms		Roth [3.62]
Mechanical flip-flops		Roth [3.62]
Mechanical non-return safety devices		Roth [3.62], VDI 2222, part 2 [3.70]
Lifting mechanisms		Raab and Schneider [3.57]
Uniform-motion transmissions		Roth [3.62]
Handling devices		VDI 2740 [3.73]
Gearboxes	Spur gears	VDI 2222, part 2 [3.70], Ewald [3.14]
	Mechanical single-stage gearboxes with constant gear ratio	Diekhöner and Lohkamp [3.9]
	Elimination of backlash in spur gears	Ewald [3.14]
Safety technology	Danger situations	Neudorfer [3.52]
	Protective barriers	Neudorfer [3.53]
Ergonomics	Indicators, controls	Neudorfer [3.51]
Production processes	Casting	Ersoy [3.13]
	Drop forging	Roth [3.62]
	Press forging	Roth [3.62]

Kuva 8. Esimerkki saatavilla olevista suunnitteluohjeistuksista (Pahl ym. 2007: 100).

2.5.2 Ratkaisujen valinnan ja arvioimisen menetelmät

Ensimmäinen ja hyvin käyttökelpoinen työkalu suunnitteluprosessin alkuvaiheessa löydettyjen ratkaisuehdotusten arviointiin ja valintaan on seuraavassa esiteltävä Pahl ym. (2007: 108) valintamatriisi. Ensimmäisenä valintamatriisia laadittaessa valitaan ratkaisun variantit. Systemaattisessa tarkastelussa ratkaisuvaihtokorin tulisi olla alussa laaja. Jotta vältyttäisiin tarpeettomalta työltä, tulee vaihtoehtoja rajata nopeasti suunnittelun edetessä. Valintamatriisin avulla alustaville ratkaisuvaihtoehtoilta testataan asetettujen vaatimusten mukaisuus. Kuvassa 10 nähdään esimerkki valintamatriisista, jossa kahdeksasta ratkaisuvaihtoehdosta testaamisen jälkeen jää jäljelle enää neljä, joiden tiedetään täyttävän asetetut kriteerit. Mahdollisten ratkaisujen arviointia jatketaan tästä eteenpäin systemaattisesti ja tavoitteena saada realistisesti pisteytetyt arviot eri vaihtoehtoilta. Kokonaisuutena Pahl ym. (2007: 110–124) esittävät seuraavat vaiheet ratkaisujen arvioinnille:

- a. peruseriaatteen
- b. kriteerien tunnistaminen
- c. kriteerien painottaminen
- d. parametrien kokoaminen
- e. pisteytyksen arviointi
- f. kokonaisarvon määrittäminen
- g. arviointiepävarmuuksien määrittäminen
- h. heikkojen kohtien etsiminen

Edellä olevat vaiheet on hyvä käydä läpi, tarpeen mukaan vaiheita yksinkertaistaen. Heikkojen kohtien etsiminen lopuksi on erittäin tärkeää, koska prosessin aikana voidaan havaita hyvinkin olennaisia tekijöitä, joita ei ole tullut huomioineeksi aiemmin.

Valintamatriisista jatkotarkasteluun valittujen ratkaisuehdotusten arviointia voidaan jatkaa Pahl ym. (2007: 115–120) mukaisella pisteytysmenetelmällä. Kuvassa 9 on esitetty pisteytyskaalat, joiden mukaan valitut kriteerit kullekin ratkaisuvaihtoehdolle pisteytetään. Lisäksi ennen kuvan 11 mukaisen kokonaispisteytystaulukon tekoa on valittava painokertoimet kullekin kriteerille sen mukaan, mitkä ovat olennaisimpia kriteereitä tuotteen toimivuuden näkökulmasta. Lopuksi on tarpeen tehdä vertailu kustannusrakenteen ja toimivuuden välillä. (Pahl ym. 2007: 110–124).

Value scale			
Use-value analysis		Guideline VDI 2225	
Pts.	Meaning	Pts.	Meaning
0	absolutely useless solution	0	unsatisfactory
1	very inadequate solution		
2	weak solution	1	just tolerable
3	tolerable solution		
4	adequate solution	2	adequate
5	satisfactory solution		
6	good solution with few drawbacks	3	good
7	good solution		
8	very good solution	4	very good (ideal)
9	solution exceeding the requirement		
10	ideal solution		

Figure 3.31. Points awarded in use-value analysis and guideline VDI 2225

Kuva 9. Pisteytys ratkaisuvaihtoehtojen arvioitaville kriteereille eri menetelmillä (Pahl ym. 2007: 108).

TH Darmstadt		SELECTION CHART for <i>Fuel gauge</i>						Page: <i>1</i>	
Enter solution variant (Sv):	Solution variants (Sv) evaluated by SELECTION CRITERIA [+] Yes [-] No [?] Lack of information [!] Check requirements list						DECISION Mark solution variants (Sv): (+) Pursue solution (-) Eliminate solution (?) Collect information (re-evaluate solution) (!) Check requirements list for changes		
	Compatibility assured						DECISION		
	Fulfils demands of requirements list								
	Realisable in principle								
	Within permissible costs								
	Incorporates direct safety measures								
	Preferred by designer's company								
	Adequate information								
	Remarks (Indications, Reasons)								
	Sv	A	B	C	D	E			F	G
1	1	+	-	+	?				
2	2	1	-					Storing the mass	-
3	3	-						Radioactivity	-
4	4	+	-	+	+	(+)		(Further development of existing solutions)	+
5	5	1	-	+	+				+
6	6	-						Fluid not conducting	-
7	7	+	-	1	+				!
8	8	+	-	+	+			see Sv 7	+
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
Date: <i>3.85</i>		Initials: <i>LR</i>							

Figure 3.27. Systematic selection chart: 1, 2, 3, etc. are solution variants of the proposals made in Table 3.3. The column reserved for remarks lists reasons for lack of information or diminution

Kuva 10. Valintamatriisi ratkaisuvaihtoehtojen rajaamiseksi tarkempaa arviointia varten (Pahl ym. 2007: 99).

No.	Evaluation criteria		Parameters	Variant V_1 (e.g. Eng. 1)		Variant V_2 (e.g. Eng. 2)		Variant V_j				
	Wgt.	Unit		Magn. m_{1i}	Value v_{1i}	Weighted value WV_{1i}	Magn. m_{2i}	Value v_{2i}	Weighted value WV_{2i}	Magn. m_{ij}	Value v_{ij}	Weighted value WV_{ij}
1	0.3	g/kWh	Fuel consumption	240	8	2.4	300	5	1.5	...	...	WV_{1j}
2	0.15	kg/kW	Mass per unit power	1.7	9	1.35	2.7	4	0.6	...	...	WV_{2j}
3	0.1	-	Simplicity of components	complicated	2	0.2	average	5	0.5	...	...	WV_{3j}
...
i	0.2	km	Service life	80 000	1	0.8	150 000	7	1.4	...	...	WV_{4j}
...
j	W_j	...	...	m_{j1}	v_{j1}	WV_{j1}	m_{j2}	v_{j2}	WV_{j2}	...	...	WV_{ij}
...
n	W_n	...	...	m_{n1}	v_{n1}	WV_{n1}	m_{n2}	v_{n2}	WV_{n2}	...	...	WV_{nj}
	$\sum_{i=1}^n W_i = 1$	...	...	OV_1 R_1	OV_2 R_2	OV_1 WV_1	OV_2 R_2	OV_j R_j	OV_j WV_j	...	...	OV_j WR_j

Figure 3.34. Completed evaluation chart with values (see Figure 3.30)

Kuva 11. Täydennetty pisteytysmatriisi ratkaisuehdotuksille (Pahl ym. 2007: 110).

2.6 Tuotekehitysprosessi

Ulrich ja Eppinger (1995: 9) ovat koonneet tuotekehitysprosessin kulun alla kuvan 12 kaavioksi samalla esittäen kirjan rakenteen. Prosessin kulku on käytännössä sama kuin seuraavalla sivulla kuvassa 13 esitetyssä kaaviossa (Pahl ym. 2007: 130). Tässä luvussa kuvataan lyhyesti työn kulku tuotekehitys- ja suunnitteluprosessissa ja päävaiheittain (detaljisuunnittelun käsittely jätetään pois työn laajuuden rajaamiseksi):

1. Tehtävän selventäminen
2. Konseptisuunnittelu
3. Toteutussuunnittelu
4. Detaljisuunnittelu

Introduction 9

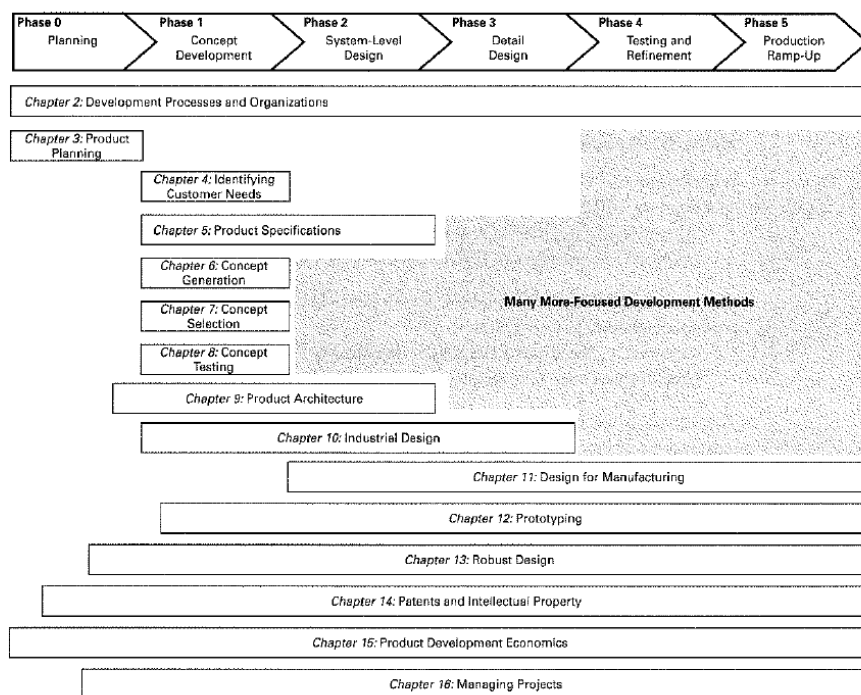


EXHIBIT 1-4 The product development process. The diagram shows where each of the integrative methods presented in the remaining chapters is most applicable.

Kuva 12. Tuotekehitysprosessin kulku Ulrichin ja Eppingerin (1995: 9) mukaan.

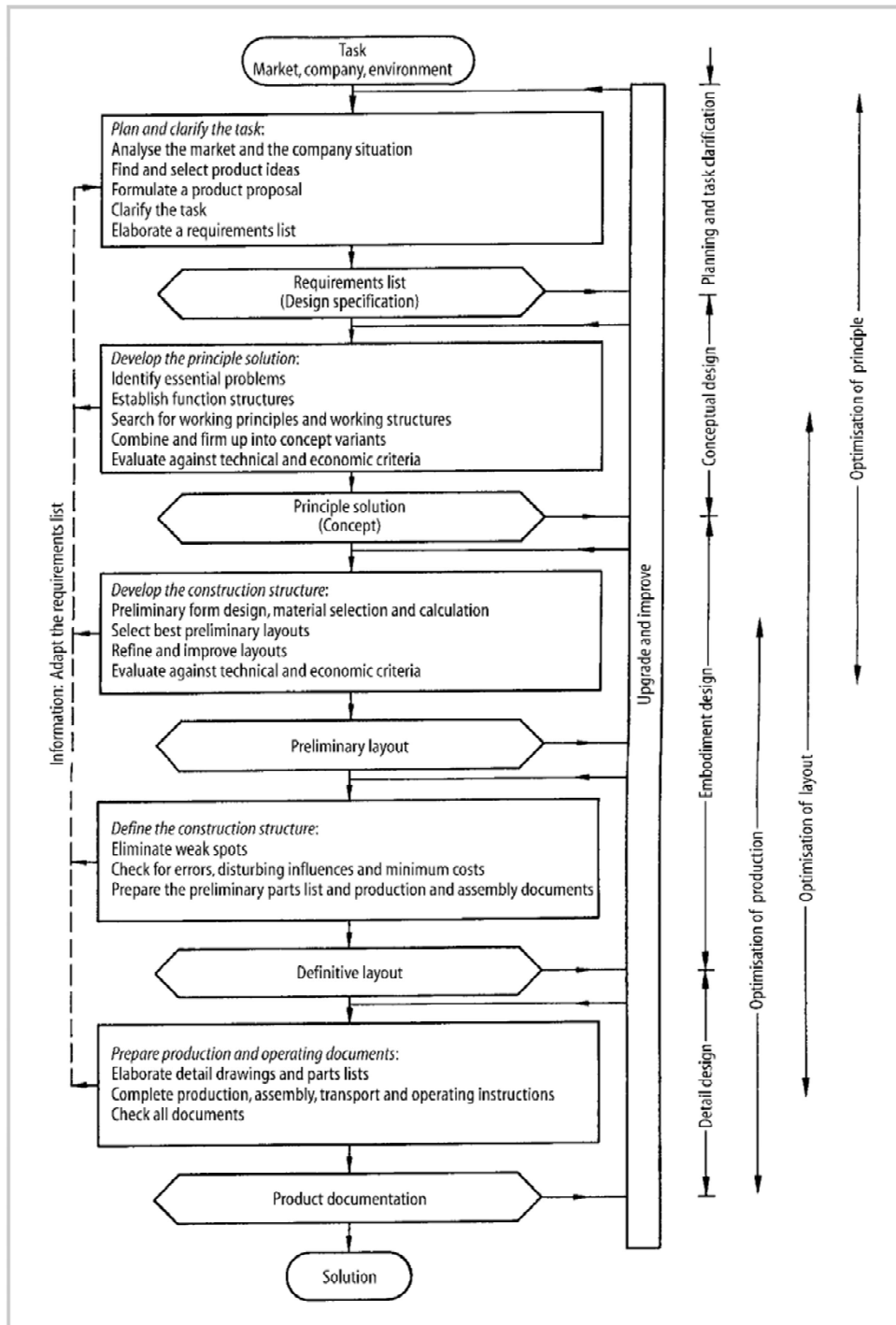


Figure 4.3. Steps in the planning and design process

Kuva 13. Tuotteen suunnittelun vaiheet Pahl ym. (2007: 130) mukaan pohjautuen VDI:n julkaisemiin suunnitteluohjeisiin.

2.6.1 Suunnittelutehtävän selventäminen ja tekniset määritteet

Suunnittelutehtävä voi olla alkuperältään joko uuden tuotteen kehitys ja suunnittelu, määrittely toimeksianto tai kehitystarve perustuen myynnin, tutkimuksen, kokoonpanon tai suunnitteluyksikön omien työntekijöiden ehdotuksiin ja kritiikkiin. *Tehtäväkuvaus* sisältää tuotteen toiminnalliset vaatimukset sekä aikataulu- ja kustannustavoitteet. (Pahl ym. 2007: 146)

Vaatimuslistaa laatiessa on tarpeen erottaa ehdottomat vaatimukset ja tuotteeseen kohdistettavat toiveet. Ennen konseptien ideointia ja arviointia sekä kvalitatiiviset että kvantitatiiviset vaatimukset on hyvä taulukoida. Vaatimuslistaa laatiessa seuraavat kysymykset ovat avuksi (Pahl ym. 2007: 150):

- Mistä ongelmassa on todella kysymys?
- Mitä implisiittisiä ts. asiakkaan hiljaisia ja kirjaamattomia, toiveita ja odotuksia tuotteelle on asetettu?
- Ovatko alussa asetut rajoitteet todella olemassa?
- Mitä kehityspolkuja on avoinna?

Vastauksien löytäminen edellyttää markkinoiden ja toimintaympäristön tuntemusta, ja usein vaatimuslista muodostaa asiakkaan kanssa tehdyn sopimuksen rungon. Esimerkki implisiittisestä vaatimuksesta, jonka määrittely ei ole aivan itsestään selvää, on helppo huollettavuus. Tämän vaatimuksen painavuus riippuu olennaisesti toimintaympäristöstä kuten esimerkiksi koneen huollosta aiheutuvan tuotantokatkoksen aiheuttamien kustannusten suuruudesta.

Kuvassa 14 on yksi esimerkki siitä, millainen tuotesuunnittelun pohjana oleva vaatimuslista voi olla. Tärkeitä lisätietoja ovat mm. päivämäärät, projektin yksilöivät tiedot, vaatimukset (ovatko välttämättömiä vai toiveita) sekä vaatimuksen alkuperä (asiakkaalta, lainsäädännöstä, yrityksen sisältä). Muutokset vaatimusten tarkentuessa tulee kirjata ja päivätä samaan dokumenttiin. Projektin pääsuunnittelija on vastuullinen vaatimusten täyttämisestä. Kuvassa 15 on esitetty vaatimuslistan laadinnassa hyödynnettävä tarkistuslista. Yritys- ja tuotekohtaisen tarkistuslistan laatiminen on erittäin hyödyllistä.

Kuvassa 16 on vielä esimerkki Siemensillä laaditusta vaatimuslistasta (Pahl ym. 2007: 147–150)

User		Requirements list for Project, product		Issued on:
Changes	D W	Requirements	Identification Classification Page:	
Date of change	Specify whether item is D or W	Objective or property with quantitative and qualitative data If necessary, split list based on subsystem (functions or assemblies) or based on checklist headings	Responsible Design group responsible	
		Replaces issue of		

Figure 5.2. Layout of a requirements list

Kuva 14. Esimerkki vaatimuslistasta (Pahl ym. 2007: 148).

Main headings	Examples
Geometry	Size, height, breadth, length, diameter, space requirement, number, arrangement, connection, extension
Kinematics	Type of motion, direction of motion, velocity, acceleration
Forces	Direction of force, magnitude of force, frequency, weight, load, deformation, stiffness, elasticity, inertia forces, resonance
Energy	Output, efficiency, loss, friction, ventilation, state, pressure, temperature, heating, cooling, supply, storage, capacity, conversion.
Material	Flow and transport of materials. Physical and chemical properties of the initial and final product, auxiliary materials, prescribed materials (food regulations etc)
Signals	Inputs and outputs, form, display, control equipment.
Safety	Direct safety systems, operational and environmental safety.
Ergonomics	Man-machine relationship, type of operation, operating height, clarity of layout, sitting comfort, lighting, shape compatibility.
Production	Factory limitations, maximum possible dimensions, preferred production methods, means of production, achievable quality and tolerances, wastage.
Quality control	Possibilities of testing and measuring, application of special regulations and standards.
Assembly	Special regulations, installation, siting, foundations.
Transport	Limitations due to lifting gear, clearance, means of transport (height and weight), nature and conditions of despatch.
Operation	Quietness, wear, special uses, marketing area, destination (for example, sulphurous atmosphere, tropical conditions).
Maintenance	Servicing intervals (if any), inspection, exchange and repair, painting, cleaning.
Recycling	Reuse, reprocessing, waste disposal, storage
Costs	Maximum permissible manufacturing costs, cost of tooling, investment and depreciation.
Schedules	End date of development, project planning and control, delivery date

Kuva 15. Tarkistuslista vaatimuslistan laatimiseen (Pahl ym. 2007: 150).

Siemens		Requirements list for a printed circuit board positioning machine	Issued on 27/04/88 Page: 1
Changes	D W	Requirements	Responsible
		<u>1. Geometry: dimensions of the test sample</u> Circuit board: Length = 80 – 650 mm Breadth = 50 – 570 mm Height = 0.1 – 10 mm Required height = 1.6 – 2 mm Clearance between basic grid boards \leq 120 mm 'Clamping area' \leq 2 mm (edges of the board)	Langner's group
		<u>2. Kinematics:</u> Precise positioning of the test sample Minimum of 2 mm displacement of the test sample normal to the board Feedback to transfer position separate stations for input and output Design of clearance zone Minimum handling time (as fast as possible)	
27/04/88	D		
27/04/88	D		
27/04/88	D		
	W		
	D		
	W		
	D		
27/04/88	D	<u>3. Forces:</u> Weight of the test sample $<$ 1.7 kg Maximum weight of the test sample $<$ 2.5 kg	
	W		
	D	<u>4. Energy:</u> Electrical and /or pneumatic (6–8 bar)	
	D	<u>5. Material:</u> Free from rust Isolation between test sample and testing device	
27/04/88	W	Thermal expansion of testing device adjusted to expansion of printed circuit	
27/04/88	D	Consideration of influence of temperature	
27/04/88	D	Temperature range: 15–40 °C	
27/04/88	D	Humidity: 65 %	
27/04/88	W	Circuit boards: epoxy-fiberglass sheet	
27/04/88	D	No condensation	
27/04/88	D	<u>6. Safety:</u> Operator Safety	
		<u>7. Production:</u> Consideration of tolerance build up	
		<u>8. Operation:</u> No contamination inside the testing device Destination: production line	
		<u>9. Maintenance:</u> Maintenance interval $>$ 10 ⁶ test operations	
		<u>10. Schedule:</u> Embodiment finished by July 1988	
		Replaces issue of 21/04/88	

Kuva 16. Esimerkki vaatimuslistasta (Pahl ym. 2007: 154).

2.6.2 Konseptisuunnittelun vaiheet

Konseptisuunnittelu aloitetaan tehtävien selventämisvaiheen jälkeen. Vaiheessa etsitään yleisellä tasolla erilaiset ongelmat ja mahdollisuudet tavoitellun toiminnon saavuttamiseksi. Kuvassa 17 esitetään konseptisuunnittelun työnkulku. Konseptisuunnittelu- vaiheessa selvitetään toimintaperiaatteet ja niihin sopivat toiminnalliset rakenteet, joilla edetään seuraavaan vaiheeseen eli toteutussuunnitteluun. Valinta perustuu tehtävän selventämisvaiheessa laadittuihin vaatimuslistoihin. Yhdistelemällä erilaisia toimintaperiaatteita ja toiminnallisia rakenteita saadaan tuloksena erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja, joiden arvioimista jatketaan tässä työssä aiemmin kuvassa 8 esitetyn valintamatriisin avulla. Suositeltavaa on valita enintään 6 lupaavinta vaihtoehtoa, joiden konkreettinen tasoa ei ole viety liian pitkälle. Konseptisuunnittelun vaiheessa, jossa tarkennetaan pääkonseptien toiminta, tulee tehdä jo alustavia laskelmia, alustavaa layout suunnittelu, hahmottaa fyysisen toteutuksen edellytykset ja tehdä karkeita malleja tai mallikokeita, hyödyntää malleja kinemaattisia ja tutkia markkinoilla olemassa olevia ratkaisuja kyseiseen tarkoitukseen. (Pahl ym. 2007: 190).

Edelleen karsinnan jälkeen jatkoon päässeitä ratkaisuvaihtoehtoja arvioidaan tässä työssä sivuilla 28-29 esitellyin pisteytysmetodein. Konseptisuunnittelun lopullinen tavoite on konseptin valinta ja terävöittäminen valmiiksi fyysisen rakenteen toteutussuunnittelua varten. (Pahl ym. 2007: 158–165).

Ennen konseptisuunnittelun aloittamista on syytä esittää seuraavat kysymykset:

- Onko tehtävä selvitetty riittävän tarkasti edellisessä vaiheessa, jotta ratkaisun kehittäminen on mahdollista?
- Onko konseptisuunnitteluvaihe todella tarpeen, vai voidaanko tunnettujen ratkaisujen avulla edetä suoraan toteutus- ja detaljisuunnitteluun?
- Jos konseptointivaihe on välttämätön, miten ja missä laajuudessa tarvitaan systemaattista lähestymistapaa konseptin kehittämiseen?

Näin voidaan varmistua riittävän laajasta panostuksesta tuotekehitysprosessiin kuitenkin välttämättä tarpeettoman ja tuloksettoman työn tekemisen. (Pahl ym. 2007: 158–165).

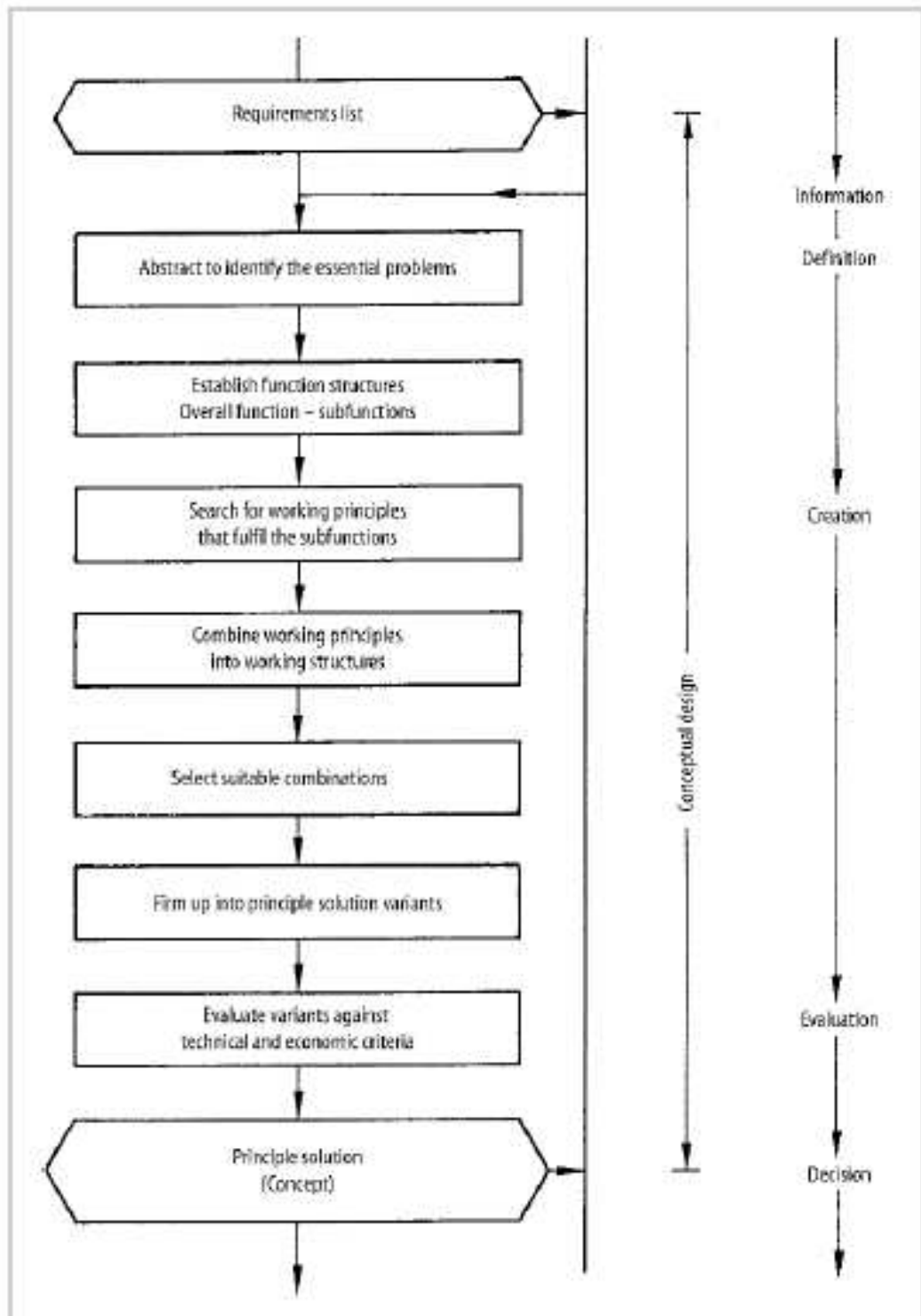


Figure 6.1. Steps of conceptual design

Kuva 17. Konseptisuunnittelun työnkulku (Pahl ym. 2007: 160).

2.6.3 Toteutussuunnittelun vaiheet

Toteutussuunnitteluvaiheessa (*embodiment desing*) suunnittelijat lähtevät liikkeelle valitulla konseptilla ja työskentelevät kuvan 18 askelien mukaan muotoillakseen fyysisen layoutin ehdotetulle tekniselle tuotteelle toteuttaen tekniset ja taloudelliset vaatimukset. Tässä vaiheessa suunnittelijoiden tarvitsee muotoilla tuotteen layout ja varmistua eri osien yhteensopivuudesta. Samalla suunnitellaan alustavat muodot ja materiaalit eri komponenteille ja ratkaistaan päätehtävää avustavien toimintojen toteutus. Usein tarvitaan useita eri toteutusratkaisuja ennen kuin lopullinen toivottu ratkaisu saadaan aikaan. Seuraavassa avataan vaiheiden sisältöä yksityiskohtaisemmin. (Pahl ym. 2007: 227–231).

1. Aluksi erittäin tärkeässä osassa on aiemmin laadittu vaatimuslista, josta tulee tunnistaa ratkaisevassa osassa olevat tuotteeseen kohdistuvat vaatimukset. Tällaisia ovat mitat määrittävät vaatimukset kuten ulostulot, liittimien koot ja käytettävissä oleva tila. Samoin komponenttien keskinäisen järjestyksen määrittää virtauksen, liikesuunnan, paikan ym. vaatimukset. Lisäksi materiaalien valintaan vaikuttavat korroosionkestävyys, lujuus-, kovuus- ja painovaatimukset ym. Aiemmin tässä työssä listatut yleisesti huomioitavat rajoitteet ja vaatimukset koskien mm. turvallisuutta, ergonomiaa, käytettävyyttä, kokoonpanoa, huollettavuutta ja kierrätystä on myös pidettävä mielessä. Ohjenuorana käytettävä muistilista eo. asioista on jälleen avuksi. (Pahl ym. 2007: 228).
2. Vaatimusten tunnistamisen jälkeen voidaan edetä tarkempiin toteutukseen vaikuttaviin tilarajoitteisiin, kuten vapaan tilan tarpeeseen, kulkureitteihin ja asennettavuuteen.
3. Tästä edelleen edetään karkean fyysisen muodon suunnitteluun huomioiden, mitkä pääasiallisten toimintojen ja toiminnallisten rakenteiden toteutukset määrittävät tarvittavat dimensiot. Samalla on tarkasteltava mitkä päätoiminnot vaativat yhdistämisen toisiin päätoimintoihin esimerkiksi liike-energian siirrolla akselin välityksellä toiseen moduuliin.
4. Seuraavaksi laaditaan alustavat layoutit ja muodot niiden päätoimintojen toteuttamiseksi, jotka määrittävät ratkaisun muodon ja mitat. Muutamista vaihtoehdoista ratkaisuista valitaan sopivat, ja niihin edelleen suunnitellaan jäljellä olevat

päätoiminnot toteuttavat ratkaisut (Pahl ym. 2007: 228). Esimerkkinä Enmac Oy:n putoamissuojissa muodon määrittäviä toimintoja ovat suojahäkin vaadittavat mitat, vaadittava liikealue pystysuunnassa, vaadittava etäisyys hoitotasosta sekä vaadittava liike vaakasuunnassa ja vaakaliikkeen toteutukseen rullakelkoilla vaadittava tila. Erittäin tärkeä päätoiminto on vaakaliike, joka saadaan aikaan lihasvoimalla työntämällä. Tästä seuraa tarvittavan työntökahvan suunnittelu, jonka suunnittelussa on muistettava jälleen huomioida erittäin tärkeät yleiset vaatimukset ergonomiasta ja turvallisesta käytöstä.

Muita päätoimintoja, jotka eivät itsessään aseta koko- ja muotorajoituksia, ovat suojahäkkiä pystysuunnassa liikuttava voimanlähde, vaakaliikkeen lukitusmekanismi suojahäkin ollessa kuorma-auton päällä käyttötilanteessa, suojarottien toimintamekanismit, laskuportaan toimintamekanismit, kaiderakenteet sekä erilaiset puristumisvaaran eliminoivat suojat.

5. Kuvan 18 mukaisesti tästä edetään aputoimintojen toteutussuunnitteluun. Edelleen vaaka- ja pystysuunnassa lineaariliikkeisen putoamissuojan aputoiminnoiksi voidaan luokitella energian siirto pystyliikkeen suorittaville toimilaitteille (pneumatiikkakytkennät), rajakytkimet ja signaalikaapelit, joilla tieto putoamissuojan olemisesta yläasennossa viedään liikennevalojärjestelmään sekä suojavaunun maadoitus. Suunnittelussa on jälleen hyvä pyrkiä hyödyntämään standardi- ja valmisosia aina kun mahdollista.
6. Seuraava vaihe on kokonaisuuden toimivuuden kannalta ratkaiseva. Tässä kohden suunnitellaan yksityiskohtainen muoto, rakenne ja toimilaitteet, joilla kaikki pää- ja aputoiminnot toteutetaan ja näiden toimintojen yhteensopivuus varmistetaan.
7. Kun myös aputoiminnot on suunniteltu yksityiskohtaisesti, arvioidaan miten kokonaisuus toteuttaa tekniset ja taloudelliset kriteerit. Jos projektissa vaaditaan useamman toteutusratkaisun vertailua, ei toteutussuunnittelua tule luonnollisesti jatkaa vaihtoehtojen osalta yksityiskohtaisemmaksi kuin tekninen ja taloudellinen arviointi edellyttää. Lopullisen toteutettavan ratkaisun valitsemiseen riittää jossain tapauksissa pelkkä päätoimintojen toteutuksen suunnittelu.

8. Alustava toteutettava kokonaisuus lyödään lukkoon. Kokonaisuus sisältää kaikki systeemin tai konstruktion tarvittavat toiminnot.
9. Optimoidaan muotoa ja eliminoidaan arvioinnin aikana havaitut heikot kohdat. Tässä vaiheessa on hyödyllistä toistaa edellisiä askelia ja valita parhaat alitoiminnot kaikista toteutusvaihtoehdoista, jotka edellä on muotoiltu.
10. *Tarkistetaan* toteutusratkaisu *virheiden* varalle (suunnitteluvirheet) suhteessa toiminnallisuuteen, tilavaatimuksiin ym. Sekä laatu- että kustannusvaatimukset tulee toteutua viimeistään tässä vaiheessa.
11. Toteutussuunnitteluvaihe päätetään alustavien osalistojen ja valmistus- sekä kokoonpanodokumenttien laatimiseen. Lopullinen layout lyödään lukkoon ja siirretään detaljisuunnitteluun.

Toteutussuunnittelussa tulisi hyödyntää kuvassa 19 esitettyä tarkistuslistaa. Edellisissä vaiheissa on tarpeen käyttää laajasti suunnittelijan työkaluja, kuten yleisiä laskentakaa-voja, kinemaattisia malleja, FEM-laskentaa ja kustannusarvioiteja. Joissakin tapauksissa prototyyppien valmistaminen tai mallikokeiden tekeminen on tarpeen (käsitellään seuraavassa luvussa 2.6.4). Virheiden tarkastus on edellä kuvatuista erityisen tärkeä vaihe, koska virheet voivat olla mahdottomia korjata tai ne voivat aiheuttaa suuria kustannuksia tuotteen valmistamisen jälkeen. (Pahl ym. 2007: 227–231).

Tämän työn osalta edellä mainituista työkaluista käytettiin useita. Kokonaisuus rakennettiin 3D-malliksi osaluetteloineen SolidWorks 2016 -koneensuunnitteluohjelmalla. Yleisiä laskentakaavoja käytettiin FEM-lujuuslaskelmien tarkistamiseen (palkkien taipumat ja jännitykset), teräspyörien aiheuttaman pintapaineen laskentaan sekä suojavaunun massan aiheuttamiin momentteihin ja tukivoimiin, jotka rullakelkat pyörineen siirtävät johteina toimiville vaakapalkeille. FEM-laskentaa käytettiin johteen päällä liikkuvien, putoamissuojavaunun kantavien rullakelkkojen kestävyys- ja varmuuskertoimien määrittämiseen. Kustannusarviointia tehtiin jokaisen toteutusratkaisun päätoimintojen osalta ennen lopullista valintaa. Myös heikkouksien tarkastelu oli tarpeen. Alustavasti varsin lupaavalta vaikuttava kaupallisen johderatkaisun hyödyntäminen hylättiin työn aikana, koska käyttövarmuus sääolosuhteista johtuen havaittiin heikoksi kohdaksi, jota ei olisi voinut eliminoida.

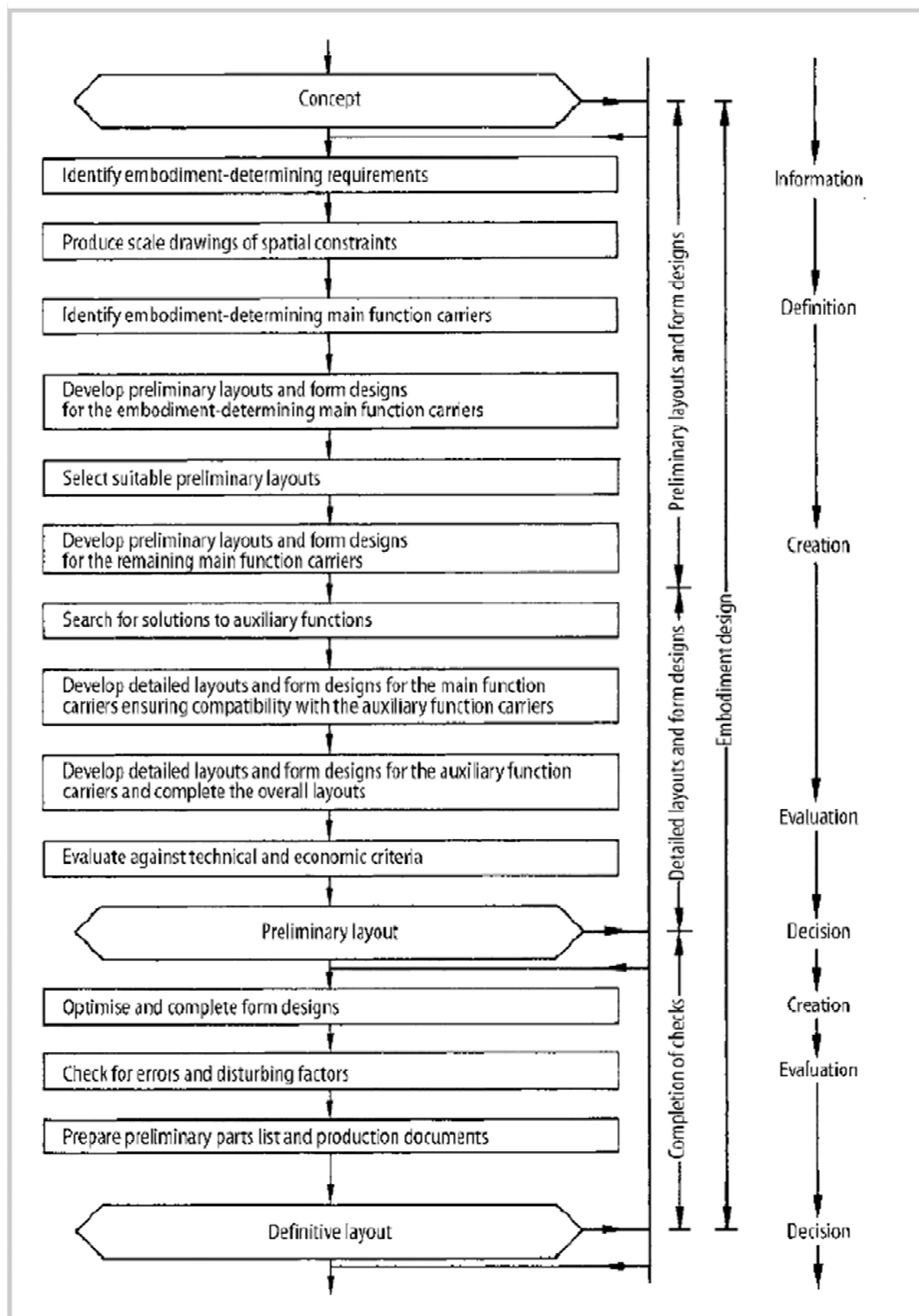


Figure 7.1. Steps of embodiment design

Kuva 18. Toteutussuunnittelun työnkulku (Pahl ym. 2007: 229).

Headings	Examples
Function	Is the stipulated function fulfilled? What auxiliary functions are needed?
Working principle	Do the chosen working principles produce the desired effects and advantages? What disturbing factors may be expected?
Layout	Do the chosen overall layout, component shapes, materials and dimensions provide: adequate durability (strength) permissible deformation (stiffness) adequate stability freedom from resonance unimpeded expansion acceptable corrosion and wear with the stipulated service life and loads?
Safety	Have all the factors affecting then safety of the components, of the function, of the operation and of the environment been taken into account?
Ergonomics	Have the human–machine relationships been taken into account? Have unnecessary human stress or injurious factors been avoided? Has attention been paid to aesthetics?
Production	Has there been a technological and economic analysis of the production processes?
Quality control	Can the necessary checks be applied during and after production or at any other required time, and have they been specified?
Assembly	Can all the internal and external assembly processes be performed simply and in the correct order?
Transportt	Have the internal and external transport conditions and risks been examined and taken into account?
Operation	Have all the factors influencing the operation, such as noise, vibration, handling, etc. been considered?
Maintenance	Can maintenance, inspection and overhaul be easily performed and checked?
Recycling	Can the product be reused or recycled?
Costs	Have the stipulated cost limits been observed? Will additional operational or subsidiary costs arise?
Schedules	Can the delivery dates be met? Are there design modifications that might improve the delivery situation?

Kuva 19. Toteutussuunnittelun tarkistuslista (Pahl ym. 2007: 234).

2.6.4 Prototyypit

Prototyyppejä voidaan hyödyntää joissakin tapauksissa tuotesuunnittelussa konseptisuunnittelua seuraavassa toteutus suunnittelussa. Ulrich ja Eppinger (1995) määrittelevät prototyypin tuotteen approksimaatioksi yhdestä tai useammasta kiinnostavasta näkökulmasta tarkasteltuna. Prototyyppi voi siten koostua matemaattisista malleista, konseptisketseistä, simulaatioista tai komponenttitesteistä tai se voi olla täysin toimiva tuotteen esituotantoversio. Suunnittelun alasta riippuen fyysinen prototyyppi voi olla täyden mittakaavan laite tai pienessä mittakaavassa toteutettu, joka testien jälkeen skaalataan täyteen mittakaavaan huomioiden erilaiset skaalausparametrit. Kuvassa 20 on esitetty erilaisia prototyyppejä jaettuna akseleille fyysisten ja analyttisten sekä yksityiskohtaisten ja kattavien välillä. Eräs kattavimpia, ja siten kustannuksiltaan kalleimpia, on beta-versiot kenttätesteihin. Kuvassa 21 nähdään erityyppisten prototyyppien soveltuvuus eri käyttötarkoituksiin. (Ulrich ja Eppinger 1995: 247).

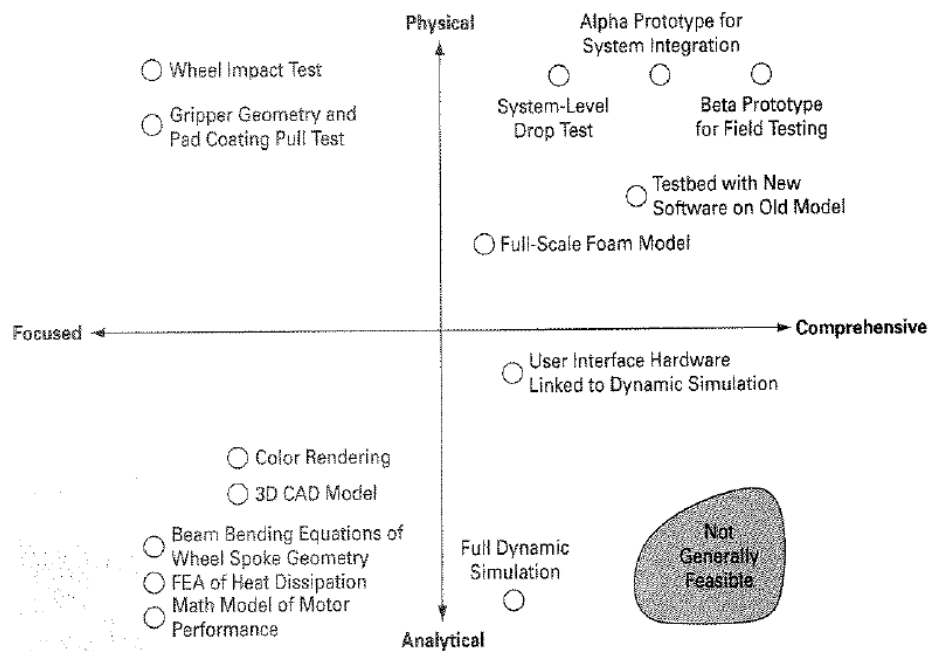


EXHIBIT 12-5 Types of prototypes. Prototypes can be classified according to the degree to which they are physical and the degree to which they implement all of the attributes of the product.

Kuva 20. Erityyppisten prototyyppien sijoitus konkretian tason ja laajuuden mukaan (Ulrich ja Eppinger 1995: 247).

	Learning	Communication	Integration	Milestones
Focused analytical	●	○	○	○
Focused physical	●	●	○	○
Comprehensive physical	●	●	●	●

EXHIBIT 12-8 Appropriateness of different types of prototypes for different purposes (● = more appropriate, ○ = less appropriate). Note that fully comprehensive analytical prototypes are rarely possible for physical products.

Kuva 21. Erityyppisten prototyyppien soveltuvuus tuotekehityksen eri vaiheisiin (Ulrich ja Eppinger 1995: 253).

2.7 Tuotteen valmistuskustannuksien määräytyminen

Huomattava osa Enmac Oy:n toimittamista putoamissuojaratkaisuihin ovat asiakkaan tarpeisiin räätälöityjä ja osin uusia tuotteita, jotka toteutetaan konseptisuunnittelusta liikkeelle lähtien. Kuten edellä on todettu, tällaisissa yksittäiskappaleiden suunnittelussa pääpaino on varmatoimisuudella ja käytettävyydellä eikä kustannusoptimointiin kannata panostaa liikaa. Tästä huolimatta kustannustaso määräytyy jo suunnittelun alkuvaiheessa. Valmistusjärjestelmän panostukset ovat materiaalit, työ, ostososat, laitteet, tieto, työkalut, energia ja palvelut. Panostuksista syntyy valmiita tuotteita ja hukkavirtoja, joiden suhde vaikuttaa valmistuksen kannattavuuteen. (Ulrich ja Eppinger 1995: 183–184).

Enmac Oy:n tuotteiden osalta tuotekehitys eri versioiden välillä näkyy valmistuskustannusten alentamisessa ja toimintavarmuuden parantamisessa. Ostososten ja rakenneratkaisujen optimoinnilla saadaan helposti aikaan huomattavia säästöjä, kuten tämän työn tuloksissa on esitetty. Tavoitteena oli toteuttaa vaakasuunnassa liikuteltavan putoamissuojan johderatkaisu noin 30 % ensimmäistä versiota alhaisemmilla tuotantokustannuksilla. Työn kulku ja tulokset esitellään kappaleessa 6.

3 Tuotesuunnittelua ja tuotekehitystä ohjaava lainsäädäntö ja standardit

3.1 Koneiden turvallisuutta käsittelevät standardit ja riskienhallinta

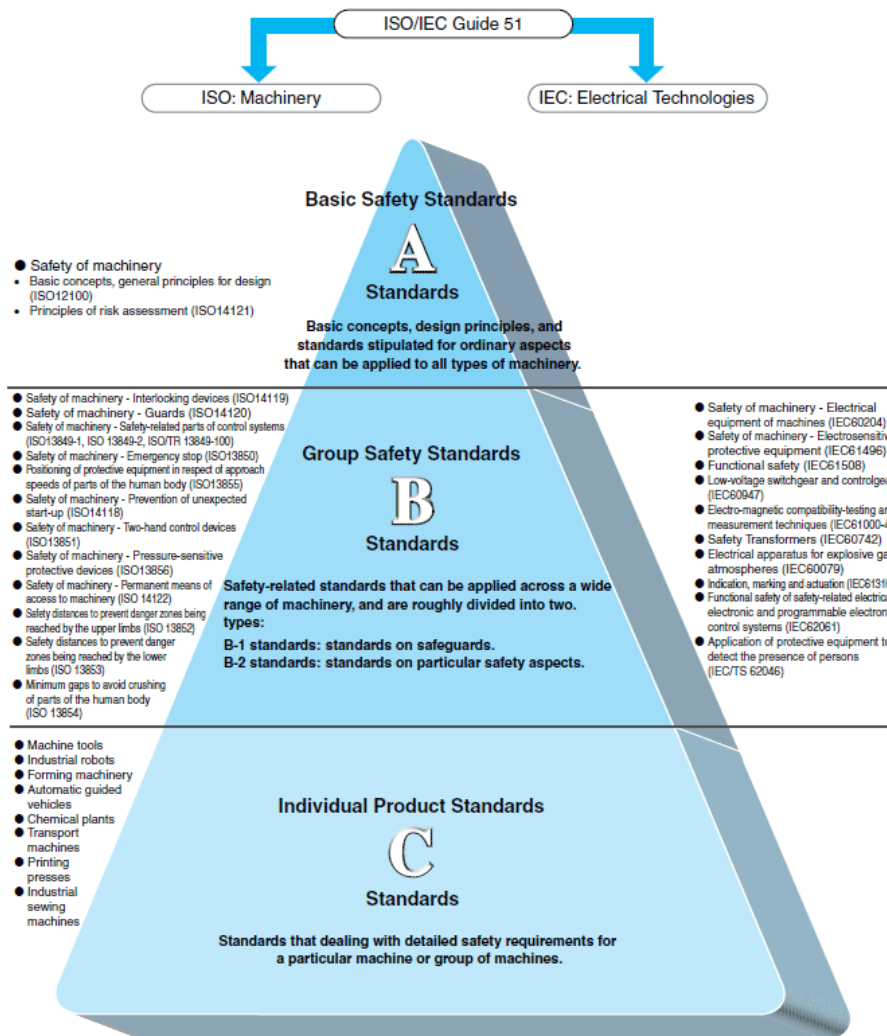
Suunnittelua ohjaavasta lainsäädännöstä Enmac Oy:n koneensuunnittelua ohjaa ylätasoinen konedirektiivi 2006/42/EY, jossa annetaan varsin karkealla tasolla mm. yleiset vaatimukset ja ohjeet turvalliseen koneiden suunnitteluun, markkinoille saattamiseen ja vaatimustenmukaisuuden osoittamiseen. Putoamissuojien osalta konedirektiiviä tarvitaan liikkuvien osien suunnittelussa ja turvallistamisessa sekä CE-merkinnän saamisen edellyttämissä asioissa. Tarkempia suunnitteluohjeita annetaan konedirektiivin alaisissa standardeissa, joiden mukaisesti suunnitellut koneet ja laitteet ovat lainsäädännössä asetettujen vaatimusten mukaisia. Kuvassa 22 (Omron 2017) alla on esitetty standardien hierarkia. Standardit on jaettu tasoille A, B ja C, jossa C on yksityiskohtaisimmat suunnitteluohjeet sisältävä standardi (laitetyyppikohtainen).

Esimerkiksi ISO 12100 (2010) standardi *koneiden turvallisuus – suunnitteluperiaatteet – riskien arviointi ja vähentäminen* on A-tyyppin turvallisuutta käsittelevä perustandardi, jossa esitellään perusperiaatteet ja suunnitteluperiaatteet, joita voidaan soveltaa kaikenlaisten koneiden suunnittelussa. Kuvassa 23 on kaaviokuva ko. standardin mukaisesta riskien vähentämisen prosessista. Vaiheina on koneen toiminta-alueen määrittäminen, vaarojen tunnistaminen, riskien arviointi ja riskin suuruuden määrittäminen. Mikäli riski jää liian suureksi, tulee toimintaa riskin pienentämiseksi jatkaa seuraavin periaattein:

- 1) Voidaanko vaara poistaa tai pienentää sitä laitteen suunnittelua parantamalla? Jos ei voida, jatketaan seuraavaan vaiheeseen.
- 2) Voidaanko vaara poistaa suojilla tai suojarusteilla? Jos ei, jatketaan seuraavaan vaiheeseen.
- 3) Viimeisenä käytettävä keinona on koneen rajojen (käyttöalueen) muutos, jolloin palataan kaavion alkuun.

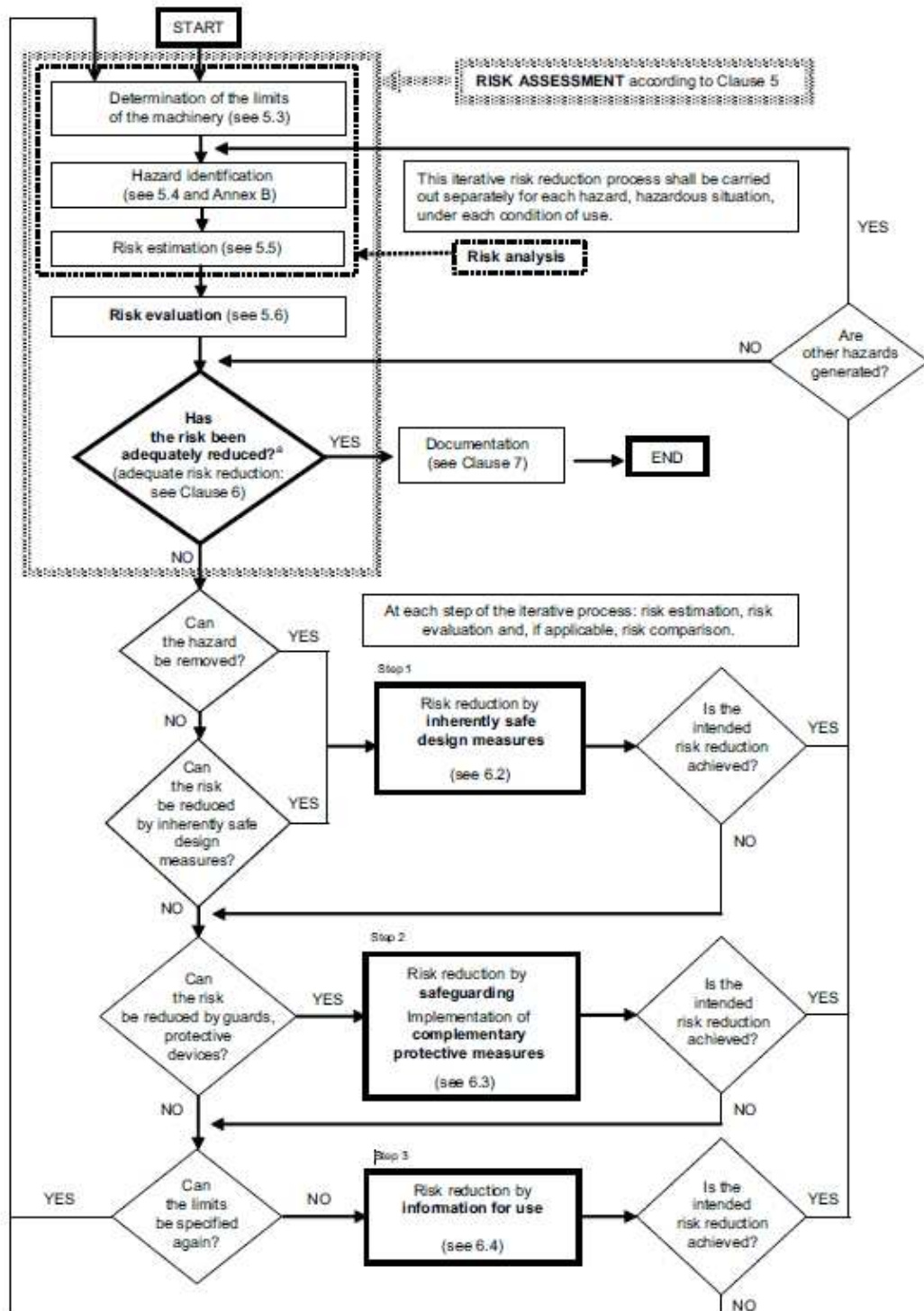
Kuvassa 24 nähdään riskin pieneneminen kaaviona eo. toimenpiteiden seurauksena. Ensisijainen toimenpide on aina koneen sisäisen turvallisuuden parantaminen, toissi-

jainen suojien ja suojalaitteiden käyttö. Mikäli jäännösriski ei ole riittävän pieni, käytetään kolmantena toimenpiteenä varoitusmerkkejä ja signaaleja koneessa sekä varoituksia käyttöohjeessa.



Kuva 22. Standardien hierarkia. (Omron 2017)

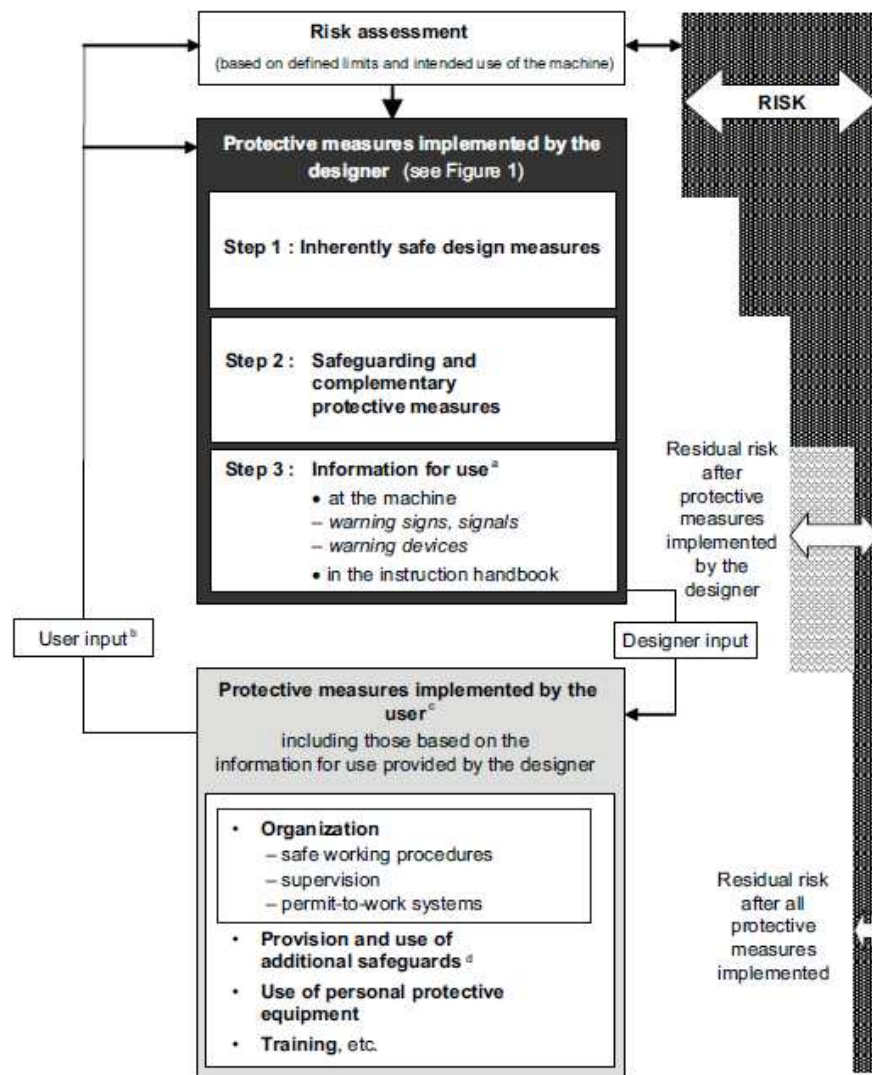
ISO 12100:2010(E)



^a The first time the question is asked, it is answered by the result of the initial risk assessment.

Figure 1 — Schematic representation of risk reduction process including iterative three-step method

Kuva 23. Standardin ISO 12100:2010 mukainen riskien vähentämisessä käytetty iteratiivinen kolmiportainen menetelmä (ISO 12100:2010(E): 10).



^a Providing proper information for use is part of the designer's contribution to risk reduction, but the protective measures concerned are only effective when implemented by the user.

^b The user input is that information received by the designer from either the user community, regarding the intended use of the machine in general, or from a specific user.

^c There is no hierarchy between the various protective measures implemented by the user. These protective measures are outside the scope of this International Standard.

^d These are protective measures required due to a specific process or processes not envisaged in the intended use of the machine or to specific conditions for installation that cannot be controlled by the designer.

Kuva 24. Standardin ISO 12100:2010 mukaisen riskien vähentämisen käytäntö suunnittelijan näkökulmasta (ISO 12100:2010(E): 11).

3.2 Putoamissuojien suunnittelua ohjaavat standardit

Enmac Oy:n putoamissuojatuotteet ovat CE-merkittyjä ja turvallisuudessa sekä toimivuudessa nojataan mm. standardimukaisuuteen EN ISO 14122 1-4 soveltuvien osien. Koneturvallisuutta käsittelevissä standardeissa käsitellään kiinteitä kulkuteitä, työskentely- ja kulkutasoja, portaita, porrastikkaita, tikkaita ja suojakaiteita. Standardit ohjaavat suunnittelemaan rakenteiden yksityiskohtia, joilla varmistetaan riittävä kestävyys ja jäykkyys käyttöturvallisuuden ja -mukavuuden kannalta. Käytännössä sallittavat taipumat ovat suojarakenteille ja hoitotasolle niin pienet, että riittävä lujuus on seurausta jäykkyyden vaatimuksesta. Rakenteiden kestävyys on joka tapauksessa osoitettava laskelmin. Lisäksi EUROCODE 3, suomennettuna SFS-EN 1993, ohjaa teräsrakenteiden suunnittelua kantavien rakenteiden osalta.

Liikkuville putoamissuojille puristumisvaaran arviointi tehdään konedirektiivin ja sen alaisten asiaa käsittelevien standardien mukaisesti. Tiloissa, joissa voi esiintyä räjähdyskelpoisia kaasuseoksia (ATEX-luokitellut tilat) suunnittelua ohjaavat muiden kuin sähkölaitteiden osalta SFS-EN ISO 80079-36:2016 sekä 80079-37:2016. Liikkuvien putoamissuojien suunnittelua (eivät ole henkilönostimia) ohjaavat hoitotasostandardien lisäksi yleiset koneensuunnittelun periaatteet. Yksittäiset koneenosat kuten rullat ja liikkuvien osien kannattimet ovat kriittisiä rakenteen kantavuuden ja henkilöturvallisuuden kannalta. Tällaiset osat ovat putoamissuojan rakenteissa tyyppillisesti pienikokoisia, ja näissä käytetään varmuuskertoimia 2,5–3 myötörajan suhteen. Suhteellinen kustannus kasvaa vain vähän tehtäessä rakenteesta riittävän vahva hyvän varmuuskertoimen saavuttamiseksi, joten mitoittaminen pienemmillä varmuuskertoimilla ei ole järkevää.

Konesuojien suunnittelua ohjaa standardi SFS-EN ISO 14120, *Koneturvallisuus. Suojukset. Kiinteiden ja avattavien suojusten suunnittelun ja rakenteen yleiset periaatteet*. Tämän työn puitteissa suunniteltavaa puristumisvaaran estävää suojausta suunniteltaessa tutustuttiin ko. ohjeistukseen. Tarkempaa tietoa esimerkiksi suojaverkon tiheyksistä ja turvaetäisyyksistä löytyy standardista EN ISO 13857.

3.3 Esimerkkejä lineaariliikkeisen putoamissuojan turvallistamisesta

Liikevoima pyritään kehittämään paineilmalla tai lihasvoimalla, jolloin vältetään kalliiden sähköisten tai hydraulisten ATEX-luokiteltujen laitteiden käyttö. Pneumaattiset sylinterit

ja komponentit sekä jousikeventimet ovat edullisia myös ATEX-luokiteltuna. Pneumaattisten moottorien käyttöä rajoittaa vaikea säädettävyys ja heikompi kylmänkesto. Lisäksi liikkuvat osat on suojattu kosketukselta eo. standardien mukaisesti, jolloin vammojen saaminen on estetty ohjeiden mukaisella käytöllä sekä ennakoitavissa olevalla väärinkäytöllä. Tämän työn yhtenä osa-alueena ollut putoamissuojan pystyjohteiden turvallistamisen suunnittelu on esitetty tuloksineen kappaleessa 5.

4 Tuotekehityksen dokumentoinnin toteutus

Dokumentoinnin osalta havaittiin kehitystarpeita tuotekohtaisten kehitysvaiheiden tallentamisessa ja saatavuudessa. Tuotesuunnittelu- ja kehitysprojekteja on viety eteenpäin putoamissuojien osalta Enmac Oy:n kahdessa eri yksikössä. Projektien aikataulu- ja paineiden sekä dokumentointiohjeiden puutteiden takia tieto tehdyistä parannuksista ja tulevista kehitystarpeista on ollut jonkin verran hajautunutta eri henkilöiden ja projektitiedostojen tallennuspaikkojen välillä. Käytännössä tämä on näkynyt uusien putoamissuojatoimitusten yhteydessä suunnittelu-aikaa pidentävänä sekä virheitä lisäävänä tekijänä. Edellisistä toimitetuista tuotteista sekä prototyypeistä opittujen asioiden ja viimeisten detaljimutosten kerääminen on vienyt suunnittelijoilta ylimääräistä aikaa ja synnyttänyt virhemahdollisuuksia. Myös suunnittelun tekeminen Enmac Oy:n kahdessa eri toimipisteessä muiden projekti- ja ohjeiden takia on hankaloittanut viimeisimmän tiedon kulkemista talon sisällä. Yhtenäistämällä tuotekehityksen toteutettujen ratkaisujen ja tulevien kehitystarpeiden dokumentointi tullaan parantamaan ajankäyttöä ja tuotteiden laatua sekä pienentämään virheiden riskiä. Huolellisesti toimivaksi rakennettu tuotekehityksen dokumentointi on myös olennainen osa laadunvarmistusta.

Dokumentoinnin lähtökohtana toimi toimitusprojektiloki, josta löytyvät asiakkaille toimitetut putoamissuojat olennaisine oheistietoineen. Putoamissuojatuotteiden kehitystä prototyypistä tähän päivään tarkastellaan projekteittain tehtyjen projektin päätös - raporttien avulla sekä keskustelemalla tuotekehitykseen eri projekteissa osallistuneiden henkilöiden kanssa. Näin tietoon saatuja tuotekehitys- ja tuotesuunnitteluasioita alettiin koota järjestelmällisesti helposti tarkasteltavaan muotoon. Tavoitteena oli saada putoamissuojien aiemmin projekteittain ja eri suunnittelijoiden välillä pirstoutunut tieto helposti käytettäväksi yrityksen tarpeisiin. Havaitut tuotekehitystarpeet jo olemassa olevissa tuotteissa sekä uusien tuotteiden suunnittelutarpeet kartoitettiin ja koottiin yhteen.

Tuloksena syntyi Excel-tilasto, jonka ensimmäisellä välilehdellä ovat kaikki jo toimitetut putoamissuojat ja niissä havaitut kehitystarpeet sekä linkit raporteihin joista löytyy yksityiskohtaisempaa tietoa. Kuvassa 25 on esitetty taulukon pää rakenne (pällekkäisiin kuviin jaettuna). Yrityksen käytössä olevasta taulukosta löytyvät tämän työn tuloksena kaikki tunnistetut tuotekehitystarpeet, joiden tärkeys on jaoteltu kolmiportaiseksi. Hakutoiminnolla voi hakea tärkeysjärjestyksen, asiakkaan tai projektinumeron avulla tietoa taulukosta. Taulukosta löytyy myös tietoa siitä, onko havaittu kehitystarve rat-

kaistu jo tehdyssä toimitusprojektissa vai tuleeko asia korjata seuraavan projektin suunnittelun yhteydessä. Toisin sanoen onnistunut toimitusprojekti putoamissuojalle edellyttää, että tuotekehitystaulukosta tarkastetaan edellisten samantyyppisten putoamissuojien tiedot. Tällöin ei olla ainoastaan yksittäisten henkilöiden muistin varassa asioissa, joita tuotteissa tulee kehittää.



Päivitetty
23.8. 2017
ALA

PUTOAMISSUOJIIEN TUOTEKEHITYSKOhteET (JO TEHDYT TOIMENPITEET SEKÄ KEHITYSTARPEET TÄRKEYSJÄRJESTYKSESSÄ)

Tulevien kehityskohteiden tärkeys 1/2/3	Asiakas	Projektinumero	Kehityskohde /toimenpiteet	Putoamissuojan tyyppi	Pääkokoontyypin	Sarjanumero(t)	Sijainti
toteutetut 0 / muut 1,2,3 voidaan lajitella tärkeyden perusteella	N.N	xxx	Uusi tuote / tuotteen kehitystarve / kustannusoptimointi	Lineaariliikkeit/nivelvarret/manuaaliset/pneumaattiset	Piirustusnumero pääkokoontyypin	toimitettujen tuotteiden sarjanumerot	Kohde/tarkka sijainti /lastauslaituri

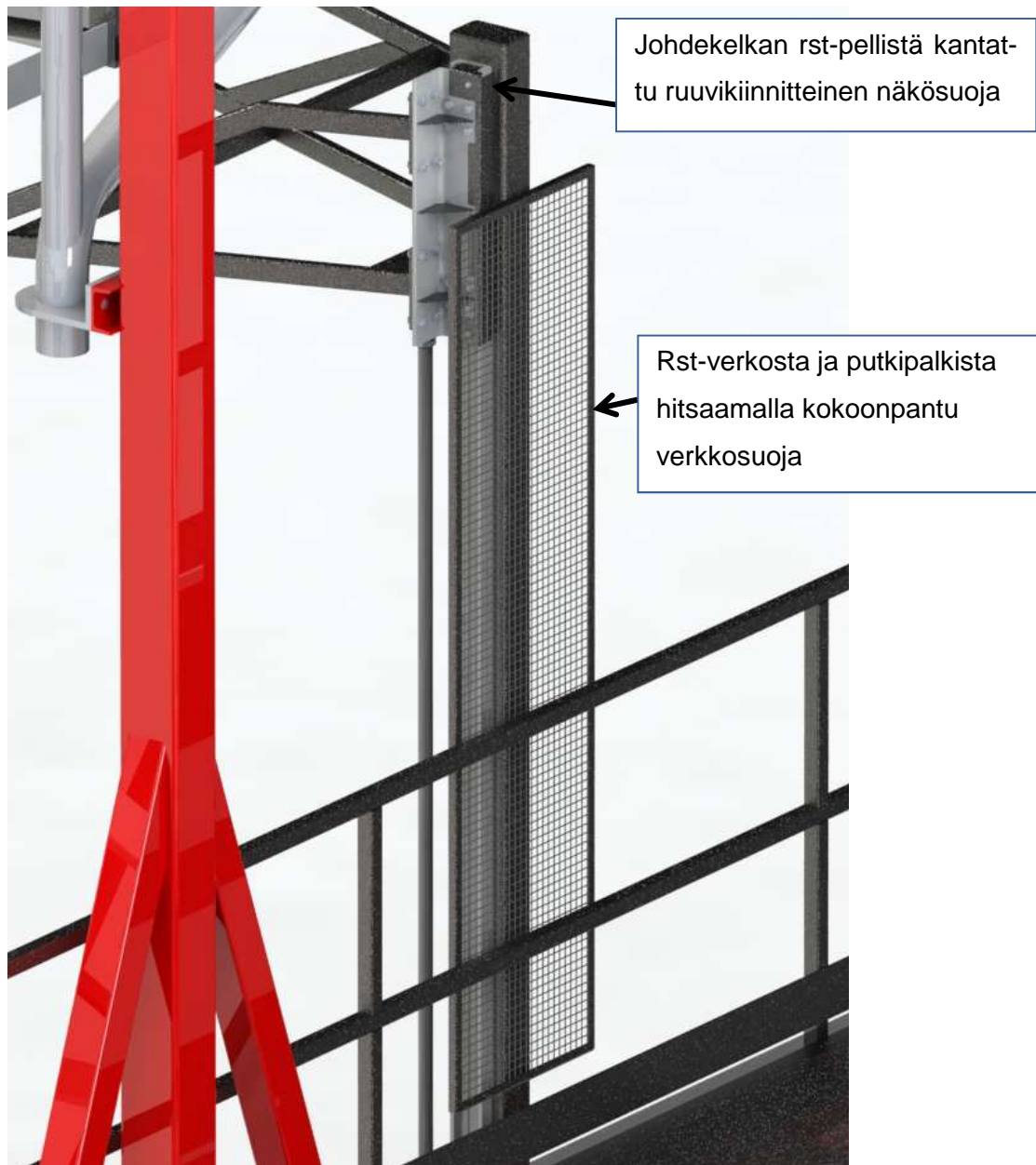
Tulevien kehityskohteiden tärkeys 1
/ 2 / 3 (1 kiireellisin , 0 jo toteutetut)

Toimitusaika (kk/vuosi)	atex-tilaluokka	Kehitettävät asiat	Uusi ratkaisu	Muuta
xxx	asiakkaan määrittämä	Lyhyt kuvaus kehitystarpeista / uuden tuotteen vaatimuksista	Lyhyt kuvaus löydettyistä ratkaisuista ongelmaan sekä vaihe jossa kehitysprojektissa ollaan / työn alla vai valmis	Linkit olennaisiin dokumentteihin, joissa kuvataan tarkasti tarpeet, tehdyt toimenpiteet, projektin vaihe ja saavutetut tulokset

Kuva 25. Tuotekehitystiedon kokoamistaulukon etusivun rakenne (kuvan päällekkäiset osat ovat taulukossa vierekkäiset).

Taulukon muille välilehdille on koottu putoamissuojatyyppi- ja komponenttikohtaista tietoa, jolloin luotettaviksi osoittautuneet sekä käytöstä poistetut komponentit on dokumentoitu. Myöhemmin työn aikana on olennaista esitellä taulukon käyttötarkoitus ja hyödyt putoamissuojien tuotekehityksen parissa toimiville henkilöille Enmacissa. Pelkän dokumentin olemassaolosta ei ole hyötyä, ellei sen käyttötarkoitusta saateta tiedoksi suunnitteluprojektien päälliköille, jotka toimivat putoamissuojien parissa.

Kuten taulukosta 1 nähdään, mikään alkuperäisistä konsepteista ei riitä itsessään toteuttamaan riittäviä ehtoja. Tämän perusteella valittiin yhdistelmä konsepteista 1 ja 3, jotka ovat keskenään yhteensopivia ja toteuttavat kaikki tarvittavat ehdot. Kuvassa 26 on esitetty suojakonseptin rakenne. Ratkaisun yksinkertaisuudesta johtuen pidemmälle vietyä edellä kappaleessa 2.5.2 esitettyä ratkaisuehdotusten pisteytystä ei ole tarpeen käyttää tämänkaltaisissa pienissä suunnittelun alatehtävissä.



Kuva 26. Pystyjohteiden kosketussuojauksen suunnitteluratkaisu (ruuvikiinnitystä ei esitetä kuvassa).

Edellisten kriteerien lisäksi suojauksen suunnittelussa huomioitiin standardin SFS-EN ISO 14120 sekä DIN EN ISO 13857 ohjeistus, jonka mukaan suojukset eivät saa olla ilman työkaluja irrotettavissa eivätkä suojukset saa pysyä paikoillaan ilman kiinnittimiä. Jälkimmäinen standardi määrittäi verkon silmäkoon ja turvaetäisyyden suhteen. 19 mm vapaan aukon mitalla etäisyyden puristusvaaraan tulee olla 120 mm. Molemmat ehdot toteutuvat, kun kiinnitys tehdään ruuvikiinnityksellä, jossa pystypilariin on asennettu niittimutterit ja suojaverkon kehys tuodaan ulospäin johderakenteesta kiinnityslevyjen avulla.

Yksinkertaisuus on taulukon 1 mukaisen tarkastelun vahvuus. Pienehköt suunnittelu-tehtävät voidaan viedä toteutettavan ratkaisun lopulliseen valintaan asti. Suurissa ja monimutkaisissa ratkaisumallien valintatehtävissä taulukon mukainen arviointi rajaa jatkossa tarkasteltavia vaihtoehtoja pienempään lukumäärään ja välttää ylimääräistä työtä vaihtoehtojen jatkotarkastelussa.

6 Putoamissuojan vaakajohteiden suunnittelu ja tuotekehitys

Tämän työn kolmas ja laajin osio oli uuden vaakajohdekonseptin suunnittelu. Tehtävänä oli säiliöauton päällä pituussuunnassa liikutettavan putoamissuojan johderatkaisun kehittäminen. Kuvassa 27 nähtävän ensimmäisen prototyypin johderatkaisun kustannukset olivat putoamissuojan kokonaiskustannukseen nähden suuret ja käytettävyydessä sekä asennettavuudessa havaittiin parannettavaa. Tämän osan tavoitteeksi asetettiin johderatkaisun kustannustason laskeminen noin 30 % ja asennettavuuden sekä vaativien talviolosuhteiden käyttövarmuuden parantaminen. Kuten seuraavassa esitetään, asetetut tavoitteet saavutettiin sekä kustannusten että käyttövarmuuden osalta.



Kuva 27. Vaakajohteilla kuorma-auton kulkusuunnassa liikuteltava putoamissuoja (Enmac Oy 2017).

Työn alussa asetettu tavoite työn laajuudelle oli vaakajohteiden uuden toteutusratkaisun ideointi ja karkea konseptitason suunnittelu valmistuskustannusten arvioimiseksi. Alkuperäinen työn laajuuden tavoite ylitettiin ja suunnittelussa saatettiin loppuun useimpien osien lujuusanalyysit FEM-laskennalla sekä toteutussuunnittelu. Valmistus-

kuvien perusteella tehtiin uuden vaakajohderatkaisun valmistuskustannuksien arvionti ja verrattiin aikaisemman mallin valmistuskustannuksia uuden toteutusratkaisun kustannuksiin.

6.1 Johteiden ja kelkkojen lujuusanalyysi

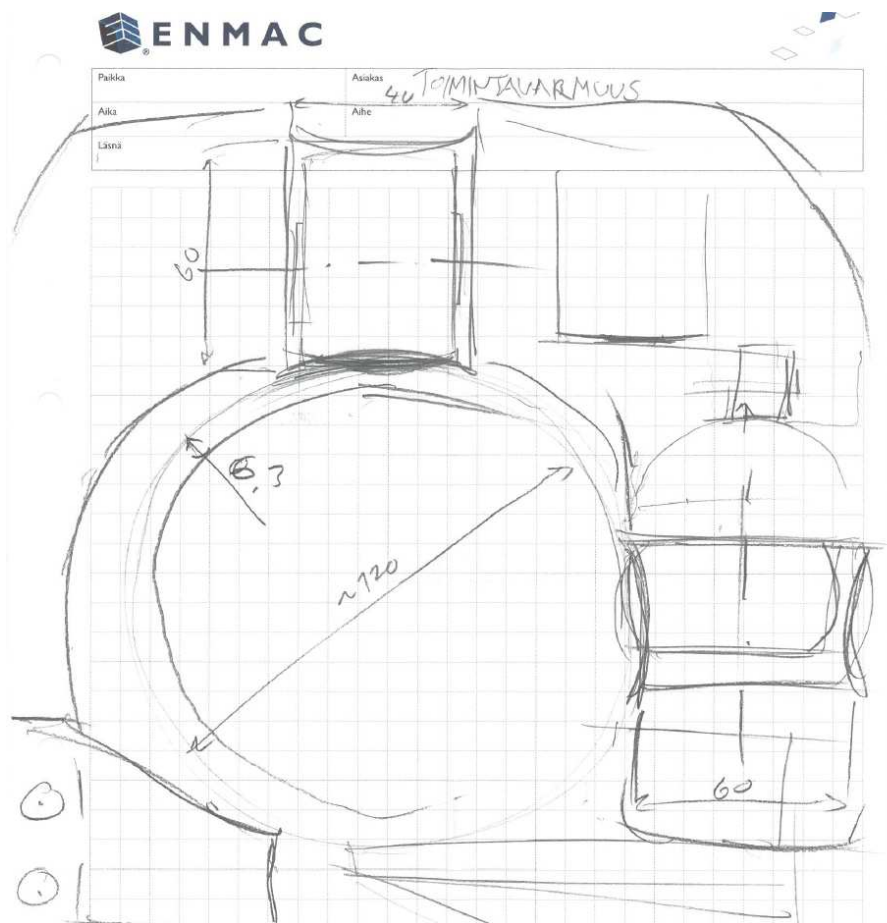
Koneenosien suunnittelu on tehty tässä työssä Solidworks 2016 ohjelmalla (jäljempänä SW2016). Ohjelmiston lisäosa sisältää kohtuullisen monipuolisen FEM (Finite Element Method) -esikäsittelijä–ratkaisija–jälkikäsittelijä -työkalupaketin, jossa on mahdollista käyttää samassa mallissa palkki-, solidi-, ja kuorielementtejä. Tuloksissa on vertailtu laskettuja jännityksiä ja siirtymiä solidi-elementeillä sekä kuorielementeillä verkon tiheyden ja elementtityypin vaikutuksen selvittämiseksi. Kaikki lopulliset samalla geometrialla ja eri elementtityypeillä saadut tulokset ovat jännityksiltään 10 % sisällä. Lisäksi on tehty vertailevia jännitysten suuruusluokkatarkasteluja yksinkertaisella normaalijännityksen laskentakaavalla perustuen poikkipinta-aloihin ja momentteihin. Johteiden taipumat ja jännitykset on laskettu FEMillä palkkielementtejä käyttäen ja tarkistettu analyttisillä palkkikaavoilla.

Koska tämän työn aihe ei ole FEM-analyysit vaan systemaattinen suunnitteluprosessi kokonaisuutena erilaisine työkaluineen ja menetelmineen, esitellään tulokset ja käytetyt elementtityypit sekä reunaehdot hyvin lyhyesti. Olennaista tässäkin työssä on ollut käyttää erilaisia prototyyppisiä (3D-mallit käytettävyyden ja lujuusanalyysineen) suunnittelun alkuvaiheesta lähtien jo konseptisuunnitteluvaiheessa.

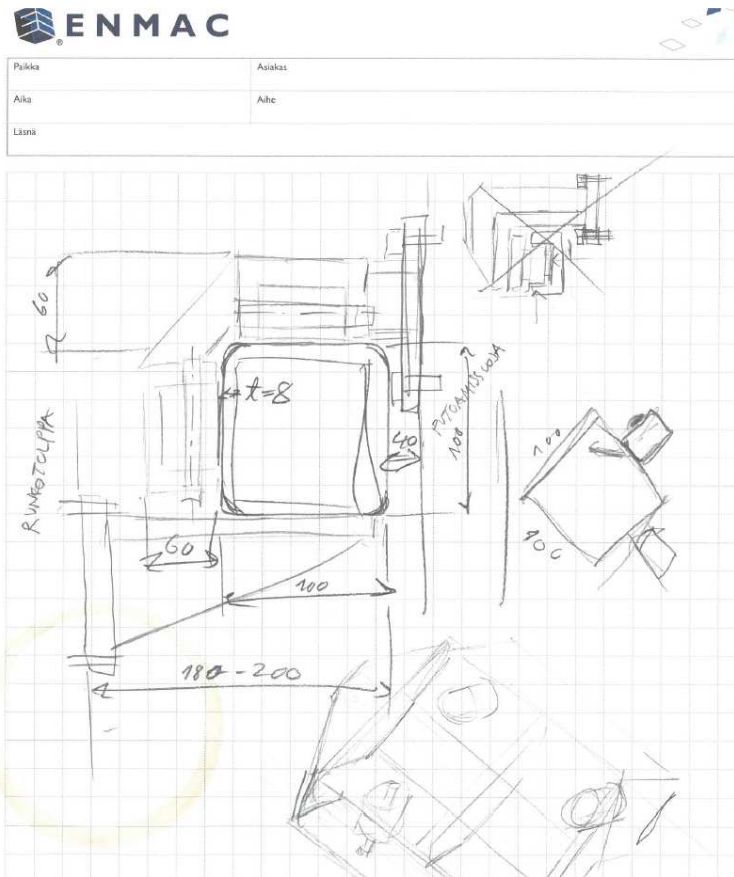
6.1.1 Johteiden käyttövarmuus, jännitykset ja taipumat

Lopullisen johderatkaisun löytymistä edelsi yhden konseptin tarkastelu melko pitkälle sisältäen viiden eri toteutusmahdollisuuden FEM-analyysit. Näitä laskentatuloksia ei esitetä tässä yhteydessä. Tämä johderatkaisu kuitenkin hylättiin mallin heikkouksien tarkastelun jälkeen. Kyseessä oli kaupallinen U-johde -rullakokonaisuus, jonka asentaminen olisi ollut välttämätöntä tässä käyttötarkoituksessa U-kouru avoin puoli ylöspäin. Ulkotiloissa vallitsevista sääoloista johtuen työssä todettiin, että veden kertyminen ja jäätyminen johteen sisälle oli ollut riski erilaisista sääsuojavaihtoehdoista huolimatta. Tämän heikkouden jälkeen siirryttiin tarkastelemaan muita johderatkaisuja, jotka

olisivat myös talvikäytössä varmatoimisia. Oivallus johteen ulkopuolisen rullakelkan käytöstä oli, kuten teoriaosuudessa on kuvattu, intuitiivinen yhtäkkinen oivallus, joka syntyi aiemman pohtimisen ja havaitun heikkouden myötä. Koska erilaisia ulkopuolisia kiskoratkaisuja käytetään ympärivuotisesti monissa sovelluksissa ilman erillistä suojausta, todettiin tällaisen konseptin olevan järkevä. Paperille piirrettyjen luonnosten tarkastelun tuloksena päästiin kiinni päämittoihin hyvin nopeasti (kuvat 28 ja 29).

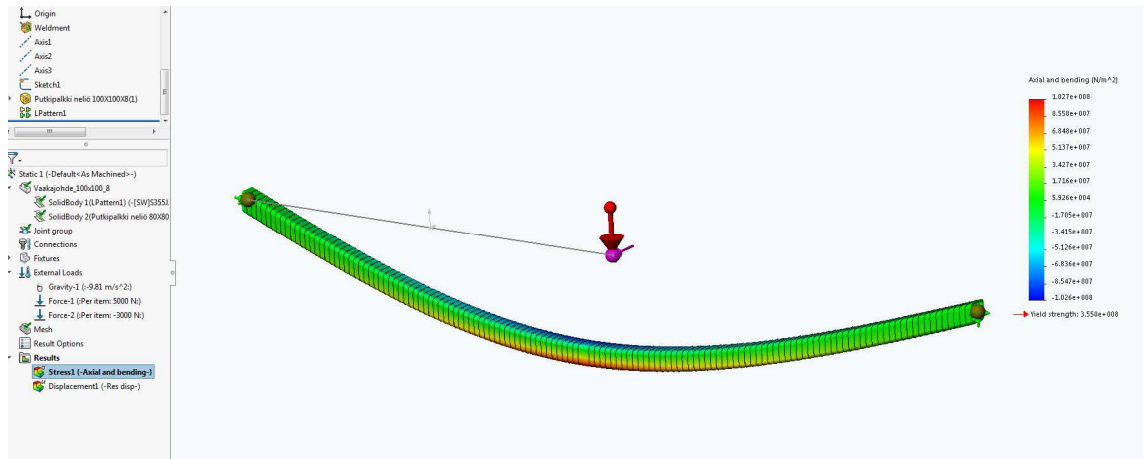


Kuva 28. Luonnos pyöreään putkipalkkijohteen ja teräsrullien asemoinnista sekä päämitoista.

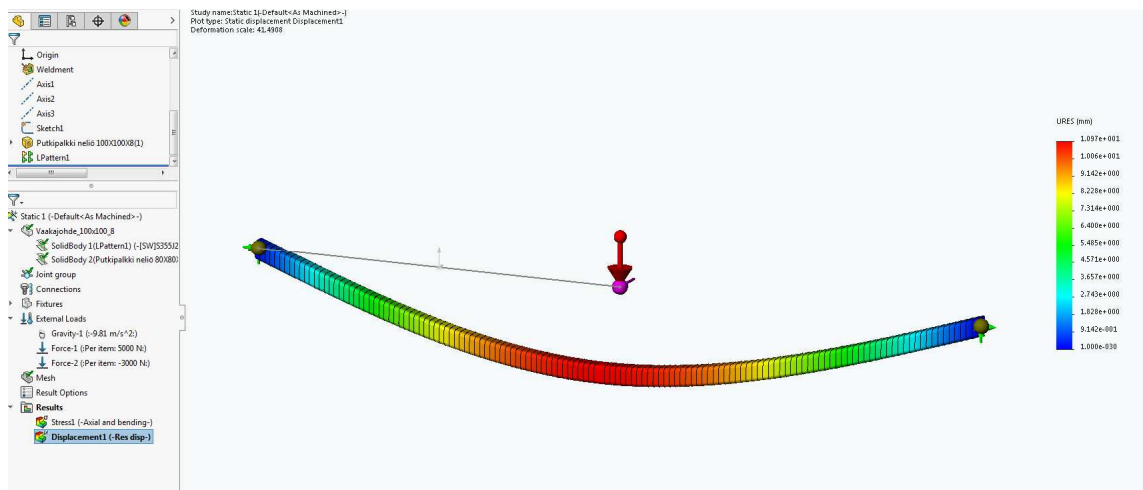


Kuva 29. Luonnos neliöputkipalkkijohteen ja teräsrullien asemoinnista sekä päämitoista.

Vaakasuuntaiset johdepalkit valittiin sekä suurin taipuma että suurin jännitys huomioiden. Putoamissuojan hoitosilta on mielekästä valmistaa 4 m elementeissä, joten sama pituus valittiin myös johde-elementtien pituudeksi ja tukipisteiden väliksi. Laskennan tuloksena saatiin nopeasti selville, että neliöputkipalkki 100 mm x 100 mm x 8 mm on riittävä sekä jäykkyydeltään että kestävyydeltään. Johteisiin kohdistuvat kuormitukset laskettiin käsin luonnoksen avulla määritetyistä vaaka- ja pystysuuntaisista voimista ja putoamissuojan synnyttämästä momentista. Vaakajohteisiin 100 x 100 x 8 mm, 4 m jänneväliillä ja maksimikuormituksella (pystysuunnassa 5000 N ja vaakasuunnassa 3000 N) syntyi suurimmillaan 11 mm taipuma. Kuormituksen aiheuttamasta taivutuksesta seurasi palkkiin vetojännitys 103 MPa kiinnityksen ollessa nivelletty päistään. S355J2H rakenneteräksellä varmuus myötöön nähden on siten kolminkertainen. Jännitys ja taipuma on esitetty alla kuvissa 30 ja 31. Siirtymän (kuva 32) ja jännityksen laskenta käsin tuotti n. 105 MPa vetojännityksen, mikä vastaa hyvin FEM-laskentaa. Mahdollisuuksien mukaan on aina syytä tarkastaa FEM-laskennan tulosten suuruusluokka käsin laskettavilla kaavoilla. Laskentatuloksista tulee aina tarkistaa myös kokonaisvoimat, jolloin varmistetaan, että kuormitukset on syötetty oikein.




Kuva 30. Päistään nivelletyn 4 m pitkän vaakajohdepalkin kuormituksesta seuraava suurin normaalijännitys on 103 MPa.



Kuva 31. Päistään nivelletyn 4 m pitkän vaakajohdepalkin kuormituksesta seuraava taipuma on 11 mm.

$$\begin{aligned}
 F &:= 6000 \text{ N} \\
 l &:= 4000 \text{ mm} \\
 q &:= 0 \frac{\text{N}}{\text{m}} \\
 I &:= 3,66 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \\
 E &:= 210000 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Saranoitu, voima F keskellä



$$\frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} = 10,41 \text{ mm}$$

Kuva 32. Vaakajohteen siirtymän tarkistus 100 x 100 x 8 neliöputkipalkille.

Materiaalin valinta oli alusta lähtien selvää, koska SSAB:n rakenneteräkset valmistetaan vähintään S355J2H lujuusluokkaan. Pintakäsittelyksi on yhtä selvää valita kuumasinkitys, jolloin johdekelkkojen teräsrullien paine ei aiheuta merkittävää pinnan rikkoutumista ja haitallinen korrosio estetään koko putoamissuojan suunnitellulle käyttöille.

6.1.2 Rullakelkkojen jännitykset ja taipumat

Rullakelkkojen tehtävänä on kannatella putoamissuoja vaakajohteilla ja mahdollistaa herkkä liikuttaminen vaakajohteilla. FEM-malleissa ei ole esitetty teräspyöriä, jotka siirtävät putoamissuojan kuormat johteille (\varnothing 65 mm Blickle, 7500 N kantavuus). Yhdelle pyörälle kohdistuva voima on 5000 N. Tällöin varmuuskerroin myötöön nähden on 1,5. Tämä on riittävä, koska pyörän laakerin rikkoutuminen ei johda putoamissuojavaunun irtoamiseen vaakajohteelta. Vain ylemmät kelkat putoamissuojassa (2 kpl / putoamissuoja) kantavat pystysuuntaista kuormaa, 10 000 N jaettuna kahdelle kelkalle. Sekä alempi että ylempi johde kantavat momentista johtuvaa vaakakuormaa, 6000 N yhteensä eli 3000 N kelkkaa kohden.

Pyöriin kohdistuvat voimat on siirretty malliin pyörien akseleita kantaviin teräslevyihin laakerivoimana. Pyörän kiinnitys tehdään vakioratkaisuna M10 osakierreruuvilla. Pyörän aiheuttama pintapaine vaakajohdepalkille laskettiin Tekniikan taulukkokirjan (Valtanen 2016: 368) kohdan 5 (sylinteri + taso) mukaisesti. Maksimi kosketuspaineeksi saatiin 5000 N kuormalla 375 MPa ja keskimääräiseksi kosketuspaineeksi 300 MPa, jolloin myötöraja alittuu riittävästi eikä odotettavissa ole haitallisia muutoksia vaakajohteen pintaan pyörän vaikutuksesta. FEM-laskennalla solidi-elementtejä ja tiheää verkotusta käyttäen varmistettiin myös, ettei 8 mm paksuun 100 mm x 100 mm johdepalkkiin tule laajemmalla alueella haitallisia puristusjännityksiä pyörän aiheuttamasta voimasta.

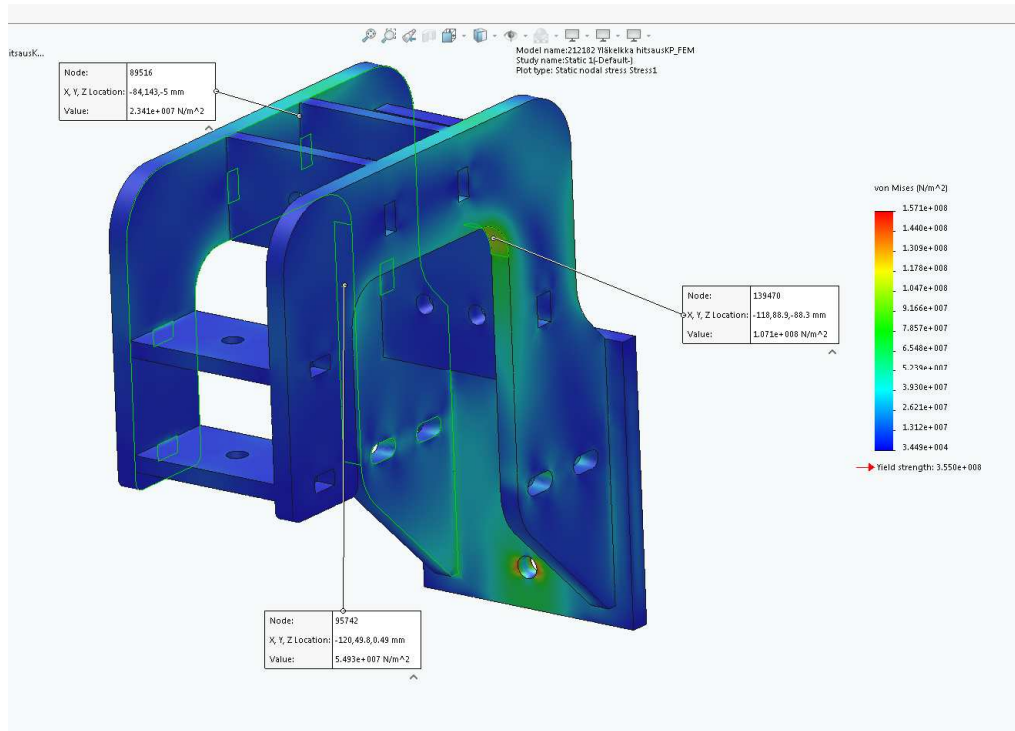
Seuraavassa on esitetty FEM-laskennan tuloksia lopullisille johteiden päällä liikkuville rullakelkkageometrioiden. Tarkasteltavat jännitykset ovat yhdistettyjä Von Misesin vertailujännityksiä, joita voidaan verrata suoraan materiaalin myötörajaan. Suunniteltu materiaali on rakenneteräs S355J2H, jonka myötöraja on 355 MPa. Työn aikana eri geometrioiden laskennassa päästiin vähäisillä muutoksilla 150 MPa maksimijännityksestä 110 MPa jännitykseen levypaksuuksia ja hitsejä muuttamatta. Näin saavutettiin varmuuskertoimeksi 3 ja voidaan olla erittäin tyytyväisiä kriittisen osan kantavuuteen. Rakenteen optimointi pidemmälle ei ole tarpeen, koska valmistus on riittävän yksinkertaista ja kappale verrattain pieni. Hitsit määritettiin tehtäväksi tasalujina, jolloin erilliset laskelmat eivät ole tarpeen. Jälleen hitsien optimointi pienemmiksi kuin a5 molemminpuoliset pienahitsit olisi ollut tarpeetonta. Alustavien valmistuskuvien ja osaluetteloiden perusteella tehtiin kustannusarvio. Detaljisuunnittelussa hiotaan viimeiset valmistustekniset asiat ja varmistetaan sovitteiden ja kiinnitysten toimivuudesta ja riittävästä lujuudesta.

Kuvassa 34 on esitetty viimeiset laskentatulokset parabolisilla solidi-elementeillä. Kuvassa 33 on esitetty laskennassa käytetty tetraedriverkotus, jossa 10 mm levyissä on paksuussuunnassa 3 kerrosta tetraedrejä. Tällä verkon tiheydellä saavutetaan hyvä tarkkuus. Elementtien kokonaismäärä on 120 000 ja solmujen 180 000. Kuvan 33 FEM-tuloksissa suurin jännitys sisäkaareissa on alle 110 MPa. Ruuvikiinnityksen jännityksiin, jotka ovat hieman suuremmat, 160 MPa, ei varmuuskertoimen näkökulmasta kiinnitetä suurempaa huomiota kiinnityksen ollessa kapeammalla alueella kuin todellisessa ruuvikiinnityksessä, jossa oikeaan momenttiin kiristetty ruuvi jakaa ruuvipaineen laajemmalle alueelle aluslevyn välityksellä.

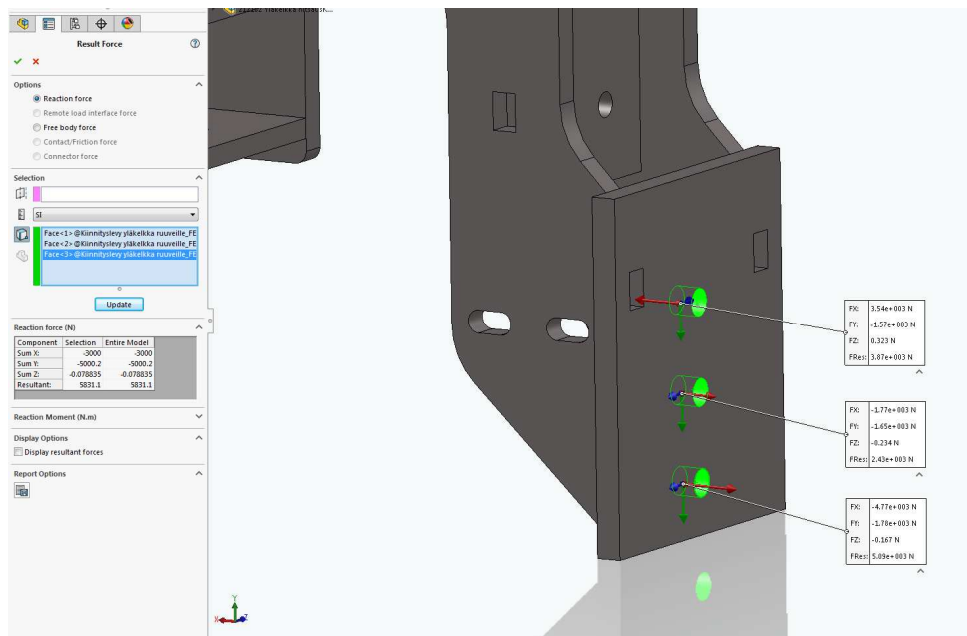
Kuvassa 37 on esitetty vertailun vuoksi saman geometrian laskenta kuorielementeillä (kuva 36). Sisäkaaren suurin jännitys näin tarkasteltuna on 117 MPa (bottom- eli elementin sisäpinnalla). Ero tetraedrisolideilla laskettuun tulokseen on alle 7 %. Tämä varmentaa hyvin tetraedriverkon avulla laskettujen jännitysten arvot.



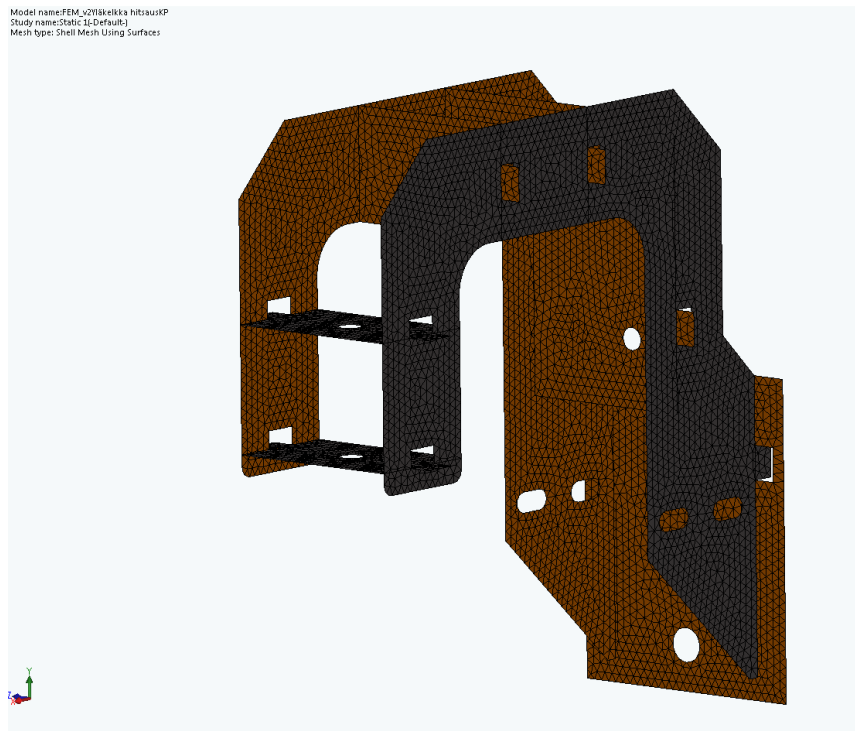
Kuva 33. Kuvassa on esitetty parabolinen tetraedriverkotus, jossa 10 mm levyissä on paksuus-suunnassa 3 kerrosta tetraedrejä. Tällä verkon tiheydellä saavutetaan hyvä tarkkuus. Elementtien kokonaismäärä on 120 000 ja solmujen 180 000.



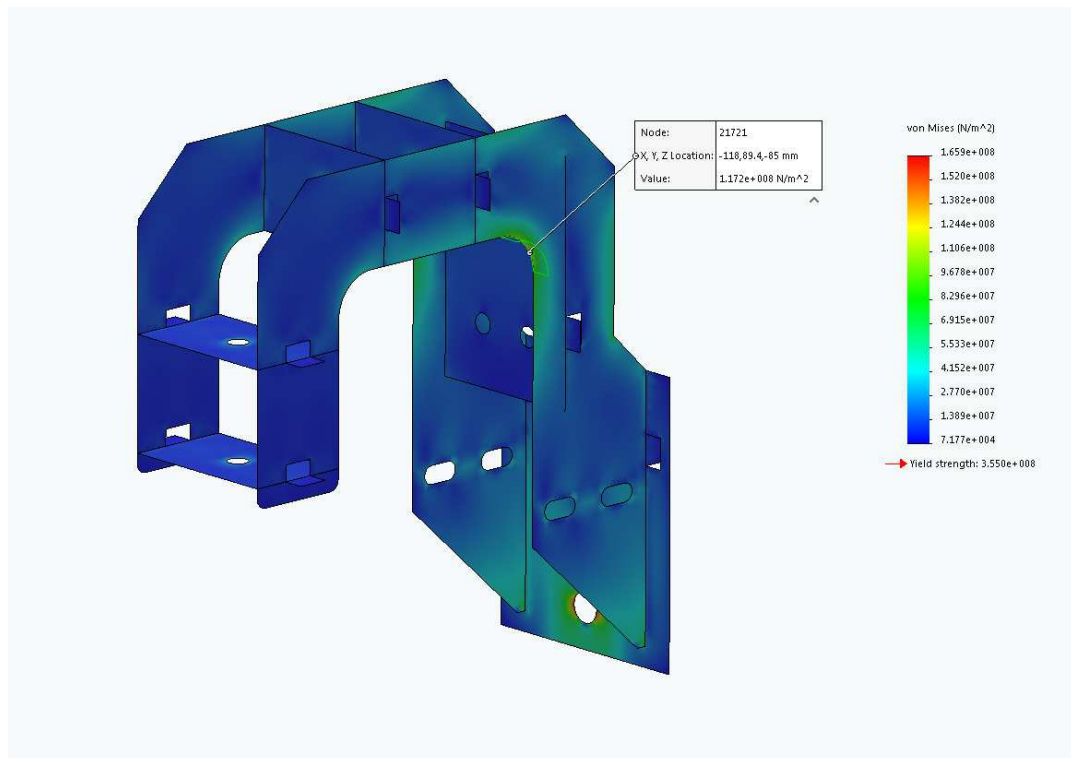
Kuva 34. Suurimmat jännitykset kriittisillä alueilla 110 MPa, hitsaussaumojen kohdalla maksimi 50 MPa. Tasalujat hitsit riittävät hyvin. Kiinnityslevyä ei huomioida tässä yhteydessä, koska ruuvi kiinnitys muutetaan nelireikäiseksi. Ko. alueen jännitykset pienenevät tässä laskennassa esitetystä, lisäksi aluslevyt jakavat ruuvivoiman tasaisemmin pinnalle.



Kuva 35. Ruuvivoimat approksimoituna jäykkinä kiinnityksinä ruuveille. M12 ruuvien myötöraja on 50000 N, eli varmuus on 10-kertainen rasitetuimmalla (alimmalla) ruuvilla. Tarkastelun tarkkuus on riittävä.



Kuva 36. Toisen kertaluvun kuorielementeillä tehty laskentaverkko.



Kuva 37. Jännitykset bottom-pinnalla eli sivulevyissä sisäpinnalla. Suurin jännitys kaarissa 117 MPa. Vrt. solideilla tehty tetraedriverskotus, jossa jännitys oli samassa pisteessä 110 MPa.

6.2 Johteiden toimintavarmuuden analyysi

Yksi työn olennainen tavoite oli johteiden ympärivuotisen toimintavarmuuden ja asennettavuuden arviointi. Toimintavarmuutta arvioitiin seuraavien kriteerien avulla:

- Lumen ja jään mahdollinen kertyminen johteelle
- Kestävyys ja vikaantumisherkkyys
- Huollettavuus
- Liikkeen herkkyys johteella
- ATEX-yhteensopivuus

Heikkojen kohtien etsimisessä havaittiin edelleen mahdollisuus, että neliöputkipalkista valmistetun johteen yläpuoliselle vaakapinnalle voi joissakin sääoloissa kertyä lunta tai vettä. Tästä voi edelleen muodostua jäätä siten, että rullakelkkojen ja suojavaunun herkkä liike johteilla estyy. Tämä ei ole ongelma alajohteessa, jossa rullakelkan kontakti on ainoastaan johteen kyljessä. Tilannetta analysoitiin tarkemmin miettien erilaisia skenaarioita, joissa lumen ja jään kertyminen voisi tuottaa ongelmia.

Ensimmäinen skenaario on lumimyrsky, jossa lunta kertyy joitakin senttimetrejä johdepalkin päälle. Näin syntyvä lumikerros ei pysty muodostamaan sellaista jääkerrosta, joka estäisi herkän liikkeen. On huomattava, että 350 MPa kosketuspaine sulattaa ohuen jääkerroksen helposti. Toinen skenaario on jäinen tihkusade, joka muodostaa muutaman millimetrin paksuisen jääkerroksen johdepalkin päälle. Tällaisella ohuella jääkerroksella ei ole käytännön merkitystä rullien herkkään liikkeeseen ja kerros murtuu kevyesti pyörän päällä. Kolmas skenaario on kostea räntälumi, joka kerääntyy enimmillään 10 cm kerrokseksi. Tällainen kerros siirtyy herkästi pois johteen päältä, kun yläkelkan sääsuoja työntää enimmäkseen lumet pois johteen pinnalta. Näillä perusteilla voidaan todeta, että johderatkaisu ei ole herkkä lumen ja jään esiintymiselle Suomen olosuhteissa.

Tässä työssä nähtiin hieman tarpeetonta vaivaa viemällä joidenkin osien osalta suunnittelua jopa detaljisuunnitteluvaiheeseen ennen toteutusratkaisujen heikkojen kohtien etsimistä. Tällaisia ovat kiinnikkeet, joilla vaakajohde kiinnitetään hoitotason pystypilareihin. Periaateratkaisujen etsiminen ja sen tavan löytäminen, jolla johde-elementit kohdistetaan tarkasti peräkkäin, olisi ollut riittävä suunnittelun taso. Samoin erilaisten johderatkaisujen heikkojen kohtien arvioinnin olisi voinut tehdä hieman aikaisemmassa vaiheessa. Asiasta on hyvä ottaa oppia seuraavaa suunnittelutehtävää varten ja hyödyntää tarkemmin tämän työn teoriaosuudessa esiteltyä systemaattista prosessia suunnittelussa.

ATEX-yhteensopivuutta arvioitaessa todettiin, että yläkelkan varmuuslevy, joka ottaa yläjohteeseen kiinni vikatilanteessa, on väärää muovimateriaalia. Tämä on helppo korjata. Muovin tulee olla sähköä riittävästi johtavaa ESD-materiaalia, joka ei synnytä missään olosuhteissa staattista kipinää. Osa voidaan valmistaa myös teräksestä.

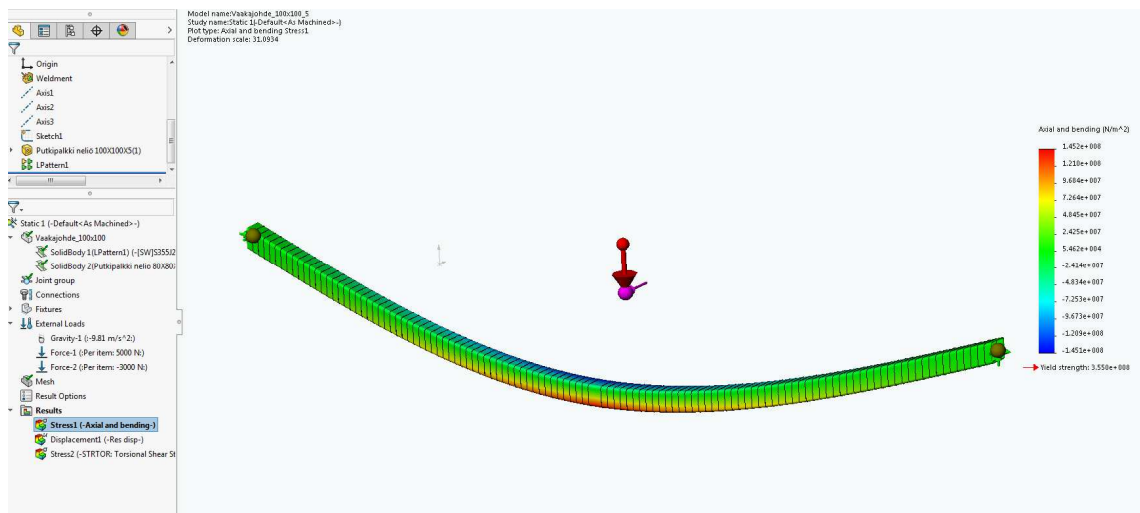
6.3 Putoamissuojan vaakajohteiden kustannusten arviointi ja optimointi

Kustannusten arvioinnissa ei ollut käytettävissä aivan tarkkoja tietoja aiemman vaakajohde-rullakelkka -konstruktion kustannuksista. Suuntaa antavien arvioiden tekeminen on kuitenkin mahdollista näiden tietojen perusteella. Uusi konstruktio on johteen osalta itsekantava ja siten käsittää vähemmän osia ja on helpommin asennettavissa kuin aiempi malli. Alkuperäisen johteen suhteellisen kustannuksen ollessa 100 yksikköä /putoamissuoja on uusi johderatkaisu arviolta 60–70 yksikköä putoamissuojaa kohden. Alkuperäisten rullakelkkojen (4 kpl / putoamissuoja) suhteellinen kustannus oli 25 yksikköä / putoamissuoja ja uusien kelkkojen kustannus noin 25–30 yksikköä / putoamissuoja. Yhteensä alkuperäisen kustannuksen ollessa 125 yksikköä, on uuden konstruktion kustannusarvio johteiden ja rullakelkkojen osalta 90 yksikköä eli noin 30 % edullisempi. Kun huomioidaan lisäksi asennuksessa saatava kustannussäästö, on kyse huomattavasta säästöstä vaakajohteilla liikkuvan putoamissuojan kokonaiskustannuksissa. Toimintavarmuuden ja asennettavuuden parantaminen taas tuo tuotteelle lisäarvoa mahdollisten käyttöhäiriöiden määrän ollessa aiempaa pienempi.

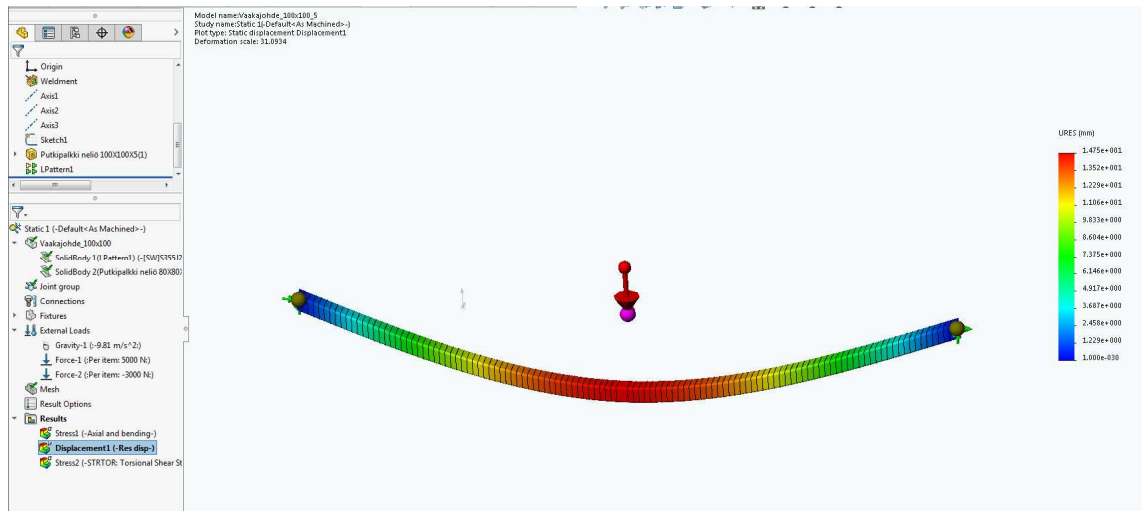
Mikäli kysymyksessä olisi sarjatuotannossa valmistettava tuote, olisi välttämätöntä optimoida rakenteita kevyemmiksi ja vielä valmistusystävällisemmiksi. Joka tapauksessa pienellä vaivalla on mahdollista keventää rakenteita. Varmuuskertoisia olisi varaa las-

kea turvallisuutta ja varmatoimisuutta vaarantamatta kolminkertaisista noin kaksinkertaisiksi. Rullakelkkojen hinnassa tällä olisi jonkinlainen vaikutus, muttei kokonaisuutta ajatellen kovin suuri. Vaakajohteiden osalta palkkikoon pienentäminen on mahdollista ja järkevää. Suurin taipuma määrittää putoamissuojan vakauden ja siten käytettävyyden. Johdepalkin taipuma voisi kuitenkin pystysuunnassa olla 15 mm aiemmin lasketun 10 mm sijaan. Varmuuskerroin säilyisi suuruudeltaan edelleen yli kahden. Maksimi palkin kallistuma olisi 10 mm / m, joka tarkoittaa kaltevuuskulmaa 0,56°. Tällöin 5000 N normaalivoiman vaakasuuntainen komponentti olisi 50 N, mikä ei ole liian suuri lisäkuorma työnnettäessä suojavaunua liikkeelle.

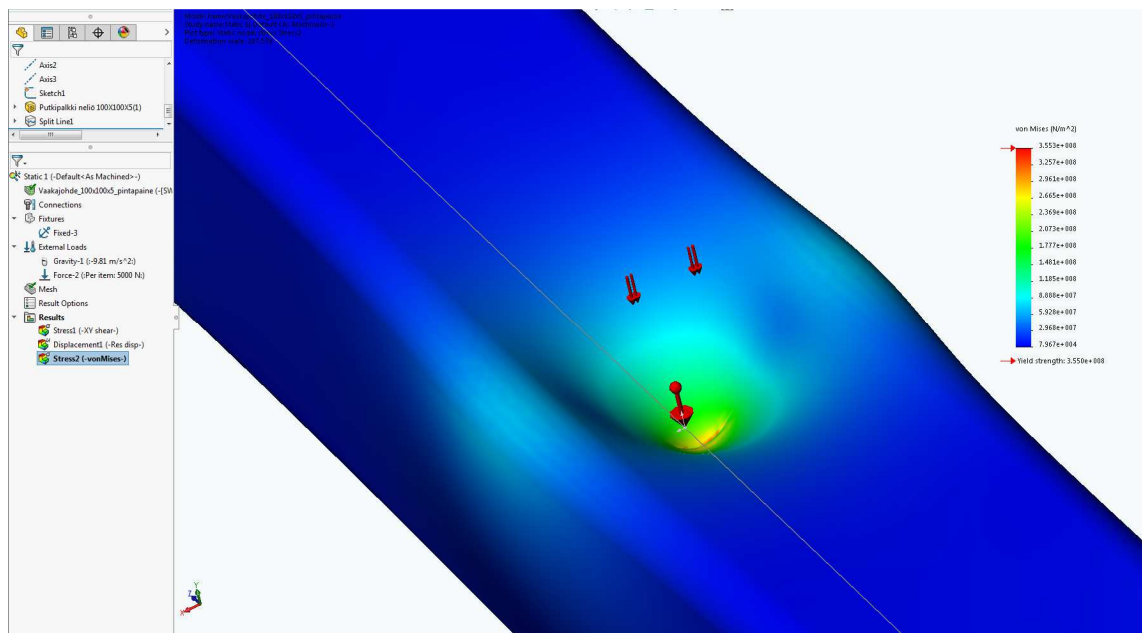
FEM-laskennan perusteella nähdään, että 100 x 100 x 5 neliöputkipalkki kantaa rakenteen 2,4 varmuuskertoimella ja taipumalla 15 mm (kuvat 38 ja 39). Koska johdepalkin kustannus on riippuvainen pääasiassa materiaalin painosta (teräs + sinkitys), synnyttää 35 % pudotus painossa edelleen 25–30 % johteiden kustannuksen laskun. Myös teräspyörän aiheuttaman pintapaineen 350 MPa vaikutus 5 mm paksun palkin pinnan mahdolliseen deformaatioon tarkistettiin FEM-menetelmällä. Tuloksista havaitaan, että teräspyörän synnyttämä kosketuspaine ei aiheuta pysyviä muodonmuutoksia palkkiin (kuva 39). Suurin elastinen painuma pyörän alla on 250 µm, mikä ei ole ongelma.



Kuva 38. Päistään nivelletyn 4 m pitkän 100 x 100 x 5 vaakajohdepalkin kuormituksesta seuraava suurin normaalijännitys on 145 MPa. Varmuuskerroin myötöön nähden on 2,4.



Kuva 39. Päistään nivelletyn 4 m pitkän 100 x 100 x 5 vaakajohdepalkin kuormituksesta seuraava suurin taipuma on 15 mm.



Kuva 40. 100 x 100 x 5 vaakajohdepalkin pintaan teräspyörästä kohdistuva voima ei aiheuta deformaatioita. Suurin elastinen painautuma on 250 μm .

7 Yhteenveto

Työ keskittyi Enmac Oy:n omina tuotteina valmistettavien putoamissuojien tuotesuunnittelun ja -kehityksen ympärille huomioiden laajasti tuotekehitysprosessille ominaiset piirteet. Työssä käsiteltiin teoriaa tavanomaista laajemmin ja monitahoisemmin, koska tuotekehitys ja tuotesuunnittelu on laaja-alainen kokonaisuus. Tuloksellinen työskentely tällä kentällä edellyttää vankkaa teoriapohjaa sekä käsiteltävästä tuotteesta että kehitystyössä sovellettavasta metodologiasta.

Työ jaettiin kolmeen tehtävään; tuotekehityksen sisäisen dokumentointijärjestelmän luomiseen sekä kahteen konsepti / toteutussuunnittelutehtävään. Tulokulmaksi valittiin saksalaisten insinöörien ja VDI:n kehittämä systemaattinen lähestymistapa tuotesuunnitteluun. Kirjallisuudesta löydettyjä metodologioita ja työkaluja esiteltiin teoriaosuudessa sekä hyödynnettiin tämän työn eri tehtävien toteuttamisessa. Tavoitteina oli toimivien ratkaisujen löytäminen konseptitasolla kaikkiin osa-alueisiin. Painotus oli mekaniikkasuunnittelun osalta sekä valmistuskustannusten alentamisessa että käyttövarmuuden ja asennettavuuden parantamisessa. Enmac Oy:stä saadun palautteen mukaan kaikki asetetut tavoitteet täyttyivät erinomaisesti. Työn viime metreillä tehty rakenteen optimointi, suojavaunun vaakajohteiden palkkien seinämävahvuuden pienentäminen 35 %, tuo huomattavan lisän kustannussäästöön. Lopputuloksena johteet ovat valmistuskustannuksiltaan noin 50 % edellistä mallia edullisemmat.

Työn aikana vahvistuivat aiemmin muotoutuneet käsitykset tuotesuunnittelussa olennaisista asioista. Järjestelmällisen lähestymistavan aiempaa tehokkaampi hyödyntäminen tuo hyviä tuloksia ja nopeuttaa suunnitteluprosessia. Tämä on seurausta siitä, että suunnitteluprosessin läpi pidetään jatkuvasti mielessä olennaiset kriteerit ja edetään yleisestä tasosta yksityiskohtaiseen tasoon nopeasti, samalla rajaten epäolennaiset tekijät ulkopuolelle. Systemaattiseen lähestymistapaan kuuluu myös jatkuva ratkaisuehdotusten arviointi asetettuja kriteerejä vasten, jolloin toimimattomat ratkaisuehdotukset karsitaan pois aikaisessa vaiheessa. Työssä opittiin myös virheistä; vaakajohde-ratkaisun osalta vietiin suunnittelussa tarpeettoman pitkälle kaupallista johdetta hyödyntävää konseptia, jonka heikkoudeksi kuitenkin havaittiin epäluotettavuus talvisissa sääolosuhteissa.

Toimintatapa, joka vahvistui työn aikana, oli iterointi suunnittelun eri vaiheiden välillä. Kustannustehokkaan ja luotettavan toteutusratkaisun löytyminen vaati konseptisuunnit-

teluvaiheen jälkeen usein useampia iteraatiokierroksia toteutussuunnittelussa. Hyvä esimerkki on vaakajohdepalkkien mitoitus, jossa alun perin oli ajateltu 10 mm taipuman olevan suurin soveltuva arvo. Kyseinen rajoite oli kuitenkin vain työn alussa tehty pikainen arvio. Lisälaskelmien ja päätelmien jälkeen todettiin, että vaakapalkin suurin taipuma voi hyvin olla 15 mm. Näin oli mahdollista pienentää palkin seinämävahvuutta 35 % ja saavuttaa samalla huomattava lisä kustannussäästöön.

Lähteet

2006/42/EY. 2006. Konedirektiivi. Euroopan parlamentti ja neuvosto.

Enmac Oy. 2017. Putoamissuojaratkaisut. Verkkodokumentti.

<<https://www.ensuredsafety.fi/>> Luettu 14.9.2017.

ISO 13857. 2008. Konesuojien turvaetäisyydet. International Organization for Standardization.

Omron. Standardien hierarkia. 2017. Verkkodokumentti. <http://www.omron-ap.com/service_support/technical_guide/safety_component/safety_requirements.asp>

Luettu 1.8.2017.

Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K. 2007. Engineering Design - A Systematic Approach. Berlin: Springer.

Pekkarinen, S., Niemelä, A. 2011. Positiivinen psykologia ja yrittäjäyys. Jyväskylä: Jyväskylän yliopiston kauppakorkeakoulu.

Pickert, K. 2014. The Mindful Revolution. Time-Magazine, helmikuu / nro 3.

SFS-EN ISO 12100. 2010. koneiden turvallisuus – suunnitteluperiaatteet – riskien arviointi ja vähentäminen. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN ISO 14122 1-4. 2016. Koneiden kiinteät kulkutiet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN ISO 14120. 2016. Koneturvallisuus. Suojukset. Kiinteiden ja avattavien suojusten suunnittelun ja rakenteen yleiset periaatteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN ISO 80079-36:2016 ja 80079-37:2016. 2016. Räjähdyksvaarallisten tilojen muut kuin sähkölaitteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

Työterveyslaitos. 2017. Aivojen hyvinvointi. Verkkodokumentti.
<<https://www.ttl.fi/tyontekija/aivot-tyossa/aivojen-hyvinvointi/>> Luettu 9.9.2017

Työterveyslaitos. 2017. Mitä on resilienssi? Verkkodokumentti.
<<https://www.ttl.fi/tyoyhteiso/tyon-kehittaminen/mita-on-resilienssi/>> Luettu 14.9.2017.

Ulrich, K. & Eppinger, S. 1995. Product Design and Development. New York: McGraw-Hill Inc.

Valtanen, E. 2016. Tekniikan taulukkokirja. Hyvinkää: Genenis-Kirjat Oy.

VDI/Wallace. 1987. VDI Design Handbook 2221. Systematic Approach to the Design of Technical Systems and Products. English translation. VDI.

Williams, M. & Kuyken W. 2012. Mindfulness-based cognitive therapy. The British Journal of Psychiatry 200.

