

Ultralujat teräkset mekaniikkasuunnittelussa

DFMA-prosessin soveltaminen

Henri Niemi



**KERTTU SAALASTI
INSTITUUTTI**

**OULUN
YLIOPISTO**

Henri Niemi

ULTRALUJAT TERÄKSET MEKANIKKASUUNNITTELUSSA
DFMA-prosessin soveltaminen

OULUN YLIOPISTO
Kerttu Saalasti Instituutin julkaisuja
Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT)

ISBN 978-952-62-2016-1 (painettu)
ISBN 978-952-62-2017-8 (elektroninen)

ISSN 2489-3501 (painettu)

Henri Niemi

Ultralujat teräkset mekaniikkasuunnittelussa, DFMA-prosessin soveltaminen

Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutti

Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) -ryhmä

Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutin julkaisuja 5/2018

Nivala

Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa selvitettiin, millaisen suunnitteluprosessin avulla ultralujien terästen ominaisuudet voidaan muuntaa parhaiten tuotteiden ominaisuuksiksi. Aluksi määriteltiin työssä käytettävä ultralujan teräksen käsite ja sen kattamat terästyypit, joiden tärkeimmät ominaisuudet esiteltiin. Ultralujien terästen sovelluksina käsiteltiin kennolevyjä ja rakenneputkea: tärkeimpänä näkökulmana oli niiden soveltuvuus keveiden ja lujien rakenteiden toteuttamiseen. Lisäksi käsiteltiin tärkeimpiä lujuus- ja materiaali-teknisiä näkökulmia. Suunnittelutyön toteuttamistavan ja eri suunnitteluvaiheiden järjestyksen merkitystä käsiteltiin tuotteiden valmistettavuuden näkökulmasta: tieteellisenä taustana aiheeseen esiteltiin valmistus- ja kokoonpanoystävällisen suunnittelun periaate (DFMA, Design For Manufacture and Assembly). Myös tietokoneavusteisia suunnittelutyökaluja sekä niiltä vaadittavia ominaisuuksia käsiteltiin. Lisäksi tutkimuksessa esiteltiin uusi DFMA-teoriaan perustuva suunnitteluprosessi, joka on kehitetty helpottamaan ultralujien terästen ominaisuuksien ja erityispiirteiden huomioimista suunnittelutyössä. Laajennetuksi DFMA-prosessiksi nimitetyn menettelytavan soveltamista havainnollistettiin työn lopussa tapausesimerkin avulla.

Tämä tutkimus on tehty Meripohjolan uudistuva metalli- ja konepajateollisuus (MUMK) -hankkeessa. Hankkeen on pääosin rahoittanut Euroopan Aluekehitysrahasto EAKR. Lisäksi hanketta on rahoittanut Raahen kaupunki. Hankkeen koordinoijana toimi Raahen seudun yrityspalvelut.

Asiasanat: ultraluja teräs, DFMA, suunnitteluprosessi

Henri Niemi

Ultra High Strength Steels in mechanical design, The application of a DFMA-process

University of Oulu, Kerttu Saalasti Institute
Future Manufacturing Technologies (FMT) group

Publication of Kerttu Saalasti Institute of the University of Oulu 5/2018
Nivala, Finland

Abstract

In this study it was clarified what kind of design process can be best used to transform the properties of Ultra High Strength Steel (UHSS) as the properties of the products. The concept of UHSS, which is used in the work and the steel types covered by it, were defined first. Also the most important properties of UHSS were presented. Cell plates and structural pipes were handled as the applications of UHSS: the most important point of view was their suitability for carrying out light and firm structures. Furthermore, most important aspects of mechanics of materials and materials technology were discussed. The significance of the implementation method of the design work and of the order of the different design stages was discussed from the point of view of the easy manufacturing of products. The DFMA (Design For Manufacture and Assembly) design principle was presented as a scientific background for the subject. Also computer aided design tools and the properties which are required of them were discussed. Furthermore, a new planning process, which is based on the DFMA theory and has been developed to help paying attention for the properties and special characteristics of UHSS materials in the design work, was presented in the study. The application of the procedure that has been named to a DFMA process was demonstrated at the end of the work with the help of the case example.

This study has been conducted in the Meripohjolan uudistuva metalli- ja konepajateollisuus (MUMK) project. The project has mainly been financed by Euroopan Aluekehitysrahasto EAKR. Furthermore, the project has been financed by the town of Raahen. Raahen seudun yrityspalvelut served as the coordinator of the project.

Keywords: Ultra High Strength Steel, DFMA, design process

Lyhenteet

CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CNC	Computerized Numerical Control
CP	Complex Phase
DFA	Design For Assembly
DFM	Design For Manufacture
DFMA	Design For Manufacture and Assembly
FEA	Finite Element Analysis
FEM	Finite Element Method
MAG	Metal Active Gas
MPa	Megapascal
MS	Martensitic
NRC	National Rally Car
TIG	Tungsten Inert Gas
TWIP	Twinning Induced Plasticity
UHSS	Ultra High Strength Steel
WRC	World Rally Championship

Sisälllys

Lyhenteet	5
1 Johdanto	9
2 Ultralujat teräkset	11
2.1 Rakenne- ja kulutusteräket	11
2.2 Ajoneuvoteollisuuden teräket	11
2.3 Ruostumattomat teräket	12
3 Kevyet ja lujat teräsrakenteet	13
3.1 Materiaalin sijoittaminen	13
3.2 Stabiuteetin säilyttäminen	13
3.3 Väsymisvaurion estäminen	15
3.4 Rakenne-esimerkkejä	15
4 Valmistus- ja kokoonpanoystävällinen suunnittelu	17
4.1 Perinteinen tuotesuunnittelutapa	17
4.2 DFMA-suunnittelumenetelmä	17
4.3 Tietokoneavusteinen suunnittelu	20
4.4 Laajennettu DFMA-prosessi	21
5 Laajennetun DFMA-prosessin soveltaminen	23
5.1 Konseptisuunnittelu	23
5.1.1 Tuotevaatimukset	23
5.1.2 Rakennevaihtoehtojen etsiminen	24
5.2 DFA-analyysi	31
5.3 Kehitettävien suunnitteluehdotusten valitseminen	32
5.4 Materiaalien ja valmistusmenetelmien valinta	32
5.5 Yksityiskohtainen suunnittelu	33
5.5.1 DFM-valmistussuunnittelu	33
5.5.2 Rakenteiden lujuusoptimointi	33
5.6 Valmistus	34
Yhteenveto	35
Kiitokset	36
Lähdeluettelo	37

Kuva 1. Poikkileikkauksen keventäminen (mukaillen SSAB Ab 2017).	13
Kuva 2. Teräksen lujuuden vaikutus nurjahdusjännitykseen (Kiuru 2012).	14
Kuva 3. Kennolevytyypit (mukaillen Kujala et al. 2003).	16
Kuva 4. DFMA-suunnittelun eteneminen (mukaillen Boothroyd et al. 1994).	18
Kuva 5. DFMA:n vaikutus tuotekehitysaikaan (mukaillen Boothroyd et al. 1994).	20
Kuva 6. Laajennettu DFMA-prosessi (mukaillen Iso-Junno et al. 2018).	22
Kuva 7. NRC-auton rungon varhainen luonnos (mukaillen Mäkikangas ja Jokelainen 2018).	25
Kuva 8. Keskirungon luonnoksia (mukaillen Mäkikangas ja Jokelainen 2018).	25

Kuva 9. Etuapurungon suunnittelun lähtökohta (mukaillen Mäkikangas ja Jokelainen 2018).	26
Kuva 10. Etuapurungon FEM-tarkastelu (mukaillen Mäkikangas ja Jokelainen 2018).	27
Kuva 11. Taka-apurungon suunnittelun lähtökohta (mukaillen Mäntyjärvi 2017a).	27
Kuva 12. Taka-apurungon kehittyminen (mukaillen Mäkikangas ja Jokelainen 2018).	28
Kuva 13. Kartioliitoksen toiminta (mukaillen Iso-Junno 2018).	28
Kuva 14. Uuden kennolevytyypin toteutusvaihtoehdot (mukaillen Mäntyjärvi et al. 2017b).	29
Kuva 15. Kennolevyosien liittämisehdotukset (mukaillen Mäntyjärvi et al. 2017b).	29
Kuva 16. Rakenneputken valmistusvaihtoehdot (mukaillen Mäntyjärvi et al. 2017b).	30
Kuva 17. Putkiosien liittämisehdotukset (mukaillen Mäntyjärvi et al. 2017b).	31
Kuva 18. Taka-apurungon yksityiskohtainen suunnittelu (mukaillen Mäntyjärvi 2017a).	33
Kuva 19. Taka-apurungon lujuuslaskenta (mukaillen Mäntyjärvi 2018).	34
Kuva 20. NRC-ralliauton runko valmiina (Iso-Junno et al. 2018).	34

1 Johdanto

Terästuotteiden valmistuksessa ja käytössä taloudellisuus- sekä ympäristönäkökulmat ovat yhä tärkeämpiä. Yleinen käytännön tavoite on tuotteiden massan pienentäminen, mihin voidaan päästä vähentämällä tuotteissa käytetyn teräksen määrää. Teräksen määrän vähentäminen täytyy kompensoida joko teräksen lujuutta nostamalla tai sijoittamalla materiaali rakenteeseen siten, että materiaalin ominaisuudet tulevat hyödynnettyiksi mahdollisimman hyvin. Myötölujuudeltaan 300 – 400 megapascaliin yltävien perinteisten rakenneterästen rinnalle on kehitetty suuri joukko erityisen lujia teräslaatuja, joita nimitetään yleisesti ultralujiksi teräksiksi. Niitä käyttämällä voidaan toteuttaa keveitä ja suorituskykyisiä teräsrakenteita.

Lujemman teräksen käyttöön ei voida kuitenkaan siirtyä pelkästään materiaali vaihtamalla, vaan on tunnettava ja tarvittaessa selvitettävä muuttuneiden materiaaliominaisuuksien ja poikkileikkausmittojen vaikutus rakenteiden toimintaan ja turvallisuuteen. Esimerkiksi teräksen kimmomoduuli ei riipu lujuudesta, joten ultralujilla teräksillä muodonmuutokset voivat tulla suuriksi. Lujempi teräslaatu ei toisaalta merkitse automaattisesti parempaa väsymiskestävyyttä. Yleisesti ultralujilla teräksillä korostuu tarve estää väsymisvauriot ja stabiiliteetin menetys.

Materiaali- ja rakenneteknisten seikkojen lisäksi on tarpeen kiinnittää erityistä huomiota suunnittelutyön toteutustapaan, jotta voidaan hyödyntää ultralujien terästen koko potentiaali. Erityisiä tavoitteita ovat suunnittelutyön johdonmukaisuus ja eri vaiheiden oikea-aikaisuus: näiden tavoitteiden saavuttaminen näkyy tuotteessa tarkoituksenmukaisena suorituskykynä, korkeana laatuna ja valmistusvaiheen kustannustehokkuutena. Ohjenuorana voidaan käyttää valmistus- ja kokoonpanoystävällisen suunnittelun periaatteita ja toimintatapoja (Design For Manufacture and Assembly, DFMA). Erityisesti lujia teräksiä varten on kehitetty uusi toimintatapa, jota nimitetään laajennetuksi DFMA-prosessiksi. Laajennettua DFMA-prosessia voidaan soveltaa esitetyn suunnitteluesimerkin avulla.

Tämän tutkimusraportin tarkoituksena on tarjota kootusti tietoa, joka helpottaa ja nopeuttaa ultralujista teräksistä valmistettavien tuotteiden suunnittelua ja näin edistää nykyaikaisten teräsmateriaalien ominaisuuksien täysimittaista hyödyntämistä konepajatuotteissa. Raportti on suunnattu erityisesti sellaisille Pohjois-Suomessa toimiville metalli- ja konepaja-alan yrityksille, joiden toiminnassa ultralujat teräkset eivät vielä ole merkittävässä asemassa.

Tutkimus on tehty osana Meripohjolan uudistuva metalli- ja konepajateollisuus -hanketta, joka on Raahen seudun yrityspalvelut -yksikön koordinoima ja pääosin Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) rahoittama. Lisäksi hanketta on rahoittanut Raahen kaupunki. Tutkimuksessa on hyödynnetty myös ULTRA – Uutta liiketoimintaa järjestelmätason tuote- ja palveluratkaisuista -hankkeen aineistoa. Tutkimuksen tuloksia ja tekstiä on hyödynnetty osana kirjoittajan opinnäytetyötä ”DFMA-prosessi lujista teräksistä valmistettujen keveiden rakenteiden suunnittelussa”.

2 Ultralujat teräkset

Eri tahot määrittelevät ultralujan teräksen eri tavoin. Tässä teoksessa käytetään Lukkarin, Kyröläisen ja Kaupin (2016) esittämää määritelmää, jonka mukaan ultralujan teräksen myötölujuus ylittää 900 MPa. Toinen rajausta tässä käsiteltäville teräslaaduilla on se, että mekaaniset ominaisuudet ovat valmiina toimitustilassa eli valmistettuja osia ja tuotteita ei ole tarpeen esimerkiksi lämpökäsitellä lopullisen lujuuden saavuttamiseksi. Näin määriteltynä ultralujia teräksiä on löydettävissä rakenne- ja kulutusterästen, ajoneuvoteollisuuden terästen sekä ruostumattomien terästen joukosta.

2.1 Rakenne- ja kulutusteräkset

Ultralujat rakenne- ja kulutusteräkset kuuluvat lujien hitsattavien terästen ryhmään. Ryhmän teräkset voidaan jaotella valmistusmenetelmän mukaan seuraavasti:

- normalisoidut hienoraeteräkset
- termomekaanisesti valssatut hienoraeteräkset
- karkaistut teräkset
- nuorrutetut teräkset
- muut lujat hitsattavat teräkset. (MET 2001)

Useimpien lujien hitsattavien terästen lujuus ja sitkeys on saatu aikaan mikroseostuksella, jonka tuottamat erkaumat estävät raekoon kasvua. Mikroseosaineina ovat esimerkiksi alumiini, vanadiini, niobi ja titaani. Mikroseosaineiden pitoisuus on yleensä alle 0,1 %. (MET 2001)

Lujimpien rakenneterästen ominaisuudet tuotetaan karkaisun ja päästön avulla, joten näiden terästen mikrorakenne muodostuu pääasiassa martensiitista. Näiden nuorrutettujen rakenneterästen karkenevuutta on parannettu kromi-, molybdeeni- ja nikkeliseostuksella: lujuus voikin yltää jopa 1300 MPa:iin. (MET 2001) Termomekaanisella valssauksella valmistetaan ultralujaa rakenneterästä 1100 MPa:n myötölujuuteen asti (SSAB Ab 2018b). Suoran vesijähdytyksen myötä mikrorakenteesta muodostuu ferriittis-perliittinen, ferriittis-bainiittinen tai bainiittinen: mikrorakenteen koostumus riippuu tavoitellusta lujuudesta ja levyn paksuudesta. (MET 2001)

Kulutusterästen kovuus on huomattavasti suurempi kuin tavanomaisilla rakenneteräksillä. Tämä on karkaisemalla tai karkaisemalla ja nuorruttamalla tuotetun martensiittisen tai martensiittis-bainiittisen mikrorakenteen ansiota. Koska tällaisten terästen martensiitin hiilipitoisuus on matala, säilyy kulutusterästen sitkeys korkeasta lujuudesta ja kovuudesta huolimatta melko hyvänä. (Lukkari et al. 2016) Kulutusteräksiä käytetäänkin erityisesti kohteissa, jotka altistuvat hankaavalle kulutukselle tai iskuille. Tyypillisiä kulutusterästen käyttökohteita ovat kauhat, murskaimet ja kuljettimet. Useita kulutusteräksiä voidaan käyttää myös teräsrakenteiden keventämisessä varsinainen rakenneterästen tapaan. (Miilux Oy 2017)

2.2 Ajoneuvoteollisuuden teräkset

Ajoneuvoteollisuuden teräkset erottuvat muista ultralujien terästen tyypeistä hyvän tai erinomaisen muovattavuutensa ansiosta. 900 MPa:n myötölujuusvaatimuksen täyttäviä ja ominaisuuksiltaan toimitustilassa valmiita ultralujia teräksiä on markkinoilla monifaasiterästen (CP, Complex Phase), martensiittisten terästen (MS, Martensitic)

sekä eräiden työstölujittuvien terästen (TWIP, Twinning Induced Plasticity) joukossa. (Keeler, Kimchi & Mooney 2017)

Monifaasiterästen tärkeimmät ominaisuudet ovat kyky energian absorbointiin ja merkittävään muodonmuutokseen muokkauksen jälkeen. Monifaasiteräkset soveltuvatkin erityisen hyvin ajoneuvojen rakenteisiin. Monifaasiterästen mikrorakenne sisältää enimmäkseen ferriittiä ja bainiittia, mikä tuottaa parhaimmillaan noin 1050 MPa:n myötölujuuden. (Keeler et al. 2017)

Suurimmat lujuudet ajoneuvoteollisuuden terästen joukossa ovat löydettävissä martensiittisten terästen ryhmästä, jossa tyypillinen myötölujuus on 950–1250 MPa. Paras muodonmuutoskyky on puolestaan TWIP-teräksillä, joiden kokonaisvenymä voi olla 50 %:n luokkaa. Korkean lujuuden ja venymän yhdistelmä perustuu huoneenlämmössäkin austeniittisena säilyvään mikrorakenteeseen, joka on saatu aikaan 17–24 %:n mangaaniseostuksella. Muokkauksessa austeniittirakeet kaksostuvat eli raekoko pienentyy. (Keeler et al. 2017)

2.3 Ruostumattomat teräkset

Yleinen määritelmä ruostumattomalle teräkselle on, että teräs sisältää 10,5 % tai enemmän kromia. Mikrorakenne on tällöin joko austeniittinen, ferriittinen, austeniittis-ferriittinen tai martensiittinen. (Lukkari et al. 2016) Tässä teoksessa käytetyn ultralujan teräksen määritelmän täyttävät eräät martensiittiset sekä lujitusvalssatut austeniittiset ruostumattomat teräkset.

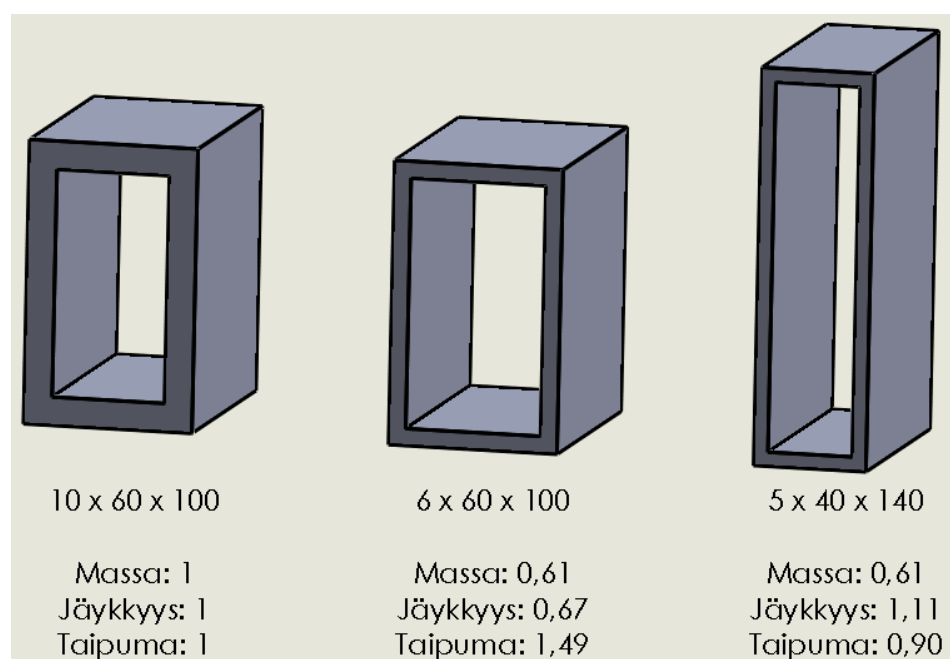
Martensiittinen ruostumaton teräs sisältää 11–17 % kromia sekä karkenevuutta parantavia hiiltä ja mangaania. Ultralujat laadut on valmistettu erkautuskarkaisulla, joka tuottaa korkeita myötölujuuksia aina 1300 MPa:iin asti. (Lukkari et al. 2016)

Austeniittinen ruostumaton teräs sisältää yleensä 16–24 % kromipitoisuuden lisäksi nikkeliä ja mangaania. Lujitusvalssaamalla austeniittisen teräksen myötölujuus voidaan nostaa alkuperäisestä 220–240 MPa:sta lujimpien martensiittisten terästen tasolle eli 1300 MPa:n luokkaan. Austeniittisen teräksen muokkauslujittuminen perustuu austeniittirakeiden lujittumisen ohella siihen, että osa austeniitista muuttuu martensiitiksi. (Lukkari et al. 2016)

3 Kevyet ja lujat teräsrakenteet

3.1 Materiaalin sijoittaminen

Paino-optimoidussa rakenteessa on kyettävä hyödyntämään materiaalin ominaisuudet tehokkaasti. Tällöin materiaali tulee sijoittaa rakenteeseen siten, että kuormitukset voidaan kantaa mahdollisimman pienellä materiaalin määrällä. Tämä tarkoittaa, että eri rakennetyyppejä käytetään niille parhaiten soveltuvalla tavalla. Esimerkiksi levyrakenne suunnitellaan sellaiseksi, että levy kuormittuu vain tasonsa suunnassa. Oikeaoppisessa levyrakenteessa materiaalin lujuuden kaksinkertaistuessa voidaan levynpaksuutta pienentää jopa 50 %, kun tasoa vasten kohtisuora kuormitus sallii samoilla materiaaliominaisuuksilla vain 30 %:n ohennuksen. Palkkirakenteessa vastaavasti poikkileikkauksen mitat optimoidaan taivutuksen suunnan mukaan. (SSAB Ab 2017) Kuva 1 havainnollistaa tapaa, jolla yhdessä suunnassa taivutusrasitetun putkipalkin massaa voidaan jäykkyysominaisuuksien kärsimättä alentaa poikkileikkauksen mittoja muuttamalla.



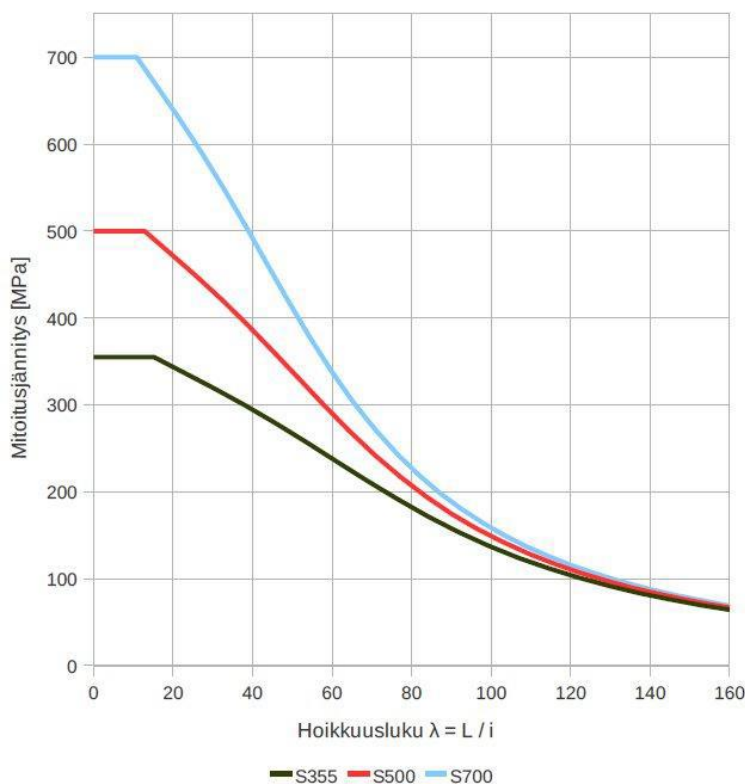
Kuva 1. Poikkileikkauksen keventäminen (mukaillen SSAB Ab 2017).

3.2 Stabiiliteetin säilyttäminen

Ultralujan teräksen käyttö johtaa usein hoikkiin rakenteisiin, minkä vuoksi stabiiliteetin menettämisen mahdollisuus tulee huomioida suunnittelussa. Stabiiliteettiongelmia voivat olla paikallisia tai globaaleja ilmiöitä. Paikallisia stabiiliteettiongelmia ovat jäykistämättömissä tai jäykistetyissä levykentissä esiintyvä lommahdus, pistemäisen kuormituksen aiheuttama paikallinen muodonmuutos sekä leikkausvoimalla kuormitetun levyn leikkauslommahdus. Globaaleja stabiiliteetti-ilmiöitä ovat koko rakenteen nurjahdus sekä kiepahdus. Globaali stabiiliteetin menetys on erityisen vaarallinen, koska tällöin rakenne ei anna ennakkovaroitusta ennen vauriota. (SSAB Ab 2017)

Paikallinen lommahdus on puristus- tai leikkauskuormitetuille lujille teräslevyrakenteille tyypillinen stabiliteettiongelma; matalan lujuuden teräksillä paikallista lommahdusta ei usein ehdi ilmetä ennen materiaalin myötämistä. Staattisesti kuormitettujen lujien teräsrakenteiden suunnittelussa on siis tiedostettava se, että jännitysten pysyminen myötörajan alapuolella ei takaa rakenteiden kestävyyttä. Rakenteen eri osissa esiintyvä paikallinen palautuva lommahdus ei kuitenkaan välttämättä alenna koko rakenteen kantavuutta, mikäli materiaalin myötöraja ei ylitä. Paikallisia nurjahdusilmiöitä voi estää tai viivästyttää erilaisten jäykisteiden avulla. Tällöin esimerkiksi jäykistetyssä levyrakenteessa lommahdus rajoittuu aluksi erillisiin levykenttiin, jolloin rakenne voi yhä kantaa kuormitukset jännitysten uudelleen jakautumisen ansiosta. Jäykisteet voivat olla sisäänrakennettuna rakenteissa esimerkiksi taitosten tai muovattujen urien muodossa. Särmäys- ja taivutusmenetelmät ovat tehokkaita tapoja tuottaa rakenteen vaatimat jäykistyspiirteet piensarjatuotannossa. Myös erillisiä jäykisteosia voidaan kiinnittää rakenteisiin hitsaamalla tai muilla kiinnitysmenetelmillä. (SSAB Ab 2017)

Ultralujien terästen korkeasta lujuudesta on Lämsän ja Kiurun (2012) mukaan eniten hyötyä nurjahdusta vastaan, kun rakenneosa on riittävän massiivinen eli hoikkuusluku on pieni. Tällöin materiaalin staattinen lujuus vaikuttaa suuresti nurjahdusjännitykseen, mikä nähdään kuvassa 2. (Lämsä & Kiuru 2012) Kun hoikkuusluku on suuri, ainoastaan materiaalin kimmomoduuli vaikuttaa nurjahduskestävyyteen, eikä teräksen lujuuden nostaminen paranna rakenteen nurjahduskestävyyttä (Outinen, Salmi, & Vulli 2007)



Kuva 2. Teräksen lujuuden vaikutus nurjahdusjännitykseen (Kiuru 2012).

3.3 Väsymisvaurion estäminen

Teräsrakenteiden keventäminen lujan materiaalin käytöllä johtaa tilanteeseen, jossa rakenteen kuormitukset on kannettava aiempaa ohuemmilla materiaalipaksuuksilla. Tällöin jännitysten kasvaminen kohottaa väsymisvaurion riskiä. Väsymislujuuteen vaikuttavat eniten kuormituskertojen määrä, kuormituksen jakauma ja voimakkuus sekä lo-vivaikutus. Muita vaikuttavia tekijöitä teräksen staattisen lujuuden ohella ovat pinnanlaatu, hitsausvirheet, jännitystila, levynpaksuus, lämpötila ja korroosio. Koska alkusärön ydintymiseen tarvittavan jännityksen suuruus riippuu perusaineen staattisesta lujuudesta, voidaan ultralujien terästen ajatella olevan väsymiskestävyyden kannalta perusteräksiä edullisempia. Toisaalta ydintyneen särön kasvunopeus ei riipu teräslaadusta. Tyypillisesti särön ydintymisvaihe määrittää voimakkaimmin väsymiskestävyyttä perusmateriaalissa ja jouhevasti muotoilluissa rakenneyksityiskohdissa, kun taas särön kasvunopeus on kriittisin tekijä suuren lo-vivaikutuksen alueilla, joita ovat esimerkiksi hitsausliitokset. (SSAB Ab 2017)

Väsytyskuormitettujen rakenteiden liitoksissa on yleisesti tärkeintä välttää teräviä muotoja ja jyrkkiä rakenneosien välisiä jäykkyyden muutoksia, jotka toimivat väsymiskestävyyttä alentavina jännityskeskittyminä. Erityisen tärkeää rakenneosien jäykkyyden tasainen muutos on vääntökuormitetuissa rakenteissa. Hitsauksen sijaan on parempi suosia kitkaliitoksia, joiden avulla lujan materiaalin parempi väsymiskestävyys voidaan hyödyntää. Jos hitsaamista ei voida välttää, hitsausliitosten väsymiskestävyyden säilymistä voidaan edistää sijoittamalla hitsausliitokset rakenteessa vähemmän kuormitetulle alueelle tai jälkikäsittelemällä hitsit väsymiskestävyyttä parantavilla menetelmillä. (SSAB Ab 2017)

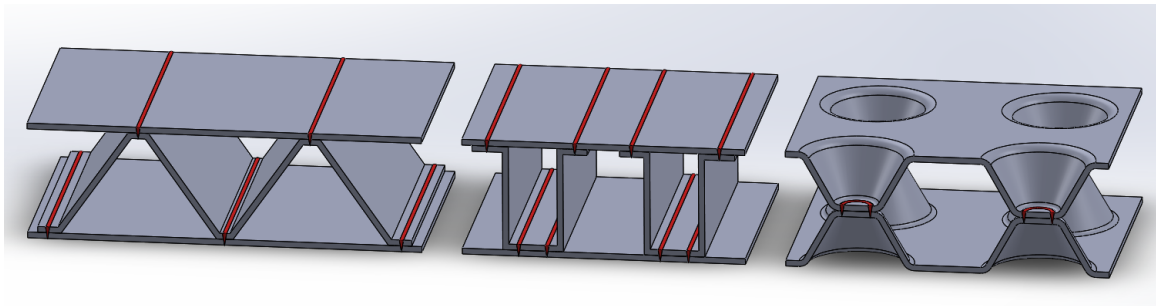
Väsymiskestävyyttä parantavat menetelmät perustuvat joko hitsin geometrian tai jäännösjännitystilan muokkaamiseen. Kaikki väsymiskestävyyttä parantavat menetelmät ovat tehokkaimpia, kun rakenteen kuormituksen aiheuttama jännitystaso on matala ja kuormitusten määrä on suuri. Toisaalta minkään menetelmän soveltuvuutta ei voida taata alle 6 mm materiaalipaksuuksille tai teräslaaduille, joiden myötölujuus on yli 900 MPa. (Hobbacher 2009)

Dynaamisesti kuormitettujen rakenteiden väsymiskestävyyttä voidaan analysoida laskennallisin keinoin. Tällöin tavoitteena on mitoittaa rakenteet siten, että ne kestävät joko äärettömän tai äärellisen määrän kuormituskertoja. Keveät rakenteet mitoitetaan äärellisen kestoisuuden periaatteella, jolloin yleisimmin käytettyjä menetelmiä ovat nimellisjännitysten menetelmä, hot spot-menetelmä eli geometrisen jännityksen menetelmä, paikallisen venymän menetelmä sekä murtumismekaniikkaan perustuvat menetelmät. (Björk et al. 2014) Perinteisten menetelmien lisäksi on kehitetty todennäköisyysteoriaan perustuva väsymismitoitusmenetelmä (Rabb 2017).

3.4 Rakenne-esimerkkejä

Eräs esimerkki kevyestä ja lujasta rakenteesta on teräslevyistä valmistettu kennolevy, joka koostuu yleensä pohja- ja kansilevyistä sekä niiden välissä olevasta ytimestä. Tyypillisesti kenno valmistetaan hitsaamalla ydinrakenne kansi- ja pohjalevyihin. Hitsausmenetelmänä käytetään laserhitsausta, koska tällöin lämmöntuonti ja siitä johtuvat rakenteen muodonmuutokset ovat mahdollisimman vähäisiä. Laserhitsaus on myös hyvin tuottava menetelmä nopeutensa ansiosta. Kennolevyjä on kehitetty useita eri tyyppisiä, joiden erot ovat ytimen rakenteessa sekä levyjen paksuuksissa ja materiaaleissa (Pohjalainen 2007).

Teräsrakenteiset kennolevyt voidaan jakaa ytimen rakenteen mukaan kolmeen pääryhmään, jotka ovat korrugoidulla eli yhtenäisellä aaltomaisella ytimellä jäykistetty kenno, yksittäisillä profiileilla tai putkipalkeilla jäykistetty kenno sekä kalottikenno, jossa ydin on muodostettu pintalevyihin muovatuista ulokkeista. Prismaattiset eli samansuuntaisilla elementeillä jäykistetyt kennot soveltuvat palkkirakenteisiin verrattavien mekaanisten ominaisuuksiensa vuoksi parhaiten yhdessä suunnassa tapahtuvaan taivutusrasitukseen; kalottikennojen mekaaniset ominaisuudet puolestaan riippuvat kalottien sijoittelusta ja määrästä. Kaikkien kennotyyppien etuna on pieni rakennekorkeus, kun taas haittapuolena on alhainen pintapaineen kestävyys. (Kujala, Romanoff, Salminen, Varis, & Vilpas 2003) Kuva 3 esittää eri kennolevytyyppien rakenneperiaatteita.



Kuva 3. Kennolevytyypit (mukaillen Kujala et al. 2003).

Kennolevyn merkittävin etu on alhainen paino ja materiaalin tehokas käyttö; rakenteen kaikki osat voidaan saada kantamaan kuormituksia. Lisäksi puolivalmisteena toimitettavan kennolevyn avulla voidaan säästää työkuukustannuksissa lopputuotteen osalta. Umpimateriaaleista valmistettuihin rakenteisiin verrattuna lisäetua voi tuottaa kennolevyn sisätilan hyödyntäminen esimerkiksi lämmön ja äänen eristämisessä tai värähtelyjen vaimentamisessa sekä kaapelointien ja putkistojen suojaamisessa. (Lassila 1999)

Lujia teräksiä voidaan hyödyntää tehokkaasti myös rakenneputkina, joiden painon ja lujuuden suhde on hyvä yksinkertaisen muodon sekä edullisten lujuusominaisuuksien vuoksi. Suljetuille profiileille tyypilliseen tapaan rakenneputken vääntölujuus on hyvä. Suljettu muoto tuottaa putkipalkille myös sen edun, että vauriotilanteissa rakenne ei rikkoudu hallitsemattomasti. Putkipalkkirakenteen kuormankantokyky ei välttämättä romahda edes stabiliteetin menettämisen seurauksena, vaan kuormankantokyky laskee hitaasti maksimikuormituksen toteutumisen jälkeen. Parhaiten muodonmuutoskykynsä säilyttävät sellaiset poikkileikkaukset, joiden ulkomitat ovat pieniä suhteessa seinämänpaksuuteen. (Kähönen et al. 1999) Myötölujuuden noustessa 900 MPa:n tasolle saatavilla olevien rakenneputkien poikkileikkausmittojen valikoima kuitenkin kaupetuu ja sijoittuu pääasiassa suurten poikkileikkausten alueelle (SSAB Ab 2018c). Tämä voi rajoittaa lujimpien teräslaatuja käyttöä rakenneputkimuodossa.

4 Valmistus- ja kokoonpanoystävällinen suunnittelu

4.1 Perinteinen tuotesuunnittelutapa

Perinteisen koneteknisen tuotesuunnitteluprosessin ajatellaan rakentuvan erillisistä osavaiheista, jotka voidaan esittää seuraavasti:

1. Teknisten vaatimusten määrittely.
2. Toimintorakenteen kuvaus.
3. Ratkaisuvaihtoehtojen kuvaus ja arviointi.
4. Toteutettavan ratkaisun valinta ja kehittäminen.
5. Tuotteen viimeistely. (Pere 2016)

Teknisten vaatimusten määrittely sisältää luettelon ominaisuuksista, jotka suunniteltavalla tuotteella on oltava ja joita siinä ei saa esiintyä. Tärkeintä on ilmoittaa vaaditut ominaisuudet täsmällisinä lukuarvoina tai selkeinä sanallisina kuvauksina, mikäli vaatimus ei ole ilmaistavissa lukuarvona. (Björk et al. 2014)

Toimintorakenteen kuvaus on kaaviomainen esitys, joka sisältää osatoiminnot yhdistettynä kokonaisuudeksi. Toimintorakenteen kehittäminen on tärkeä osa luonnosteluvaihetta erityisesti uuden tuotteen tapauksessa, jolloin osatoimintojen väliset yhteydet ja kokonaisuuden toiminta eivät ole valmiiksi tunnettuja. Toimintorakenteen kuvaus helpottaa kehitettävän tuotteen jakamista toisistaan erillisiin tehtäväkokonaisuuksiin, jotka voivat edetä rinnakkain. Tämä lyhentää tuotteen kehitystyöhön kuluva aikaa ja siten vähentää kustannuksia. Tuotteen osatoiminnot voidaan usein saada aikaan monella eri ratkaisuperiaatteella. Ehdotettujen ratkaisuyhdistelmien soveltuvuutta ja eroja voidaan arvioida esimerkiksi pisteytysmenetelmällä. (Björk et al. 2014)

Toteutettavan ratkaisun valinnan jälkeen alkaa varsinainen suunnitteluvaihe, jossa luodaan esitetyt tekniset ja taloudelliset vaatimukset täyttävä tuote. Luonnosvaiheessa tehdyt suunnitelmat tarkentuvat laskelmien, simulointien ja mallikokeiden avulla yksikäsitteiseksi tuoterakenteeksi. Tuotteen viimeistelyvaiheessa määritellään osien lopulliset muodot, materiaalivalinnat, pinnanlaatuvaatimukset ja mitoitukset. Samalla myös arvioidaan valmistuskustannukset ja päätetään valmistusmenetelmät. Tärkeänä osana viimeistelyvaihetta luodaan tarvittavat tekniset dokumentit, joihin muun muassa valmistuksen suunnittelu ja ohjaus perustuvat. (Björk et al. 2014)

Tuotteen valmistettavuuden näkökulmasta katsoen perinteisessä tuotesuunnittelussa luodaan aluksi tekniset vaatimukset täyttävä tuote ja sen jälkeen tarvittaessa muokataan rakennetta, jotta voidaan käyttää tiettyjä valmistusmenetelmiä tai valmistus on ylipäättään mahdollista. Valmistuksen suunnittelu siis aloitetaan vasta tuotesuunnitteluvaiheen jälkeen; tätä tiedonkulun yksisuuntaisuutta on nimitetty muuriksi suunnittelun ja valmistuksen välillä. (Eskelinen & Karsikas 2013)

4.2 DFMA-suunnittelumenetelmä

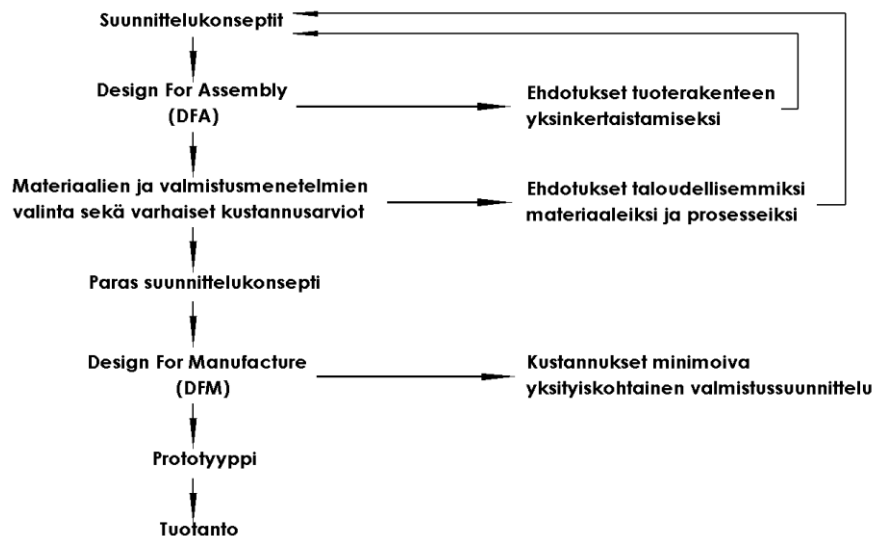
Perinteisen tuotesuunnittelutavan ongelmaksi koettua suunnittelun ja valmistuksen välistä muuria voidaan purkaa erityisen tehokkaasti soveltamalla suunnitteluprosessissa niin sanottua DFMA-menetelmää (Design For Manufacture and Assembly) (Boothroyd, Dewhurst & Knight 1994). Valmistus- ja kokoonpanoystävällisessä DFMA-suunnittelutavassa on keskeistä etsiä mahdollisimman varhaisessa vaiheessa menetel-

miä, jotka saattaisivat soveltua suunniteltavan tuotteen valmistukseen. Tällöin tuote-suunnittelu ja valmistuksen suunnittelu ovat käynnissä samanaikaisesti, toisin kuin perinteisessä suunnittelutavassa. (Eskelinen & Karsikas 2013)

DFMA-suunnittelutavan kaksi tärkeintä osiota ovat:

- DFA-analyysi (Design For Assembly), joka tähtää suunnittelun alkuvaiheessa tuoterakenteen yksinkertaistamiseen ja osien määrän vähentämiseen sekä todellisen tuotteen tai prototyypin yksityiskohtaiseen analysointiin kokoonpanon helppouden kannalta.
- DFM-analyysi (Design For Manufacture), jonka tavoitteena on pienentää yksittäisen osan valmistuskustannuksia. Parhaiten soveltuvan valmistusprosessin ja materiaalin valinnan tulee perustua realistisiin kustannusarvioihin. Osissa olevien piirteiden sekä niiden aiheuttamien valmistuskustannusten välinen riippuvuus tuodaan esille menetelmäkohtaisesti. (Boothroyd et al. 1994).

Kuva 4 esittää DFMA-suunnitteluprosessin etenemisen vaiheet.



Kuva 4. DFMA-suunnittelun eteneminen (mukaillen Boothroyd et al. 1994).

Suurin hyöty DFMA-suunnittelutavasta saadaan tuoterakenteen yksinkertaistumisesta erillisten osien lukumäärän vähentämisen kautta. Olennaista on nimenomaan yksinkertaistaa tuoterakennetta eikä yksittäisiä osia, toisin kuin eräät suunnittelusäännöt virheellisesti ohjeistavat (Boothroyd et al. 1994). Yksittäiselle komponentille tulisi osoittaa mahdollisimman monta tuotteen toimivuudelle välttämättömistä toiminnoista ja piirteistä; tällöin kokoonpanossa tarvittavien osien määrä jää mahdollisimman pieneksi (Eskelinen & Karsikas 2013).

Tuoterakenteen yksinkertaistaminen tapahtuu pääasiassa jo konseptisuunnitteluvaiheessa, jolloin olemassa olevan tai suunniteltavan tuotteen rakennetta on tarkasteltava analyttisesti. Tätä varten vertailukohdaksi voidaan määritellä vastaava teoreettinen tuote, jossa on vain tuotteen käytännön toiminnan kannalta ehdottomasti välttä-

mättömät osat ja komponentit; valmiina hankittavia alikokoonpanoja pidetään analyysin kannalta yksittäisinä osina. Tuotteen kokoonpanossa oleva osa on välttämätön vain silloin, jos yksi tai useampi seuraavista kolmesta määritelmästä pitää paikkansa:

- Osa liikkuu tuotteen käytön aikana suhteessa muihin kokoonpanossa oleviin osiin. Liike tarkoittaa tässä selvää ja suunniteltua toiminnallista liikettä; esimerkiksi valmistusepä tarkkuudesta tai materiaalin joustosta johtuvaa pientä liikettä ei huomioida.
- Osan täytyy olla eri materiaalia tai muuten eristetty muista kokoonpanon osista. Vain olennaiset materiaaliominaisuuksista johtuvat perustelut huomioidaan.
- Osan täytyy olla erillinen sen vuoksi, että muuten muiden kokoonpanon osien asentaminen tai irrottaminen olisi mahdotonta. (Boothroyd et al. 1994)

Tuoterakenteen yksinkertaistamiseen tähtäävässä DFA-vaiheessa voidaan soveltaa esimerkiksi seuraavia ohjeita:

- Suunnittele yksinkertaisia ja itsensä paikoittavia rakenteita.
- Vähennä tuotteessa olevien yksittäisten osien kappalemäärää.
- Yksinkertaista liittämismenetelmiä ja vältä erillisiä liitososia.
- Käytä standardoituja osia, komponentteja ja piirteitä.
- Käytä moduloituja ratkaisuja (toiminto- tai rakennemodulointi).
- Yhdenmukaista ja minimoï asennussuunnat.
- Määritä osille tarkoituksenmukaiset toleranssit. (Pere 2016)

Tuoterakennetta yksinkertaistavan DFA-prosessin jälkeen on vuorossa varsinainen tuotesuunnittelu, jossa määritetään käytettävät valmistusmenetelmät ja -materiaalit sekä tuotteen todellinen rakenne. Suunnittelussa käytetään lähtökohtana DFA-analyysin avulla yksinkertaistettua tuoterakennetta. Valmistusmenetelmien valinnassa on suunnittelijan laaja tuntemus eri menetelmistä tarpeen, jotta välttyään rajoittumasta muutamiin yleisimpiin menetelmiin ja materiaaleihin sen sijaan, että löydettäisiin kuhunkin tilanteeseen sopivin materiaalin ja prosessin yhdistelmä. (Boothroyd et al. 1994)

DFM-periaatteiden mukaisessa valmistusmenetelmän ja materiaalin valinnassa on tärkeää huomioida muun muassa seuraavat kysymykset:

- Millainen on menetelmän saatavuus ja käytettävyys?
- Miten eri rakennemateriaalit soveltuvat valitulle menetelmälle?
- Millainen on valitussa menetelmässä käytettävän laitteiston suorituskyky, ulottuvuus ja yleinen rakenteellinen soveltuvuus suhteessa valmistettavaan osaan?
- Millaisia ovat mahdollisten raaka-aineiden saatavuus, mitat ja toimitustilat?
- Millainen on menetelmän tarkkuus ja tasalaatuisuus eli laaduntuottokyky?
- Miten valmiiden osien vaadittu laatu voidaan tarkastaa? (Pere 2016)

DFMA-toimintatavan oikeanlainen soveltaminen voi parantaa yritystoiminnan kannattavuutta, kun eri valmistusreittien vaikutukset tuotteen kustannuksiin voidaan nähdä jo suunnittelun alkuvaiheessa. Yksityiskohtaisia tavoitteita ovat tällöin seuraavat:

- Kytkeä suunnittelu ja valmistus paremmin toisiinsa.
- Säästää tuotekehitykseen käytettyjä resursseja.
- Parantaa tuotteen laatua ja luotettavuutta.
- Lyhentää tuotekehityksen ja osavalmistuksen läpimenoaikoja.
- Saavuttaa parempi tuottavuus.

- Parantaa yrityksen kykyä vastata asiakkaiden tarpeisiin. (Eskelinen & Karsikas 2013)

Parhaimmillaan DFMA-menetelmän onnistunut soveltaminen voi lyhentää tuotekehitysprosesseja kuvan 5 esittämällä tavalla.

Konsepti-suunnittelu ilman DFMA:n soveltamista	Yksityiskohtainen suunnittelu	Prototyypin testaus ja muutokset suunnitelmiin
--	-------------------------------	--

DFMA-perustainen konseptisuunnittelu	Yksityiskohtainen suunnittelu	Prototyypin testaus ja muutokset suunnitelmiin
--------------------------------------	-------------------------------	--

aika →

Kuva 5. DFMA:n vaikutus tuotekehitysaikaan (mukaillen Boothroyd et al. 1994).

4.3 Tietokoneavusteinen suunnittelu

DFMA-ohjeiden noudattamisen tärkeimpiä apukeinoja on virtuaalimallinnuksen ja -valmistuksen hyödyntäminen (Eskelinen & Karsikas 2013). Ultralujista teräksistä valmistettavien tuotteiden kohdalla tietokoneavusteisista suunnittelutyökaluista (CAE, Computer Aided Engineering) korostuu erityisesti elementtimenetelmään perustuvan lujuusanalyysin (FEA, Finite Element Analysis) hyödyntäminen. Lisäksi topologian optimointia voidaan hyödyntää pyrittäessä löytämään keveitä rakenneratkaisuja.

Tehokkaimpia tietokoneavusteisia suunnittelusovelluksia ovat sellaiset modulaariset ohjelmistot, joissa tuotteen luonnostelu, suunnittelu, FEM-analyysi, toiminnan simulointi ja valmistustiedon tuottaminen voidaan tehdä integroidusti. Tällöin samaa geometriaa ei tarvitse mallintaa useaan kertaan tuotesuunnittelun, simuloinnin ja valmistussuunnittelun tarpeisiin. (Eskelinen & Karsikas 2013) 3D-CAD-ohjelmaan integroidulla FEA-moduulilla voidaan tarkastella suunniteltavan tuotteen ominaisuuksia suunnittelutyön aikana, mikä vähentää tarvetta fyysisten prototyyppien testaukselle. Tällöin ylimääräisen työn ja viiveiden vähentymisellä voidaan säästää aikaa ja tuotekehityskustannuksia. (Solidworks Corporation 2017a)

Topologian optimointi on menetelmä, jolla voidaan määrittää tietyn rakenteen kevein mahdollinen muoto, jolla rakenne kestää määritellyt kuormitukset. Optimoinnin periaatteena on, että kaikki kuormitukset siirretään rakenteen läpi veto- ja puristussauvojen avulla. Optimointi suoritetaan tietokoneohjelmalla, jossa käytetään lähtökohtana lopullista kappaletta suurempaa aihiota. (Westerlund 2017) Topologian optimointi edellyttää lähtöaihion lisäksi tuentakohtien, säilytettävän materiaalin alueiden sekä kuormitustilanteen määrittämistä. Kun tarvittavat lähtötiedot on määritetty, ohjelma laskee työkappaleelle mahdollisimman vähän materiaalia sisältävän geometrian. (Solidworks Corporation 2017b) Topologian optimoinnin avulla voidaan nopeuttaa tuote-

kehitysprosessia manuaalisen mallinnus- ja laskentatyön vähenemisen kautta. Optimoinnista saatuja tuloksia ei voida suoraan käyttää valmistettavien rakenteiden mallina, mutta optimointi antaa suunnittelijalle viitteitä edullisimman muodon löytämiseksi. (Iso-Junno, Niemi, Mäkikangas & Mäntyjärvi 2018)

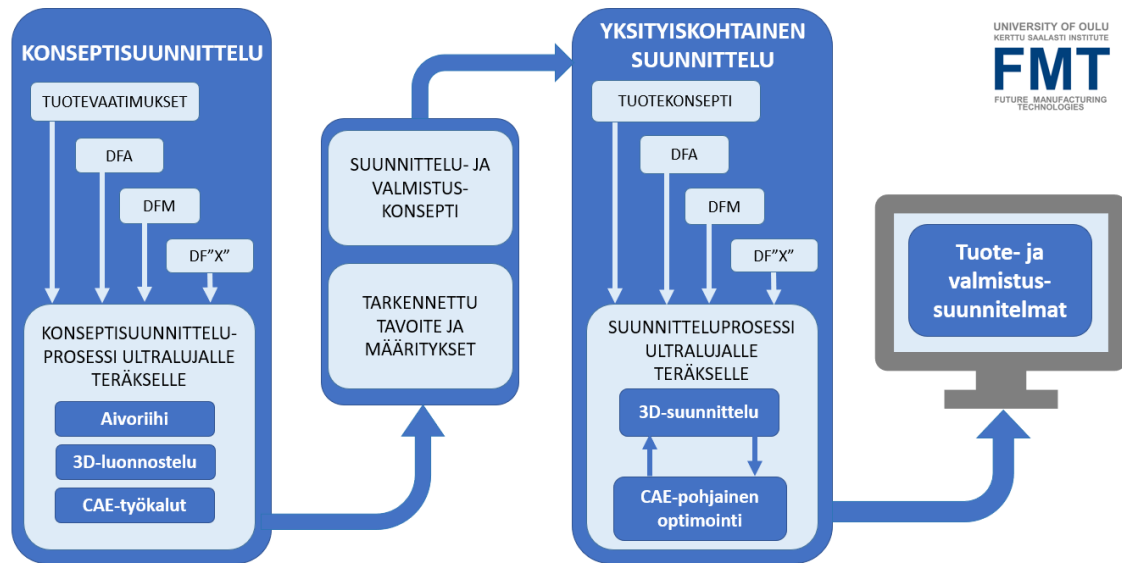
4.4 Laajennettu DFMA-prosessi

Laajennettu DFMA-prosessi on ultralujista teräksistä valmistettavien tuotteiden suunnittelua ohjaava kokonaisvaltainen menettelytapa, jonka päämääränä on hyödyntää lujan teräsmateriaalin ominaisuudet mahdollisimman tehokkaasti tuotteiden kilpailukyvyn parantamiseksi. Tämä edellyttää eri tilanteisiin parhaiten soveltuvien nykyaikaisten tuotantomenetelmien löytämistä, jotta valmistusvaihe voi toteutua mahdollisimman yksinkertaisena ja kustannustehokkaana. Yleiseen DFMA-menetelmään pohjautuva laajennettu DFMA-prosessi on kehitetty Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutin FMT-tutkimusryhmässä (Future Manufacturing Technologies, Tulevaisuuden tuotantoteknologiat). Kokemusperäisen tiedon avulla on kartoitettu työskentelytapoja, jotka tehostavat suunnittelutyötä ja joiden avulla erityisesti henkilöstöresursseiltaan pienet toimijat voivat saavuttaa hyviä tuloksia lyhyessä ajassa. (Iso-Junno et al. 2018)

Laajennetun DFMA-prosessin mukainen suunnitteluprosessi jakaantuu konseptisuunnittelun ja yksityiskohtaisen suunnittelun vaiheisiin. Keskeisiä piirteitä konseptisuunnitteluvaiheessa ovat aivoriihimenetelmällä toteutettava ratkaisuvaihtoehtojen ideointi sekä tarpeen mukainen CAE-työkalujen hyödyntäminen ratkaisuehdotusten 3D-luonnostelussa, lujuusanalyyseissä sekä rakenteiden hahmottelussa topologian optimoinnin avulla. Konseptisuunnittelua ohjaavat tuotevaatimukset sekä DFA- ja DFM-periaatteet, joista korostuu tuoterakennetta yksinkertaistava DFA-analyysi. Konseptisuunnittelun tavoitteena on löytää tehokkaimmat rakenneperiaatteet ja valmistusmenetelmät eli määrittää selkeä tuotekonsepti yksityiskohtaisen suunnittelun lähtökohdaksi. (Iso-Junno et al. 2018)

Yksityiskohtaisen suunnittelun vaiheessa laajennetulle DFMA-prosessille on ominaista lujuuslaskentaohjelmistojen tehokas hyödyntäminen rakenteiden mitoittamisessa, 3D-CAD-ohjelmien käyttäminen pääasiallisina suunnittelutyökaluina sekä rakenteiden viimeistely iteratiivisten suunnittelukierrosten avulla. Suunnittelun lähtökohtana on aiemmin määritelty tuotekonsepti, joka sisältää tuotteen rakenne- ja valmistusperiaatteet sekä täsmälliset tuotevaatimukset. Mitään fyysisiä CAD-malleja ei kuitenkaan siirretä konseptisuunnitteluvaiheesta yksityiskohtaisen suunnittelun pohjaksi, jotta nopeasti mallinnettujen luonnosten puutteellisuudet ja virheet eivät häiritse varsinaista suunnittelutyötä. Myös yksityiskohtaista suunnittelua ohjataan DFA- ja DFM-periaatteiden avulla: tärkeintä on DFM-periaatteiden mukainen valmistussuunnittelu. Tuoterakenteen yksinkertaistamisen ja valmistettavuuden parantamisen lisäksi laajennetussa DFMA-prosessissa voidaan huomioida myös muita erityisiä näkökulmia, joita voivat olla esimerkiksi huollettavuus tai toimintavarmuus. (Iso-Junno et al. 2018)

Kuva 6 esittää laajennetun DFMA-prosessin periaatteen.



Kuva 6. Laajennettu DFMA-prosessi (mukaillen Iso-Junno et al. 2018).

5 Laajennetun DFMA-prosessin soveltaminen

NRC-hanke on Oulun Ammattikorkeakoulun Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelman opetus- ja opiskelijaprojekti, jossa on tarkoituksena luoda Suomen kansallisiin rallisarjoihin uusi WRC-tasoinen (World Rally Championship) kilpa-auto (NRC, National Rally Car). (Oulun ammattikorkeakoulu 2017b) Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutin FMT-tutkimusryhmä toteutti pääosan NRC-auton rungon ensimmäisen prototyypin suunnittelusta sekä käytännön valmistuksesta ULTRA – Uutta liiketoimintaa järjestelmätason tuote- ja palveluratkaisuista -hankkeen puitteissa. Suunnittelutyössä sovellettiin FMT-ryhmän kehittämää laajennettua DFMA-prosessia, jonka avulla voidaan suunnitella lujista teräksistä keveitä ja kestäviä sekä kustannustehokkaita rakenteita, joiden valmistettavuus ja kokoonpantavuus on huomioitu erityisen hyvin (Oulun ammattikorkeakoulu 2017a).

Tässä luvussa kuvataan NRC-auton suunnitteluprosessi esimerkkinä laajennetun DFMA-prosessin soveltamisesta.

5.1 Konseptisuunnittelu

5.1.1 Tuotevaatimukset

NRC-auton tärkeimpiä vaatimuksia ovat turvallisuus ja luotettavuus sekä edulliset käyttökustannukset. Auton kehitystyössä painotetaan turvallisuuden ohella keveiden sekä lujien runko- ja korirakenteiden merkitystä. (Oulun ammattikorkeakoulu 2017b) Auton käyttöikätaavoite on 5 vuotta tai 5000 km kilpailukäytössä. Prototyyppivaiheen jälkeen on tarkoitus valmistaa alle 150 auton piensarja. (Ilomäki, Lehtonen, Färm, Jokinen, & Väyrynen, 2017)

Ajoneuvon runko koostuu kolmesta osasta: etuapurungosta, keskirungosta sekä taka-apurungosta. Kiinteän keskirungon tehtävä on suojata kuljettajia. Apurungot otavat vastaan törmäysvoimat ja johtavat ne hallitusti keskirunkoon liitoskohtien välityksellä; tämän vuoksi apurunkojen tulee olla vaihdettavissa. Moottori, voimansiirto ja pyöräntuenta kiinnitetään apurunkoihin. Auton rungon on oltava suomalaisten konepajojen valmistettavissa SSAB Ab:n tuottamista materiaaleista. (Ilomäki et al. 2017) Turvallisuus- ja keveysvaatimusten täyttämiseksi valitaan materiaaliksi lujin teräslaatu, jota on saatavilla tarvittavissa paksuusluokissa. (Mäntyjärvi, Mälikangas, Jokelainen, & Kananen, 2017b)

Ajoneuvon käyttö on jaettu kolmeen alueeseen: normaalikäyttö, ei-normaalikäyttö sekä onnettomuus. Normaalikäyttöä on kaikki sellainen ajo, jossa ei osuta esteisiin ja auto pysyy renkaiden varassa – tällöin kuitenkin esimerkiksi hyyt ja tiessä olevat kuopat voivat aiheuttaa suuria kuormituksia auton rakenteisiin. Ei-normaalissa käytössä autolla törmätään suoraan esteeseen, joka voi olla esimerkiksi tien sivussa oleva kivi tai kanto; tällöin muodonmuutoksia saa tapahtua apurungoissa, mutta ei keskirungossa. Onnettomuus tarkoittaa tilannetta, jossa autolla törmätään rajusti esteeseen; tällöin keskirunkoonkin tulee vaurioita, mutta muodon pääpiirteissään säilyttävä rakenne suojaa kuljettajia. (Ilomäki et al. 2017)

Auton ajateltiin voivan joutua seuraavan kaltaisiin rasisitustilanteisiin:

- Hyppy ilmaan ja putoaminen tielle.
- Suora törmäys esteeseen keula edellä.
- Vaino törmäys esteeseen keula edellä.

- Suora törmäys esteeseen perä edellä.
- Sivusuuntainen törmäys esteeseen.
- Pyörähdys ympäri 360° etenemissuunnassa.
- Pyörähdys ympäri 360° kohtisuorassa etenemissuuntaan nähden. (Mäntyjärvi, Mäkikangas, Jokelainen, Kananen, 2017a)

Edellä kuvattujen rasiutilanteiden perusteella määriteltiin myöhemmin laskentakuormitukset, joiden perusteella rakenteiden kestävyyttä tarkasteltiin tuotekehitysprosessin eri vaiheissa elementtimenetelmän avulla. Laskentakuormiksi saatiin seuraavat voimat:

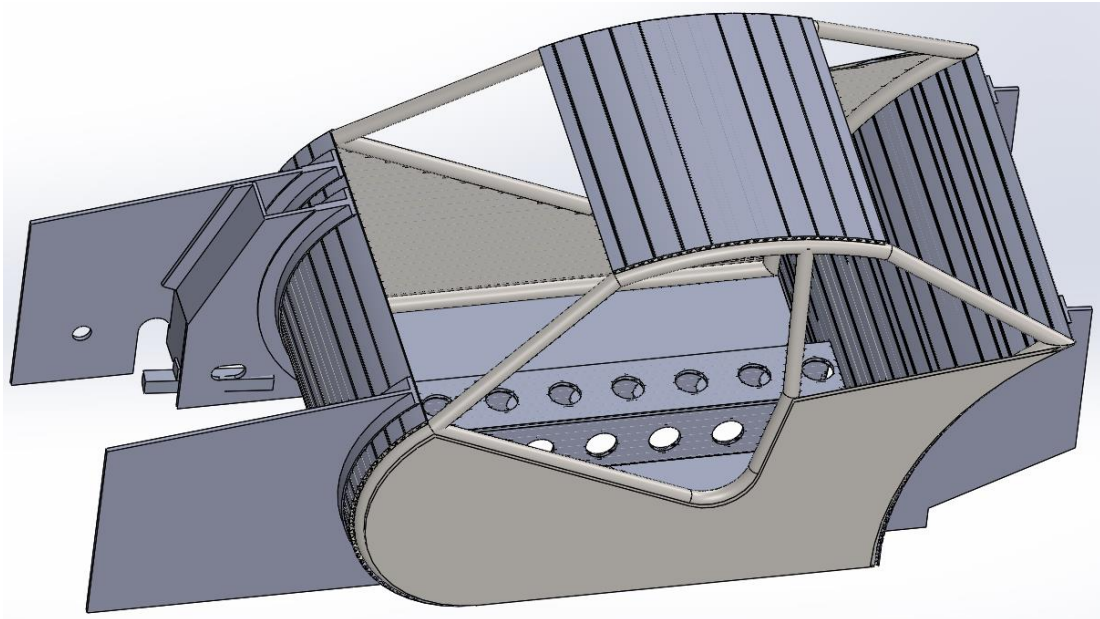
- Jousen suuntainen voima: 100 kN.
- Poikittaisvoima jousen yläpäässä: 50 kN.
- Etualatukivarteen kohdistuva voima: ± 160 kN.
- Taka-alatukivarteen kohdistuva voima: ± 160 kN. (Jokinen 2016)

5.1.2 Rakennevaihtoehtojen etsiminen

Samalla kun ajoneuvosta haluttiin mahdollisimman kevyt, keskirungon tuli kyetä takaamaan kuljettajien turvallisuus. Näin päädyttiin ajatukseen, että keskirungon suojausominaisuudet toteutetaan erillisten turvakaarien sijasta kiinteänä osana rakennetta. Eri rakennevaihtoehtojen luomisessa työkaluna käytettiin SolidWorks-ohjelmaa, jolla voitiin sekä mallintaa rakenteet, että analysoida niiden lujuusteknisiä ominaisuuksia. Konseptisuunnitteluvaiheen lujuuslaskennan tarkoituksena oli vertailla karkeasti eri vaihtoehtojen lujuus- ja jäykkyysominaisuuksia. FEM-analyysseissä kuormituksina käytettiin projektin alussa määritettyjä laskentavoimia. Rakenteiden keveimpien mahdollisten muotojen etsimisessä käytettiin lisäksi apuna topologian optimointiin tarkoitettua ParetoWorks-ohjelmaa. Keski- ja apurungoille sekä niissä käytettäville liitoksille ja rakennemateriaaleille ideoitiin runsaasti vaihtoehtoisia rakenneratkaisuja. (Mäntyjärvi et al. 2017b)

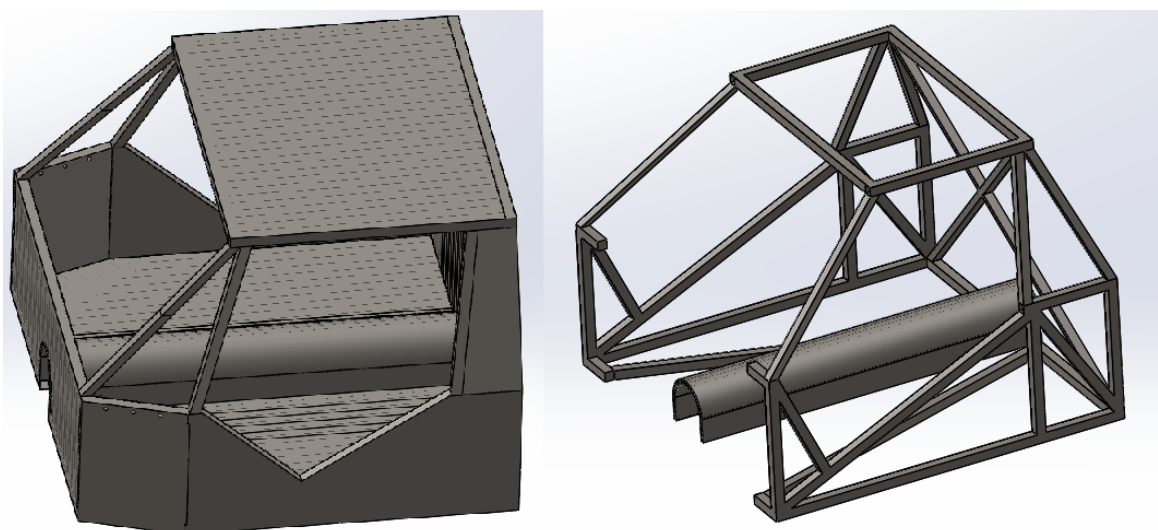
Keskirungon rakenneperiaatteet

Korirakenteen hahmottelu aloitettiin keskirungosta, jonka valmistusmateriaaliksi ehdotettiin teräskennolevyä sekä rakenneputkea. Keskirungolle ehdotettiin aluksi muodoltaan pisaraa muistuttavaa muotoilua. Ehdotus perustui pyöreästä rakenneputkesta valmistettuun kehikkoon, joka oli jäykistetty 15 mm paksulla kennolevyllä. Kaarevien muotojen ensisijainen tarkoitus oli parantaa rakenteen jäykkyyttä. Myös etu- ja takaapurungon rakennetta hahmoteltiin kennolevyn avulla. (Mäkikangas ja Jokelainen 2018) Kuvassa 7 nähdään ohueen kennolevyn ja pyöreään rakenneputkeen perustuva ralliauton rungon yleisluonnos.



Kuva 7. NRC-auton rungon varhainen luonnos (mukaillen Mäkikangas ja Jokelainen 2018).

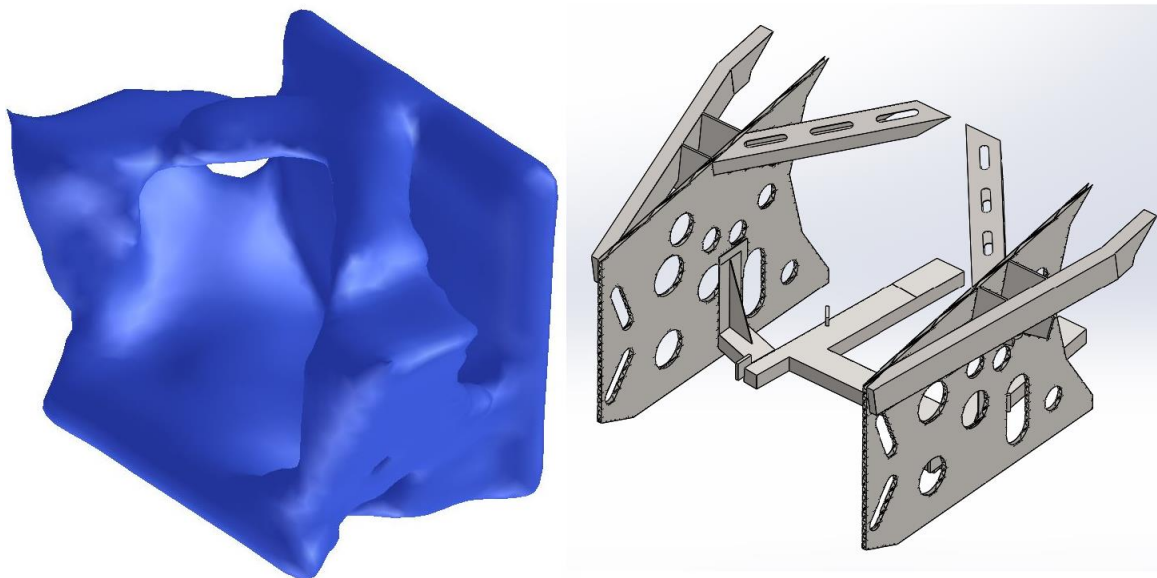
Keskirungon rakenteen ideoinnin jatkuessa kaarevien kenno-osien valmistuksen arvioitiin kuitenkin olevan liian työlästä, joten jatkossa päätettiin käyttää vain suoraa kennoa. Alustavien lujuustarkastelujen myötä ilmeni, että aluksi ehdotetun 15 mm paksun kennolevyn lujuus- ja jäykkyysominaisuudet eivät olleet riittäviä. Kennon paksuuden kasvattamisen lisäksi kenno-osien ulkomuodon yksinkertaisuutta painotettiin kennojen leikkaamisen helpottamiseksi. Myös pääasiassa putkirakenteisia ehdotuksia esitettiin keskirungon osalta. Koska varmistui, että valitusta materiaalista teollisesti valmistettua rakenneputkea ei ole saatavilla, putken poikkileikkaus vaihdettiin pyöreästä suorakaide- ja neliömuotoihin putken valmistuksen yksinkertaistamiseksi. (Mäkikangas ja Jokelainen 2018) Kuvassa 8 nähdään kenno- ja putkirakenteisen keskirungon luonnokset.



Kuva 8. Keskirungon luonnoksia (mukaillen Mäkikangas ja Jokelainen 2018).

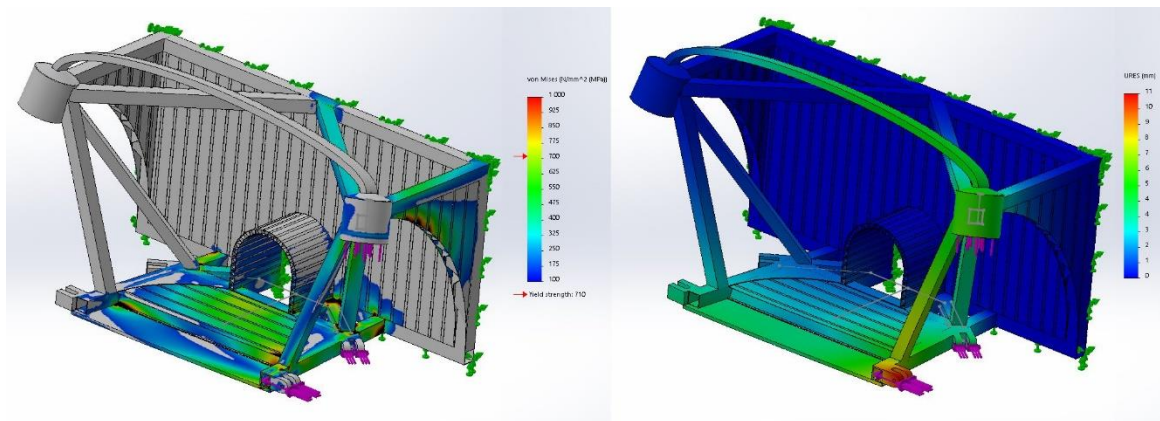
Etuapurungon rakenneperiaatteet

Etuapurungon muodon hahmottelussa hyödynnettiin topologian optimointia, millä pyrittiin lujan ja keveän rakenteen löytämiseen. Etuapurungon pääasialliseksi valmistusmateriaaliksi ehdotettiin aluksi 15 mm paksuista kennolevyä. (Mäkikangas ja Jokelainen 2018) Kuvassa 9 nähdään etuapurungon alustavan optimoinnin tulos sekä pääasiassa ohuen kennolevyn käyttöön perustunut rakenne-ehdotus.



Kuva 9. Etuapurungon suunnittelun lähtökohta (mukaillen Mäkikangas ja Jokelainen 2018).

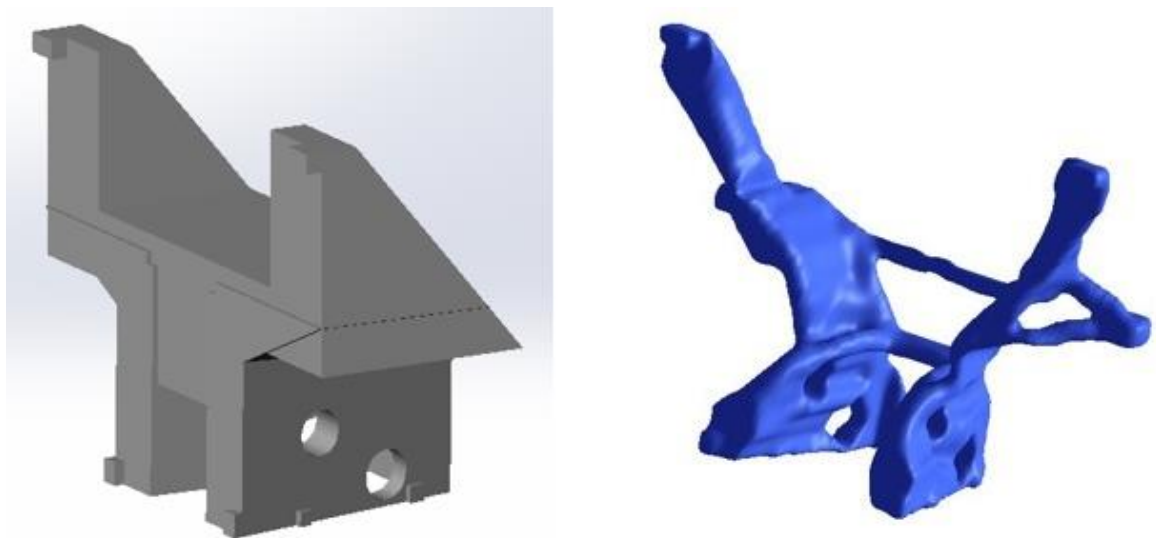
Kennorakenteisen etuapurungon valmistettavuutta analysoitaessa päädyttiin arvioon, että rakenneputken käytöllä voidaan saavuttaa kennolevyä helpommin kevyt ja kestävä rakenne. Tämän vuoksi etuapurungosta hahmoteltiin uusi versio, jossa suurin osa kuormituksista siirretään rakenneputkien avulla. (Mäkikangas ja Jokelainen 2018) Konseptivaiheessa suoritettujen lujuusanalyysien perusteella voitiin yksilöidä tietty etuapurungon rakennetyyppi, jonka lujuusominaisuudet olivat parhaat (Mäntyjärvi 2017b). Kuva 10 esittää edullisimman konseptirakenteen FEM-laskennasta saatuja tuloksia, joissa siirtymän maksimiarvo on 11 mm ja jännityksen yläraja 1000 MPa. Kuormituksen sijainnit ja suunnat näkyvät kuvassa violetin värisinä nuolina. Laskentamallissa etuapurunko on kiinnitetty keskirungon kennorakenteeseen etuseinään, jonka taustapuoli on tuettu jäykällä tuennalla.



Kuva 10. Etuapurungon FEM-tarkastelu (mukaillen Mäkikangas ja Jokelainen 2018).

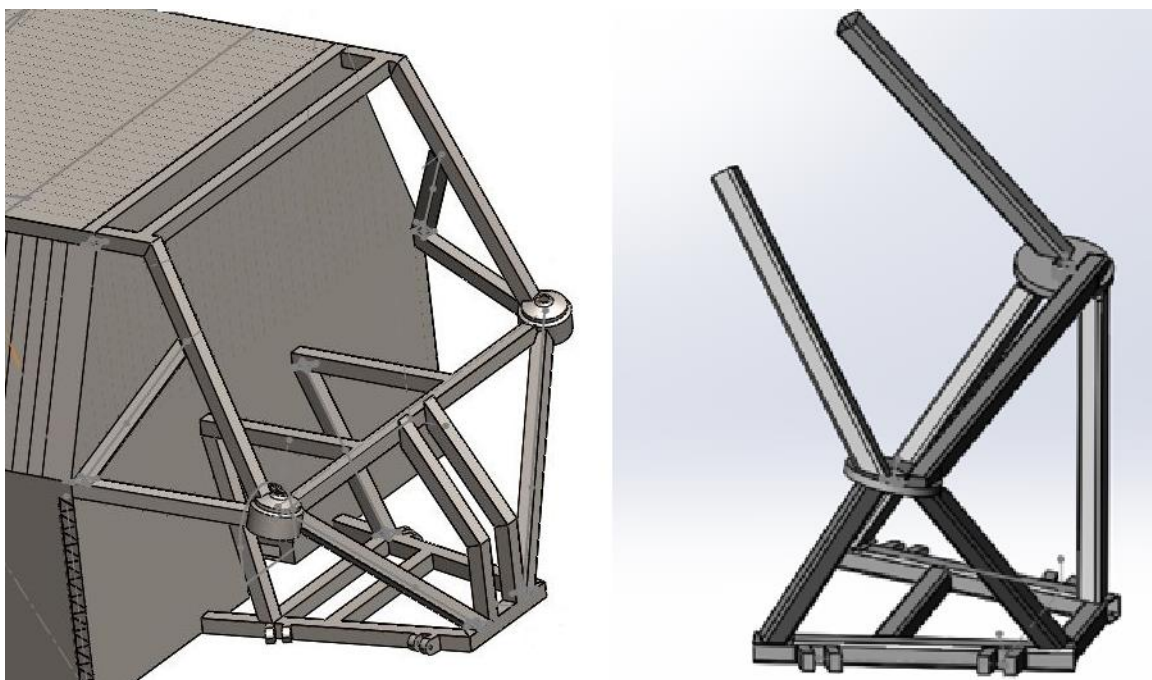
Taka-apurungon rakenneperiaatteet

Taka-apurungon muodon hahmottelu aloitettiin etuapurungon tapaan topologian optimoinnin avulla (Mäntyjärvi 2017a). Kuva 11 esittää optimoinnin lähtöaihiota sekä optimoinnin tuloksena saatua geometriaa.



Kuva 11. Taka-apurungon suunnittelun lähtökohta (mukaillen Mäntyjärvi 2017a).

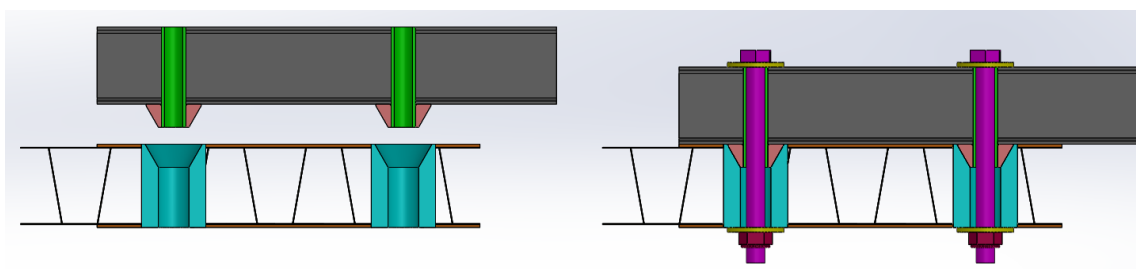
Taka-apurungon valmistusperiaatteeksi ehdotettiin alkuvaiheessa etuapurungon tapaan kennolevyrakennetta, mutta yksinkertaisemman valmistettavuuden vuoksi siirryttiin pian luomaan pääasiassa rakenneputken käyttöön perustuneita vaihtoehtoja (Mäkikangas ja Jokelainen 2018). Kuvassa 12 esitetään varhainen taka-apurungon suunnitteluehdotus keskirunkoon yhdistettynä sekä valmistettavuuden ja keveyden suhteen edistyneempi vaihtoehto.



Kuva 12. Taka-apurungon kehittyminen (mukaillen Mäkikangas ja Jokelainen 2018).

Keskirungon ja apurunkojen liittäminen

Keskirungon ja apurunkojen liitostavaksi ehdotettiin ruuvikiristeistä kartioliitosta, joka mahdollistaisi apurunkojen vaihtamisen tarvittaessa (Mäntjärvi et al. 2017a). Ehdotuksessa liitoksessa kuormitukset siirretään palkki- ja kennorakenteisiin laserhitsattujen kartio-osien ja vahvikelevyjen avulla. Liitos kiristetään läpimenevien ruuvien avulla. Kartio-osat paikoitetaan CNC-koneistettuihin asennusreikiin, mikä tuottaa rakenteelle hyvän tarkkuuden. Kuva 13 esittää kartioliitoksen periaatetta.

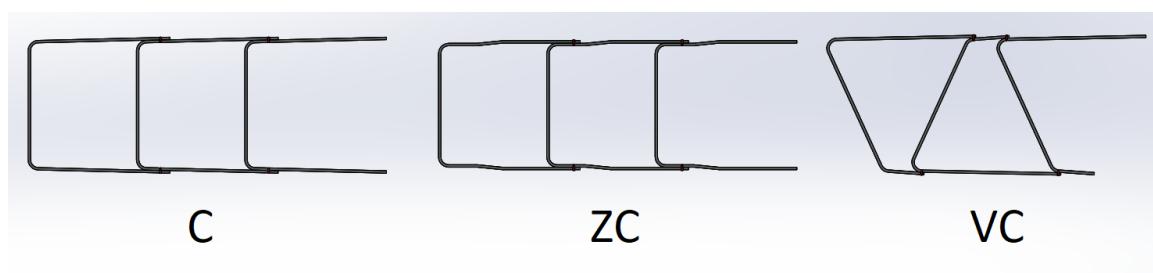


Kuva 13. Kartioliitoksen toiminta (mukaillen Iso-Junno 2018).

Kennolevyn valmistus

Auton rungon rakenne-ehdotuksissa esiintyneen kennolevyn vaatimuksena oli yksinkertainen rakenne, jonka avulla voidaan valmistaa edullisesti ja helposti suoraa sekä kaareutuvaa kennoa. Perinteisten kennotyyppien ohella kennolevyn rakenteeksi ehdotettiin uutta vaihtoehtoa, jonka valmistus perustuu C-kirjaimen muotoon särmätyjen ohutlevyprofiilien yhteen liittämiseen laserhitsatun limiliitoksen avulla. Kaareutuvia ja suoraa kenno-osia voidaan valmistaa hitsaamalla ensin toinen pinta kennosta valmiiksi

ja asettamalla joustava rakenne halutun muotoiseksi, minkä jälkeen muoto lukitaan hitsaamalla toisen puolen limiliitokset. (Mäntyjärvi et al. 2017b) Kuva 14 esittää uuden kennolevytyypin vaihtoehtoisia toteutustapoja.

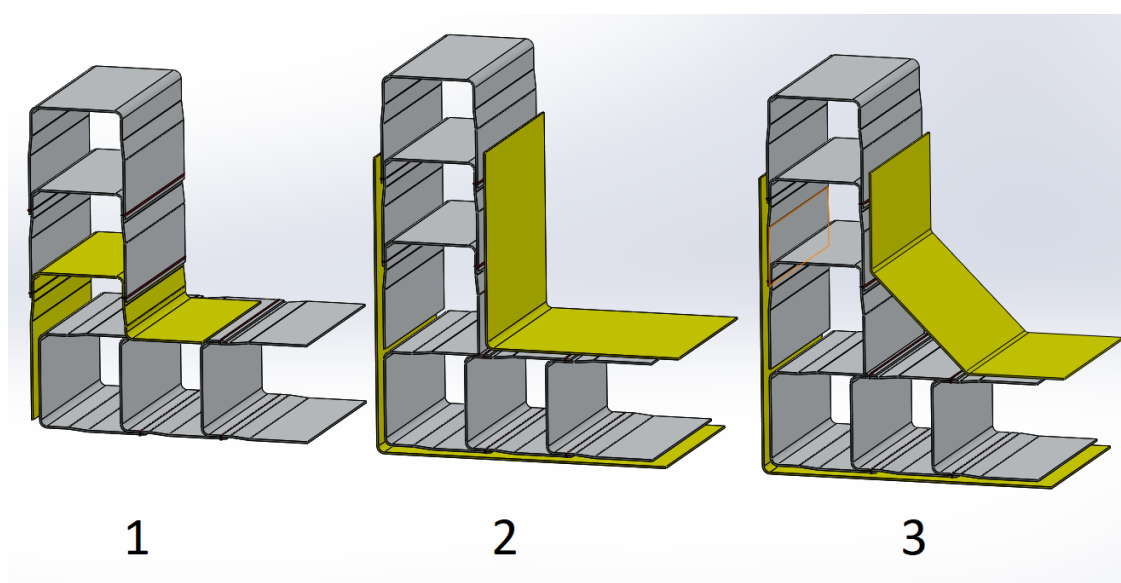


Kuva 14. Uuden kennolevytyypin toteutusvaihtoehdot (mukaillen Mäntyjärvi et al. 2017b).

Kuvan 14 kennovaihtoehto C koostuu sisäkkäin asetettavista kartionmuotoisista profiileista. Ratkaisun etuna on profiilin yksinkertainen muoto. Haittana on se, että kartiomaisuuden vuoksi limitetyt levyt eivät ole samansuuntaisia ja siten laserhitsauksessa ilmarakon eliminointi voi olla haastavaa. Keskellä nähtävä kennotyyppi ZC on johdettu tyyppistä C. Vaihtoehdon ZC profiileissa on ylimääräiset taivutukset, joiden ansiosta kennon limittyvät osuudet asettuvat täsmälleen vaakatasoon ja näin laserhitsauksessa ilmarako on helpompi poistaa levyjen välistä. Kolmas ehdotettu kennotyyppi VC perustuu epäsymmetrisen profiilin käyttöön. Ratkaisulla saavutetaan kalotti- tai hattuprofiilikennojen kaltaiset ominaisuudet, mutta haasteena on kennotyypin C tapaan erisuuntaisten liitospintojen limiliitokseen syntyvä ilmarako.

Kenno-osien liittäminen

Kennolevyosien liitosperiaatteeksi ehdotettiin kuvan 15 mukaisia ratkaisuja, joissa liitoselementit on korostettu keltaisella värillä.

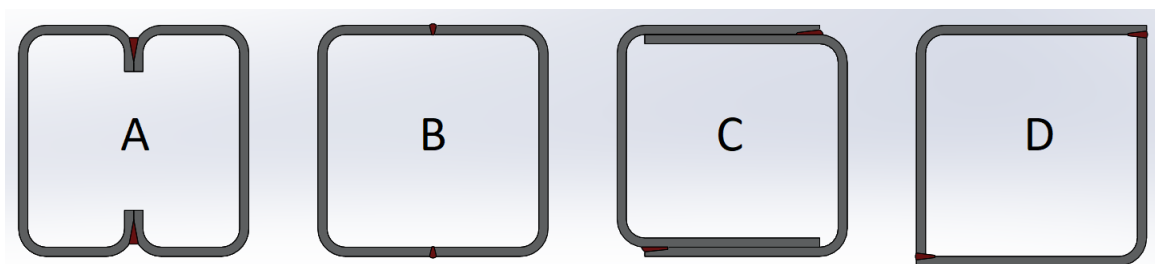


Kuva 15. Kennolevyosien liittämisetehdotukset (mukaillen Mäntyjärvi et al. 2017b).

Kuvan 15 vaihtoehto 1:n mukaisessa ratkaisussa vaakakennoon liittyvän pystykennon ensimmäinen profiili on muotoiltu liitosta varten, joten erillistä liitososaa ei tarvita. Vaihtoehdossa 2 ja 3 puolestaan on erilliset liitoskulmat, jotka laserhitsataan kennoihin kiinni. Vaihtoehdossa 3 sisäpuolisen kulman ylimääräinen taitos tuottaa nurkkaa jäykistävän vinotuen.

Rakenneputken valmistus

Myös rakenneputken osalta jouduttiin etsimään valmistustapoja, koska soveltuvaa ultralujaa rakenneputkea ei ollut saatavilla. Valmistusperiaatteeksi ehdotettiin, että levyaihiot särmätään profiileiksi ja profiilit liitetään yhteen laserhitsaamalla. Kuva 16 esittää rakenneputken vaihtoehtoisia valmistustapoja.



Kuva 16. Rakenneputken valmistusvaihtoehdot (mukaillen Mäntyjärvi et al. 2017b).

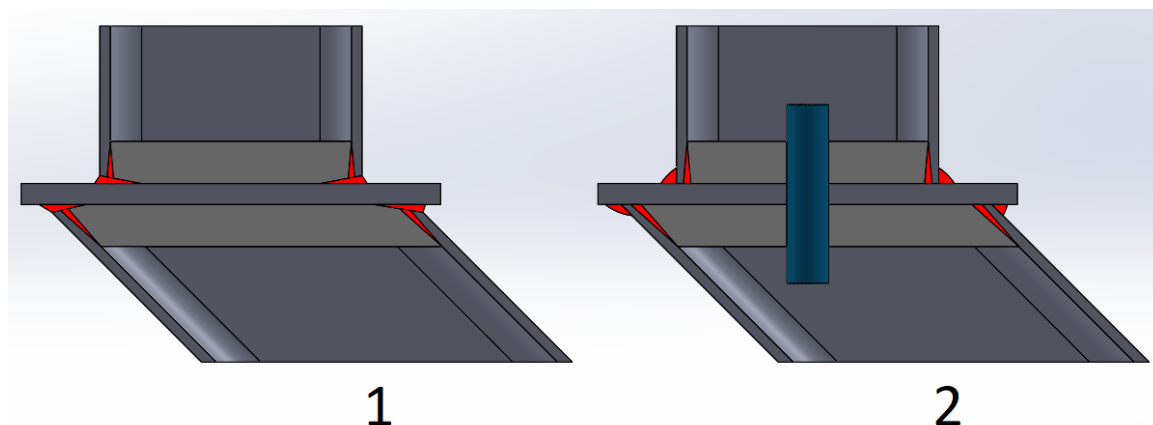
Kuvan 16 ratkaisussa A saavutetaan syvä hitsisauma, mutta rakenteen haittapuolena on vaadittavien särmäysten lukumäärä ja korkeat tarkkuusvaatimukset. Tarkkuutta voisi parantaa tarvittaessa koneistamalla liitospinnat, mikä tuottaisi ylimääräistä työtä. B-ratkaisun etuna on yksinkertaisuus, mutta tässä vaihtoehdossa profiilien reunojen on oltava erityisen suoria liitoksen onnistumiseksi. Toisaalta matalan hitsaussyvyyden ansiosta sauma olisi mahdollista hitsata sulattavan laserhitsauksen avulla, jolloin profiilien tarkkuusvaatimuksia voitaisiin alentaa. Liitosten A ja B tapauksessa liitettävät profiilit on helppo puristaa yhteen hitsauksen ajaksi. Ratkaisussa C saavutetaan syvä avaimenreikähitsi leveään liitospinnan ansiosta, mutta liitoksen onnistumiseksi liitettävien profiilien tulee olla tarkasti samanlaiset ja liitospintoja on vaikea puristaa yhteen hitsauksen aikana. Leveät laipat tuottavat ylimääräistä massaa rakenteeseen, mutta toisaalta lisämassa sijaitsee kaukana neutraaliakselista ja näin parantaa rakenteen jäykkyyttä. Vaihtoehto C voidaan toteuttaa myös siten, että toinen c-profiileista on kaapeampi ja asetetaan leveämmän profiilin sisälle. Liitostapa D:n tärkein etu on mahdollisuus asettaa profiilit edullisen hitsausrillon saavuttamiseksi, jolloin profiilien särmäyksessä syntyneiden epätarkkuuksien vaikutusta lopputuloksen valmistettavuuteen voidaan vähentää. Lisäksi profiilit sisältävät vain yhden särmättävän nurkan ja rakenne on kevyt: profiilit on myös helppo puristaa yhteen hitsausta varten. Toisaalta lopputuloksena on terävsärmäinen putki ja putken mittatarkkuus voi kärsiä profiilien asettelusta.

Kun kuvan 16 poikkileikkauksia verrataan taivutuspaalkkeina, huomataan erot laserhitsien sijainneissa ja rakenteiden väsymisalttiudessa. Ratkaisuissa A ja B taivutusakselin kulkiessa kuvassa pystysuuntaan ei raskaimmin kuormitettujen laippojen alueella ole lainkaan hitsejä, mikä vähentää hitsin väsymisestä aiheutuvan vaurion riskiä. Ratkaisuissa C ja D puolestaan ei voida saavuttaa samanlaista edullista tilannetta,

koska hitsit sijaitsevat putken nurkissa. Toisaalta ratkaisussa C ja D hitsit eivät juurikaan kuormitu, mikäli taivutusakseli kulkee hitsattujen nurkkien kautta.

Rakenneputkiosien liittäminen

Rakenneputkiosien välisten hitsausliitosten väsymiskestävyyden arvioitiin olevan kriittinen tekijä runkorakenteiden kestävyyskannalta, ja vahvistamatonta liitosta ei pidetty riittävän luotettavana (Mäntyjärvi et al. 2017b). Liitosten toteuttamistavoiksi ehdotettiin kuvan 17 mukaisia ratkaisuja.



Kuva 17. Putkiosien liittämisehdotukset (mukaillen Mäntyjärvi et al. 2017b).

Kuvassa 17 nähdään tarvittavat osat ja joko laser-, MAG- tai TIG-hitsauksella valmistettavat hitsisaumat. Vasemmalla olevan vaihtoehto 1:n tapauksessa liitoskohdan ytimen muodostaa teräslevy, johon liittyvät rakenneputket kiinnittyvät hitseillä. Putkien päihin on ennen liittoksen kokoamista hitsattu erilliset tukilevyt. Tukilevyjen tehtävänä on tuottaa lisää pinta-alaa hitsausliitokseen ja näin parantaa liittoksen väsymiskestävyyttä. Vaihtoehdossa 2 on liittoksen keskellä lisäksi läpimenevä kierretanko, jonka tehtävänä on helpottaa liittoksen kokoamista ennen hitsausta. Kierretankoa varten liittoksen keskilevyssä tulee olla kierreareikä ja apulevyissä vastaavat vapaareiät. Hitsausmenetelmäksi esitettiin ensisijaisesti laserhitsausta ja toissijaisesti MAG- tai TIG-hitsausta, mikäli valmistuksessa ei päästäisi laserhitsauksen edellyttämään tarkkuuteen.

5.2 DFA-analyysi

DFA-analyysi soveltuu Boothroyd'in ym. (1994) mukaan erityisesti olemassaolevan tuoterakenteen tai suunnitteluehdotuksen yksinkertaistamiseen konseptisuunnitteluvaiheessa. DFA-analyysin tarkoitus on löytää suunniteltavalle tuotteelle yksinkertaisin mahdollinen tuoterakenne, joka olisi periaatteessa mahdollinen valmistaa. Näin saadaan hyvät lähtökohdat tuotteen varsinaiselle valmistussuunnittelulle. DFA-analyysin kannalta NRC-projektin erityispiirteenä oli se, että tuoterakenteen yksinkertaistamisella pyrittiin ensisijaisesti mahdollisimman keveän rakenteen luomiseen ja toissijaisesti elinkaarikustannusten minimointiin.

NRC-projektissa ideointivaiheen tuloksena saatuja rakennevaihtoehtoja vertailtiin muun muassa kokoonpanojen osien lukumäärän sekä yleisesti osien valmistuksen ja kokoonpanotyön arvioidun sujuvuuden kannalta. (Mäntyjärvi 2017a) Esimerkiksi

taka-apurungon varhainen putkirakenteinen ehdotus sisälsi yhteensä 23 rakenneputkiosaa, 2 iskunvaimentimen kiinnikettä sekä 4 tukivarren kiinnityskorvakkoa. Rakenteen osien kokonaismäärä oli tällöin $23 + 2 + 4 = 29$. Edistyneempi rakenne-ehdotus sisälsi 11 rakenne-putkiosaa, 2 iskunvaimentimen kiinnikettä sekä 4 kiinnityskorvakkoa. Tällöin osien kokonaismäärä on $11 + 2 + 4 = 17$: ensimmäisestä rakenteesta saatiin vähennettyä $29 - 17 = 12$ osaa. Tämä tarkoittaa, että suhteen $12 : 29 = 0,41$ mukaisesti osien määrä väheni DFA-näkökulman ansiosta 41 prosenttia alkuperäisestä.

5.3 Kehitettävien suunnitteluehdotusten valitseminen

Tärkein kriteeri jatkokehitettävän suunnittelukonseptin valinnassa oli rakenteen turvallisuus, jota arvioitiin eri kuormitustapauksia vastaavilla FEM-analyyseillä. Keskirungon lujuus- ja keveysvaatimusten täyttämiseksi valittiin vaihtoehto, jossa rakenne-materiaalina on pääasiassa teräskennolevy. Etu- ja taka-apurunkojen on oltava myös keveitä sekä törmäyksessä hallitusti vaurioituvia, minkä vuoksi apurunkojen rakenne-periaatteiksi valittiin vaihtoehdot, joissa käytetään pääasiassa rakenneputkea. Apurungot päätettiin liittää keskirunkoon ruuvikiristeisillä kartioliitoksilla, jotta vaurioituneet apurungot voidaan tarvittaessa vaihtaa. (Mäntyjärvi et al. 2017b)

Kennolevyn valmistustavaksi valittiin kuvan 14 vaihtoehto VC, jolla saavutetaan hyvät jäykkyysominaisuudet yksinkertaisella profiilimuodolla. Kenno-osien liitostavaksi valittiin vaihtoehto 2. Tällöin kennolevyt voidaan valmistaa yksinkertaisesti samanlaisista profiileista ja kennon käsittely on helppoa. Lisäksi vaihtoehtoon 3 verrattuna sisäpuolinen liitoslevy voidaan hitsata kennoihin mahdollisimman läheltä kennojen liittymiskohtaa. Rakenneputkien pääasialliseksi valmistusperiaatteeksi valittiin kuvan 16 vaihtoehto B, jossa yhdistyvät hitsisaumojen edullinen sijainti, rakenteen keveys sekä profiilin yksinkertaisuus. Lisäksi vaihtoehdon C kaltaisia putkia käytettiin etuapurungon alemmissa runkopalkeissa: valmistusperiaatteeksi valittiin vaihtoehto, jossa epäsymmetriset C-profiilit asetetaan sisäkkäin. Rakenneputkiosien liitostavaksi valittiin yksinkertaisuuden vuoksi kuvan 17 vaihtoehto 1. Liitosvaihtoehdon 2 kohdistuspiirteen ennakoitiin olevan vaikea valmistaa sellaisella tarkkuudella, että lisäominaisuudesta olisi todellista hyötyä rakenteen kokoonpanohitsauksessa.

5.4 Materiaalien ja valmistusmenetelmien valinta

NRC-projektissa materiaali- ja tuotantokustannukset pyrittiin minimoimaan jo DFA-vaiheessa tuoterakennetta yksinkertaistamalla. Lisäksi projektin yhtenä tavoitteena oli löytää uusia tapoja käyttää ultralujaa terästä keveässä ajoneuvossa, jolloin teknologiset perustelut olivat etusijalla.

Esitettyjen määritysten perusteella materiaaliksi valittiin SSAB Ab:n valmistama Docol 1200M -teräs. (Mäntyjärvi et al. 2017b) Docol 1200M on ajoneuvoteollisuudelle suunnattu kylmävalssattu martensiittinen teräs, jonka myötölujuus on 950 MPa ja murtolujuus 1200–1400 MPa (SSAB Ab 2018a).

Käytettäväksi taivutusmenetelmäksi valittiin särmäys, jossa työkaluina käytetään yleistyökaluja eikä tuotekohtaisia työkalukustannuksia muodostu lainkaan. Lisäksi särmäyksen valintaa puolsi menetelmän yleisyys. Levymateriaalin leikkausmenetelmäksi valittiin abrasiivinen vesisuihkuleikkaus, koska materiaalin ominaisuuksien ei haluttu muuttuvan leikkaustyön seurauksena. Rakenneputkien leikkausmenetelmäksi valittiin mekaaninen leikkaus pyörösahalla, koska 3D-vesileikkaukseen soveltuvaa laitteistoa

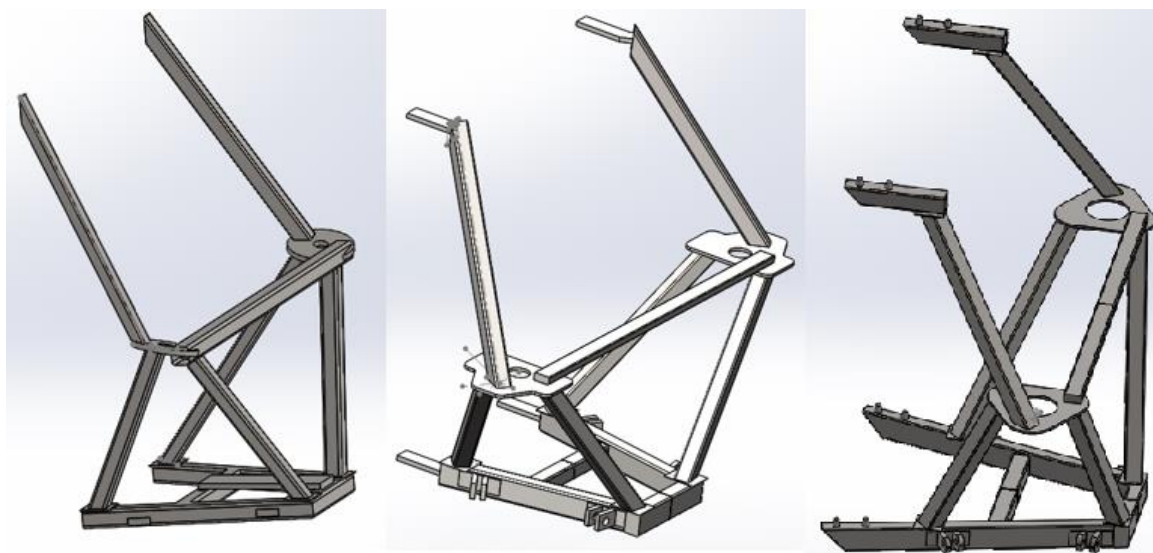
ei ollut projektissa käytettävissä. Liittämismenetelmiksi valittiin laserhitsaus ja MAG-hitsaus sekä ruuviliitos pääasiassa teknisen soveltuvuuden ja tuotevaatimusten vuoksi.

5.5 Yksityiskohtainen suunnittelu

Tässä luvussa kuvataan NRC-auton yksityiskohtaista suunnittelua. Esimerkkirakenteena käytetään auton taka-apurunkoa, jonka suunnitteluun sisältyi valitun konseptirakenteen kehitys lopulliseksi tuotemalliksi sekä rakenteen lujuuslaskenta.

5.5.1 DFM-valmistussuunnittelu

NRC-auton taka-apurungon suunnittelu aloitettiin valitun ratkaisuehdotuksen pohjalta. Perusteellisen konseptisuunnittelun ansiosta yksityiskohtaisessa suunnittelussa oli tarpeen ainoastaan toteuttaa kartioliitosten rakenne valitun periaatteen mukaisesti, hienosäätää osien mitoitus yleisesti sekä luoda valmistuksessa tarvittavat dokumentit. Rakenteen kehityksessä oli tavoitteena tuoterakenteen yksinkertaisuuden ohella valmistusmenetelmäkohtainen osien optimointi. Koska prototyyppiauton rakenneputkiosien valmistus perustui manuaalisiin työstömenetelmiin, haluttiin putkien valmistuksen olevan yksinkertaista mittatarkkuuden säilyttämiseksi. Rakenneputkiosat suunniteltiin siten, että jokainen osa voidaan katkaista sahalla yhden tason suhteen kääntämällä. Näin osan sahauskulmat määrittyvät aina yhden sivun suhteen ja putkiaihion valmistusepätkätkuudet vaikuttavat osan mittatarkkuuteen mahdollisimman vähän. Kuvassa 18 nähdään taka-apurungon suunnittelun vaiheita konseptiluonnoksesta lopulliseen rakenteeseen.

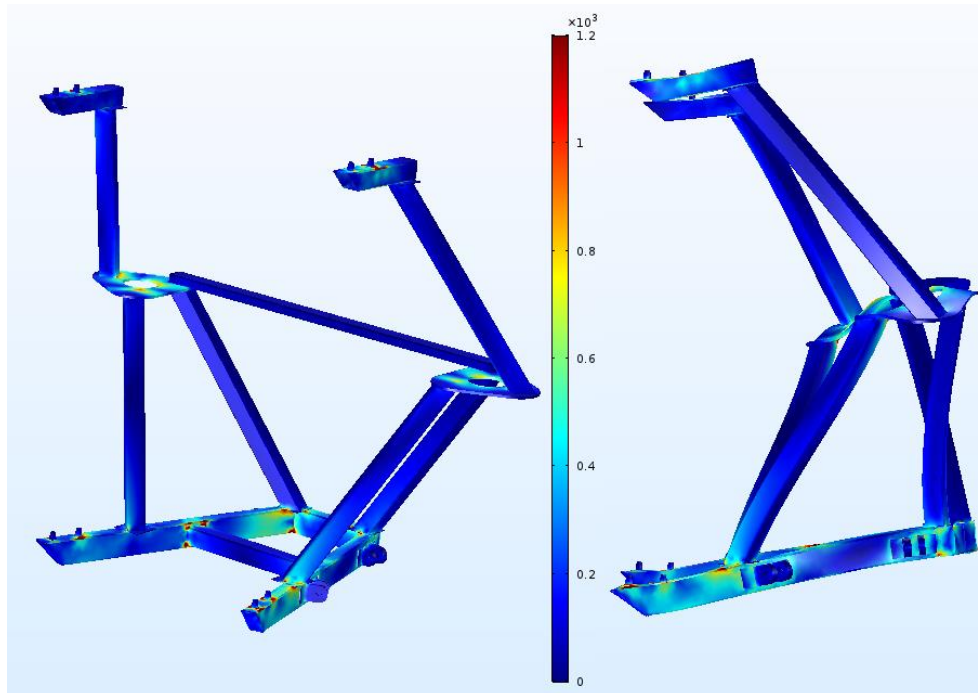


Kuva 18. Taka-apurungon yksityiskohtainen suunnittelu (mukaillen Mäntyjärvi 2017a).

5.5.2 Rakenteiden lujuusoptimointi

Rakenteiden yksityiskohtaisen suunnitteluvaiheen lujuusanalyysissä käytettiin Comsol Multiphysics -laskentaohjelmaa. Elementtityyppinä käytettiin solidielementtiä ja verkotustapana adaptiivista verkotusta. Aluksi laskennassa käytettiin elementin koon

vaihteluvälinä 4–10 mm ja tulosten tarkkuuden todentamiseksi käytettiin myös vaihteluväliä 0,5–5 mm. Kuvassa 19 nähdään taka-apurungon lujuusanalyysin tuloksina jännitysten esiintyminen ja rakenteen liioiteltu muodonmuutos. Laskentamalli on tuettu liitoskartioista jäykällä tuennalla: tuotevaatimusten mukaiset kuormitukset on kohdistettu iskunvaimentimen kiinnikkeisiin ja tukivarsien korvakoihin. Kuvan väripalkki näyttää von Mises-vertailujännitykset. (Mäntyjärvi 2018)



Kuva 19. Taka-apurungon lujuuslaskenta (mukaillen Mäntyjärvi 2018).

5.6 Valmistus

Suunniteltu NRC-auton runko valmistettiin ULTRA - Uutta liiketoimintaa innovatiivisista järjestelmätason tuote- ja palveluratkaisuista -projektin aikana pääasiassa Nivalan ELME-studion (Elektroniikan Mekaniikka) tuotantotekniikan laboratoriossa syksyn 2017 aikana. Kuvassa 20 nähdään NRC-prototyyppiajoneuvon rungon lopullinen CAD-malli sekä valmistettu runkorakenne, johon on asennettu alustan osat.



Kuva 20. NRC-ralliauton runko valmiina (Iso-Junno et al. 2018).

Yhteenveto

Tutkimuksessa etsittiin vastauksia kysymykseen, millaisen suunnitteluprosessin avulla ultralujien terästen ominaisuudet saadaan parhaiten hyödynnettyä tuotteissa. Aluksi oli määriteltävä ultralujien terästen tyypilliset ominaisuudet, jotta voitiin selvittää, mihin asioihin suunnittelussa on erityisesti kiinnitettävä huomiota. Kun matalan lujuuden teräksillä on staattisen lujuuden todentamista totuttu pitämään useissa tapauksissa riittävänä lujuusanalyysinä, tehty kirjallisuustutkimus nosti ultralujien terästen kohdalla tärkeimmiksi näkökulmiksi stabiliteettiongelmien ja väsymisvaurioiden välttämisen. Rakenteiden keventämisen vuoksi materiaalin oikeaoppinen sijoittaminen on myös tärkeää hallita.

Suunnittelutyössä ei riitä pelkästään tieto siitä, mitä asioita on huomioitava, vaan tehokas työskentely edellyttää selkeän vaiheittaisen toimintamallin omaksumista. Vastauksena tähän tarpeeseen on Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutin Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) -tutkimusryhmässä kehitetty ultralujille teräksille soveltuvaa suunnittelutapaa, jota nimitetään laajennetuksi DFMA-prosessiksi. Tämä prosessi ja sen taustalla oleva yleinen valmistus- ja kokoonpanoystävällisen suunnittelun teoria esiteltiin vastauksena tutkimuksen ydinkysymykseen. Lisäksi käsiteltiin tärkeimpiä DFMA-periaatteiden toteuttamisen apuvälineitä eli tietokoneavusteisia suunnittelutyökaluja sekä niiltä vaadittavia ominaisuuksia. Tutkimuksen loppuosaan sisällytettiin vaiheittain etenevä ja havainnollinen suunnittelutapauksen kuvaus, jonka avulla on mahdollista omaksua laajennetun DFMA-prosessin periaate.

Johdannossa mainitun mukaisesti tämä tutkimusraportti on tarkoitettu yleistason oppaaksi, joka auttaa hahmottamaan vaatimuksia, joita ultralujat teräkset tuottavat suunnittelutyöhön. Työssä ei esitelty täsmällisesti rakenteiden turvallisuuteen tai kestokäyttöön liittyviä suunnitteluvaatimuksia tai näiden vaatimusten toteuttamista, vaan näkökulma oli tuotteiden valmistettavuuden ja suunnittelutyön yhteensovittamisessa. Yleisesti voidaan todeta, että turvallisuuteen liittyvät näkökulmat ja vaatimukset ovat olennainen osa tuotteen teknisiä vaatimuksia ja niiden määrittely sekä toteutumisen varmistaminen ovat tärkeä osa suunnitteluprosessia.

Aiheen yleistasoisen luonteen vuoksi tässä työssä ei voitu määritellä täsmällisiä suunnittelutapaohjeita mihinkään tiettyihin tapauksiin. Toisaalta teoksen lähdeaineistona käytetyt DFMA-teoriaa käsittelevät teokset tarjoavat suunnittelutyöhön myös konkreettisia valmistusmenetelmäkohtaisia ohjeita, joita ei nähty mielekkääksi toistaa tämän tutkimuksen puitteissa. Tutkimuksen tekijä suosittelee lukijaa perehtymään myös mainittuihin teoksiin.

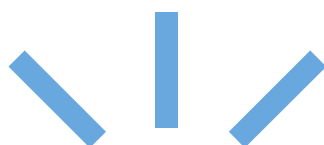
Kiitokset

Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutin Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) -tutkimusryhmä ja tutkimuksen tekijä kiittävät Meripohjolan uudistuva metalli- ja konepajateollisuus -hankkeen rahoittajaa Pohjois-Pohjanmaan liittoa, jonka kautta hankkeelle on saatu Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) rahoitusta. Lisäksi kiitämme Raahen kaupunkia hankkeen kuntarahoituksesta ja Raahen seudun yrityspalveluita hankkeen koordinoinnista.

Lähdeluettelo

- Björk, T., Hautala, P., Huhtala, K., Kivioja, S., Kleimola, M., Lavi, M., . . . Salonen, P. (2014). *Koneenosien suunnittelu* (6th ed.). Helsinki: Sanoma Pro Oy.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Knight, W. (1994). *Product design for manufacture and assembly*. New York: Marcel Dekker.
- Eskelinen, H., & Karsikas, S. (2013). *DFMA-OPAS – valmistus- ja kokoonpanoystävällisen tuotteen suunnittelu*. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Hobbacher, A. (2009). *Recommendations for fatigue design of welded joints and components*. New York, NY: Welding Research Council.
- Ilomäki, J., Lehtonen, A., Färm, R., Jokinen, K., & Väyrynen, T. (2017). *ULTRA-DFMA vaatimusmäärittely*. Unpublished manuscript.
- Iso-Junno, T., Niemi, H., Mäkikangas, J., & Mäntyjärvi, K. (2018). *Design process of durable and lightweight rally car frame from ultra high strength stainless steel*. Unpublished manuscript.
- Iso-Junno, T. (2018). In Niemi H. (Ed.), *Kartioliitos_assy.zip*
- Jokinen, K. (2016). *Pyörän ripustuksesta koriin ja apurunkoon siirtyvät voimat*. Unpublished manuscript.
- Kähönen, A., Pärssinen, V., Ilvonen, R., & Siljander, A. (1999). *Putkipalkkien ja korkealujuuksisten terästen käyttö ajoneuvorakenteissa*. (). Espoo: VTT Valmistustekniikka.
- Keeler, S., Kimchi, M. & Mooney, P. J. (2017). AHSS guidelines 6.0. Retrieved from <http://www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel-application-guidelines/>
- Kiuru, H. (2012). *Ultralujien terästen käyttö dynaamisesti kuormitetuissa koneen rakenteissa*.
- Kujala, P., Romanoff, J., Salminen, A., Varis, J., & Vilpas, M. (2003). *Teräksiset kerroslevyrakenteet*. Helsinki: Metalliteollisuuden keskusliitto.
- Lämsä, J., & Kiuru, H. (2012). *Ultralujat rakenne- ja kulutusteräkset – tärkeimmät ominaisuudet suunnittelulle*. (). Oulu: Oulun yliopisto & Raahen Seudun Teknologiakeskus Oy. Retrieved from <https://wiki oulu.fi/display/fmtk/Tietopaketit>
- Lassila, J. (1999). *Hitsattujen kennolevyjen käyttö metallituotteissa*. Helsinki: Metalliteollisuuden keskusliitto.
- Lukkari, J., Kyröläinen, A., & Kauppi, T. (2016). *Hitsauksen materiaalioppi – osa 2: Metallit ja niiden hitsattavuus*. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y.
- Mäkikangas, J., & Jokelainen, T. (2018). *Projektipalaverin aineisto*. Unpublished manuscript.
- Mäntyjärvi, K. (2017a). *Fmt-dfma*. Unpublished manuscript.
- Mäntyjärvi, K. (2017b). *ULTRA keskirunko laskenta ja runkojen vertailu*. Unpublished manuscript.
- Mäntyjärvi, K., Mäkikangas, J., Jokelainen, T., & Kananen, M. (2017a). *ULTRA -ideoinnin tulokset*. Unpublished manuscript.
- Mäntyjärvi, K., Mäkikangas, J., Jokelainen, T., & Kananen, M. (2017b). *ULTRA-Proto1_Runko_V2*. Unpublished manuscript.
- Mäntyjärvi, K. (2018). In Niemi H. (Ed.), *FEM-analyysit*
- MET. (2001). *Muokatut teräkset – raaka-ainekäsikirja 1* (3rd ed.). Helsinki: Metalliteollisuuden keskusliitto.
- Miilux Oy. (2017). Kulutusteräkset. Retrieved from <http://www.miilux.fi/kulutusterakset/>

- Oulun Ammattikorkeakoulu. (2017a). DFMA keveiden ja kestävien runkorakenteiden suunnittelussa ja toteutuksessa. Retrieved from <http://www.oamk.fi/fi/tutkimus-ja-kehitys/hankkeet/ultra/runkorakenteet/>
- Oulun Ammattikorkeakoulu. (2017b). Nrc. Retrieved from <http://www.oamk.fi/fi/tutkimus-ja-kehitys/nrc/>
- Outinen, H., Salmi, T., & Vulli, P. (2007). *Lujuusopin perusteet*. Tampere: Pressus Oy.
- Pere, A. (2016). *Koneenpiirustus 1-2* (12th ed.). Espoo: Kirpe Oy.
- Pohjalainen, T. (2007, Kenno keventää hissien lattiaa.27(2)
- Rabb, R. (2017). *Väsyminen ja todennäköisyysteoria*. Oulu: Oulun yliopisto.
- SolidWorks Corporation. (2017a). Finite element analysis. Retrieved from <http://www.solidworks.com/sw/products/simulation/finite-element-analysis.htm>
- SolidWorks Corporation. (2017b). SciArt, LLC: ParetoWorks. Retrieved from <http://www.solidworks.com/sw/products/details.htm?productID=5394>
- SSAB Ab. (2017). *Design handbook – structural design and manufacturing in high-strength steel*. Borlänge: SSAB Ab.
- SSAB Ab. (2018a). Docol product program for the automotive industry. Retrieved from <https://www.ssab.fi/ladattavat-tiedostot?dcFilter=&dcSearch=>
- SSAB Ab. (2018b). Strenx. Retrieved from <http://www.ssab.fi/tuotteet/brandit/strenx>
- SSAB Ab. (2018c). Strenx tube 900MH. Retrieved from <https://www.ssab.fi/tuotteet/teraslukkat/rakenneputket/tuotteet/strenx-tube-900-mh>



**KERTTU SAALASTI
INSTITUUTTI**

**OULUN
YLIOPISTO**

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

POHJOIS-POHJANMAA
Council of Oulu Region



MERIPOHJOLA
UUDISTUVA METALLI- JA KONEPAJATEOLLISUUS



RAAHEN SEUDUN
YRITYSPALVELUT

OULUN YLIOPISTO
KERTTU SAALASTI INSTITUUTTI
FMT