

Moottoripyörän rungon muuntelun valvontakriteerit muutoskatsastuksessa

**Panu Hava,
Lappeenrannan teknillinen yliopisto**

Moottoripyörän rungon muuntelun valvontakriteerit muutoksastuksessa

Panu Hava, Lappeenrannan teknillinen yliopisto

ALKUSANAT

Tutkimuksen tavoitteena oli selkeyttää muunneltujen moottoripyörien runkojen muutoksastuksen kriteereitä tulevaisuudessa. Moottoripyörien rungoille ei ole asetettu vaatimuksia kestävyys suhteen. Runkomuutokset vaativat kuitenkin muutoksastuksen, missä on tarvittaessa esitettävä asiantuntijaselvitys hitsaustyöstä ja rakenteen lujuudesta. Asetus on osittain epäselvä alan harrastajille ja toimijoille, jotka muuntelevat erityisesti chopper- ja katupyörien runkoja.

Tutkimuksen on tehnyt Panu Hava Lappeenrannan teknillisestä yliopistosta. Työtä on AKEssa ohjannut yksikönpäällikkö Sami Peuranen.

Tutkimus kuuluu AKE:n vuoden 2009 tutkimussuunnitelman mukaisiin tutkimuksiin.

Helsingissä, 2. marraskuuta 2009

Juhani Intosalmi
tutkimusjohtaja
Ajoneuvohallintokeskus AKE

FÖRORD

Undersökningens mål var att förtydliga kriterierna för modifierade motorcykelramar vid ändringsbesiktningar i framtiden. Inga krav är ställda på motorcykelramars hållfasthet. Ändringar av ramen kräver emellertid alltid en ändringsbesiktning där en expertutredning ska uppvisas för svetsarbeten och konstruktionens hållfasthet om så behövs. Förordningen är delvis oklar för utövare och aktörer i branschen som modifierar ramarna framför allt på chopper- och gatucyklar.

Undersökningen har utförts av Panu Hava vid Villmanstrands tekniska universitet. Arbetet leddes vid AKE av enhetschef Sami Peuranen.

Undersökningen ingår i AKEs forskningsplan för 2009.

Helsingfors den 2 november 2009

Juhani Intosalmi
forskningschef
Fordonsförvaltningscentralen AKE

FOREWORD

The purpose of this study was to clarify the body alteration inspection criteria of customised motorcycles in the future. There are no durability requirements for motorcycle bodies. However, an alteration inspection is required after body alterations, and an expert statement on the welding and structural strength must be presented at the inspection upon request. This regulation is partly unclear for leisure motorcyclists and entrepreneurs who customise the bodies of chopper and street motorcycles in particular.

The study was conducted by Panu Hava from Lappeenranta University of Technology and managed by Sami Peuranen, Head of Unit, at AKE.

The study is part of AKE's research in compliance with its 2009 research plan.

Helsinki, 02.11.09

Juhani Intosalmi
Director of Research
Finnish Vehicle Administration (AKE)

Sisällysluettelo

Index

Tiivistelmä

Sammanfattning

Abstract

1	Johdanto.....	1
1.1	Lähtökohdat.....	1
1.1.1	Moottoripyörän muuntelu	1
1.1.2	Nykyinen lainsäädäntö.....	1
1.1.3	Ongelmakohdat.....	2
1.1.4	Muutosehdotus	2
1.2	Moottoripyörien turvallisuus.....	3
1.2.1	Onnettomuustilastot.....	3
1.2.2	Turvallisuuden kehitys	3
1.3	Tavoitteena muuntelun kriteerien selkeyttäminen.....	4
2	Moottoripyörien rungot.....	5
2.1	Rungot käyttötarkoituksen mukaan	5
2.1.1	Chopper-pyörien putkirungot	5
2.1.2	Katupyörien rungot.....	6
2.2	Runkomuutokset	7
2.2.1	Chopper-pyörien runkomuutokset	7
2.2.2	Katupyörien runkomuutokset	8
2.2.3	Vaurioituneen rungon oikaisu	9
2.3	Runkomateriaalit	9
2.3.1	Runkomateriaalien ominaisuuksia	9
2.3.2	Runkomateriaalien lujuus	10
3	Liittämismenetelmät rungon muuntelussa	11
3.1	Hitsaus.....	11
3.1.1	Hitsattavuus	11
3.1.2	Runkoterästen erityisvaatimuksia	12
3.1.3	Runkoalumiinien erityisvaatimuksia.....	12
3.1.4	Tuntemattoman materiaalin hitsaus.....	13
3.2	Kovajuotto.....	13
3.3	Laatu liittämismenetelmissä	13
3.3.1	Virheiden välttäminen	14
3.3.2	Laatu tarkastuksen kautta.....	14
3.4	Rungon oikaisu.....	14
3.5	Liittämismenetelmien ongelmat.....	15
4	Rungon lujuustarkastelu	16
4.1	Rajoitetun vaurion periaate	16
4.1.1	Rungon kestävyyskriteerit	17
4.2	Väsyminen.....	17
4.2.1	Väsymismitoitus	17
4.2.2	Jännityshistoria	18
4.2.3	Väsymiskestävyysmuodostuminen.....	19
4.2.4	Tehollinen lovijännitys.....	20
5	Moottoripyörään vaikuttavat voimat.....	22
5.1	Jarrutus.....	23
5.2	Kiihdytys	25
5.3	Kaarrajo	26
5.4	Väsymistarkastelun kuormitus.....	28
5.4.1	Laskennallinen väsymiskuormitus	28

5.4.2	Todellinen moottoripyörän kuormitus	28
6	Rungon vauriosietoisuus	29
6.1	Rungon mallinnus	29
6.1.1	Mallin geometria ja verkotus	30
6.1.2	Vaurion mallinnus	31
6.1.3	Reunaehdot	32
6.1.4	Rungon kuormitusten asetus	33
6.1.5	Runkomallin rajoitukset	35
6.2	Mallinnettujen runkojen lujuustarkastelu	35
6.2.1	Vauriosietoisuuden kriteerit	35
6.2.2	Jännitystasot ehjässä rungossa	36
6.2.3	Vauriosietoisuuden tarkastelu	37
6.2.4	Vauriosietoisuuden tulokset	40
7	Rungon väsymiskestävyys	41
7.1	Hitsin geometrian mallinnus	41
7.2	Elementtimenetelmän parametrit	41
7.2.1	Verkotus tehollista lovijännitystä varten	41
7.2.2	Kuormitus ja reunaehdot alimallille	42
7.2.3	Emäputken alueen mallin rajoitukset	43
7.3	Kriittisten hitsausliitosten väsymiskestävyys	43
7.3.1	Väsymistarkastelun kriteerit	43
7.3.2	Suurimmat lovijännitykset	43
7.3.3	Kuormitusblokki väsymistarkastelussa	44
7.3.4	Jännityshistoria ja väsymisikä	45
7.3.5	Väsymislaskennan tulokset	47
8	Kriteerit muutostarkastuksessa	48
8.1	Ehdotukset muutostarkastukseen	48
8.1.1	Mallikirjasto	48
8.1.2	Mallikirjaston ulkopuoliset rungot	49
8.1.3	Ehdotus muuntelun kannalta	49
8.2	Vaatimusten vertailu	50
9	Pohdinta ja johtopäätökset	52
9.1	Käytettyjen mallien epätarkkuudet	52
9.2	Johtopäätökset	52
9.3	Kehitysehdotukset	53
10	Lähdeluettelo	54

TIIVISTELMÄ

Nykyinen moottoripyörien muutuskatsastusta käsittelevä asetus edellyttää tarvittaessa asiantuntijaselvitystä rakennemuutoksen lujuudesta ja hitsaustyöstä. Lainsäädäntö aiheuttaa paikoin tulkintavaikeuksia ja rajoitteita moottoripyörä-harrastajille ja alan toimijoille. Asetus rajoittaa moottoripyörän geometriaa muun muassa akselivälin ja emäputken kulman osalta. Ajoneuvojen yksittäishyväksyntä ja rakenteen muuttaminen -raportin perusteella tämän työn tavoitteena oli tutkia erityisesti teräspankrungon kestävyyttä sekä laatia runkomalleja, jotka voitaisiin hyväksyä yksinkertaisin menettelyin.

Moottoripyörien runkoja valmistetaan hitsaamalla seostamattomista teräksistä ja lämpökäsiteltävistä alumiini- ja terässeoksista. Runkojen muuntelu suoritetaan myös yleisesti hitsaamalla. Turvallisuuden kannalta tärkeiltä hitsausliitoksilta vaaditaan hyvää laatua, joka saavutetaan oikeilla hitsausparametreilla ja -suorituksella. Pätevöitynyt hitsaaja kykenee täyttämään seostamattoman teräksen hitsaukseen liittyvät laatukriteerit.

Hitsien laadun merkitystä moottoripyörän rungossa tutkittiin soveltamalla rajoitetun vahingon periaatetta. Vauriotapauksena mallinnettiin satunnaisen rungon hitsausliitoksen murtuminen eri kuormitustilanteissa elementtimenetelmää hyödyntäen. Chopper-tyyppisten moottoripyörien runkojen todettiin olevan osittain vauriosietoisia. Työssä tunnistettiin rungon kriittiset hitsausliitokset, jotka tyypillisesti sijaitsevat emä- ja vaakaputken alueilla. Lisäksi yhdessä rungossa myös kehtoputket todettiin kriittisiksi.

Moottoripyörien runkojen kriittisiä hitsausliitoksia tarkasteltiin väsymisen kannalta. Kriittisten alueiden hitsausliitosten väsymiskestävyyttä vertailtiin soveltamalla tehollista loviännitystä oletetulla kuormituksella. Tulosten perusteella muunneltu moottoripyörän runko voi olla alkuperäisrunkoa kestävämpi tai heikompi. Moottoripyörän akseliväli tai emäputken kulma eivät määrää kestävyyttä, vaan rakenteen yksityiskohtainen suunnittelu. Kriittisten liitosten väsymiskestävyyksissä havaittiin merkittäviä eroja eri mallien välillä.

Muutuskatsastuksen tueksi muodostettiin mallikirjasto tyypillisistä runkomuutoksista. Mallikirjasto sisältää tarkastellut kolme runkoa sekä näiden kriittiset alueet ja mitat. Kriittisten alueiden hitsaamiseen ehdotetaan vaadittavaksi pätevöitynyttä hitsaajaa.

SAMMANFATTNING

Den befintliga förordningen, som behandlar ändringsbesiktning av motorcyklar, kräver vid behov en expertutredning av konstruktionsändringens hållfasthet och svetsarbetet. Lagstiftningen orsakar ställvis tolkningssvårigheter och begränsningar för motorcykelutövarna och aktörerna i branschen. Förordningen begränsar motorcykelns geometri, bland annat axelavståndet och styrrörets vinkel. Målsättningen med denna undersökning var att med rapporten *"Fordonens enskilda godkännande och konstruktionsändring"* som utgångspunkt undersöka hållfastheten hos en stålrörsram och utarbeta rammodeller som kan godkännas med enkla förfaranden.

Motorcykelramarna tillverkas genom svetsning av olegerat stål samt av värmebehandlade aluminium- och stålblandningar. Modifieringen av ramarna utförs generellt genom svetsning. God kvalitet krävs av de svetsfogar som är viktiga för säkerheten vilket uppnås med korrekta svetsparametrar och rätt utförda svetsningar. En auktoriserad svetsare har förmågan att uppfylla kvalitetskriterierna för svetsning av olegerat stål.

Betydelsen av svetsfogarnas kvalitet för motorcykelramen undersöktes genom att tillämpa principen begränsad skada. Som skadehändelse modellerades ett sporadiskt brott i ramens svetsfog i olika belastningssituationer med hjälp av finita elementmetoden. Ramarna hos motorcyklar av choppertyp visade sig vara partiellt skadetåliga. Under arbetet identifierades ramens kritiska svetsfogar som oftast förekommer i området kring styrröret och det horisontella röret. Dessutom konstaterades att rören i vaggan i en av ramarna var kritiska.

Utmattningen i motorcykelramarnas kritiska svetsfogar kontrollerades. Utmattningshållfastheten hos svetsfogarna i de kritiska områdena jämfördes genom att tillämpa effective notch-metoden vid antagen belastning. Resultaten visar att en modifierad motorcykelram kan vara starkare eller svagare än originalramen. Motorcykelns axelavstånd eller styrrörets vinkel bestämmer inte hållfastheten, utan strukturens detaljkonstruktion. Mellan olika modeller observerades betydande differenser i utmattningshållfastheten hos kritiska fogar.

Ett modellbibliotek över ofta förekommande rammodifieringar skapades som ett stöd vid ändringsbesiktningen. Modellbiblioteket innehåller tre undersökta ramar samt ramarnas kritiska områden och dimensioner. Vårt förslag är att endast auktoriserade svetsare får utföra svetsning av kritiska områden.

ABSTRACT

The legislation that covers modifying of motorcycle frames is ambiguous for enthusiasts and technicians. Currently, when modifying the structure of a motorcycle, an expert report needs to be presented when required. The expert report has to cover the strength of the structure and the welding. The law also limits the wheelbase and the angle of the steering head of a motorcycle. Based on a general report on acceptance of structural modifications, the goal of this work was to study the strength of motorcycle frames.

Motorcycle frames are manufactured by welding from mild steel and heat treated aluminium and steel alloys. Modifying of frames is generally carried out by welding. For safety, critical welds are required to have predictable strength and quality, which can be obtained with correct parameters and execution of welding. The requirements for mild steel can be satisfied by a qualified welder.

Significance of weld quality in motorcycle frames was assessed using the fail safe concept. As a failure case, a random weld defect was modelled using finite element method. Covering different load cases, the chopper style motorcycle frames were determined to be partially fail safe and the critical welds were discovered in the area of the steering head and the main tube. In one frame also the cradle pipes were determined to be critical.

The fatigue lives of the critical welds were assessed using the effective notch stress method. Different structures of steering heads were modelled for comparison under calculated load spectrum. Based on the results, a modified motorcycle frame can be stronger or weaker compared to an original frame. Fatigue strength of a motorcycle frame is determined by a detailed design, not the wheelbase or the angle of the steering head. There were significant differences between the fatigue lives of the modelled frames.

A set of frames was created to support the inspection process of a typical modified frame. The set consists of the reviewed frames, their critical areas and required dimensions. Critical areas are proposed to be welded only by a qualified welder.

1 Johdanto

1.1 Lähtökohdat

1.1.1 Moottoripyörän muuntelu

Moottoripyörien ajo-ominaisuuksia ja ulkonäköä muunnellaan, kun kaupallinen tuote ei riitä tyydyttämään moottoripyöräharrastajan henkilökohtaisia tarpeita. Muotoiluun ja estetiikkaan kiinnitetään huomiota, moottoripyörää halutaan personoida. Harrastajan tieto- ja taitotason noustessa toteutetaan myös rakenteellisia muutoksia. (Malk 2009) Moottoripyörätyypeistä (liite 1) runkojen muuntelu keskittyy erityisesti chopper- ja katupyöriin, jotka on esitetty kuvassa 1. Runkojen muuntelu tapahtuu pääosin hitsaamalla. (Nieminen 2009; Anttila 2009)



Kuva 1. Chopper- ja katupyörä (MAIDS 2004).

1.1.2 Nykyinen lainsäädäntö

"2 § Runkomuutokset ja -korjaukset

1. Moottoripyörän ja mopon rungon rakenteen saa muuttaa, moottoripyörän ja mopon rungon vaihtaa malliltaan alkuperäisestä poikkeavaan ja moottoripyörän ja mopon rungon korjata hitsaamalla tässä pykälässä säädettyin ehdoin.

2. Hitsattaessa on käytettävä rungon perusaineelle soveltuvia hitsausaineita ja -tapaa. Moottorinkiinnikkeiden tulee lujuudeltaan vastata alkuperäistä rakennetta. Mikäli moottoripyörään vaihdetaan malliltaan alkuperäisestä poikkeava runko, tulee ajoneuvossa olla asianmukainen jousitus myös takana ja valmistenumero meistettynä runkoon.

3. Vaurioitunut runko on uusittava, milloin takahaarukan tai ohjauksen laakeriputken asento on voimakkaan iskun johdosta paikallisesti muuttunut tai vastaava kiinnityskohta tai putki on vaurioitunut. Jos mopon runko on uusittu, on tyyppikilpi siirrettävä uuteen runkoon.

4. Taipuneen tai vääntyneen rungon saa oikaista ehdolla, että vauriossa syntynyt muodonmuutos on vähäinen ja on tapahtunut siten, että runkoputkiin ei ole syntynyt litistymiä, painumia tai halkeamia. Oikaisun yhteydessä runkoputkia saa tarvit-

taessa kuumentaa, mikäli kuumentamisen voi rajoittaa rungon lujuuden ja runkoon ajettaessa kohdistuvien rasitusten kannalta vähemmän merkityksellisiin kohtiin.

5. Lisävarusteiden ja laitteiden asennusta varten tarvittavat kiinnityskorvakkeet on kiinnitettävä runkoon puristusliitoksella, joka kiristetään ruuvien avulla. Korvakkeita ei saa kiinnittää hitsaamalla eikä runkoon saa tehdä reikiä.

6. Mitä edellä on määrätty rungosta, koskee soveltuvin osin myös pyöräntuenta-laitteita.” (Liikenneministeriön päätös 332/1992, 2 §)

Etuhaarukan muutoksista on määrätty seuraavasti:

”Jos laakeriputken asentoa on muutettu rungon valmistajan tarkoittamasta asennosta poikkeavaksi, hitsaustyöstä ja rakenteen lujuudesta esitetään tarvittaessa asiantuntijaselvitys” (Liikenneministeriön päätös 332/1992, 3 §)

Lisäksi etuhaarukan kallistuskulma saa olla enintään 47 astetta ja moottoripyörän akseliväli enintään 200 cm. (mt. 3 §) Rungon muutokset vaativat aina muutostarkastuksen (mt. 11 §). Muutostarkastus on ajoneuvon muutosten hyväksymiseksi ja ajoneuvosta rekisteriin merkittyjen tietojen muuttamiseksi tai täydentämiseksi suoritettava tarkastus (Ajoneuvolaki 1090/2002, 3 §).

1.1.3 Ongelmakohdat

Ajoneuvolain periaate on, että ajoneuvon tulee aina täyttää sille uutena asetetut vaatimukset. Vaatimuksien toteutumista ei liikenteessä olevien ajoneuvojen osalta tapahtuvassa käytännön valvonnassa kuitenkaan voida mitata. Sarjavalmisteisille ajoneuvoille tarkoitettujen direktiivien soveltaminen muutostarkastuksessa on muodostanut välillisen kiellon tehdä ajoneuvoille korjauksia tai muutoksia, jotka luonteensa puolesta kuitenkin on katsottu tarkoituksenmukaisiksi sallia. (Rautavirta 2009, 2-3)

Nykyinen moottoripyörän rakenteen muuntelua koskeva asetus ei ole selvä suomalaisille alan harrastajille tai yrityksille; se ei anna täsmällisiä ohjeita muutostöiden toteuttamiseen, dokumentointiin tai tarkastukseen. Asetuksessa mainittu tarvittaessa toimitettava selvitys hitsaustyöstä ja rakenteen lujuudesta ei ole yksikäsitteinen. Moottoripyörän akselivälin pituuden tai etuhaarukan kallistuskulman rajoituksille ei nähdä syytä. (Anttila 2009; Nieminen 2009)

1.1.4 Muutosehdotus

Ajoneuvohallintokeskus on vuoden 2006 toimeksiannon perusteella selvittänyt keinoja säädösten kehittämiseksi ja selkeyttämiseksi, huomiona yksittäisten ajoneuvojen rakentelun ja muuntelun sekä valvonnan tarpeet. Työryhmän raportin esitysten perusteella on liikenneministeriön päätös vuodelta 1992 esitetty korvattavaksi uudella asetuksella. Luonnos asetuksesta valmistui tämän työn edetessä kesällä 2009, perustuen erillisiin selvityksiin. (Rautavirta 2009, 3) Luonnos ei perustunut tämän työn tuloksiin. Luonnos asetuksesta ottaa kantaa runkomuutoksiin seuraavasti:

1. Ajoneuvon rungon rakenteen saa muuttaa, ja korjata hitsaamalla tässä pykälässä säädetyn ehdoin. Rungon saa vaihtaa malliltaan alkuperäisestä poikkea-

vaan vähintään suurimmalta teknisesti sallitulta massaltaan ja teholtaan samansuuruiseen ajoneuvoon tarkoitettuun. Kevytmallista tehtyä runkoa saa työstää vain ajoneuvon valmistajan ohjeiden mukaisesti.

2. Runkomuutoksissa on käytettävä tarkoitukseen soveltuvia ominaisuuksiltaan alkuperäisen kaltaisia materiaaleja. Hitsattaessa on käytettävä rungon perusaineelle soveltuvia hitsauslisäaineita ja hitsaustapaa. Runkorakenteen sekä kiinnikkeiden ja korvakkeiden liitosten on oltava rakenteeltaan lujia ja huomioitava kasvaneet rasitukset. Hitsausseamat on varauduttava tarvittaessa esittämään tarkastettaviksi viimeistelemättöminä.

3. Vaurioitunut runko on uusittava vauriokohtaan nähden riittävän laajalta alueelta käyttäen tarkoitukseen soveltuvaa materiaalia. Taipuneen tai vääntyneen rungon saa oikaista, jos vauriossa syntynyt muodonmuutos on vähäinen ja jos runkoputkiin ei ole syntynyt litistymiä, painumia tai halkeamia. (Luonnos: Liikenne- ja viestintäministeriön asetus L-luokan ajoneuvon korjaamisesta ja rakenteen muuttamisesta 2009)

1.2 Moottoripyörien turvallisuus

Moottoripyörän runkoa tai rungon vikaantumista onnettomuussyynä tai vahingon aiheuttajana ei ole julkisissa tutkimuksissa käsitelty. Myöskään moottoripyörän muuntelun vaikutusta turvallisuuteen ei ole tutkittu. (MAIDS 2004; Mattsson & Summala 2008) Rungon vaarallisuutta on kuitenkin rajoitettu ulokkeiden osalta; ruumiinvammojen riskiä tai vakavuutta ei saa ulokkeilla lisätä. Moottoripyörän rungon kestävydestä ei ole olemassa vaatimuksia. (97/24/ETY, luku 3)

1.2.1 Onnettomuustilastot

Moottoripyöriä koskevissa onnettomuustutkimuksissa on tarkasteltu onnettomuuksiin johtaneita syitä ja onnettomuusriskiä kasvattavia tekijöitä. Suomalaisessa tutkimuksessa suistumisonnettomuuksista yli 90 prosenttia on johtunut joko käsittely-, arviointi- tai havainnointivirheistä. (Mattsson & Summala 2008, 38). Eurooppalaisen tutkimuksen mukaan tekninen vika on ollut pääsyyinä 0,3 prosenttiin ja myötävaikuttimena 1,6 prosenttiin onnettomuuksista. Teknisistä vioista suurin osa on ollut renkaaseen tai pyörään liittyviä ongelmia. Pyörätyypeittäin muunneltujen katupyörien osuus onnettomuuksista on havaittu suuremmaksi kuin niiden osuus kannasta. Tässä yhteydessä muunnellulla on tarkoitettu esimerkiksi vaihdettua pakoputkistoa. Chopper-tyyppisillä moottoripyörillä osuus ei ole ollut kannasta poikkeava. (MAIDS 2004, 29–43) MAIDS-tutkimuksen pyörätyypit on esitetty liitteessä 1. Teknisistä ominaisuuksista moottoripyörän korkean teho/painosuhteen on todettu nostavan onnettomuuksien suhteellista määrää (Mattsson & Summala 2008, 18).

1.2.2 Turvallisuuden kehitys

Moottoripyörien turvalaitteiden arviointiin on kehitetty standardi ISO 13232. Standardi sisältää ohjeet kuljettajalle aiheutuvan vahingon arviointiin törmäystesteissä ja -simulaatioissa. (ISO 13232:1996, Chawla ym. 2003 mukaan, 1) Simulointi vaatii yksityiskohtien tarkkaa mallinnusta tuottaakseen oikeita tuloksia (Chawla ym. 2003, 9). Kuvassa 2 on esitetty simulaation ja törmäystestin vertailua.



Kuva 2. FE-menetelmällä simuloitu moottoripyörän ja auton törmäys (Chawla ym. 2003, 5).

Ainakin Honda on hyödyntänyt ISO 13232 -standardia airbag-järjestelmän simuloinnissa ja testauksessa. Vuonna 2005 Honda kehitti ensimmäisenä airbag-järjestelmän tuotannossa olevaan moottoripyörään. (Motorcycle Airbag System 2005, 5)

Suomalaistutkimuksen ehdotukset moottoripyörän turvallisuuden lisäämiseksi tulevaisuudessa ovat moottoripyörän rakenteen osalta jarruteknologiaan liittyviä sekä moottoripyörän asennon ja nopeuden valvontajärjestelmiä. (Mattsson & Summala 2008, 61)

Rungon vikaantumista moottoripyörien onnettomuustilastoissa ei ole käsitelty, joten sen vaikutus moottoripyörän turvallisuuteen lienee vähäinen. Turvallisuutta ei kuitenkaan rungon muuntelun kautta ole syytä alentaa.

1.3 Tavoitteena muuntelun kriteerien selkeyttäminen

Työn tavoitteena on selvittää tyypillisten moottoripyörien runkomuutosten vaikutus rungon kestävyys. Kestävyyttä tarkastellaan hitsauksen ja rungon rakenteen muutosten kannalta. Koska suurin osa hitsattujen rakenteiden vaurioista johtuu väsymisestä (Niemi 2003, 92), on tarkastelun lähtökohtana rungon hitsausliitoksen väsymisvaurio. Lujuustarkastelun tulosten perusteella laaditaan ehdotus tyypillisten runkomuutosten hyväksynnälle muutostatsastuksessa. Moottoripyörän rakenteen osalta tutkimus rajataan moottoripyörän runkoon ja takahaarukkaan.

2 Moottoripyörien rungot

Moottoripyörän rungon päätoimintoina ovat kuorman kantaminen ja ajo-ominaisuuksien tukeminen. Rungon täytyy kantaa moottoripyörän komponenteista ja kuljettajasta muodostuva staattinen ja väsyttävä kuormitus. Rungon tulee myös tukea moottoripyörän ajo-ominaisuuksia riittävällä vääntö- ja taivutusjäykkyydellä. (Foale 2002, 1:3) Usein moottoripyörältä vaaditaan miellyttävää ulkonäköä ja kuljettajan ergonomiaa, mihin rungolla on suuri merkitys (mts. 10:23).

Haluttuja ominaisuuksia tavoitellaan valitsemalla käyttötarkoitukseen sopiva runkotyyppi. Rungon tyyppi ja käyttötarkoitus määrittävät rungolle ominaiset muuntelun kohteet ja tavoitteet. Rungon materiaali määrittää myös rungon ominaisuuksia ja on osittain sidoksissa runkotyyppiin. (Foale 2002, 13:1; Nieminen 2009)

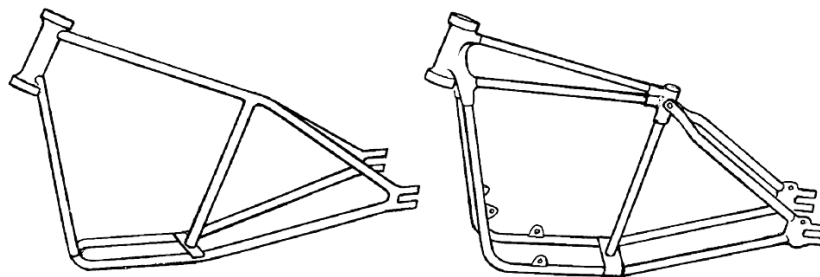
2.1 Rungot käyttötarkoituksen mukaan

Chopper-pyörät rakennetaan ainoastaan putkirungoista perinteitä kunnioittaen (Nieminen 2009). Katupyörissä suorituskyky on tärkeä ominaisuus ja runkotyypejä on useita. Perinteiden takia katupyörissä nähdään edelleen putkirunkoja, mutta tällä hetkellä suorituskykyisimmiltä vaikuttavat twin spar -tyyppiset palkkirungot. (Foale 2002, 10:33)

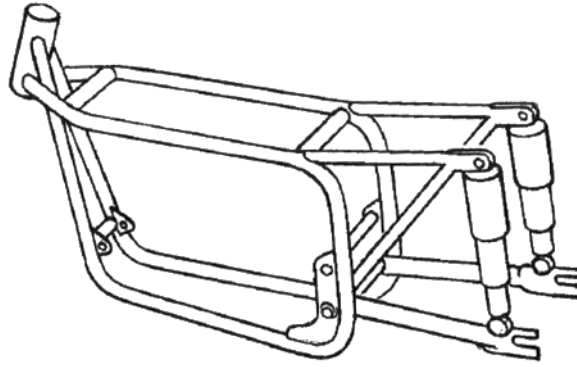
2.1.1 Chopper-pyörien putkirungot

Chopper-pyörät rakennetaan kehtoputki- ja kaksoiskehtoputkirungon ympärille (Nieminen 2009). Kehtoputkirunkoja on esitetty kuvassa 3. Kehtoputkirungoissa päätarkoituksena on luoda tila moottorille, rungon jäykkyys on toissijaista. (Foale 2002, 1:3-1:4) Kaksoiskehtoputkirunko on jäykempi ja soveltuu paremmin tehokkaille ja suurille moottoripyörille (Coombs 2002, 9:4).

Kuvasta 3 nähdään, kuinka takahaarukka on kiinnitetty jäykästi moottoripyörän runkoon. Jäykkäperäisestä rungosta siirryttiin nivelöityyn takahaarukkaan Norton ”höyhenpeti”-rungon (kuva 4) myötä, jolloin matkustusmukavuus parani oleellisesti (Foale 2002, 1:6). Chopper-pyörissä käytetään kuitenkin edelleen usein jäykkäperäistä runkoa (Nieminen 2009).



Kuva 3. Kehtoputkirunko ja kaksoiskehtoputkirunko (Foale 2002, 1:4).

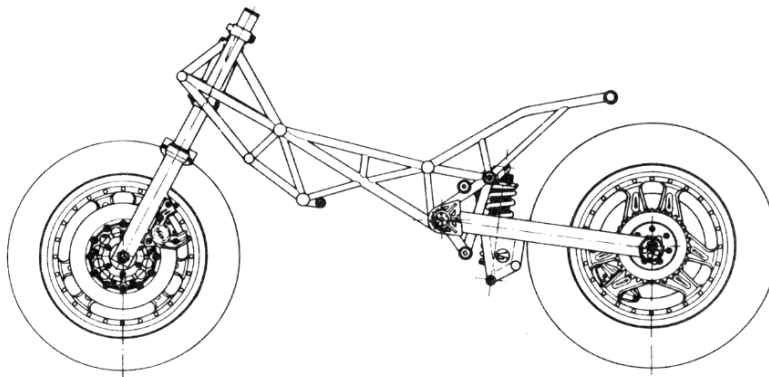


Kuva 4. Norton "höyhenpeti" nivelöidyllä takahaarukalla (Foale 2002, 1:6).

2.1.2 Katupyörien rungot

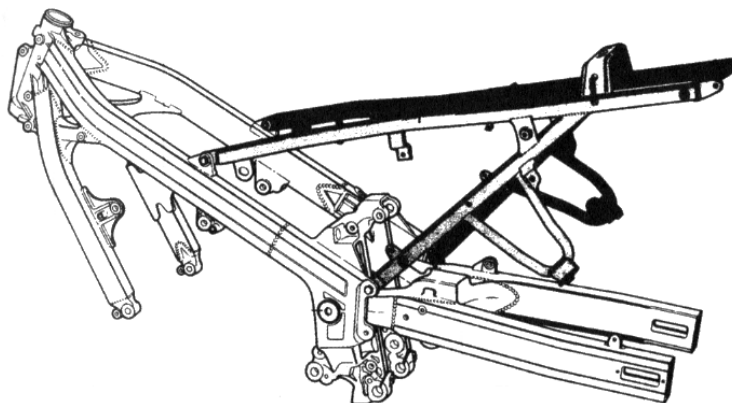
Katupyörien runkoja valmistetaan putki- ja palkkirunkoina. Katupyörän rungossa tärkeää jäykkyyttä voidaan putkirungon osalta parantaa kolmioinnilla (kuva 5), jolloin syntyy ristikkorunko. Ristikkorungossa runkoputket ovat jäykkiä puristusta ja vetoa vastaan eivätkä altistu taivutusvoimille. Ristikkorunko on oleellisesti aiemmin esiteltyjä kehtoputkirunkoja jäykempi rakenne. (Foale 2002, 10:2–10:4)

Kuvan 5 mukainen ristikkorunko koostuu monesta lyhyestä ja hoikasta putkipalkista. Ristikkorungolla voi jäykkyyden lisäksi olla myös ulkonäköä parantavia ominaisuuksia. (Foale 2002, 10:4)



Kuva 5. Ristikkorunko, Bimota KB2 (Foale 2002, 10:4).

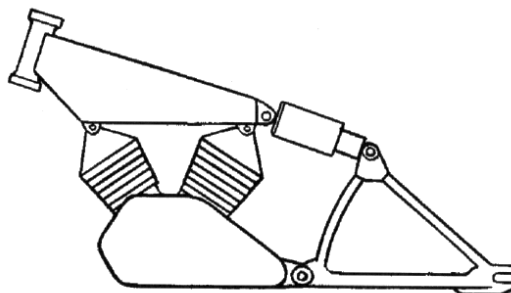
Katupyörissä käytetään yleisesti myös twin spar -palkkirunkoja, joissa runkopalkki jakautuu kahteen osaan moottorin ympärille. Kuvassa 6 on esitetty twin spar -runko, jossa jäykkyys saavutetaan hyödyntäen suurten putkipalkkien taivutus- ja vääntövastusta. (Foale 2002, 1:7-1:11)



Kuva 6. Twin spar -runko, Honda vuodelta 1985 (Foale 2002, 10:23).

Kuvassa 6 näkyvät moottorin sivulla kulkevat palkit valmistetaan putkesta, levystä tai usein laakeriputken ja takahaarukan nivelpisteen alueella valuosista. Valuosat liitetään sivupalkkeihin hitsaamalla. (Foale 2002, 10:23)

Edelleen rungon jäykkyyttä voidaan kasvattaa käyttämällä moottoripyörän komponentteja osana runkorakennetta. Moottorin käyttö kantavana rakenteena on esitetty kuvassa 7. (Foale 2002, 1:14)



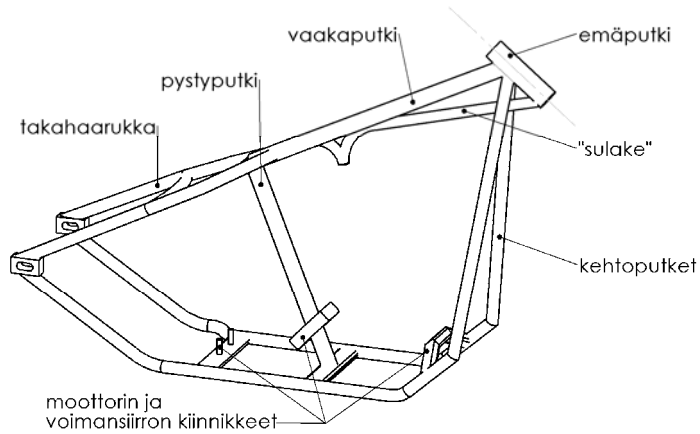
Kuva 7. Moottorin käyttö kantavana rakenteena, Vincent (Foale 2002, 1:14).

Harva valmistaja on hyödyntänyt moottoria kantavana rakenteena, mahdollisesti koska kantavana rakenteena toimiva moottori tulee suunnitella tätä käyttötarkoitusta varten. Useimmat ratkaisut ovatkin muistuttaneet enemmän kuvien 5 ja 6 mukaisia runkoja tai näiden yhdistelmiä. (Foale 2002, 10:33)

2.2 Runkomuutokset

2.2.1 Chopper-pyörien runkomuutokset

Chopper-tyyppisten moottoripyörien runkomuutoksissa kyse on yleensä rungon "streksaamisesta" ja rungon jäykkäperäiseksi muuttamisesta. Jäykkäperäinen chopper-pyörän runko on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Jäykkäperäisen chopper-pyörän runko.

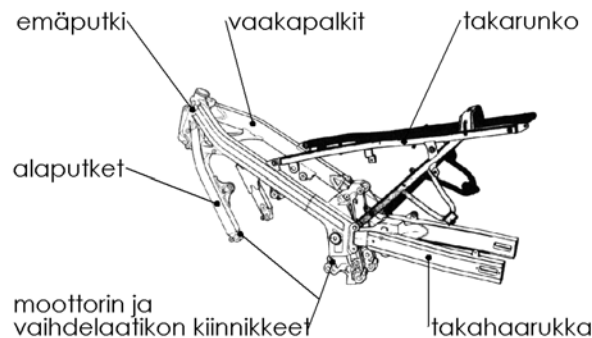
"Stretsauksessa" rungon emäputkea siirretään chopper-pyörässä eteen- ja ylöspäin kehto- ja vaakaputkia muokkaamalla. Myös emäputken kulmaa muutetaan, kun moottoripyörän akseliväliä kasvatetaan. Jäykkäperäinen moottoripyörän runko ei sisällä erillistä jousitettua ja nivelöityä takahaarukkaa, vaan runkorakenne on kokonaan jäykäksi hitsattu. Taka-akselin sijaintia muutetaan usein rungossa eteenpäin. (Nieminen 2009)

Chopper-pyörältä ei haluta suorituskykyä; tyypillistä on vaihdelaatikon ja takapyörän välityssuhteen pienentäminen, jolloin moottorilla voidaan ajaa mahdollisimman alhaisella kierrosnopeudella. Ajo-ominaisuuksista korostetaan moottoripyörän vakautta. (Nieminen 2009)

2.2.2 Katupyörien runkomuutokset

Katupyörien muuntelu on lähinnä ulkonäköön vaikuttamista. Rungon osalta muuntelu keskittyy takarunkoon, jota muokataan yleensä ylöspäin ja lyhyemmäksi. Takahaarukkaa pidennetään jolloin moottoripyörän akseliväli kasvaa. (Anttila 2009) Katupyörän rungon osat on esitetty kuvassa 9.

Usein muuntelu katupyörissä tuottaa alkuperäisiä rakenteita raskaamman tuloksen, sillä alkuperäiset ratkaisut ovat hyvin optimoituja. (Anttila 2009).



Kuva 9. Katupyörän rungon osat (Foale 2002, 10:23).

2.2.3 Vaurioituneen rungon oikaisu

Varsinaisten runkomuutosten ohella vaurioituneita runkoja voidaan oikaista. Moottoripyörän rungon oikaisua tarvitaan lähinnä vanhojen ja erikoisten moottoripyörien osalta, koska se on kustannusten ja saatavuuden kannalta kannattavampi vaihtoehto kuin uuden rungon hankinta (Homuth 1993, 530).

Valmistajat ohjeistavat rungon ja takahaarukan vaurioiden tarkastusta ja oikaisua eri tavoin. Vaurioita voidaan tutkia etsimällä säröjä sekä toteamalla rungon suuruus pyörien suhteen ja mittatoleransseissa pysyminen. Vanhempien (1970-luvun) runkojen osalta valmistajat ovat ohjeistaneet oikaisun jälkeisten mittojen tarkastamiseen. Uudempien moottoripyörien runkojen korjaaminen tai oikaisu on valmistajien ohjeissa kielletty. Vaurioitunut tai vääntynyt runko ja takahaarukka tulee vaihtaa uuteen. (Common Service Manual 1988, 20:4; FZS1000N (C) SERVICE MANUAL 2001, 4:70; Ninja ZX-6R Motorcycle Service Manual, 14:9; Repair Manual F 650 CS 2001, 46:23-46:26; Workshop Manual, 31-33)

2.3 Runkomateriaalit

Moottoripyörien rungoissa yleisimmin käytetty materiaali on teräs, putkipalkkina ja levynä. Teräksen hinta on matala ja muokkaustekniikat hyvin tunnettuja. Seuraavaksi yleisin on alumiini, jota käytetään nykyään usein urheilullisten katupyörien rungoissa. Aikaisemmin alumiinia käytettiin vain erikois- ja kilpakäyttöön tehdyissä rungoissa sekä yksittäisissä osissa, esimerkiksi takahaarukassa. Erikoisempien metallien kuten titaanin ja magnesiumin käyttö on vähäistä suurempien kustannusten ja vaativien hitsaustekniikoiden takia. Komposiittimateriaalien käyttö odottaa vielä tulevaisuutta, nykyisellään kustannukset ovat liian suuria hyötyihin nähden. (Foale 2002, 13:4–13:7)

Chopper-pyöriä valmistetaan seostamattomasta teräksestä (Nieminen 2009). Katupyörissä terästä käytetään tyypillisesti putki- ja ristikkorungoissa. Twin spar -tyyppiset palkkirungot valmistetaan usein alumiinista. Katupyörien runkomateriaalivalinnoissa on kuitenkin paljon valmistajakohtaisia eroja joten poikkeuksia edellä mainittuihin on olemassa. (Hawks 2003)

2.3.1 Runkomateriaalien ominaisuuksia

Moottoripyörän rungon materiaalinvalinta riippuu halutuista ominaisuuksista. Runkomateriaalin tärkeitä ominaisuuksia ovat yleisesti jäykkyys/paino-suhde, lujuus ja soveltuvuus liittämismenetelmille (kts. kappale 3). (Foale 2002, 13:1)

Materiaalin jäykkyys/paino-suhde on tärkeä rungon suorituskyvyn kannalta etenkin katupyörissä. Suhde riippuu materiaalin kimmomoduulista ja tiheydestä, ja se on suorassa vedossa tai puristuksessa lähes sama teräkselle ja alumiinille. Moottoripyörän rungon jäykkyys-paino/suhteeseen vaikuttaa kuitenkin myös rungon rakenne. Suuria putkipalkkeja käyttämällä saadaan kevyemmällä materiaaleilla suurempi jäykkyys/paino-suhde, joten alumiini on palkkirungoissa terästä suorituskypisempi vaihtoehto. (Foale 2002, 13:4)

2.3.2 Runkomateriaalien lujuus

Runkomateriaalilta vaaditaan riittävä lujuus kuorman kantamiseen. Materiaalin myötölujuus R_e määrittää rajan pysyvän muodonmuutoksen alkamiselle. Murtolujuus R_m kertoo materiaalin kestävyuden ennen murtumista. Taulukossa 1 on vertailtu moottoripyörien rungoissa käytettävien materiaalien lujuusominaisuuksia.

Taulukko 1. Moottoripyörissä käytettävien materiaaleja ja niiden lujuuksia. (KEY to METALS Steel Database 2009; Kaker & Glavar 2005; Lukkari 2001, 50-53; Homuth 1993, 534; Foale 2002, 13:5; Anttila 2009; Nieminen 2009; Robinson 1994, 155)

Materiaalinimike	Myötölujuus R_e [MPa]	Murtolujuus R_m [MPa]	Tyyppi
EN E235 (DIN St 35)	235	340	Seostamaton teräs
EN S235 (DIN St 37)	235	360	Seostamaton teräs
EN S275 (DIN St 44)	275	430	Seostamaton teräs
EN S355 (DIN St 52-3)	355	490	Seostamaton teräs
DIN C60	380–570	710–980	Hiiliteräs
AISI 4130 (EN 25CrMo4)	400–700	650–1100	Nuorrutusteräs
BS T45	620	700–900	Nuorrutusteräs
EN AW-6082	130–260	170–310	Alumiiniseos
EN AW-7020	140–280	220–350	Alumiiniseos

Taulukosta 1 nähdään seostamattomien teräksien lujuusominaisuuksien olevan vakioita. Taulukossa näkyvät materiaaliikohtaiset lujuusvaihtelut koskevat materiaaleja, joilla täysi lujuus saavutetaan vain oikealla lämpökäsittelyllä (Hitsauksen materiaalioppi 2001, 85–87).

Moottoripyörän runko hitsattuna, väsyttävästi kuormitettuna rakenteena ei välttämättä hyödy lujemmasta materiaalista (Foale 2002, 10:3). Hitsausliitoksen väsymislujuus ei riipu suoraan materiaalin lujuudesta. Valitsemalla lujempi teräs ei voida suoraan kasvattaa hitsatun rakenteen väsymiskestävyyttä, sillä hitsit usein sijaitsevat rakenteen kriittisissä kohdissa. Poikkeuksen muodostavat kuormituspaukset, joissa tapahtuu yksittäinen jännityshuippu tai jännitystaso on jatkuvasti korkea. (Niemi 2003, 131–132; Lukkari 2001, 85–89) Hitsausliitoksen väsymiskestävyyttä erityisesti lujilla teräksillä voidaan kuitenkin kasvattaa hitsausliitoksen jälkikäsittelyllä. Jälkikäsittely voidaan toteuttaa esimerkiksi paineilmavasaroinnilla, hionnalla tai TIG-uudelleensulatuksella. (Niemi 2003, 114–115)

3 Liittämismenetelmät rungon muuntelussa

Yksittäisiä moottoripyörän alumiini- ja teräsputkirunkoja valmistetaan pääsääntöisesti hitsaamalla, mutta myös kovajuottamalla (Foale 2002, 16:1–16:3). Chopperpyörien runkomuutokset toteutetaan hitsaamalla. Katupyörien runkojen muuntelu toteutetaan hitsaamalla, mikäli muutosta ei voida toteuttaa ruuviliitoksien. (Anttila 2009; Nieminen 2009) Rungon oikaisussa käytetään vastaavia tekniikoita kuin hitsauksessa (Homuth 1993, 530–534).

3.1 Hitsaus

Hitsi tai sen lähiympäristö (HAZ) on usein rakenteen heikoin lenkki hitsausvirheidensä ja geometrinen epäjatkuvuuskohtien vuoksi. Erityisesti väsyttävässä kuormituksessa hitsausvirheet heikentävät liitoksen kestävyyttä, mihin hitsaajan toiminnalla on merkitystä. Hitsauksen takia myös perusmateriaalin lujuusominaisuudet voivat heikentyä. Hitsattavan rakenteen materiaaalilta haluttavia ominaisuuksia ovat lujuus, sitkeys ja hitsattavuus. (Hitsauksen materiaalitiete 2001, 39–105)

3.1.1 Hitsattavuus

Materiaalin hitsattavuus on sitä parempi mitä vähemmän rajoituksia on hitsauksen suhteen ja mitä vähemmän esivalmisteluja ja jälkikäsittelyjä joudutaan tekemään. Teräksen hitsattavuutta kemiallisen koostumuksen suhteen arvioidaan hiiliekvivalentilla C_e . Hiiliekvivalentti lasketaan kaavalla

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (1)$$

missä seosaineiden C, Mn, Cr, Mo, V, Ni ja Cu pitoisuudet annetaan teräksen kemiallisen koostumuksen mukaan. (Hitsauksen materiaalioppi 2001, 104) Taulukossa 2 on vertailtu rungoissa käytettyjen terästen kemiallisia koostumuksia ja hiiliekvivalentteja.

Taulukko 2. Runkoterästen kemialliset koostumukset.

Teräs	C	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	C_e
EN E235 (DIN St 35)	0,17	1,40						0,35
EN S235 (DIN St 37)	0,17	1,40						0,35
EN S275 (DIN St 44)	0,21	1,50						0,40
EN S355 (DIN St 52-3)	0,22	1,60						0,45
DIN C60	0,61	0,75	0,40	0,10				0,84
AISI 4130 (EN 25CrMo4)	0,28	0,60	1,10	0,25		0,25	0,35	0,69
BS T45	0,25	1,70	0,25	0,10		0,40		0,63

Taulukon 2 mukaan terästen E235–S355 seospitoisuudet ovat alhaiset, joten myös niiden hiiliekvivalentti on matala. Hiiliekvivalentin ollessa alle 0,40 hitsatta-

vuus on hyvä ja seostamattomia teräksiä voidaankin hitsata ilman erityistoimenpiteitä kaikilla hitsausmenetelmillä. (Hitsauksen materiaalioppi 2001, 104) Taulukoiden 1 ja 2 mukaan lujemmat teräkset ovat seostetumpia, joten myös niiden hiiliekvivalentit ovat suurempia ja hitsaukselle on erityisvaatimuksia.

3.1.2 Runkoterästen erityisvaatimuksia

Lämpökäsiteltävät materiaalit menettävät lujuutensa hitsauksessa syntyvän karbonemisen johdosta. Jälkilämpökäsittely palauttaa materiaalin mikrorakenteen hienorakeiseksi, jolloin materiaalin lujuus ja sitkeys paranevat. Lämpökäsittely tehdään uunilla, jolla lämpötilaa voidaan tarkasti hallita, ei esimerkiksi nestekaasupolttimilla. (Hitsauksen materiaalioppi 2001, 85-88)

AISI 4130 putkipalkkina ei vaadi lämpökäsittelyä hitsien lujuuden varmistamiseksi, kun seinämänpaksuus on alle 3 mm. Suuremmilla seinämänpaksuuksilla suositellaan jännityksenpoistohehkutusta 590 °C:ssa. Perusaineen kosteudenpoiston takia on kuitenkin hyvä suorittaa esikuumennus lämpötilassa 30–50 °C. Lisäainetta suositellaan käytettäväksi AWS ER70S-2:ta, kun hitsiltä vaaditaan muodonmuutoskykyä. Tällöin kuitenkin lujuus on matalampi. Lujempaa AISI 4130:n koostumusta vastaavaa lisäainetta voidaan käyttää jos rakenteelle suoritetaan jännityksenpoistohehkutus. (Swaim 2001, 50-52)

Terästä BS T45 voidaan liittää juottamalla tai TIG-hitsaamalla. Mikäli materiaalia hitsataan muilla menetelmillä, on tarpeen suorittaa jännityksenpoistohehkutus. (Elmdon Metals 2009)

3.1.3 Runkoalumiinien erityisvaatimuksia

Myös lämpökäsiteltävässä alumiinissa tapahtuu hitsauksen vuoksi lujuusominaisuuksien heikkenemistä. Menetetty lujuus voidaan osittain palauttaa oikealla jälkikäsittelyllä. Alumiinin tärkeimpänä erona teräkseen on oksidikalvo. Oksidikalvo aiheuttaa hitsausvirheitä ja lujuuden alenemista, joten se tulee poistaa ennen hitsausta. (Hitsauksen materiaalioppi 2001, 250–258)

Alumiiniseos EN AW-6082 (AlSi1MgMn) on lämpökäsiteltävä seos, jonka hitsattavuus on hyvä. Seoksella tapahtuu hitsin muutosvyöhykkeellä lujuuden laskua. Lujuuden palauttaminen hitsauksen jälkeen saadaan aikaan ainoastaan uusitulla liuotuskäsittelyllä. Keinovanhentamisen vaikutus lujuuden palautumiseen on pieni. (Lukkari 2001, 69–72)

EN AW-7020 (AlZn4,5Mg1) on hitsattaviin rakenteisiin kehitetty erkautuskarkeneva alumiiniseos hyvällä paino/lujuus-suhteella. Sen lujittaminen tapahtuu lämpökäsittelyllä. (Lukkari 2001, 50) AW-7020:n lujuus hitsausliitoksessa alenee vain vähän perusmateriaalin verrattuna, kun vanhentaminen on tehty. Luonnollinen vanhentaminen voidaan tehdä huoneenlämpötilassa 3 kk ajan. Vanhentaminen voidaan suorittaa myös huoneenlämpötilassa luonnollisesti 1–3 päivän ajan yhdistettynä keinokeinoiseen vanhentamiseen 60 °C:een lämpötilassa 60 tunnin ajan. (mts. 84)

3.1.4 Tuntemattoman materiaalin hitsaus

Hitsattava runkomateriaali on usein tuntematon (Nieminen 2009; Anttila 2009). Tuntematonta perusainetta voi määritellä eri tavoin mahdollisimman hyvän hitsausohjeen perustaksi. Ohjeita on laadittu yleiseen metallien tunnistamiseen ja alumiinivaluseosten tunnistamiseen muun muassa hiontakipinöiden ja viilakokeen (kovuuden) perusteella (kts. esim. Korjaushitsauskäsikirja 1:13; Lukkari 2001, 236). Tuntemattomia teräksiä tulee käsitellä huonosti hitsattavina hitsausvirheiden estämiseksi. Ongelmia huonosti hitsattavilla teräksillä tuottaa karkenemistaipumus ja muutosvyöhykkeen suuri kovuus sekä hauraus. Periaatteessa kaikkia teräksiä voidaan hitsata sopivalla lisäaineella ja lämpökäsittelyn avulla. (Korjaushitsauskäsikirja 2:7)

3.2 Kovajuotto

Juottamalla on valmistettu muun muassa moottoripyörän teräksisiä ristikkorunkoja (Foale 2002, 10:20). Juotto on hitsaukselle vaihtoehtoinen tapa muodostaa pysyvä liitos kahden kappaleen välillä. Kovajuotossa liitosalueen lämpötila nostetaan vähintään 450 °C:een lämpötilaan, jotta juote sulaa ja leviää liitoksen pinnoille. Lämpötila pidetään perusaineen sulamispistettä alempana. Juotettu liitos pysyy jäähtyttyään yhdessä kapillaarivoimien ja metallurgisten reaktioiden vuoksi. (Schwartz 2003, 4–5)

Kovajuoton etuina hitsaukseen verrattuna ovat parempi mahdollisuus erilaisten metallien liittämiseen toisiinsa ja pienemmät muodonmuutokset. Juottamalla voidaan liittää pintoja, jotka muuten olisivat saavuttamattomissa, sillä lämpö johdetaan juotteeseen liitettävien kappaleiden kautta. Kovajuotossa syntyy hitsauksen tavoin lämmölle altistunut alue (HAZ), joka ei kuitenkaan ole yhtä voimakas kuin hitsauksessa. Lämmöntuonti vaikuttaa kuitenkin joka tapauksessa lämpökäsittelyjen materiaalien lujuusominaisuuksiin. Lämmöntuonti voidaan tehdä paikallisesti liitoksen kohdalta tai uunia käyttäen koko rakenteen osalta. (Schwartz 2003, 3)

Juotetun liitoksen kestävyyttä voidaan arvioida staattisessa ja väsyttävässä kuormituksessa. Väsyttävässä kuormituksessa käytettävät varmuuskertoimet ovat suuria ja vaihtelevat kuormitustyyppistä riippuen välillä 5–11. (Airila ym. 1995, 315) Juotetun liitoksen lujuuden määrittäminen on hankalaa, sillä liitoksen alueiden ominaisuudet ovat heterogeeniset eivätkä jännitykset jakaudu tasaisesti. Oikein juotettu liitos on kuitenkin muotoutunut hyvin väsymistä vastustavaksi. (Schwartz 2003, 4)

3.3 Laatu liittämismenetelmissä

Hitsauksessa tapahtuu aina virheitä, mutta niitä pyritään pääsääntöisesti minimoimaan hitsin laadun ja kestävyuden takaamiseksi. Oikeat hitsausparametrit ja -suoritus ovat laadukkaan hitsin perusta. (Lukkari 2001, 230–232) Hitsausvirheiden sallitut raja-arvot, hitsaajan pätevyysvaatimukset ja hitsausliitosten tarkastus on standardoitu kattavasti teollisia sovelluksia varten (SFS-EN ISO 5817:2006; SFS-EN 287-1:2004; SFS EN 473:2008). Kuten hitsauksessa myös kovajuotossa tapahtuu virheitä. Kovajuoton laadunhallinta on toteutettu hitsausta vastaavasti. (SFS-EN 13133:2001; SFS-EN 12799:2000)

Hitsatun rakenteen laatu ei kuitenkaan ole yksiselitteinen asia, eikä virherajoja kuvaavaa standardia SFS-EN 5817 ole suunniteltu väsyttävästi kuormitettujen liitosten luokitteluun. Kriittisille väsyttävästi kuormitetuille hitseille asetetaan tarvittaessa standardia tiukempiakin vaatimuksia. (Björk & Nykänen & Marquis 2007, 2–4)

3.3.1 Virheiden välttäminen

Väsyttävästi kuormitetussa rakenteessa vakavia hitsausvirheitä ovat halkeamat, liitosvirheet, huokokset ja reunahaavat. Kylmähalkeamia syntyy teräksillä korkean vetypitoisuuden takia ja halkeiluriskiä vähennetään valitsemalla MIG/MAG- tai TIG-hitsausprosessi, pintojen puhtaudella sekä hyvällä kaasusuojauksella. Alumiinia hitsattaessa halkeamat syntyvät jännitysten vaikutuksesta. Alumiinin halkeilutaipumusta alennetaan nopealla hitsausprosessilla, lämmöntuontia vähentämällä ja esikuumennuksella. Liitosvirhe johtuu väärästä hitsaussuorituksesta; teräksillä väärästä hitsausvirrasta, kuljetustavasta tai hitsausnopeudesta. Alumiinilla liitosvirhe aiheutuu väärästä suorituksesta tai pintojen likaisuudesta. Huokokset johtuvat epäpuhtauksista ja väärästä hitsaussuorituksesta, alumiinilla myös puutteellisesta oksidikalvon poistosta. Reunahaava johtuu liian suuresta hitsausvirrasta ja väärästä hitsausnopeudesta. (Lukkari 2001, 226–234; Hitsausvirhetaulu)

Hitsausvirheet johtuvat siis väärästä hitsaussuorituksesta, hitsausparametreista tai puutteellisesta hygieniasta. Hitsauksen suorittajalla onkin merkittävä vaikutus hitsin laatuun ja kestävyys. Laatua hallitaan todentamalla hitsaajan taidot pätevyyskokeissa. Hitsaajan pätevyyskokeet on määritelty erikseen teräksille ja alumiineille standardeilla SFS-EN 287-1 ja SFS-EN ISO 9606-2. Hitsaaja pätevytyy hitsauksessa oleellisiin muuttujiin kuten tuotemuoto, perusaineryhmä, ainepaksuus ja hitsausprosessi. Pätevöitynyt hitsaaja voi suorittaa myös pätevytymiskoetta helpompia hitsauksia. (SFS-EN 287-1:2004, SFS-EN ISO 9606-2:2005). Kovajuottajan pätevöinti osoitetaan sovelluskohtaisesti kun laadulla on merkitystä (SFS-EN 13133:2001, luku 1).

3.3.2 Laatu tarkastuksen kautta

Hitsaaja arvioi hitsin laadun silmämääräisesti aina hitsauksen jälkeen. Ammattitaitoisen henkilön tekemä silmämääräinen tarkastus on aina ensimmäinen tarkastusmenetelmä, joka ei kuitenkaan paljasta kaikkia virheitä. Jos halutaan suurempi varmuus hitsien laadusta, suoritetaan ainetta rikkomaton NDT-tarkastus yhdellä tai useammalla menetelmällä. Muilla tarkastusmenetelmillä voidaan löytää erityyppisiä virheitä, ongelmia kuitenkin aiheuttaa rakenteen ja liitoksen monimutkainen geometria ja tarkastusmenetelmien rajoittuneisuus. (Hitsauksen materiaalioppi 2001, 40–44) Tarkastusta suorittavan henkilön pätevöintijärjestelmä on esitetty standardissa SFS-EN 473 rikkomattomalle aineenkoetukselle (SFS EN 473:2008). Juotosten tarkastus voidaan suorittaa hitsien tarkastusta vastaavasti (SFS-EN 12799:2000).

3.4 Rungon oikaisu

Moottoripyörän rungon korjauskelpoisuuden arvioimiseen tarvitaan ammattitaitoa, sillä kaikkia vaurioituneita runkoja ei voida oikaista. Oikaisussa vaikeuksia tuottavat erityisesti monimutkaiset alumiiniprofiileista koostuvat rungot. Rungon muo-

donmuutoksia ei voida silmämääräisesti arvioida, alkuperäisiin mittoihin oikaiseminen vaatii mittapisteiden asettamista ja niiden seuraamista. Riippumatta vauri muodosta tulisi koko runko mitata, sillä etuosaan aiheutunut isku voi aiheuttaa muodonmuutoksia rungon keski- ja takaosassa. Moottori jäykkänä komponenttina voi aiheuttaa muodonmuutoksia runkoon kiinnikkeidensä kautta. (Homuth 1993, 530–534)

Mekaaniseen oikaisutyöhön tulisi yhdistää lämpökäsittely. Korotetussa työlämpötilassa teräksen myötöraja sekä kimmomoduuli pienenevät selvästi ja muodonmuutokset vaativat vähemmän voimaa. Ilman lämpökäsittelyä riskinä on materiaalin murtuminen ja rungon vaurioituminen edelleen, erityisesti materiaalin myötö- ja murtorajan eron ollessa pieni. Kuten teräksen hitsattavuutta, myös soveltuvuutta lämmöllä oikaisuun voidaan arvioida hiiliekvivalentin C_e avulla. (Homuth 1993, 528–530) Parhaiten lämmöllä oikaisua kestävät yleiset rakenneteräokset. Nuorrutusteräksillä koostumus ja valmistustapa vaikuttavat kuumennuksessa syntyvään teräksen mikrorakenteeseen, joten yleisiä ohjeita oikaisuun ei ole. Terästen oikaisussa ei suositella ylitettävän 650 °C:een lämpötilaa. (Hitsattujen teräsrakenteiden lämmöllä oikaisu 1986, 12-13)

Alumiinirungot jotka koostuvat yhdistetyistä pursotetuista profiileista ja valuosista, ovat vaikeasti oikaistavissa. Useimmat ammattilaiset eivät suorita näiden runkojen oikaisutyötä. (Homuth 1993, 530) Alumiinin oikaisu perustuu teräksen oikaisussa käytettäviin tekniikoihin. Lämpökäsiteltäviä seoksia oikaistaessa tulee lämpötila rajoittaa 150 °C:een tai seurauksena on seoksen pehmenemistä ylivanhemisen takia. (Mathers 2002, 88–89)

3.5 Liittämismenetelmien ongelmat

Hitsaus luo liitokseen virheitä ja mahdollisesti heikentää perusaineen lujuusominaisuuksia. Moottoripyörän runkomateriaaleista seostamattomia teräksiä voidaan hitsata rajoituksitta, mutta lämpökäsiteltujen ja alumiiniseosten osalta on hitsaukselle sekä jälkikäsittelylle erityisvaatimuksia. Liittämismenetelmän vaihtaminen kovajuottoon ei poista lämmöntuonnista ja virheistä johtuvia ongelmia. Rungon oikaisussa vaikeuksia aiheuttavat monimutkaiset rakenteet ja alumiiniseokset.

Ennakoitavat hitsausliitoksen väsymisominaisuudet edellyttävät virheiden hallintaa ja hallittua laatua. Laatu perustuu oikeisiin hitsauslisäaineisiin ja hitsaussuoritukseen. Laatu saavutetaan hitsausprosessille ja perusaineelle pätevyityneen hitsaajan toimesta. Mikäli hitsien laadusta halutaan suurempi varmuus, voidaan hitit tarkastaa erilaisilla tarkastusmenetelmillä.

4 Rungon lujuustarkastelu

Dynaamisesti kuormitetun rakenteen mitoitusperiaatteet pohjautuvat arvioihin, kokemusperäiseen tietoon tai standardeihin. Liian optimiset arviot johtavat rakenteen alhaiseen luotettavuuteen ja turvallisuuden heikkenemiseen, liian konservatiiviset valinnat taas kustannuksiltaan huonompiin ratkaisuihin. Yleensä kulkuneuvojen rakenteisiin käytettävät menetelmät perustuvat mitoitukseen kestopajan vastaan, eli rakenteet suunnitellaan rajalliselle kestoajalle. Menetelmillä pyritään parempaan rakenteen luotettavuuteen ja turvallisuuteen sekä painonsäästöön. Yksi kestopajaan perustuvista menetelmistä on rajoitetun vaurion periaate. (Airila ym. 1995, 23–25)

Moottoripyörävalmistajat kiinnittävät paljon huomiota etenkin katupyörien runkoihin niiden ominaisuuksien parantamiseksi. Optimointia suoritetaan rungon ja takahaarukan jäykkyys/painosuhteen parantamiseksi sekä kestävyysnäkökulmaa. Optimoinnissa hyödynnetään FE-menetelmää. (Armentani ym. 2007; Beretta & Sala 2005, 257; Robinson 1994, 156; Rodriguez ym. 2009, 181) Moottoripyöräharrastajilla on valmistajia vähemmän resursseja käytössä, mutta he voivat saavuttaa hyviä tuloksia rungon lujuustarkastelussa yksinkertaisilla laskelmilla pahimpien kuormitustilanteiden kannalta. Harrastajien mitoitusperiaatteet perustuvat usein olemassa olevien moottoripyörien tarkasteluun. (Foale 2002, 15:10)

Koska moottoripyörien runkojen kestävyydelle ei ole vaatimuksia tai standardeja, käytetään muunnellun rungon lujuustarkastelussa yleisesti käytössä olevia dynaamisesti kuormitettujen rakenteiden mitoitusmenetelmiä. Tarkastelussa selvitetään rungon muuntelussa tapahtuvan hitsauksen laadun merkitys turvallisuudelle. Rungon lujuustarkastelussa sovelletaan rajoitetun vaurion periaatetta yksinkertaisissa, pahimmissa mahdollisissa kuormitustilanteissa. Kriteerit rungon kestävyydelle tai käyttökelpoisuudelle määritetään rajatilojen perusteella. Kriittisille hitsausliitoksille jotka eivät ole vauriosietoisia suoritetaan väsymistarkastelu, jonka perusteella määritellään muuntelun vaikutus rungon kestoikään.

4.1 Rajoitetun vaurion periaate

Redundanttinen rakenne joka on luotu rajoitetun vahingon periaatteella (Fail Safe) voi vaurioitua käyttöikänsä aikana ilman, että sen toiminta tai ihmisten turvallisuus vaarantuu. Vauriotilanteessa redundanttisella rakenteella tulee olla vaihtoehtoisia polkuja kuormitusten kantamiseksi, jotta vaatimukset täyttyvät. Syitä tämän periaatteen valitsemiseksi ovat tuntemattomat tekijät kuten suunnitteluvirheet, valmistusvirheet tai ennakoimaton käyttö. Rajoitetun vahingon periaate toimii parhaiten silloin, kun vauriot ovat äkillisiä ylikuormitustilanteita. (Airila ym. 1995, 26) Redundanttisuuden poistuttua on rakenne vähemmän turvallinen, joten redundanttisuuden häviäminen normaalikäytössä tulee voida havaita, mahdollisesti määräaikailla tarkastuksilla. Rajoitetun vaurion periaatteesta on olemassa variaatio, jossa vaurioituneet tai irronneet osat eivät saa aiheuttaa liiallista lisävahinkoa. (Pook 2007, 70–71)

4.1.1 Rungon kestävyyskriteerit

Eurokoodin mukaisella rajatilamitoituksella varmistetaan sekä rakenteen kestävydestä että sen kyvystä suoriutua tehtävästään. Rajatilamitoitus perustuu muodostettujen rakenne- ja kuormitusmallien käyttöön. Kaikki ihmisten turvallisuuteen liittyvät rajatilat luokitellaan murtorajatiloiksi, joista tarkistetaan merkitykselliset tapaukset. Merkityksellisiä murtorajatiloja ovat muun muassa rakenteen vaurioituminen ja katkeaminen. Malleilla osoitetaan, ettei määritettyjä rajatiloja ylitetä. Tarkastelussa tutkitaan riittävän ankarat, perustellusti ennakoitavat mitoitustilanteet. (SFS-EN 1990-1:2002, luku 3)

Paikallista lommahdusta ei käsitellä, koska tutkittavat rungot koostuvat putkipalkkeista, joiden halkaisija/seinämänpaksuus -suhde on alhainen ja kaikki putkipalkit kuuluvat poikkileikkausluokkaan 1 (SFS-EN 1993-1-1:2005, luku 5). Runkojen putkipalkit ovat lyhyitä, joten myöskään nurjahdusta ei tarkastella. Runkojen putkipalkkien poikkileikkauksina käytetään niiden bruttopoikkileikkauksia, jolloin kiinnittimien reikiä ei vähennetä (SFS-EN 1993-1-1:2005, luku 6).

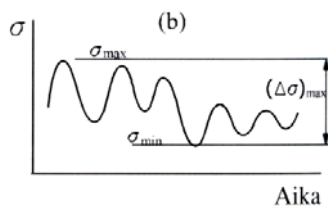
4.2 Väsyminen

Arviolta 80–90 prosenttia rakenneaurioista johtuu metallin väsymisestä, erityisesti hitsatut rakenteet ovat alttiita väsymisaurioille (Niemi 2003, 92). Myös moottoripyörissä väsyminen on yleisin syy vaurioon normaalikäytössä (Foale 2002, 10:1).

Väsyminen on rakenteen vaurioitumista useiden kuormituskertojen seurauksena, vaikka ylikuormitustilanteita ei tapahtuisi. Väsyminen koostuu väsymissärön ydintymisestä, kasvamisesta ja lopullisesta murtumisesta. Hitsatussa rakenteessa särönkasvu alkaa tyypillisesti hitsin rajaviivan loven luota. Särönkasvu tapahtuu särön reunalla vaikuttavan huippujännityksen vuoksi ja johtaa lopulliseen murtumiseen kun kantava poikkipinta on kasvanut riittävän pieneksi. (Niemi 2003, 94; Outinen 2007, 367–369)

4.2.1 Väsymismitoitus

Väsymismitoituksessa käytettävät mitoitusperiaatteet poikkeavat staattisessa tarkastelussa käytettävistä. Jännitysvaihteluväli $\Delta\sigma$ on tärkein tekijä hitsatun rakenteen väsymisilmiössä. Jännitysvaihtelu voi muodostua muun muassa kiihdytyksistä ja jarrutuksista, ajoradan epätasaisuuksista ja rakenteen dynaamisesta värähtelystä. Useimmiten kuormitus ja tutkittavan kohdan jännitys ovat muuttuvamplitudisia tuottaen kuvan 10 mukaisen jännityshistorian. (Niemi 2003, 92)

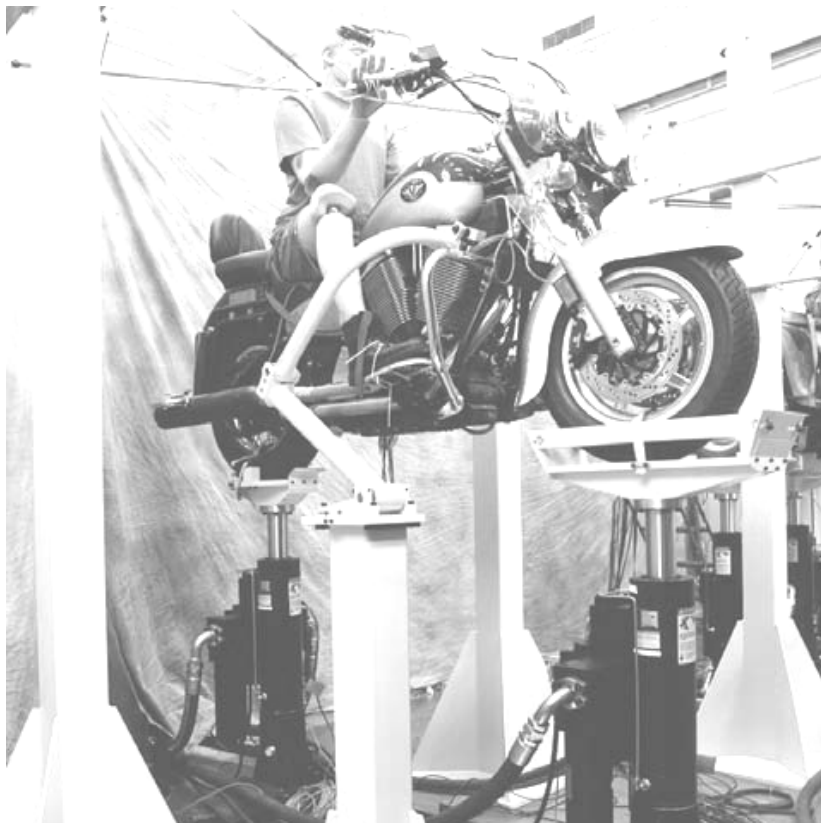


Kuva 10. Muuttuva-amplitudinen jännityshistoria (Niemi 2003, 92).

Hitsauksessa muodostuvien hitsausjännitysten takia rakenteessa on myötörajalta yltäviä jännityksiä. Tämän vuoksi hitsattujen rakenteiden mitoitus perustuu oletukseen, jossa jännitysheilahdus tapahtuu myötörajasta alaspäin. Jännityshuippu $\sigma_{\max}$ on materiaalin myötörajalla, riippumatta nimellisen jännitysvaihtelun suunnasta. (Niemi 2003, 92)

4.2.2 Jännityshistoria

Kuvan 10 mukaisesta jännityshistoriasta havaitaan jännitysheilahdukset $\Delta\sigma_i$ ja niiden lukumäärät n_i , jotka taulukoidaan väsymislaskentaa varten. Tähän voidaan käyttää Rainflow-menetelmää. Laskennallinen jännityshistorian muodostaminen on hankalaa, koska erilaisia muuttujia on paljon. Kuormituksiin ja jännityshistoriaan vaikuttavat muun muassa kuljettajan taidot sekä käyttöolosuhteet. (Niemi 2003, 93) Mitatun jännityshistorian avulla voidaan paremmin arvioida rakenteen elinikää. Jännityshistoriaa mitattaessa moottoripyörän runkoon asennetaan veynämäliuska-antureita ja pyörällä ajetaan erilaisissa olosuhteissa. Riittävällä testauksella saadaan kuva rungon rasituksista sen käyttöaikana. Tämä kuormitushistoria voidaan sen jälkeen toistaa testipenkissä, jolla rasitetaan koko moottoripyörää (kuva 11). Testipenkki ei sovellu nopeaan tai taloudelliseen rungon arviointiin, sillä se vaatii jokaiseen testiin täydellisen ja kalibroidun moottoripyörän. (Di Piazza 2003, 6)



Kuva 11. Koko pyörää kuormittava testilaitteisto (*Smoothing the Road for Victory*, 2).

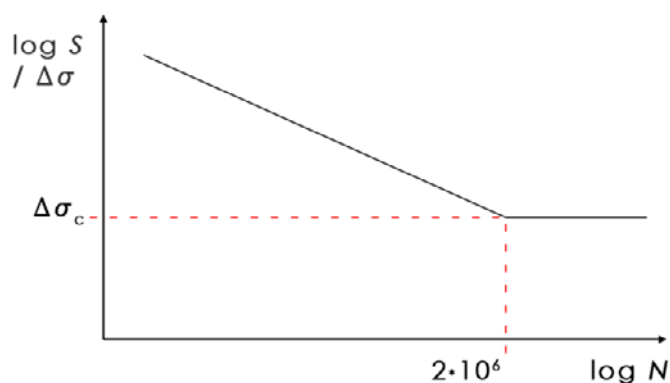


Kuva 12. Ducatin testipenkki moottoripyörän etu- ja takaosalle (Di Piazza 2003, 7).

Ainakin moottoripyörävalmistaja Ducati on valinnut testaustavakseen tie- ja rata-testien kuormituksen vertailun testipenkistä saatavaan kuormitukseen. Rungon etu- ja takaosa testataan erikseen testipenkissä jolla pyritään kuormittamaan pyörää radalla nauhoitettuja tilanteita vastaavasti, kuva 12. Ratkaisu on edullinen ja nopea, mutta sillä ei suoraan voida tuottaa SN-käyriä. Testiasetus on kuitenkin helppo siirtää FE-malliksi kuormituksineen ja näin arvioida rakenteen elinikää. (Di Piazza 2003, 7-8)

4.2.3 Väsymiskestävyyden muodostuminen

Väsymisluku ilmoitetaan SN-käyränä jännitystason S (stress) ja jännitysjaksojen lukumäärän N (number of cycles) suhteen, kuten kuvassa 13. Väsymislukuusarvo $\Delta\sigma_c$ ilmoitetaan yleisesti $2 \cdot 10^6$ jännitysjakson kohdalla. (Niemi 2003, 95-96)



Kuva 13. Esimerkki SN-käyrästä.

Kestoiän mitoitusarvo N_{Rd} lasketaan yhtälöllä

$$N_{Rd} = \left(\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf} \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_E} \right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 \quad (2)$$

jossa γ_{Mf} on materiaalin osavarmuuskerroin, γ_{Ff} kuormituksen osavarmuuskerroin ja $\Delta\sigma_E$ jännitysheilahduksen ominaisarvo. Tutkittavan kohdan jännitysheilahdukseen vaikuttavat hitsausliitoksen epäjatkuvuuskohdat, paikalliset lovet ja rakenteen makrogeometria. Näiden vaikutusten tutkimiseen voidaan käyttää elementtimenetelmää. (Niemi 2003, 94-96)

Kuvan 10 mukainen muuttuva-amplitudinen kuormitus käsitellään Minerin säännöllä, jossa vaurio kasvaa kumulatiivisesti jokaisen jännitysheilahduksen takia. Kumulatiivinen vauriosumma on

$$D = \sum \frac{n_{Ei}}{N_{Rdi}} \quad (3)$$

missä n_{Ei} on jännitysheilahdusten lukumäärä tasolla i ja N_{Rdi} jännitysheilahduksen mitoituskestoikä yhtälön 2 mukaan. Vauriosummaa ei tarvitse laskea, jos jännitysheilahdukset korvataan ekvivalentilla vakioamplitudisella jännitysheilahduksella. Kun ekvivalentin jännitysheilahduksen aiheuttama vaurio asetetaan yhtä suureksi kuin Minerin vauriosumma, saadaan

$$\Delta\sigma_{ekv} = \sqrt[3]{\frac{\sum (n_i \cdot \Delta\sigma_i^3)}{N_{ref}}} \quad (4)$$

kun $N_{ref} = \sum n_i$ tai joku muu käyttöikää kuvaava kestoiän yksikkö. Sijoittamalla saatu ekvivalentti jännitysheilahdus yhtälöön 2, saadaan mitoituskestoikä. (Niemi 2003, 96-97)

4.2.4 Tehollinen lovijännitys

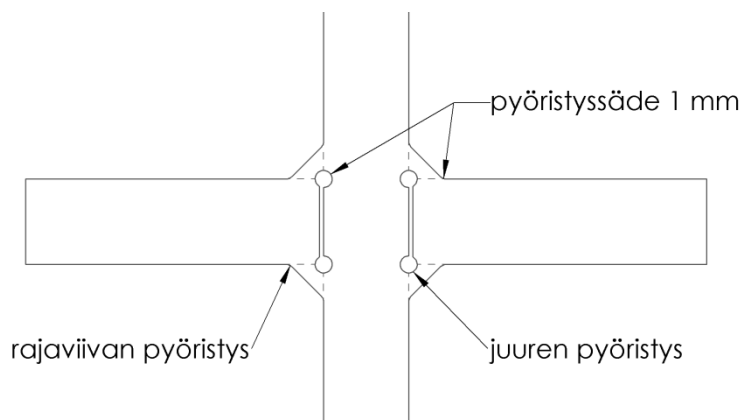
Kun ei tiedetä säröjen ydintymiskohtaa, soveltuu väsymistarkastelun menetelmäksi tehollinen lovijännitys. Tehollisella lovijännityksellä voidaan tutkia hitsin rajaviivalta ja juuren puolelta alkavaa väsymistä. Menetelmä ottaa huomioon rakenteen makrogeometrian, muotovirheet, rakenteelliset epäjatkuvuudet ja paikalliset lovet joten se soveltuu hyvin hitsin ominaisuuksien tutkimiseen. (Niemi 2003, 95-106)

Hitsin juuren ja rajaviivan epäsäännöllisyydet estävät tarkan lovijännityksen laskennan. Loven tulee olla pyöristetty, jotta sille voidaan määrittää lovijännitys. Sijoittamalla rajaviivalle kuvitteellinen lovi pyöristyssäteellä ρ_f saadaan yhdenmuukaisia tuloksia lovijännityksen suhteen. Pyöristyssäde lasketaan kaavalla

$$\rho_f = \rho + s\rho^* \quad (5)$$

missä ρ on todellinen loven säde, s moniaksaalisuuskerroin ja ρ^* materiaalivakio. Yleisesti hitsatuille teräksille oletetaan pahin mahdollinen tilanne, jolloin $\rho = 0$ ja $\rho_f = 1$ mm. (Radaj 2006, 96)

Tehollisen loven pohjalla oleva lovijännitys voidaan määrittää joko lovenvaikutusluvun avulla, numeerisilla menetelmillä tai mittaamalla. Yleensä lovijännitys saadaan elementtimenetelmän avulla, jolloin käytetään alimallinnustekniikkaa. Makrogeometrian sisältävästä mallista siirretään solmuvoimat paikallisgeometrian sisältävään alimalliin. Paikallisgeometriassa voidaan huomioida nimellismittojen lisäksi hitsin geometria, valmistustoleranssit ja hitsausvirheet. (Radaj 2006, 106-108) Kuvassa 14 on esitetty tehollisen lovijännityksen käyttö erilaisissa hitsausliitoksissa.



Kuva 14. Tehollinen lovi mallinnuksessa.

Tuloksia arvioidaan yhden materiaalikohtaisen SN-käyrän perusteella, joka on tällä hetkellä kehitetty teräkselle ja alumiinille (Hobbacher 2009, 53). IIW määrittää tehollisen lovijännityksen väsymislajuuden teräkselle SN-käyrällä, jossa väsymislajuusarvo $\Delta\sigma_c = 225$ MPa, kun kuormanvaihtoluku $N = 2 \cdot 10^6$ ja väsymiskäyrän kaltevuus $m = 3$ (Niemi 2003, 106).

Mallinnettava lovi aiheuttaa ohuilla levyillä merkittävää kuormankantokyvyn heikkenemistä ja jännitystason nousua. Loven heikentävän vaikutuksen vuoksi menetelmä on rajoitettu levynpaksuuksille $t \geq 5$ mm. (Radaj 1990, 219)

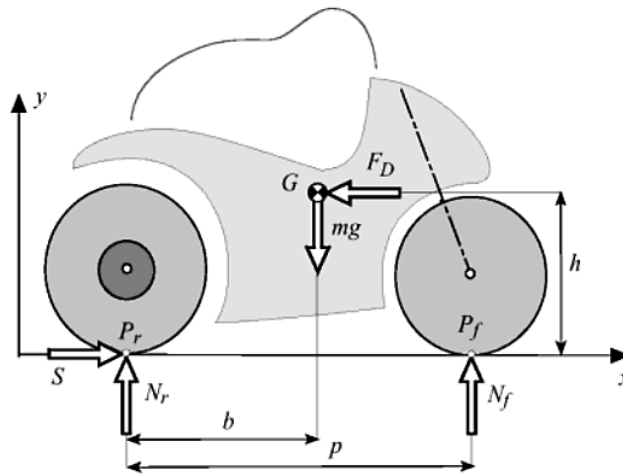
5 Moottoripyörään vaikuttavat voimat

Moottoripyörään kohdistuvia voimia tutkitaan suoraviivaisen liikkeen tasapainotilassa. Moottoripyörän ja kuljettajan yhteinen massa on m . Etu- ja takapyörään kohdistuvat pystysuuntaiset tukivoimat N_f ja N_r . Vaakasuunnassa vaikuttavat ajava voima S ja ilmanvastus F_D . Voimien vaikutuspisteet on esitetty kuvassa 15. Voimista voidaan muodostaa kolme tasapainoyhtälöä vaakasuuntaisten (yhtälö 6) ja pystysuuntaisten (yhtälö 7) voimien suhteen sekä momenttitasapaino massakeskipisteen mg suhteen (yhtälö 8). (Cossalter 2006, 83-84)

$$S - F_D = 0 \quad (6)$$

$$mg - N_r - N_f = 0 \quad (7)$$

$$Sh - N_r b + N_f (p - b) = 0 \quad (8)$$



Kuva 15. Pysyvässä suoraviivaisessa liikkeessä moottoripyörään kohdistuvat voimat (Cossalter 2006, 84).

Yhtälöstä 8 massakeskipisteen etäisyys b takapyörästä lasketaan pysyvässä liikkeessä kaavalla

$$b = \frac{N_f p}{mg} \quad (9)$$

jossa p on moottoripyörän akseliväli. Pyörien pystysuuntaiset tukivoimat ovat staattisessa tilassa etu- ja takapyörälle

$$N_{sf} = mg \frac{b}{p} \quad (10)$$

$$N_{sr} = mg \frac{p - b}{p} \quad (11)$$

Massakeskipisteen pituussuuntainen sijainti voidaan esittää myös suhteellisesti painojakaumana etu- ja takapyörän välillä. Massakeskipisteen korkeus h vaikuttaa moottoripyörän käyttöön jarrutuksen ja kiihdytyksen aikana. (Cossalter 2006, 79-82) Moottoripyörään kohdistuvien voimien kannalta tärkeitä ominaisuuksien arvoja on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Moottoripyörien tyypillisiä ominaisuuksia (Foale 2002, A8).

Ominaisuus	massa m [kg]	akseliväli p [mm]	painojakauma b [%] eteen	mkp. korkeus h [mm]
Arvo	250–350 kg	1450–1700 mm	40–50	400–600 mm

Taulukossa 3 massaltaan ja akseliväliltään pienempiä moottoripyöriä edustavat katupyörät. Matkapyörät ovat raskaampia ja pidempiä, sekä niiden paino on jakautunut enemmän taakse. (Foale 2002, A8) Chopper-pyörillä on yleensä taulukossa 3 esitettyjä arvoja huomattavasti pidempi akseliväli ja niiden massa jakautuu suhteellisesti enemmän takapyörälle (Nieminen 2009).

5.1 Jarrutus

Kun tarkastellaan moottoripyörään kohdistuvia voimia muuttuvassa suoraviivaisessa tasapainotilassa kuten jarrutuksessa ja kiihdytyksessä, ovat yhtälöt 6 ja 7 voimassa ja S on joko ajava tai hidastava voima. (Cossalter 2006, 87) Vaa-kaasuuntaisten voimien tasapainoyhtälö jarrutuksessa on esitetty yhtälössä 11.

$$m\ddot{x} = F \quad (12)$$

Yhtälössä 12 F on moottoripyörän jarrutusvoima ja $\ddot{x}$ moottoripyörän hidastuvuus. Pyörän dynaaminen tukivoima on staattisen kuorman ja painonsiirron summa etupyörälle (yhtälö 13) ja takapyörälle näiden erotus (yhtälö 14).

$$N_f = mg \frac{b}{p} + F \frac{h}{p} \quad (13)$$

$$N_r = mg \frac{p-b}{p} - F \frac{h}{p}. \quad (14)$$

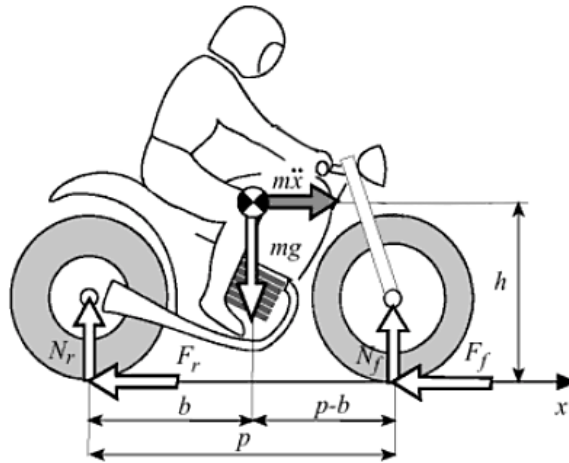
Jarrutusvoima F voidaan jakaa etu- ja takapyörän komponentteihin

$$F = F_f + F_r \quad (15)$$

jossa F_f ja F_r ovat etu- ja takapyörän jarrutusvoimat. Jarrutusvoimat riippuvat renkaiden ja tien pinnan välisestä kitkakertoimesta μ sekä pyörien tukivoimista

$$F = F_f + F_r = \mu N_f + \mu N_r. \quad (16)$$

Jarrutustilanteen voimat on esitetty kuvassa 16. (Cossalter 2006, 97-98)



Kuva 16. Moottoripyörän jarrutustilanne (Cossalter 2006, 98).

Jarrutuksessa etu- ja takapyörälle kohdistuvat erilaiset jarrutusvoimat. Optimaalinen jarrutus saavutetaan, kun jarrutusvoima jaetaan niin, että molemmat renkaat ovat menettämässä pitonsa. Tällöin suurin mahdollinen hidastuvuus on

$$\ddot{x}_{\max} = \mu g . \quad (17)$$

Sijoittamalla suurin mahdollinen hidastuvuus kaavaan 10, voidaan laskea suurin mahdollinen jarrutusvoima

$$F = m\mu g . \quad (18)$$

Jarruvoimat mahdollisimman tehokkaassa jarrutuksessa ovat etupyörälle (yhtälö 19) ja takapyörälle (yhtälö 20) seuraavat: (Cossalter 2006, 101-102)

$$F_{bf} = F \frac{b + \mu h}{p} \quad (19)$$

$$F_{br} = F \frac{(p - b) - \mu h}{p} . \quad (20)$$

Hidastuvuutta voi rajoittaa moottoripyörän pyrkimys kaatua eteenpäin. Vaadittava hidastavuus moottoripyörän alkaessa kaatua eteenpäin on

$$\ddot{x} = g \frac{p - b}{h} . \quad (21)$$

Eteenpäin kaatuminen on mahdollista moottoripyörälle, jonka massakeskipiste on korkealla ja edessä. (Cossalter 2006, 99-100)

5.2 Kiihdytys

Kiihdytyksessä vaakasuuntaisten voimien tasapainoyhtälö on

$$S = m\ddot{x} + F_D. \quad (22)$$

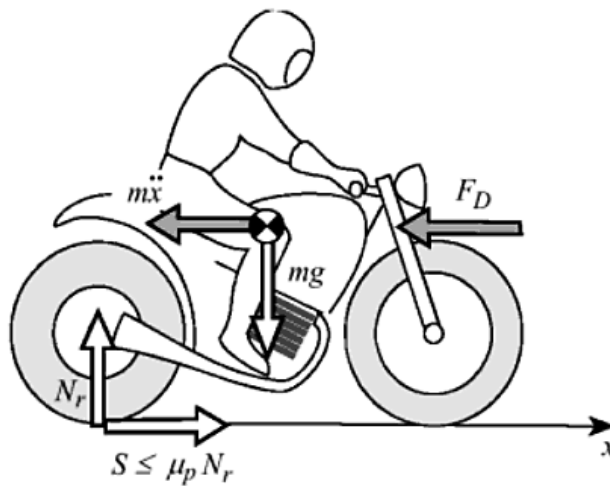
Ajava voima on nyt

$$S = T \frac{\omega_m}{V} \quad (23)$$

jossa T on moottorin vääntömomentti, ω_m moottorin kulmanopeus ja V moottoripyörän nopeus. Moottoripyörään kiihdytyksessä vaikuttavat voimat on esitetty kuvassa 17. Hitaassa vauhdissa ilmanvastuksella F_D ei ole merkitystä. Painon-siirto tapahtuu kiihdytyksessä vastakkaiseen suuntaan jarrutustilanteeseen verrattuna, dynaamiset tukivoimat etupyörälle (yhtälö 24) ja takapyörälle (yhtälö 25) ovat seuraavat: (Cossalter 2006, 88-89)

$$N_{af} = mg \frac{b}{p} - S \frac{h}{p} \quad (24)$$

$$N_{ar} = mg \frac{p-b}{p} + S \frac{h}{p}. \quad (25)$$



Kuva 17. Moottoripyörään kiihdytyksessä vaikuttavat voimat (Cossalter 2006, 93).

Suurin kiihtyvyys, jonka moottori voi antaa moottoripyörälle, lasketaan kaavalla

$$\ddot{x} = \frac{T \frac{\omega_m}{V}}{m}. \quad (26)$$

Moottoripyörän kiihtyvyyttä rajoittavina tekijöinä ovat takarenkaan ja tien välinen kitka sekä moottoripyörän pyörähtäminen etupyörän noustessa ilmaan. Moottoripyörän suurin kiihtyvyys, kun takarengas on menettämässä pitonsa tien suhteen, voidaan laskea kaavalla

$$\ddot{x} = \frac{\mu g \frac{p-b}{h}}{1 - \mu \frac{h}{p}}. \quad (27)$$

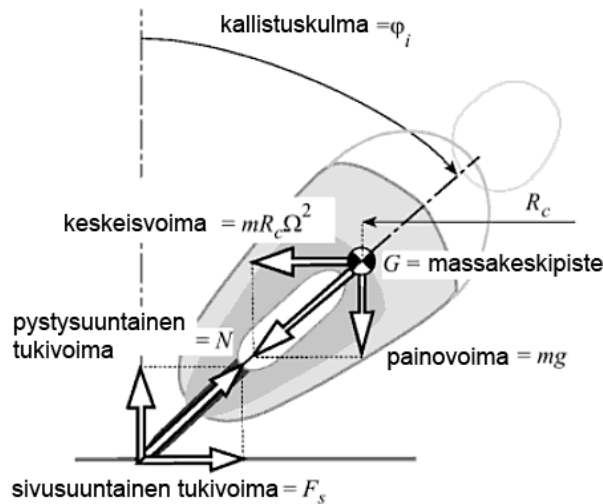
Moottoripyörän suurin kiihtyvyys etupyörän noustessa ilmaan lasketaan kaavalla

$$\ddot{x} = g \frac{b}{h}. \quad (28)$$

Alinta kiihtyvyyssrajaa vastaava ajava voima sekä pyörien dynaamiset tukivoimat lasketaan yhtälöillä 22, 24 ja 25. (Cossalter 2006, 93-96)

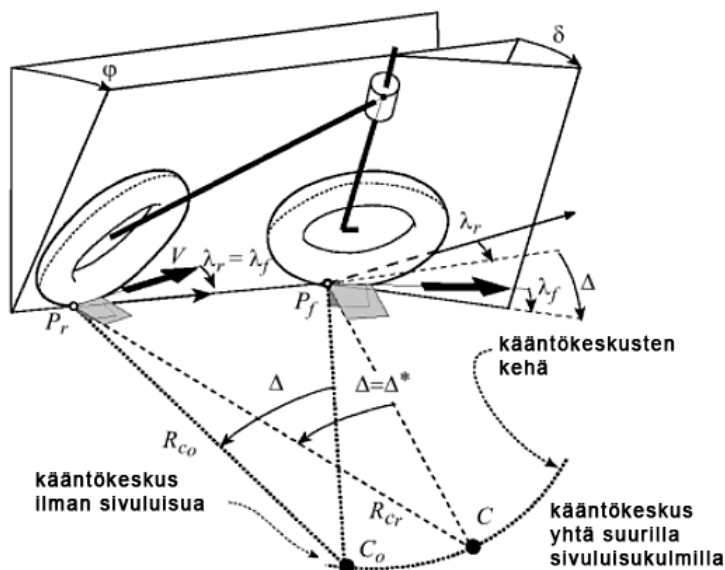
5.3 Kaarreaajo

Moottoripyörän ollessa kaarteessa vaikuttaa siihen keskeisvoima, joka pyrkii palauttamaan moottoripyörän pystyasentoon. Painovoima pyrkii kaatamaan moottoripyörää kohti kaarteeseen keskustaa. Renkaisiin kohdistuvat tukivoimat pysty- ja sivusuunnassa. Tasaaisessa kaarteessa oletetaan kaarteelle vakiosäde R_c ja vakionopeus V . Gyroskooppivoimat oletetaan merkityksettömiksi sekä renkaan paksuus äärettömän pieneksi. Kaarteessa moottoripyörään vaikuttavat voimat on esitetty kuvassa 18. (Cossalter 2006, 105-106)



Kuva 18. Moottoripyörään kaarreaajossa vaikuttavat voimat (Cossalter 2006, 106).

Oletetaan kaarteeseen säde suureksi moottoripyörän akselivälin suhteen ja kallistuskulma φ , kääntökulma Δ sekä sivuluisukulma λ pieniksi. Kaarreaajossa syntyvät kulmat on esitetty kuvassa 19. (Cossalter 2006, 112)



Kuva 19. Kallistuskulma φ , kääntökulma Δ ja sivuluisukulma λ (Cossalter 2006, 112).

Pystysuuntaiset tukivoimat kaarteessa ovat etupyörälle (yhtälö 29) ja takapyörälle (yhtälö 30) seuraavat:

$$N_f = mg \frac{b}{p} \quad (29)$$

$$N_r = mg \frac{p-b}{p}. \quad (30)$$

Etupyörän (yhtälö 31) ja takapyörän (yhtälö 32) sivuttaiset tukivoimat ja näitä vastaan massakeskipisteeseen vaikuttava keskeisvoima (yhtälö 33) ovat

$$F_{sf} = \frac{N_f V^2}{g \cos \Delta R_c} \quad (31)$$

$$F_{sr} = \frac{N_r V^2}{g R_c} \quad (32)$$

$$F_k = F_{sf} + F_{sr} . \quad (33)$$

(Cossalter 2006, 110-115)

Kaarreajon tukivoimat voidaan muuntaa pyörän suhteen pystysuuntaisiksi laske-
malla tukivoimien komponentit yhteen etupyörälle (34) ja takapyörälle (35)

$$N_{fp} = \sqrt{N_f^2 + F_{sf}^2} \quad (34)$$

$$N_{rp} = \sqrt{N_r^2 + F_{sr}^2} . \quad (35)$$

5.4 Väsymistarkastelun kuormitus

5.4.1 Laskennallinen väsymiskuormitus

Väsymistarkastelun jännitysvaihteluväli $\Delta\sigma$ määritetään kuormanvaihtona edellä laskettujen kuormitustilanteiden ja staattisen tilan välillä, sillä nämä tilat lienevät yleisimmin toistuvat selkeät kuormitukset moottoripyörän normaalissa käytössä. Kaarreaajossa etupyörälle oletetaan kuormitusheilahduksen arvoksi

$$\Delta N_{caf} = N_{fp} - N_{sf} \quad (36)$$

ja takapyörälle

$$\Delta N_{cbf} = N_{fr} - N_{sr} . \quad (37)$$

Vastaavasti kiihdytyksessä etu- ja takapyörälle pystysuuntaiset kuormitusheilahdukset ovat

$$\Delta N_{aaf} = N_{af} - N_{sf} \quad (38)$$

$$\Delta N_{arf} = N_{af} - N_{sf} \quad (39)$$

ja jarrutuksessa

$$\Delta N_{baf} = N_{bf} - N_{sf} \quad (40)$$

$$\Delta N_{brf} = N_{bf} - N_{sf} . \quad (41)$$

Jarrutustilanteessa vaakasuuntaiset kuormitusheilahdukset lasketaan kaavojen 19 ja mukaan 20, kiihdytystilanteessa kaavan 22 mukaan.

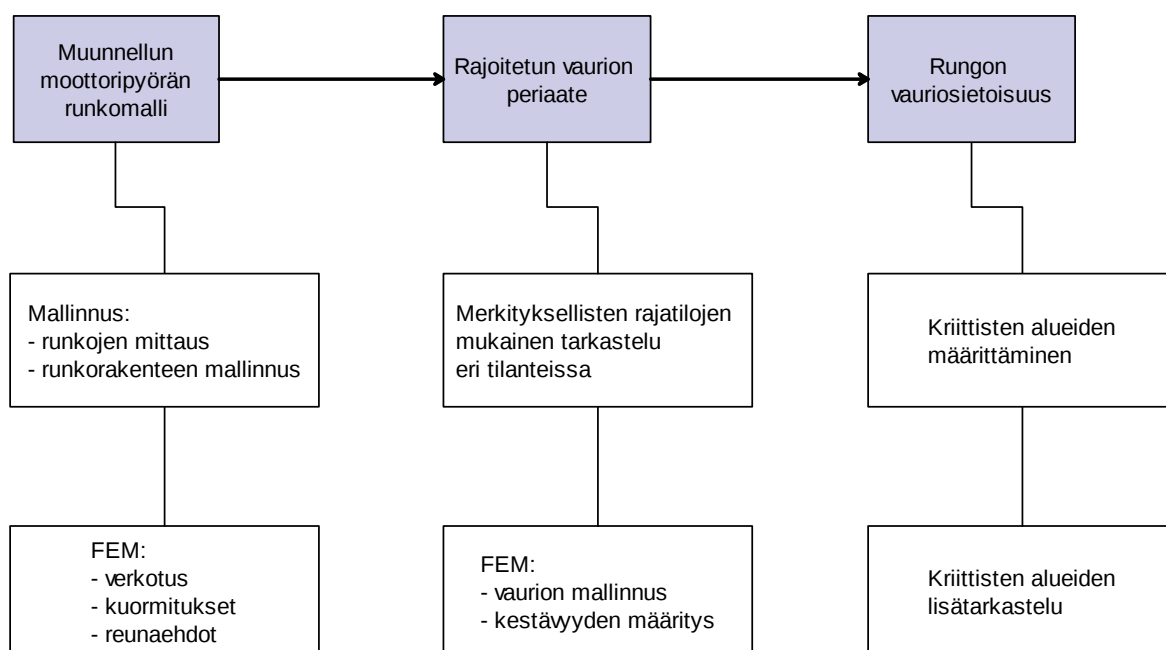
5.4.2 Todellinen moottoripyörän kuormitus

Kuten todettua, on kuormitushistorian muodostaminen laskennallisesti hankalaa. Edellä lasketut kuormitustilat eivät ota huomioon tienpinnan epätasaisuuksia, todellisia ohjausliikkeitä tai moottorin aiheuttamaa tärinää. Todellisessa kuormitushistoriassa nämä näkyisivät lukuisina pienempinä kuormitusheilahduksina, koska ääritilanteesta toiseen ajaminen vaatii kuljettajaltakin taitoa. Laskennallinen ääritilanteista koostuva kuormitushistoria siis yliarvioi kuormituksia.

Standardisoituja kuormitushistorioita on kehitetty kulkuneuvoille ja niiden komponenteille riittävän kestävyysvarmistamiseksi. Standardisoidun kuormitushistorian pohjalta voidaan luoda tarkempi tuotekohtainen kuormitushistoria ja arvioida sen kestävyyttä. (Heuler & Klätschke, 2005) Tulevaisuudessa moottoripyörän kuormitushistorian laskenta mahdollisesti helpottuu, mikäli moottoripyörille kehitetään oma standardisoitu kuormitushistoria.

6 Rungon vauriosietoisuus

Muunneltuihin moottoripyörän runkoihin sovellettiin rajoitetun vaurion periaatetta, kun rungon hitsien ominaisuudet oletettiin tuntemattomiksi. Periaatteen mukaisesti moottoripyörän rungosta haettiin vaihtoehtoisia kuormankantopolkuja vauriotilanteiden varalta. Koska rungon hitsien lujuus- tai väsymisominaisuuksia ei tunnettu, vauriomuodoksi oletettiin satunnainen hitsausliitoksen murtuminen. Edelleen, vaurioituvan liitoksen kuormankantokyvyn oletettiin katoavan täysin. Rungon vauriosietoisuus selvitettiin eri vaurio- ja kuormitustilanteissa. Tarkasteluprosessi on esitetty kuvassa 20. Rungon vauriosietoisuuden ohella havaittiin ne kriittiset hitsausliitokset, joiden kestävyys tulee olla ennakoitavissa.



Kuva 20. Moottoripyörän rungon arviointi vauriosietoisuuden kannalta.

6.1 Rungon mallinnus

Erilaisia jäykkäperäisiä kaksoiskehtorunkoja mallinnettiin kolme kappaletta lujuustarkastelua varten. Mallinnetut rungot ja niiden ominaisuudet on esitetty taulukossa 4, mittapiirustukset rungoista ovat liitteessä 2.

Taulukko 4. Mallinnettujen runkojen ominaisuudet.

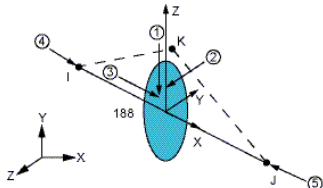
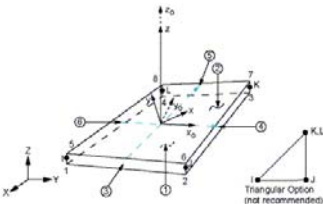
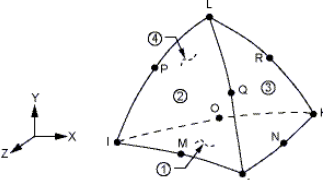
Runko	Akseliväli [mm]	Emäputken kulma [°]	Takahaarukan leveys [mm]
Telik	2390	51	270
Jasak	2300	52	260
Hydra	1600	30	225

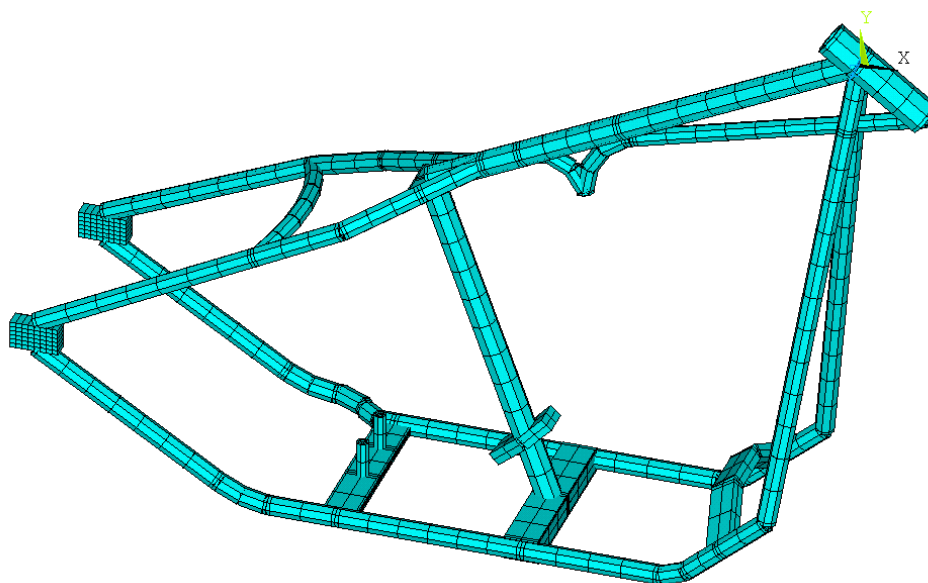
Rungot Telik ja Jasak ovat muunneltuja chopper-pyörien runkoja, jotka muistuttavat toisiaan taulukon 4 ominaisuuksien mukaan. Kuitenkin mittapiirustuksista nähdään niiden emäputken tuennassa olevan rakenteellisia eroja. Kolmantena runkona on jäykkäperäinen vuoden 1949 Harley-Davidson Hydra-Gliden runko, joka mallinnettiin vertailukohteeksi muunnelluille rungoille. Hydra-Glidea muistuttavia runkoja on saatavilla tarvikerunkoina ja ne ovat usein muuntelun kohteena, kun halutaan rakentaa chopper-moottoripyörä (Nieminen 2009).

6.1.1 Mallin geometria ja verkotus

Putkirunkojen viivageometria mallinnettiin suoritettujen mittausten perusteella SolidWorks 2008 -ohjelmistolla. Viivageometria tuotiin Ansys-ohjelmistoon verkotettavaksi ja analysoitavaksi FE-menetelmällä. Verkotuksessa käytettyjen elementtityyppien ominaisuudet on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Mallissa käytetyt elementtityypit (Release 10.0 Documentation for ANSYS).

Elementti	Ominaisuudet
BEAM188 	Palkkielementti, 2 solmua 6 vapausastetta per solmu määrittäminen viivageometrialla ja vakioilla
SHELL181 	Kuorielementti, 3–4 solmua 6 vapausastetta per solmu määrittäminen aluegeometrialla ja vakioilla
SOLID187 	Solidielementti, 10 solmua 3 vapausastetta per solmu määrittäminen tilavuusgeometrialla

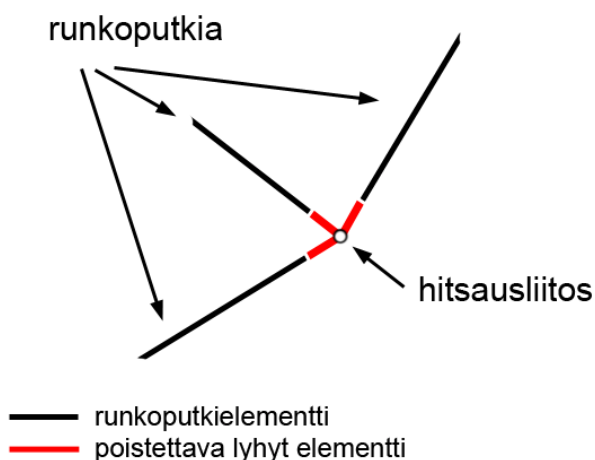


Kuva 21. Elementeillä BEAM188 ja SHELL181 verkotettu Telik-runko. Malli sisältää 292 elementtiä ja 325 solmua.

Palkki- ja kuorielementeillä verkotettu Telik-runko on esitetty kuvassa 21. Kuvasta 21 nähdään hitsausliitoksiin mallinnetut tihentymät elementtiverkossa. Mallin tiheämmin verkotetuilla alueilla mallinnettiin hitsausliitoksen vaurio.

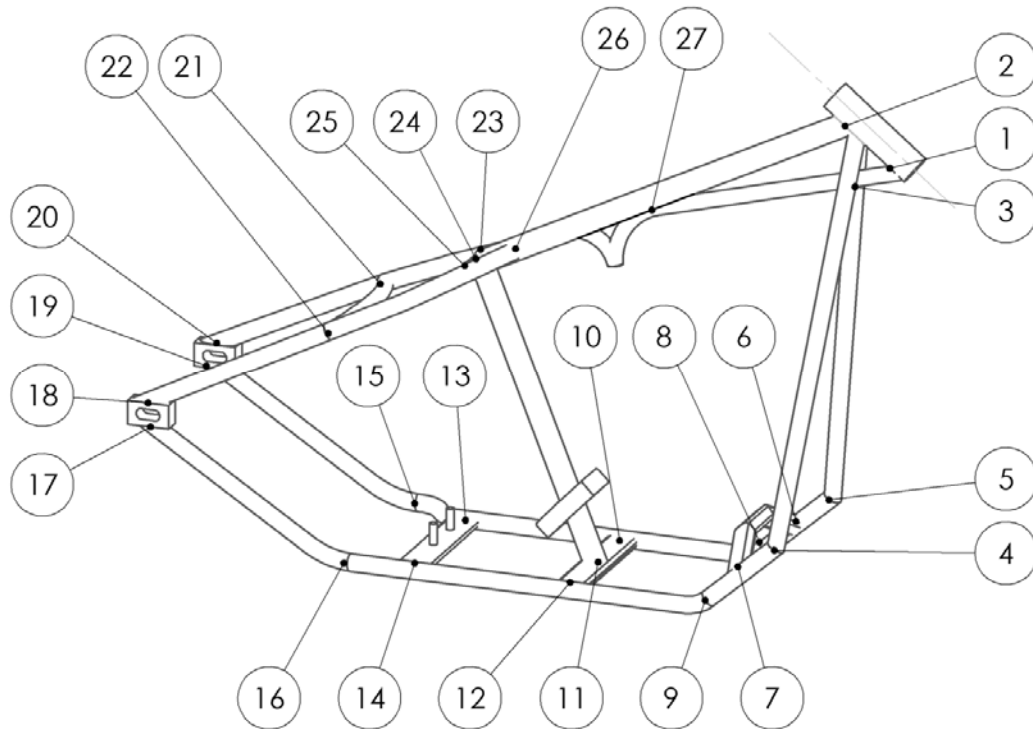
6.1.2 Vaurion mallinnus

Hitsausliitoksen pettämisen mallintamiseksi jokainen runkoputken pää sisälsi lyhyen palkkielementin. Hitsausliitoksen vauriota mallinnettaessa poistettiin liitokseen liittyvät lyhyet palkkielementit. Koska liitoksen vauriosuuntaa tai -muotoa ei tunnettu, oletettiin vaurion koskevan koko poikkipintaa. Elementtien poiston jälkeen liitos ei kantanut kuormaa, mikä mahdollisti rungon vauriosietoisuuden arvioinnin. Vaurion toteutus on esitetty kuvassa 22.



Kuva 22. Hitsausliitoksen vaurion toteutus.

Hitsausliitokset, joiden kantokyvyn katoamista Telik-rungossa tarkasteltiin, on esitetty kuvassa 23 numeroituna. Yhteensä hitsausliitoksen vauriotapauksia Telik-rungolle mallinnettiin 27. Vauriotapausten suuren määrän vuoksi analyysi toteutettiin Ansys-makrojen avulla.



Kuva 23. Lujoustarkastelussa vaurioituvaksi oletetut liitokset Telik-rungossa.

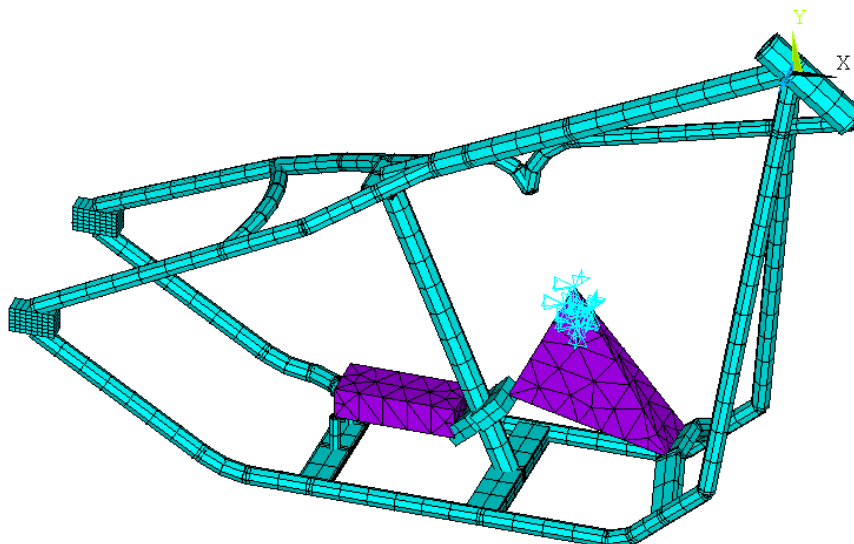
Rungosta tutkittiin vaurioiden kannalta oleelliset hitsausliitokset. Varusteluhitsit sijaitsevat aina oletettujen vauriokohtien välissä, joten varusteluhitsien sisällyttäminen vauriotarkasteluun ei tuottaisi kriittisempiä vauriotapauksia kuin jo kuvassa 23 esitetty.

6.1.3 Reunaehdot

Mallin reunaehtoina estettiin siirtymät ja kiertymät massakeskipisteessä. Reunaehtoien asettamiseksi mallinnettiin moottoripyörän moottori. Massakeskipisteen oletettiin sijaitsevan moottoripyörän moottorissa. Koska moottori verkotettiin solidielementeillä, estettiin siirtymät useassa solmussa, jotta myös rotaatio massakeskipisteen suhteen estyi.

Myös taaempaan runkoon kiinnitetty vaihdelaatikko mallinnettiin, sillä se osaltaan jäykkänä komponenttina vaikutti kuormitusten jakautumiseen rungossa. Moottori ja vaihdelaatikko olivat tarkastelun alla olevissa pyörissä kiinnitetty runkoon ruuvi-liitoksien, joten ne liitettiin runkomalliin siirtymien suhteen. Moottorin ja muiden mallinnettavien komponenttien muodonmuutoksia tai jännitystasoja ei tarkasteltu.

Reunaehdot on esitetty kuvassa 24. Mallinnetut moottori ja vaihdelaatikko näkyvät kuvassa eri sävyillä.

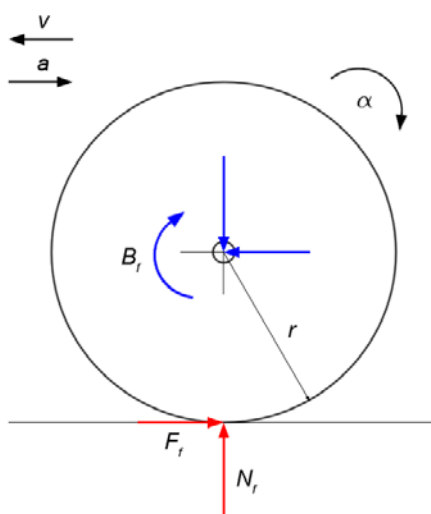


Kuva 24. Reunaehdot Telik-rungon massakeskipisteessä.

6.1.4 Rungon kuormitusten asetus

Runkoon eri tilanteissa kohdistuvat kuormitukset laskettiin Excel-taulukolla. Taulukkoon syötettiin moottoripyörän parametrit, joiden perusteella se laski voimat eri tilanteissa kaavojen 6–41 mukaan. Runkojen kuormitusten laskentaa varten luotu Excel-taulukko on esitetty liitteessä 3. Koska esitetyt moottoripyörään kohdistuvat voimat eivät ole samat kuin runkoon vaikuttavat voimat, johdettiin ne runkoon etu- ja takapyörän kautta. Rungon kuormituksia varten mallinnettiin etuhaarukka ja taka-akseli. Piirtämällä vapaakappalekuvat erikseen pyöristä ja rungosta, voitiin moottoripyörän voimat johtaa runkoon.

Jarrutustilanteessa etupyörän vapaakappalekuva on esitetty kuvassa 25. Pyörän ja tien pinnan tukivoimat ovat samat kuin aikaisemmin koko moottoripyörälle lasketut F_f ja N_f . Jarrutusmomentti B_f etupyörässä aiheuttaa kulmakiittävyyden α .



Kuva 25. Etupyörän vapaakappalekuva jarrutuksessa.

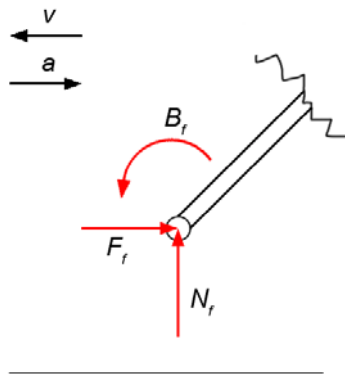
Muuttuvassa suoraviivaisessa liikkeessä momentin tasapainoyhtälö pyörän akselin suhteen on

$$B_f - F_f r = m_p \alpha. \quad (42)$$

Yhtälössä r on pyörän säde ja m_p pyörän massa, joka oletetaan nolllaksi. Jarrutusmomentiksi saadaan

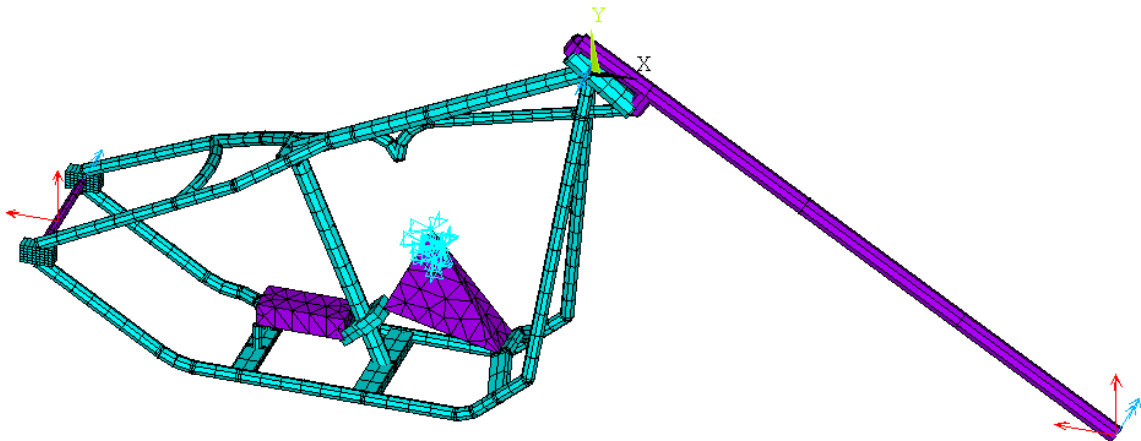
$$B_f = F_f r. \quad (43)$$

Nämä runkoon vaikuttavat voimat lasketaan edelleen mainitussa Excel-taulukossa. Jarrutuksessa runkoon kohdistuvat voimat on etuhaarukan osalta esitetty kuvassa 26. Voimat ovat samat kuin etupyörälle lasketut, jarrutusmomentti on suunnaltaan päinvastainen.



Kuva 26. Jarrutuksessa etuhaarukkaan kohdistuvat voimat.

Taka-akselilla vaikuttavat jarrutuksessa voimat kuten etuhaarukkaan kuvassa 26. Takajarrutusmomenttia lukuun ottamatta kuormitukset asetetaan pyörien keskilinjalle. Koska takajarru on tarkasteltavissa rungoissa kiinnitetty runkoputkiin, asetetaan taka-akselin jarrutusmomentti B_r runkoon jarrun puolelle. Jarrutustilanteessa Telik-rungolle asetetut kuormat on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27. Jarrutustilanteessa rungolle 1 asetetut kuormitukset mallinnettujen komponenttien avulla.

Kiihdytyksessä runkoon kohdistuva ajava voima asetettiin taka-akselille. Moottorin ja pyörien tukivoimat asetettiin etuhaarukkaan ja taka-akselille. Kiihdytystilanne laskettiin kitkan rajoittamana, koska sama runko voidaan varustaa eri tehoisilla moottoreilla. Tästä syystä myöskään voimansiirron aiheuttamia vääntömomenteja ei asetettu malliin. Kaarreaajossa renkaiden rungon pystyakselin suuntaiset tukivoimat asetettiin etuhaarukkaan ja taka-akselille, muita voimakomponentteja ei kaarreaajossa laskettu.

6.1.5 Runkomallin rajoitukset

Esitellyssä mallissa voidaan Ansys-makroilla nopeasti muuttaa runkoputkien halkaisijaa ja seinämänpaksuutta sekä laattamaisten osien paksuutta. Tutkittavia liitosvaurioita voidaan lisätä ja poistaa. Runkogeometrian muutokset esimerkiksi emäputken sijainnin ja kulman sekä takahaarukan sijainnin ja leveyden mukaan vaativat viivageometrian muokkaamista ennen elementtiverkotusta. Rungon kuormitukset määräytyvät runkogeometriasta, joten ne lasketaan Excel-taulukolla erikseen jokaiselle muunnellulle rungolle.

Esitetty runkomalli on palkkimalli, johon ei mallinnettu paikallisgeometrioita. Näin ollen se ei sovellu väsymistarkasteluun hot spot -jännitysten tai lovi-jännitysten perusteella.

6.2 Mallinnettujen runkojen lujuustarkastelu

6.2.1 Vauriosietoisuuden kriteerit

Moottoripyörän rungon lujuustarkastelussa runkoputkien kestävyys nousi merkittävimmäksi kriteeriksi. Moottoripyörän rungon tarkastelumalli käsitteli rakenteen varmuutta ja pyrki varmistamaan ihmisten turvallisuuden, joten kaikki tarkasteltavat rajatilat luokiteltiin Eurokoodin (SFS-EN 1990-1:2002, luku 3) mukaan murto-rajatiloiksi. Rungon vauriosietoisuuden osalta tutkittiin seuraavat merkitykselliset murtorajatilat:

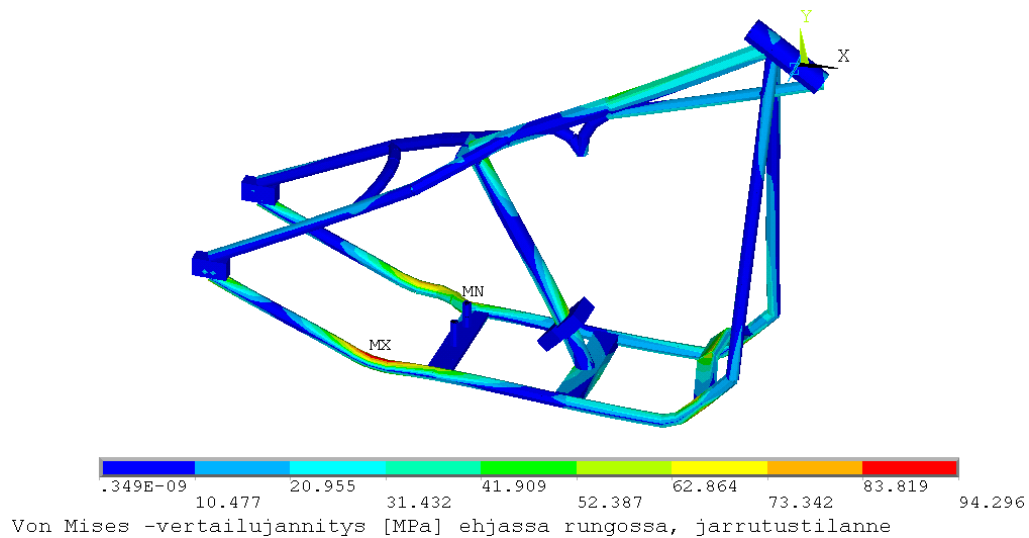
- Runkoputkien kestävyysmenetyksen (myötöehdon saavuttaminen, lineaariselastinen analyysi)
- Rungon muuttuminen mekanismiksi (siirtymien kasvaminen hallitsemattomasti)

Murtorajatilassa määritettiin materiaalin osavarmuuskerroin $\gamma_{M0} = 1,00$ poikkileikkauksen kestävyysasteen suhteen (SFS-EN 1993-1-1:2005, luku 6). Staattiselle kuormitukselle määritettiin osavarmuuskerroin $\gamma_F = 1,00$, sillä kappaleessa 5 lasketut kuormitukset olivat rungolle pahimpia mahdollisia tilanteita. Kuormitus asetettiin pistekuormana moottoripyörän massakeskipisteeseen, mikä edelleen teki lujuustarkastelusta kriittisemmän. Myös mallinnetun referenssirungon korkeat jännitystasot vaikuttivat alhaisten osavarmuuskerroinien valintaan. Kimmoteorian mukaisena myötöehtona käytettiin von Mises -vertailujännitystä, sillä se antaa realistisia tuloksia rungoissa käytetyille materiaaleille (Outinen 2007, 351).

6.2.2 Jännitystasot ehjässä rungossa

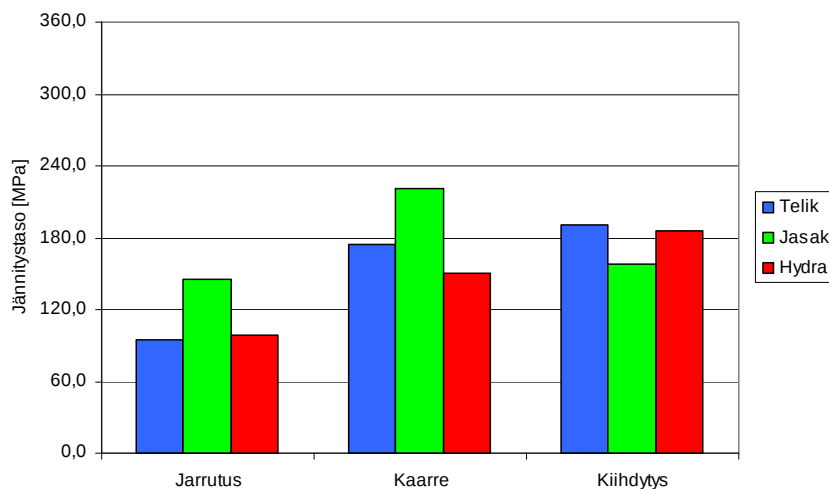
Lujuustarkastelun osalta merkitykselliseksi rajatilaksi nousi runkoputkien kestävyiden menetys. Mallinnettujen runkojen materiaalin myötöraja on 235 MPa ja murtoraja 360 MPa. Tulokset on tämän takia esitetty alueella 0–360 MPa, suuremmat jännitykset eivät ole tarkastelun kannalta oleellisia. Runkomallien suurimmat vertailujännitykset ja siirtymäresultantit kaikissa vaurio- ja kuormitustilanteissa on listattu liitteessä 4.

Kuvassa 28 on esitetty Telik-rungon vertailujännitykset jarrutustilanteessa. Runkojen huippujännitykset keskittyivät eri kohtiin rungosta ja kuormituksesta riippuen. Jarrutustilanteen kuormitus tuottaa Telik-rungossa suurimmat jännitykset takahäärän alaputkiin.



Kuva 28. Telik-rungon vertailujännitykset FE-mallissa.

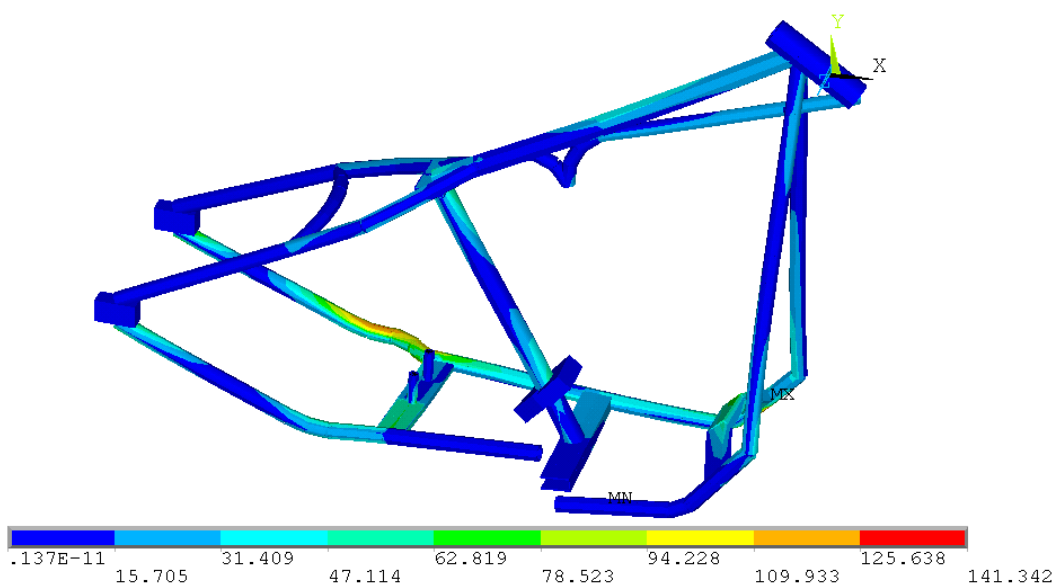
Huippujännitykset kaikille ehjille rungoille eri kuormitustilanteissa on esitetty kuvassa 29. Runkomallien suurimmat jännitykset ovat samalla tasolla eri kuormitustilanteissa, poikkeuksena Jasak-rungon huippujännitykset jarrutuksessa ja kaareajossa.



Kuva 29. Runkojen suurimmat vertailujännitykset eri kuormitustilanteissa.

6.2.3 Vauriosietoisuuden tarkastelu

Vaurioituneen Telik-rungon vertailujännitykset on esitetty kuvassa 30, josta nähdään, että jännityshuiput siirtyvät vauriotilanteessa eri kohtiin verrattuna ehjään runkoon. Kuvan 30 mukaan vaurioituneen liitoksen kuormankantokyky katosi, joten siihen liittyneiden osien jännitykset hävisivät. Suurin vertailujännitys siirtyi moottorinkiinnikkeen ja kehtoputken liitokseen ja jännityksen suurin arvo kasvoi verrattuna ehjään runkoon.

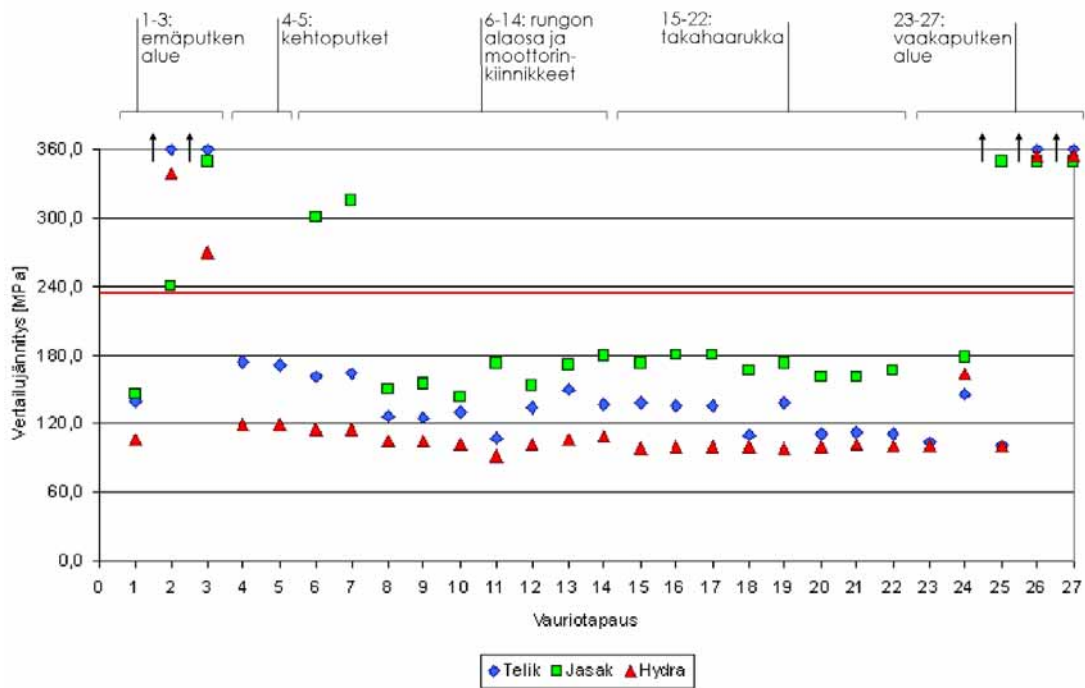


Kuva 30. Telik-runko vauriotilanteessa 12, vertailujännitykset [MPa] kuormituksen ollessa jarrutustilanne.

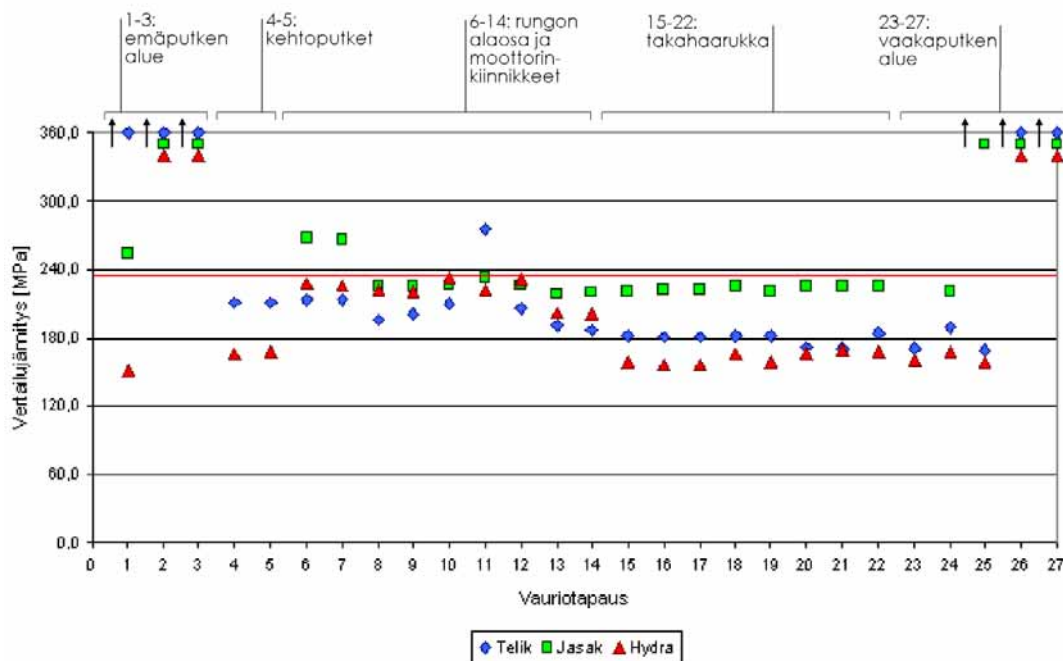
Jännitystasot eri vauriotilanteissa mallinnetuille vaurioille on esitetty kuvassa 31, kun kuormituksena on jarrutustilanne. Kuvassa vauriotapaukset etenevät numeroituna välillä 1–27. Jasak-runko ei sisällä vauriotapauksia 4,5 ja 23. Suurimmat huippujännitykset eivät näy esityksessä, ne voidaan lukea tarkemmin liitteestä 4. Runkomateriaalin myötöraja 235 MPa on esitetty kuvissa punaisena vaakaviivana.

Kuvasta 31 nähdään emä- ja vaakaputken vauriotilanteiden olevan kaikissa rungoissa myötörajan ylittäviä. Jasak-rungossa myös etummaisten moottorinkiinnikkeiden vauriotilanteet 6 ja 7 tuottavat myötörajan ylittävät jännitykset. Tapauksissa 8–24 vertailujännitykset jäävät selkeästi alle myötörajan. Kaarreajon aiheuttamassa kuormituksessa vauriotapausten jännitykset on esitetty vastaavasti kuvassa 32.

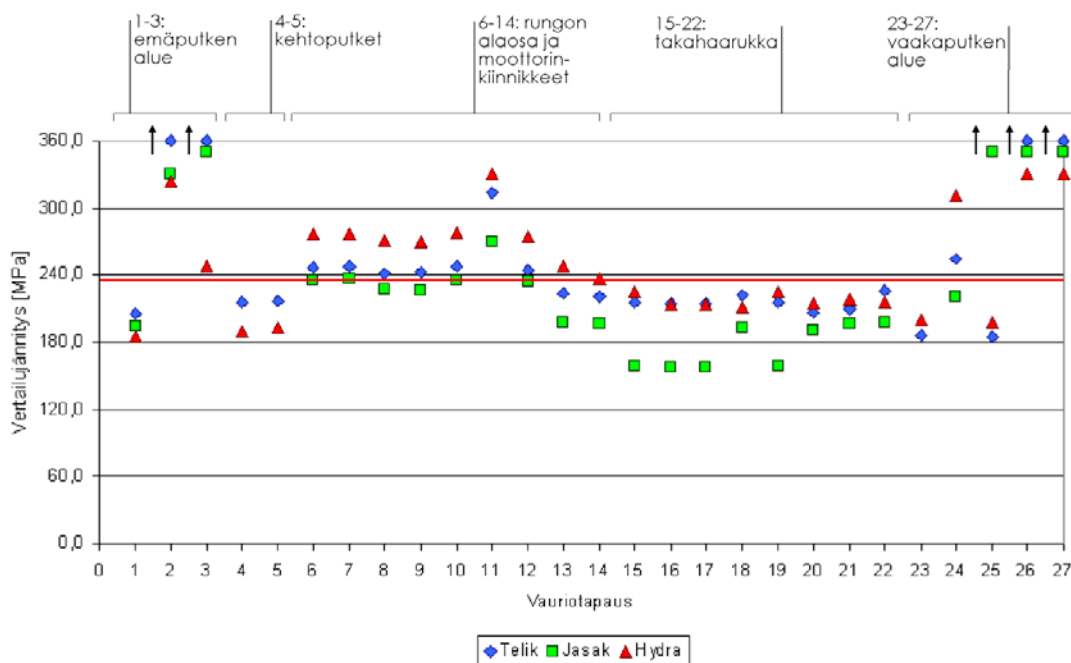
Kuvasta 32 nähdään, että kaarreajossa vertailujännitykset ylittävät kaikissa rungoissa selkeästi myötörajan, kun vauriotapauksina ovat emä- ja vaakaputkeen liittyvät vauriot. Jasak-rungon etummaisiin moottorinkiinnikkeisiin liittyvät vauriotapaukset 6–7 aiheuttavat myötörajan ylittävät jännitykset. Myötörajan ylittävät vauriotapaukset ovat samat kuin jarrutuskuormituksessa, mutta nyt myös pystytolppaan liittyvässä vauriotapauksessa 11 ylittää Telik-runko myötörajan. Kiihdytystilanteessa syntyvät vertailujännitykset on esitetty kuvassa 33.



Kuva 31. Runkojen suurimmat vertailujännitykset vauriotapauksissa 1–27, kun kuormituksena on jarrutustilanne.



Kuva 32. Runkojen suurimmat vertailujännitykset vauriotapauksissa 1–27, kun kuormituksena on kaarreajo.

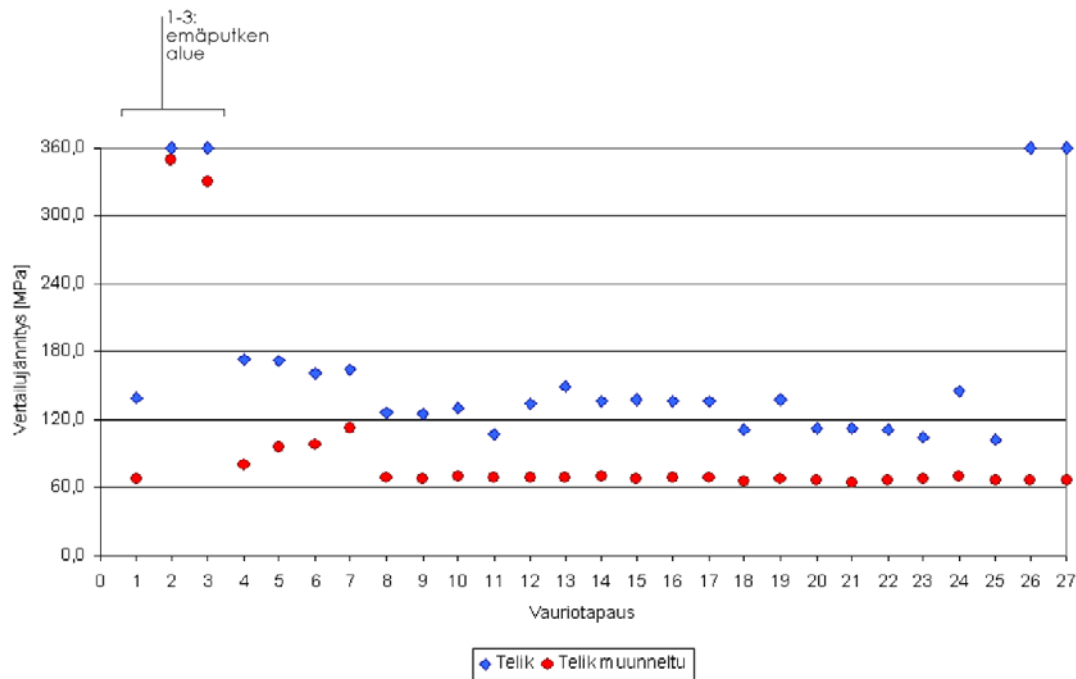


Kuva 33. Runkojen suurimmat vertailujännitykset vauriotapauksissa 1–27, kun kuormituksena on kiihdytystilanne.

Kuvan 33 perusteella kiihdytyksessä vertailujännitykset ovat emä- ja vaakaputkeen liittyvissä vaurioissa selkeästi myötörajan yläpuolella. Myös rungon alaosaan liittyvissä vauriotapauksissa 6–12 kaikkien runkojen vertailujännitykset ovat myötörajan lähellä tai ylittävät sen.

Koska vauriosietoisuutta ei mallinnettuilla rungoilla saavutettu, muunneltiin Telik-runtoa tavoitteena vauriosietoisuus. Muuntelu keskittyi emäputkeen liittyvien putkipalkkien koon kasvattamiseen liitteessä 2 esitetyn mittapiirustuksen mukaan. Kuvassa 34 on esitetty Telik-runгон eri versioiden vertailujännitykset jarrutustilanteessa.

Kuvasta 34 nähdään, että kasvattamalla runkoputkien kokoa saatiin vertailujännityksiä alennettua kaikissa tapauksissa. Kuitenkin vauriotapauksissa 2 ja 3 ovat jännitykset edelleen selkeästi myötörajaa ylempänä. Muunneltua Telik-runtoa ei määritetty vauriosietoiseksi.



Kuva 34. Telik-runko ja sen muunnellun version vertailujännitykset eri vauriotapa-
uksissa jarrutustilanteessa.

6.2.4 Vauriosietoisuuden tulokset

Vauriosietoisuuden tarkastelu tuotti runkojen eri osiin liittyviä tuloksia. Vauriosietoisuus rungon osien (kuva 8) suhteen on esitetty taulukossa 6. Kiihdytystilanteen tuloksia ei huomioitu lopullista vauriosietoisuutta määritettäessä, sillä tarkastelussa käytetty kuormitus ei toteudu edes tämän hetken nopeimmalla Harley-Davidson -moottoripyörillä (Stewart 2007).

Taulukko 6. Runkoalueiden vauriosietoisuus. x = vauriosietoisuus toteutuu.

runko	emäputki	vaakaputki	kehtoputket	pystyputki	takahaarukka
Telik	-	-	x	x	x
Jasak	-	-	-	x	x
Hydra	-	-	x	x	x

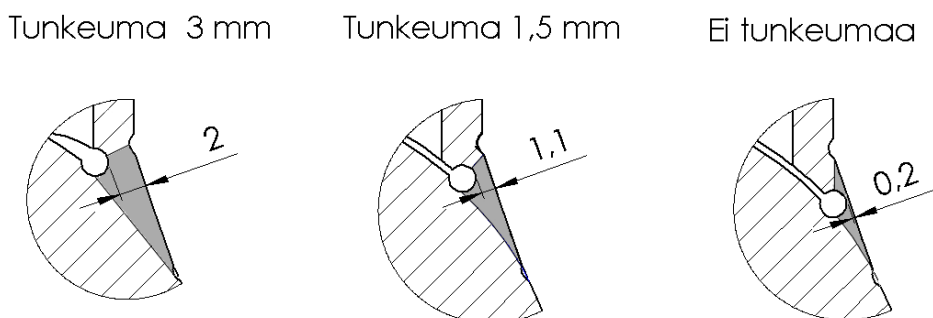
Taulukosta 6 nähdään, että vauriosietoisuus ei toteutunut millään rungolla emä- ja vaakaputken osalta. Jasak-rungossa myöskään kehtoputkien ja moottorinkiinnikkeiden liitokset eivät olleet vauriosietoisia.

7 Rungon väsymiskestävyys

Koska rungon vauriosietoisuutta ei kaikkien hitsausliitosten osalta saavutettu, tarkasteltiin erikseen kriittisten hitsien väsymislujuutta. Tehollista lovi­jännitystä varten luotiin alimalli rungon emäputken alueesta. Rungon emäputki ja siihen liittyvät putkipalkit mallinnettiin hitseineen niin, että tehollinen lovi asetettiin sekä hitsin rajaviivan, että juuren puolelle. Mallinnus tehtiin Solidworks-ohjelmistossa ja verkotus ja analyysi Ansys Workbench -ohjelmistossa.

7.1 Hitsin geometrian mallinnus

Rajaviivan puoleiset lovet mallinnettiin 0,3 mm syvyyteen perusaineeseen, mikä on väsyttävästi kuormitetuissa rakenteissa suurin sallittu reunahaava IIW:n mukaan (Hobbacher 1996, 86). Pienahitsien sovitusrvirheenä mallinnettiin 0,5 mm rako liitettävien pintojen väliin (SFS-EN ISO 5817:2006, luku 5). Pienahitsin a-mitta mallinnettiin 3 mm pituisena. Perusaineen paksuuden ollessa pieni (3 mm) verrattuna menetelmän alarajasuositukseen 5 mm, nähdään kuvan 35 mukaan, että ilman tunkeumaa mallinnettavissa hitsausliitoksissa materiaalia on jäljellä 0,2 mm. Kuvan 35 mukaan mallinnuksessa käytettiin 3 mm tunkeumaa, jolloin hitsin paksuus on noin 2 mm.

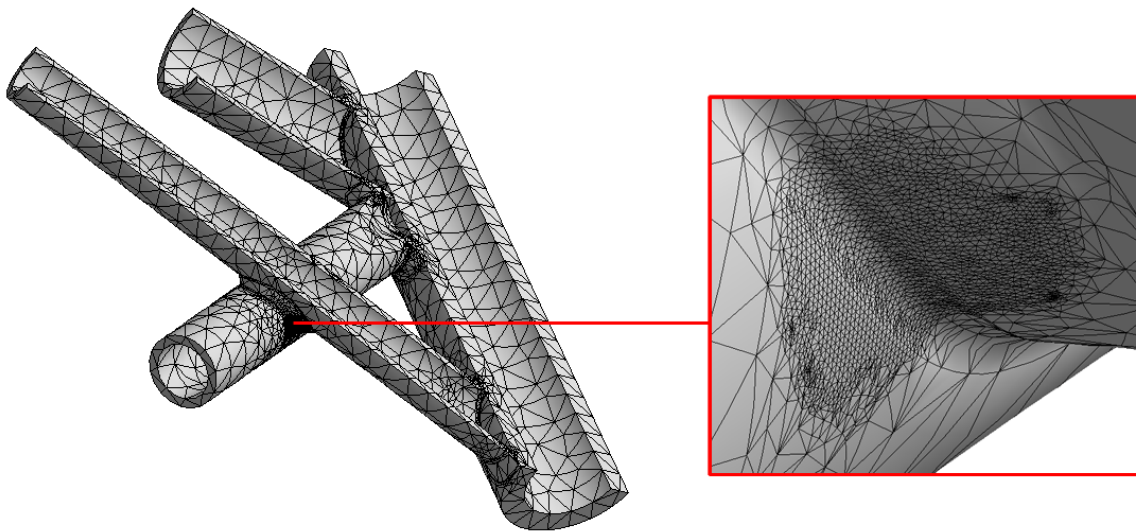


Kuva 35. Hitsin tunkeumavertailu satulapisteen kohdalla. Mallinnuksessa käytettiin 3 mm tunkeumaa.

7.2 Elementtimenetelmän parametrit

7.2.1 Verkotus tehollista lovi­jännitystä varten

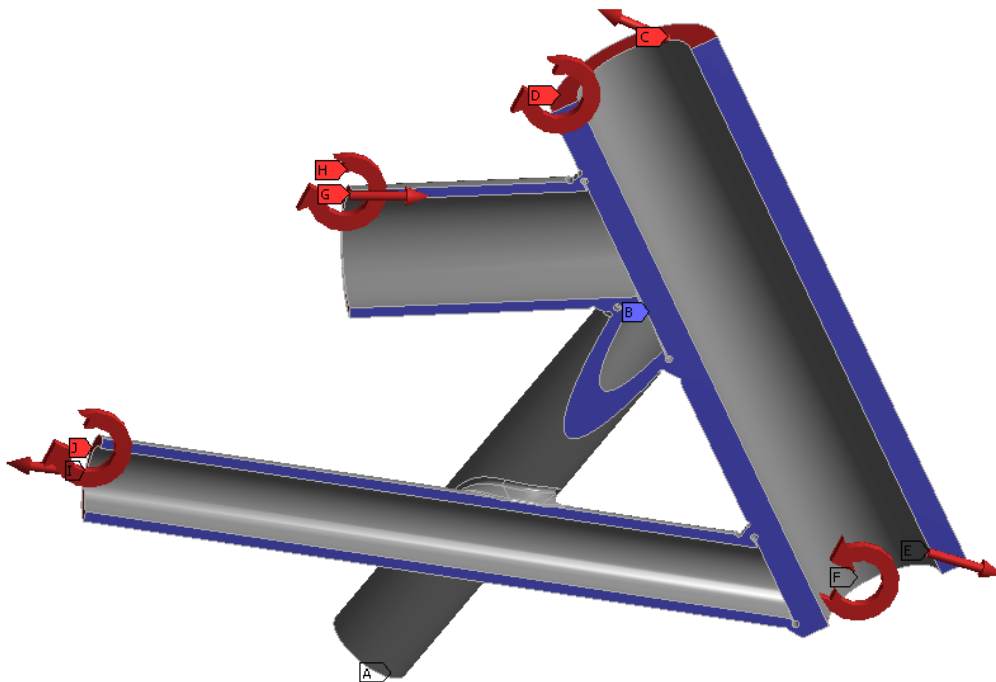
Alimallin verkotus tehtiin solidielementeillä, joiden ominaisuudet esiteltiin taulukossa 4. Suurimman lovi­jännityksen alueella elementin kooksi asetettiin teholliselle lovi­jännitykselle suositeltu 0,20 mm (Niemi 2003, 106). Kuvassa 36 nähdään elementtiverkko Telik-rungon emäputken alueesta sekä tiheimmin verkotettu loven alue. Solmuja mallissa on noin 30 000. Emäputken alueen mallintamisessa hyödynnettiin symmetriaa rungon pituuden suhteen. Malli ei sisältänyt emäputken sisäisiä ohjauslaakereiden pintoja tai ohjauslukkoa.



Kuva 36. Telik-rungon emäputken alueen verkotus, lovijännityksen alue tiheämällä elementtiverkolla.

7.2.2 Kuormitus ja reunaehdot alimallille

Kuormitus alimallille siirrettiin vauriosietoisuustarkastelun palkkimallin solmuvoimista. Voimat ja momentit asetettiin alimallin leikkauspinoille kuvan 37 mukaan. Reunaehdoiksi asetettiin kehtoputken leikatun pään siirtymien esto sekä symmetriatason mukainen siirtymien esto.



Kuva 37. Emäputken alueen voimat ja reunaehdot kaarreheilahduksessa. Kehtoputken pään leikkauksessa (kuvassa A) kaikki siirtymät on estetty.

7.2.3 Emäputken alueen mallin rajoitukset

Väsymistarkastelua varten mallinnettiin moottoripyörän rungosta se alue, joka osoittautui rajoitetun vaurion periaatteen kannalta kriittiseksi. Malli ei siis välttämättä sisällä väsymiskestävyyden kannalta heikointa kohtaa. Tehollista loviännitystä varten käytettävät mallinnusmenetelmät ovat hitaita (Rudolph & Weiss & Forster, 2003), mikä kävi ilmi myös emäputken alueen hitsejä mallinnettaessa. Monimutkaisessa mallissa hitsien geometriaa ei pystytty parametrisoimaan tai käyttämään tehokkaasti mallinnuspiirteitä. Hitsien geometriaa muutettaessa jouduttiin mallinnus usein aloittamaan uudelleen alusta asti.

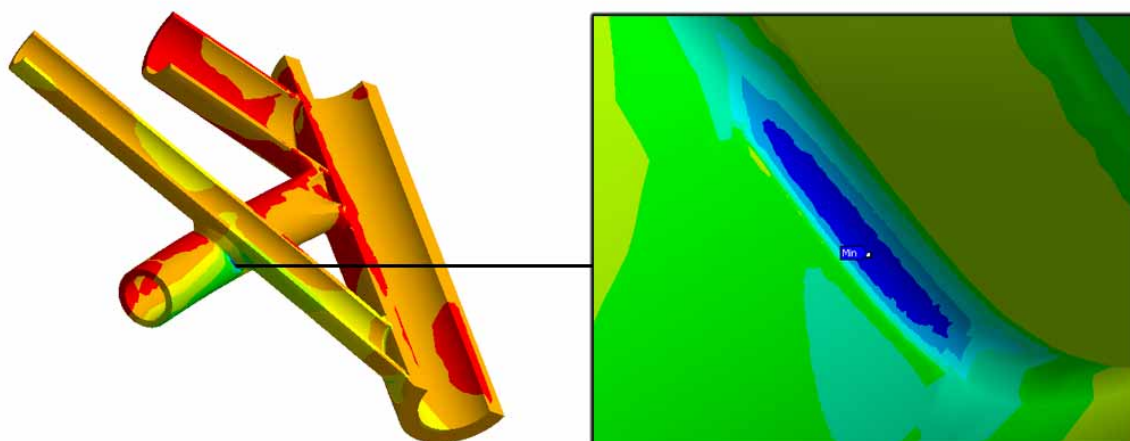
7.3 Kriittisten hitsausliitosten väsymiskestävyys

7.3.1 Väsymistarkastelun kriteerit

Varsinaisia rajatiloja ei väsymistarkastelussa määritetty, koska mittaustiedon puutteessa ei väsymiskestävyydelle voitu asettaa absoluuttista alarajaa. Tarkastelussa materiaalin osavarmuusluvaksi valittiin $\gamma_{Mf} = 1,35$, perustuen vauriosietoisuuden puutteeseen ja vahinkojen seurausten vakavuuteen. (SFS-EN 1993-1-9:2005, luku 3) Kappaleessa 5.4 määritetty väsyttävä kuormitus ei ollut mittauksiin perustuva, joten sille asetettiin osavarmuusluku $\gamma_{Ff} = 1,5$.

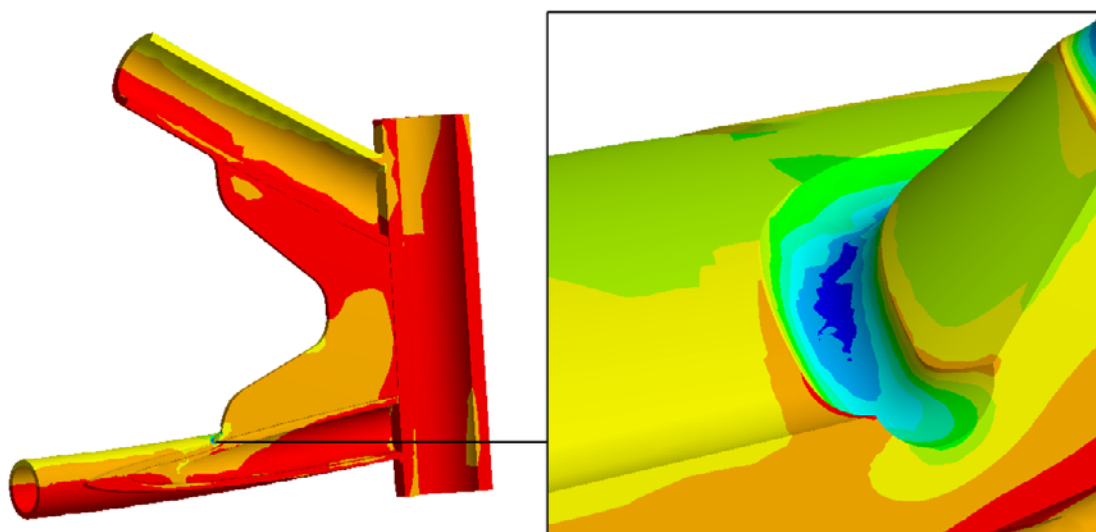
7.3.2 Suurimmat loviännitykset

Kuvassa 38 on esitetty pääjännitys Telik-rungon emäputken alueella. Kuvan kuormitustilanteena on kaarreajon aiheuttama kuormitusheilahdus. Väsymisikä määriteltiin jokaiselle rungolle siinä lovessa, jossa esiintyi suurin loviännitysheilahdus.



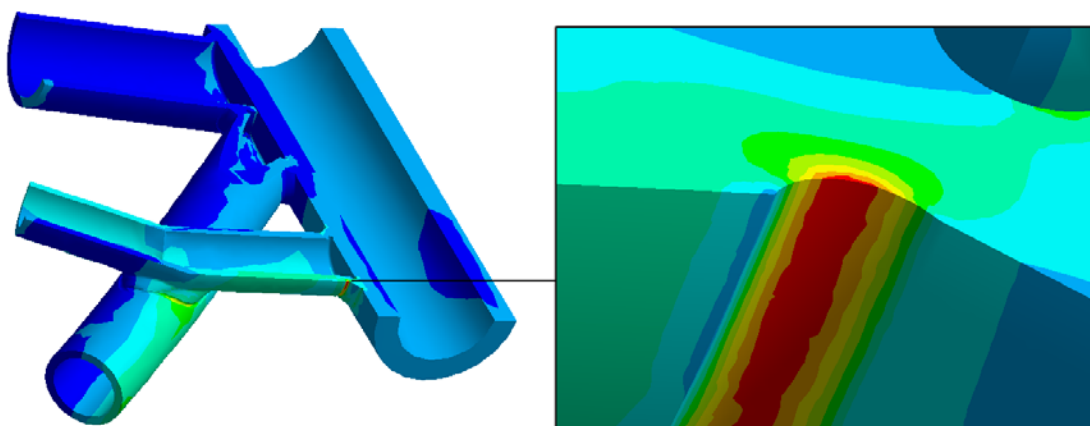
Kuva 38. Pääjännitys Telik-rungon emäputken alueella sekä suurin loviännitys.

Kuvasta 38 nähdään loviännityksen erottuvan selkeästi ympäröivästä alueesta. Telik-rungossa suurin loviännitys on "sulakkeen" ja kehtoputken hitsin rajaviivalla. Jasak-rungon suurin loviännitys on esitetty kuvassa 39.



Kuva 39. Pääjännitys Jasak-rungossa, kuormituksena kaarreheilahdus.

Kuvan 39 perusteella suurin lovijännitys on Jasak-rungossa kehtoputken ja tukilevyn välisen hitsin rajaviivalla. Hydra-rungon suurin lovijännitys on esitetty kuvassa 40.



Kuva 40. Pääjännitys Hydra-rungon tutkittavassa lovessa.

Kuvan 40 mukaan Hydra-rungossa suurin lovijännitys on "sulakkeen" ja emäputken välisen hitsin rajaviivalla. Yhteistä eri mallin lovijännityksille oli suurimman jännityksen keskittyminen emäputken alaosaan ja kehtoputkiin. Kaikissa tapauksissa suurin lovijännitys havaittiin hitsin rajaviivan puolella.

7.3.3 Kuormitusblokki väsymistarkastelussa

Koska mittaustietoa moottoripyörään kohdistuvista kuormituksista ei ollut saatavilla, arvioitiin yhden kuormitusblokin olevan taulukon 7 mukainen. Kuormitusblokin arvioitiin kuvaavan 25 km ajosuoritetta, jossa jarrutus-, kiihdytys- ja kaarretilantei-

ta esiintyy taulukossa kuvatulla tavalla. Herkkyysanalyysia varten muunneltiin kaarreajon kuormituskertoja, koska muun muassa tien pinnan epätasaisuuksista johtuvia, kaarreajoheilahdusta vastaavia tai pienempiä kuormitusheilahduksia ei laskettu.

Taulukko 7. Oletetut kuormitusheilahdukset 25 km ajon aikana.

kuormitusblokki	kuormitusheilahdusten määrä		
	jarrutus	kiihdytys	kaarre
n_i	1	1	48
n_{i2}	1	1	498

Taulukon 7 jarrutus-, kiihdytys- ja kaarreajoheilahdukset laskettiin kappaleessa 5.4 esitetyllä tavalla. Rungoille lasketut kuormitusheilahdukset on esitetty liitteessä 3.

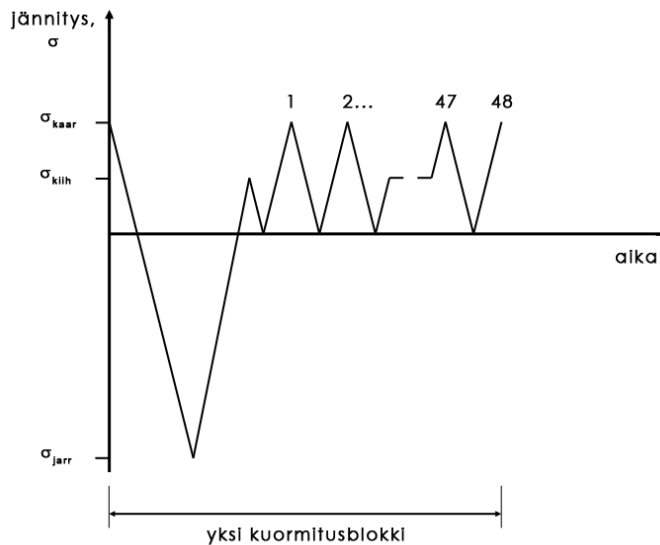
7.3.4 Jännityshistoria ja väsymisikä

Kolmelle rungolle eri kuormitusheilahduksista havaitut teholliset lovijännitykset on esitetty taulukossa 8. Taulukon 8 lovijännitykset ovat pääjännityksiä.

Taulukko 8. Kuormitustilanteiden lovijännitykset.

runko	lovijännitys [MPa]		
	jarrutus	kiihdytys	kaarre
Telik	-285,7	21,5	51,9
Jasak	704,8	70,3	-89,9
Hydra	-475,9	-74,7	30,0

Sijoittamalla Telik-rungon lovijännitykset eri tilanteista jännityshistoriaksi, piirrettiin kuvan 41 mukainen jännityshistoria. Vastaavasti saatiin muiden runkojen jännityshistoriat, joissa esiintyvät eri kuormitusheilahdukset Kuormitusblokki oletettiin niin lyhyeksi, että sen sisältämien jännitysheilahdusten järjestyksellä ei ollut merkitystä.



Kuva 41. Yhden kuormitusblokin jännityshistoria Telik-rungolle.

Kuvasta 41 saatiin jännitysheilahdukset "vesisäiliöanalogialla" rungolle 1 (kts. esim. Niemi 2003, 93). Kuormitusblokista saadut jännitysheilahdukset on rungoille esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Kuormitusblokin jännitysheilahdukset.

runko	Jännitysheilahdus [MPa]		
	$\Delta\sigma_1$	$\Delta\sigma_2$	$\Delta\sigma_3$
Telik	337,6	51,9	21,5
Jasak	794,7	89,9	70,3
Hydra	505,9	74,7	30,0

Sijoittamalla jännitysheilahdukset ja niiden määrät kaavaan 4, laskettiin ekvivalentti jännitysheilahdus $\Delta\sigma_{ekv}$. Mitoituskestoikä N_{Rd} laskettiin osavarmuuskertoimet huomioon ottaen kaavalla 2. Lasketut ekvivalentit jännitysheilahdukset ja kestoikä on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 10. Ekvivalentit jännitysheilahdukset ja mitoituskestoikä.

runko	ekvivalentti jännitysheil.	mitoituskestoikä
	$\Delta\sigma_{ekv}$ [MPa]	N_{Rd} [km]
Telik	121,8	1 517 488
Jasak	278,0	127 696
Hydra	173,8	522 806

Taulukon 10 mukaan runkojen mitoitustkestävyyksissä on suuria eroja. Alkuperäistä runkoa esittävä Hydra ei ollut kestoältään paras.

Herkkyysanalyysin tulokset kaarreajoheilahdusten määrän suhteen on esitetty taulukossa 11, kun 25 km ajosuoritteessa on kaarreajoheilahduksia 498 kappaletta.

Taulukko 11. Herkkyysanalyysi kaarreajoheilahdusten määrän suhteen.

runko	ekvivalentti jännitysheil.	mitoituskestoikä	kestoian muutos
	$\Delta\sigma_{ekv}$ [MPa]	N_{Rd} [km]	alkuperäisestä [%]
Telik	162,8	634 437	-58,2
Jasak	325,7	79 377	-37,8
Hydra	179,0	478 492	-8,5

Taulukosta 11 nähdään kaarreajoheilahdusten määrän vaikuttavan merkittävästi väsymisikään chopper-pyörien rungoissa. Referenssinä toimivaan Hydra-rungon kestoikään kaarreajoheilahduksilla ei ollut yhtä suurta vaikutusta.

7.3.5 Väsymislaskennan tulokset

Muunneltu runko voi olla alkuperäisrunkoa kestävämpi tai heikompi. Telik-runko todettiin kestävämmäksi ja Jasak-runko heikommaksi kuin alkuperäismallinen Hydra. Emäputken alueelta suurin lovijännitys todettiin kaikissa tapauksissa keh-toputkiin liittyväksi.

Kriittisten hitsausliitosten väsymistarkastelu emäputken alueen osalta osoitti niiden laskennallisissa väsymiskestävyyksissä olevan eroja, kun tarkastelumenetelmänä oli tehollinen lovijännitys. Muuntelemalla kuormitusblokin sisältöä muuttuivat runkojen kestoiät eri tavalla. Runkojen suhteellinen järjestys ei kuitenkaan muuttunut. Lasketut väsymiskestävyydet perustuivat kuvitteelliseen kuormitusblokkiin, joten tulokset soveltuvat vain vertailuun toisiaan vastaan. Arvioita runkojen absoluuttisista kestävyysistä ei mitatun kuormitushistorian puutteessa tule esittää.

8 Kriteerit muutoksastuksessa

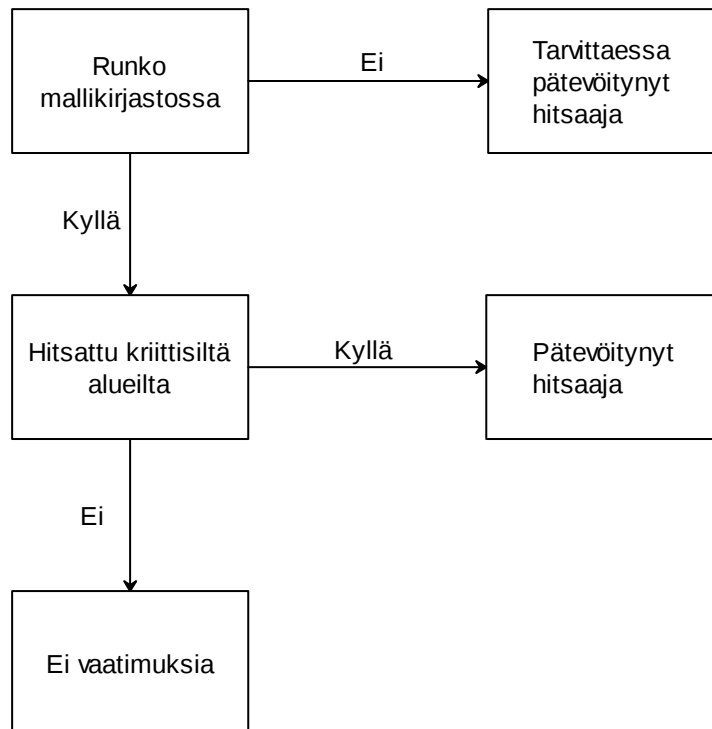
Liitosmenetelmien ongelmien ja lujuustarkastelun perusteella luotiin ehdotus moottoripyörän rungon muuntelun muutoksastuksen kriteereiksi. Ehdotus perustuu mallikirjastoon ja hitsauksen laadunhallintaan kriittisillä alueilla. Työn tuloksia verrattiin nykyiseen ja työryhmän ehdottamaan asetukseen.

8.1 Ehdotukset muutoksastukseen

8.1.1 Mallikirjasto

Lujuustarkastelun perusteella luotiin mallikirjasto, jonka sisältämien runkojen lujuusominaisuuksia ei tarvitse muutoksastuksessa osoittaa. Mallikirjasto koostuu tyypillisistä muunnelluista moottoripyörien rungoista. Mallikirjaston rungot piirrettiin nimellismitoiltaan tarkasteltujen runkojen mukaisiksi ja vähimmäisvaatimukset määriteltiin kriittisiksi arvioituihin kohtiin. Mallikirjasto on esitetty liitteessä 5 ja se koostuu kolmesta rungosta.

Muutoksastuksessa mallikirjastoon kuuluvan rungon osalta varmistetaan vaadittujen mittojen täyttyminen. Mikäli runkoa on hitsattu kriittisiltä alueilta, vaaditaan hitsaajan pätevyydestä selvitys. Selvityksestä tulee käydä ilmi hitsaajan pätevyys rungon perusaineelle ja käytetylle hitsausprosessille. Muiden mallikirjaston runkoalueiden hitsauksen laatua ei valvota. Kuvassa 42 on havainnollistettu runkomuutosten tarkastusprosessi mallikirjaston ja muuntelun menetelmille esitettyjen laatuvaatimusten osalta. Kuvan mukainen ehdotus runkomuutosten tarkastukseen yksinkertaistaa vain mallikirjastossa olevien runkojen muutoksastuksen.



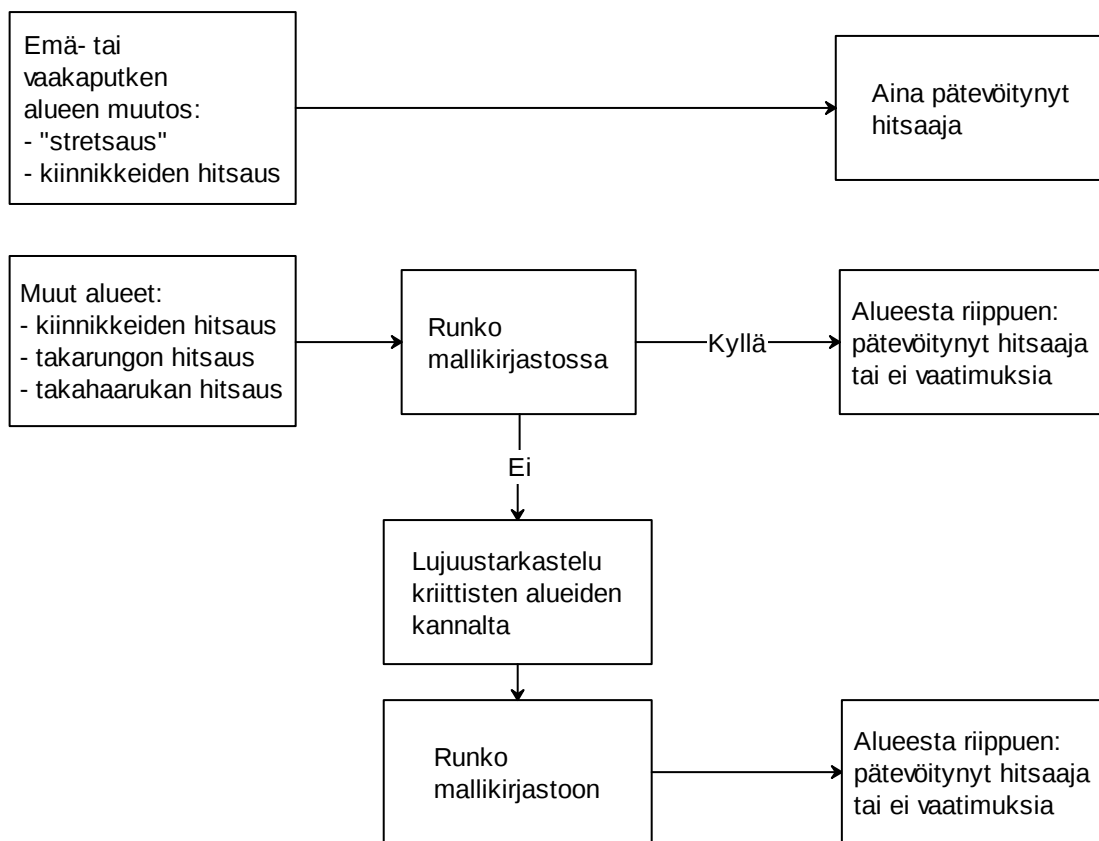
Kuva 42. Runkomuutosten kriteerit.

8.1.2 Mallikirjaston ulkopuoliset rungot

Emä- ja vaakaputken todettiin kaikissa tutkituissa rungoissa olevan kriittisiä, joten niiden hitseiltä voidaan aina vaatia todennettua laatua. Runkorakenteesta riippuen voivat muutkin alueet olla kriittisiä, minkä toteamiseen voidaan käyttää luvussa 6 kuvattua menetelmää. Näin arvioitu runko voidaan liittää mallikirjastoon.

8.1.3 Ehdotus muuntelun kannalta

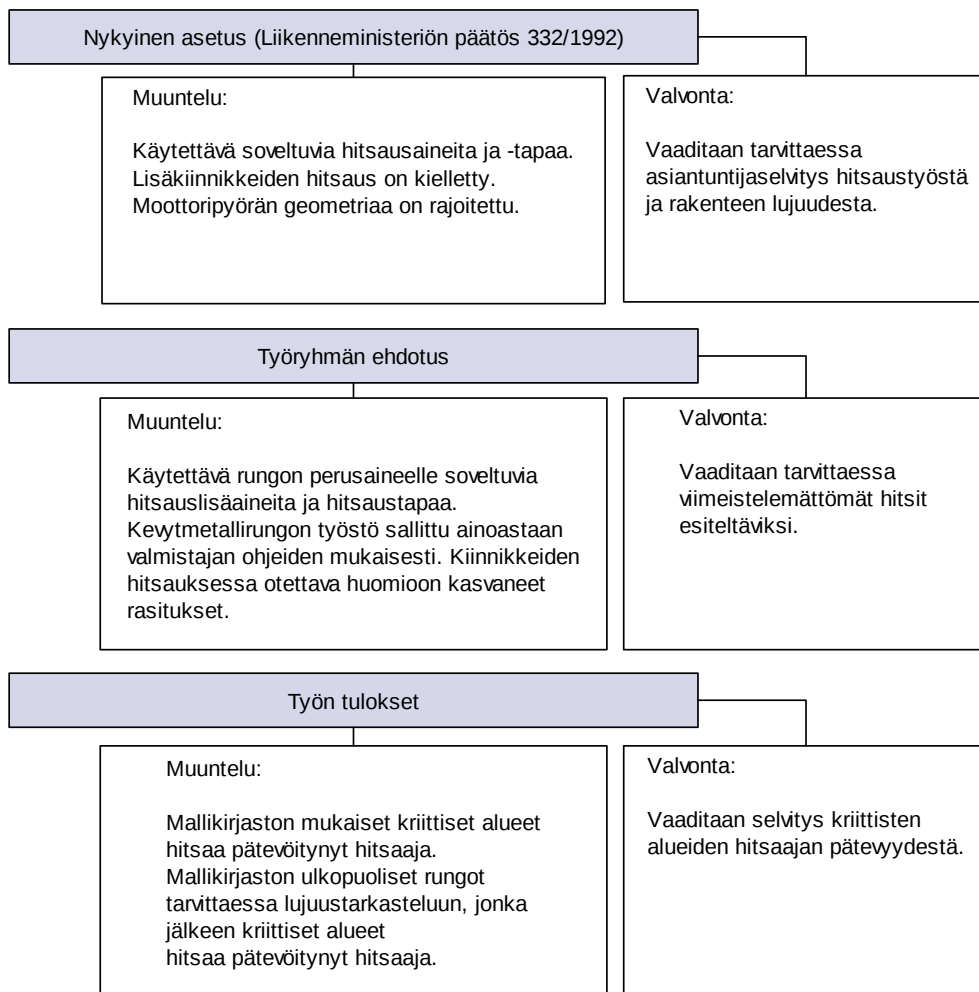
Ehdotetut kriteerit on esitetty kuvassa 43 tyypillisten muutoskohteiden perusteella. Moottoripyörän rungon emäputken sijainnin muuttaminen vaatii aina pätevöityneen hitsaajan. Muiden alueiden vaatimukset riippuvat mallikirjaston vaatimuksista tai tapauskohtaisesti arvioidusta kriittisyydestä.



Kuva 43. Muuntelun vaatimukset muutosten kannalta.

8.2 Vaatimusten vertailu

Rungon muuntelua koskevaa nykyistä asetusta, työryhmän asetusehdotusta ja tämän työn tuloksia vertailtiin muuntelun suorituksen ja valvonnan kannalta, tutkimuksessa ilmi tulleiden seikkojen valossa. Vaatimuksissa muuntelun suorituksen ja valvonnan osalta todettiin eroavaisuuksia ja ongelmia. Muutosten suorituksen kannalta oleelliset vaatimukset eri asetuksista on esitetty kuvassa 44.



Kuva 44. Eri asetusten vertailu muuntelun ja valvonnan osalta.

Nykyinen asetus on epäselvä ja rajoittava. Valvonnan osalta nykyinen asetus mahdollistaa asiantuntijaselvityksen vaatimisen. Muunnellun rungon lujuudesta toimitettava selvitys esimerkiksi tässä työssä esitetyin menetelmin on työläs prosessi. Vaadittuja selvityksiä ei ole määritelty yksiselitteisesti.

Työryhmän ehdotus vaatii kevytmetallirunkojen työstössä valmistajan ohjeiden noudattamista. Kevytmetallien ohella myös joillekin runkoteräksille on erityisvaatimuksia, mitä ehdotus ei ota huomioon. Valmistajat eivät myöskään ohjeista run-

kojen työstöä, joten ehdotus käytännössä kieltää kevytmetallirunkojen muuntelun. Lakiehdotuksessa mainitaan mahdollisuus vaatia viimeistelemättömät hitsit esiteltäviksi. Hitsien tarkastuksen tekijää tai menetelmää ei määritellä. Hitsien tarkastajan tulisi olla ammattitaitoinen, mutta katsastuksia suorittavalle henkilölle ei ole NDT-tarkastuksen pätevöitymisvaatimuksia.

Tämän työn lujuustarkastelun perusteella mallikirjastossa määritetyille kriittisille alueille vaaditaan pätevöitynyt hitsaaja. Mallikirjaston ulkopuolisille rungoille voidaan suorittaa lujuustarkastelu, jonka perusteella löydetään kriittiset alueet. Mallikirjaston ulkopuolisille rungoille ei löydetty suoraa ratkaisua, mikä tekee tästä ehdotuksesta toteutukseltaan hankalan.

9 Pohdinta ja johtopäätökset

9.1 Käytettyjen mallien epätarkkuudet

Runkojen vauriosietoisuutta arvioitaessa todettiin jännitystasojen olevan yleisesti korkealla. Suoraa syytä tähän ei löydetty, mutta yksi mahdollinen tekijä oli kuormituksen asettaminen pistekuormana. Moottoripyörän massa on moottorin ja kuljettajan ohella jakautunut useaan komponenttiin, esimerkiksi etu- ja takapyöriin sekä etu- ja takahaarukkaan. Näiden osakokonaisuuksien ominaisuuksia mittaamalla ja mallintamalla saataisiin käytetystä mallista todenmukaisempi. Kuitenkaan emä- ja vaakaputken vauriosietoisuuteen ei mallin tarkennuksilla olisi merkitystä, sillä kyseisissä vauriotapauksissa rungon kestävyys ylittyi moninkertaisesti.

Väsymistarkastelussa käytetty kuormitusblokin todenmukaisuus on kyseenalainen. Mallinnuksessa hitsausliitosten paikallisgeometria oletettiin virheettömäksi reunahaavaa lukuun ottamatta. Mahdollisesti vähemmän oleellisia virheitä mallintamalla olisi suurimman lovi-jännityksen sijainti ja suuruus muuttunut.

9.2 Johtopäätökset

Runkojen muuntelu eli hitsaus aiheuttaa muutoksia runkojen väsymiskestävyydessä. Hitsausliitosten kestävyysongelmia voidaan poistaa ja lievittää, mutta harastelijoiden on vaikea osoittaa työn riittävä laatu. Ilman todennettua laatua ei liitosten kestävyyttä voida määrittää. Rungon kestävyuden kannalta kriittisiltä hitsausliitoksilta on vaadittava ennakoitavaa kestävyyttä eli todennettua laatua.

Rajoitetun vahingon periaate soveltuu tutkittuihin chopper-moottoripyörien runkoihin. Suurin osa runkoputkista on vauriosietoisia eikä niiden liitosten laatua ole tarpeen valvoa. Periaatteen avulla löydettiin runkojen kriittiset alueet eri kuormituslanteissa. Kriittiset liitokset liittyivät rungon emä- ja vaakaputkeen sekä yhdessä rungossa myös kehtoputkiin.

Väsymistarkastelussa käytetty tehollinen lovi-jännitys antoi rungoille vaihtelevia tuloksia. Lasketut väsymiskestävyydet eivät sovellu runkojen todellisen kestoajan arvioimiseen. Vertailuun ja erilaisten rakenneratkaisujen valintaan tulokset kuitenkin antavat pohjan. Jos lähtökohtana pidetään vertailua alkuperäisrakenteeseen, on Telik-rungon konstruktio hyvä. Jasak-runko sisälsi enemmän kriittisiä alueita ja sen väsymisikä arvioitiin merkittävästi referenssirunkoa Hydra alhaisemmaksi. Jasak-runkoa vastaavaa muuntelua ei siis ole kestävyuden kannalta perusteltua toteuttaa. Toisaalta tulosten perusteella ei voida todeta Jasak-rungon olevan liian heikko. Moottoripyörän akselivälin ja emäputken kulman ei todettu vaikuttavan suoraan rungon väsymiskestävyyteen.

Hitsattujen rakenteiden mitoitusperiaatteita soveltamalla voidaan arvioida moottoripyörän rungon kestävyyttä. Työssä kehitetyillä menetelmillä havaitaan runkojen kriittiset alueet, joihin on kiinnitettävä huomiota muutostarkastuksessa. Lujuustarkasteluiden perusteella ehdotetut kriteerit muunneltujen runkojen hyväksymiselle muutostarkastuksessa on esitetty kuvissa 42, 43 ja liitteessä 5. Valvontaa tuke-

maan luotiin muunneltujen moottoripyörien rungoista mallikirjasto (liitteessä 5). Mallikirjaston päivittämiseen tarvittavat menetelmät on esitetty luvussa 6.

9.3 Kehitysehdotukset

Rajoitetun vaurion periaate voisi sopia paremmin monimutkaisempiin runkorakenteisiin, joissa voimat jakautuvat usean runkoputken tai -palkin välillä. Optimoituihin rakenteisiin, kuten katupyöriin, vauriosietoisuus ei välttämättä sovi, sillä niiden rungoista halutaan mahdollisimman kevyitä.

Väsymistarkastelua varten pitäisi kuormitushistoriaa kerätä kattavasti, jotta tarkastelusta saataisiin absoluuttisia tuloksia. Mikäli moottoripyörille kehitetään standardinomainen kuormitushistoria, helpottuu tämä oleellisesti. Tehollista loviännitystä käyttäen saadut tulokset tulisi varmentaa kokeellisesti tai toisella väsymistarkastelun menetelmällä.

Mallikirjaston käyttökelpoisuuden edistämiseksi sitä tulisi laajentaa tarpeen mukaan. Mallikirjasto itsessään on kuitenkin ongelmallinen, sillä se vaatii eri runkojen analysoimista kriittisten alueiden löytämiseksi. Koska erilaisia runkoja ja niiden muunnelmia on suuri määrä, on työn määrä vastaavasti suuri.

10 Lähdeluettelo

97/24/EY. 1997. Neuvoston ja Euroopan parlamentin direktiivi kaksi- ja kolmipyöräisten moottoriajoneuvojen tietyistä osista ja ominaisuuksista.

Airila, M. ym. 1995. Koneenosien suunnittelu. Porvoo, WSOY. 796 s. ISBN 951-0201723.

Ajoneuvolaki 1091/2002, 2002.

Anttila, T. 2009. Yrittäjä, Tomi's Custom Garage. Keskustelu 17.7.2009.

Armentani ym. 2007. Numerical evaluation and experimental tests for a road bike swingarm. XXI International Automotive Conference "Science and Motor Vehicles". s. 1-13.

Beretta, S & Sala, G. 2005. A model for fatigue strength of welded lap joints. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. Vol 28. s. 257-264. ISSN 1460-2695.

Björk, T. & Nykänen, T. & Marquis, G. 2007. Hitsin laatu, tutkimusraportti. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, teknillinen tiedekunta, konetekniikan osasto. 56 s. ISBN 978-9522144423.

Chawla, A. ym. 2003. FE Simulations of Motorcycle - Car Frontal Crashes, Validation and Observations. New Delhi, Indian Institute of Technology. 10 s. [viitattu 15.4.2009]
Saatavissa: <<http://web.iitd.ac.in/~tripp/publications/paper/biomech/18ESV-FEsimul.pdf>>

Cossalter, V. 2006. Motorcycle dynamics. Lulu.com. 376 s. ISBN 978-1430308614.

Coombs, M. 2002. Moottoripyörän tekniikka. Alfamer, Helsinki. 238 s. ISBN 952-5089746.

Di Piazza, S. 2003. Ducati Chassis Design; Simulations and Experimental Testing. Ducati Motor Holding S.p.A. Bologna. 10 s. [viitattu 15.4.2009] Saatavissa <http://www.fh-zwickau.de/ftz/Konferenzen/muenchen_2003/htm/Papers/13_DiPiazza.pdf>

Elmdon Metals. 2009. BS4T45-BS4T100 Data Sheet. [viitattu 25.8.2009] Saatavissa <http://www.elmdonmetals.co.uk/Products_BS4T45_Data.htm>

Foale, T. 2006. Motorcycle Handling and Chassis Design: The Art and Science. 540 s. ISBN 978-8493328610.

Hawks, C. 2003. Sport Motorcycle Comparison Chart. [viitattu 25.8.2009] Saatavissa: <http://www.chuckhawks.com/sport_motorcycle_chart.htm>

Hitsattujen teräsrakenteiden lämmöllä oikaisu. 1986. Helsinki, Metalliteollisuuden kustannus. 28 s. ISBN 951-8172951.

Hitsauksen materiaalioppi, 2004. Helsinki, Suomen hitsausteknillinen yhdistys. 295 s. ISBN 951-9821228.

Hitsausvirhetaulu. Helsinki, Esab. [viitattu 16.4.2009] Saatavissa: <<http://www.esab.fi/fi/support/upload/Hitsausvirhetaulu.pdf>>

Hobbacher, A. 1996. Fatigue design of welded joints and components: recommendations of IIW Joint Working Group XIII-XV. Cambridge, Abington. 127 s. ISBN 1-855733153.

Hobbacher, A. 2009. The new IIW recommendations for fatigue assessment of welded joints and components - A comprehensive code recently updated. International Journal of Fatigue. Vol 31. s. 50-58. ISSN 0142-1123.

Homuth, J. 1993. Alles im Lot durch Rahmenrichten. Der Praktiker. Nro 9. s. 528-534. ISSN 0554-9965.

Kaker, H. & Glavar, U. 2005. Metal Ravne Steel Selector [verkkodokumentti]. Metal Ravne. [viitattu 27.4.2009] Saatavissa: <<http://www.metalravne.com/selector/download/download.html>>

KEY to METALS Steel Database [verkkotietokanta]. 2009. Key To Metals. [viitattu 27.4.2009] Saatavissa: <<http://steel.keytometals.com/>>

Korjaushitsauskäsikirja. Helsinki, Esab.

Liikenneministeriön päätös moottoripyörän ja mopon rakenteen muuttamisesta 332/1992, 1992.

Lukkari, J. 2001. Alumiinit ja niiden hitsaus. Helsinki, Metalliteollisuuden kustannus. 251 s. ISBN 951-8177562.

Luonnos: Liikenne- ja viestintäministeriön asetus L-luokan ajoneuvon korjaamisesta ja rakenteen muuttamisesta. 2009. 13 s.

MAIDS (Motorcycle Accidents In Depth Study). 2004. In-depth investigations of accidents involving powered two wheelers – version 1.3. Brysseli, ACEM (The European Association of Motorcycle Manufacturers). 176 s. [viitattu 15.4.2009] Saatavissa: <http://www.maids-study.eu/pdf/MAIDSreport1.3_EN.pdf>

Malk, M. 2009. Re:Syyt chopper-pyörien rakentamiseen [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaa: Panu Hava. Lähetetty 29.4.2009. Päätoimittaja, Kopteri-lehti.

Mathers, G. 2002. The welding of aluminium and its alloys. Boca Raton, CRC Press. 236 s. ISBN 0-849315514.

Mattsson, M. & Summala, H. 2008. Moottoripyöräilyn turvallisuus. Helsinki, Ajoneuvohallintakeskus. 131 s. ISBN 978-9525324570.

Motorcycle Airbag System. 2005. Honda Develops World's First Production Airbag System. 12 s. [viitattu 25.8.2009] Saatavissa: <http://www.accidentreconstruction.com/security/library/HondaAirbag_2005.pdf>

Niemi, E. 2003. Levyrakenteiden suunnittelu. Helsinki, Teknologiainfo Teknova. 136 s. ISBN 951-8178135.

Nieminen, M. 2009. Yrittäjä, Mr.Moore Custom Craft Oy. Lempäälä, keskusteluja 17.4.-5.6.2009.

Outinen, H. 2007. Lujuusopin perusteet. Tampere, Pressus. 464 s. ISBN 978-9529835652.

Pook, L. 2007. Metal Fatigue: What it is, Why it matters. Dordrecht, Kluwer Academic. 280 s. ISBN 1-40205596X.

Radaj, D. 2006. Fatigue assessment of welded joints by local approaches. Cambridge, Woodhead Publishing Limited. 660 s. ISBN 1-855739488.

Radaj, D. 1990. Design and Analysis of fatigue resistant welded structures. Cambridge, Abington Publishing. 378 s. ISBN 1-855730049.

Rautavirta, M. 2009. Muistio: Liikenne- ja viestintäministeriön asetus L-luokan ajoneuvon korjaamisesta ja rakenteen muuttamisesta. Liikenne- ja viestintäministerio. 18 s.

Release 10.0 Documentation for ANSYS. 2005. ANSYS Inc.

Robinson, J. 1994. Motorcycle Tuning: Chassis. Butterworth-Heinemann. 259 s. ISBN 0-75061840X.

Rodriguez ym. 2009. Design of a motorcycle frame using neuroacceleration strategies in MOEAs. Journal of Heuristics. Nro 2. s. 177-196. ISSN 1572-9397.

Rudolph & Weiss & Forster 2003. Modeling of welded joints for design against fatigue. Engineering with Computers. Vol 19. s. 142-151. ISSN 1435-5663.

Schwartz, M. 2003. Brazing. ASM International. 421 s. ISBN 978-0871707840.

Smoothing the Road for Victory, 2009. MTS Systems Corporation. [viitattu 20.5.2009]
Saatavissa:
<http://www.mts.com/stellent/groups/public/documents/library/dev_004293.pdf>

Stewart, B. 2007. Power Cruiser Motorcycles: PM Road Test. Popular Mechanics. Vol 5. 8 s. [viitattu 13.8.2009] Saatavissa:
<http://www.popularmechanics.com/automotive/new_cars/4216203.html>

Swaim, W. 2001. FAQs on Welding 4130. MetalForming. Nro 1. s. 50-52. [viitattu 1.4.2009] Saatavissa: <<http://archive.metalformingmagazine.com/2001/01/Lincoln.pdf>>

[standardit]

SFS-EN 287-1, 2004. Hitsaajan pätevyyskoe. Sulahitsaus. Osa 1: teräkset. Standardi, Suomen standardoimisliitto SFS ry. 68 s.

SFS-EN 1990, 2002. Eurocode. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Standardi, Suomen standardoimisliitto SFS ry. 138 s.

SFS-EN 1993, 2005. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Standardi, Suomen standardoimisliitto SFS ry. 99 s.

SFS-EN 12799, 2001. Kovajuotto. Kovajuottojen rikkomaton aineenkoetus. Standardi, Suomen standardoimisliitto SFS ry. 38 s.

SFS-EN 13133, 2001. Kovajuotto. Juottajien pätevyyskokeet. Standardi, Suomen standardoimisliitto SFS ry. 30 s.

SFS-EN ISO 5817, 2006. Teräksen, nikkelin, titaanin ja niiden seosten sulahitsaus. Standardi, Suomen standardoimisliitto SFS ry. 63 s.

SFS-EN ISO 9606-2, 2005. Hitsaajan pätevyyskoe. Sulahitsaus. Osa 2: alumiinit ja alumiiniseokset. Standardi, Suomen standardoimisliitto SFS ry. 69 s.

SFS-EN ISO 10042, 2006. Hitsaus. Alumiinin ja alumiiniseosten kaarihitsaus. Standardi, Suomen standardoimisliitto SFS ry. 47 s.

SFS-EN ISO 18279, 2004. Kovajuotto. Juotosvirheet. Standardi, Suomen standardoimisliitto SFS ry. 29 s.

[korjausoppaat]

Common Service Manual. Honda Motor Corporation. 1988.

FZS1000N © Service Manual. Yamaha Motor Corporation. 2001.

Ninja ZX-6R Motorcycle Service Manual. Kawasaki.

Repair Manual F 650 CS. München, BMW Motorrad. 2001.

Repair Manual K 1100 LT/RS. München, BMW Motorrad. 1999.

Workshop Manual. Ducati Meccanica S.p.A. Bologna.



Figure 2.1: Conventional street style PTW



Figure 2.2: Sport style PTW



Figure 2.3: Cruiser style PTW



Figure 2.4: Chopper style PTW



Figure 2.5: Touring style PTW



Figure 2.6: Scooter style PTW



Figure 2.7: Step-through style PTW

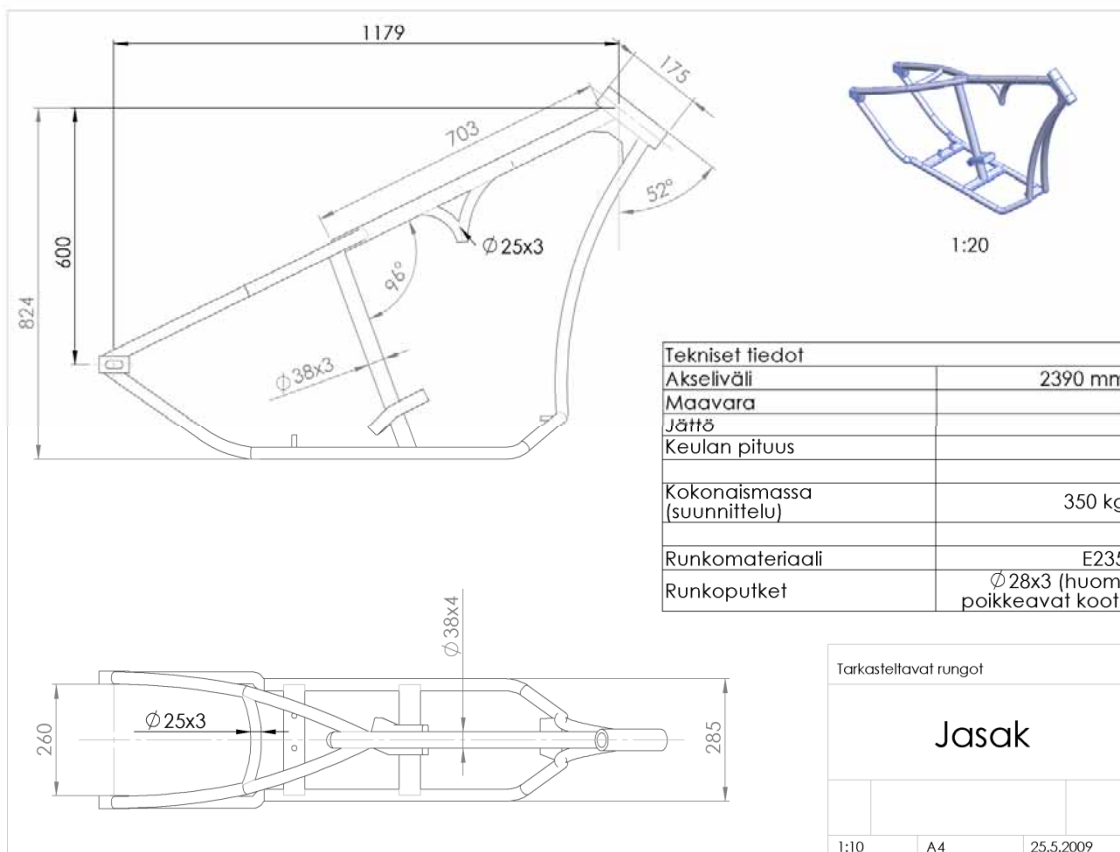
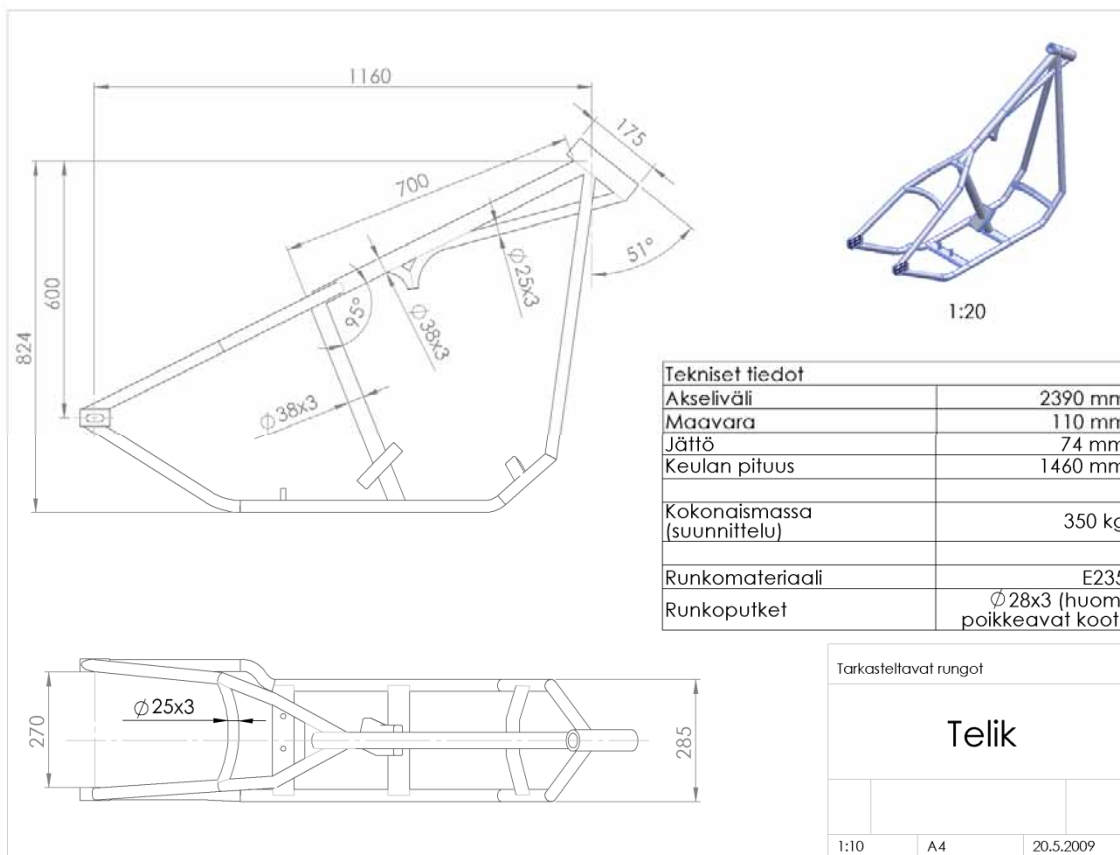


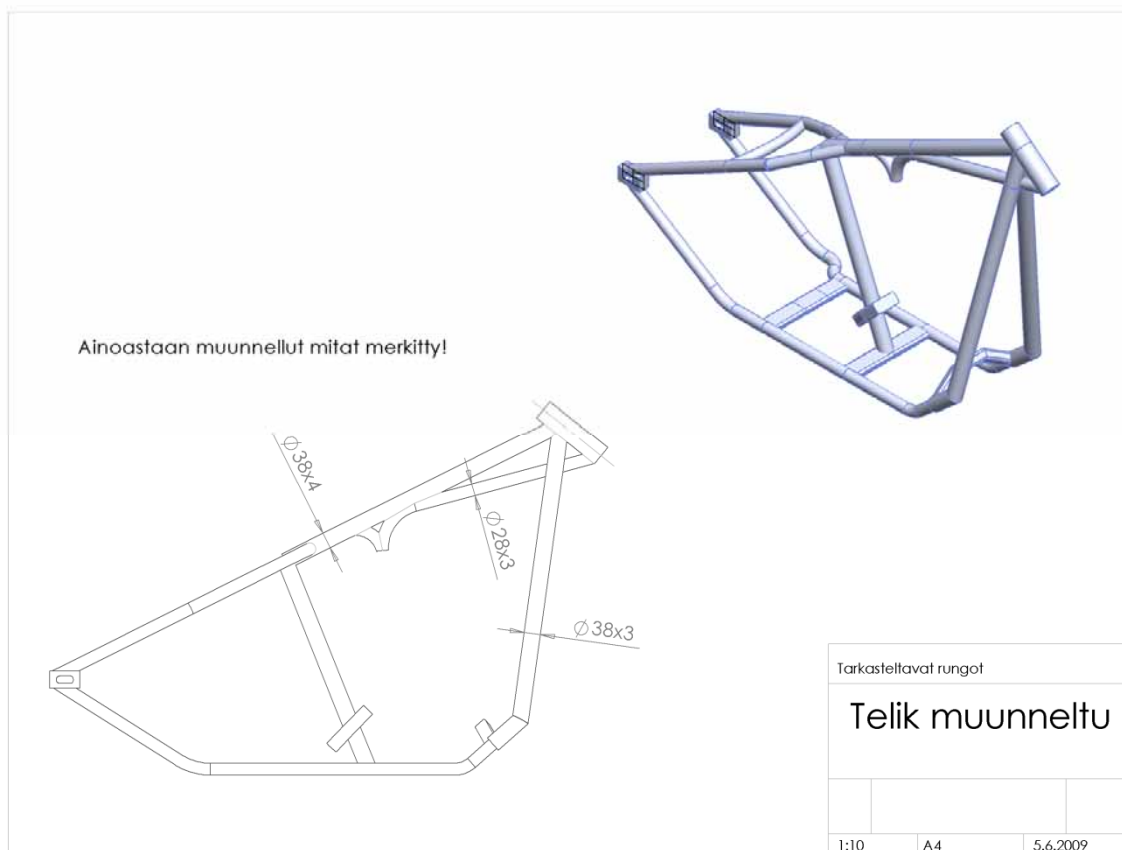
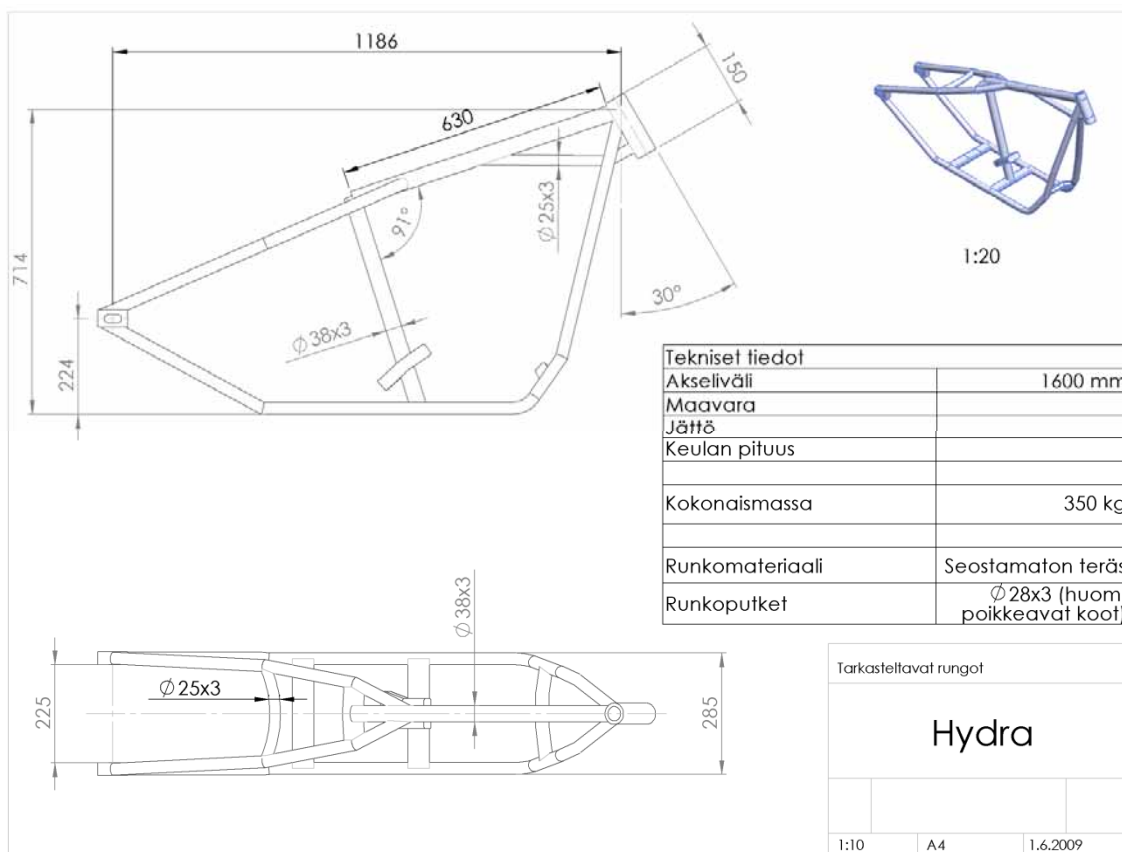
Figure 2.8: Sport Touring style PTW



Figure 2.9: Enduro style PTW

MALLINNETUT RUNGOT





RUNKOON KOHDISTUVAT VOIMAT

Moottoripyörän ja ympäristön parametrit		Telik	Jasak	Hydra	
Yhteinen massa	m	350,00	350,00	350,00	kg
Putoamiskiihtyvyys	g	9,81	9,81	9,81	m/s ²
Akseliväli	p	2,39	2,30	1,60	m
Painojakauman suhde etupyörälle	N_{zf}/mg	0,35	0,35	0,43	%
Etupyörän staattinen tukivoima	N_{zf}	1 201,73	1 201,73	1 476,41	N
Takapyörän staattinen tukivoima	N_{zf}	2 231,78	2 231,78	1 957,10	N
Mkp takapyörästä	b	0,84	0,81	0,69	m
Mkp korkeus	h	0,50	0,50	0,50	m
Renkaan ja tien välinen kitkakerroin	μ	0,90	0,90	0,90	
Moottoripyörän paino	G	3 433,50	3 433,50	3 433,50	N
Eturenkaan halkaisija	D_f	0,69	0,69	0,69	m
Takarenkaan halkaisija	D_r	0,66	0,66	0,66	m

Jarrutustilanne

Suurin mahdollinen hidastuvuus	$\dot{x}_{MAX}$	8,83	8,83	8,83	m/s ²
Yhteinen jarrutusvoima	F	3 090,15	3 090,15	3 090,15	N

Optimaalinen jarrutus

Jarrutusvoima etupyörälle	F_f	1 663,38	1 686,15	2 197,87	N
Jarrutusvoima takapyörälle	F_r	1 426,77	1 404,00	892,28	N
Etupyörän dynaaminen tukivoima	N_f	1 848,20	1 873,50	2 442,08	N
Takapyörän dynaaminen tukivoima	N_r	1 585,30	1 560,00	991,42	N
Etuakselin jarrutusmomentti	J_f	576,36	584,25	761,56	Nm
Taka-akselin jarrutusmomentti	J_r	470,12	462,62	294,01	Nm

Jarrutus pyörän alkaessa kaatua

Vaadittava hidastuvuus	$\dot{x}_{MAX}$	30,48	29,33	17,89	m/s ²
------------------------	-----------------	-------	-------	-------	------------------

RUNKOON KOHDISTUVAT VOIMAT

Kiihdytystilanne

Kiihdytys kitkan rajoittamana

Suurin mahdollinen kiihtyvyys	$x_{\max}$	7,07	7,13	7,00	m/s ²
Ajava voima	F	2 474,51	2 497,18	2 450,62	N
Etupyörän dynaaminen tukivoima	N_f	684,05	658,86	710,59	N
Takapyörän dynaaminen tukivoima	N_r	2 749,45	2 774,64	2 722,91	N

Kiihdytys pyörän alkaessa keulia

Vaadittava kiihtyvyys	$x_{\max}$	16,41	15,79	13,50	m/s ²
-----------------------	------------	-------	-------	-------	------------------

Kaarreaajo

Kaarteen säde	R_c	40,00	40,00	40,00	m
Kaarteen kehänopeus	V	15,00	15,00	15,00	m/s
Etupyörän pystysuuntainen tukivoima	N_f	1 201,73	1 201,73	1 476,41	N
Takapyörän pystysuuntainen tukivoima	N_r	2 231,78	2 231,78	1 957,10	N
Etupyörän sivusuuntainen tukivoima	F_{yf}	689,06	689,06	846,56	N
Takapyörän sivusuuntainen tukivoima	F_{yr}	1 279,69	1 279,69	1 122,19	N
Keskeisvoima	F_k	1 968,75	1 968,75	1 968,75	N
Keskeisvoima + paino mp:n pystyaks.	F	3 957,89	3 957,89	3 957,89	N
Etupyörän tukivoima mp:n pystyaks.	F_f	1 385,26	1 385,26	1 701,89	N
Takapyörän tukivoima mp:n pystyaks.	F_r	2 572,63	2 572,63	2 256,00	N

Jarrutusheilahdus

Etupyörän pystys. kuormitusheilahdus	ΔF_f	646,47	671,77	965,67	N
Takapyörän pystys. kuormitusheilahdus	ΔF_r	-646,47	-671,77	-965,67	N

Kiihdytysheilahdus

Etupyörän pystys. kuormitusheilahdus	ΔF_f	-517,68	-542,86	-765,82	N
Takapyörän pystys. kuormitusheilahdus	ΔF_r	517,68	542,86	765,82	N

Kaarreheilahdus

Etupyörän pystys. kuormitusheilahdus	ΔF_f	183,54	183,54	225,49	N
Takapyörän pystys. kuormitusheilahdus	ΔF_r	340,85	340,85	298,90	N

RUNKOMALLIEN SIIRTYMÄT JA JÄNNITYKSET VAURIOSIETOISUUSTARKASTELUSSA

Telik Vauriotapaus	Jarrutus		Kaarreaio		Kiihdytys	
	siirtymä max	Von Mises	siirtymä	Von Mises	siirtymä max	Von Mises
Ehjä runko	2,3	94,3	4,8	174,8	8,3	190,7
1	2,4	139,3	4,8	458,2	8,4	205,2
2	9,1	712,2	16,5	1 671,3	9,1	795,2
3	69,6	756,6	80,2	895,9	28,6	436,1
4	8,9	173,6	8,4	210,4	8,6	216,3
5	8,9	172,3	8,7	210,5	8,9	217,5
6	9,1	161,3	8,4	214,0	11,9	246,7
7	9,2	164,6	8,1	213,4	11,8	248,7
8	2,6	126,7	7,4	195,6	11,5	241,2
9	2,6	125,6	7,2	200,6	11,5	243,1
10	2,7	130,1	7,5	209,6	11,8	248,7
11	2,0	107,2	13,4	275,9	19,5	314,2
12	2,9	134,3	7,7	205,9	11,7	244,7
13	3,3	149,7	7,1	190,5	10,4	224,2
14	3,7	137,0	7,7	186,8	10,7	220,9
15	3,4	138,0	6,3	181,4	9,6	216,2
16	3,8	136,3	7,1	180,2	10,0	214,8
17	3,8	136,3	7,1	180,2	10,0	214,8
18	3,3	110,7	7,8	182,1	12,4	222,7
19	3,4	138,0	6,3	181,4	9,6	216,2
20	3,2	112,1	6,5	171,7	10,6	207,5
21	3,2	112,9	6,6	170,8	10,6	209,7
22	3,2	111,2	7,9	184,5	12,5	226,6
23	2,8	104,2	5,3	170,3	9,1	186,1
24	5,5	146,0	4,2	189,8	14,1	254,2
25	2,8	101,7	6,0	168,7	9,9	184,7
26	41,2	878,2	45,8	1 083,6	21,1	489,6
27	84,7	794,1	92,2	714,9	40,6	393,0
Jasak	Jarrutus		Kaarreaio		Kiihdytys	
Vauriotapaus	siirtymä max	Von Mises	siirtymä max	Von Mises	siirtymä max	Von Mises
Ehjä runko	2,8	145,8	4,3	221,6	6,8	158,3
1	2,8	145,7	6,9	253,4	7,1	193,5
2	3,0	241,3	4,3	575,4	6,8	330,0
3	65,8	632,8	71,4	756,9	39,0	483,1
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	3,7	300,5	10,4	267,4	10,2	235,8
7	3,6	315,5	10,4	267,1	10,2	236,4
8	2,6	150,1	7,1	224,4	10,0	227,4
9	2,6	155,3	7,2	224,7	10,0	226,8
10	2,9	143,9	7,5	226,4	10,3	235,5
11	2,6	172,8	14,7	232,8	18,0	269,9
12	3,1	153,4	7,5	225,9	10,3	234,4
13	4,6	172,2	7,1	219,0	9,3	198,1
14	4,4	179,4	7,2	219,6	9,3	197,0
15	4,8	173,0	6,4	221,5	8,6	159,1
16	4,5	180,2	6,5	222,1	8,6	158,0
17	4,5	180,2	6,5	222,1	8,6	158,0
18	4,0	166,9	6,8	224,2	9,6	192,5
19	4,8	173,0	6,4	221,5	8,6	159,1
20	4,2	161,0	6,5	224,3	9,4	191,2
21	4,2	161,1	6,6	224,5	9,5	196,5
22	4,0	167,0	6,9	224,5	9,8	197,7
23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
24	7,4	178,4	3,8	220,8	8,9	220,8
25	101,2	889,5	109,0	787,9	69,3	787,9
26	91,8	891,1	97,1	798,5	58,8	798,5
27	91,8	891,1	97,1	798,5	58,8	798,5

RUNKOMALLIEN SIIRTYMÄT JA JÄNNITYKSET VAURIOSIETOISUUSTARKASTELUSSA

Hydra	Jarrutus		Kaarreaajo		Kiihdytys	
Vauriotapaus	siirtymä max	Von Mises	siirtymä max	Von Mises	siirtymä max	Von Mises
Ehjä runko	1,7	99,1	4,7	150,9	10,4	185,3
1	1,7	105,7	4,7	151,2	10,4	185,4
2	3,7	888,4	4,3	774,6	10,4	323,6
3	24,6	270,3	36,5	594,7	9,7	248,4
4	2,3	119,2	5,0	165,3	10,6	190,2
5	2,3	119,2	4,8	167,9	10,6	192,4
6	2,7	115,0	7,1	227,5	14,2	276,7
7	2,6	114,9	7,2	225,5	14,2	276,4
8	1,8	105,1	7,2	222,1	13,4	271,7
9	1,8	104,9	7,2	221,0	13,4	270,1
10	1,9	102,7	7,5	232,0	13,6	277,3
11	1,5	92,4	14,3	222,8	22,3	330,7
12	2,0	102,2	7,5	230,8	13,7	274,8
13	2,5	106,6	6,7	202,3	13,1	248,7
14	2,4	108,5	6,7	201,0	13,0	236,4
15	2,5	99,1	5,8	158,6	12,2	225,6
16	2,5	99,7	5,8	157,1	12,1	212,8
17	2,5	99,7	5,8	157,1	12,1	212,8
18	3,2	100,4	5,9	164,9	12,4	212,2
19	2,5	99,1	5,8	158,6	12,2	225,6
20	3,2	100,5	5,8	166,3	12,3	214,6
21	2,1	101,9	5,9	168,6	12,4	218,7
22	2,1	101,8	6,0	167,4	12,6	216,4
23	1,9	101,0	5,1	160,8	11,0	200,7
24	3,4	164,0	5,9	167,9	17,7	310,9
25	1,9	100,9	5,2	159,5	11,1	198,4
26	15,7	355,1	33,6	396,4	12,5	330,4
27	15,6	355,1	33,6	396,4	12,5	330,6
Telik muunneltu	Jarrutus					
Vauriotapaus	siirtymä	Von Mises				
Ehjä runko	0,3	65,8				
1	0,4	67,4				
2	4,4	546,4				
3	7,8	330,2				
4	0,5	80,7				
5	1,1	96,1				
6	1,2	97,8				
7	1,4	112,4				
8	0,4	69,1				
9	0,3	68,2				
10	0,3	69,8				
11	0,3	69,2				
12	0,4	69,5				
13	0,3	69,0				
14	0,3	69,7				
15	0,3	67,5				
16	0,3	69,0				
17	0,3	69,0				
18	0,3	65,6				
19	0,3	67,5				
20	0,3	65,8				
21	0,4	64,1				
22	0,3	66,1				
23	0,3	67,8				
24	0,3	69,7				
25	0,3	66,1				
26	0,3	66,9				
27	0,4	66,1				

