



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUKKA MÄENNENÄ
HIILIKUIDUN KÄYTTÖ MAASTOPYÖRÄN RUNKOMATERIAALINA
Diplomityö

Tarkastajat: professori Erno Keskinen ja yliopisto-opettaja Jori Montonen
Tarkastajat ja aihe ovat hyväksytyt tiedekunnan kokouksessa 4.2.2015.

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

MÄENNENÄ, JUKKA: Hiilikuidun käyttö maastopyörän runkomateriaalina

Diplomityö, 81 sivua

Helmikuu 2015

Pääaine: Konetekniikka

Tarkastajat: professori Erno Keskinen ja yliopisto-opettaja Jori Montonen

Avainsanat: Konetekniikka, hiilikuitu, komposiitti, hiilikuidun käyttökohteet, hiilikuidun materiaaliominaisuudet, maastopyörä, polkupyörä

Hiilikuidun käyttö on yleistynyt viime vuosina voimakkaasti erilaisissa korkeaa lujuutta, jäykkyyttä ja keveyttä vaativissa rakenteissa. Tekniikaltaan ja volyymiltaan merkittävien hiilikuidun käyttäjiä ovat tällä hetkellä avaruus-, ilmailu ja urheiluvälineteollisuus. Erilaiset sovellukset ja hiilikuidun käytön yleistymistä on tapahtunut kuitenkin myös autoteollisuudessa, jossa autourheilu on arvatenkin ollut näyttämässä tietä.

Maastopyöräteollisuus ole suuruusluokassa maailmanlaajuisesti näiden teollisuuden alojen veroinen, mutta itse alan sisällä hiilikuidun käyttö on ollut vuosi vuodelta yhä suuremmassa roolissa. Hyvin suunniteltu ja valmistettu hiilikuidusta tehty komponentti on kevyt, kestävä ja jäykkä halutussa suunnassa. Se tekee siitä houkuttelevan vaihtoehdon esimerkiksi rungon materiaaliksi.

Työn tarkoituksena on selvittää hiilikuidun ominaisuuksia maastopyörän runkomateriaalin. Tämä sisältää suunnittelun eri osa-alueet sekä valmistuksen. Työ tehtiin tutkimustyönä suomalaiselle Pole Bicycle Company Oy:lle. Tavoitteena oli auttaa oikeiden ratkaisujen löytämisessä tulevien hiilikuiturunkojen suunnittelussa.

Työ jakautuu kolmeen osaan: Tutkimusosiossa selvitetään hiilikuidun käytön historiaa, materiaaliominaisuuksia ja tyypillisiä sovelluskohteita. Katsausosiossa perehdytään alalla jo käytettyihin ratkaisuihin ja sovelluksiin. Viimeisessä suunnitteluosassa paneudutaan Pole Bicycle Company Oy:n uuden runkomallin suunnitteluun ja valmistukseen liittyviin seikkoihin.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

MÄENNENÄ, JUKKA: Carbon fiber as a material in mountain bike frames

Master of Science Thesis, 77 pages, 4 Appendix pages

February 2015

Major: Mechanic Engineering

Examiner: Professor Erno Keskinen and university teacher Jori Montonen

Keywords: Mechanical engineering, carbon fiber, composite, carbon fiber applications, carbon fiber material properties, mountain bike, bicycle.

The use of Carbon fiber has grown in popularity considerably in recent years in applications with great demands in stiffness, lightness and strength. At the moment aviation and aerospace industries are the largest carbon fiber users. Lately different applications have become more common in automotive industry since some of the technology can be easily adapted from competitive motor sports.

Mountain bike industry is quite small compared to other industries just mentioned, but the general trend is that the use of carbon fiber grows steadily every year. A well engineered frame or component can be made light, durable and stiff in the directions wanted. These features makes it a compelling choice as the material of choice when it comes to frame design.

The goal of this thesis is to examine the carbon fiber propertis when it comes to designing and manufacturing mountain bike frames. The thesis was made for is Pole Biycyle Company Oy which is based in Finland.

The thesis is divided in three parts. In the introduction the history, material properties and some of the most common applications of carbon fiber is presented. Following the introduction is the summary which describes the used and proven methods when it comes to carbon fiber mountain bike frame design. In the last part some iterative analysis were done to give guidance for further design and engineering.

ALKUSANAT

Diplomityö on tehty tutkimustyönä Pole Bicycle Company Oy:lle. Tavoitteena on ollut auttaa yritystä hiilikuidusta valmistetun maastopyörän rungon suunnittelussa. Työn osa-alueita ovat materiaalivalinta, rungon suunnittelu, alustava lujuuslaskenta ja valmistusprosessien päättämisessä avustaminen.

Komposiittirakenteet ovat tekniikan osa-alue, jolla on oma erikoiskielensä. Vaikka ala ei ole enää uusi, niin kehitys on silti nopeaa ja joskus jopa ennalta arvaamatonta. Tämän johdosta termistö ja teknisissä tarkasteluissa käytettävät merkinnät eivät ole vielä täysin vakiintuneet. Vierasperäisille termeille on pyritty löytämään mahdollisimman hyvä ja kuvaava suomenkielinen vastine. Jos tässä ei ole onnistuttu, niin alkuperäistä termiä on käytetty sellaisenaan.

Työn ohjaajana toimivat hydrauliiikan ja automatiikan laitokselta professori Erno Keskinen ja yliopisto-opettaja Jori Montonen. Ulkopuolista apua työhön on saatu suomalaisilta yrityksiltä ja yksityishenkilöiltä, joilla on kokemusta kyseessä olevan materiaalin kanssa työskentelemisestä.

SISÄLLYS

Abstract	iii
Termit ja niiden määritelmät	viii
1 Johdanto	1
2 Hiilikuitu materiaalina	2
2.1 Historiaa	2
2.2 Rakenne	3
2.3 Raakamateriaalin valmistus	4
2.4 Valmistajat	4
2.5 Sidosaine	5
2.6 Hiilikuitulaadut	6
2.7 Hiilikuitukudokset	6
2.8 Mekaaniset ominaisuudet	7
2.9 Iskunkestävyys	9
2.9.1 Vertailu muihin yleisesti käytettyihin materiaaleihin	10
3 Hiilikuidun käyttö maastopyörän runkomateriaalina	12
3.1 Vahvuudet	12
3.2 Heikkoudet	13
4 Materiaalivalinta	14
4.1 Mekaanisten ominaisuuksien valintakriteerit	15
4.2 Kerrosrakenteen suunnittelu	15
4.3 Kerrosjärjestys ja suuntaus	15
5 Yleisimmät käyttökohteet	18
5.1 Ilmailuteollisuus	18
5.2 Autoteollisuus	18
5.3 Rakennustekniikka	19
5.4 Urheiluvälineet	20
5.4.1 Mailat ja pelivälineet	20
5.4.2 Polkupyörät	20
6 Rungon ominaisuudet	22
6.1 Rungon muoto ja rakenne	22
6.2 Mitoitus	23
6.3 Jousitus	25
6.3.1 Jousitusratkaisu ja kinematiikka	26
6.4 Laakerointi	27
6.5 Massakeskipiste	28
6.6 Paino	28
6.7 Jäykkyys	29
6.8 Toleranssit ja mitoitus	29
6.9 Materiaalien liitoskohdat	30
6.10 Huoltoväli ja huollettavuus	31

6.11 Käyttöikä.....	31
6.12 Hinta.....	32
7 Rasisus ja lujuusvaatimukset.....	33
7.1 Suurimmalle rasisukselle joutuvat kohdat.....	33
7.2 Turvallisuus.....	34
8 Mitoitus.....	36
9 lujuuslaskenta.....	37
9.1 ESAComp-ohjelmisto.....	37
9.2 Jännitykset ja venymät.....	38
10 Laminaattien FEM-analyysi.....	40
10.1 Mallinnettu laminaatti ja materiaaliominaisuudet.....	40
10.2 Mallit.....	40
10.3 Kuormitukset.....	42
10.4 Tulokset.....	42
11 Hiilikuidun valmistusmenetelmät.....	44
11.1 Sidosaineella kyllästäminen (impregnation).....	44
11.2 Kuitukerrostien asettelu (lay-up).....	44
11.3 Tiivistys (consolidation).....	45
11.4 Kovetus.....	45
11.5 Resin transfer molding (RTM).....	46
11.5.1 Kuiva valmistus.....	46
11.5.2 Prepreg (märkä valmistus).....	46
11.5.3 Hyödyt.....	47
11.5.4 Heikkoudet.....	48
12 Rungon Valmistusmenetelmät.....	49
12.1 Arkin leikkaus.....	49
12.2 Muotti.....	49
12.2.1 Muottisuunnittelun osa-alueet.....	50
12.3 Valmistus rakon avulla.....	52
12.3.1 Vahvuudet.....	53
12.3.2 Heikkoudet.....	53
12.4 Valmistus sisämuottia käyttäen.....	53
12.4.1 Vahvuudet.....	54
12.4.2 Heikkoudet.....	54
12.5 Liimaus.....	54
12.5.1 Liiman tai sidosaineen valitseminen.....	56
12.5.2 Rikkoutuminen.....	56
12.5.3 Vahvuudet.....	57
12.5.4 Heikkoudet.....	57
12.6 Yhdistelmät.....	58
12.7 Muita huomioitavia tekijöitä.....	58
13 Maastopyörän rungon suunnittelu.....	60

13.1	Modulaarisuus	60
14	Prototyypivaihe	62
14.1	3D-tulostus	62
14.2	Failure mode and effects analysis (FMEA)	62
14.3	Koekuormitus osana suunnitteluprosessia	64
14.4	Koekuormituspenkki	64
14.4.1	Vaadittavat ominaisuudet ja komponentit.....	64
14.4.2	Koekuormituspenkki	64
15	Kierrätys ja materiaalin loppusijoitus	66
15.1	Polttaminen	66
15.2	Kierrätys	67
15.3	Terveydelliset haittavaikutukset.....	67
	Lähteet.....	69

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Esiaste	Hiilikuidun valmistamiseen käytetty raaka-aine. Noin 90% markkinoilla olevan hiilikuidun esiasteena on ollut PAN (polyakryylinitriili). Loput 10% valmistetaan tekosilkistä tai öljyn jalostuksessa saatavasta piestä.
FEM-analyysi	FEM on lyhenne sanoista <i>finite element analysis</i> , joka tarkoittaa tietokoneella tehdyn mallin lujuuslaskentaa.
Filamentti	Pienin hiilikuiturakenteen osa, jonka halkaisija on tyypillisesti hiusta pienempi.
Harts	Harts on puiden haavoista saatavaa tai synteettistä, kovaa, ja sitkeää sidosainetta, jota käytetään hiilikuidun valmistuksessa.
Hiilikuitu	Hiilikuitu on hiilisäie tai hiilisäikeistä valmistettu seos, jossa on sidosaineena hartsia.
Jousitus	Maastopyörän joustohaarukka tai runkoon suunniteltu takapyörän jousitus, joka koostuu linkkusysteemistä ja iskunvaimentimesta.
Kertamuovi	Seos, jota ei voida muovata uudelleen tai jonka materiaaleja ei voida erottaa lämmittämällä. Perusraaka-aineena on hartsi, josta kertamuovi syntyy kemiallisessa kovettumisreaktiossa.
Kestomuovi	Seos, joka voidaan muovata uudelleen tai jonka materiaalit voidaan erottaa lämmittämällä. Koostuvat pitkistä polymeeriketjuista, joiden välillä ei ole kemiallisia sidoksia.
Komposiitti	Yleisnimi kahden tai useamman materiaalin yhdistelmille, joissa materiaalit toimivat yhdessä, mutta eivät ole liuenneet tai sulautuneet toisiinsa.
Komposiittirakenne	Komposiitista koostuva tuote tai rakenne, joka on yleensä suunniteltu kestämään merkittäviä kuormia.
Kovettumiskutistuma	Hartsissa kovettumisen aikana tapahtuva ominaisuus, jonka aikana sen tilavuus pienenee.
Lujuus	Jännitys, jonka materiaali kestää, kun siihen kohdistetaan vetoa. esimerkiksi pituussunnassa
Maastopyörä	Maastossa ajettavaksi tarkoitettu erikoisvalmisteinen polkupyörä.
Muovi	Synteesireaktiolla valmistettu suurimolekyylinen polymeeri, joihin on tavallisesti sekoitettu pieniä määriä muita aineita.
Prepreg	Esikyllästetty lujite, joka voi tarkoittaa hiilikuitumattoa, johon on lisättyä hartsia.
Suuntaus	Kuitujen suunta kankaassa ja rakenteessa voi vaihdella ja rakenteen mekaaniset ominaisuudet ovat voimakkaasti siitä

Touvi
Youngin moduli

riippuvaisia. Tyypillisiä suuntauksia ovat 0, 30, 45 ja 90 astetta sovittuun neutraalisuuntaan nähden.

Yksittäisistä hiilikuiduista koostettu kimppu.

Youngin moduli kuvaa materiaalin jäykkyyttä. Mitä enemmän painetta materiaali kestää ilman muodonmuutoksia, sitä jäykempää se on sitä suurempi Youngin modulin arvo on.

1 JOHDANTO

Hiilikuidun käyttö on yleistynyt viime vuosina merkittävästi erityisesti vaativissa käyttökohteissa. Hiilikuitu on ominaisuuksiltaan kevyttä, vahvaa ja haluttaessa myös hyvin jäykkää. Nämä ominaisuudet tekevät siitä hyvän materiaalin polkupyörän runkoihin ja komponentteihin, joissa tavoitellaan hyvää lujuus/paino-suhdetta. Koska maastopyörä liikkuu vain ja ainoastaan kuljettajan oman lihasvoiman ja painovoiman avulla, niin massaltaan kevyestä pyörästä saadaan etenkin kilpatasolla usein huomattavia hyötyjä.

Toinen huomionarvoinen ominaisuus on hiilikuidun jäykkyys. Siitä pystytään tarvittaessa tekemään, etenkin painoonsa nähden, hyvin jäykkiä rakenteita. Kuitujen suuntaa ja kerrosten paksuutta muuttamalla rakenteeseen saadaan luotua hyvällä suunnittelulla halutut jäykkyysominaisuudet

Kolmas ja hyvin merkittävä ominaisuus hiilikuidussa on suunnittelun vapaus, erityisesti geometriaan ja muotoihin liittyen. Hiilikuitu mahdollistaa rakenteiden ja muotojen käyttämisen, mikä ei ole esimerkiksi alumiinia tai terästä käyttäessä mahdollista. Lisäksi hyvin suunniteltu ja valmistettu hiilikuiturakenne voi olla parhaimmillaan erittäin homogeeninen, eli esimerkiksi hitsattujen rakenteiden epäjatkuvuuskohdat puuttuvat. Komponenttien lujuutta ja käyttösyklejä on arvioitu jo pitkään mm. FEM-analyysin avulla. Tulokset ovat kuitenkin vain niin hyviä kuin käytössä oleva malli on. Hyvä mallinnus ja FEM-analyysin suorittaminen hiilikuidusta valmistetuille komponenteille on vaativa ja erityisosaamista vaativa osa-alue.

Viimeisenä haastavana osa-alueena on valmistus. Maastopyörrien rungoissa näkee käytettävän useaa eri tapaa halutun rakenteen luomiseksi. Rungon halutun muodon saavuttamiseen tulee käyttää jonkinlaista muottia. Yksi käytetty muottimateriaali on styreeni. Toinen yleinen vaihtoehto on rakkorakenteen käyttäminen, joka täytetään kuumennuksen aikana paineen aikaansaamiseksi.

Työn tarkoituksena on toimia tutkimustyönä ja auttaa Pole Bicycle Company Oy:ta rakentamaan kansainvälisesti kilpailukykyinen maastopyörärunkomallisto.

2 HIILIKUITU MATERIAALINA

Hiilikuidulla tarkoitetaan yleisesti puhekielessä komposiittia, joka sisältää sidosaineen ja hiilikuitumateriaalien yhdistelmän. Tämä ei ole kuitenkaan tarkkaa termistön käyttöä. Termillä hiilikuitu tarkoitetaan teknisissä sovelluksissa vain ja ainoastaan itse kuitumateriaalia, jonka hiilipitoisuus on korkea, tyypillisesti 95-99 %. Sille on ominaista korkea lujuus ja kimmomoduli sekä suhteellisen alhainen tiheys. Ominaisuuksiensa puolesta se soveltuu erinomaisesti useisiin vaativiin käyttösovelluksiin, joissa vaaditaan suurta lujuutta ja jäykkyyttä samaan aikaan kun esimerkiksi massan suhteen on asetettu tiukkoja reunaehtoja. Hiilikuidun käyttö onkin yleistynyt viimeisen vuosikymmenen aikana voimakkaasti juuri tällaisissa sovelluksissa. Hyviä esimerkkejä näistä teollisuudenaloista on muun muassa sotilas- ja ilmailuala, autoteollisuus, erilaiset urheiluvälineet ja tässäkin työssä aiheena oleva polkupyörateollisuus.

Raakamateriaalin hinnan pienen laskun ja uusien tuotantoprosessien myötä hiilikuidun käyttö materiaalina on yleistynyt voimakkaasti. Hiilikuidun ollessa vielä tuore materiaali sen käyttö rajoittui lähinnä vain avaruus- ja ilmailuteollisuuden sovelluksiin sen korkean hinnan johdosta. Nykyään laadukkaita hiilikuidusta valmistettuja komponentteja löytää hintaluokaltaan keskitason tai hieman sen yläpuolella olevista tuotteista.

On vaikeaa sanoa varmaksi, mikä on vaikuttanut eniten hiilikuidun käytön yleistymiseen. Onko jokin valmistustekniikka painanut valmistuskustannuksia alas vai onko alalla lisääntynyt toimijoiden määrä, osaaminen ja kokemus lisännyt kilpailua? Todennäköisesti kuitenkin nämä kaikki ovat vaikuttaneet asiaan.

2.1 Historiaa

Roger Bacon loi nykyisellään hiilikuituna tunnetun materiaalin vuonna 1958 Union Carbide Parma Technical Center -yrityksessä Yhdysvalloissa. Nämä kuidut valmistettiin kuumentamalla keinosilkkisäikeitä kunnes ne hiiltyivät. Lopputulos ei ollut kuitenkaan vielä haluttu, sillä lopputulos sisälsi vain noin 20 % hiiltä ja sillä oli huonot mekaaniset ominaisuudet. 1960-luvulla valmistusprosessia kehitettiin Dr. Akio Shindon toimesta niin, että lopputuotteessa oli 55 % hiiltä. [1]

Hiilikuidun huomattava potentiaali huomattiin vuonna 1963 Englannissa Hampshiressa Royal Aircraft Establishment -instituutissa. Englannin puolustusministeriö patentoi prosessin, joka lisensoi sen myöhemmin kolmelle englantilaiselle yritykselle: Rolls-Roycellle, Marganitelle ja Courtauldsille. [1]

Uusi läpimurto tapahtui vuonna 1970 kun, öljyn jalostuksessa syntyvää viskoelastista yhdistettä pikeä muistuttavaa yhdisteen rakennetta muokattiin. Tyypillisesti

öljyn jalostuksessa syntyvät yhdisteet ovat isotrooppisia, eli niiden materiaaliominaisuudet ovat suunnasta riippumattomia. Uusi löytö oli, että yhdisteiden molekyylijä pysytään suuntaamaan ennennäkemättömän tarkasti kerrosmaiseen muotoon. Leonard Singer oli ensimmäinen, joka ajatteli, että näistä yhdisteistä pystyttäisiin todennäköisesti luomaan kuituja, joilla olisi hyvin käyttökelpoisia mekaanisia ominaisuuksia. Singer ja hänen assistenttinsa rakensivat laitteen, jonka avulla pikimäisestä viskoelastisesta yhdisteestä pysyttiin valmistamaan hiilikuitua, jonka molekyylit olivat hyvin saman suuntaisia. Lopputuotteen materiaaliominaisuudet olivat siihen aikaan hämmästyttävät. Kimmokerroin oli suuruudeltaan lähes 1 000 GPa ja yhdisteellä oli erittäin korkea lämmönjohtavuus. Vaikka Singerin ensimmäiset koetulokset onnistuivat jo vuonna 1970, prosessi patentoitiin vasta vuonna 1977. Patentti oli huomattavan laaja, se oli pituudeltaan 42 sivua ja sisälsi 47 kuvaa. [2]

2.2 Rakenne

Hiilikuitu koostuu pienistä sylinterin muotoisista säikeistä, jotka toimitetaan jatkuvana kuitukimppuna eli touvina. Ensimmäisten 1970-luvulla valmistettujen hiilikuitujen säikeet olivat halkaisijaltaan 16-22 μm . Nykyiset käytössä olevat hiilikuidut ovat huomattavasti ohuempia säikeiden halkaisijan ollessa yleensä 5-8 μm välillä. Touvin ympärillä on tyypillisesti tuhansia yksittäisiä säikeitä. [1]

Hiilikuidun kemiallinen rakenne muistuttaa grafiittia, joka koostuu säännölliseen kuusikulmaiseen rakenteeseen järjestäytyneistä hiiliatomien kerroksista. Erona on hiiliatomien kerrosten väliset rakenteet ja niiden liittyminen toisiinsa. Esimerkiksi grafiitissa kerrokset ovat toistensa päällä saman suuntaisesti, joka johtaa pehmeään ja hauraaseen materiaaliin.

Hiilikuitu on rakenteensa johdosta ominaisuuksiltaan ortotrooppinen. Tämä tarkoittaa, että materiaaliominaisuudet vaihtelevat kuormitus- tai tarkastelusuunnasta riippuen atomien ja molekyylien välisten sidosten luonteen johdosta. Tämän vuoksi materiaalilla on huomattavasti suurempi lujuus ja jäykkyys suuntaan, joka on samansuuntainen vahvimpien sidosten kanssa. Suuren lujuuden ja jäykkyyden kompromissina on kuitenkin materiaalin mahdollisesti hauras käyttäytyminen. [3]

Hiilikuituja voidaan valmistaa lukuisista eri lähtöaineista eri valmistusmenetelmin. Materiaaliominaisuudet ovat voimakkaasti sidoksissa lähtöaineeseen ja valmistustapaan. Käytetystä esiasteesta riippuen lopputuote voi olla rakenteeltaan kidemäisiä tai grafiitin tapaan säännöllisen kuusikulmaista. Kidemäisissä rakenteissa hiiliatomit ovat yhdistyneet toisiinsa satunnaisessa järjestyksessä. Erilaiset välimuodot, eli niin sanotut hybridirakenteet ovat myös mahdollisia. Polyakrylinitriilitistä (PAN) valmistettua hiilikuitua käytetään lähes yksinomaan kaikki korkean lujuuden ja kimmomodulin omaavat kuidut. Se on rakenteeltaan kristallimaista, kun taas piestä valmistetusta hiilikuidusta saadaan säännöllistä grafiitin omaista kuusikulmaista rakennetta. [1] Kuituominaisuuksien parantaminen on mahdollista kehittämällä entistä puhtaampaa PAN-kuitua, jolla

saadaan positiivisia vaikutuksia niin materiaaliominaisuuksiin, valmistusaikaan kuin myös hävikkiin.

2.3 Raakamateriaalin valmistus

Hiilikuidun esiasteena käytetään polyakryylnitriiliä (PAN) tai pikeä. PAN on kuitenkin yleisemmin käytetty vaihtoehto. Se on usein jäykempää, mutta samalla myös hauraampaa. Valmistusprosessin ensimmäisessä osassa materiaali hapetetaan altistamalla se erittäin korkealle lämpötilalle. Valmistuksen myöhemmässä vaiheessa esiasteesta syntyy hiiltä, jolloin materiaalille syntyy sille tyypilliset ominaisuudet. Tuloksena on erittäin jäykkä ja luja materiaali, jonka tiheys on silti pieni. Tyypillisesti materiaalin massasta katoaa noin puolet tämän prosessien aikana. Usein raakamateriaalia jalostetaan tästä eteenpäin sen käsiteltävyyden ja sidosaineen yhteensopivuuden parantamiseksi.

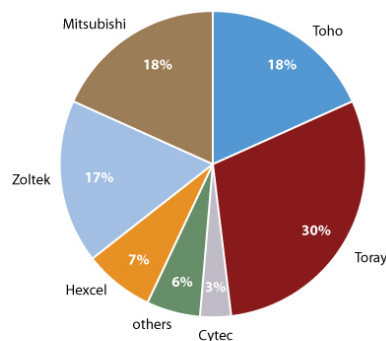
Piestä valmistettua hiilikuitua käytetään vähemmän sen vaikean jalostettavuuden vuoksi. Esiaste itsessään on huomattavasti edullisempaa, mutta kaikki sen jalostukseen tarvittavat prosessit nostavat valmistuskustannuksia huomattavasti.

Hiilikuidun valmistusprosessi on hidas ja vaatii paljon pääomaa laitteiden ja raakamateriaalin muodossa. Lopputuotteen hinta riippuu raakamateriaalista ja sen valmistukseen käytetyistä prosesseista, lopputuotteen materiaaliominaisuuksista ja käytetystä punoksesta. Mitä suurempi punoksen koko, sitä alhaisempi hinta tyypillisesti on. Siten esimerkiksi 12K-laatuinen (12 000 filamenttia per punos) on edullisempaa kuin 3K-laatu. [4]

2.4 Valmistajat

Vaikka hiilikuitua käytetään maailmanlaajuisesti monella alalla, valmistajien lukumäärä on silti verrattain pieni. Määritelmästä riippuen merkittäviä valmistajia on vain 4-5 kappaletta. Lisäksi kaikki merkittävät valmistajat sijaitsevat Aasiassa. Merkittävimpiä ovat Mitsubishi Rayon, Hexcel, Zoltek, Toray ja Toho.

Carbon fiber market share by company



Kuva 1. [5]

2.5 Sidosaine

Lujaa ja jäykkää materiaalia valmistettaessa merkitsevä ominaisuus on, että miten materiaaliominaisuuksia pystytään hyödyntämään mahdollisimman hyvin lopputuotteessa ja käyttökohteessa esiintyvässä kuormituksessa. Hiilikuidun tapauksessa kuitujen suuntauksella on suuri merkitys ortotrooppisten materiaaliominaisuuksien johdosta. Tämän lisäksi on huomioitava kuormituksen kohdistuminen kuiduille mahdollisimman tasaisesti. Optimaalisessa rakenteessa kaikki kuidut kantavat osansa kuormasta ja kuitujen kuormituksen välillä ei ilmene merkittäviä eroja.

Komposiiteissa tärkeänä osana oleva sidosaine vastaa valmistusvaiheessa materiaalin kovettumisesta ja kuormituksen jakamisesta kuitujen välillä. Hiilikuidun tapauksessa sidosaineena käytetään lähes aina epoksia, jonka lujuus on itse kuitumateriaaliin verrattuna huomattavasti pienempi. Valmistusvaiheessa epoksi on ohutta ja viskositeettiltaan alhaista, mikä tekee siitä hyvin juoksevaa mahdollistaen rakenteen kyllästämisen. Eri epoksilaatuja ja niihin lisättäviä kovetteita on montaa eri tyyppiä. Myös niiden materiaaliominaisuudet, viskositeetti ja kovettumisajat vaihtelevat käyttötarkoituksen ja valmistusmenetelmän mukaan

Epoksilaatuja on monenlaista. Muuttamalla sen koostumusta voidaan vaikuttaa muun muassa kovettumisen nopeuteen, valmistuksen aikana tarvittavaan lämpötilaan ja lopullisen kappaleen materiaaliominaisuuksiin. Kovettumisen aikana liimattavaa alueeseen tai liimasaumaan tulee kohdistaa huomattavasti painetta, jotta kappaleelle saadaan halutut ominaisuudet. Tämä on yksi merkittävä elementti, mikä tulee täyttyä jokaisella valmistusmenetelmällä.

Sidosaine ei pelkästään ympäröi kuituja, vaan oikein käytettynä tunkeutuu kimpussa olevien kuitujen väliin tehden materiaalista mahdollisimman tasalaatuista. Sidosaaine siirtää materiaaliin kohdistuvan voiman F leikkausvoimana τ kuitujen ulkopinnalle, joka puolestaan aiheuttaa itse kuituun jännityksen σ .

Valmiissa materiaalissa sidosaineen tehtävät ovat seuraavat:

- Sitoo kuidut yhteen ja siirtää kappaleen materiaalin kohdistuvan kuormituksen niille.
- Eristää kuidut toisistaan, jotta niiden ominaisuudet voivat olla yksilöllisesti hyödynnettävissä. Vaikka osa kuiduista katkeaisi kovassa kuormituksessa, loput voivat säilyä edelleen vahingoittumattomana.
- Mahdollistaa hyvän pinnanlaadun ja auttaa lopullisen kappaleen muodon saavuttamisessa.
- Suojaa kuituja kemiallisilta ja mekaaniselta kuormitukselta.
- Vaikuttaa materiaaliominaisuuksiin kuten jäykkyyteen, kovuuteen ja lujuuteen.

- Kyky vaikuttaa tapaan, jolla kappale tai materiaali rikkoutuu. Sidosaineen valinta vaikuttaa tähän merkittävästi. [6]

2.6 Hiilikuitulaadut

Hiilikuidut valmistetaan jatkuvana kimppuna, eli niin sanottuna touvina, jonka filamenttiluku vaihtelee käyttötarkoituksesta ja valmistustavasta riippuen tuhannesta aina satoihin tuhansiin. Yleisimpiä filamenttilukuja ovat 3 000, 6 000, 12 000, 24 000 ja 48 000. Näistä käytetään usein lyhenteitä. Esimerkiksi 3 000 filamenttilukua merkitään luku- ja kirjainyhdistelmällä 3K. Eri laatuilla hiilikuiduilla pyritään tarjoamaan jokaiseen käyttötarkoitukseen mekaanisilta ominaisuuksiltaan ja kustannustasoltaan optimi vaihtoehto.

Lisäksi hiilikuitulaadut jaotellaan tyypillisesti kimmomodulin mukaan. Ne ovat esitettynä luvussa 2.8.

2.7 Hiilikuitukudokset

Kankaan tapaiseksi kudokseksi punotut hiilikuitupalat voidaan valmistaa monen tyyppisellä eri kuviolla. Tietyn suuntauksen omaavien kuitujen määrää kontrolloidaan punoksen kuviolla. Yhdensuuntaisissa kankaissa, joissa kuitujen suuntaus on 0° 95% koko kankaan kuiduista ovat yhdensuuntaisia. Vastaavasti ristiin punotuissa kankaissa 0° ja 90° suuntaan olevia kuituja on yhtä paljon. Tyypillisimmät punosmallit ovat kuvattuna alla.

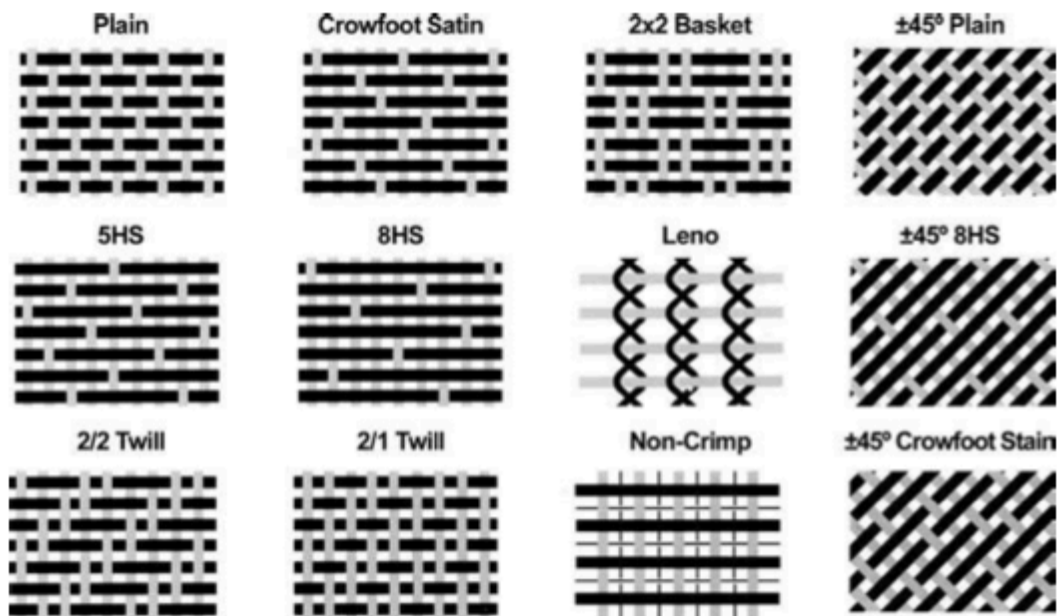


FIGURE 2.6
Various weave styles for fabrics. (Courtesy of Cytec Fiberite.)

Kuva 2. [7]

2.8 Mekaaniset ominaisuudet

Rakenteeltaan kiteisellä hiilikuidulla on yleensä suuri vetolujuus. Vastaavasti hiilikuiduilla, jonka esiasteena on käytetty pikeä on suurempi kimmokerroin ja parempi lämmönjohtavuus.

Kimmoarvon kerroin isotrooppiselle ja homogeeniselle materiaalille kuvataan kokeellisesti aksiaalikuormituksessa selvitetyn Hooken lain avulla, josta saadaan johdettua kimmomoduli E . Tämä kuvaa materiaalin jäykkyyttä veto- tai puristuskuormituksessa. Kuormitus voi aiheuttaa myös sitä vastaan kohtisuorassa suunnassa ilmeneviä muodonmuutoksia, jota kuvataan Poissonin vakiolla ν_{12} .

Materiaalin jäykkyyden leikkauskuormituksessa määrittää liukumoduli G . Kimmo- ja liukumodulia sekä Poissonin vakiota nimitetään yhdessä materiaalin kimmoarvoiksi. Niistä vain kaksi on riippumattomia ja yhteys voidaan esittää muodossa. Ominaisuuksien suuntauksesta johtuen kimmoarvoja ilmoitettaessa tulee ilmoittaa aina tarkastelusuunta.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Laminaatin lujuusarvot ovat materiaalin normalisoituja jännityksiä sen rikkoutumishetkellä. Kuten kimmoarvot, niin myös lujuusarvot ovat tarkastelusuunnasta riippuvaisia. Toisin kuin isotrooppisissa ja homogeenisissa materiaaleissa, niin laminaateille on tyyppillistä vaiheittainen hajoaminen tai pettäminen.

Standardi hiilikuitukudos (STD CF Fabric)			
Ominaisuus	Merkki	Yksikkö	Arvo
Kimmo kerroin 0°	E1	GPa	70
Kimmo kerroin 90°	E2	GPa	70
Leikkauskerroin	G ₁₂	Gpa	5
Poissonin vakio	ν_{12}		0,1
Murtolujuus 0°	X _t	MPa	600
Murtolujuus 90°	Y _t	MPa	600
Puristuslujuus 0°	X _c	MPa	570
Puristuslujuus 90°	Y _c	MPa	570
Murtovenymä 0°	e _{xt}	%	0,85
Murtovenymä 90°	e _{yt}	%	0,8
Lämpölaajenemiskerroin	Alpha1		2,1
Tiheys		g/cm ³	1,6

Yllä olevassa taulukossa on esitetty yleisesti käytetyn standardin hiilikuidun materiaaliominaisuudet. Maastopyörärunkojen valmistuksessa käytetään kuitenkin yleisesti neljää eri hiilikuitutyyppiä, joiden ominaisuudet ovat seuraavanlaiset:

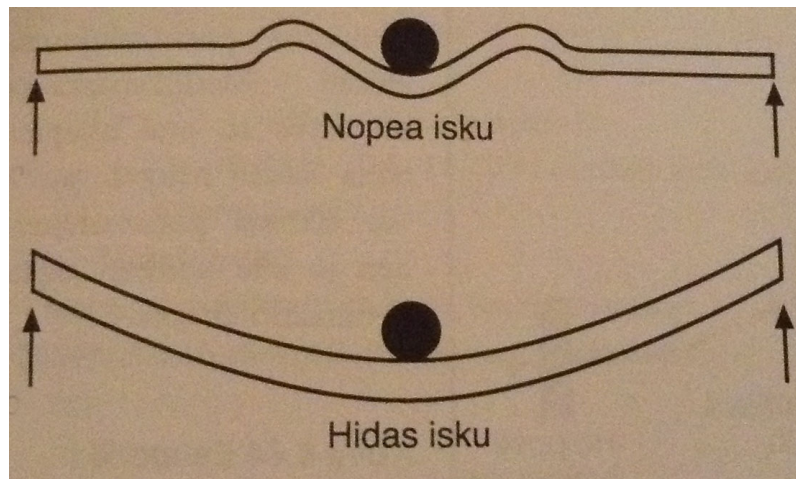
Tyyppi/Nimitys	Murtolujuus/GPa	Youngin kimmo- moduli/GPa	Muuta
Standard Modulus	200-280	200-250	Verrattain jäykkää ja vahvaa sekä kohtuullisen edullista. Käytetään usein edullisen hintaluokan rungoissa.
Intermediate Modulus	280-350	265-320	Kaikista vahvin hiilikuitulaatu. Käytetään erityisen kovalle rasiukselle joutuvilla alueilla, kuten keskiossa, takahaarukassa ja emäputkessa. Käytetään usein vain kalliimman hintaluokan rungoissa.
High Modulus	350-600	320-440	Tämä hiilikuitulaatu on arviolta 62% jäykempää kuin peruslaatu (Standard Modulus). Se on kuitenkin haurasta, minkä vuoksi sitä käytetään säästeliäästi.
Ultra-High Modulus	600 tai enemmän	440-960	Kaikista kallein ja jäykin hiilikuitulaatu, mutta samalla myös erittäin hauras. Käytetään vain kaikista kalleimman hintaluokan rungoissa ja niissäkin vain muiden hiilikuitulaatujen kanssa. Yleensä runko sisältää korkeintaan vain 15% tätä kuitutyyppiä.

Yllä olevassa taulukossa esitetyt hiilikuitutyypit ovat yleisesti käytössä muun muassa Japan Carbon Fiber Manufacturers Association -yhdistyksellä. Kyseessä ei ole kuitenkaan varsinaiset standardit, vaan ne ovat ennemminkin suuntaviivoja. Tuotteen nimeämisen päättävältä jää siis täysin valmistajan päätettäväksi.

2.9 Iskunkestävyys

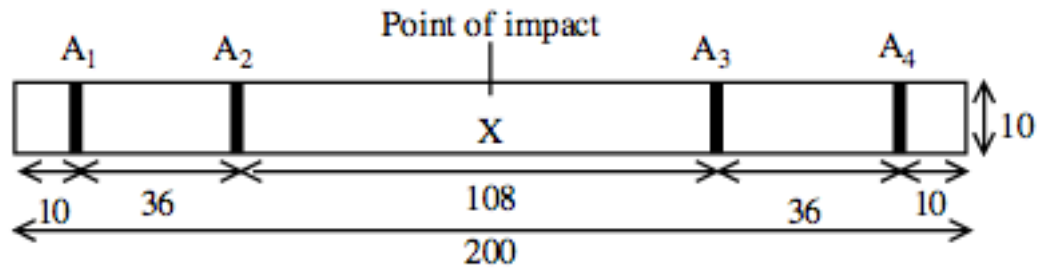
Suurten normaalikuormien ohella erityisesti iskukuormat aiheuttavat hiilikuitu- ja komposiittirakenteisiin helposti vaurioita. Etenkin maastopyörän rungoissa tämä on oleellinen ominaisuus, sillä esimerkiksi kaatumistilanteissa runko voi iskeytyä kiveä tai puuta vastaan. Lisäksi kovassa vauhdissa pyörivästä eturenkaasta lentävät kivet saattavat vahingoittaa rungon viistoputkea. Takavuosina usealla suurella valmistajalla olikin ongelmia runkojen kestävyudessa juuri tämän takia.

Iskunkestävyys ei ole pelkästään materiaaliriippuvainen ominaisuus. Se riippuu myös iskun saaneen komponentin koosta, rakenteesta ja iskun nopeudesta. Kun iskevän esineen nopeus kasvaa, rakenteen koon ja tuennan merkitys vähenee. Vaurioon vaikuttavat erityisesti iskun aiheuttavan kappaleen massa, muoto, koko ja nopeus. Alla on kuvattuna materiaalin käyttäytyminen nopealla ja hitaalla iskulla. Hiilikuitu on kevyttä ja jäykkää, mikä aiheuttaa usein materiaalin hauraan käyttäytymisen, kun siihen kohdistuu merkittävä määrä iskuenergiaa.



Kuva 3. [8]

Wang ja kumppanit tutkivat vuonna 2004 kolmen erilaisen hiilikuitukomposiitin iskunkestävyyttä koejärjestelyllä, jossa halkaisijaltaan 19 mm teräskuula tiputettiin tasaisella alustalla tuettuun materiaaliin eri korkeuksilta. Vaurioita tutkittiin sähkövirran vastukseen perustuvalla mittaustavalla, jonka sanotaan olevan muun muassa ultraääntä tarkempi. Kahdeksasta laminaattikerroksestä koostuvan testikappaleen mitat ovat ilmoitettuna alla millimetreissä.



Kuva 4. [9]

Alla olevassa taulukossa on esitettyä saman laminaattirakenteen koetuloksia.

Iskuenergia/J	Vaurion halkaisija/mm	Vaurion syvyys/mm
0,68	2,3	0,07
1,37	2,9	0,11
2,05	3	0,12
2,74	3,3	0,14
3,42	3,7	0,18
4,11	4,2	0,23
5,78	4,4	0,26

[9]

2.9.1 Vertailu muihin yleisesti käytettyihin materiaaleihin

Hiilikuidusta tekee materiaalivalintana houkuttelevan erityisesti sen mekaaniset ominaisuudet. Esimerkiksi rakenneteräkseen verrattuna sen tiheys on vain neljäsosan, vetolujuus voi olla silti jopa 7-9 kertaa suurempi jäykkyyden ollessa samaa luokkaa. Hiilikuituvahvisteisten polymeerien, toiselta nimeltään CFRP-yhdisteiden, lujuuden ja tiheyden suhde voi olla parhaimmillaan jopa 2 000 MPa / (g/cm³). 4130 CrMo -teräksellä vastaava suhdeluku on 129 MPa / (g/cm³).

Pelkästään materiaaliominaisuudet tekevät siis hiilikuidusta hyvin houkuttelevan materiaalin rakenteisiin, joissa vaaditaan suurta lujuutta, jäykkyyttä ja keveyttä. Tämän lisäksi hiilikuidun käyttö mahdollistaa muotojen ja rakenteiden tekemisen, mikä ei olisi välttämättä terästä tai alumiinia käytettäessä mahdollista.

Materiaali	Youngin Kimmo moduli (GPa)	Myötöraja (MPa)	Murtolujuus (MPa)	Väsytysraja 50 000 sykliä (Mpa)	Tiheys (kg/m ³)	Työstettävyyys	Kustannukset (USD/kg)
Alumiini 6061-T6	72	193-290	241-320	75	2700	Erinomainen	2,42
Alumiini 7075-T6	72	290	350	75	2780	Erinomainen	2,87

Teräs 4130	205	800-1000	650	250	7800	Erinomainen	0,95
Titaani - Grade 9	91-95	483-620	621-750	250	4480	Kohtalainen	57,4
Hiilikuitu	274-415	Vaihtelee	Vaihtelee	Vaihtelee	1800	Kohtalainen	Vaihtelee

[10]

3 HIILIKUIDUN KÄYTTÖ MAASTOPYÖRÄN RUNKOMATERIAALINA

Tässä luvussa on lueteltuna tiiviisti hiilikuidun hyviä ja huonoja puolia maastopyörän runkomateriaalina. Materiaaliominaisuuksien lisäksi valintaan vaikuttavat muun muassa hinta, valmistettavuus, valmistusprosessit, materiaalin saatavuus ja tasalaatuisuus sekä laaduntarkkailu helppous.

3.1 Vahvuudet

Hiilikuidun käytöllä maastopyörän runkomateriaalina saavutetaan lukuisia hyötyjä, jonka ansiosta se on saavuttanut materiaalina merkittävän suosion. Alla on listattuna joitakin yleisimpiä perusteita, joiden vuoksi hiilikuidun käyttö on yleistynyt merkittävästi.

- Hiilikuiturakenteet mahdollistavat osakokonaisuuksien integraation, joka edellyttäisi muilla materiaaleilla pultti-, puristus-, prässäys- tai hitsausliitoksia.
- Valmistuksessa voidaan tuottaa lähempänä lopullista muotoa olevia kappaleita, mikä vähentää jatkotyövaiheiden määrää.
- Muotojen valmistaminen, mikä ei olisi mahdollista teräksellä tai alumiinilla.
- Hiilikuitu on hyvin jäykkää tiheyteensä nähden. Hiilikuitu tarjoaa saman jäykkyyden kuin teräs, mutta vain 1/5 teräksen painosta ja vastaavan kuin alumiini 1/2 vastaavan alumiinikappaleen painosta.
- Lujuuden ja tiheyden suhde on erittäin korkea. Lujuus-tiheyssuhde on tyypillisesti 3-5 kertaa parempi verrattuna teräkseen tai alumiiniin.
- Korkea väsymisraja. Teräksellä on hyvät väsymisominaisuudet noin 50 % asti sen staattiseen lujuuteen nähden, kun hiilikuidulla vastaava raja tulee vasta 90 % kohdalla.
- Hyvä korroosionkesto. Hiilikuitu ei tarvitse tyypillisesti minkäänlaista erikoiskäsittelyä esimerkiksi happea tai vettä vastaan. Poikkeuksena ovat liitoskohdat muiden materiaalien, kuten esimerkiksi alumiinin kanssa.
- Lopullisen kappaleen jäykkyysominaisuuksiin voidaan vaikuttaa hyvällä suunnittelulla. Ortotrooppisen materiaaliluonteen johdosta kappale voi olla yhteen suuntaan erittäin jäykkä ja toisaalta tarjota toiseen suuntaan jonkin verran joustoa.

3.2 Heikkoudet

Vaikka hiilikuitu on materiaaliominaisuuksiltaan erinomainen vaihtoehto moneen käyttökohteeseen, myös sillä on olemassa jonkin verran haittapuolia tai heikkouksia. Niistä merkittävimmät ovat esitetty alla olevassa listassa:

- Hinta. Hiilikuitu on raaka-aineena tyypillisesti kallista. Se maksaa 5-20 kertaa enemmän kuin vastaava määrä alumiinia tai terästä. Materiaalihinta on kuitenkin laskenut huomattavasti viime vuosikymmeninä. 1970-luvulla pauna (0,454 kg) hiilikuitua maksoi 150 \$, kun taas 2000-luvulla vastaava summa oli enää 8 \$.
- Suuret tuotantomäärät voivat olla ongelmallisia. Vielä vajaa kymmenen vuotta sitten hiilikudusta valmistettuja komponentteja valmistettiin suhteellisen pieniä määriä. Kappaleen monimutkaisuudesta ja koosta riippuen tämä saattoi merkitä vain 1-3 kappaletta per päivä. Uusien valmistustekniikoiden, kuten RTM:n, avulla on päästy kuitenkin jo hieman suurempaan tuotantokapasiteettiin. Keski-kokoinen pyörärunkovalmistaja pystyy valmistamaan arviolta vain 3-5 runkoa per päivä.
- Kaikki hiilikuiturungon valmistusmenetelmät edellyttävät käsin tehtäviä töitä ainakin jossakin tuotantovaiheessa.
- Vähäinen standardien määrä. Esimeriksi teräsrakenteiden suunnittelusta, valmistuksesta ja standardeista on runsaasti tietoa erilaisissa tietopankeissa, luetteloissa ja käytännön tasolla. Hiilikuidulla ei ole olemassa vielä vastaavaa tietämystä tai ainakaan sitä ei ole vielä yhtä helposti saatavilla.
- Huonosti suunniteltu ja/tai valmistettu hiilikuitukappale voi rikkoutua pahimassa tapauksessa odottamattomasti. Maastopyörän rungon kohdalla tämä voi tarkoittaa vakavaa vaaratilannetta.
- Rikkoutunut komposiittiosan korjausmahdollisuudet ovat hyvin rajalliset. Käyttöön kelpaamaton komponentti tai runko on ongelmajätettä.

4 MATERIAALIVALINTA

Materiaalivalinta on erittäin tärkeässä osassa suunnitteluprosessia. Kappaleen tai valmiin tuotteen suunnitteleminen uudesta materiaalista tehdään yleensä kahdesta syystä:

- 1) Tuote halutaan suunnitella uudestaan paremman toiminnan, matalampien kustannusten, parantuneen luotettavuuden tai alhaisemman massan saavuttamisen vuoksi.
- 2) Materiaalin valitsemiseksi uutta tuotetta tai sovellusta varten.

Kummassakaan yllä olevista tilanteista vanhan suunnittelumallin toteuttaminen uudestaan ja pelkästään materiaalin korvaaminen toisella ei tuo optimaalista lopputulosta. Esimerkiksi rungon valmistaminen hiilikuidusta samoilla muodoilla ja materiaalivaihtumuksilla kuin esimerkiksi alumiinia käytettäessä olisi potentiaalinen ja materiaalin tuhlausta. Kun alumiinista tai teräksestä valmistettu kappale tai kokonainen tuote valmistetaan hiilikuidusta, suunnitteluprosessi tulee tehdä uudelleen alusta alkaen.

Käytössä oleva materiaalidataa tulee käyttää eri tavoin suunnitteluprosessin kaikissa vaiheissa. Alun niin sanotussa konseptivaiheessa tehdään väljempiä linjauksia ja vaihtoehdot sekä suunnittelulinjat pidetään auki. Prosessin edetessä ja vaihtoehtoja pois suljettaessa myös mahdollisten materiaalivalintojen määrä pienenee. Huomioitavia päätöksiä valmistusprosessissa ovat muun muassa:

- Käytetyn hiilikuidun tyyppi: yksisuuntaiset kuidut vai tietyllä kuviolla kudotut kangaspalat.
- Eri kudomallien ominaisuudet ja niiden soveltuvuus erilaisille vaatimuksille.
- Kudospalojen koko, muoto, määrä ja asetelujärjestys.
- Sidosaineen tyyppi ja ominaisuudet.
- Soveltuvuus eri valmistusmenetelmille.
- Materiaalin tiheys ja lopputuotteen massa.

Materiaalivalintaan ei ole olemassa standarditekniikkaa tai prosessia. Erilaisia yllä esitetyn tapaisia päättelyketjuja ja kriteereitä voidaan hyödyntää tilanteen ja tarpeen mukaan. Siltikin suuri vastuu jää edelleen suunnittelijalle tai suunnittelutiimille. Empiirisen tiedon hyödyntämistä ei tule myöskään sivuuttaa. Jos jokin ratkaisumalli, materiaali ja valmistustapa on toiminut ennen vastaavassa kohteessa, tämä vaihtoehto kannattaa pitää avoimena. Myös kilpailijoiden valmistamat tuotteet ja käyttämät ratkaisut kannattaa tutkia. Suunnittelijan työ on kuitenkin arvioida kaikki mahdolliset vaihtoehdot ja muodostaa niistä optimaalisen lopputuloksen tuottama yhdistelmä riippumatta siitä ovatko käytetyt materiaalit, valmistustekniikat ja muut suunnitteluun liittyvät parametrit uusia tai vanhoja.

4.1 Mekaanisten ominaisuuksien valintakriteerit

Materiaalivalinta lähtee aina tarpeista ja niiden tunnistamisesta. Mikä on lopputuotteelta vaadittava lujuus, jäykkyys, massa, hinta ja ulkonäkö? Esimerkiksi massan saaminen mahdollisimman alhaiseksi voi olla yksi tavoitteista, mutta sitä ei voida tehdä turvallisuuden ja luotettavuuden kustannuksella – etenkin maastopyörärungon tapauksessa. Tyypillisiä tarkasteltavia mekaanisia ominaisuuksia ovat lujuus, jäykkyys, iskunkestävyys ja hinta.

4.2 Kerrosrakenteen suunnittelu

Kuituja voidaan käyttää yhdensuuntaisina rakenteina tai erilaisina punoksina, joita on lukuisia erilaisia. Muutamia esimerkkejä oli kuvattuna aiemmin luvussa 2. Parhaat mekaaniset ominaisuudet saadaan pääasiassa yhdensuuntaisilla kuiturakenteilla. Tosin tämä riippuu rungon kohdasta ja sille kohdistuvasta kuormituksesta, koska yhdensuuntaiset rakenteet ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan huomattavasti huonompia kuituja kohtisuoraan suuntaan.

Lisäksi on tärkeää huomioida rakenteen geometria. Yhdensuuntaiset kuiturakenteet taipuvat huonosti kaksoiskaareville pinnoille, joita rungoissa on voi olla huomattavan paljon. Erilaisilla punoksilla saavutetaan myös kohtuullisen hyvät mekaaniset ominaisuudet, vaikkakin kuitujen epäsuorat linjat alentavat jonkin verran lujuutta ja jäykkyyttä. Punokset kestävät myös tyypillisesti jonkin verran paremmin myöhempää työstöä ja iskukuormia.

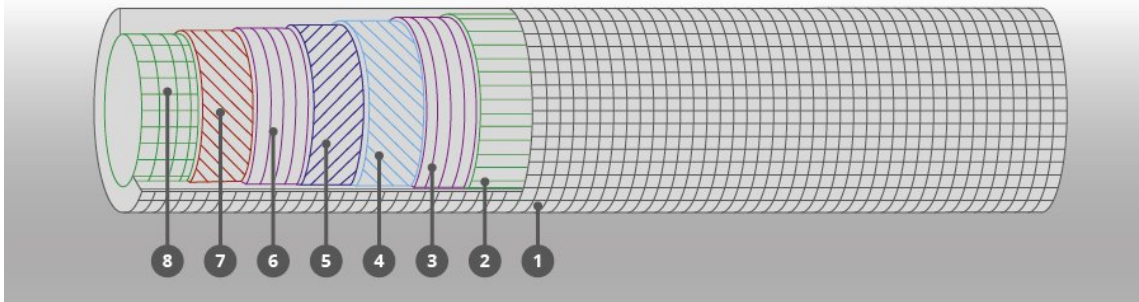
Kerrosten määrä on hyvin riippuvainen rungon kohdasta, käyttötarkoituksesta ja siten sille kohdistuvista kuormituksista. Luku voi vaihdella mitä tahansa 4-40 kerroksen väliltä.

4.3 Kerrosjärjestys ja suuntaus

Kerrosten suuntaus on yksi merkitsevä muuttuja rungon tai minkä tahansa muun hiilikuidusta (tai muusta kuitulaminaatista) valmistetun kappaleen suunnittelussa. Esimerkiksi jo 0° -, $\pm 90^\circ$ -, $\pm 45^\circ$ - tai $\pm 60^\circ$ -kuitusuunnilla rakenne voidaan saada jäykäksi ja lujaksi moneen eri suuntaan tai toisaalta joustamaan halutusti tiettyihin suuntiin. Vaikka kerrossuunnissa on vaihtoehtoja periaatteessa loputtomiin, tyypillisesti valmistuksen ja laadunvarmistuksen helpottamiseksi ne rajataan usein vain edellä lueteltuihin vaihtoehtoihin. Kuitenkin, jos jotakin merkittäviä hyötyjä saadaan käyttämällä muita suuntauksia näistä neljästä suuntauksesta poikkeamista ei tarvitse välttää.

Kerrossuuntien suhteet valitaan rakenteeseen arvioitujen tai mitattujen kuormituskomponenttien perusteella. Vaikka jokin rungon kohta olisi lähes yksinomaan aksiaalisesti kuormitettu, myös poikittaisten kerrosten käyttäminen on tarpeen, koska vain yhteen suuntaan lujitettu rakenne on usein hauras ja iskunkestävyydeltään huono. Esi-

merkkinä tästä putkimaisessa rakenteessa voisi olla kuitusuuntaukset aksiaalisuuntaan antamassa rakenteelle taivutusjäykkyyttä ja $\pm 45^\circ$ samaan suuntaan nähden sijoitetut kuidut antavat tarvittavaa vääntöjäykkyyttä. Alla olevassa kuvassa on esitettyinä runkoputken niin sanottu layup-suunnitelma, jossa on käytetty 0° -, $\pm 45^\circ$ - ja 90° -kuitusuuntia.



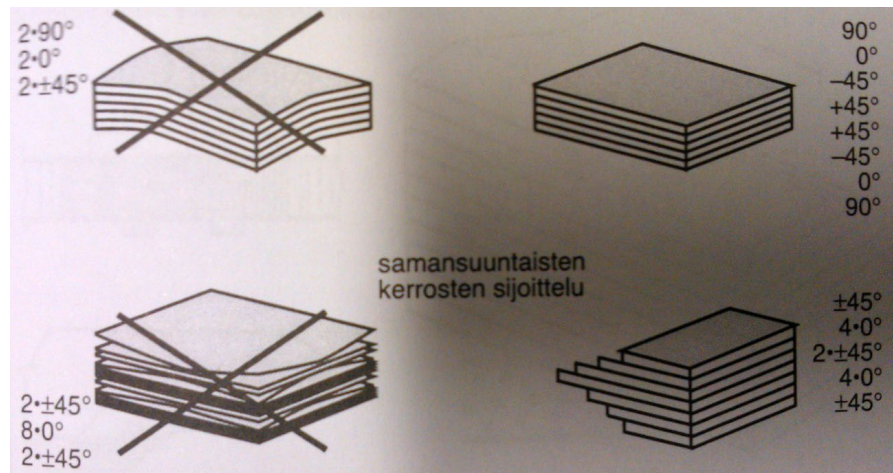
Kuva 5. [11]

Kerrosjärjestystä suunnitellessa yleinen suositus on keskitason suhteen symmetrisen rakenteen käyttö. Epäsymmetrisen hiilikuiturakenteen käyttö vältetään pääsääntöisesti lämpötila- ja kosteuserojen aiheuttamien muodonmuutosten vuoksi. Jos kerrosrakenteen on epäsymmetrisen, muodonmuutokset tapahtuvat epäsymmetrisesti keskitasoon nähden aiheuttaen näin mahdollisia ongelmia. Vaikka lämpötila- ja kosteusvaihtelut ovat maastopyörärunkojen tapauksessa hyvin pieniä, tämä on silti hyvä huomioida. Näiden seikkojen lisäksi epäsymmetrisen rakenteen saattaa käyttäytyä kuormituksessa arvaamattomasti.

Kerroksien lukumäärän lisäksi niiden järjestys on merkittävä muuttuja, jolla voidaan vaikuttaa taivutusjäykkyyteen ja lujuuteen. Taivutusjäykkyys tietyssä suunnassa voidaan maksimoida sijoittamalla materiaalin kuitusuuntaus samaan suuntaan. Monien samansuuntaisten kerrosten tekemistä kannattaa kuitenkin välttää, sillä rakenne voi tulla näin hyvin hauraaksi ja helposti delaminoituvaksi.

Epäjatkuvuuskohtien ja muiden mahdollisesti rakenteen geometriasta johtuvien pistekuormien vuoksi rakennetta on syytä usein vahvistaa paikallisesti. Tällaisia kohtia rungossa ovat muun muassa keskiön alue, laakeripesät, emäputken alue ja dropoutit sekä muut mahdolliset tarvittavat aukot tai reiät rungon rakenteessa. Vahvistuksien suunnittelussa tulee olla huolellinen, sillä kuitulaminaattirakenteen joustaminen on hyvin pientä. Syntyvät jännitykset pystyvät täten tasoittumaan vain rikkoutumisen kautta. Aukkojen vahvisteet suunnitellaan tyypillisesti niin, että aukon ympäristössä kuitusuuntia on kaikissa neljässä pääsuunnassa (0° , $\pm 90^\circ$, $\pm 45^\circ$ ja $\pm 60^\circ$). On tärkeää huomioida, että kuitusuuntaukset vaikuttavat oleellisesti epäjatkuvuuskohtien aiheuttamiin jännitys-huippuihin.

Alla olevassa kuvassa on esimerkki kuitukerrosten suuntauksesta.



Kuva 6. [12]

Paikallisesti kuormitetun alueen vahvistusta suunniteltaessa on varmistettava, että rakenne kestää sille kohdistetun kuorman ja jakamaan sen mahdollisimman hyvin ympäröivään rakenteeseen. Tämän johdosta vahvistetun alueen tulisi sisältää kuormituksen suuntaisia kuituja ja kuorman suuntaan $\pm 45^\circ$ suunnattuja kuituja.

5 YLEISIMMÄT KÄYTTÖKOHTEET

Hiilikuitua alettiin käyttää ensimmäisenä avaruus- ja ilmailuteollisuudessa. Syynä kapealle käyttöalalle oli yksinkertaisesti korkeat kustannukset. Uutta materiaalia ei ollut kannattavaa käyttää kuin kohteissa, jotka vaativat äärimmäistä optimointia lujuuden, jäykkyyden ja keveyden suhteen. Kehityskaari on hyvin tyypillinen, sillä myös monen muun materiaalin, teknologian käytössä on toistunut samanlainen kehityskulku.

5.1 Ilmailuteollisuus

Hiilikuidun käyttö on yleistynyt vuosien saatossa ilmailuteollisuudessa entisestään. 70-80-luvulla hiilikuidun ollessa vielä uusi materiaali, sitä käytettiin vain kohteissa, jotka vaativat äärimmäistä lujuutta, keveyttä tai molempia. Nykyään esimerkiksi Airbusin valmistama A350 XWB -lentokoneen materiaaleista jopa 53 % on hiilikuitua. [13] Saman valmistajan A380-malli on ensimmäinen kaupallinen matkustajakone, jonka siipien runko on valmistettu kokonaan hiilikuidusta. [13]

5.2 Autoteollisuus

Hiilikuitua on käytetty jo verrattain pitkään autourheilussa. Vaikka materiaalikustannukset ovat korkeat, materiaalin lujuus-painosuhte tekee sen käytön silti kannattavaksi. Autourheilussa, kuten monessa muussakin urheilulajissa teho-painosuhte on ratkaisevassa asemassa. Suomalaisille tutuin autourheilun muoto on varmastikin Formula 1, jossa hiilikuitua on käytetty todennäköisesti eniten kaikista autourheilun muodoista.

Esimerkiksi John Barnardin suunnittelema McLaren MP4 F1-auto on rakennettu pääosin Hercules Aerospace -yrityksen toimittamasta hiilikuidusta. Autoa nimitettiin jopa vallankumoukselliseksi korin vahvuuden, jäykkyyden ja kuljettajan turvallisuuden johdosta. Kilpailevat tallit kopioivat mallin vain kuukausia sen julkistamisen jälkeen. [14]

Eräänlainen osoitus hyvin suunnitellun hiilikuiturakenteen kestävyydestä on, että McLarenin autoon raakamateriaalit toimittanut Hercules Aerospace pitää vuoden 1981 Italian Grand Prix -kilpailussa John Watsonin vauhdikkaassa ulosajossa ollutta autoa edelleen esillä päätoimipisteessään. [15]

Vaikka hiilikuidun käyttö on rajoittunut vain autourheilun terävimpään kärkeen, teknologian kehittyessä ja valmistuskustannusten lasiessa sovellukset päätyvät vaihtelevalla viiveellä myös tavalliselle kuluttajalle massatuotantomalleissa.

5.3 Rakennustekniikka

Hiilikuidun yleistynyt käyttö rakennustekniikan sovelluksissa viestii, että sen valmistuskustannukset ovat laskeneet selvästi ajoista, kun hiilikuitu oli vielä uusi materiaali. Nykyään hiilikuidun käyttöä pidetään kustannustehokkaana keinona mm. teräs-, valurauta, puu-, tiili- ja betonirakenteiden vahvistuksessa. Sovelluskohteet vaihtelevat hiilikuidun käytöstä alkuperäisestä suunnitteluprosessista alkaen ulottuen aina vanhojen rakenteiden restaurointiin ja kunnostukseen. Alla olevassa kuvassa on Norjassa sijaitseva kävelysilta, jonka rakennusmateriaalina on käytetty betonin lisäksi hiili- ja lasikuitua.



Kuva 7. [16]

Hiilikuidun käyttö jälkikäteen on mahdollinen vaihtoehto erityisesti rakenteissa, joiden on tarkoitus kestää ja kantaa suuria kuormia. Näin voi olla esimerkiksi sillan kohdalla, joka on suunniteltu kevyempään käyttöön, jolle se tällä hetkellä altistuu. Rakenteiden vahvistaminen jälkikäteen on tyypillisesti huomattavasti edullisempaa kuin kokonaan uuden rakentaminen. Hyvin suunnitellulla hiilikuiturakenteen lisäyksellä on tyypillisesti huomattava vaikutus rakenteen lujuuteen, jopa sen kaksinkertaistamiseen asti. Samalla rakenteen muut ominaisuudet voidaan suunnitella halutuksi lujuudesta riippumatta. Tiettyillä hiilikuitulaaduilla voi olla hyvin suuri murtolujuus aina 3 000 MPa asti. Kuitenkin saman materiaalin jäykkyys on vain 150-250 GPa. Käyttämällä tästä materiaalista valmistettuja rakenteita, jotka ovat poikkileikkauksen pinta-alaltaan pieniä voidaan saavuttaa rakenne, jonka lujuus on yli kaksinkertainen vanhaan verrattuna, mutta jäykkyys on kasvanut vain 10 %.

Hiilikuidun käytöstä jälkiasennuksessa esimerkiksi teräksen korvikkeena käydään edelleen keskustelua ja aiheesta tehdään tutkimustyötä. Perinteisiä rakennusmate-

riaaleja, kuten terästä, betonia ja puuta, korkeammat kustannukset ovat edelleen huomioitava asia. Lisäksi alalla on edelleen epäluuloisuutta materiaalin mahdollisen haurauden vuoksi ja koska pitkäaikaisia kokemuksia käytöstä ei vielä ole. Vaikka alalle on kehitetty standardeja (esimerkiksi American Concrete Instituten toimesta), niin rakennusinsinöörien keskuudessa on edelleen epäluuloja hiilikuidun käyttöä kohtaan.

5.4 Urheiluvälineet

Hiilikuidun käyttö on etenkin huipputason urheiluvälineissä yleistä ja hyvästä syystä. Useimmissa urheilulajeissa liikutetaan joko urheilijan itsensä massaa ja mahdollisesti myös pelivälinettä. Mitä kevyempi liikutettava massa on, sitä parempi teho-painosuhte saadaan, mikä antaa arvatenkin etulyöntiaseman. Vielä kun materiaalin keveyteen yhdistetään muut hiilikuidun mekaaniset ominaisuudet, kuten suuri lujuus ja jäykkyys, niin on ymmärrettävää, että se on saavuttanut suuren suosion usean urheilulajien välineiden materiaalina.

5.4.1 Mailat ja pelivälineet

Suomalainen Exel Composites toimii laajalla alalla hiilikuitu- ja komposiittirakenteiden valmistajana. Urheilun saralla se on tunnettu mm. salibandymailoista ja hiihtosauvoista. Hiilikuitu onkin näissä sovelluksissa ominaisuuksiltaan erinomainen. Esimerkiksi hiihtosauva saadaan valmistettua riittävän jäykäksi, jotta lihastyöstä ei huku merkittävää osaa sauvan joustoon työntöliikkeen aikana. Vastaavasti esimerkiksi salibandymailan tulee joustaa tietyllä tapaa halutun ”pelituntuman” saavuttamiseksi.

Jääkiekko on Suomessa yksi suosituimpia urheilulajeja ja hiilikuitua on käytetty mailoissa jo yli vuosikymmenen ajan. Näiden mailojen hintaluokka on tullut tosin vasta viime vuosina alas niin, että ne ovat yleistyneet muillakin kuin aktiivi- ja ammattipelaajilla. Jääkiekkomailalta edellytettävät ominaisuudet ovat samanlaiset kuin salibandyssäkin. Erona on kuitenkin, että mailan tulee olla huomattavasti kestävämpi ja jäykempi, koska se altistuu suuremmalle rasitukselle. Jääkiekossa pelaajat liikkuvat suuremmalla nopeudella ja kiekko on pelivälineenä huomattavasti salibandypalloa painavampi.

5.4.2 Polkupyörät

Tämä työ käsittelee hiilikuitua maastopyörän runkomateriaalina, joten polkupyörien mainitseminen urheiluvälineiden yhteydessä on aiheellista. Kuten edellä jo mainittiin, urheilussa välineiden mahdollisimman alhainen massa on usein hyödyksi. Erityisesti tämä ehto toteutuu polkupyörien kohdalla, sillä ajajan tulee liikuttaa itseään polkupyörää pelkästään lihasvoiman avulla. Mitä kevyempi yhdistelmä on, sitä parempi teho-painosuhte saavutetaan, joka antaa etulyöntiaseman.

Polkupyöriteollisuus on etsinyt jo vuosikymmeniä mahdollisimman lujia, jäykkiä ja kevyitä materiaaleja. Esimerkiksi mekaanisilta ominaisuuksiltaan erinomainen 7075 T6 -alumiinia käytetään runsaasti pyörien komponenteissa. Polkupyöriteollisuus onkin suurin 7075 T6 -alumiinin käyttäjä heti ilmailuteollisuuden jälkeen. [17]

Hiilikuitua on käytetty tyypillisimmin rungoissa ja muissa putkimaisissa osissa. Näihin kuuluvat muun muassa ohjaustangot, ohjainkannattimet ja satulatolpat. Noin kymmene viimeisen vuoden aikana käyttökohteet ovat kuitenkin laajentuneet merkittävästi, sillä hiilikuitua käytetään yleisesti myös vaihtajien ja vaihdevipujen osissa ja kammissa. Merkittävin uusi käyttökohde on kuitenkin todennäköisesti vanteet. Hiilikuidun alhaisen tiheyden vuoksi vanteesta voidaan rakentaa kestävä ja erittäin jäykkä säilyttäen se samalla erittäin kevyenä. Pyörivän massan minimointi eli mahdollisimman kevyiden kiekkojen (navat, vanteet ja pinnat) käyttäminen tuo selviä etuja. Pyörä on ajo-ominaisuuksiltaan tyypillisesti helpompi käsitellä ja se kiihtyy nopeammin.

6 RUNGON OMINAISUUDET

Modernilta maastopyörän rungolta vaadittavien ominaisuuksien lista on pitkä. Materiaaleista riippumattomia ominaisuuksia ovat muun muassa geometria, mitoitus ja täysjous-torungoissa myös hyvin suunniteltu takajousituksen kinematiikka. Materiaaleista riippuvaiset ominaisuudet ovat puolestaan paino, jäykkyys, lujuus, toleranssit ja hinta. Kaikilla ratkaisuilla pyritään kohti lopputuotetta, joka täyttäisi suunnittelun alussa asetetut kriteerit. Usein jo alkutilanteessa tavoitteena on jonkinlainen kompromissi lujuuden, painon ja hinnan kesken.

6.1 Rungon muoto ja rakenne

Jäykkäperäisten maastopyörärunkojen perusrakenne on ollut samanlainen jo yli sadan vuoden ajan. Kolmiorakenne on paljon insinöörien käyttämä muoto, jolla saavutetaan usein merkittäviä hyötyjä. Kolmio on rakenteena vahva, jonka kaikki sivut säilyvät saman pituisina niin kauan kuin rakenne on ehjä. Usein puhutaankin niin sanotusta tupla-kolmio- tai tuplatimanttimuodosta, jonka runko muodostaa sivulta päin katsottuna. Alla olevassa kuvassa on klassinen esimerkki jäykkäperäisestä rungosta, joka muodostuu etu- ja takakolmiosta.



Kuva 8. [18]

Runkojen etupäät rakennetaan edelleen tänä päivänäkin usein kolmion muotoon. Materiaalina voi olla teräs, alumiini tai tässä työssä käsiteltävä hiilikuitu. Hiilikuitu antaa kuitenkin helpon muovattavuuden ansiosta huomattavia vapauksia suunnitteluun. Käytännössä se tarkoittaa, että kolmiorakenne voidaan säilyttää, mutta se voi sisältää suuria kotelarakenteita. Erityisen hyödyllistä ja siten myös yleistä tämä on esimerkiksi emäputken ja keskiön alueella. Vastaavasti hiilikuitu antaa vapauksia käyttää muita huomattavasti perinteistä kolmiorakennetta monimutkaisempia muotoja ilman mainittavaa painon lisäystä.

Ibis Mojo HD on yksi esimerkki tällaisesta ratkaisusta, jossa vaaka- ja viistoputki ovat yhdistettynä erillisellä siltamaisella rakenteella tukemaan iskunvaimentimen kiinnityskohdan etupäätä.



Kuva 9. [19]

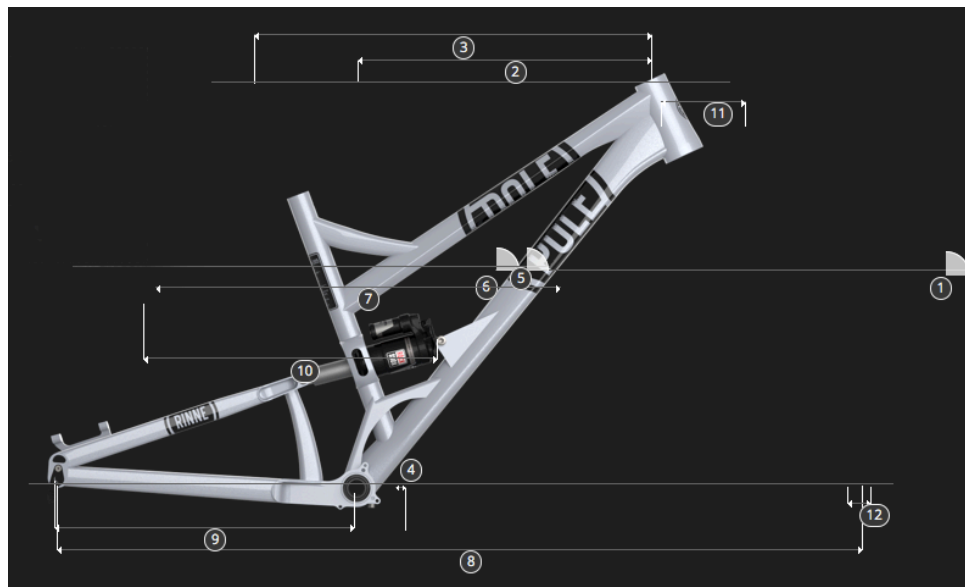
6.2 Mitoitus

Runkojen mitoituksessa on tapahtunut merkittäviä muutoksia viime vuosina. Moderni enduro- ja *all mountain* -käyttöön suunniteltu runko on pitkä, matala, kulmiltaan loiva ja siinä tyypillisesti matala keskiö. Pitkä vaakaputki ja akseliväli tuovat pyörälle vakautta. Erityisesti tämä korostuu kovavauhtisilla osuuksilla. Lisäksi pitkä vaakaputki antaa kuljettajalle enemmän tilaa liikkua pyörän päällä. Akseliväliin yhteydessä oleva taka-

haarukan pituus on myös merkittävä. Mitä lyhyempi takahaarukka, sitä ketterämpi pyörä on käsitellä ja sitä helpommin painopisteen saa halutessaan taakse. Toisaalta liian lyhyt takahaarukka voi tehdä pyörästä turhan nopean käsiteltäväksi. Kyse on aina optimimittojen etsimisestä ja mieltymykset kuljettajien välillä vaihtelevat.

Rungon ohjainkulma on astemitta, jonka emäputki ja siihen kiinnitetty etuhaarukka muodostavat horisontaalilinjan kanssa. Mitä loivempi kulma on, eli mitä pienempi asteluku, sitä vakaampi ohjattava pyörä on. Tämä ominaisuus korostuu jälleen erityisesti suurilla nopeuksilla. Liian loiva ohjainkulma tekee pyörästä kuitenkin samalla vaikeammin ohjattavan, mikä korostuu erityisesti terävissä mutkissa ja hitaammassa maastonkohdissa. Tässäkin on kyse jonkinlaisen optimiarvon löytämisestä, joka yhdistää parhaat puolet molemmista ääripäistä. Nykyisen enduro-käyttöön suunnitellun maastopyörärungon ohjainkulma on tyypillisesti noin 65 astetta. Satulakulma määrittää ajajan paikan pyörän keskiöön, taka- ja etuakseliin nähden satulassa istuttaessa. Nykyinen suuntaus on, että satulapolpan kulma on noin kymmenen astetta ohjainkulmaa jyrkempi. Tämä mahdollistaa painopisteen viemisen tarpeeksi eteen esimerkiksi ylämäkeen poljtaessa niin, että eturenkaalla säilyy riittävästi pitoa.

Keskiön korkeus määrittää pyörän ja kuljettajan massakeskipisteen korkeuden maahan nähden. Mitä matalampi keskiö, sitä vakaampi pyörä on ajaa ja sitä helpompaa kääntyminen tyypillisesti on. Keskiön korkeus ilmoitetaan tyypillisesti mittana, jonka keskiö poikkeaa etu- ja taka-akselin välisestä vaakasuorasta linjasta. Alla esitetyssä esimerkkitapauksessa keskiö sijaitsee 14 millimetriä tämän linjan alapuolella. Liian matala keskiö pienentää maavaraa ja tekee polkemisen kivikkoisissa maastonkohdissa vaikeaksi, sillä polkimet ja kammenpäät osuvat helposti kiviin. Tyypillisesti keskiön korkeus vaihtelee tähän käyttötarkoitukseen suunnitelluissa rungoissa 5-15 millimetrin välillä akselilinjan alapuolella.



Kuva 10. [20]

Rungon koko	S	M	L
1. Ohjainkulma		65°	
2. Reach	424	442	460
3. Reach (efektiivinen)	575	595	615
4. Keskiön korkeus		-14	
5. Satulaputken kulma		69,6°	
6. Satulapolpan kulma (efektiivinen)		76°	
7. Stack	609	613,5	618
8. Akseliväli	1197	1217	1237
9. Takahaarukan pituus		449	
10. Satulaputken pituus	420	450	480
11. Emäputki	120	125	130
12. Etuhaarukan offset		42	
Mitat ovat millimetreinä			

6.3 Jousitus

Koska opinnäytetyön aiheena on maastopyörärungon suunnittelu, niin maastopyörissä käytettävät jousitetut etuhaarukat jätetään käsittelemättä tässä osiossa.

Jousitus on kehittynyt maastopyörissä merkittävästi viimeisen 5-6 vuoden aikana. Hyvän jousituksen tulee olla riittävän matalakitkainen, halutulla tapaa progressiivinen, se ei saa hukata liikaa poljinvoimaa, keskiön ja taka-akselin välinen etäisyys ei saa kasvaa liiaksi joustoliikkeen aikana (engl. *chain growth*) ja jousituksen tulee käyttäytyä ennalta arvattavasti kaikissa tilanteissa. Kaikki nämä ominaisuudet saavutetaan runkojen kinematiikalla, käytetyllä iskunvaimentimella ja sen säädöillä. Tässä työssä käsiteltävän endurokäyttöön suunnatun rungon joustomatka on vakiintunut 130-170 mm välille. Tyypillisimpiä lukemia ovat 140-150 mm välille osuvat ratkaisut. Suuri, esimerkiksi 160 mm ylittävä, joustomatka antaa maastonmuotoja ja epätasaisuuksia hyvin anteeksi ja voi tehdä ajamisesta täten mukavampaa ja nopeampaa. Tyypillisesti kuitenkin kasvaneen jouston mukana poljettavuus kuitenkin huononee, jonka vuoksi pyörä ei ole niin nopea tasamaalla ja ylämäissä kun muut mahdollisesti joustomatkaltaan lyhyemmät ratkaisut.

Joustomatkan määrästä riippumatta on erittäin tärkeää, että runko käyttää olemassa olevan joustomatkan mahdollisimman tehokkaasti. Tällä tarkoitetaan tyypillisesti, että jouston alkumatka on riittävän alkuherkkää, se kantaa kuljettajaa hyvin jouston keskiosassa ja on loppua kohden sopivan progressiivinen niin, että jousitus ei pohjaa kuin erittäin kovissa iskuissa.

6.3.1 Jousitusratkaisu ja kinematiikka

Maastopyörän rungoissa käytetään lukuisia jousitusratkaisuja, joista osa on patentilla suojattu. Yksinkertaisimmillaan jousitus voidaan toteuttaa yksinivelratkaisuna, jossa rungon etukolmio ja takahaarukka ovat yhdistetty toisiinsa yhden nivelen ja iskunvaimentimen kiinnityskohtien välityksellä. Vastaavasti esimerkiksi toisessa ääripäässä ovat niin sanotut nelilinkkusysteemit, joissa on nimensä mukaisesti neljä niveltä. Taka-akseli voi pyöriä kiinteän nivelpisteen ympäri linkkujen välittäessä voiman iskunvaimentimelle tai vaihtoehtoisesti nivelpiste voi olla kelluva, eli se muuttuu joustomatkan aikana. Esimerkki tällaisesta ratkaisusta on Virtual Pivot Point (VPP).

Huomioitavaa jokaisessa ratkaisussa on edellä mainittujen ajo-ominaisuuksien lisäksi iskunvaimentimelle välittyvä vipusuhde, taka-akselin liikerata. Alla on esitelty nä joitakin yleisimpiä ratkaisuja.

6.3.1.1 Yksinivelratkaisu

Yksinivel on yksinkertaisin ja vanhin käytetty maastopyörien jousitusratkaisu. Taka-akseli pyörii yhden nivelen ympäri, joka on tyypillisesti sijoitettu, ratkaisusta riippuen, keskiön ylä- ja etupuolelle. Taka-akselin liikerata on osa ympyrän kaarta. Hyvin suunniteltu yksinivelratkaisu voidaan tehdä kevyeksi, kestäväksi sivusuunnassa jäykäksi ja ennen kaikkea huoltovapaaksi. Modernilla hyvin säädetyllä iskunvaimentimella ajo-ominaisuudet eivät kuitenkaan välttämättä häviä monimutkaisemmille ratkaisuille.

6.3.1.2 Faux-bar

Faux-bar on yksinivelratkaisusta monimutkaisuudessa seuraava ratkaisu. Siinä on edelleen yksi päänivel, jonka ympäri taka-akseli liikkuu takahaarukan välityksellä. Iskunvaimentimelle kohdistuvat voimat välitetään kuitenkin linkkusysteemi välityksellä. Tämä antaa lisää mahdollisuuksia jousituksen suunnitteluun. Esimerkiksi vipusuhdetta ja jousituksen progressiota voidaan säätää näin huomattavasti vapaammin. Faux-bar ja nelilinkku voivat olla ulkonäöltään hyvin saman näköisiä. Erottava tekijä on usein, että nelilinkussa nivel on sijoitettu takahaarukan alaputkessa päänivelen ja taka-akselin välissä.

6.3.1.3 Nelilinkku

Nelinlinkusta yleisin on varmastikin Horst link, jossa nivelpisteen ja taka-akselin yhdistävä takahaarukan alaputki on katkaistu nivelellä lähellä taka-akselia. Tämä muuttaa taka-akselin liikerataa. Lisäksi jousituksen sanotaan reagoivan huomattavasti vähemmän jarrutuksiin. Esimerkiksi yksinivelratkaisuisissa jousituksen sanotaan joskus jäykistävän voimakkaiden jarrutusten aikana. Nelilinkut ja niiden erilaiset variaatiot ovat todennäköisesti yleisin maastopyörien rungoissa käytetty jousitusratkaisu. Suunnittelijalla on

riittävästi vapauksia rungon suunnittelussa, rakenne voidaan pitää kohtuullisen yksinkertaisena ja lisäsi kevyinä.

Faux-bar ja nelilinkku voivat olla ulkonäöltään hyvin saman näköisiä. Erottava tekijä on usein, että faux-barissa lähellä taka-akselia sijaitseva nivelpiste on takahaarukan yläputkissa. Tällä ratkaisulla taka-akselin liikerata on edelleen tasainen ympyrän kaari. Voiman välitys takarenkaalta iskunvaimentimelle voidaan kuitenkin tehdä erilaisin linkkuratkaisuin.

6.3.1.4 Kelluvat nivelpisteet

Kelluvissa tai virtuaalisissa nivelpisteissä nivelpiste muuttuu nimensä mukaisesti jousitomatkan myötä. Tyypillisesti tämä saavutetaan niin, että takahaarukka on kiinni rungon etukolmiossa niin ylä- kuin alanivelpisteestä linkkujen välityksellä. Joissakin ratkaisuisa linkut pyörivät eri suuntiin jouston edetessä. Kelluva nivelpiste antaa entistä enemmän vapauksia rungon ja jousituksen kinematiikan suunnitteluun. Ensimmäinen tällainen ratkaisu oli patentoitu Virtual Pivot Point (VPP). Siinä taka-akselin liikerata on tyypillisesti loivan S-kirjaimen muotoinen. Toinen yleinen ja patentoitu ratkaisu kulkee nimellä DW-link.

Kelluvissa nivelpisteissä on vahvuutena suunnittelijalle jäävä vapaus. Jousitukseen voidaan luoda samanaikaisesti ominaisuuksia, jotka eivät muilla yksinkertaisemmillä ratkaisuilla ole mahdollisia. Huonoa puolena ovat mahdollinen monimutkaisuus, useiden nivelpisteiden mukana tuleva paino ja mahdollisesti tiheämpi huoltoväli yksinkertaisempiin ratkaisuihin verrattuna.

6.4 Laakerointi

Täysjoustorungoissa on käytetty yleensä kahta laakerityyppiä: urakuula- tai liukulaakereita. Jälkimmäisten käyttö on kuitenkin vähentynyt huomattavasti, koska ne vaativat tyypillisesti paljon huoltoa puhdistuksen ja voitelun muodossa. Urakuulalaakereissa ei ole tätä haittapuolta. Hyvin mitoitettu urakuulalaakeri voikin kestää useita vuosia aktiivisessakin käytössä. Halkaisijaltaan isoimmat laakerit löytyvät usein rungon päänivelestä, jossa laakerin sisähalkaisija on tyypillisesti välillä 12-25 mm. Linkkuihin ja muihin pienempiin niveliin riittää usein selvästi pienemmät laakerit. Mitä suurempi laakerikoko, sitä jäykempi ja kestävämpi rakenteesta voidaan rakentaa. Haittapuolena suurista laakereista tulee kuitenkin jonkinasteinen massan lisäys.

Yksinkertaisimmillaan rungon jousitus voidaan toteuttaa yksinivelratkaisuna vain kahdella laakerilla. Toisessa ääripäässä ovat monimutkaisemmat ratkaisut, kuten esimerkiksi VPP. Parhaimmillaan (tai pahimmillaan) näissä ratkaisuisa kaikkien laakereiden uusiminen voi tarkoittaa jopa yli kymmenen urakuulalaakerin hankkimista, jotka eivät ole kaikki edes välttämättä helposti löydettävää standardikokoa. Arvatenkin tämä tarkoittaa, että tällaisen täysihuollon suorittaminen on myös usein hintavaa.

6.5 Massakeskipiste

Mitä matalammalla massakeskipiste on, sitä vakaampi kappale on. Toisin sanoen tasapainoasemasta poikkeaminen vaatii suuremman voiman. Maastopyörän kohdalla matala massakeskipiste tekee pyörän tyypillisesti vakaammaksi ajaa ja helpottaa erityisesti mutkien ajamista. Ideaalitulanteessa iskunvaimennin ja suurin osa linkuista saataisiin sijoitettua keskiön päälle tai sen läheisyyteen. Usein kuitenkin tilarajoitukset iskunvaimentimen ja linkkujen sijoittelussa tekevät tämän hankalaksi. Lisäksi keskiön ja vaa-
kaputken yhdistävä satulaputki tulee halkaista jostakin kohtaa, jotta iskunvaimentimelle ja sitä käyttäville linkuille saadaan riittävästi tilaa.

Matala massakeskipiste on haluttava ominaisuus rungon suunnittelussa, mutta sitä pidetään harvoin pääprioriteettina. Jos iskunvaimennin ja mahdolliset linkut ovat mahdollista sijoittaa lähelle keskiötä ja mahdollisesti vielä suoraan sen yläpuolelle, niin tähän ratkaisuun on hyödyllistä pyrkiä sillä oletuksella, että se ei aiheuta muita huomattavia kompromisseja.

6.6 Paino

Koska kaikissa pyöräilyn alalajeissa kulkuvälinettä liikuttaa painovoiman lisäksi vain kuljettajan tuottama oma lihasvoima, pyörästä halutaan tehdä mahdollisimman kevyt. Erityisesti tämä pätee pyöriviin massoihin eli kiekkoihin ja renkaisiin, mutta rungon massa on myös yksi huomattava tekijä pyörän painossa. Mallista riippuen ilmajousella toteutettu iskunvaimennin painaa 350-650 g. Endurokäyttöön suunnatun rungon kokonaispaino iskunvaimentimen, laakerien, akseleiden ja tarvittavien kiinnityspulttien kanssa sijoittuu yleensä 2,5-3,5 kg välille. Keveimmät rungot ovat valmistettu hiilikuidusta, mutta hyvin suunnitellulla ja valmistetulla alumiinirungolla päästään hyvin lähelle samoja lukemia. Luonnollisesti rungon painoon vaikuttaa käytetty jousitusratkaisu. Mitä enemmän niveliä, sitä enemmän laakereita, linkkuja, akseleita ja pultteja, jotka tuovat nopeasti lisää painoa runkoon.

Rungon ja pyörän paino on noussut kenties viime vuosina liiankin suureen asemaan. Kevyempi pyörä on usein painavaa parempi olettaen, että kaikki muut ominaisuudet ovat samalla tasolla. Paino on kuitenkin vain yksi monista muuttujista, mikä vaikuttaa pyörän ajettavuuteen. Erityisen siitä tekee seikka, että siihen on helppo tarttua. Mitä pienempi lukema on, yleensä sitä parempi. Raja tulee jossakin kuitenkin vastaan, sillä liian kevyt pyörä menettää vakautensa kovavauhtisissa radankohdissa ja hypyissä. Lisäksi koko pyörän kestävyys nousee nykytekniikalla ja materiaaleilla kysymysmerkiksi, jos rungon tai koko pyörän paino kevenee nykyisestä huomattavasti.

6.7 Jäykkyys

Rungon jäykkyys on paljon puhuttu aihe, joka jakaa edelleen mielipiteitä. Yhdestä asiasta ollaan kuitenkin varmoja – rungon tulee olla sivusuunnassa riittävän jäykkä. Mikä on kuitenkin oikea määrä? Siihen on mahdotonta vastata yksiselitteisesti ja se riippuu rungon mitoituksesta, pyörän käyttötarkoituksesta, kuljettajan painosta ja radasta. Jo tässä vaiheessa on tärkeää mainita, että kiekot ovat toinen merkittävä, ellei usein jopa suurempi, sivusuuntaisen jouston lähde. Hiilikuitu on materiaalina erinomainen juurikin jäykkyyden osalta. Kuitukerrostojen määrästä, kuitujen suunnasta, valmistustekniikasta ja suunnittelijan taidosta riippuen rungolle voidaan saada haluttuihin suuntiin juuri halutut jäykkyysominaisuudet. Esimerkki tästä olisi, että runko voisi myötää hieman pystysuunnassa jousituksen lisäksi, mikä voi tehdä mahdollisesti ajotuntumasta hieman mukavamman ja toisaalta olla samaan aikaan sivusuunnassa erittäin jäykkä.

Sivusuunnassa liikaa joustava runko tuntuu useimpien kuljettajien mielestä ajossa liian löysältä, se ei anna maastonmuodoista palautetta ja pyörä hukkaa nopeutta käännoksissä rungon joustoon. Samalla kuitenkin hieman sivusuunnassa joustava runko voi olla esimerkiksi hyvin kivikkoisissa radankohdissa jopa hieman nopeampi, sillä etu- ja takarenkaalla on mahdollisuus elää hieman toisiinsa nähden. Hondan sanottiin uskoneen juuri tähän ominaisuuteen merkin kilpaillessa alumiinista valmistetulla RN01-rungolla alamäkiajon maailmancupissa vuosina 2002-2007.

6.8 Toleranssit ja mitoitus

Maastopyörän rungon valmistukseen tarvittava tarkkuus on suurempi, kuin usein voisi ensioletukselta ajatella. Ainakin seuraaviin asioihin tulee kiinnittää huomiota:

- Ohjain- ja satulaputken kulma
- Emäputki on suorassa pystysuunnassa
- Emäputken halkaisija ohjainlaakerin kiinnitystä varten
- Keskiö on kohtisuorassa muuhun runkoon nähden
- Etu- ja takapyörä ovat samassa linjassa
- Rungon nivelien laakeripesien halkaisijat
- Kaikki nivelet ovat samassa linjassa
- Jarrusatulan korvakkeiden mitoitus
- Runko on suora etupäästä takahaarukkaan
- Hiilikuidun valmistukseen liittyvät seikat ja toleranssit

Satulaputken ja erityisesti ohjainkulma vaikuttavat merkittävästi rungon ajo-ominaisuuksiin. Mitä loivempi ohjainkulma on, eli mitä pienempi asteluku on, sitä rauhallisempi pyörä on ohjata. Tämä tulee kuitenkin käänntöpuolen kanssa ja tietyn pisteen jälkeen pyörä ei käänny enää hidastuvauhtisissa kohdissa ja eturengas alkaa harrastuskielellä ”puskemaan” helposti ja menettää sen vuoksi pitonsa. Tyypillisesti ohjainkulma on

tähän käyttöön suunnitelluissa rungoissa 64-66 astetta. Jotkut valmistajat ilmoittavat ohjainkulman asteen kymmenesosan tarkkuudella. Kokenut kuljettaja pystyy usein huomaamaan noin puolen asteen eron ohjainkulmassa. Laadukkaassa rungoissa ohjainkulma on tyypillisesti noin asteen kymmenesosan sisällä ilmoitetusta.

Emäputken suuntaaminen mahdollisimman tarkkaan pystysuoraan linjaan on äärimmäisen tärkeää. Tällä tarkoitetaan, että edestäpäin tarkasteltuna runkoon kiinnitetty etuhaarukka ja eturengas ovat täysin vertikaalilinjassa pyörän ollessa suorassa. Joidenkin asiantuntijoiden mielestä pienetkin poikkeamat tästä vaikuttavat pyörän käyttäytymiseen huomattavan negatiivisesti. Tähän vaatimukseen liittyy myös, että eturunko, takahaarukka ja nivelpisteet ovat suunnattuna oikein, jotta takapyörä on samassa linjassa etupyörän kanssa. Tällä tarkoitetaan niin sivusuuntaista siirtymää kuin mahdollisesti pystysuorasta poikkeavaa linjaa. Kummatkin poikkeamat pitäisi minimoida.

Täysjoustorungossa on tyypillisesti vähintään neljä laakeripesää. Ne ovat emäputken ylä- ja alaosa sekä yksinivelrungossa jousituksen nivelpiste molemmilla puolin runkoa. Jousitusratkaisuisissa, joissa on enemmän niveliä laakeripesiä on luonnollisesti enemmän. Laakeripesien suuntaus tulee olla arvatenkin tarkkaa ja samoin niiden halkaisijan. Laakerikoosta riippuen halkaisijan olisi hyvä olla noin 0,05-0,1 mm sisällä halutusta. Kun hiilikuiturungot olivat uusia, niin laakeripesät olivat usein erikseen alumiinista työstettyjä komponentteja, jotka kiinnitettiin muuhun runkoon valmistuksen yhteydessä. Hiilikuidun valmistustekniikoiden kehittyessä tästä on kuitenkin suurimaksi osaksi luovuttu ja myös laakeripesät ovat hiilikuitua.

Viimeisenä yksityiskohtana on takajarrun korvakkeiden mitoitus, jotta jarrusatula saadaan sijoitettua oikein jarrulevyyn nähden. Korvakkeiden reiät tulevat olla säteittäissuunnassa oikeilla kohdilla ja lisäksi koko korvakkeen sijainti tulee olla säteittäissuunnassa oikea. Jälkimmäiseen, eli säteittäissuuntaan on tehty säätövaraa tekemällä jarrusatulan kiinnitysreiät ovaalin muotoisiksi.

Valmistusprosessiin liittyvät mitoitukset nousevat tärkeäksi tekijäksi, jos runko valmistetaan esimerkiksi useasta osasta moduulityyppisesti. Esimerkiksi emäputken, keskiön ja satulatolpan alueet voivat olla erillinen moduuli, jotka liitetään toisiinsa putkimaisilla rakenteilla. Näiden rakenteiden pituutta ja mittoja muuttamalla voitaisiin valmistaa useita eri runkokokoja ja samalla pienentää käytettävien muottien määrää. Liimaliitosten toleranssit ovat kuitenkin tärkeä osa mitoituksessa. Tyypillinen ”suunnittelijan nyrkkisääntö” tällaisissa rakenteissa on 0,2 mm toleransseihin pyrkiminen ja, että 0,5mm välystä ei tulisi ylittää.

6.9 Materiaalien liitoskohdat

Kun hiilikuitu oli maastopyörän runkomateriaalina suhteellisen uusi, laakeripesät, keskiö, ja takahaarukan dropoutit olivat muuta materiaalia, yleensä alumiinia. Tyypillisesti näissä kohdissa käytettiin alumiinia, koska se on kevyttä, edullista ja helppoa työstää. Korroosio voi tulla alumiinin ja hiilikuidun liitoksissa kuitenkin ongelmaksi, minkä

johdosta liitokseen lisätään jotakin muuta materiaalia, yleensä lasikuitua. Hiilikuidun valmistustekniikoiden kehittyttyä näistä joskus ongelmallisista liitoskohdista on kuitenkin enimmäkseen luovuttu. Laadukkaissa rungoissa laakerit sovitetaan nykyään suoraan rungon hiilikuituisiin laakeripesiin. Myös dropoutit saatetaan valmistaa kokonaan hiilikuidusta. Poikkeuksena ovat keskiöt, jos niissä käytetään edelleen perinteistä kiinnitystä kierteiden avulla. Hiilikuitu ei sovellu hyvin kierteytettäväksi, jonka vuoksi näissä kohdoin käytetään usein alumiinista valmistettua holkkia, joka kiinnitetään runkoon.

Kahden eri materiaalin liitoskohdat ovat usein ongelmallisia, joten usein onkin hyödyllistä, että niiden lukumäärä saadaan minimoitua. Kirjoittaja on itse nähnyt ainakin yhden hiilikuiturungon, jossa alumiinista valmistettu keskiöön kiinnitetty holkki oli irronnut normaalin käytön seurauksena. Tällainen runko on käyttö- ja korjauskelvoton.

6.10 Huoltoväli ja huollettavuus

Maastopyörät, kuten kaikki muutkin tekniikka sisältävät ja epäpuhtauksille altistuvat laitteet edellyttävät säännöllistä huoltoa, jotta ne toimivat suunnitellusti mahdollisimman pitkään. Mitä enemmän rungossa on niveliä ja linkkuja, sitä enemmän ja useammin runko tarvitsee tyypillisesti huoltoa. Jotkut jousitusratkaisut saattavat vaatia puhdistusta jokaisen pitkän märissä tai kuraisissa olosuhteissa tehdyn ajokerran jälkeen. Vastaavasti hyvin suunniteltua ja yksinivelratkaisulla toteutettu runko saattaa toimia moitteettomasti jopa kaksikin ajokautta tai enemmän ilman mainittavia huoltotoimenpiteitä. Urakuula-laakerit ovat yleisin laakerointiratkaisu ja ne ovat tyypillisesti hyvinkin huoltovapaita ja saattavat toimia kauden tai kaksikin hyvinkin vaativissa käyttöolosuhteissa.

Yksi merkittävä seikka rungon suunnittelussa on rungon huollettavuus. Kuinka paljon runkoa pitää purkaa, jotta tarvittavat huoltotoimenpiteiden suorittamiseksi? Onnistuuko se yksin vai tarvitseeko siihen jopa kaksi henkilöä? Ideaalitapauksessa avattavia pulteja ei ole montaa ja kriittisiin rakenteisiin pääsee helposti käsiksi.

Iskunvaimentimelle pääsy ja säädettävyyys on viimeinen, mutta silti huomion arvoinen seikka. Onko iskunvaimennin sellaisessa paikassa, että kaikkiin säätöruuveihin pääsee helposti käsiksi? Tästä ominaisuudesta voidaan mahdollisesti tinkiä, jos käytettävää jousitusratkaisua ei pystytä toteuttamaan muuten ja se tarjoaa muita merkittäviä etuja. Hyvä esimerkki suunnittelusta, jossa tämä kriteeri täyttyi erittäin huonosti, oli erään suuren valmistajan alamäkiajoon suunniteltu runko, jossa iskunvaimenninta ei pystynyt säätämään ilman sitä käyttävän alalinkun irrottamista. Tämän johdosta oikeiden säätöjen hakeminen on tarpeettoman vaikeaa.

6.11 Käyttöikä

Runkojen ja kokonaisten pyörien kohdalla puhutaan harvoin käyttöiästä. Valmistajat antavat usein lainmukaisen täyden vuoden takuun, joka kattaa valmistus- ja materiaali-

viat. Tämän lisäksi saatetaan tarjota 2-3 vuoden päähän ulottuvaa niin kutsuttua crash replacement -ohjelmaa, jossa rikki menneen rungon voi korvata uudella huomattavasti listahintaa pienemmällä summalla. Hyvin suunnitellun rungon ei pitäisi hajota aktiivisemmassakaan käytössä vielä 2-3 vuoden jälkeen. Aktiivisimmat harrastajat vaihtavat usein tässä vaiheessa rungon tai koko pyörän vapaaehtoisesti, jos markkinoille on tullut uutuuksia, jotka tarjoavat uusia ominaisuuksia.

Oletuksena voisi sanoa, että tyypillisesti enduro-käyttöön suunnitellulta rungolta odotetaan vähintään kolmen vuoden käyttöikää. Todellisuudessa se voi ulottua, etenkin kevyemmässä käytössä, huomattavasti pidemmällekin. Joissakin tapauksissa runko saattaa kestää jopa eliniän.

6.12 Hinta

Kaikki huipputason urheiluvälineet, johon käytetään paljon suunnittelutunteja, hyviä materiaaleja ja monimutkaisia valmistusprosesseja ovat arvokkaita. Kun tähän lisätään vielä valmistajan ja väliportaiden katteet, maastopyörän rungon kohdalla hinta nousee tuhansiin euroihin. Todennäköisesti noin 90 % markkinoilla olevista tähän käyttötarkoitukseen valmistetuista hiilikuiturungoista osuu 1500-3000 € hintahaarukkaan. Vaihteluväli on suuri, mikä on selitettävissä erilaisilla valmistusprosesseilla, työn ja materiaalin laadulla, katteilla sekä myyntiketjun rakenteella. Esimerkiksi suoraan asiakkaille myyvä valmistaja voi myydä tuotteitaan edullisemmin kuin toinen valmistaja, jolla on jälleenmyyntijakeluketju tätä varten.

Hiilikuiturunkojen kohdalla on edelleen ongelmallista päätellä miten laatu ja hinta kohtaavat? Esimerkiksi Aasiassa valmistetut ja nimettöminä myytävät rungot voivat olla vain murto-osan tunnettujen merkkien hinnasta. Päällisin päin molemmat rungot saattavat vaikuttaa yhtä laadukkailta, sillä maalipinnalla voi peittää paljonkin rakenteessa olevia virheitä. Asiaa ei voi selvittää varmasti kuin tutustumalla valmistusprosessiin omakätisesti tai altistamalla rungon rasiustesteille laboratoriossa. Kumpikaan vaihtoehto ei ole kovin realistinen keskivertokuluttajalle.

7 RASITUS JA LUJUUSVAATIMUKSET

Maastopyörärungot altistuvat normaalissa käytössä huomattaville voimille, joista aiheutuvia rasitusyklejä niiden tulee kestää huomattavan suuri määrä. Ominaisuuksia, joita tulee ottaa huomioon rungon rakenteen suunnittelun lisäksi ovat käytetyn materiaalin määrä eri rungon alueilla, lujuus, jäykkyys, tiheys ja väsyminen.

7.1 Suurimmalle rasitukselle joutuvat kohdat

Tyypillisesti suurimmalle rasitukselle altistuvat rungon emäputken ja keskiön alue, sekä mahdollisesti nivelpisteiden ympäristö. Tämä on erityisesti huomioitava silloin, jos nivelpisteisiin kohdistuu suuria voimia takapään jousituksen pohjatesa. Joissakin rakenteissa voimat voivat olla jopa 8 000-10 000 N niveltä kohden. Luonnollisesti näin suuria voimia olisi hyvä välttää ja jos niitä ilmenee, niin se tulisi huomioida rakenteen suunnittelussa ja materiaalivahvuuksissa. Alla olevissa kuvissa on keskiöstä rikkoutunut YT Capra- runko ja emäputkesta haljennut Canyonin valmistama runko.



Kuva 11. [18]



Kuva 12. [22]

7.2 Turvallisuus

Rungon ja komponenttien testaaminen tarkkaan kontrolloiduissa laboratorioolosuhteissa on tärkeää. On yksi asia tietää, että kuinka monta rasisussykliä runko kestää tietyllä kuormalla, mutta sen lisäksi äärimmäisen tärkeä tieto on, että miten runko rikkoutuu. Miten vakava rikkoutuminen on ja missä kohtaa runkoa se todennäköisimmin tapahtuu? Halkeako runko jostain kohtaa vai onko hajoaminen niin katastrofaalinen, että jokin rakenne menee poikki? Luonnollisesti katastrofaalisia hajoamisia halutaan välttää ja ideaalitulanteessa runko vain murtuisi ja säilyttäisi entisen muotonsa. Tällaista hajoamista voisi nimittää kohtuullisen turvalliseksi. Jos rikkoutumistilanteessa esimerkiksi emäputki repeytyy irti, se on merkittävä turvallisuusriski.

Kaikki rakenteet hajoavat, kun niitä kuormitetaan tarpeeksi. Rungon rikkoutumista voidaan mallintaa mm. FEM-analyysillä, mutta rasisuskokeiden tekeminen enemmän kuin yhdellä rungolla on toivottavaa. Näin saadaan selville, että millaista kuormitusta runko kestää ja miten rikkoutuminen lopulta tapahtuu.

Hiilikuiturunkojen kohdalla on edelleen ongelmallista päätellä, että miten laatu ja hinta kohtaavat. Entä kuinka turvallinen runko on? Esimerkiksi Aasiassa valmistetut ja nimetöminä myytävät rungot voivat olla vain murto-osan tunnettujen merkkien hinnasta. Päällisin päin molemmat rungot saattavat vaikuttaa yhtä laadukkailta, sillä maalipinnalla voi peittää rakenteessa olevia virheitä. Asiaa ei voi selvittää varmasti kuin tutustumalla valmistusprosessiin omakätisesti tai altistamalla rungon rasiustesteille laboratoriossa. Kumpikaan vaihtoehto ei ole kovin realistinen keskivertokuluttajalle. Yksi vaihtoehto on tietenkin vain ottaa riski ja ajaa rungolla ja tarkkailla, että ilmeneekö siinä hälyttäviä merkkejä, kuten murtumia tai asiaan kuulumatonta ääntä. Edelleen usein sanottu neuvo on, että laatu, turvallisuus ja hinta kulkevat käsi kädessä. Mitä arvokkaampi runko on, sitä laadukkaampia materiaaleja ja enemmän suunnittelutunteja siihen on todennäköisesti käytetty.

8 MITOITUS

Hiilikuiturakenteiden mitoituksessa käytetään usein kolmivaiheista mitoitusprosessia: 1) Käytettävien hiilikuitutyypin alustava määrittely. 2) Rakenteen globaalit analyysit. 3) Rakenneyksityiskohtien mitoitukset.

Rakenteessa käytettävät laminaatit määritellään alustavasti rakenteen eri kohtiin arvioitujen kohdistuvien kuormien perusteella. Lisäksi vastaavan alumiinista valmistetun rungon lujuus- ja jäykkyyssarvoja voidaan käyttää referenssinä niin, että tavoitteena on pyrkiä vähintään samoihin tai mahdollisuuksien mukaan jopa parempiin arvoihin. Tässä vaiheessa on joskus tarpeen lähteä liikkeelle vähemmän tieteellisellä menettelytavalla ja tehdä rakenne, joissa kuitukerrokset ja -määrät perustuvat parhaisiin mahdollisiin arvioihin. Mitä pidemmälle suunnittelussa mennään, sitä enemmän näitä valintoja pystytään optimoimaan saatujen tulosten perusteella. Mitoitus- ja suunnitteluprosessi on esitetty vaiheittain alla hierarkisesti:

- Geometria ja rungon muoto sekä design
- Kuitukerrosten määrittely
- Rakenneanalyysit
- Kuormien määrittely
- Koko rakenteen tarkistus – paluu edeltäviin vaiheisiin tarvittaessa
- Yksityiskohtainen suunnittelu ja tarkastaminen
- Koko rakenteen tarkastaminen – paluu edeltäviin vaiheisiin tarvittaessa
- Verifiointianalyysit

9 LUJUUSLASKENTA

Komposiittirakenteiden mekaaniset mallit pohjautuvat samoihin lähtökohtiin kuin perinteisessäkin koneenrakennuksessa alumiinin ja teräksen kanssa työskennellessä. Rakennetarkasteluissa ja lujuuslaskennoissa voidaan toisinaan tehdä oletus, että materiaali on homogeenista ja käyttäytyy lineaariselastisesti. Todellisuudessa tilanne on kuitenkin harvoin tällainen, mutta tarkasteluissa nämä olettamukset ovat usein riittävät.

Homogeenisuus tarkoittaa, että materiaali itsessään ja myös materiaaliominaisuudet ovat kaikkialla materiaalissa paikasta kuormituksen suunnasta riippumatta samanlaiset. Komposiittien kohdalla näin tapahtuu vain harvoin. Komposiittirakenteet ovat lähtökohtaisesti aina epähomogeenisia, mutta rakenteeltaan yksinkertainen komposiitti voidaan ajatella makroskooppisella tasolla homogeeniseksi. Esimerkiksi yhden kuitukerroksen sisällä materiaaliominaisuudet voidaan ajatella jokaisessa saman kerroksen pisteissä samalla tapaa homogeeniseksi.

Lineaariselastinen käyttäytyminen tarkoittaa, että muodonmuutokset materiaalissa kasvavat suoraan verrannollisesti kuormituksen määrään nähden. Mitä suurempi kuormitus, sitä suurempi deformaatio ja päinvastoin. Tämä tehdään sillä oletuksella, että kuormitus on riittävän alhainen ja lyhytaikainen. Komposiittien tapauksessa materiaalin käyttäytyminen on lineaariselastista lähes murtorajaan asti.

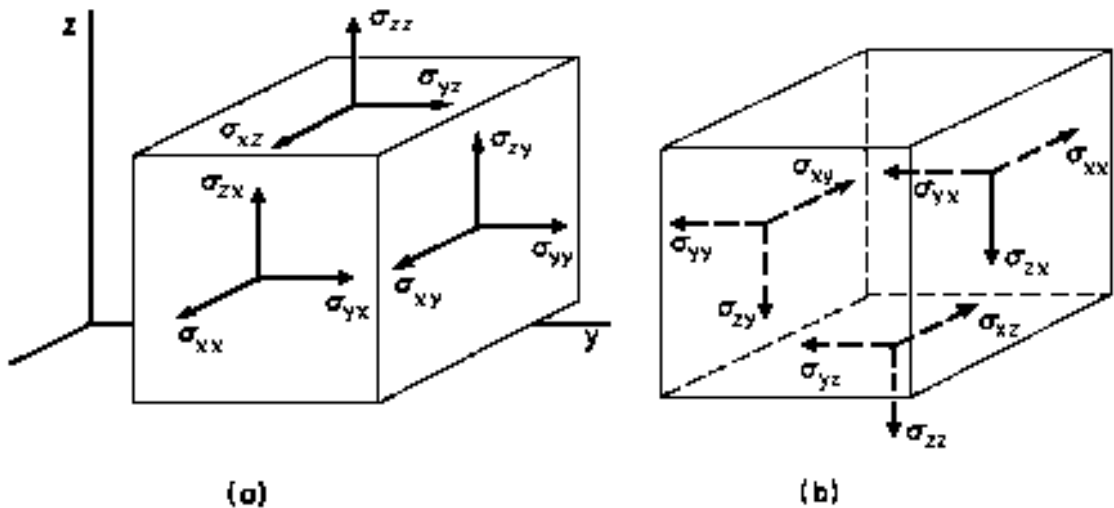
9.1 ESAComp-ohjelmisto

Suomalainen ESAComp-ohjelmisto on laajalti käytetty hiilikuitu- ja komposiittirakenteiden mallintamisessa. Se on saanut alkunsa Helsingin Teknillisen Yliopiston alaisessa (nykyään Aalto Yliopisto) projektissa, jonka tavoitteena oli yhdistää komposiittianalyysit ja suunnittelutyökalut yhden käyttöliittymän alle. Projekti käynnistettiin vuonna 1998 ja Componering Inc. perustettiin kaksi vuotta myöhemmin pelkästään sen edistämiseksi.

ESAComp on ominaisuuksiltaan monipuolinen ja soveltuu siten niin alustavaan rakenteiden suunnitteluun kuin myöhemmissä vaiheissa yksityiskohtaisempaan työskentelyyn ja rakenteiden optimointiin. Erityinen vahvuus ohjelmistolla on sen laaja materiaalikirjasto ja monipuoliset ominaisuudet, jotka liittyvät komposiittirakenteiden kerrokseen, kuitujen suuntauksiin ja mikromekaanisiin analyyseihin.

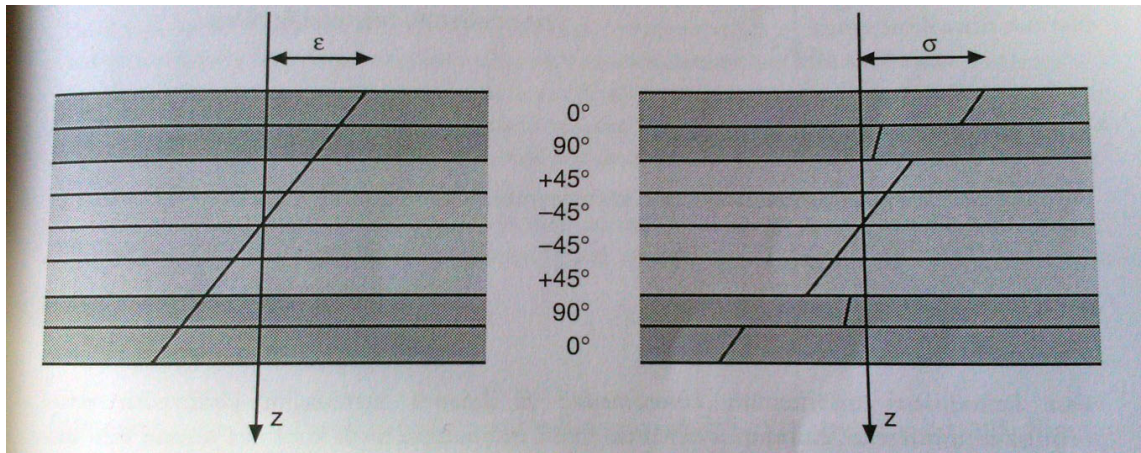
9.2 Jännitykset ja venymät

Materiaalin kuormitustilaa kuvataan yleisesti jännitysten avulla. Se määritellään jännityskuormana pinta-alayksikköä kohti, jotka jaetaan veto- ja puristuskuormitusten aiheuttamiin normaalijännityksiin sekä leikkausvoimien aikaansaamiin leikkausjännityksiin. Materiaalin jännitystila kuvataan kuudella jännityskomponentilla xyz-koordinaatistossa. Jännitystila esitetään jännityskomponenttien määrittelemänä jännitysvektorina. Kuormitus aiheuttaa materiaalin muodonmuutoksia, joita kuvataan normaalivenyminä ja liukuminä.



Kuva 13. [23]

Laminaattirakenteessa todennukaisen jännitystilän kuvaaminen ei ole yhtä yksinkertainen tehtävä kuin homogeenisten ja isotrooppisten materiaalien kohdalla. Kerrosten paksuus, suunnat ja punosten muodot vaikuttavat kaikki jännitysten esiintymiseen. Tarkastelua yksinkertaistetaan usein kerrokset homogeeniseksi makroskooppisella tasolla. Tästä johtuen lineaariselastisesti käyttäytyvissä kerroksissa jännitys on tietyn kuormituksen alla epäjatkuva, eli se voi muuttua kerrosten rajapinnassa. [24]



Kuva 14. Symmetrisen laminaattirakenteen tasovenymä ja tasojäännitys taivutuksessa. [24]

10 LAMINAATTIEN FEM-ANALYYSI

Työtä varten tehtiin ESAComp-ohjelmistolla iteratiivisia lujuuslaskelmia. Tavoitteena oli saada alustava käsitys, että miten kuitukerrosten, tyyppi, määrä ja suuntaus vaikuttavat koekappaleen muodonmuutokseen vakiosuuruisella kuormalla. Alun perin tavoitteena oli tehdä mallintaa rungon osa, esimerkiksi emäputken tai keskiömuhvin alue ja tehdä tarkastelut näille rungon osille. Tämä vaihtoehto osoittautui kuitenkin toistaiseksi haastavaksi työksi mm. tarvittavan ohjelmiston puutteen johdosta.

10.1 Mallinnettu laminaatti ja materiaaliominaisuudet

FEM-laskennassa käytettiin suorakulmion muotoista laminaattia, joka oli mitoiltaan 120 x 40 mm. Laminaatin paksuus riippui kuitukerrosten määrästä. Yhden kuitukerroksen paksuudeksi määriteltiin 0,26 mm, joka on tällaisessa käyttökohteissa yleinen arvo.

10.2 Mallit

FEM-laskentaa varten tehtiin kuusi eri mallia, joiden kerrosten lukumäärät vaihtelivat 6-11 kappaleen välillä. Tilanteen yksinkertaistamiseksi analyyseissä käytettiin vain kahta eri kuitutyyppiä. Jo pelkästään tavallisimpia intermediate-, high- ja ultra high modulus -kuituja käyttämällä vaihtoehtoja olisi käytännössä lähes rajaton määrä. Laskentaa ja arviointia rajattiin käyttämällä pelkästään high- ja ultra high modulusta vastaavia kuituja. Tarkasteltavien laminaattien kuitukerrosten lukumäärät ja -suunnat ovat runkovalmistajien ilmoittamia.

Alla on taulukoituna kaksi tarkastelussa käytettyä kuitutyyppiä. High modulus -kuitua vastaa ESAComp-ohjelmistossa nimellä HS Carbon -materiaali ja Ultra High Modulus -kuitua vastaavasti Cytec Thornel Carbon Fibers P-75S -materiaali.

Materiaaliominaisuudet ESAComp-ohjelmistossa		
	High modulus (HMCF)	Cytec Thornel Carbon fibers P-75S (UHCF)
E_L	230 Gpa	517 Gpa
E_T	28 Gpa	8,96 Gpa
G_LT	50 Gpa	13,1 Gpa
nu_LT	0,23	0,23
E_1	135	135
E_2	10	10
G ₁₂	5	5

G ₂₃	3,7	3,7
nu ₁₂	0,3	0,3

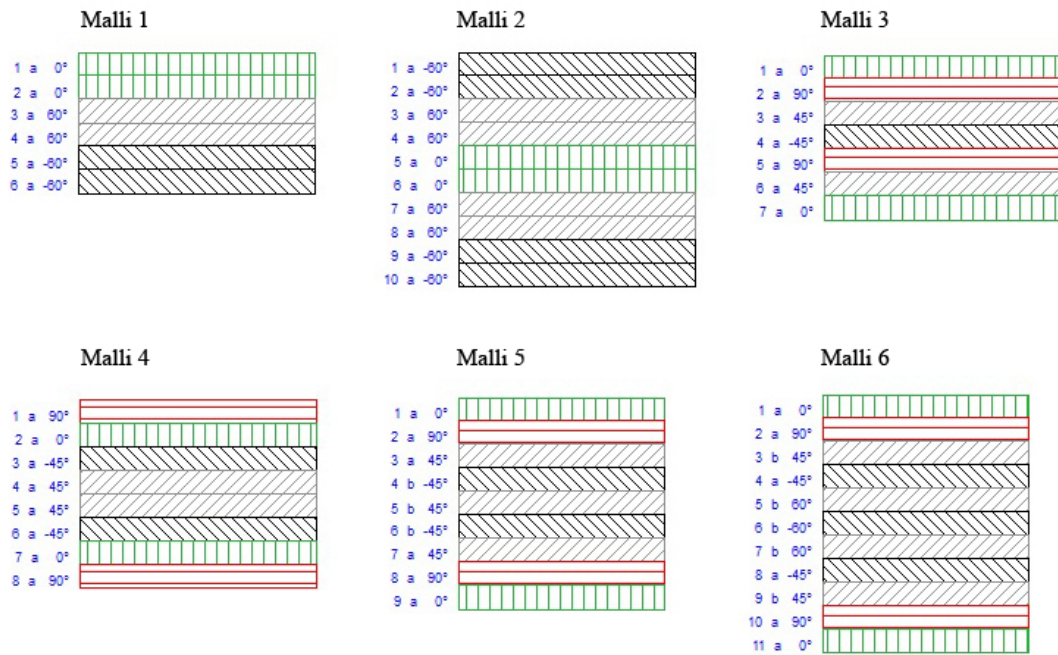
Alla on taulukoituna käytettyjä laminaattimalleja. Mallit 1-4 koostuvat kaikki High modulus -kuidusta kun taas malleissa 5-6 on molempia yllä taulukoituja kuitutyyppejä. Kuitukerrostojen suunta on merkittynä erikseen jokaiseen malliin ja malleissa 5-6 on käytetty seuraavia lyhenteitä kerrostojen kuitutyypeistä: HMCF merkitsee high modulus -kuitua ja UHCF ultra high modulus -kuitua.

Nimi	Malli 1	Malli 2	Malli 3	Malli 4	Malli 5		Malli 6	
	Suunta	Suunta	Suunta	Suunta	Suunta	Tyyppi	Suunta	Tyyppi
1. kerros	0	-60	0	90	0	HMCF	0	HMCF
2. kerros	0	-60	90	0	90	HMCF	90	HMCF
3. kerros	60	60	45	-45	45	HMCF	45	UHCF
4. kerros	60	60	-45	45	-45	UHCF	-45	HMCF
5. kerros	-60	0	45	45	45	UHCF	60	UHCF
6. kerros	-60	0	90	-45	-45	UHCF	-60	UHCF
7. kerros	-	60	0	0	45	HMCF	60	UHCF
8. kerros	-	60		90	90	HMCF	-45	HMCF
9. kerros	-	-60	-	-	0	HMCF	45	UHCF
10. kerros	-	-60	-	-	-	-	90	HMCF
11. kerros	-	-	-	-	-	-	0	HMCF

Mallinnettujen laminaattien seinämävahvuudet ja massat ovat taulukoituna alla.

Nimi	Vahvuus	Massa
Malli 1	1,56 mm	13 g
Malli 2	2,6 mm	22 g
Malli 3	1,82 mm	16 g
Malli 4	2,08 mm	18 g
Malli 5	2,34 mm	20 g
Malli 6	2,6 mm	25 g

Mallinnettujen laminaattien poikkileikkaukset näyttävät seuraavilta.



Kuva 15.

10.3 Kuormitukset

FEM-laskennassa käytettiin kuormituksena tarkasteltavan laminaattien keskelle kohdistuvaa pistekuormaa, joka oli suuruudeltaan 100 N. Laminaatti oli tuettu pituussuunnaltaan molemmista päistä tuilla, jotka rajoittivat sen liikesuuntaan jokaisessa kolmessa tasossa. Lisäksi laminaateille tehtiin tarkastelu, jossa niihin kohdistettiin 1 kN suuruinen voima pituussuunnassa.

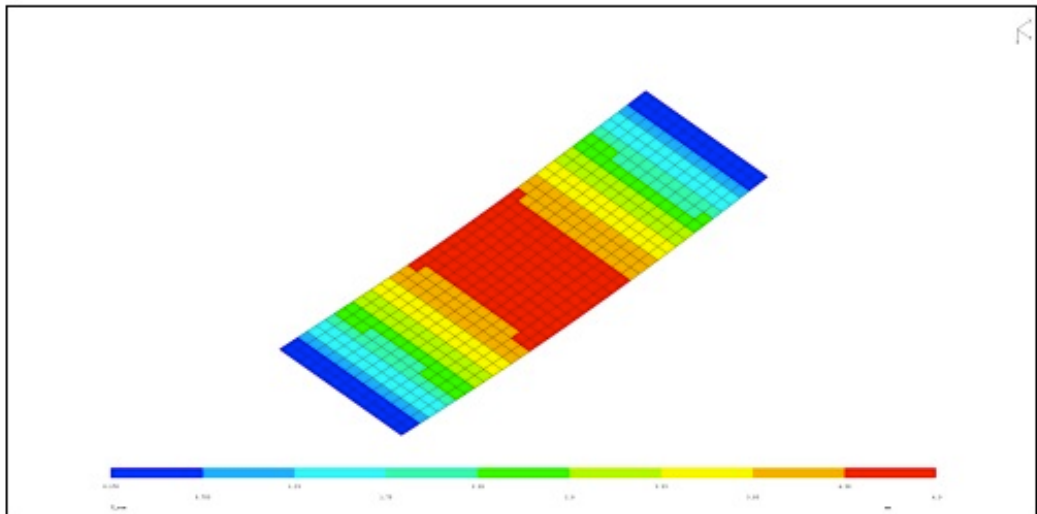
10.4 Tulokset

Tulokset FEM-laskennasta ovat taulukoituna ohessa.

	Muodon muutos, piste-kuorma (mm)	Muodon muutos, veto pituussuunnassa (mm)
Malli 1	5,43	0,00337
Malli 2	4,9	0,00194
Malli 3	1,91	0,0049
Malli 4	2,36	0,00221
Malli 5	1,04	0,00194
Malli 6	0,635	0,00169

Tuloksista on havaittavissa, että kuitukerrosten määrän lisäksi niiden suuntaus ja tyyppi vaikuttaa merkittävästi laminaatin jäykkyyteen pistekuormituksessa. Esimerkiksi malli 1:n ja malli 6:n välillä muodonmuutos on 8-kertainen. Kahden ko. laminaatin vahvuudessa on eroa alle 1 mm, mutta malli 6:n massa on lähes kaksinkertainen malli 1:n verrattuna.

Alla olevassa kuvassa on esitetty tarkastelu malli 2:sta pistekuormituksen alla graafisessa muodossa. Värikoodit merkitsevät muodonmuutoksen suuruutta määrän suurentuessa väriskaalalla sinisestä punaiseen päin.



Kuva 16.

11 HIILIKUIDUN VALMISTUSMENETELMÄT

Kuitulujitettu komposiittirakenne on huomattavasti hankalampi määritellä kuin vastaava homogeenisesta materiaalista valmistettu rakenne. Määriteltäviä ominaisuuksia ovat geometrian lisäksi käytetyt kuitulaadut, ainevahvuus, kerrosten paksuus, suuntaus, käytetty sidosaine, laminaattirakenne ja valmistusprosessi.

Yksinkertaistettuna hiilikuidusta valmistetun komponentin valmistukseen tarvitaan neljä asiaa: raakamateriaalia, työkalut/muotti, lämpöä ja painetta. Materiaali valitaan käyttökohteen ja valmistusprosessin perusteella ja se asetetaan halutulla tapaa muotin päälle. Tämän jälkeen kappale altistetaan korkealle lämpötilalle ja paineelle ja lopputuloksena hiilikuitu saadaan haluttuun muotoon ja onnistuessaan myös toiminta ja materiaaliominaisuudet ovat halutut.

Jokainen valmistusmenetelmä voidaan jakaa tarkemmin seuraaviin välivaiheisiin.

11.1 Sidosaineella kyllästäminen (impregnation)

Ensimmäisessä työvaiheessa kuitumateriaali ja sidosaine sekoitetaan keskenään. Tätä kutsutaan kyllästämiseksi. Riippuen valmistustavasta sidosaine saattaa olla lisättynä kuitumateriaaliin valmiiksi kuten esimerkiksi prepreg-materiaaleja käytettäessä. Vastaavasti esimerkiksi RTM-valmistusmenetelmällä sidosaine lisätään erillisenä työvaiheena. Vastaavasti niin sanotussa märkä asettelussa (wet lay-up process) jokainen kuitukerros kastellaan sidosaineessa ennen muottiin asettamista. Työvaiheen tarkoitus on kyllästä materiaali mahdollisimman perusteellisesti ja tasaisesti sidosaineella tasalaatuisen lopputuotteen aikaan saamiseksi. Tärkeitä huomioitavia muuttujia työvaiheessa ovat sidosaineen viskositeetti, toleranssit pintajännitys sekä muotin ja kappaleen geometria.

11.2 Kuitukerrosten asettelu (lay-up)

Tässä työvaiheessa sidosaineella kyllästetyt kuitukerrokset sijoitetaan tarkasti ennalta päätettyyn muotoon muotin päälle. Muutamia tärkeitä huomioitavia seikkoja ovat käytettyjen kerrosten tyyppi, määrä, asettelujärjestys ja suuntaus. Työvaiheen tarkoitus on luoda suunniteltu rakenne, jolla on haluttu materiaalivahvuus, lujuus, jäykkyys ja iskunkestävyys. Lopputuotteen, eli tässä tapauksessa rungon, käyttöominaisuuksien ja turvallisuuden kannalta tämä on yksi tärkeimmistä työvaiheista

11.3 Tiivistys (consolidation)

Tiivistyksen aikana kuitukerrosten välille halutaan luoda mahdollisimman tiivis kontakti. Työvaihe on tärkeässä osassa lopputuotteen laadun ja toiminnan kannalta. Prosessin aikana on tärkeää saada poistettua kaikki ilma kerrosten välistä. Jos kappaleeseen jää kuivia kohtia, johon sidosaine ei ole päässyt laisinkaan tai niin sanottuja tyhjiöitä, se aiheuttaa kappaleeseen epäjatkuvuuskohtia ja muuttaa materiaaliominaisuuksia merkittävästi suunnitellusta. Tiivistyksessä on kaksi erityisen tärkeää tekijää: sidosaineen tasainen virtaus koko kappaleen läpi ja kuitukerrosten elastinen deformaatio. Prosessin alussa syntyvä paine kohdistuu pääasiassa sidosaineeseen, mutta jakautuu myöhemmin tasaisesti myös kuitukerroksille, joka johtaa edellä mainittuun elastiseen deformaatioon. [25]

11.4 Kovetus

Kovetus on valmistusprosessin viimeinen vaihe. Kovetuksen aikana kappaleeseen kohdistetaan edelleen painetta ja lämpöä. Kovettumiseen kuluva aika riippuu materiaali-
vahuuksista, sidosaineen koostumuksesta ja käytetystä kovetteesta sidosaineessa. Tyyppillisesti mitä korkeampi lämpötila prosessin aikana on, sitä nopeammin prosessi tapahtuu. Lämpötilalla on kuitenkin aina jokin yläraja, jonka jälkeen prosessi ei onnistu halutulla tavalla. Tavat, jolla painetta ja lämpötilaa kohdistetaan kappaleeseen vaihtelevat eri valmistustapojen välillä.

TABLE 6.1
Manufacturing Process Selection Criteria

Process	Production Speed	Cost	Strength	Size	Shape	Raw Material
Filament winding	Slow to fast	Low to high	High	Small to large	Cylindrical and axisymmetric	Continuous fibers with epoxy and polyester resins
Pultrusion	Fast	Low to medium	High (along longitudinal direction)	No restriction on length; small to medium size cross-section	Constant cross-section	Continuous fibers, usually with polyester and vinylester resins
Hand lay-up	Slow	High	High	Small to large	Simple to complex	Prepreg and fabric with epoxy resin
Wet lay-up	Slow	Medium	Medium to high	Medium to large	Simple to complex	Fabric/mat with polyester and epoxy resins
Spray-up	Medium to fast	Low	Low	Small to medium	Simple to complex	Short fiber with catalyzed resin
RTM	Medium	Low to medium	Medium	Small to medium	Simple to complex	Preform and fabric with vinylester and epoxy
SRIM	Fast	Low	Medium	Small to medium	Simple to complex	Fabric or preform with polyisocyanurate resin
Compression molding	Fast	Medium	Medium	Small to medium	Simple to complex	Molded compound (e.g., SMC, BMC)
Stamping	Fast	Low	Medium	Medium	Simple to contoured	Fabric impregnated with thermoplastic (tape)
Injection molding	Fast	Low to medium	Low to medium	Small	Complex	Pallets (short fiber with thermoplastic)
Roll wrapping	Medium to fast	Low to medium	High	Small to medium	Tubular	Prepregs

Kuva 17. [26]

Eri valmistusmenetelmillä on merkittäviä eroja lopputuotteeseen. Pelkästään valmistusmenetelmä itsessään voi tehdä merkittäviä eroja mekaanisiin ominaisuuksiin. Muita valmistusmenetelmissä huomioitavia kriteerejä ovat muun muassa nopeus, luotettavuus, tarvittavat välineet ja laitteet, hinta ja tasalaatuisuus.

11.5 Resin transfer molding (RTM)

Suomenkielinen termi RTM-menetelmälle on hartsi-injektio. Siinä valmistettava rakenne sijoitetaan suljettuun muottiin, jossa hartsi ruiskutetaan muotin sisälle sitä varten valmistettua reittiä pitkin. Tyypillisesti kappale kovetetaan muotissa, jota seuraa vielä viimeistely. Kuitupalojen leikkaus ja muottiin asettelu on työläs ja aikaa vievä työvaihe, joka on tästä johtuen myös kallis. Viime aikoina juuri tähän työvaiheeseen on tehty paljon kehitystyötä, koska se on tyypillisesti ko. valmistusmenetelmän rajoittavin tekijä. Vahvuutena menetelmässä on, että koska kappaleen molemmat puolet ovat pinnanlaadultaan kosketuksissa muottiin, niin pinnanlaatu on hyvä heti kovettumisen jälkeen muotista ulos otettaessa.

Etuna menetelmässä on kyky tehdä muodoltaan monimutkaisiakin kappaleita kohtuullisin kustannuksin.

11.5.1 Kuiva valmistus

Muottiin asetettava hiilikuitu voi olla ns. kuivaa, eli siihen ei ole lisätty vielä mitään sidosaineita. Yleisesti sidosaineena käytettävää matalaviskositeettista epoksia syötetään kovalla paineella muottiin sille varatun käytävän kautta. Epoksin lisäämistä jatketaan kunnes muotti on täynnä ja kaikki ilma on poistunut muotista. Kun muotin sisältö on kyllästetty epoksilla, muotti ja valmistettava komponentti kuumennetaan. Epoksi kovettuu suuren lämpötilan vaikutuksesta.

11.5.2 Prepreg (märkä valmistus)

Prepreg on lyhenne sanoista pre-impregnated, jota käytetään hiilikuidusta, jossa sidosaineena käytettävä epoksi on lisättyä jo ennen varsinaista valmistusprosessia. Kun hiilikuitu ja epoksi ovat sekoitettu keskenään ne siirretään tyypillisesti siirtokalvolle, joka käytetään yksinomaan tätä prosessia varten suunniteltuun koneeseen, jonka tehtävä on tiivistää hiilikuitu, epoksi ja siirtokalvo tasalaatuisiksi kokonaisuudeksi. Erityisesti epoksin tasainen leviäminen hiilikuituun on tärkeää. Tämän jälkeen valmis prepreg-materiaali jäähdytetään, joka estää ennen aikaisen kovettumisen ennen valmistusta. Tässä tilassa olevaa materiaalia kutsutaan B-vaiheessa olevaksi. [27] Jotta materiaali saadaan kovettumaan haluttuun muotoon se pitää altistaa joko tyhjiölle, kovalle paineelle tai korkealle lämpötilalle. Joskus käytetään kaikkien näiden yhdistelmää. Vaikka ma-

terialiin on lisätty jo epoksia, niin se on silti edelleen helposti muokattavissa, mikä on luonnollisesti edellytys onnistuneelle valmistusprosessille. Parhaimmillaan nykyaikaisen prepreg-arkkien varastointiaika on jopa vuoden mittainen.

Prepreg-arkkeja valmistetaan lukuisia eri vaihtoehtoja ja ne ovat kaikki tarkasti luokiteltu. Luokittelu sisältää tiedot valmistajasta, käytettyjen kuitujen tyypistä, määrästä ja epoksin sisällöstä. Tyypillisesti kuitujen määrä ilmoitetaan arkin painona neliömetriä kohden. Tästä käytetään lyhennettä FAW, joka on lyhenne englanninkielien sanoista fiber areal weight. Mitä pienempi FAW-arvo, sitä ohuempaa ja kevyempää käytetty materiaali on ja vastaavasti toisinpäin. Mitä pienempi FAW-arvo, sitä jäykempää ja vahvempaa käytettävän materiaalin tulee olla, jotta halutut mekaaniset ominaisuudet saadaan täytettyä.

Arkki leikataan haluttuun muotoihin etukäteen tehtyjen laskelmien perusteella, jotka ottavat myös huomioon käytetyn arkin jäykkyyden ja lujuuden sekä kuitujen suunnan. Tämän jälkeen arkin palat asetellaan käsin naarasmuotin päälle, ne pakataan painetta kestäviin pusseihin ja kovetetaan uunissa paineen alla. Näin valmistetaan tyypillisesti monimutkaisia rungon osia kuten keskiön tai emäputken aluetta. Ne saatetaan myöhemmin yhdistää toisiinsa erikseen tehtyjen putkimaisten hiilikuituosien kanssa, jonka jälkeen ne sijoitetaan isoon muottiin, joka vastaa valmiin rungon muotoa. Ennen kuumennusta ja kuitujen kovettumista tarkkoja toleransseja vaativiin kohtiin, kuten keskiöön ja emäputkeen asetetaan alumiinista tai teräksestä tehdyt holkit riittävän tarkkuuden takaamiseksi. Joskus kuumennusvaiheeseen saatetaan yhdistää myös rakon käyttämistä, joka on kuvattu myöhemmin.

Valmistustavasta riippumatta muottien tekemiseen on monia vaihtoehtoja. Tavallisimpia vaihtoehtoja ovat alumiini, teräs, nikkeli ja polyesteri. RTM sopii hyvin massavalmistukseen. Vuodessa valmistettava kappalemäärät voivat vaihdella 100-10 000 väliltä. Tällä hetkellä prepreg on yksi yleisimmistä polkupyörien runkojen valmistusmenetelmistä. [28]

11.5.3 Hyödyt

- Kappaleella on hyvä pinnan laatu heti muotista otettaessa.
- Materiaali on tasalaatuista. Poistaa tarpeen punnita ja mitata oikea epoksin ja kovetteen suhde.
- Sopii hyvin lujien ja jäykkien kappaleiden valmistamiseen.
- Suurien ja monimutkaiset muodot mahdollisia.
- Alkukustannusten jälkeen edullinen valmistustapa.
- Pieni materiaalihukka.
- Ilman jääminen rakenteeseen epätodennäköistä.
- Sopii massatuotantoon.

11.5.4 Heikkoudet

- Kotelarakenteiden valmistaminen ei ole yhdellä kertaa mahdollista.
- Muotin korkeat valmistuskustannukset.
- Kappaleen pieni tai olematon muunneltavuus muotin valmistamisen jälkeen.

12 RUNGON VALMISTUSMENETELMÄT

Edellisessä luvussa esiteltyjen hiilikuidun valmistusmenetelmien lisäksi myös itse rungon valmistukseen on olemassa lukuisia menetelmiä, joilla on jokaisella omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Hiilikuidun ja rungon valmistusmenetelmät eivät ole täysin toisistaan riippumattomat, eli esimerkiksi yhden hiilikuidun valmistusmenetelmän käyttö saattaa mahdollistaa tai sulkea pois rungonrakennusta ajatellen tiettyjä vaihtoehtoja. Alla on esitettyinä yleisimpiä valmistusmenetelmiä ja niihin liittyviä työvaiheita.

12.1 Arkin leikkaus

Hiilikuituarkin muotoon leikkaaminen on tärkeä rungon valmistuksen alun työvaihe. Arkin palojen muotoa, asettelua ja suuntausta kutsutaan englanninkielen termillä layout. Tämä työvaihe riippuu rungon koosta, muodosta ja halutuista ominaisuuksista. Mitä monimutkaisempi kokonaisuus, sitä monimutkaisempi layout ja sitä enemmän leikattavia arkin paloja yleensä syntyy. Esimerkiksi keskiön alueen osaan, joka käsittää keskiömuhvin, päänivelen laakeripesän sekä osan viisto- ja satulaputkea. Pelkästään tähän osaan saattaa kuulua jo neljäkymmentä muotoon leikattua arkkia. Kokonaisuudessaan runko voi vaatia paloja aina jopa 200-400 kappaleeseen asti.

Kun valmistusmäärät ovat suuria, niin arkin leikkaus tehdään lähes aina CNC-laitteella. Halutut muodot ohjelmoidaan laitteeseen, joka leikkaa halutut muodot hyvällä tarkkuudella. Tämän jälkeen yhteen runkoon tarvittavat leikatut palat voidaan sijoittaa erillisille tarjottimelle. Näin minimoidaan mahdolliset sekaannukset ja virheet tässä työvaiheessa, jotka voivat heikentää lopputuotteen laatua tai johtaa jopa rungon hylkäämisen myöhemmässä vaiheessa valmistusta.

12.2 Muotti

Uuden tuotteen kehityksessä kriittisimmät osa-alueet ovat itse tuotteen suunnittelu, prosessien suunnittelu ja muotin suunnittelu sekä valmistus. Kokonaisuuden monimutkaisuutta lisää, että nämä eivät ole itsenäisiä työvaiheita, vaan ovat voimakkaasti toisistaan riippuvaisia. Tuotesuunnittelusta vastaavien insinöörien tulee huomioida muotti- ja prosessisuunnittelun sekä valmistustekniikan asettamat reunaehdot. Jos näitä seikkoja ei huomioida heti alusta alkaen, suunnittelusta vastaava insinööri voi luoda hienon tuotteen, jonka valmistus on lopulta kannattamatonta tai jopa mahdotonta.

Muotin ja muiden tarvittavien työkalujen suunnittelu ja valmistus ovat kenties haastavin osuuksi hiilikuitukomponenttien suunnittelussa itse lopputuotteen suunnittelun

lisäksi. Ilman muottia ja mahdollisesti muita tarvittavia työkaluja raakamateriaalia ei saada haluttuun muotoon ja täyttämään haluttuja ominaisuuksia. Muotin ja muiden tarvittavien työkalujen tarve riippuu käytettävästä valmistusmenetelmästä. Esimerkiksi prepreg-materiaaleja käytettäessä tarvitaan sisämuottia ja RTM:llä suljettua ulkopuolista teräsmuottia. Lopputuotteen pinnanlaatu riippuu voimakkaasti käytettyjen työkalujen viimeistelystä ja pinnanlaadusta.



Kuva 18. [29]

12.2.1 Muottisuunnittelun osa-alueet

Alla on listattuna tärkeimpiä muottisuunnittelun osa-alueita.

12.2.1.1 Sallittu kutistuminen

Hiilikuitu ja muut komposiitit sekä niissä käytettävät sidosaineet kutistuvat aina lämmityksen aikana. Kutistuminen tulee ottaa huomioon, jotta lopputuotteella on haluttu muoto, mitat ja toleranssit. Kutistuminen koostuu tilavuuden ja/tai suorien muotojen pienemisestä, joka johtuu sidosaineen kovettumisesta ja materiaalin supistumisesta lämmön vaikutuksesta. Kutistuminen tulee huomioida niin muotin kuin itse kappaleenkin suunnittelussa.

12.2.1.2 Työkalumateriaalien ja kappaleen lämpölaajenemiskertoimet

Muotin lämpölaajenemiskerroin on tärkeä materiaaliominaisuus, joka tulee huomioida muottimateriaalia valittaessa. Jokaisella materiaalilla on ominainen lämpölaajenemiskerroin, joka vaikuttaa materiaalin laajenemiseen ja supistumiseen lämpötilavaihtelujen seurauksena. Työkalujen, erityisesti muottien, lämpölaajenemiskertoimen tulisi olla mahdollisimman lähellä valmistettavan kappaleen vastaavia arvoja, jotta tästä johtuvilta kuormituksilta ja epätarkkuuksilta vältyttäisiin valmistusprosessin aikana.

12.2.1.3 Muotin jäykkyys

Muotti altistuu valmistuksen aikana suurille lämpötilavaihteluille ja korkealle paineelle. Sen johdosta muotin tulee olla jäykkä, jotta lopputuotteen muoto ja mitoitus ovat toleranssien sisällä. Tämä pyritään varmistamaan niin muotin materiaalilla kuin riittävällä ainevahvuudella. Lisäksi muotin puolikkaiden toisiinsa liittämiseen tulee kiinnittää huomiota. Yleisin tapa liitoksen toteuttamiseen on pulttiliitos. Siinä tulee huomioida riittävä pulttien koko ja kiinnitysvälit.

12.2.1.4 Pinnanlaatu

Muotin ja työkalujen pinnanlaatu korreloi lopputuotteen pinnanlaadun kanssa. Itse pinnanlaadun lisäksi työkalujen ja erityisesti muotin tulee olla erittäin puhdas ja täysin vapaa muista aineista hyvän lopputuotteen pinnanlaadun varmistamiseksi.

12.2.1.5 Päästökulma ja kaarevuussäteet

Hiilikuitu- ja komposiittiosien valmistuksessa tulee välttää liian teräviä särmiä ja muotoja. Esimerkiksi vertikaalipinnoilla suositellaan vain 1° suuruista päästökulmaa. Suuri päästökulma edesauttaa sidosaineen virtausta, estää ryppyjen syntymistä ja helpottaa kappaleen irrotusta muotista. Päästökulman lisäksi kaarevuussäteisiin tulee kiinnittää huomioita ja teräviä kulmia tulee välttää. Miniminä sisäkulman säde on 2 mm ja ulkokulman vastaavasti 1,5 mm. [30] Tällä osa-alueella on kuitenkin tapahtunut kehitystä aivan viime vuosina. Esimerkiksi Mondrakerin valmistaman Foxy Carbon -rungon etukolmion särmät ovat huomattavan teräviä.



Kuva 19. [30]

12.3 Valmistus rakon avulla

Rakko tarkoittaa hiilikuidun valmistuksessa yleensä ilmalla paineistettua elastisesta materiaalista valmistettua pussimaista rakennetta, joka sijoitetaan valmistettavan kotelomaisen kappaleen sisälle luomaan painetta kuumennuksen aikana tiivistäen kappaleen rakon ja ulkomuotin väliin. Rakkoa käyttämällä voidaan valmistaa kotelomaisia rakenteita, joiden valmiusaste on korkea heti muotista pois ottamisen jälkeen. Toisin kuin RTM:ssä, rakkoa käyttämällä saadaan valmis kotelomainen rakenne yhdellä valmistusprosessilla.

Rakkovalmistuksessa käytetään usein prepreg-hiilikuitua, joka asetetaan ulkomuottiin tarkasti suunnitelman mukaisesti. Tässä tulee huomioida niin käytetyn hiilikuidun tyyppi, arkista leikattujen palasten koko ja muoto, kerrosten määrä sekä kuitujen suuntaus. Kun hiilikuitukankaat ovat paikallaan, niin niihin saatetaan lisätä vielä lisää sidosaineena käytettävää hartsia.

Tämän jälkeen prosessi voi erota riippuen valmistettavan kappaleen muodosta. Kotelomaisissa kappaleissa rakko sijoitetaan kappaleen sisään, kun taas puolestaan yksinkertaisimmissa avoimissa muodoissa rakko tiivistää kappaleen muottia vasten. Rakko kohdistaa rakenteeseen korkean paineen sisältä päin muottia vasten. Näin varmistetaan, että lopputuote on mahdollisimman tasalaatuinen sekä lisäksi, että siihen ei ole jäänyt ilmaa. Muotin kuumennuksen ja rakenteen kovettumisen jälkeen rakko tyhjenetään ja

vedetään pois. Joissakin tapauksissa rakko voidaan jättää valmiin kappaleen sisälle. Tätä käytetään erityisesti, jos valmistettava kotelomainen kappale on muodoltaan monimutkainen ja rakon poistaminen ei onnistu helposti tai voi olla jopa mahdotonta. Lisäksi on luonnollisesti tärkeää huomioida, että rakon jättäminen rungon sisään ei haittaa käyttöä myöhemmin.

12.3.1 Vahvuudet

- Mahdollistaa monimutkaisten muotojen valmistamisen.
- Hyvin toteutettuna kohdistaa tasaisen paineen valmistettavaan kappaleeseen, joka on edellytys tasalaatuisille materiaaliominaisuuksille.
- Tyypillisesti (mutta ei aina) helppo poistaa lämmityksen jälkeen.
- Yhtenä kokonaisuutena valmistetut osat eivät tyypillisesti rikkoudu odottamattomasti ja katastrofaalisesti.

12.3.2 Heikkoudet

- Jokainen kappale tarvitsee oman muotin ja rakon.
- Materiaalin seinämävahvuuksien tarkka kontrollointi on vaikeaa.
- Tasalaatuisen laadun tuottaminen (kappaleesta ja muodosta riippuen) voi olla vaikeaa.
- Mahdolliset haasteet rakon poistamiseen liittyen lämmityksen jälkeen.

12.4 Valmistus sisämuottia käyttäen

Joustavasta materiaalista rakennetun muotin käyttäminen on periaatteeltaan samanlainen kuin rakkoa käytettäessä. Kappale rakennetaan tarkkaan muotoon valmistetun muotin ympärille. Tyypillisiä muottimateriaaleja ovat polyuretaani, polystyreeni ja silikoni. Materiaalin työstettävyys, hinta ja materiaaliominaisuudet vaikuttavat huomattavasti muottimateriaalin valintaan. Haluttu muoto rakennetaan sisämuotin päälle, jonka jälkeen kappale asetetaan teräksestä rakennettuun ulkomuottiin, johon se suljetaan tiiviisti. Riippuen sisämuotin materiaalista ja sen ominaisuuksista, lämmityksen aikana materiaali saattaa turvota kohdistuen näin rakenteeseen painetta sisältä päin kohti ulkopuolella olevaa teräsmuottia. Näin saavutetaan samoja hyötyjä kuin rakkoa käytettäessä, mutta vähemmällä ja yksinkertaisemmilla työvaiheilla. Tosin tällä tapaa syntyvä sisältä ulospäin runkomateriaalin kohdistuva paine ei vastaa rakolla saavutettavaa.

Toinen huomioitava seikka on muottimateriaalin sulamispiste. Esimerkiksi polyuretaani sulamispiste on noin 50 °C lämpötilassa. Koska muotin lämmityksessä tämä lämpötila ylittyy tyypillisesti yli kaksinkertaisesti, materiaali on helppo poistaa valmiin rakenteen sisältä. Valmistettavan kappaleen muodosta ja käytetystä muottimateriaalista riippuen sisämuotti saatetaan jättää valmiin kappaleen sisään. Tämä riippuu materiaa-

liominaisuuksien lisäksi koosta, painosta ja valmistettavasta kappaleesta, sen muodosta ja aiheutuuko muotin jättämisestä kappaleen sisälle jotakin haittaa.

12.4.1 Vahvuudet

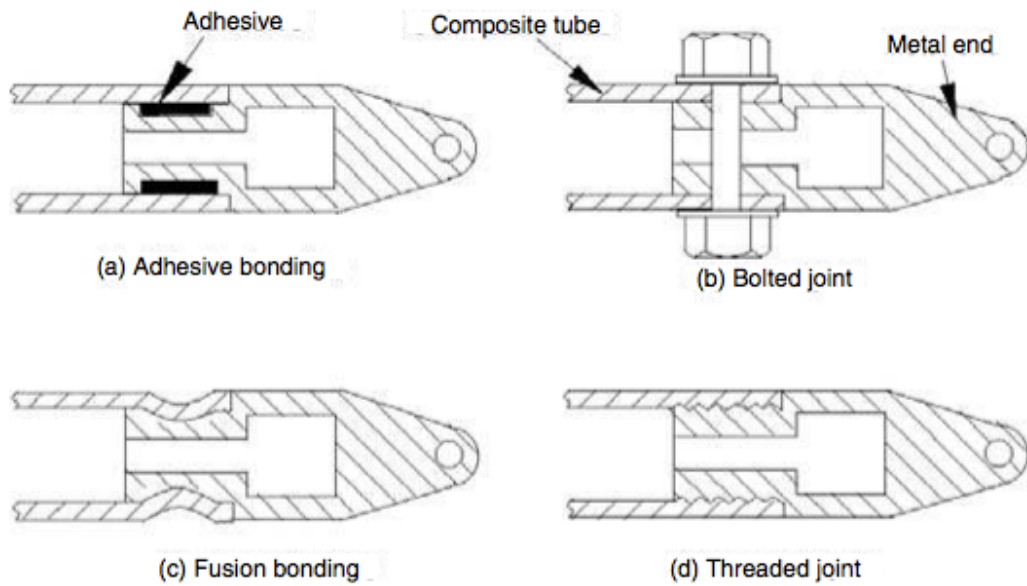
- Mahdollista valmistaa monimutkaisia muotoja, jolla voidaan vaikuttaa rakenteellisiin ominaisuuksiin, aerodynamiikkaan ja ulkonäköön.
- Mahdollista valmistaa isoja kokonaisuuksia. Esimerkiksi koko rungon etukolmion valmistaminen kerralla on mahdollista sisämuotin avulla.
- Runko tai rungon osa voidaan valmistaa helposti jäykäksi.

12.4.2 Heikkoudet

- Epätasaisuudet paineessa rungon lämmityksen aikana. Voi johtaa materiaalin tasalaatuisuuden huononemiseen.
- Jokainen koko tai variointi mitoissa vaatii uuden muotin rakentamisen.
- Muotin poistaminen lämmityksen jälkeen voi olla hankalaa.
- Materiaalin tarkka optimointi vaikeaa.

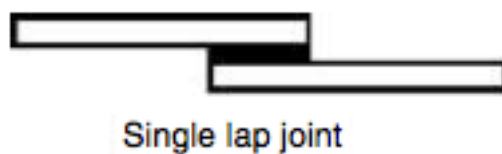
12.5 Liimaus

Yleinen tapa on valmistaa runko useasta eri osasta, jotka liitetään myöhemmin yhteen. Tyypillisesti tämä tarkoittaa esimerkiksi rungon etuosan, eli emä-, vaaka ja viistoputken sekä keskiön alueen valmistamista erillisinä kotelomaisina kappaleina. Tällä tapaa meneteltävässä prosessissa tulee huomioida, että liitettävät kappaleiden liitoskohta on mahdollisimman tiivis. Myös mekaanisten liitosten tekeminen pulteilla, teräksisten tai alumiinisten välikappaleiden avulla on myös mahdollista, mutta näiden käytöllä on harvoin perusteita. Liimaamalla tehty liitos on lähes aina vahvempi, kevyempi ja ulkonäöltään siistimpi. Alla on kuvattuna erilaisia liitosmalleja.



Kuva 20. [32]

Liimaliitoksissa kuormitus siirtyy osasta ja materiaalista toiseen leikkausvoiman välityksellä. Sen johdosta liimoille ja epoksille ilmoitetaan murtolujuus. On kuitenkin tärkeää huomioida, että tämä arvo on mitattu usein liitokselle, jossa vain kaksi pintaa on liitetty toisiinsa, eli niin sanottu *single lap joint*. Todellisuudessa liimaa tai epoksia käytettäessä tilanne vastaa harvoin tällaista. Käytännön sovelluksissa liimaliitoksen lujuus voi olla siis huomattavasti suurempi kuin valmistajan ilmoittama. Tämä on luonnollisesti syytä varmistaa huolellisesti.



Kuva 21. [33]

Rungon osien liittämisen voidaan käyttää erityistä liimaa tai samantyyppistä epoksista, jota käytetään sidosaineena muussakin rungon valmistuksen vaiheissa. Näin hyvin tehty liitos on parhaimmillaan yhtä vahva tai jopa vahvempi kuin itse perusmateriaali.

12.5.1 Liiman tai sidosaineen valitseminen

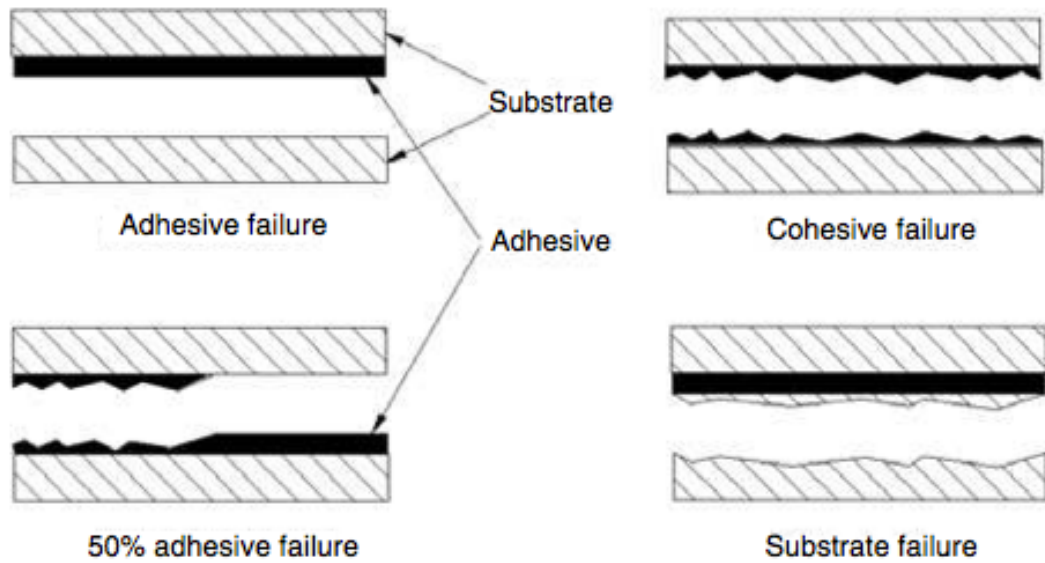
Valittava liima tai sidosaine riippuu käytettävästä materiaalista, sovelluskohteesta, siihen kohdistuvasta rasituksesta ja käyttölämpötilasta. Maastopyörän rungon kohdalla nämä tekijät ovat kuitenkin usein hyvin tiedossa ja esimerkiksi erilaisille kemikaaleille altistumista ei tarvitse ottaa huomioon. Seuraavassa on listattuna, että mitä tekijöitä liiman tai sidosaineen valitsemisessa tulee huomioida.

- Lujuus
- Hinta
- Liitokselle kohdistuva rasitus
- Iskunkestävyys
- Käyttölämpötila
- Kosteus
- Kuivumisaika
- Tuotantomäärä
- Väsyminen

Liimoja ja sidosaineita valmistavat yritykset luettelevat tuotteidensa ominaisuudet kattavasti ja tarjoavat usein myös palvelua, joka auttaa oikean liiman tai sidosaineen valinnassa. Tämän ansiosta oikean sidosaineen tai liiman valinta jää harvoin pelkästään suunnittelijan päätettäväksi.

12.5.2 Rikkoutuminen

Liimaliitokset rikkoutuvat tyypillisesti kahta eri tyyppiä: adhesiivinen tai kohesiivinen. Ensimmäisessä tilanteessa rikkoutuminen tapahtuu liitoskohdassa perusmateriaalien ja liiman välillä. Kohesiivinen rikkoutuminen saattaa tapahtua puolestaan niin liimassa kuin perusmateriaalissakin. Kaikkien hyvin suunniteltujen ja valmistettujen liitosten tavoitteena on olla vahvempi kuin liitettävät materiaalit. Tällaisessa tapauksessa rikkoutuminen voi tapahtua niin, että liitos itsessään pysyy ehjänä, mutta perusmateriaali rikkoutuu sen vierestä. Yleisesti ottaen itse liiman peittäminen liitoksessa ei voida pitää hyväksyttävän missään olosuhteissa.



Kuva 22. [34]

12.5.3 Vahvuudet

Vaikka liimaliitoksen hyviä ja huonoja puolia käytiin läpi jo lyhyesti yllä, seuraavassa on vielä perusteellisempi luettelo molemmista vaihtoehdoista.

- Kuormitus jakautuu suuremmalle alueelle pistemäisen kuormituksen sijasta. Kuormitus jakaantuu tämän ansiosta tasaisemmin.
- Väsymisominaisuudet taivutusta ja tärinää vastaan ovat mekaanisia liitoksia paremmat.
- Keveys.
- Liimaliitos ei pelkästään liitä kahta pintaa toisiinsa vaan sulkee liitoksen kokonaan ja ehkäisee näin muun muassa korroosiota.
- Monimutkaisten pinnanmuotojen liittäminen on helpompaa liima- kuin mekaanisilla liitoksilla.
- Pinnanmuotoihin ja geometriaan ei tarvitse tehdä muutoksia liimaliitosta käytettäessä.
- Usein halvempaa ja nopeampaa kuin mekaanisten liitosten tekeminen.

12.5.4 Heikkoudet

- Pinnat vaativat usein esikäsitteilyn ennen liimaamista.
- Liimaus saattaa edellyttää painetta ja lämpöä, mikä edellyttää oman työvaiheen.
- Kuivumisaika saattaa olla pitkä, mikä hidastaa prosessia ja sitoo työtilaa.
- Liitoksen tarkastaminen on hyvin vaikeaa.
- Valmistaminen vaatii erityisosaamista.

- Liitoksen purkaminen ei ole mahdollista.

12.6 Yhdistelmät

Edellä kuvattuja valmistustapoja voidaan myös yhdistellä parhaan lopputuloksen saamiseksi. Jos jostakin valmistustavasta puuttuu jokin tarvittava ominaisuus, puutetta voidaan mahdollisesti paikata yhdistämällä prosessiin toista valmistustapaa, josta haluttu ominaisuus löytyy. Luonnollisesti valmistustapojen tulee olla yhteensopivat. Tämä ei välttämättä suoraan toteudu, vaan niitä pitää muokata ja soveltaa, jotta prosessista saadaan toimiva ja lopputulos on haluttu.

Esimerkkinä toimii Yhdysvaltalainen Pivot Cycles, joka teettää runkojen valmistuksen alihankintana Kaukoidässä. Valmistusprosessi yhdistää sisä-, ja ulkomuottien lisäksi myös rakon käyttöä.

Runkojen valmistuksessa käytetään teräksistä ulkomuottia, joka on valmistettu jyrsimällä tai EDM:n (*electro discharge machining*) avulla. Ulkomuotissa viime vuosina tehty kehitystyö on liittynyt monimutkaisempien muotojen luomiseen, toleranssien parantamiseen. Teräksisen ulkomuotin lisäksi valmistusprosessissa käytetään kahta tai kolmea muuta materiaalia: polystyreeniä, polyuretaania ja lateksista valmistettua rakkoa.

Rungon osan muotoiluun käytettävä muotti koostuu kolmesta eri komponentista perinteisen yhden sijaan. Sisäpuolelta ulospäin lueteltuna rakenteen järjestys on seuraava: polystyreenimuotti, joustava rakko ja polyuretaanikerros. Hiilikuitukankaan palat muotoillaan tämän rakenteen päälle, joka toimii rakenteen sisämuottina.

Kolmiosaisen sisämuotin jokaisella komponentilla on jokaisella oma tarkka funktionsa. Sisällä oleva polystyreeni on helposti muotoiltavaa materiaali ja tarjoaa pinnanlaadultaan hyvän muottiaihion. Sen päällä olevan rakon tehtävä on sama kuin rakolla on yleensä. Kun rakenne lämmitetään teräsmuotin sisällä, rakon täyttäminen ilmalla tai jollakin muulla kaasulla laajentaa sitä, jonka seurauksena rakenteeseen kohdistuu painetta teräksestä tehtyä ulkomuottia vasten. Uloimpana kerroksena olevan polyuretaanin tehtävä on tarjota entistä parempi tiivistys lämmityksen aikana, jotta kuiturakenne saadaan haluttuun muotoon ja materiaali on mahdollisimman tasalaatuista. Lämmityksen aikana rakon sisällä oleva polystyreenimuotti sulaa ja se poistetaan osan sisältä rakon mukana lämmityksen jälkeen. Tämän jälkeen polyuretaanimuotin jäämät poistetaan myös rungosta erillisellä prosessilla.

12.7 Muita huomioitavia tekijöitä

Tuotantoprosessin valintaan liittyvät rungon teknisten ratkaisujen lisäksi merkittävästi myös valmistuskustannukset, prosessiin muunneltavuus, työmäärä, nopeus viriheerkkyys ja edellytettävä ammattitaito.

Muottien valmistus on merkittävä osa rungon valmistuksen kustannusrakennetta. Muottien pitää kestää suuri määrä käyttökertoja ja siksi niiden tulee olla lujaa ja kovaa materiaalia. Yleisimmät muottimateriaalit ovat alumiini ja teräs. Muotit valmistetaan lähes aina jyrsimällä. Kun tähän yhdistetään vielä muotin pinnanlaadun korkea vaatimus, prosessi on aina työläs ja aikaa vievä. Muotin koosta riippuen valmistus voi viedä kymmeniä, joissakin tapauksissa jopa satoja konetyötunteja. Kun muotit ovat valmiit,

niin muu osa rungon valmistusprosessista on kuluiltaan suhteellisen pieni. Luonnollisesti käsityövaiheet ovat aina yksi huomioitava kustannus ja muut työvaiheet edellyttävät erikoislaitteita ja -välineitä. Esimerkiksi lämmitykseen tarvittavat uunit ovat erikoisvälineitä, joita ilman runkojen valmistus ei onnistu. Lisäksi näillä erikoisvälineillä tulee olla riittävästi kapasiteettia, jotta ne eivät muodosta tuotantoon pullonkaulaa.

Prosessin muunneltavuus liittyy eniten muottien tyyppiin eli millaisia osia muoteilla valmistetaan? Jos esimerkiksi koko eturunko valmistetaan yhdessä muotissa, joka runkokoko tai pienikin muutos rungossa edellyttää uuden muotin valmistamista. Jos valmistus jaetaan sen sijaan osiin eli esimerkiksi emäputken ja keskiön alue valmistetaan erikseen ja ne liitetään putkilla toisiinsa, muunneltavuutta on huomattavasti enemmän. Joissakin tapauksissa saattaa olla mahdollista, että kaikki runkokoot saadaan valmistettua samoilla muoteilla. Erot mitoituksessa tehdään muuttamalla niitä yhdistävien putkien tai kotelorakenteiden mittoja.

Hiilikuidun valmistus on hyvin paljon käsityötä vaativa prosessi. Arkkien sijoittelu haluttuun muotoon tehdään käsin, eli se sitoo vähintään aina yhden työntekijän. Prosessi on hidaskäyttöinen sen edellyttämän tarkkuuden vuoksi. Yleensä ajan säästö tapahtuu prosessin muissa osissa. Esimerkiksi käytettävien muottien määrässä. Tyypillisesti yksi keskikokoinen tehdas voi valmistaa keskimäärin 2-5 runkoa päivässä.

Virheherkkyys on ominaisuus, joka halutaan luonnollisesti minimoida. Inhimillisiä virheitä voi aina tapahtua, mutta luonnollisesti kaikki virheet ja laatueroavaisuudet halutaan minimoida lähteestä tai syystä riippumatta. Yksi esimerkki inhimillisestä virheestä olisi arkin palojen virheellinen asettelu joko suunnan tai sijainnin osalta. Muita mahdollisia virheitä voi tapahtua muun muassa muotissa lämmityksen aikana. Jos esimerkiksi käytetään rakkoa ja se ei kohdistu painetta tasaisesti koko kappaleen alueelle, lopputulos ei ole välttämättä homogeeninen ja siten mekaanisilta ominaisuuksiltaan haluttu. Riippuu virheen suuruudesta, valmistajasta, standardeista ja laadun tarkkailusta, että hylätäänkö runko vai voiko se jatkaa prosessissa eteenpäin.

13 MAASTOPYÖRÄN RUNGON SUUNNITTELU

Isotrooppisia materiaaleja, kuten alumiinia ja terästä käytettäessä, lähdetään aina liikkeelle raakamateriaalista, joka voidaan valita esimerkiksi tavarantoimittajan katalogista tai luettelosta. Kun materiaali on valittu selvitetään tarvittavat valmistusprosessit ja niiden vaihtoehdot halutun tuotteen valmistamiseksi. Tämä menettelytapa tai suunnittelufilosofia ei ole kuitenkaan mahdollinen tai ainakaan paras vaihtoehto hiilikuidun ja muiden komposiittien kanssa toimiessa. Kun materiaaliksi on valittu jokin edellä mainittuun ryhmään kuuluvista materiaaleista, materiaalivalinta, mitoitus, mekaanisten ominaisuuksien suunnittelu ja valmistusprosessit sulautuvat kaikki yhteen erottamattomaksi kokonaisuudeksi. Pelkästään eri valmistusmenetelmien käyttö (esim. RTM, prepeg yms.) tekee merkittäviä eroja hiilikuituun molekyylylitasolla, mikä vaikuttaa taas huomattavasti itse valmiin kappaleen materiaaliominaisuuksiin.

13.1 Modulaarisuus

Moduuli tarkoittaa yksittäistä erikseen valmistettua komponenttia, jolla on standardoitu liitos- tai liittymäkohta muihin lopputuotteen komponentteihin. Modulaarisuus voi olla maastopyörän rungon valmistuksessa kustannusten minimoimisessa huomattavassa osassa. Yksi merkittävimmistä kuluista on valmistukseen tarvittavien suurien teräksestä jyrsimällä valmistettujen ulkomuottien valmistus. On huomattava kuluerä, jos jokaiselle runkokoolle täytyy valmistaa oma muottinsa. Jos kuitenkin esimerkiksi rungon eri osat, kuten keskiön, emäputken sekä satulatulpan alueet voidaan valmistaa erillisinä moduuleina ja rungon kokoa voidaan varioida muuttamalla niitä yhdistäviä putki- tai kotelorakenteita, niin ajallinen kuin rahallinenkin säästö voi olla hyvinkin merkittävä.

Alla olevassa kuvassa on Ibiksen valmistaman Mojo HD –rungon keskiön alue. Valmistajan mukaan pelkästään kyseisen komponentin valmistaminen kestää lähes yhtä pitkään kuin kokonaisen maantierungon valmistus.



Kuva 23. [29]

Modulaarisuus johtaa lähes väistämättä rungon valmistusprosessin valintaan, jossa eri osat liitetään toisiinsa liimaamalla. Tämä ei ole sinänsä ongelma, koska hyvin suunniteltuna ja tehtynä liitoskohdat voivat olla aivan yhtä vahvoja tai jopa vahvempia kuin itse perusmateriaali.

14 PROTOTYYPPIVAIHE

Kun kaikki edellä käyty suunnitteluvaiheet on huomioitu ja käyty läpi useaan kertaan, on aika edetä prototyyppivaiheeseen. Prototyyppivaiheessa tuotetta eli tässä tapauksessa runkoa, testataan käytännössä. Näin saadaan luotettavasti selville rungon toimintaan liittyvät ominaisuudet kuten jäykkyys, jousituksen toiminta ja muut ajo-ominaisuudet. Rungon loppukäyttäjälle merkitsevien tekijöiden eli ajo-ominaisuuksien ja viimeistelyn lisäksi selviää tuotantoprosessiin liittyviä tärkeitä tekijöitä. Onnistuiko tuotantoprosessi odotetusti? Valmistuiko runko odotetussa ajassa? Olivatko toleranssit riittävät? Sopiiko valmistus suuremmille kappalemäärille? Erittäin tärkeä vaihe prototyyppivaihetta on käytännön testaus, eli rungolla ajaminen. Onko rungon geometria oikea (ohjainkulma, satulakulma yms.), onko rungon linjaus suora, sopivatko kaikki osat runkoon kokoonpanovaiheessa? Laakerien, ohjainlaakerin, keskiön, linkkujen ja takajarrun jarrusatulan onnistunut asennus ovat kaikki merkittäviä seikkoja, jotka tulee tarkistaa.

Runkoa suunnitellessa jokainen rungon osa saatetaan tehdä erillään prototyyppinä, jotta niitä voidaan tarkastella ja testata erikseen. Koska lopullista runko ei valmisteta kuitenkaan yhdessä osassa (jopa etukolmio valmistetaan useasta osasta), voi olla hyödyllistä testata osien lujuus- ja jäykkyysominaisuudet erikseen ennen etenemistä kokonaisen rungon valmistukseen osat toisiinsa liittämällä. Tällä prosessilla saatetaan saavuttaa merkittäväkin hyötyä lopullisen tuotteen optimoinnin suhteen.

14.1 3D-tulostus

Erityisesti hiilikuidusta valmistettujen tuotteiden kohdalla 3D-tulostus on noussut viime vuosina merkittäväksi niin sanottujen nopeiden prototyyppin valmistuskeinoksi. Kun haluttu kappaleen tai kokonaisen rungon muoto ja geometria on saatu valmiiksi CAD-ohjelmalla, niin se voidaan tulostaa fyysiseksi malliksi jopa 1:1 mittakaavassa. 3D-tulosteen avulla saadaan nopeasti käsitys kappaleesta fyysisessä muodossa. Luonnollisesti materiaaliominaisuuksien testaamiseen 3D-tuloste ei käy, koska se tehdään täysin eri materiaaleista kuin itse valmis tuote.

14.2 Failure mode and effects analysis (FMEA)

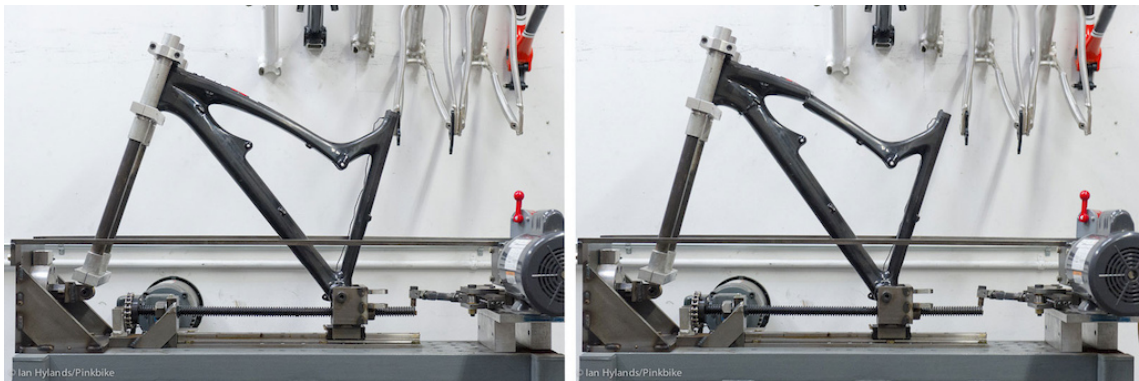
Hiilikuiturakenteilla on tyypillisesti erinomaiset lujuus- ja väsymisominaisuudet. Isku- ja iskutuuheus ovat sen sijaan keskinkertaisia verrattuna joihinkin muihin komposiittimateriaaleihin ja erityisesti teräkseen tai jopa alumiiniin. Hiilikuiturakenteet pysty-

vät absorboimaan energiaa materiaalin murtovenymään asti. Murtuma voi tapahtua kuitusuunnassa, kuitusuuntaa vastaan, kohtisuoraan tai kerrosten delaminoitumisella. Koska rungossa on tyypillisesti useampaa kuin yhtä kuitusuuntaa lähes kaikissa kohdissa, niin murtumisen kohdan ja suuruuden ennustaminen täysin luotettavasti erittäin vaikeaa tai jopa mahdotonta. Sen vuoksi murtumismekaniikan testaaminen käytännön kokein on usein tarvittava testausvaihe.

Prototyyppi saatetaan valmistaa pelkästään lujuusominaisuuksien ja rikkoutumismekanismien testaamista varten. Yksi vaihtoehto, joka on todennäköisesti kustannustehokkaampi on selvittää edellä luetellut asiat eli kokoonpanon onnistuminen, ajoominaisuudet ja lopuksi edetään FMEA:han. Se suoritetaan usein valmistajan tehtaalla Taiwanissa tai runko voidaan lähettää riippumattomaan laboratorioon, jossa testaus tehdään. Tyypillisesti runko kiinnitetään tätä varten suunniteltuun koekuormituspenkkiin ja se altistetaan tietylle kuormitukselle, joka voi selvittää lujuuden tai väsymisen tietyllä kuormalla halutun syklimäärän ajan.

Edellä mainittujen numeeristen arvojen lisäksi on erityisen tärkeää selvittää rikkoutumisen tyyppi. Missä kohtaa se tapahtuu ja ennen kaikkea johtaako se vaaratilanteeseen? On myös hyvä tarkistaa, että vastaavat tulokset FEM-analyysissä saatuja tuloksia. Jos ero on suuri, niin joko CAD-malli tai FEM-analyysi on puutteellinen, runko ei vastaa suunniteltua tai valmistuksessa on tapahtunut virhe.

Tärkein tarkoitus FMEA:lla on rungon luotettavuuden ja turvallisuuden varmistaminen. Suunnittelua ja jatkokehitystä varten saatava tieto tulevat hierarkiassa vasta näiden jälkeen. Jos runko rikkoutuu testin aikana odottamattomasti tai lujuus- ja jäykkyyssarvot ovat pienemmät kuin oli alun perin odotettu, niin tämä voi johtua vain kolmesta asiasta: huonosta suunnittelusta, huonoista tai vääristä materiaaleista tai huonosta valmistusprosessista.



Kuva 23. [35]

Tyypillisesti hajoaminen johtuu yhdestä tai useammasta kolmesta seuraavasta tekijästä: huono suunnittelu, materiaalivalinta tai valmistusprosessi.

14.3 Koekuormitus osana suunnitteluprosessia

Vaikka moderni FEM-analyysi mahdollistaa parhaimmillaan hyvin tarkan arvion lopullisen rakenteen lujuudesta, jäykkyydestä ja mahdollisista heikoista kohdista, prototyypin testaus on silti esimerkiksi laboratorio-olosuhteissa edelleen tärkeä ja mahdollisesti paljon informaatiota antava suunnitteluprosessin vaihe. Se voi paljastaa asioita tai suoranaisia virheitä, joita on tapahtunut mallinnuksessa, valmistuksessa. Lisäksi on myös mahdollista, että mallinnus- ja FEM-ohjelmiston ominaisuudet ovat rajalliset niistä saadut tulokset eivät vastaa todellisuutta odotetulla tarkkuudella.

Näistä seikoista johtuen koekuormitus on ehdottomasti hyödyllinen tai jopa pakollinen osa suunnitteluprosessia. Parhaimmillaan hyvällä koejärjestelyllä voidaan jäljitellä parhaimmillaan jopa vuosien normaalia käyttöä vastaavia rasituksia. Käytännössä tämä tarkoittaa jopa kymmenien tuhansia tietyn suuruisten kuormitus syklien kohdistamista runkoon.

14.4 Koekuormituspenkki

Kaikki maastopyörän koekuormituksessa käytettävät välineet ja penkit täytyy valmistaa kyseistä tarkoitusta varten komponentti kerrallaan. Ne ovat siis arvokkaita erikoistyökaluja, joita löytyy usein vain suurimmilta runko- ja polkupyörävalmistajilta sekä runkoja valmistavilta tehtailta.

14.4.1 Vaadittavat ominaisuudet ja komponentit

Koekuormituspenkissä voidaan selvittää, mallista ja mittalaitteista riippuen, seuraavia asioita suurin kuormitus, jonka runko kestää tietyssä suunnassa, rikkoutumiselle alttiit kohdat ja lisäksi jäykkyys tietyssä tarkastelusuunnassa.

14.4.2 Koekuormituspenkki

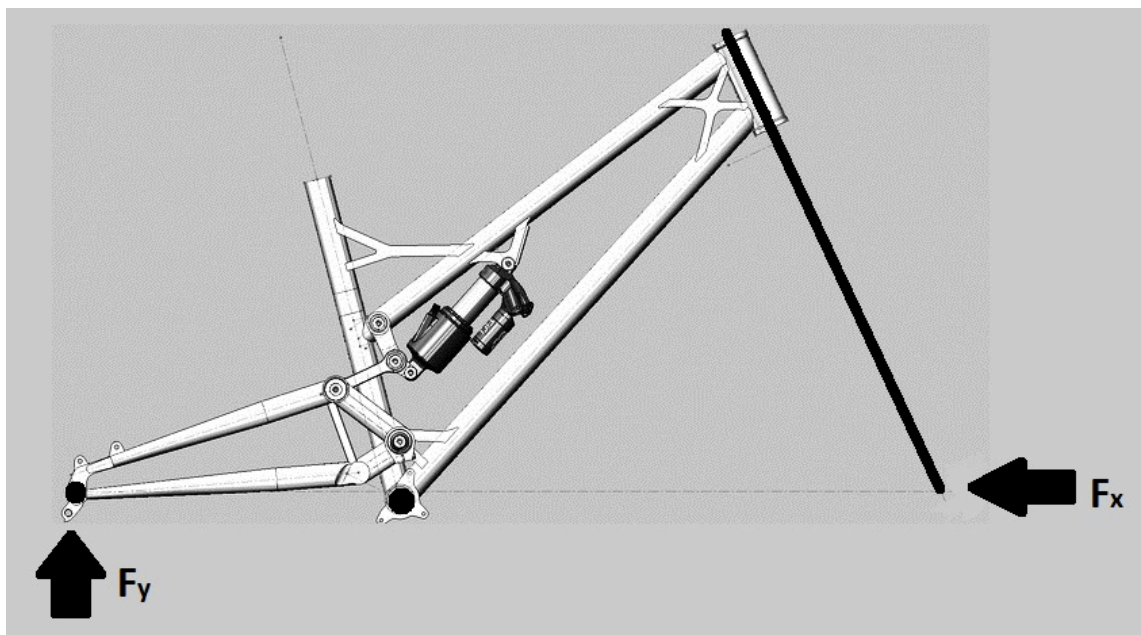
Kuormituspenkin tulee sisältää kiinnityskohdat rungon keskiölle, emäputkelle ja takahaarukalle. Emäputken kiinnitys tehdään usein etuhaarukkaa jäljittelevän mahdollisimman jäykän teräsrakenteen avulla. Kuormitus voidaan kohdistaa emäputken ja/tai takahaarukan kiinnityksen avulla horisontaali- tai vertikaalisuuntaisella voimilla. Keskiön kiinnitys on useissa koekuormituspenkeissä tyypiltään ainoastaan stabiloiva. Satulaputkeen voidaan myös mahdollisesti kohdistaa vertikaalisuuntainen voima, jonka tarkoitus on mallintaa kuljettajan painoa pyörän päällä. Tätä käytetään kuitenkin testeissä tietyvästi verrattain harvoin.

Voima ja siitä kohdistuva kuormitus voidaan saada aikaan sähkötoimisella tai hydraulisella prässillä. Riittävän voimantuoton lisäksi laitteessa tulee olla lisäksi mitta-ominaisuus, joka kertoo käytettävän voiman suuruuden. Muuten koejärjestelystä saatavilla tuloksilla on vain vähän, jos ollenkaan, käyttöarvoa. Rungon rikkoutumispiste tai

vastaavasti kuormitusyökkien määrä halutulla kuormituksen arvolla voidaan selvittää pelkästään näillä välineillä.

Jäykkyyden mittaamiseksi paras mittaväline on venymäliuska. Mallista riippuen niillä voidaan mitata äärimmäisen pieniä venymiä ja muodonmuutoksia, joten mittatekniikan tarkkuus ei ole rajoittava tekijä. Sen sijaan venymäliuskien sijoittelu ja tulosten tulkinta ovat tärkeässä asemassa. Rungon kiertojäykkyyttä tarkastellessa kuormitusta pitää pystyä kohdistamaan myös kolmannessa tasossa eli sivusuunnassa runkoon nähden. Yksinkertaisimmillaan tämä on periaatteessa mahdollista toteuttaa kääntämällä käytetyn prässin suunta 90 astetta alkuperäiseen suuntaan nähden. Esimerkiksi emäputkeen kiinnitetyn teräsrakenteen kohdalla se tarkoittaisi, että voima kohdistuisi runkoon suoraan sivulta eteen-taakse suunnan sijasta.

Oheisessa periaatekuvassa on esitettyä testipenkin rakenne. Emäputken läpi kulkeva musta linja kuvaa teräksistä kiinnitys- ja voimavälitysrakennetta, johon voidaan haluttaessa kohdistaa horisontaalinen kuormitus F_x . Keskiön kiinnitys on pelkästään stabiloiva. Taka-akselin kohdalla oleva kiinnitys voi olla niin ikään stabiloiva tai siihen voidaan kohdistaa vertikaalisuuntaista kuormitusta F_y .



15 KIERRÄTYS JA MATERIAALIN LOPPUSIJOITUS

Maastopyörän runko pyritään suunnittelemaan mahdollisimman pitkälle käyttöiälle. Käytännössä se on kuitenkin rajallinen. Aktiiviharrastaja käyttää samaa runkoa korkeintaan arviolta 5-6 vuotta. Ajosta ja käytöstä riippuen useat rungot voivat kestää ja toimia kiitettävästi huomattavasti pidempäänkin, mutta muun iskunvaimentimissa, runkogeometriassa, komponenteissa ja käytettävissä standardeissa tapahtuva kehitys aiheuttaa usein rungon vaihdon jo ennen tämän ajanjakson täyttymistä. Suurimpana syynä on kuitenkin todennäköisesti harrastajan halu hankkia uusi mahdollisesti parempi väline harrastusta varten. Tämän seurauksena voidaan sanoa, että useimmissa tapauksissa runkojen käyttöikä on rajallinen. Niiden loppusijoituksesta tai kierrätyksestä puhutaan kuitenkin harvoin ja etenkin hiilikuidun kohdalla tämä on tärkeää huomioida. Koska hiilikuidun ja muiden komposiittien käyttö yleistyy jatkuvasti osaamisen kasvun ja tuotantokustannusten laskun seurauksena, oikeanlainen ja mahdollisimman pitkälle viety kierrätys nousee entistä tärkeämpään asemaan. Ikävä kyllä tällä hetkellä suuri osa komposiiteista päättyy kaatopaikalle maantäytteeksi. Tällä sektorilla on kuitenkin entistä enemmän toimijoita, jotka ovat erikoistuneet juuri näiden materiaalien kierrättämiseen. Komposiittien ja muovien kierrättäminen on lakisäateistä tällä hetkellä ainakin Saksassa, Ranskassa, Englannissa ja Italiassa. Eniten kierrätystä tapahtuu silti komposiittien merkittävässä valmistusmaassa Japanissa.

Vaihtoehdot kierrätystä varten ovat kuitenkin vielä rajallisia. Käytetyt materiaalit ja tuotteet voidaan käyttää uudelleen tai polttaa. Jälkimmäisestä keinosta voidaan kiistellä, että onko se oikeasti kierrättämistä. Jos kuitenkin polttamisesta saatu lämpö tai sivutuotteet saadaan hyödynnettyä, niin sitä voi pitää parempana vaihtoehtona kuin materiaalin jätteenä päätymistä.

15.1 Polttaminen

Polttaminen on yleinen vaihtoehto jätteenkäsittelyssä. Se kuitenkin tuhoaa aina arvokasta materiaalia ja tuottaa usein myös saastetta. Hiilikuidun ja muutamien muiden komposiittien polttamisessa käytetään seuraavia prosesseja.

Pyrolyysissa epoksi tai sidosaine poltetaan pois paloreaktiossa tarkkaan rajoitetun happimäärän avulla. Jäljelle jäävä kuitumateriaali myydään eteenpäin jauhattavaksi, leikattavaksi tai pelleteitavaksi. Tätä prosessia käyttävät ainakin Englannissa toimiva

yritys Recycled Carbon Fibre Ltd ja Saksassa HADEG Recycling GmbH. Suomessa ei ole tiettävästi vielä vastaavaa toimintaa.

Leijupeti (*fluidized bed*) on menetelmä, jossa komposiitit upotetaan leijupetiin, jonka läpi syötetään kuumaa ilmaa 450-550 °C lämpötilassa. Tämän johdosta sidosaine rikkoutuu ja höyrystyy. Näin kuitumateriaali saadaan erotettua. Lisäksi syntynyt lämpö voidaan kerätä talteen ja käyttää hyödyksi.

Solvolyysissa (*solvolysis*) sidosaine ja kuitumateriaali erotetaan toisistaan prosessissa, joka käyttää korkeaa painetta ja lämpötilaa aina 200°C asti. Sidosaaine muuttuu reaktiossa veden avulla molekyyli­massaltaan kevyeksi alkoholiksi, joka mahdollistaa kuitujen erottamisen. Solvolyysin hyvänä puolena on, että kuitumateriaali säilyy prosessissa ehjänä, eli kuitujen alkuperäinen pituus ja tilavuus säilyy [35].

15.2 Kierrätys

Kierrätys voidaan jaotella eri asteisiin välillä 1-4. Ensimmäisen asteen kierrätys tarkoittaa tuotteen talteenottoa ja sen jalostamista samanlaiseksi tuotteeksi. Arvatenkin tämän työn aiheen piirissä tämä ei ole realistinen ratkaisu. Toisen asteen kierrätyksessä kierrätettävä materiaali käytetään sovelluskohteisiin, jotka eivät edellytä yhtä hyviä tai samoja materiaaliominaisuuksia kuin alkuperäinen käyttökohde. Kolmannen asteen kierrätyksessä komposiitin polymeerirakenne rikotaan ja nämä pienemmät partikkelit voidaan käyttää muiden polymeerien, polttoaineiden tai kemikaalien valmistukseen. Tässä kierrätystavassa kuitumateriaali ja sidosaine voidaan saada jossakin tapauksissa erotettua ja käytettyä uudelleen. Tämä ei kuitenkaan toteudu hiilikuidun kohdalla, koska se on kertamuovi tai ns. termosetti, eli sen komponentit (kuitu ja sidosaine) eivät ole helposti erotettavissa esimerkiksi vain korkean lämpötilan avulla. Viimeisen neljännen asteen kierrätyksessä materiaali poltetaan ja siitä saatu lämpö ja palotuotteet käytetään energiaksi.

15.3 Terveydelliset haittavaikutukset

Hiilikuitua koskevat samat terveydelliset haittavaikutukset kuin muillekin komposiiteille. Luonnollisesti valmistukseen liittyy omat tekijänsä muun muassa kemikaaleille altistumisen suhteen. Valmistusprosessi ei kuitenkaan koske loppukäyttäjää, joten tässä luvussa käsitellään vain rakenteen ja materiaalin käyttöä ja loppusijoitusta.

Muiden komposiittien tapaan hiilikuidun pääasialliset terveyshaitat liittyvät hienojakoiseen pölyyn rakenteen hajotessa tai sitä käsitellessä. Ilman mukana kulkeutuvat pienet partikkelit voivat päätyä iholle, silmiin tai keuhkoihin aiheuttaen oireita lievästä ärsytyksestä aina jopa palautumattomiin tai hengenvaarallisiin sairaustiloihin altistuksesta riippuen. Luonnollisesti hiilikuitukomponentteja ei tulisi modifioida itse, ellei alasta ole erittäin syvällistä tietämystä. Mahdollisen terveyshaitan aste riippuu pölyn laadusta, sen fysikaalisista ja kemiallisista ominaisuuksista, altistumisajasta ja annos-

tuksesta. Jos hiilikuitu käsittelee millään tapaa, tarvittavien suojavaarusteiden käyttäminen on erittäin tärkeää.

LÄHTEET

[1] - http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_%28fiber%29

[2] -

<http://www.acs.org/content/acs/en/education/whatischemistry/landmarks/carbonfibers.html#carbon-fiber-production>

[3] – Heyer, Michale. Stress Analysis of Fiber Reinforced Materials,. Destech Pubns Incl. 1 p.

[4] – Mazumdar, Sanjay. Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering. CRC Press 2001. 45 p.

[5] - http://www.rmi.org/RFGGraph-Carbon_fiber_market_share_by_company

[6] – Heyer, Michale. Stress Analysis of Fiber Reinforced Materials,. Destech Pubns Incl. 4 p.

[7] – Mazumdar, Sanjay. Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering. CRC Press 2001. 54 p.

[8] - Airasmaa, Kokko, Saarela. Komposiittirakenteet. Muoviyhdistys 2007. 267 s.

[9] - Wang, Chung, Chung. Impact damage of carbon fiber polymer-matrix composites, studied by electrical resistance measurement. 2004

[10] - http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042612-124752/unrestricted/Material_and_Design_Optimization_for_an_Aluminum_Bike_Frame.pdf

[11] - <http://www.velocite-bikes.com/carbon-fiber.html.html>

[12] - Airasmaa, Kokko, Saarela. Komposiittirakenteet. Muoviyhdistys 2007. 377 s.

[13] - https://en.wikipedia.org/wiki/Airbus_A350_XWB

[14] - https://en.wikipedia.org/wiki/McLaren_MP4/1

[15] - http://en.wikipedia.org/wiki/1981_Italian_Grand_Prix

- [16] - http://www.forskningsradet.no/en/Newsarticle/Better_structures_with_proper_composites/1253972527359
- [17] - http://en.wikipedia.org/wiki/7075_aluminium_alloy
- [18] - http://www.futurecompetitions.com/eCompetition/Media/1293/image/MBK240_comp%5B1%5D.jpg
- [19] - <http://s1243.photobucket.com/user/IBISMojoHDamon/media/IbisMojoHD.jpg.html>
- [20] – www.pole.fi
- [21] - <http://ep1.pinkbike.org/p5pb11363465/p5pb11363465.jpg>
- [22] - <http://www.englishforum.ch/attachments/sports-fitness-beauty-wellness/87091d1409742824-canyon-bikes-head-tube.jpg>
- [23] - http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/def_ge/kap_5/illustr/fig03.gif
- [24] - Airasmaa, Kokko, Saarela. Komposiittirakenteet. Muoviyhdistys 2007. 31 s.
- [25] - Mazumdar, Sanjay. Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering. CRC Press 2001. 131 p.
- [26] - Mazumdar, Sanjay. Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering. CRC Press 2001. 117 p.
- [27] - <http://en.wikipedia.org/wiki/Pre-preg>
- [28] – <http://fitwerx.com/carbon-fiber-quality-part-2-of-a-3-part-series-on-carbon-fiber-in-the-bike-industry>
- [29] - http://www.ibiscycles.com/support/technical_articles/all_about_carbon/
- [30] - Mazumdar, Sanjay. Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering. CRC Press 2001. 120 p.
- [31] – www.mondraker.com

[32] - Mazumdar, Sanjay. Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering. CRC Press 2001. 324 p.

[33] - Mazumdar, Sanjay. Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering. CRC Press 2001. 325 p.

[34] - Mazumdar, Sanjay. Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering. CRC Press 2001. 327 p.

[35] - <http://www.compositesworld.com/blog/post/recycling-carbon-fiber-for-structural-applications>