

Reko Ulmonen

Tietokoneavusteinen lujitemuoviosien suunnittelu

Catia V5 - Composites Design

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Opinnäytetyö

11.5.2014

Tekijä Otsikko	Reko Ulmonen Tietokoneavusteinen lujitemuoviosien suunnitteleminen
Sivumäärä Aika	23 sivua + 3 liitettä 11.5.2014
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja	Projektipäällikkö Harri Santamala
<p>Tämä opinnäytetyö tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoulun ja UPM:n Biofore Concept Car -hankkeeseen. Hanke lähti käyntiin vuonna 2010 ja Biofore-konseptiauto julkaistiin Geneven autonäyttelyssä vuonna 2014. Konseptiautossa on itsekantava hiilikuitukori ja siinä on muutenkin käytetty laajasti kuitukomposiittisia osia. Niiden suunnittelun on kehitelty useita erilaisia ohjelmia, mutta tässä työssä keskitytään Catian tarjoamaan vaihtoehtoon.</p> <p>Tämän työn tavoitteena oli perehtyä Catia V5 -ohjelman Composites Design -alustaan ja luoda selkeät käyttöohjeet sitä varten sekä samalla suunnitella ja valmistaa mekaanisen pysäköintiavustimen hiilikuituiset rakenneosat. Käyttöohje on tarkoitettu suunnittelijoille, jotka osaavat jo käyttää Catian pintatyökaluja. Koska komposiittiosien suunnitteleminen vaatii niiden ominaisuuksien ja valmistustekniikoiden tuntemusta, niin työssä käydään myös niitä lyhyesti läpi.</p> <p>Composites Design -alustaa käytettiin konseptiauton mekaanisen pysäköintiavustimen rakenteen suunnittelussa. Työssä käydään läpi sen suunnittelun ja valmistuksen työvaiheet aina lähtötilanteesta testivaiheeseen asti. Catiassa on laaja valikoima työkaluja, joten sillä suoritettiin kaikki suunnittelun työvaiheet pintamallinnuksesta aina rakenteen ja muottien suunnitteluun asti. Catian komposiittiosien suunnittelutyökalun todettiin soveltuvan erityisesti alustavien suunnitelmien tekemiseen, mutta suurempien kokonaisuuksien lujuustarkasteluille sen todettiin olevan liian raskas. Suurempia sarjoja varten sen avulla voidaan myös suunnitella tarkat kuitujen leikkaukset, minkä avulla voidaan nopeuttaa valmistusta, minimoida materiaalikulut ja arvioida osan ominaisuudet tarkemmin.</p> <p>Työn yhteydessä suunniteltu mekaaninen pysäköintiavustin koekäytettiin autossa ja sen todettiin kestävän. Catian Composites Design -alustalle luotiin myös selkeä käyttöohje, joka on työssä liitteenä.</p>	
Avainsanat	Biofore, Catia, Komposiitti

Author Title	Reko Ulmonen Computer-aided Design of Composites
Number of Pages Date	23 pages + 3 appendices 11 May 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor	Harri Santamala, Project Manager
<p>The Biofore Concept Car was built and designed by Helsinki Metropolia University students and it uses UPM's new biomaterials to replace some of more traditional materials. The body is mainly made from the carbon fiber composite but it also contains some cellulose fiber composite as well. Most of the body panels are also made from the fiber composite materials. Various programs were developed to design the composite parts. This thesis concentrates on dealing with the Catia's option.</p> <p>The objective of this Bachelor's thesis was to get familiar with the Composites Design workbench and to create a straightforward guide for designers, and to design and manufacture structural carbon fiber composite components for the parking assistant in the car. This guide was created for the designers who already know how to design surfaces with the Catia. Because the properties of composites differ from the more traditional materials, they are also dealt with briefly in this thesis.</p> <p>The Composites Design workbench was also used to design the structural composite components of the mechanical parking assistant for the Biofore Concept Car. The design process is described phase-by-phase from the beginning phase to the testing phase. Catia has wide range of tools, and it was used from the preliminary design phase to the structural analysis and the mold designing phase. Composites Design workbench seemed to work best at the preliminary composites design phase, but Catia seemed to be quite heavy with the structural analysis at the bulkier components. For the larger series, the stacking can be designed with precise plies and darts, which makes the stacking faster and estimating the material costs more accurate.</p> <p>As a result of this thesis the parking assistant was designed and it had a test run in the car. It seemed to handle the stress well. A manual for using the Catia Composite Design workbench was also created as a result of this thesis and it can be found in the appendix of this thesis.</p>	
Keywords	Biofore, Catia, Composite

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Tavoitteet	1
1.2	Biofore Concept Car -hanke	1
1.3	6-pyöräjärjestelmä	2
2	Lujitemuovit	2
2.1	Yleistä komposiiteista	2
2.2	Kuitukomposiittien mekaaniset ominaisuudet	3
2.3	Lujitemuoviosien valmistaminen	5
3	Composites Design	6
4	6-pyöräjärjestelmä	7
4.1	Rakenteen suunnittelu	9
4.2	Valmistus	16
5	Yhteenveto	21
	Lähteet	23
	Liitteet	
	Liite 1. Arviointimenetelmien kaavat	
	Liite 2. Materiaaliarvot	
	Liite 3. Käyttöohje: Catia V5 - Composites Design	

1 Johdanto

1.1 Tavoitteet

Tämän insinööriyön tavoitteena oli perehtyä Catia V5 -ohjelman Composites Design -alustaan ja luoda siihen selkeät käyttöohjeet sekä samalla suunnitella ja valmistaa mekaanisen pysäköintiavustimen hiilikuituiset rakenneosat. Composites Design -alustaan perehdyttiin konseptiauton mekaanisen pysäköintiavustimen suunnittelun yhteydessä. Pysäköintiavustimen suunnittelu ja valmistus on käyty läpi työssä aina suunnittelusta ensitesteihin saakka. Lujitemuoviosien suunnitteleminen vaatii niiden ominaisuuksien ja valmistustekniikan ymmärtämistä, joten työssä käydään myös lyhyesti niitä läpi. Työssä tutustutaan myös Composites Design -alustan ominaisuuksiin, mutta tarkemmat käyttöohjeet ovat liitteenä (liite 3).

1.2 Biofore Concept Car -hanke

Biofore Concept Car -hanke on Metropolia Ammattikorkeakoulun ja UPM:n vuonna 2010 alkanut yhteishanke. Ideana hankkeessa oli antaa opiskelijoille mahdollisuus olla mukana suunnittelemassa ja valmistamassa tieliikenteeseen rekisteröitävää kaupunkiautoa, jossa demonstroidaan UPM:n biopohjaisten materiaalien käyttömahdollisuuksia erilaisissa käytännönsovellutuksissa. Hankkeen päätavoite oli alusta asti Geneven autonäyttely vuonna 2014 (kuva 1). Tavoite, osallistuminen messuille sekä laaja medianäkyvyys, saavutettiin menestyksekkäästi.



Kuva 1. Biofore Concept Car Geneven autonäyttelyssä vuonna 2014

1.3 6-pyöräjärjestelmä

Projektin alkuvaiheista lähtien autoon ideoitiin mekaanista pysäköintiavustinta, jossa auton takapäähän lisätään tarvittaessa laskettavat ja etuakselin keskipisteeseen nähden kohtisuorassa olevat apupyörät. Niiden avulla auto pystyy pyörimään etuakselinsa keskipisteeseen nähden, minkä tarkoituksena on helpottaa ahtaisiin parkkipaikkoihin pysäköimistä. Tästä mekaanisesta pysäköintiavustimesta, tuttavallisemmin 6-pyöräjärjestelmästä, on tehty ennen tätä opinnäytetyötä kaksi eri versiota. Tämän opinnäytetyön ja projektikurssiryhmän kanssa yhteistyössä suunniteltiin ja valmistettiin kolmas versio, jonka tavoite oli olla kevyempi, toimiva ja paremmin piilossa oleva 6-pyöräjärjestelmä.

2 Lujitemuovit

2.1 Yleistä komposiiteista

Komposiitti on yleisnimi kaikille kahden tai useamman materiaalin yhdistelmille, joissa materiaalit toimivat yhdessä, mutta eivät ole lienneet tai sulautuneet toisiinsa. Tässä työssä keskitytään komposiittien alaryhmään kuuluviin kuitulujitteisiin kertamuoveihin eli lujitemuoveihin. Lujitemuovin rakenneosista voidaan erottaa sitova ainesosa, eli matriisi

sekä jäykistävänä ja lujittavana ainesosana toimiva kuitu. (1, s. 17.) Komposiittirakenteiden suunnitteleminen vaatii niiden ominaisuuksien ymmärtämistä, minkä takia työssä käydään läpi niiden perusominaisuuksia lyhyesti.

Kertamuovilla tarkoitetaan hartsin kovettumisreaktiosta muodostunutta muovia, jota ei voi enää uudelleen muovata lämmön avulla toisin kuin kestumuoveja. Niistä voi myös suhteellisen helposti valmistaa monimutkaisiakin osia, mikä antaa muotoilulle vapauksia. Niiden valmistaminen on kuitenkin suhteellisen kallista ja sarjatuotanto haastavaa metalliin verrattuna. Kuitukomposiiteista voidaan kuitenkin valmistaa ominaispainoltaan huomattavasti metalleja kevyempiä osia. (1, s. 14–15.)

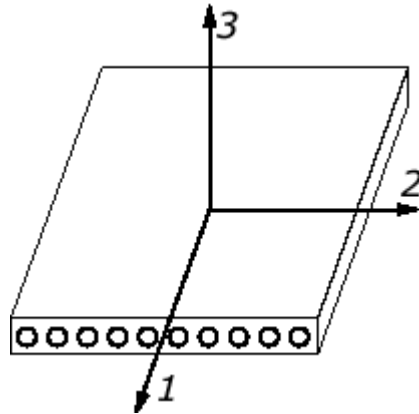
Hartsivalinnoilla voidaan vaikuttaa mm. komposiittirakenteen kustannustehokkuuteen, kovettumisaikaan sekä lämpö- ja iskukestävyyteen. Suurin vaikutus matriisin lujuusominaisuuksilla on rakenteeseen kohdistuvan voiman poiketessa kuidunsuunnasta. Hartsien valinnassa tulee ottaa huomioon valmistustekniikka niin, että hartsin viskositeetti ja kovettumisaika ovat sopivia. (2, s. 22–25.) Esimerkiksi polyesterihartsien styreeni alkaa kiehua alle 0,4–0,5 bar:n paineissa, eikä se näin ole sopivaa hartsia alipainetta käyttäville valmistustekniikoille (3, s. 24).

Kuituvalinnat vaikuttavat merkittävästi mm. komposiittirakenteen kustannustehokkuuteen, lujuuteen, iskunkestävyyteen ja painoon. Yleisimpiä lujitteita ovat lasi-, aramidi- ja hiilikuidut. Lujitemuovin ominaisuudet määräytyvät pääasiassa kuituvalinnan mukaan. Kuituja on saatavilla jatkuvina ja katkottuina. Jatkuvat kuidut voidaan suunnata rakenteeseen kohdistuvien voimien mukaan, mikä luo haasteita ja mahdollisuuksia komposiittirakenteen optimointiin. (1, s. 19–20.) Komponenttien tilavuusosuudet vaikuttavat komposiittirakenteen ominaisuuksiin siten, että mitä suurempi osuus rakenteesta on lujitettua tiettyyn rajaan asti, niin sitä paremmat ominaisuudet materiaalilla ovat. Jotta kuitujen välissä olisi riittävästi kuormituksia siirtävää muoviainetta, niin lujitepitoisuuden yläraja rakenteessa on käytännössä n. 70 %. Tilavuusosuudet määrittyvät yleensä valmistustekniikan mukaan. (1, s. 347.)

2.2 Kuitukomposiittien mekaaniset ominaisuudet

Kuitukomposiittien ominaisuudet poikkeavat metalleista. Useimmat metallit ovat isotrooppisia, eli niiden ominaisuudet ovat kauttaaltaan samanlaiset, kun taas jatkuvilla yh-

densuuntaisilla ja ristikkäisillä kuitukerroksilla ominaisuudet ovat ortotrooppisia eli kerrosten ominaisuudet vaihtelevat tarkastelusuunnan mukaan. Suunnitteluvaiheessa merkittävin ero ilmenee materiaalien kimmoarvojen määrässä, mikä kuvaa materiaalin mekaanista käyttäytymistä. Isotrooppisten materiaalien kimmoarvojen määrittämiseen riittää kolmen materiaalivakion tieto: kimmomoduuli (E), Poissonin vakio (ν) ja liukumoduuli (G). Ortotrooppiset materiaalit vaativat samojen materiaalivakioiden määrittämistä kolmessa pääsuunnassa (kuva 2). (1, s. 306–309.) 123-akselisto vastaa xyz-akselistoa. Pääsuunta on akseli numero yksi, jonka suhteen kuidun suuntaus ilmoitetaan asteissa.



Kuva 2. Pääsuunnat (4)

Kuitukomposiittien pääsuuntien kimmoarvoihin vaikuttavat mm. komponenttien kimmoarvot, niiden seossuhteet sekä lujitteen kudostyyppi. Niiden määrittämistä varten on olemassa nk. sekoituskaavat, mutta niissä ei ole otettu huomioon useita kimmoarvoihin vaikuttavia fysikaalisia tekijöitä. Näitä tekijöitä ovat esimerkiksi huokoisuus ja kuitujen epämääräinen sijoittuminen komposiitissa. Näin ollen kaavoista saa lähinnä karkeat likiarvot, joita tulee varmentaa tarkemmilla materiaalikoelilla. (1, s. 304–306.)

Isotrooppiset materiaalit käyttäytyvät kuormitettuna myötörajaan asti lineaarisesti, mutta sen ylittämisen jälkeen niihin jää pysyviä muodonmuutoksia. Kuitulujitettuihin muoveihin puolestaan syntyy riittävällä kuormilla matriisi- ja sidosmurtumia, joiden seurauksena niiden käyttäytyminen muuttuu epälineaariseksi, eli muodonmuutokset eivät ole enää suoraan verrannollisia rasitukseen. Tämän takia lujitemuovien tarkastelussa joudutaan turvautumaan arviointeihin enemmän kuin metalleilla. (1, s.308.)

Lujitemuovin kerrosten kestämisen arviointiin on kehitetty useita eri arviointimenetelmiä, jotka perustuvat mitattuihin murtoarvoihin. Kestävyyttä tulee tarkastella jokaisessa kuitukerroksessa erikseen. Yksinkertaisin tapa on verrata jännitys- ja venymäkomponentteja

erikseen niin, että oletetaan rakenteen kestävänsä jokin komponentti ylittää mitatun murtoarvon. Nämä nk. maksimijännitys- ja maksimivienymäarvot voivat antaa yliarvioituja lujuusarvoja, sillä ne eivät huomioi komponenttien vuorovaikutusta. Tämän takia on kehitetty useita erilaisia arviointikriteerejä, jotka ottavat huomioon myös komponenttien vuorovaikutuksen. Kaikki nämä tulokset ovat kuitenkin vain hyviä arviointimalleja, jotka tulee varmentaa kokeellisesti. (1, s. 332–334.)

2.3 Lujitemuoviosien valmistaminen

Lujitemuoviosien valmistamiseen on kehitelty useita erilaisia tekniikoita, mutta perusperiaate on kuitenkin lähes kaikilla tekniikoilla sama. Lujitteina toimivat kuidut asetellaan pintakäsitellyn muotin päälle, minkä jälkeen lisätään sitovana aineena toimiva hartsi. Poikkeuksena tästä ovat muovilla esikyllästetyt lujitteet, eli prepregit, jotka säilytetään kylmässä ja valmistettaessa hartsi aktivoidaan lämmön ja paineen avulla. Hartsin kovettua lujitemuoviosa voidaan irrottaa muotista ja ottaa käyttöön.

Kuitukomposiittien valmistustekniikan valintaan vaikuttaa sarjamäärät, budjetti, kappaleen koko ja muodot, sekä tavoitellut ominaisuudet (1, s. 210). Kuitujen tilavuusosuuden lisäämisellä ja huokoisuuden vähentämisellä paranevat lujitemuoviosan ominaisuudet, mikä onnistuu paineen avulla. Suuri paine puolestaan vaatii kestävämmän muotin, mikä tarkoittaa isompia muottikustannuksia.

Esimerkiksi yksittäisiä kappaleita, kuten prototyyppiajoneuvoja, valmistettaessa parhaat ominaisuudet kustannuksiin nähden saavutetaan ns. pehmeillä muoteilla ja alipainesäkkikövetuksen avulla. Siinä kuidut ladotaan pintakäsitellyn muotin päälle ja suljetaan ilmatiiviiseen säkkiin. Säkki imetään tyhjäksi alipainepumpulla, minkä jälkeen sekaan syötetään hartsi. Pehmeiden muottien työstäminen on helpompaa kuin metallisten ja niiden kustannukset jäävät muutenkin pienemmiksi. Alipaineen avulla puolestaan saavutetaan hyvä lujitetiheys ja alhainen huokoispitoisuus, mikä tarkoittaa hyviä lujuusominaisuuksia. Prepregien käyttäminen on myös mahdollista tällä tekniikalla, jolloin lujitteen ja muovin suhde on jo valmiiksi optimoitu. Huonoiksi puoliksi voidaan todeta muottien kestäämättömyys, sekä tarvittavan käsityön ja osaamisen määrä. (3, 24–27.) Kun tavoitteena on valmistaa ominaisuuksiltaan vaativampia kappaleita, kuten lentokoneen osia, voidaan kuitukomposiitin huokoisuutta vähentää ja kuitujen tilavuusosuutta parantaa lisäämällä ulkoinen paine. Tämä voidaan esimerkiksi toteuttaa autoklaavilla, jolloin koko muotti laite-

taan paineistettuun ja lämmitettyyn tilaan paine-eron tehostamiseksi. Autoklaavi on itsessään jo kallis investointi, sekä se vaatii myös muoteilta suurempaa kestävyyttä. (3, s. 32–33.)

3 Composites Design

Tässä kappaleessa käydään läpi Composites Design -alustan ominaisuuksia. Käyttöohjeet puolestaan ovat työssä mukana liitteenä. Catian Composites Design -alusta tarjoaa työkalut komposiittirakenteen alustavasta suunnittelusta aina valmistuksen suunnitteluun asti. Määritetylle rakenteelle voidaan myös suorittaa lujuustarkasteluja käyttäen Catian Generative Structural Analysis -alustaa. Composite Design -alusta vaatii EX2-lisenssin, eikä sitä näin ollen löydy pelkästään opiskelijalisenssillä varustetuista versioista. Komposiittirakenne on myös mahdollista siirtää toiselle ohjelmalle esimerkiksi lujuustarkasteluja varten, mutta tämä vaatii erillisen lisenssin. Kuitukerrokset määritellään pintojen päälle, joten Catian pintatyökalut tulee hallita.

Kerrosten määrittämiseen alusta tarjoaa monta lähestymistapaa, mistä suunnittelijan tehtäväksi jää valita itselleen ja rakenteelle sopivin. Komposiittirakenne voidaan määrittää kerros kerrokselta, taulukko- tai aluepohjaisena. Suunnittelutekniikan valitsemiseen vaikuttaa suunniteltavan kappaleen ominaisuudet. Kerros kerrokselta määrittäminen voi tuntua aluksi yksinkertaisimmalta tavalta, mutta kun rakenteessa alkaa olla monta kerrosta niin sen muokkaaminen on todella työlästä. Taulukkopohjainen lähestymistapa sopii erityisesti laajoja ja yksinkertaisia kappaleita, kuten lentokoneen siipiä, suunnitellessa. Kuitukerrosten määrää, alueita ja suuntia on helppo muokata ja vahvikkeita lisätä, kun alueet ovat jo etukäteen rajattu. Monimutkaisempia kappaleita varten parhaaksi todettiin aluepohjainen suunnittelu. Siinä alueiden rajat määritetään manuaalisesti osan pintaan, mikä helpottaa paikallisten vahvikkeiden määrittämistä.

Suunnitellun komposiittirakenteen ominaisuuksia voidaan tarkastella tarkemmin alustan työkalujen avulla. Siitä saadaan selville mm. arviot kappaleen painosta, painopisteestä, tarvittavasta materiaalin määrästä ja hinnasta. Ladontaa voidaan myös tarkastella visuaalisesti tuomalla se joko yhtenä kiinteänä osana tai erillisinä kerroksina, mikä helpottaa komposiittirakenteen hahmottamista. Arviot osuvat yleensä kuitenkin hiukan alakanttiin, koska ne eivät ota huomioon ladontavaiheessa tullutta kuitujen osittaista päällekkäisyyttä.

Osan kestävyyttä voidaan arvioida Catian Generative Structural Analysis -alustassa, jos on tiedossa siihen kohdistuvat rasitukset ja kiinnityspisteet. Catiaan on sisäänrakennettu komposiittirakenteille tarkoitettuja arviointimenetelmiä, joita ovat maximum failure, Tsai-Hill, Tsai-Wu ja Hoffman. Maximum failure arvioi rakenteen kestävyyttä kuitukerroksittain ensimmäisenä pettävän komponentin perusteella, kun taas muut menetelmät ottavat huomioon eri tekijöiden yhteisvaikutuksen. Arviointimenetelmien kaavat löytyvät liitteestä 1. Manuaalinen optimointi on kuitenkin todella työlästä, sillä komposiittirakenteen kestävyuden laskeminen riittävällä tarkkuudella vie aikaa. Catiasta löytyy myös optimointityökalu, mutta optimointiin on olemassa tehokkaampia ohjelmia.

Kappaleen valmistettavuutta voidaan myös arvioida simuloimalla kuitujen käyttäytymistä ladottaessa, mikä voi auttaa tarvittavien leikkausten ja mahdollisten rypyyjen muodostumisen arvioinnissa. Kuitukerroksiin voidaan myös simuloida viiltoja helpottamaan vaikeiden kohtien asettumista. Niistä voidaan myös tuoda ääriarajat niin tasaiseksi leviteytyssä muodossa kuin osan muodossakin, minkä avulla voidaan leikata oikean muotoisia paloja ladontaa varten. Näiden simuloimiseen tarvittavia kuitujen taipumisen arvoja ei kuitenkaan löydy materiaalitoimittajalta, vaan ne tulee todeta kokeellisesti. Yksittäisiä kappaleita valmistettaessa kerrosten tarkka suunnitteleminen ei ole kannattavaa, koska siihen kuluva aika on suurempi kuin siitä saatava hyöty. Suuremmissa sarjoissa niiden avulla voidaan osien valmistus suorittaa huomattavasti nopeammin ja samalla voidaan arvioida materiaalikulut tarkemmin. Ääriviivojen avulla voidaan leikkauttaa tietokoneohjatulla kuituleikkurilla tarkat kuitukerrokset ja ne niiden latomista voidaan helpottaa laserilla muottiin heijastettujen viivojen avulla.

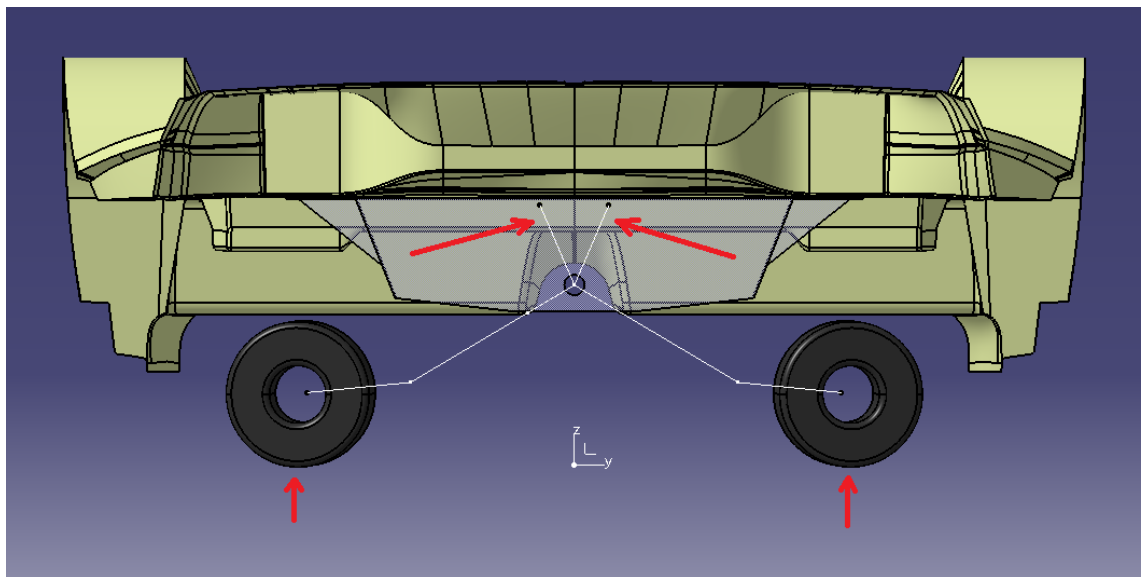
4 6-pyöräjärjestelmä

6-pyöräjärjestelmän kolmas versio suunniteltiin yhteistyössä projektikurssiryhmän kanssa. Heidän tehtävänä oli suunnitella aikaisempia versioita paremmin piiloon menevä, toimiva ja kevyempi mekaaninen pysäköintiavustin. Mahdollisimman kevyen rakenteen saavuttamiseksi päädyttiin käyttämään hiilikuitua rakenteen tukivarsissa ja rungossa, joiden rakenteiden suunnitteleminen yhdistettiin tähän opinnäytetyöhön. Projektikurssiryhmä suunnitteli mekaniikan ja raja-arvot rakenteelle, mutta tukivarsien ja rungon tarkempi suunnittelu jätettiin tälle opinnäytetyölle. Lujitemuoviosien muotit ja osien

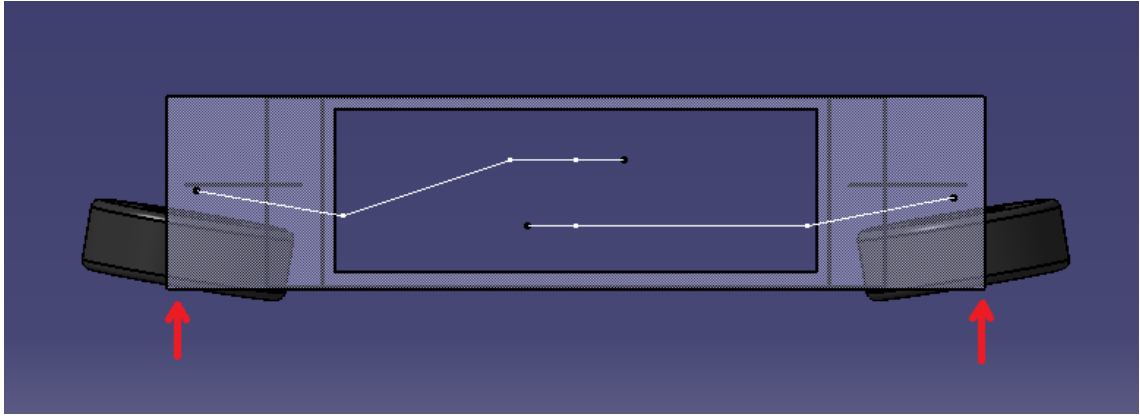
valmistus tehtiin yhteistyössä, mutta metalliset osat ja kokoonpano oli pääasiassa projektikurssiryhmän tehtäviä.

Lähtötilanne tämän opinnäytetyön osalta oli hahmotelma auton takakontin alle menevästä rungosta. Tukivarsista oli myös olemassa viivamallit ja toivotut liikeradat. Selvillä oli myös rakenteeseen kohdistuvien voimien arviot, sekä hiilikuituisiin osiin haluttujen kiinnikkeiden ja osien paikat. Tehtävänä oli suunnitella hiilikuituiset rakenteet, suunnitella ja valmistaa muotit sekä valmistaa hiilikuituiset osat.

Rakenteisiin kohdistuvan suurimman rasituksen oletettiin tulevan noston alussa ja jyrkässä ylämäessä. Auton lopullinen massa ei kuitenkaan ollut vielä tässä vaiheessa tiedossa, joten raja-arvot määriteltiin hyvien arvioiden perusteella. Auton ollessa täysin lastattuna arvioitiin pyörää kohden kohdistuvan noin 3000 N voiman, jolloin tukivarsien yläpäihin laskettiin kohdistuvan noin 12000 N:n voima (kuva 3). Jyrkässä ylämäessä tukivarsiin arvioitiin kohdistuvan noin 2600 N:n suuruinen voima, eli 1300 N tukivartta kohden (kuva 4).



Kuva 3. 6-pyöräjärjestelmän viivamalli takaapäin katsottuna



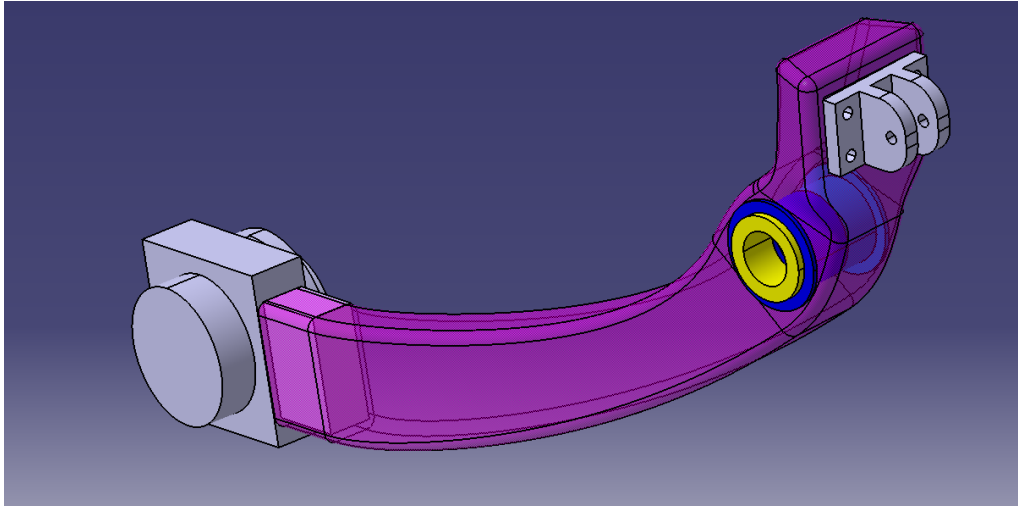
Kuva 4. 6-pyöräjärjestelmän viivamalli ylhäältäpäin katsottuna

4.1 Rakenteen suunnittelu

Lähtökohtana oli suunnitella 6-pyöräjärjestelmän hiilikuituiset osat niin, että se voidaan itse valmistaa alusta loppuun Metropolian tiloissa. Metropolian Tikkurilan toimipisteellä oli käytettävissä 3-akselinen CNC-jyrsin. Metropolian Hernesaaren toimitiloissa oli käytössä alipainepumppu, jonka avulla alipaineeseen injektointi on mahdollista. Osia suunniteltaessa pyrittiin välttämään teräviä muotoja, jotta rakenteeseen kohdistuvat rasitukset jakautuisivat mahdollisimman tasaisesti koko rakenteeseen ja osat olisi helposti valmistettavissa. Muottien tuli olla myös päästäviä, jotta ne olisivat mahdollisia jyrsiä 3-akselisella CNC-koneella ja osat saataisiin vielä irrotettua muotista. Päästävyydellä tarkoitetaan sellaisia muotoja, että muotti on mahdollista jyrsiä 3-akselisella koneella yhdellä kertaa ja samalla tuli välttää pystysuoria seinämiä.

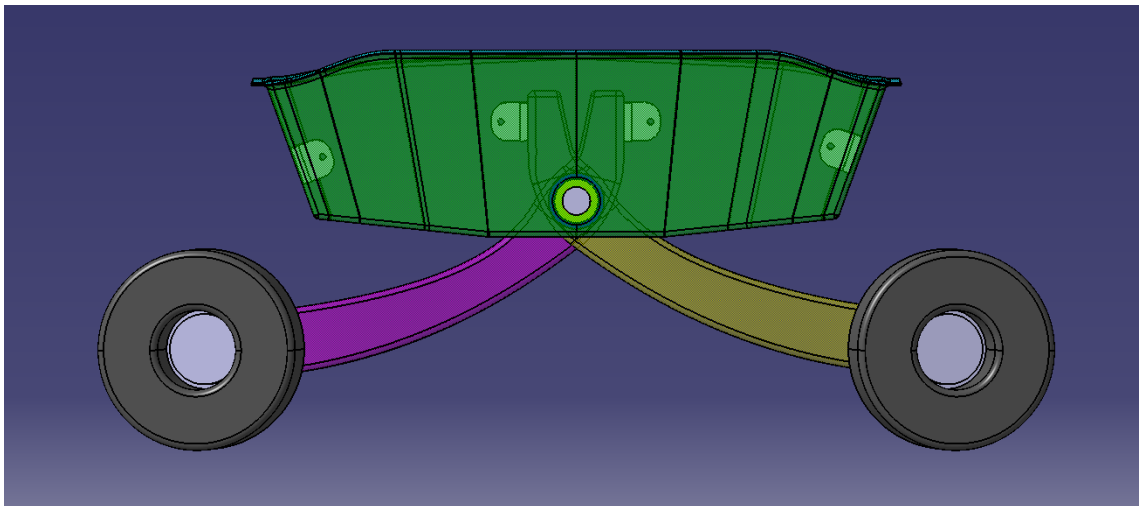
Rakenteisiin kiinnittyvät komponentit ja valmistustekniset seikat antoivat suuntaviivat osien ja niiden muottien suunnittelulle. 6-pyöräjärjestelmän runko suunniteltiin valmistettavan kahdesta osasta, jotka kiinnittyvät toisiinsa niittien ja epoksiliiman avulla. Yhtä tukivartta kohden käytettiin kolmea muottia, joista kaksi oli Sikablockiin jyrsittäviä naarasmuotteja ja yksi kuitujen latomista varten tarkoitettu Finnfoamista valmistettava muotti.

Tukivarsiin suunniteltiin kiinnitettäväksi vaihteisto, paineilmapussin kiinnike ja akseli. Kuvassa 5 on vasemman tukivarren 3d-malli, josta ilmenee siihen kiinnittyvät komponentit.

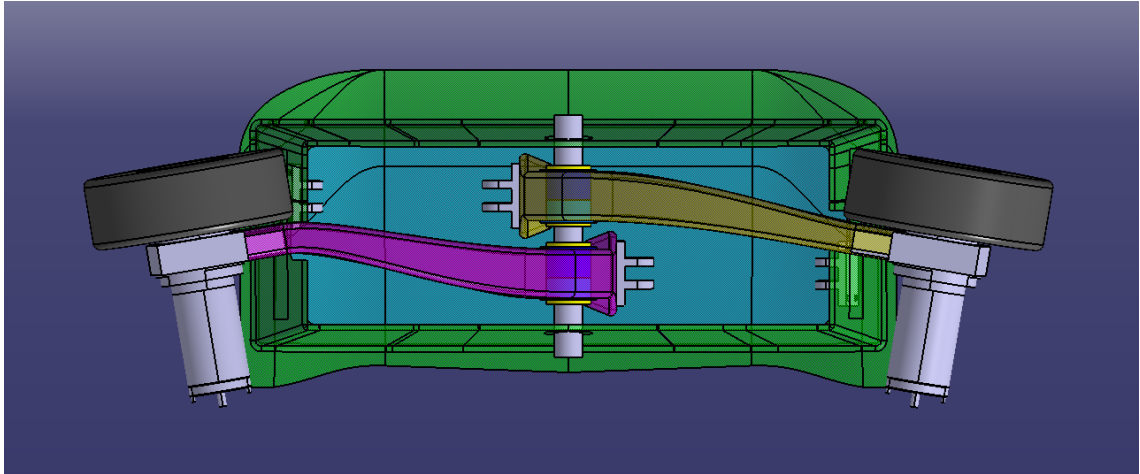


Kuva 5. Vasemmanpuoleisen tukivarren 3d-malli ja siihen kiinnittyvät komponentit

6-pyöräjärjestelmän rakenne on havainnollistettu kokonaisuudessaan kuvissa 6 ja 7. Erikseen valmistettavat lujitemuoviosat näkyvät kuvissa eri väreillä.

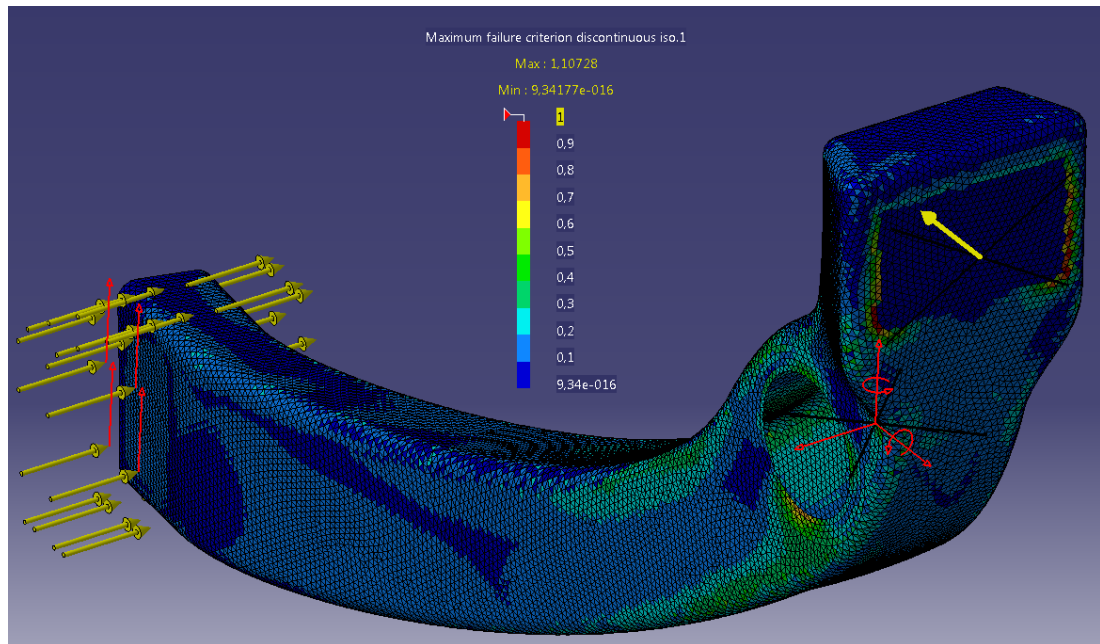


Kuva 6. 6-pyöräjärjestelmän valmis malli takaapäin katsottuna



Kuva 7. 6-pyöräjärjestelmän valmis malli alhaaltapäin katsottuna

Tukivarsille ja rungoille suoritettiin lujuustarkastelut. Tukivarsien yläpäähän todettiin kohdistuvan suuret rasitukset, joten niihin päätettiin lisätä paikalliset vahvikkeet. Muihin osiin ei tarvinnut lisätä paikallisia vahvikkeita. Rungossa päädyttiin käyttämään Soric SF2-ydinainetta, jotta kerrosrakenteen avulla saavutettaisiin lisää jäykkyyttä. Komposiittirakenteen kestävyyttä arvioitiin maximum failure, Tsai-Wu ja Tsai-Hill -menetelmien mukaan (kuva 8). Komposiittirakenteen lujuustarkastelut ovat kuitenkin lähinnä suuntaa antavia useista muuttujista johtuen, joten niiden kestäminen tulisi varmentaa käytännön kokeilla. Näihin ei kuitenkaan ollut tämän työn yhteydessä mahdollisuutta, joten kestävyudessa päädyttiin luottamaan suureen varmuuskertoimeen ja Biofore-konseptiauton rungon suunnittelussa käytettyjä hiilikuidun materiaaliarvoja. Ydinaineen materiaaliarvoina käytettiin toimittajan ilmoittamia materiaaliarvoja. Käytetyt materiaaliarvot löytyvät liitteestä 2.



Kuva 8. Vasemman tukivarren lujuustarkastelu

Tukivarsissa suunniteltiin käytettävän letkumaiseksi punottua hiilikuitulujitetta, kansankielellä hiilikuitusukkaa, latomisen helpottamiseksi. Hiilikuitusukan ilmoitettu mitta kuvaa sen halkaisijaa kuitujen ollessa 45 asteen kulmassa kuitusuuntaan nähden, mutta sitä voidaan kasvattaa noin 30 %:n ja kutistaa 70 %:n verran. Sukan halkaisijan muutos vaikuttaa myös kuitujen suuntaukseen ja näin ollen rakenteen ominaisuuksiin. Rakenteessa käytettävän hiilikuitusukan ominaishalkaisija valittiin vastaamaan mahdollisimman lähelle tukivarren suurinta halkaisijaa, jolloin kuitusuunnan poikkeavuuden vaikutuksen voitiin olettaa olevan minimaalinen. Tukivarsien kohdistuvien voimien luonteen takia rakenne vaati myös 0 asteen suuntaisia kuituja. Lujuustarkasteluiden perusteella tukivarsien todettiin toimivan identtisillä ladonnoilla. (Kuva 9.)

Sequence	Ply	Material	Osa	Vahvike ala	Vahvike Yla
Sequence.1	Ply.1	CF Braided Sleeve 6k 430gsm	45		
Sequence.2	Ply.2	CF Twill 12k 450gsm		0	
Sequence.3	Ply.3	CF Twill 12k 450gsm			0
Sequence.4	Ply.4	CF Twill 12k 450gsm	0		
Sequence.5	Ply.5	CF Braided Sleeve 6k 430gsm	45		
Sequence.6	Ply.6	CF Twill 12k 450gsm	0		
Sequence.7	Ply.7	CF Twill 12k 450gsm			0
Sequence.8	Ply.8	CF Twill 12k 450gsm		0	
Sequence.9	Ply.9	CF Braided Sleeve 6k 430gsm	45		

Kuva 9. Tukivarsien ladontakartta

6-pyöräjärjestelmän rungkon alaosassa päädyttiin kuvan 10 mukaiseen ladontaan.

Sequence	Ply	Geo-Lvl	Material	Runko	Soric
Sequence.	Ply.1	6	CF Twill 12k 450gsm	0	
Sequence.	Ply.4	3	CF Twill 12k 450gsm	45	
Sequence.	Ply.2	5	CF Twill 12k 450gsm	0	
Sequence.	Ply.7	1	Soric SF 2		default
Sequence.	Ply.3	4	CF Twill 12k 450gsm	0	
Sequence.	Ply.5	2	CF Twill 12k 450gsm	45	
Sequence.	Ply.6	1	CF Twill 12k 450gsm	0	

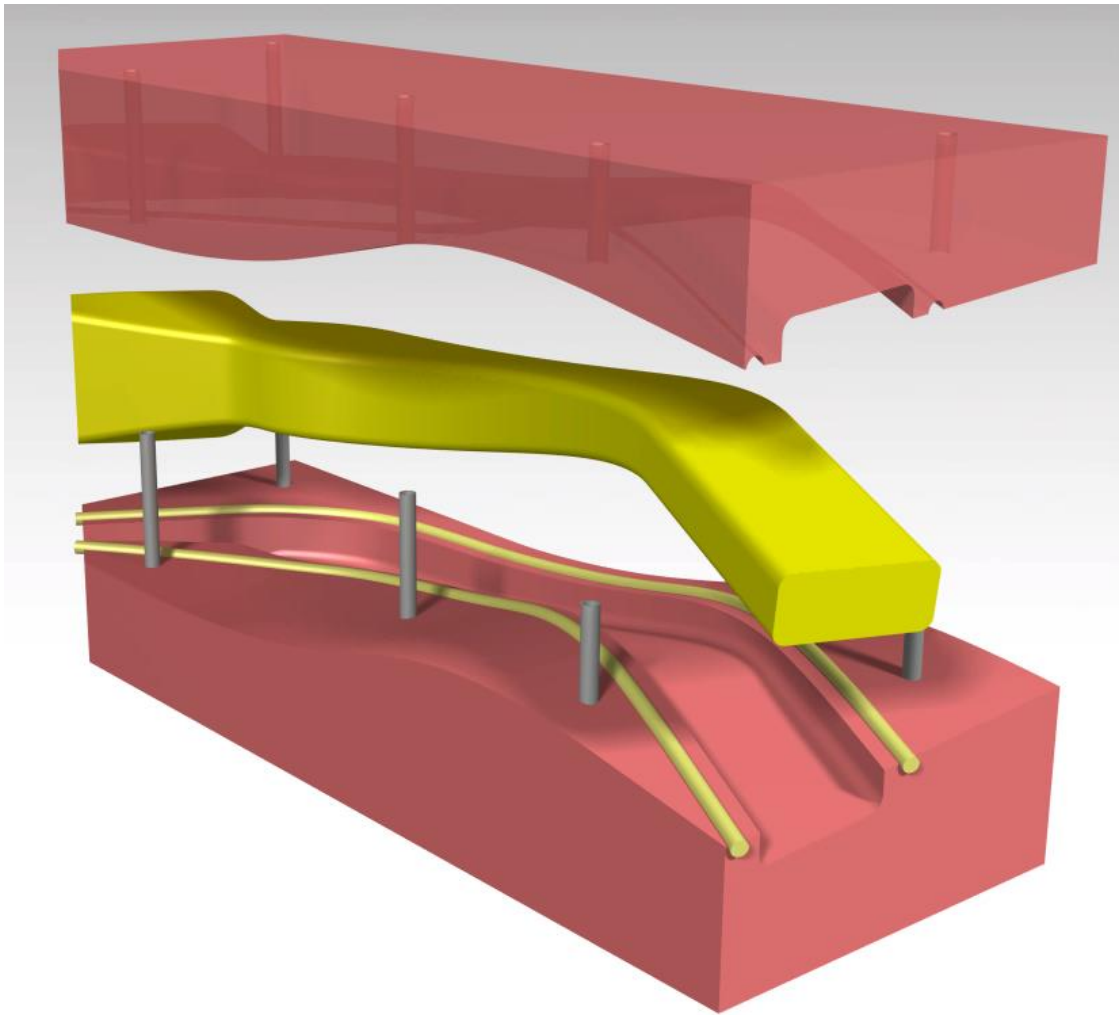
Kuva 10. Rungon alaosan ladontakartta

Suurimmat rasitukset rungossa kohdistuivat alaosaan, joten yläosassa todettiin riittävän kuvan 11 mukainen ladonta.

Sequence	Ply	Geo-Lvl	Material	Katto
Sequence.	Ply.1	3	CF Twill 12k 450gsm	0
Sequence.	Ply.3	1	CF Twill 12k 450gsm	45
Sequence.	Ply.2	2	CF Twill 12k 450gsm	0

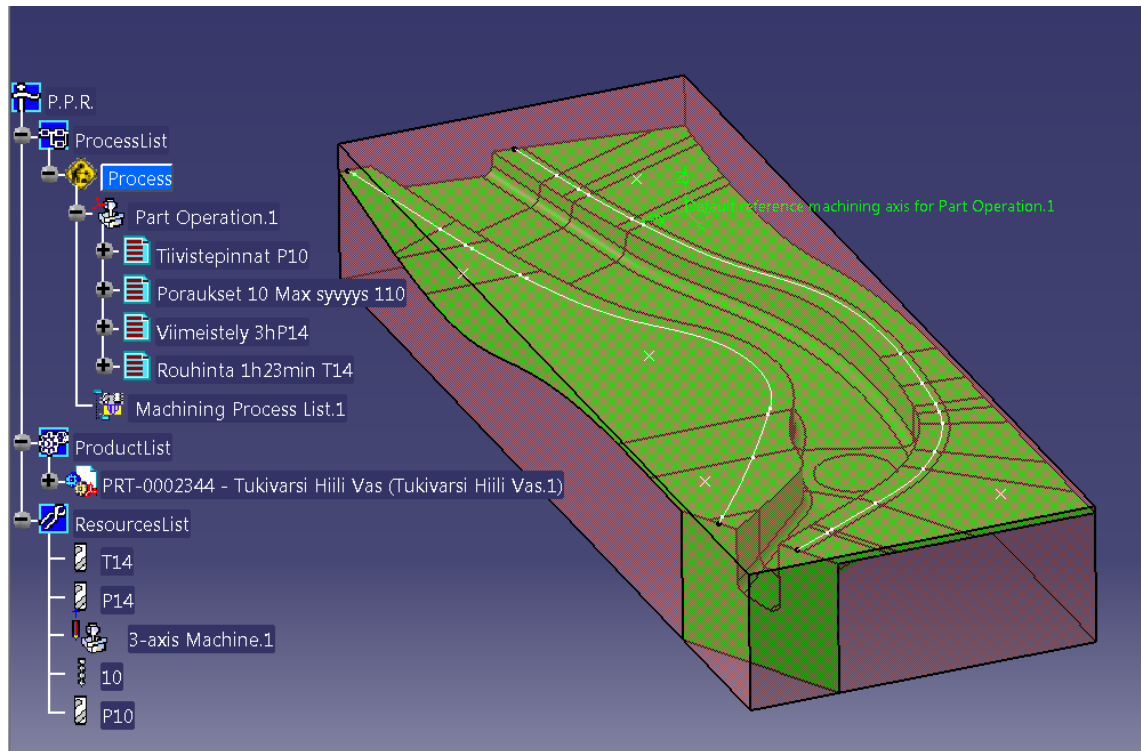
Kuva 11. Rungon yläosan ladontakartta

Kaikki osat suunniteltiin valmistettavan alipaineinjektiolla. Osia suunniteltaessa oli mietitty myös niiden muottien valmistamista. Rungon alaosa ja katto vaati vain muottiaihioon istuttamisen niin, että osan rajojen ulkopuolelle jäi vielä riittävästi laippapintaa. Laippapintoja tarvitaan hartsia ohjaavia spiraaleja ja riittäviä puskurivyöhykkeitä varten. Tukivarsista haluttiin onttoja, kerralla valmistettavia ja saumattomia, mikä vaati monimutkaisempia muotteja (kuva 12). Ulkomuodot saatiin kahdesta naaraspuolisesta muotista, jotka kohdistettiin toisiinsa alumiinisilla putkilla. Muotteihin suunniteltiin myös urat silikoniletkuille, joiden avulla säkin ja muotin ulkopintojen väliin saatiin suljettu tila sulkeamalla päädyt. Kuitujen latomista varten muottien väliin suunniteltiin Finnfoamista muotti, jonka pystyi liuottamaan pois valmistuksen jälkeen asetonilla. Muotti oli päistä avonainen, joten suljettu tila voitiin imeä tyhjäksi toisesta päästä ja syöttää hartsia toisesta.



Kuva 12. Vasemman tukivarren muotti

Muottien koneistamista varten ohjelmoitiin radat CNC-konetta varten Catian Surface Machining -alustan avulla. Ratoja varten määriteltiin koneistettavan muotin pinta, muot-
tiaihio, tarvittavat ohjelmat työkaluineen, sekä koneistusarvot. (Kuva 13.)



Kuva 13. Tukivarren ratojen suunnittelu

Aluksi muotti rouhitaan karkeasti tasapaisella terällä oikeaan muotoon niin, että muotin pintaan jätetään vielä vähintään 1 mm ylimääräistä materiaalia. Metropolian Tikkurilantoimipisteen CNC-konetta käytettäessä sopivat koneistusarvot rouhittaessa Sikablock-aihiota on todettu sopiviksi leikkaussyvyyden ollessa 7 mm, pyörimisnopeuden ollessa 18000 r/min ja syöttönopeuden ollessa 2300 mm/min.

Viimeisteltäessä käytetään palloterää ja ajetaan pinta muotoonsa. Pinnanlaatu määräytyy koneistusarvojen mukaan ja käytetyn ohjelman mukaan. Pääasiallisesti hyvä pinnanlaatu saavutetaan ajamalla muotin pinta Sweeping-työkalulla, joka ajaa muotin päästä päähän terän siirtyessä eteenpäin 0,5–0,8 mm päädyissä. Pienemmillä siirtymillä saavutetaan parempi pinnanlaatu, mutta samalla koneistusaika kasvaa. Sweeping on hyvä työkalu kun osassa ei ole jyrkkiä tai täysin pystysuoria seinämiä. Pinnanlaatua voi arvioida suunnitteluvaiheessa simuloimalla radat, jolloin ongelmakohdat on mahdollista havaita. Jyrkkiä seinämiä viimeisteltäessä ZLevel-työkalu on parempi vaihtoehto kuin Sweeping. Monimutkaisempia muotoja koneistettaessa terä voidaan ohjata seuraamaan muotoja käyttämällä Countour-driven -työkalua. Työstöarvot pysyvät muuten samana kuin rouhittaessa.

Reikiä poratessa pyritään lastuavaan työstöön, jotta reikä olisi mahdollisimman tarkka. Syvempiä reikiä poratessa on tärkeää lisätä terä nousemaan välillä, jotta purut saadaan poistettua reiästä. Koneistusarvot porattaessa 10 mm:n terällä on todettu sopiviksi syöttönopeuden ollessa 450 mm/min ja pyörimisnopeuden ollessa 3000 r/min.

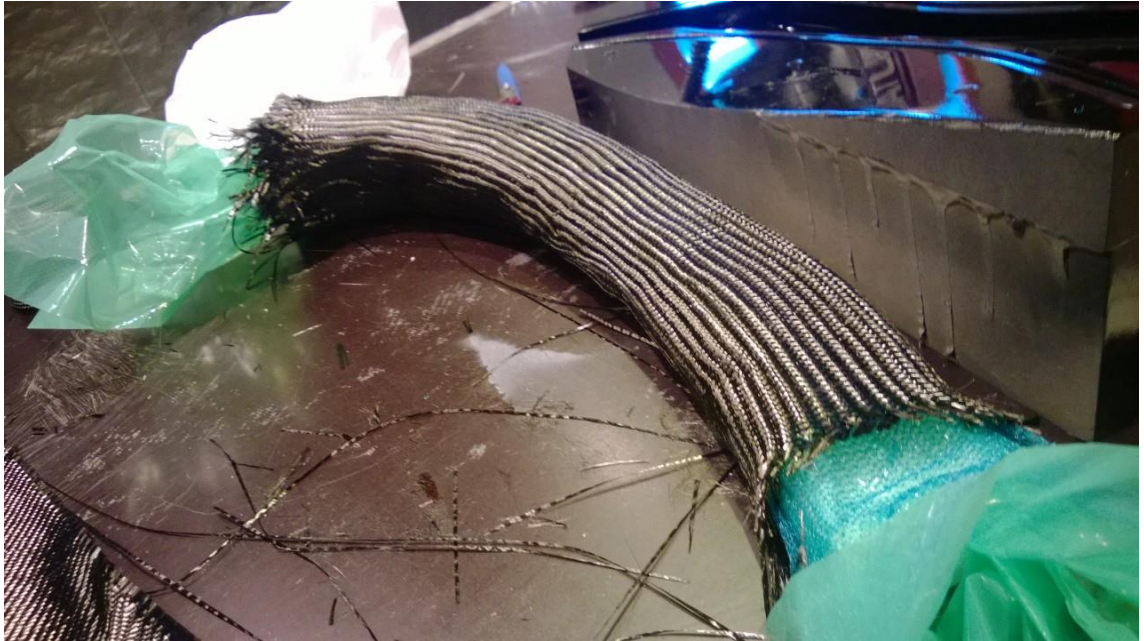
4.2 Valmistus

Muotit koneistettiin yhteistyössä projektikurssiryhmän kanssa Metropolian Tikkurilan toimipisteessä. Koneistettujen muottien pinnat viimeisteltiin vielä käsin hiomalla. Pinnat maalattiin, jotta osat irtoaisivat muoteista helpommin. Finnfoamista tehtyjen pinnanlaatu ei ollut niin tärkeää, koska niiden tehtävä oli vain toimia ladonta-alustana. Maalattujen muottien pintoihin levitettiin vielä irrotusaineet, jotka ehkäisevät osien tarttumista muottiin. Kuvassa 14 on kuva tukivarren ulko- ja sisämuotista, jotka ovat valmiina ladontavaihetta varten.



Kuva 14. Tukivarren toinen ulkomuotti ja sisämuotti

Tukivarsien sisämuottien päälle aseteltiin aluksi alipainesäkki. Säkin päälle laitettiin hartsin liikkumista helpottava verkko. Niiden päälle ladottiin kuidut suunnitelmien mukaisesti, minkä jälkeen tämä kokonaisuus aseteltiin muottien väliin (kuva 15).



Kuva 15. Tukivarren ladonta

Muotit puristettiin kasaan ruuvipuristimien avulla, jolloin silikoninauhat tiivistyivät muottipintoja vasten. Päätyjen reunoille aseteltiin spiraali hartsin johtumista varten. Spiraaleihin liitettiin letkut, joiden avulla ilma imettiin pois ja hartsin syötettiin sisään. Päädyt suljettiin tiivistenauhan avulla, jolloin säkkikalvon ja muottien väliin jäi suljettu tila. Muotti imettiin alipaineen avulla tyhjäksi, minkä jälkeen hartsin päästettiin täyttämään tyhjäksi jäänyttä tilaa. (Kuva 16.) Osan annettiin kovettua muotissaan vielä muutama päivä, jotta se hartsin kovettuisi kunnolla.



Kuva 16. Tukivarren injektointi

Rungon osat valmistettiin yksinkertaisemmin ja muutenkin perinteisemmällä tavalla. Kuidut, karhennuskangas, johdinverkko ja letkut aseteltiin muotin päälle (kuva 17), minkä jälkeen kokonaisuus suljettiin alipainesäkillä. Itse injektointi suoritettiin samalla tavalla kuin tukivarsissakin (kuva 18).



Kuva 17. Rungon alaosan ladonta



Kuva 18. Rungon osien injektointi

Osien pinnat päätettiin jättää maalamatta, mutta ne vaativat silti vielä viimeistelyä muotista irrottamisen jälkeen. Osien pintoihin oli jäänyt isompia ja pienempiä ilmakuplien aiheuttamia reikä, joten ne tuli vielä hioa (kuva 19) ja pintakäsittelä lakalla. Rungon katto ja alaosa kiinnitettiin toisiinsa epoksiliiman ja niittien avulla. Pienempiä reikiä täytettiin lakalla ja isompia koloja paikkailtiin läpinäkyvän liiman avulla. Reikien täyttämisen ja pinnan hiomisen jälkeen osat vielä lakattiin.



Kuva 19. Hiottu runko

Projektikurssiryhmän vastuulla oli 6-pyöräjärjestelmän lopullinen kokoonpanon. Kuvassa 20 on valmis 6-pyöräjärjestelmä. Järjestelmä myös koekäytettiin autossa (kuva 21), mutta muotoilullisten seikkojen ja vaiheessa olevien ohjausjärjestelmän takia se ei kuitenkaan jäänyt vielä pysyvästi kiinni.



Kuva 20. 6-pyöräjärjestelmä



Kuva 21. 6-pyöräjärjestelmän ensimmäinen onnistunut koekäyttö

5 Yhteenveto

Työssä perehdyttiin Catian Composites Design -alustaan ja luotiin sitä varten selkeät käyttöohjeet sekä samalla suunniteltiin ja valmistettiin Biofore-konseptiauton mekaanisen pysäköintiavustimen hiilikuituiset rakenneosat.

Lujitemuoviosien suunnitteleminen vaatii niiden valmistusmenetelmän ja ominaisuuksien ymmärtämistä. Parhaimmillaan niistä voidaan valmistaa kevyitä, jäykkiä ja monimutkaisiakin osia, mutta esimerkiksi vääränlaisilla muodoilla voi olla kalliit seuraukset. Composites Design -alusta tarjoaa työkalut komposiittirakenteen suunnitteluun. Määritellyn komposiittirakenteen valmistettavuutta ja kestävyyttä voidaan niin ikään arvioida Catian omilla työkaluilla, mikä tekee suunnittelusta mielekäästä. Catian antamiin tuloksiin kuitenkin tulee suhtautua kriittisesti ja saatuja tuloksia tulisi verrata käytännön kokeista saatuihin tuloksiin.

Composites Design -alustassa on todella paljon työkaluja ja erilaisia mahdollisuuksia suunnitella lujitemuoviosia, mutta tässä työssä perehdyttiin yhteen tekniikkaan. Samalla jäi useita työkaluja käymättä läpi, mutta näin käyttöohjeista saatiin tehtyä selkeät. Pysäköintiavustinta suunnitellessa todettiin Composites Design -alustan soveltuvan parhaiten alustavien ja yksittäisten lujitemuoviosien suunnittelemiseen, koska raskaampien rakenteiden simulointi Catialla on suhteellisen hidasta. Osien ladonnat voidaan myös suunnitella tarkasti, mikä on kannattavaa sarjamäärien noustessa.

6-pyöräjärjestelmän komposiittirakenteiden suunnittelu kuitenkin suoritettiin lujuustarkasteluja ja muotteja myöten Catian työkaluilla melko tiukalla aikataululla, mikä kuvaa ohjelman tarjoamia mahdollisuuksia. Catian lujuustarkastelualusta ei myöskään ollut ennalta tuttu, vaan siihen perehdyttiin työn yhteydessä. 6-pyöräjärjestelmää suunniteltaessa todettiin, että yksittäisiä osia suunniteltaessa osien tarkan ladonnan määrittämiseen kuluva aika on enemmän kuin siitä saatava hyöty. Suurempia sarjamääriä suunniteltaessa sillä kuitenkin nopeutetaan ladontaa ja säästetään materiaalia, kun voidaan hyödyntää materiaali tehokkaammin. Samalla materiaalikulut voidaan myös arvioida tarkemmin. Koska tarkkoja ladontakarttoja ei tehty 6-pyöräjärjestelmää suunnitellessa, niin valmistusta avittaviin työkaluihin ei ollut aikaa perehtyä syvällisemmin.

6-pyöräjärjestelmälle suoritettiin lujoustarkastelut, mutta niiden materiaaliarvojen perusteessa pitkälti arviointeihin voidaan suhtautua niiden tuloksiin kriittisesti. Optimointi suoritettiin manuaalisesti, joten rakenteesta olisi mahdollisesti voitu suunnitella vieläkin parempi. Toisaalta rakenne kesti ainakin koekäytön ja hiilikuituisilla osilla saavutettiin huomattavia painonsäästöjä metallisiin verrattuna, joten sen puolesta voidaan todeta tavoitteen toteutuneen 6-pyöräjärjestelmän osalta.

Lähteet

- 1 Airasmaa, Ilkka, Kokko, Juha, Komppa, Veikko, Saarela, Olli. 1991. Muovikomposiitit. Helsinki: Muoviyhdistys ry.
- 2 Lujitemuovituotteiden suunnittelu - Materiaalivalinta. Verkkodokumentti. Tampere University of Technology. <https://www.tut.fi/ms/muo/polyko/materiaalit/MAMK/MPDF/Materiaalivalinta.pdf>. Luettu 8.4.2014.
- 3 Lujitemuovitekniikka eritoimialoilla - Lujitemuovituotteiden valmistus. Verkkodokumentti. Tampere University of Technology. <https://www.tut.fi/ms/muo/polyko/materiaalit/MAMK/MPDF/Valmistusmenetelmat.pdf>. Luettu 8.4.2014.
- 4 Abaqus nonlinear FEA. Verkkodokumentti. https://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/composites/comp_lamina_principal.cfm. Luettu 23.4.2014.

Arviointimenetelmien kaavat

Tsai-Hill Criterion

For each lamina the Tsai-Hill failure criterion requires that:

$$\left(\frac{\sigma_x}{S_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{S_2}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xz}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{yz}}{S_{23}}\right)^2 - \frac{\sigma_x \sigma_y}{S_1^2} \leq 1$$

where:

- ◆ $S_1 = S_{1C}$ if $\sigma_x \leq 0$
- ◆ $S_1 = S_{1T}$ if $\sigma_x > 0$
- ◆ $S_2 = S_{2C}$ if $\sigma_y \leq 0$
- ◆ $S_2 = S_{2T}$ if $\sigma_y > 0$
- ◆ For the $\frac{\sigma_x \sigma_y}{S_1^2}$ term: if $\sigma_x \sigma_y \geq 0$, $S_1 = S_{1T}$; otherwise $S_1 = S_{1C}$

Tsai-Wu Criterion

For each lamina the Tsai-Wu failure criterion requires that:

$$\frac{\sigma_x^2}{S_{1T}S_{1C}} + \frac{\sigma_y^2}{S_{2T}S_{2C}} + \left(\frac{\tau_{xy}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xz}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{yz}}{S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{1}{S_{1T}} - \frac{1}{S_{1C}}\right)\sigma_x + \left(\frac{1}{S_{2T}} - \frac{1}{S_{2C}}\right)\sigma_y - \frac{\sigma_x \sigma_y}{(S_{1T}S_{1C}S_{2T}S_{2C})^{1/2}} \leq 1$$

Hoffman Criterion

The Hoffman criterion requires that:

$$\frac{\sigma_x^2}{S_{1r}S_{1c}} + \frac{\sigma_y^2}{S_{2r}S_{2c}} + \left(\frac{\tau_{xy}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xz}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{yz}}{S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{1}{S_{1r}} - \frac{1}{S_{1c}}\right)\sigma_x + \left(\frac{1}{S_{2r}} - \frac{1}{S_{2c}}\right)\sigma_y - \frac{\sigma_x\sigma_y}{S_{1r}S_{1c}} \leq 1$$

Maximum Failure Criterion

The maximum failure criterion is defined as follows:

$$\text{Max} \left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{\sigma_x}{S_{1r}} \right| \text{ or } \left| \frac{\sigma_x}{S_{1c}} \right| \\ \left| \frac{\sigma_y}{S_{2r}} \right| \text{ or } \left| \frac{\sigma_y}{S_{2c}} \right| \\ \left| \frac{\tau_{xy}}{S_{12}} \right| \\ \left| \frac{\tau_{xz}}{S_{13}} \right| \\ \left| \frac{\tau_{yz}}{S_{23}} \right| \end{array} \right.$$

Materiaaliarvot

Current selection : CF Twill 12k 450gsm

Rendering | Feature Properties | Analysis | Composites

Material Orthotropic Material 3D

Structural Properties

Longitudinal Young Modulus	5,5e+010N_m2
Transverse Young Modulus	5,5e+010N_m2
Normal Young Modulus	7,5e+009N_m2
Poisson Ratio in XY Plane	0,04
Poisson Ratio in XZ Plane	0,3
Poisson Ratio in YZ Plane	0,3
Shear Modulus in XY Plane	4e+009N_m2
Shear Modulus in XZ Plane	3e+009N_m2
Shear Modulus in YZ Plane	3e+009N_m2
Density	1470kg_m3
Longitudinal Thermal Expansion	2,2e-006_Kdeg
Transverse Thermal Expansion	2,2e-006_Kdeg
Normal Thermal Expansion	0_Kdeg
Longitudinal Tensile Stress	2,75e+008N_m2
Longitudinal Compressive Stress	3,85e+008N_m2
Transverse Tensile Stress	2,75e+008N_m2
Transverse Compressive Stress	3,85e+008N_m2
Shear Stress Limit in XY Plane	6,5e+007N_m2
Shear Stress Limit in XZ Plane	4,5e+007N_m2
Shear Stress Limit in YZ Plane	4,5e+007N_m2

Kuva 1. Hiilikuitu

Material HoneyComb Material

Structural Properties

Normal Young Modulus 1e+008N_m2

Shear Modulus in XZ Plane 4e+007N_m2

Shear Modulus in YZ Plane 4e+007N_m2

Density 700kg_m3

Shear Stress Limit in XZ Plane 6e+006N_m2

Shear Stress Limit in YZ Plane 6e+006N_m2

Normal Thermal Expansion 0_Kdeg

Kuva 2. Soric SF2

Käyttöohje

Catia V5 - Composites Design

Sisällys

1	Lujitemuoviosien suunnitleminen Catialla	1
1.1	Materiaalien määrittäminen	1
1.2	Alustava suunnittelu	5
1.2.1	Composites Parameters	6
1.2.2	Zones Group	7
1.2.3	Zone	8
1.2.4	Plies Creation From Zones	10
1.2.5	Interactive Ply Table	11
1.2.6	Ply Exploder	12
1.3	Lujuustarkastelu	13
1.3.1	Mesh	13
1.3.2	Rakenneanalyysit	15
1.4	Komposiittirakenteen manuaalinen optimointi	20
1.4.1	Ladontakartan luominen	21
1.4.2	Numerical Analysis	24

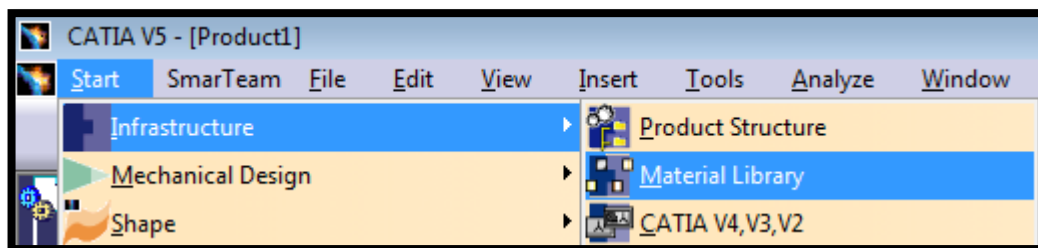
1 Lujitemuoviosien suunnitleminen Catialla

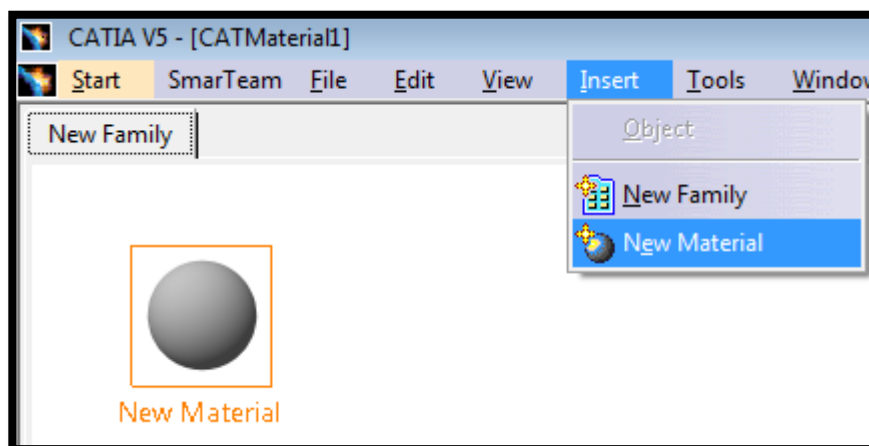
Tässä käyttöohjeessa käydään läpi yksi tapa suunnitella lujitemuoviosia Catian avulla. Komposiittiosat suunnitellaan pintojen päälle, joten Catian pintatyökalut tulisi hallita.

1.1 Materiaalien määrittäminen

Komposiittirakenteen suunnitleminen aloitetaan materiaalien määrittämisellä. Kuitujen ja hartsien arvot löytyvät yleensä valmistajalta. Käyttäjän tehtäväksi jää komposiitin arvojen määrittäminen, mikä onnistuu alustavia laskelmia varten sekoituskaavojen avulla. Kuitutiheyden voi arvioida valmistustekniikan avulla, esimerkiksi alipaineeseen injektoidulla saavutetaan yleensä noin 50 %:n kuitusuhde. Kuitukomposiitin materiaaliarvot tulisi kuitenkin varmistaa aina kokeellisesti, koska muuttujia on niin paljon.

Uusi materiaali määritellään *Catian Material Library*stä.





Oleellisia tietoja ovat materiaalin nimi, sekä *Analysis*- ja *Composites*-välilehdet. *Analysis*-välilehden tiedot vaikuttavat lujuustarkasteluihin ja *Composites*-välilehden arvot määrittävät kuitukerrostien muut ominaisuudet.

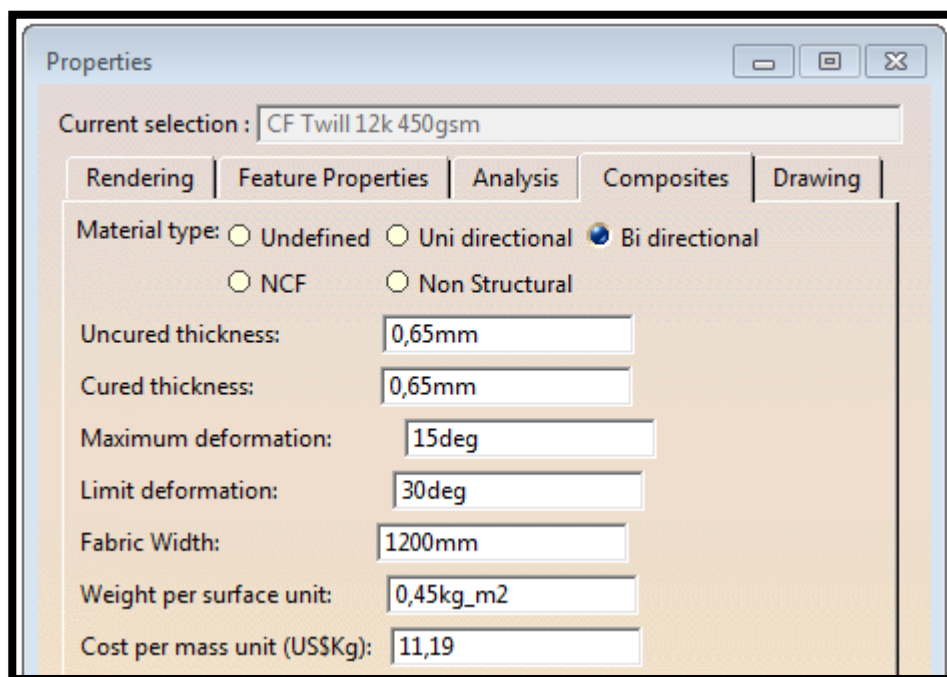
Current selection : CF Twill 12k 450gsm

Rendering | Feature Properties | Analysis | Composites

Material: Orthotropic Material 3D

Structural Properties

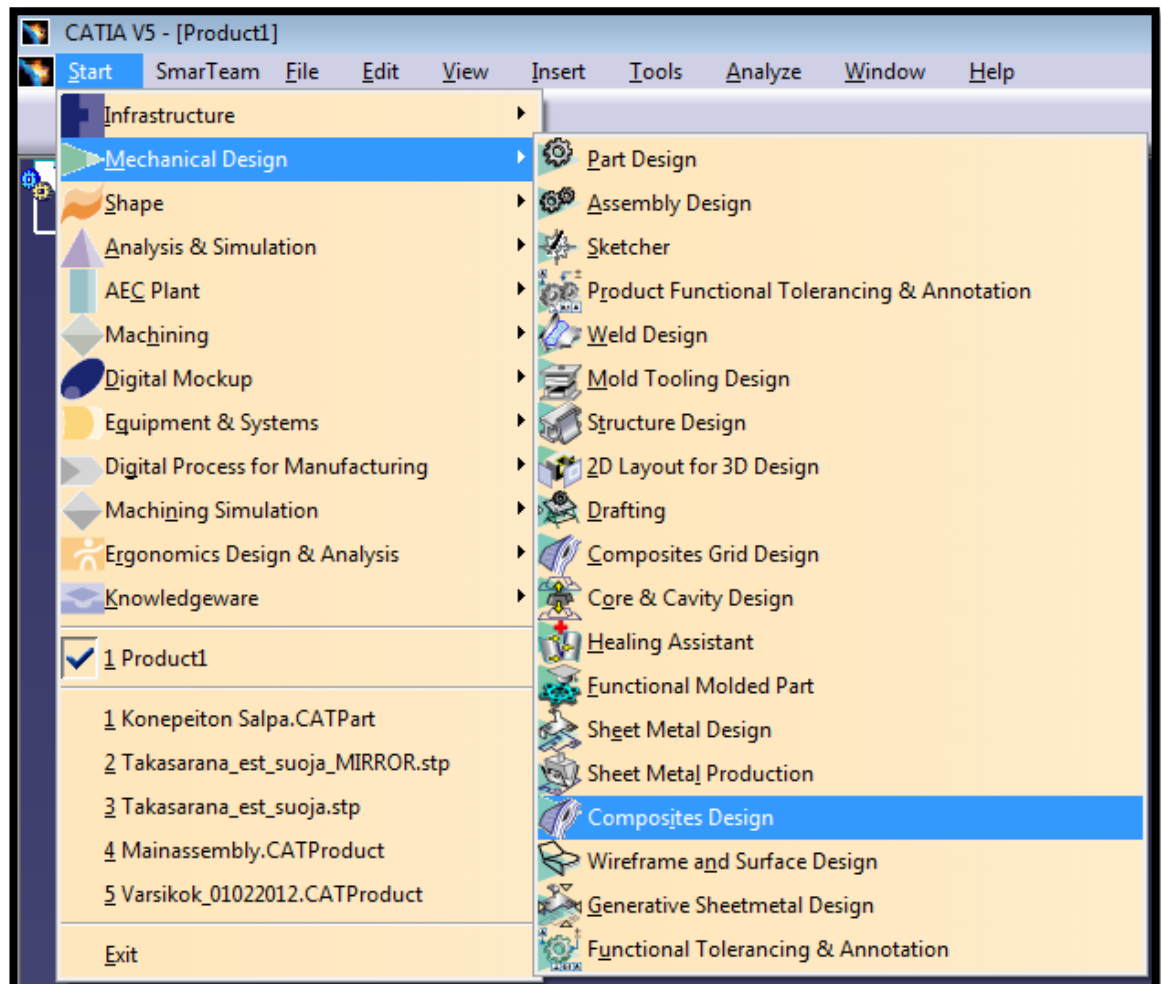
Longitudinal Young Modulus	5,5e+010N_m2
Transverse Young Modulus	5,5e+010N_m2
Normal Young Modulus	7,5e+009N_m2
Poisson Ratio in XY Plane	0,04
Poisson Ratio in XZ Plane	0,3
Poisson Ratio in YZ Plane	0,3
Shear Modulus in XY Plane	4e+009N_m2
Shear Modulus in XZ Plane	3e+009N_m2
Shear Modulus in YZ Plane	3e+009N_m2
Density	1470kg_m3
Longitudinal Thermal Expansion	2,2e-006_Kdeg
Transverse Thermal Expansion	2,2e-006_Kdeg
Normal Thermal Expansion	0_Kdeg
Longitudinal Tensile Stress	2,75e+008N_m2
Longitudinal Compressive Stress	3,85e+008N_m2
Transverse Tensile Stress	2,75e+008N_m2
Transverse Compressive Stress	3,85e+008N_m2
Shear Stress Limit in XY Plane	6,5e+007N_m2
Shear Stress Limit in XZ Plane	4,5e+007N_m2
Shear Stress Limit in YZ Plane	4,5e+007N_m2



Edellä määritellyt lujoustarkasteluun vaikuttavat arvot perustuvat EsaCompin materiaalikirjaston 50 %:n kuitusuhteen hiilikuitukomposiitin arvoihin. Kuidun tyyppi, paksuus, rullan leveys ja neliöpaino ovat puolestaan kuitutoimittajan ilmoittamia arvoja.

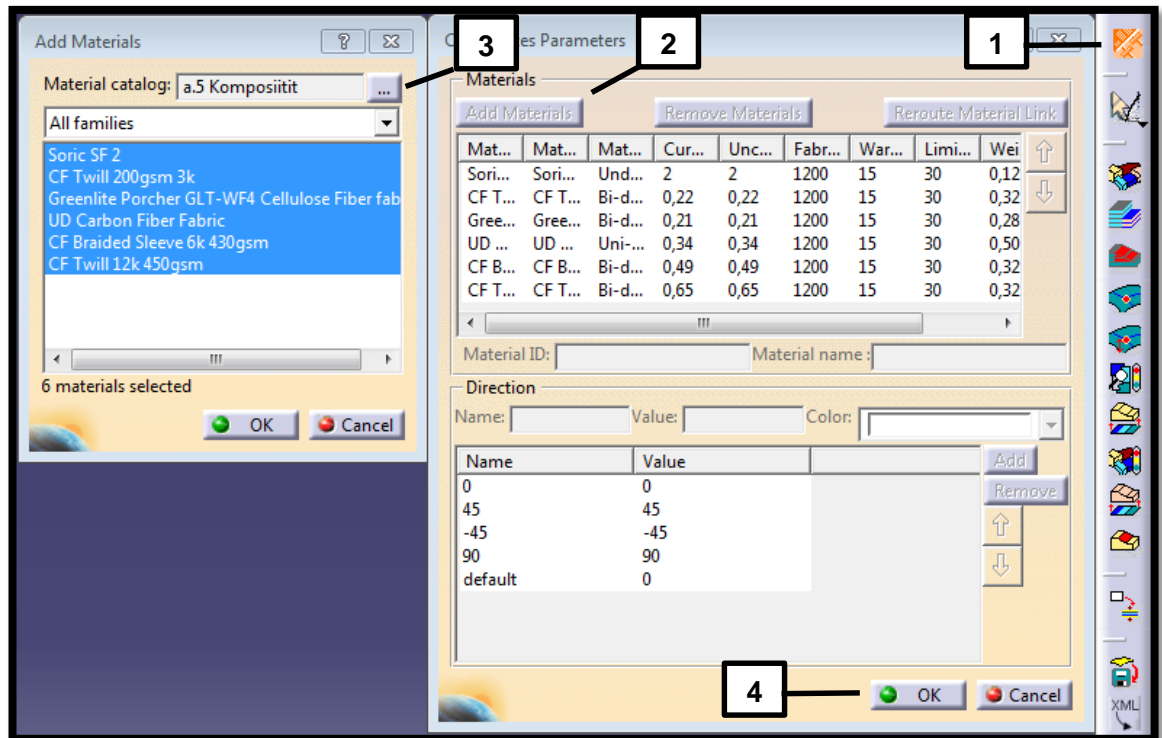
1.2 Alustava suunnittelu

Composites Design -alusta löytyy *Mechanical Design* -valikon alta.



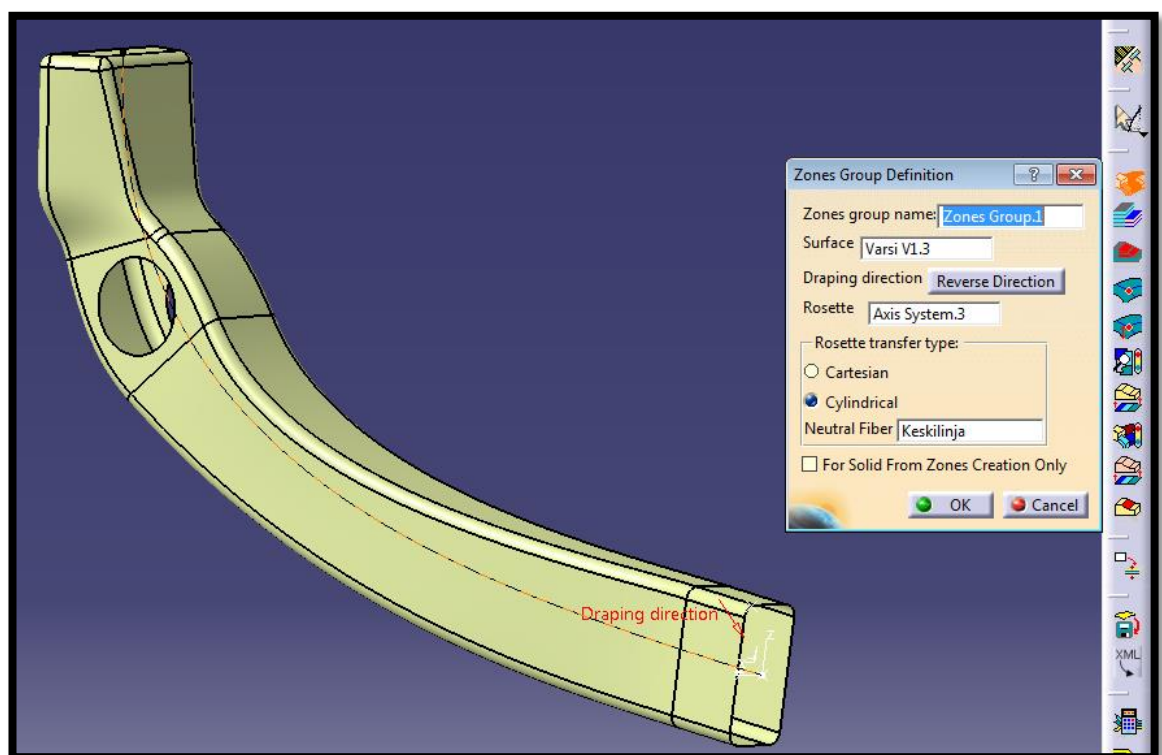
1.2.1 Composites Parameters

Composites Parameters on aluksi ainoa käytettävissä oleva työkalu, jonka kautta käydään hakemassa määritellyt materiaalit. Samalla voidaan tarvittaessa lisätä materiaaleille kuitusuuntia ja muokata simuloinneissa näkyviä kerrosten värejä.



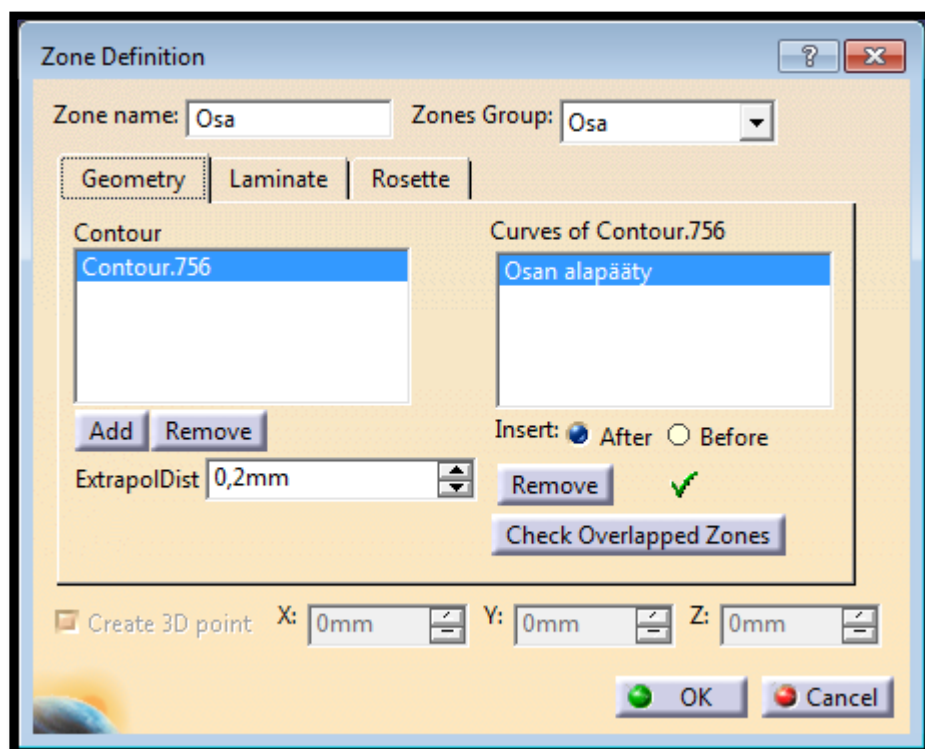
1.2.2 Zones Group

Alueisiin pohjautuva kuitukerrosten suunnittelu aloitetaan *Zones Group Definition* -työkalulla. Siinä määritetään osan pinta (*Surface*), ladontasuunta (*Draping direction*) ja akselisto (*Rosette*). Xyz-akselisto vastaa kerroskoordinaatistossa käytettävää 123-akselistoa, jossa 1 on kuidun pääsuunta, 2 samassa tasossa kohtisuorassa oleva suunta ja 3 on niiden muodostamaan tasoon nähden kohtisuorassa oleva suunta. *Rosette transfer type* -kohdassa valitaan osan muodon mukaan, niin että sylinterimäisille kappaleille määritetään keskilinja, jota akselisto seuraa tangentiaalisesti.

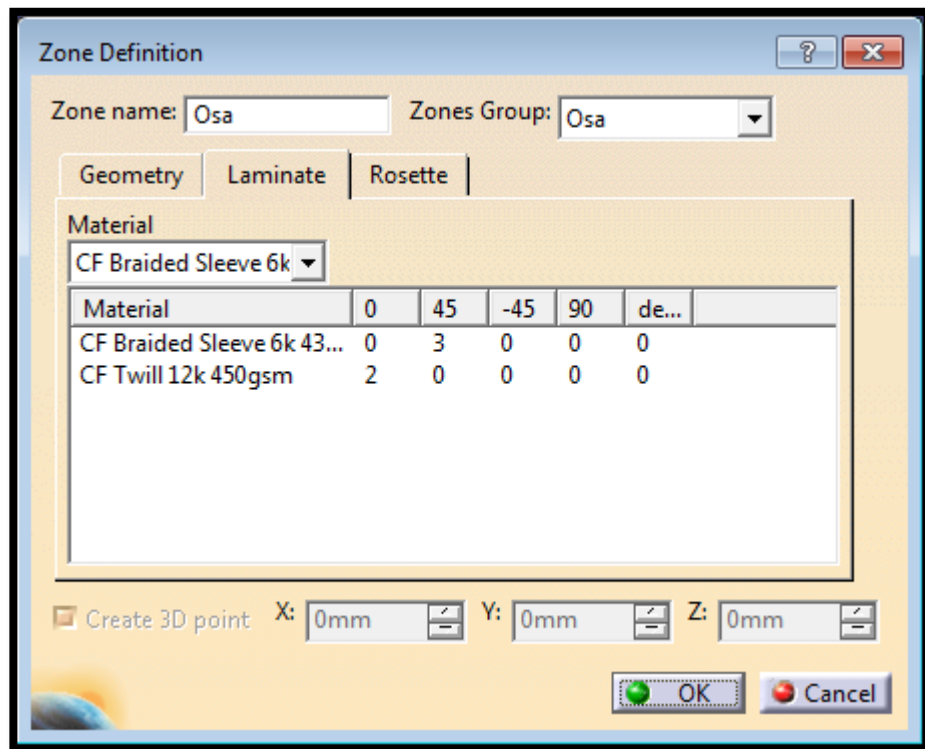


1.2.3 Zone

Alueen rajat määritetään *Curves of Contour* -kohtaan. Alustavaa suunnittelua tehtäessä rakenteen käyttäytymistä voi olla vaikea arvioida, joten varmin tapa on valita koko osa ja tehdä siitä tasapaksu. Alueita voidaan muokata ja paikallisia vahvikkeita lisätä myöhemmässä vaiheessa lujuustarkasteluiden perusteella. Alueet on myös hyvä nimetä suunnittelun helpottamiseksi.

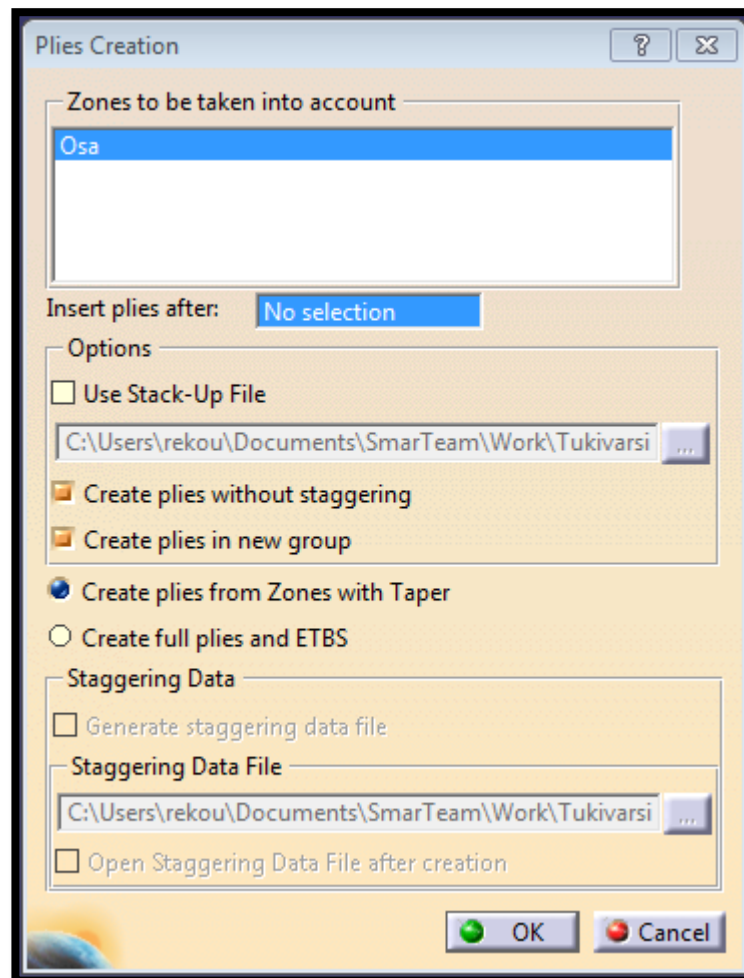


Laminate -välilehdessä valitaan käytettävät materiaalit sekä niiden kerrosten määrät ja suunnat.



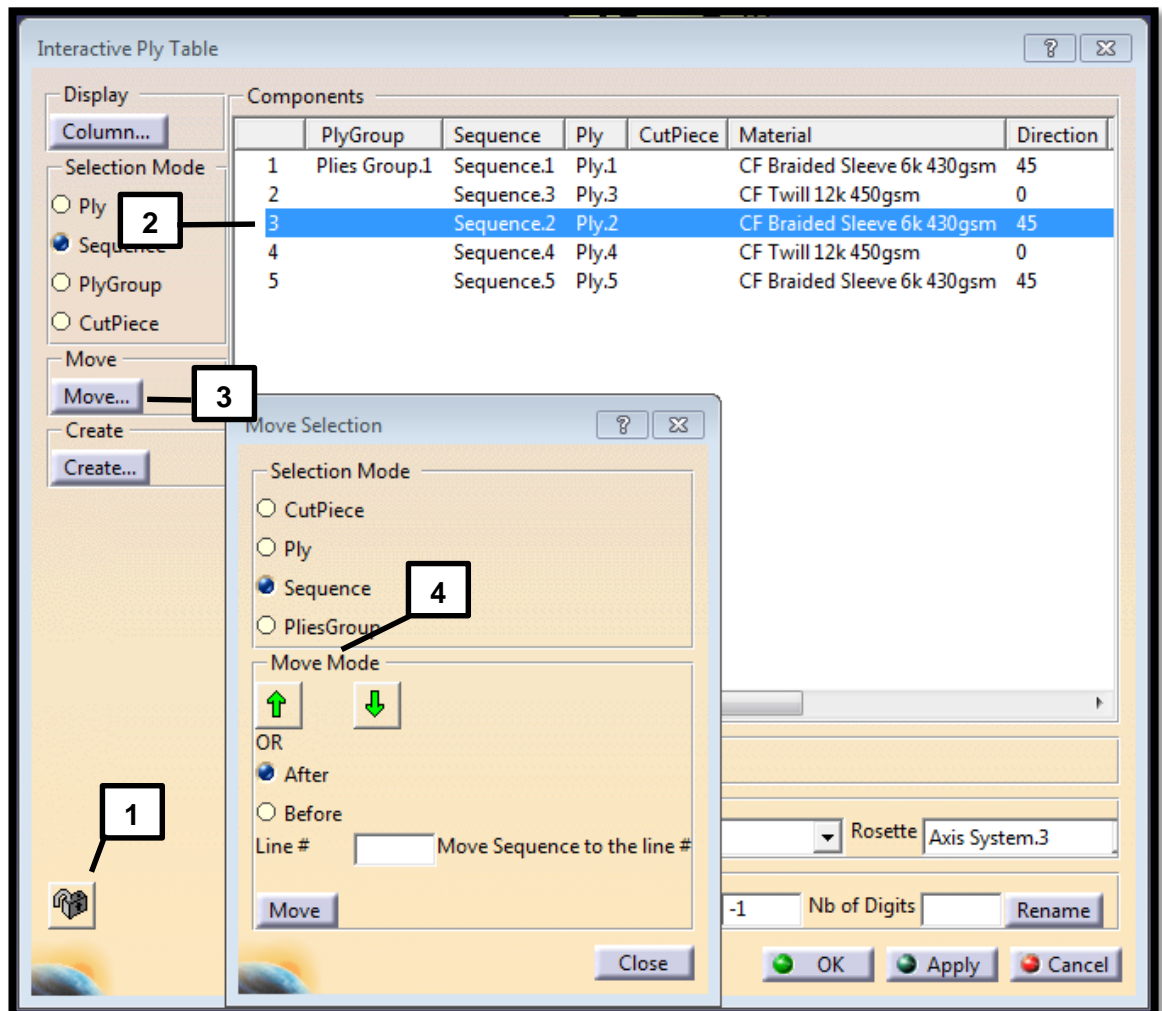
1.2.4 Plies Creation From Zones

Määritellyt kuitukerrokset saadaan tuotua malliin *Plies Creation From Zones* -työkalun avulla. Listasta valitaan haluttu komposiittirakenne. Alustavassa tarkastelussa ei vielä ole kannattavaa käyttää *Excelin* avulla tehtyjä ladontakarttoja, mutta se käydään läpi vielä ohjeen myöhemmässä vaiheessa. Kuitukerrosten porrastukselle ei myöskään ole tarvetta, joten *Create plies without staggering* -kohta voidaan ottaa käyttöön. Kerrosten onnistunut määrittämisen jälkeen *Catian* tiedostopuuhan ilmestyy *Stacking (Engineering)*, jonka alta löytyy määritelty komposiittirakenne kerroksineen.



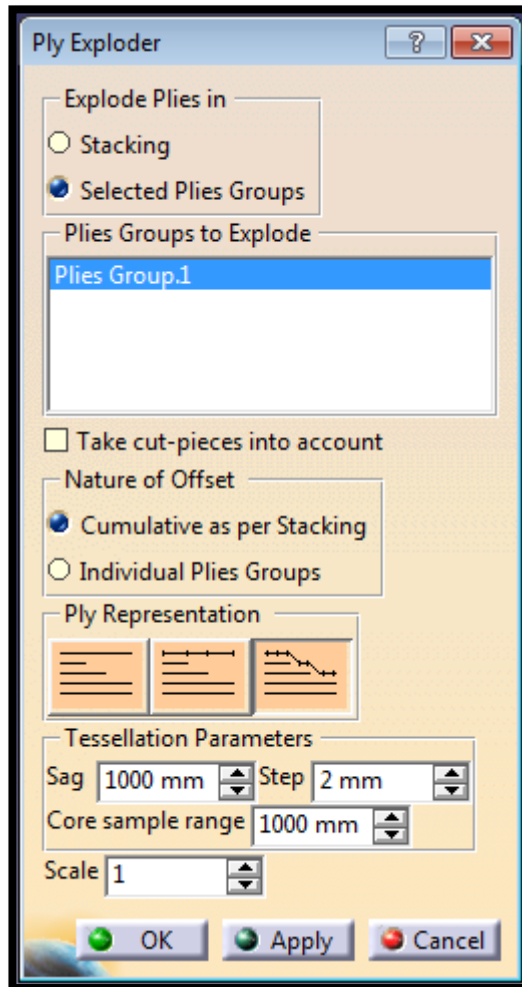
1.2.5 Interactive Ply Table

Catia määrittää komposiittirakenteen kerrosten sijainnin omien parametriensa mukaan, ellei kerrosten luontivaiheessa käytetä ladontakarttaa. Ladontakarttojen tekeminen suunnittelun alkuvaiheessa aiheuttaa turhaa työtä, minkä takia kerrosten paikkojen vaihtaminen tässä vaiheessa onnistuu parhaiten *Interactive Ply Table* -työkalun kautta. Kerrosten liikkuminen vapautetaan vasemmassa alakulmassa olevasta lukon kuvasta. Listasta valitaan liikuteltava kerros, minkä jälkeen *Move..*-työkalun kautta päästään *Move Selection* -ikkunaan. Kuitukerroksia voidaan yksinkertaisesti liikuttaa valitsemalla haluttu kerros ja liikuttamalla vihreillä nuolilla se haluttuun kohtaan. Samalla voidaan myös muokata kerrosten materiaalia ja kuidun suuntaa.



1.2.6 Ply Exploder

Kuitujen asettumista voidaan tarkastella Ply Exploder -työkalun avulla.



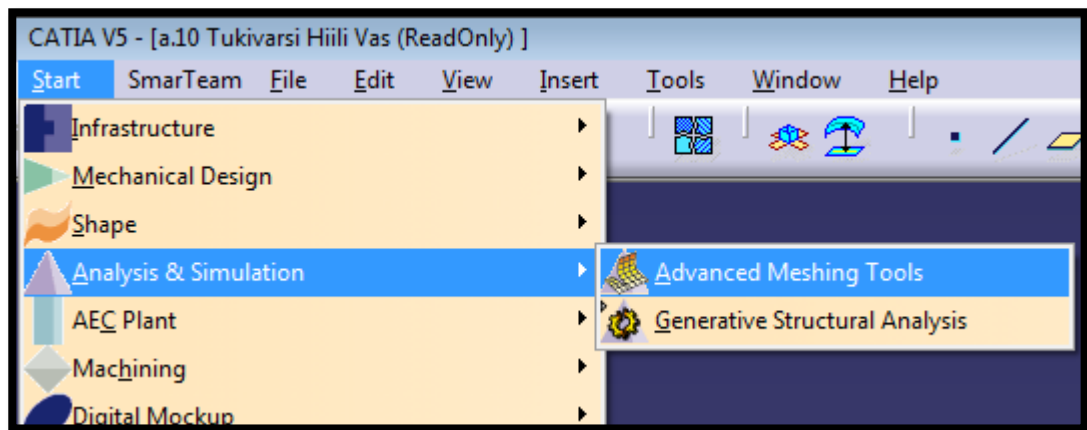
Nature of Offset -kohdassa *Cumulative as per Stacking* ottaa huomioon koko ladonnan, kun taas *Individual Plies Groups* -valinta ottaa huomioon vain kyseisen ladontaryhmän kerrokset. *Ply Representation* -kohdassa on suositeltavaa valita oikeanpuoleisin, jolloin kerrosta simuloitaessa *Catia* ottaa huomioon myös paikalliset vahvikkeet ja tekee näin parhaiten todellisuutta vastaavan ladonnan. *Tessellation Parameters* vaikuttaa simuloinnin tarkkuuteen.

1.3 Lujuustarkastelu

Tässä vaiheessa komposiittirakenne on alustavasti määritelty, joten voidaan aloittaa tarvittavien kerrosten ja niiden suuntien määrittäminen lujuustarkasteluiden avulla. Komposiittirakenteiden lujuustarkasteluita varten on kehitetty useita ohjelmia, mutta tässä työssä keskitytään käyttämään *Catian* omaa lujuustarkastelutyökalua. Komposiittirakenteiden tarkastelu onnistuu ainakin alustavasti hyvin *Catian* omilla työkaluilla.

1.3.1 Mesh

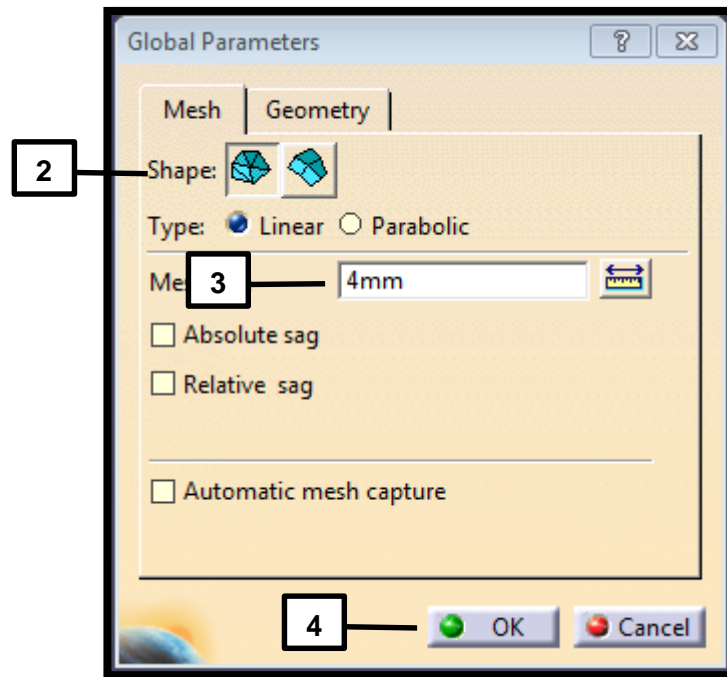
Koska komposiittirakenne on määritelty pintamallin mukaan, niin lujuustarkasteluja varten tarvittava verkko tehdään *Advanced Meshing Tools* -alustan työkaluilla.



Työkalupalkista valitaan *Surface Mesher* ja valitaan osan pinta.



Global Parameters -ponnahdusikkunaan määritellään verkon tiheys ja muoto.

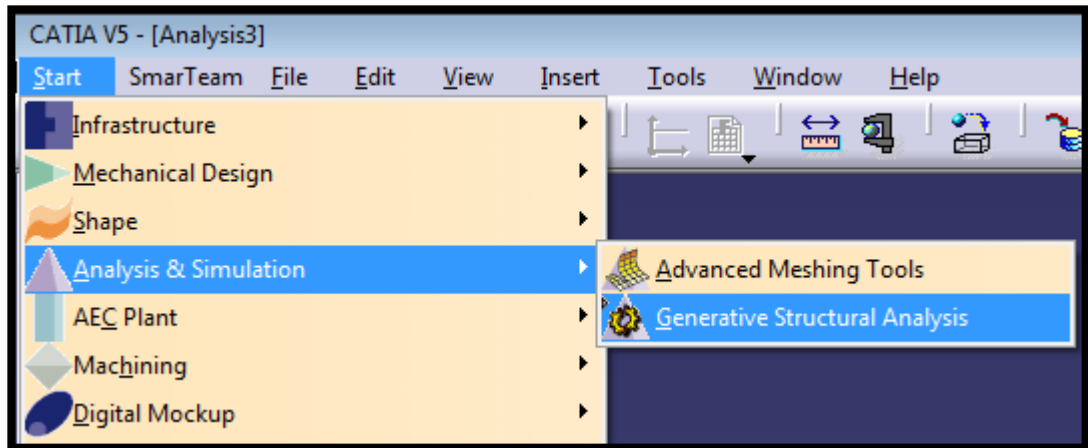


Määritellyt arvot tuodaan pintaan painamalla *Mesh The Part*.

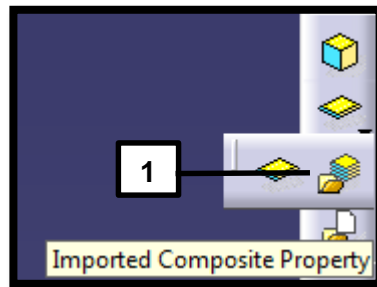


1.3.2 Rakenneanalyysi

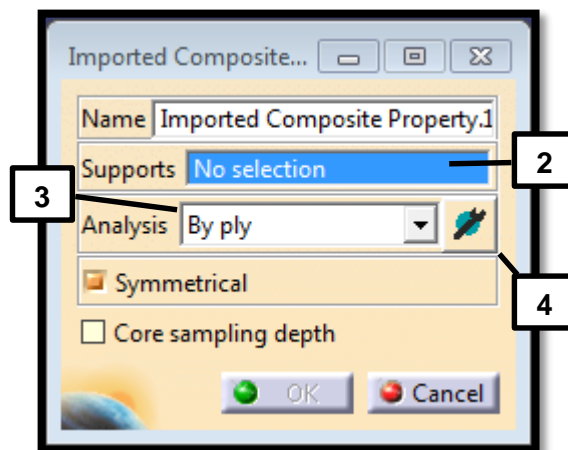
Lujuustarkastelut suoritetaan *Generative Structural Analysis* -alustassa.



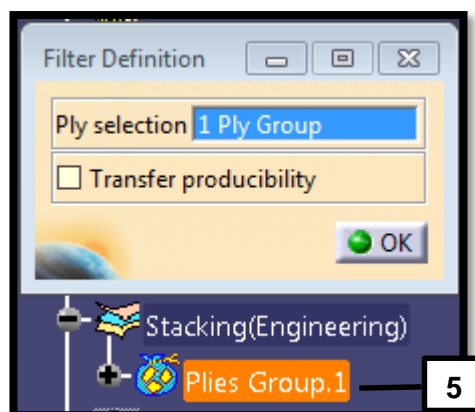
Määrittely komposiittirakenne saadaan tuotua *Imported Composite Property* -työkalun avulla.



Supports-kohtaan valitaan pinta, johon kuitukerrokset on määritelty.

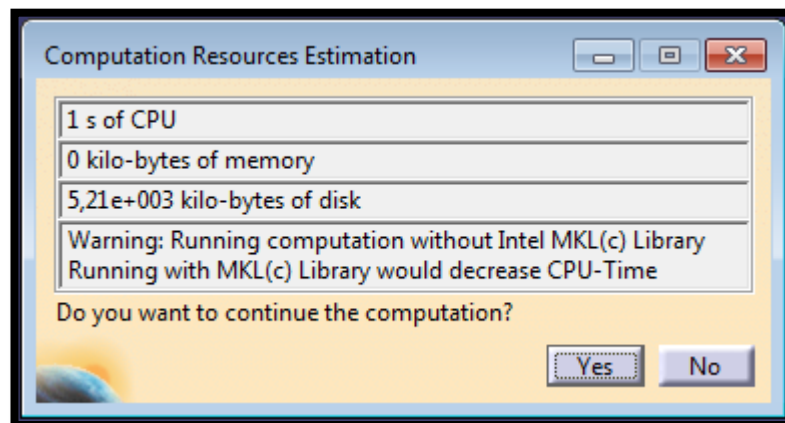


Analysis-kohtaan valitaan *By ply* ja käydään valitsemassa *Catian* tiedostopuusta se *Plies Group*, johon ladonta on määritelty.

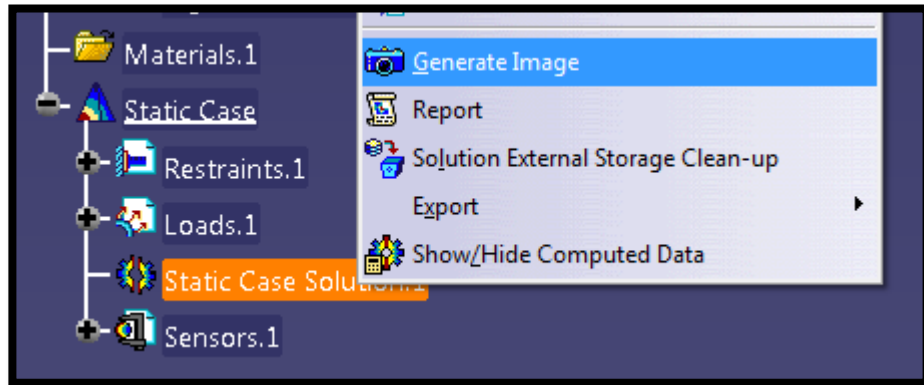




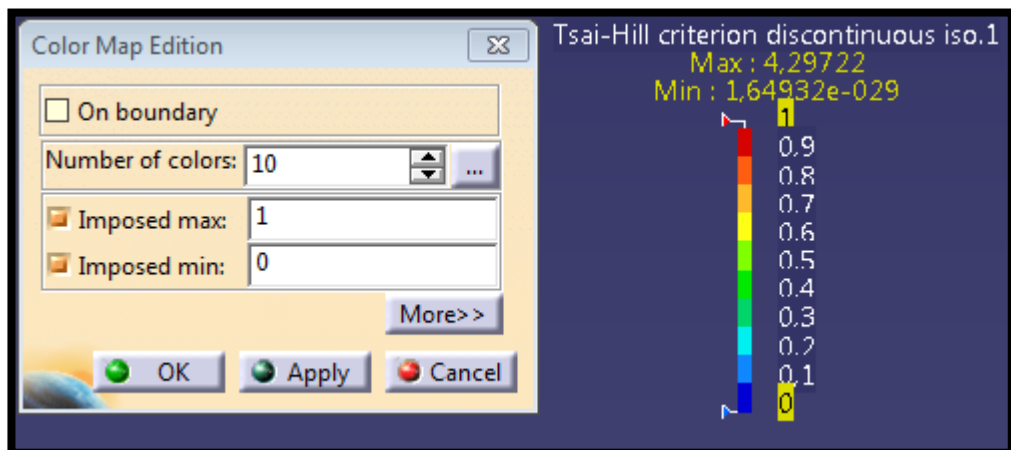
Rakenteelle määritetään vielä siihen kohdistuvat voimat ja kiinnityspisteet (1-4), minkä jälkeen voidaan suorittaa rakenneanalyysi valitsemalla *Compute* (5). Analyysissä voi kestää useita minuutteja. Jos *Computation Resources Estimation*-ponnahdusikkunassa on arvoja, niin simulointi onnistuu. Kun se puolestaan ilmoittaa jokaisessa kohdassa nolla-arvoja, niin määrittelyissä arvoissa on jotain vialla.



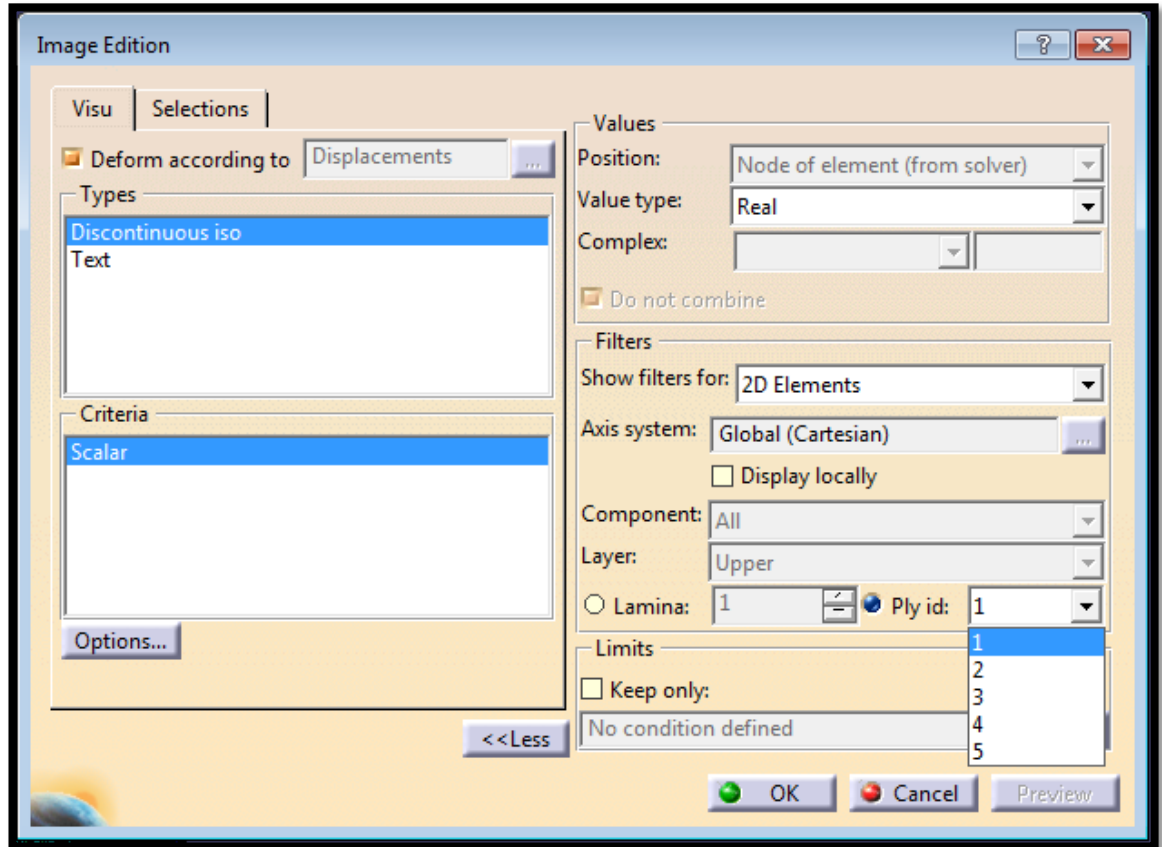
Simuloinnin onnistuttua tuloksia voidaan tarkastella *Static Case Solution* -kohdan arviointimenetelmien avulla. Komposiiteille tarkoitettuja arviointimenetelmiä löytyy *Generate Image* -kohdan alta. Niitä ovat rakenteen pettämistä arvioivat *Maximum Failure*, *Tsai-Wu*, *Tsai-Hill* ja *Hoffman*, joiden tarkemmat kaavat löytyvät liitteestä. Kuitukomposiittirakenteen kestävyyttä arvioidaan ensimmäisenä pettävän kerroksen mukaan.



Rakenteen pettämistä kuvaavat arviointimenetelmät kertoo rakenteen kestävän, jos sen antamat arvot pysyvät alle yhden. Värikartta voidaan siis rajata välille 0–1, mikä helpottaa rakenneanalyysin tarkastelua.

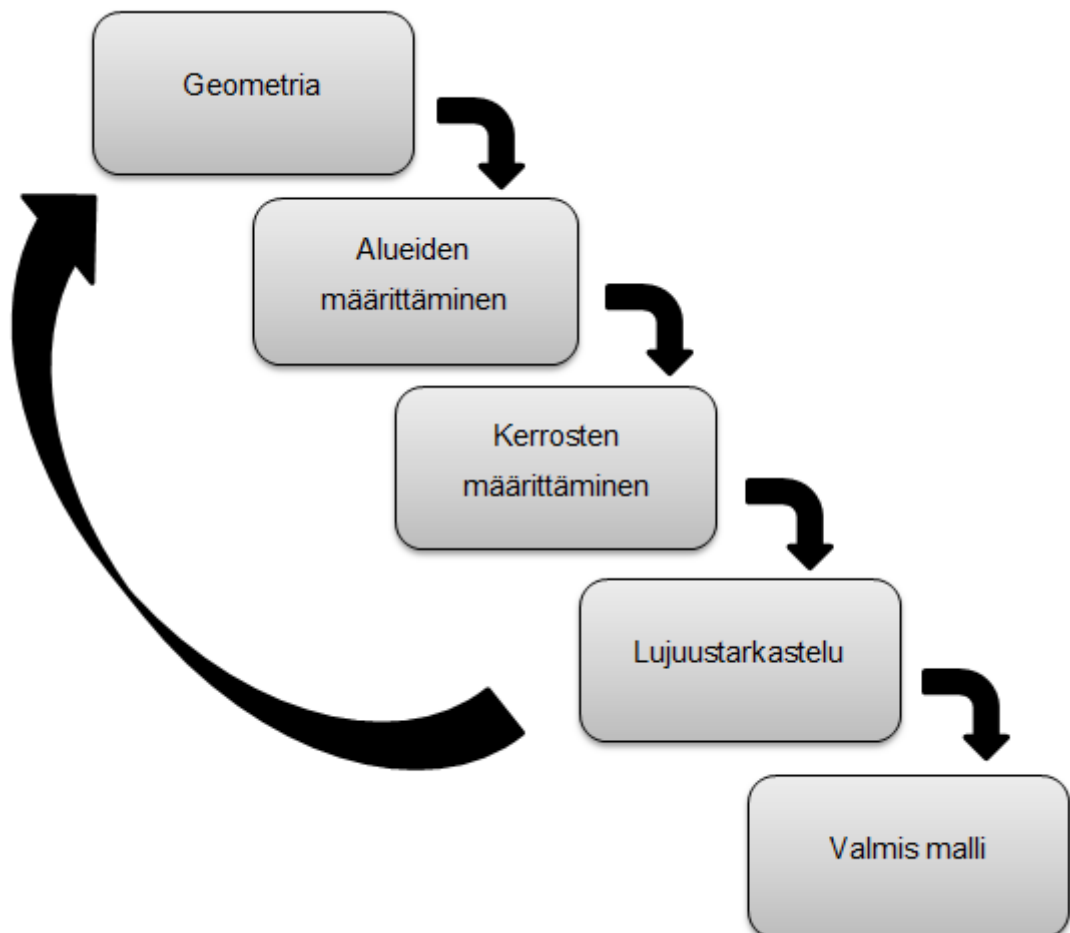


Valitsemalla tiedostopuusta haluttu arviointimenetelmä voidaan vaihtaa aktiivista kerrosta.



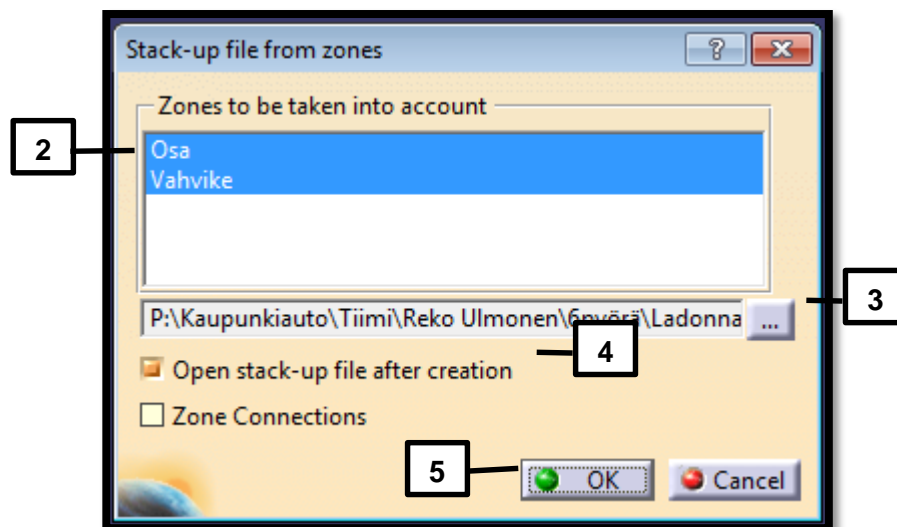
1.4 Komposiittirakenteen manuaalinen optimointi

Komposiittirakennetta lähdetään parantelemaan lujuustarkastelun perusteella kuvan mukaisesti. Lujuustarkasteluista voi esimerkiksi näkyä jokin erityiselle rasitukselle joutuva kohta mallista. Aluksi tulee miettiä, onko rasitusta esimerkiksi mahdollista jakaa laajemmalle alueelle muokkaamalla geometriaa. Seuraavaksi pohditaan, voisiko olemassa olevien alueiden muokkaamisella tai vahvikkeiden lisäämisellä vaikuttaa rakenteen kestävyys. Lopuksi vielä ennen uusia lujuustarkasteluja mietitään, onko tarvetta useammille kuitukerroksille vai voisiko olemassa olevien kerrosten suuntien muokkaaminen parantaa komposiittirakenteen kestävyyttä. Kun kehitettävää ei enää löydy, voidaan todeta komposiittirakenteen suunnittelun olevan valmis.



1.4.1 Ladontakartan luominen

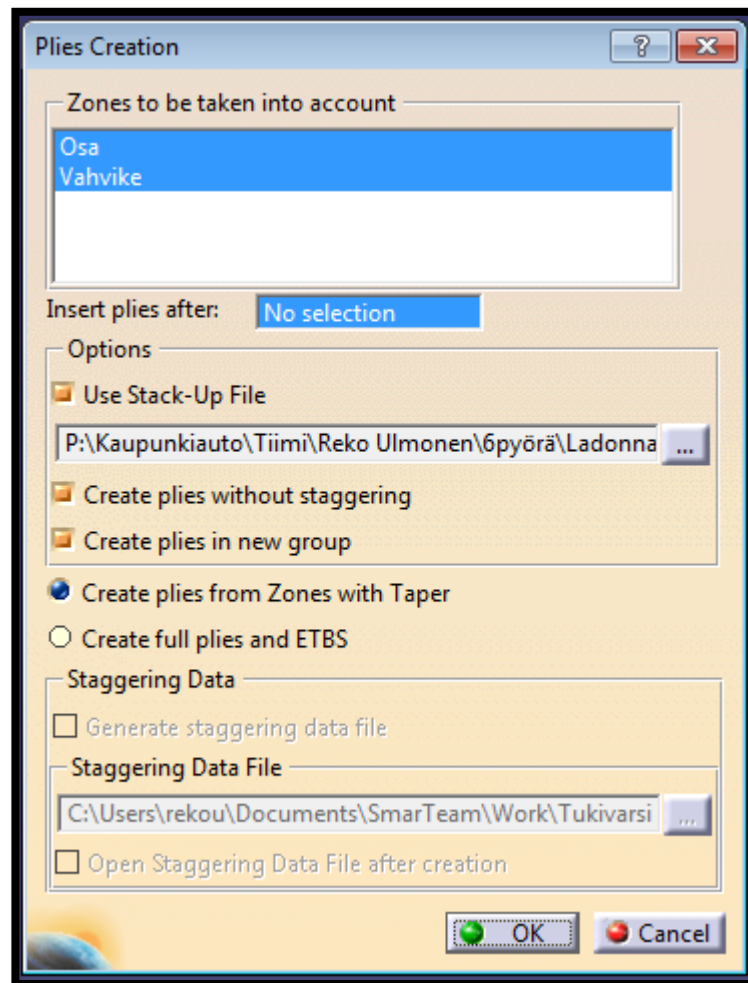
Komposiittirakenteen alkaessa hahmottua kannattaa luoda ladontakartta. Ladontakartan avulla voidaan ennalta määrittää kerrosten ladontajärjestys kuitusuuntineen ja materiaaleineen. Ladontakartta luodaan *Stack Up File From Zones* -työkalulla, joka luo komposiittirakenteen ladonnan sisältävän *Excel*-tiedoston.



Kerrosten järjestystä voidaan muokata leikkaamalla ja liittämällä rivejä *Excelissä*.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Sequence	Ply	Geo-Lvl	Material	Zone.1	Yla Vahvike 1	
2	Sequence	Ply.2	4	CF Braided Sleeve	45		
3				Twill 12k 450gsr	0		
4				Twill 12k 450gsm	0		
5				Braided Sleeve	45		
6	Sequence	Ply.5	1	CF Twill 12k 450gsr	0		
7			1	CF Twill 12k 450gsm	0		
8			2	CF Braided Sleeve	45		
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							

Ladontakartta saadaan tuotua *Catiaan Plies Creation* -kohdassa raksimalla *Use Stack-Up File* -kohta ja hakemalla tehty ladontakartta.



1.4.2 Numerical Analysis

Suunnittelusta komposiittirakenteesta saadaan selville useita tietoja *Numerical Analysis* -työkalun avulla. Se antaa arvion tarvittavasta kuitujen määrästä, osan hinnasta, sekä osan painosta ja massan keskipisteestä. Arviot osuvat yleensä alakanttiin, koska *Catia* ei huomioi ladontavaiheessa tulevaa kuitujen osittaista päällekkäisyyttä. Lisäksi lujite-muoviosien valmistuksessa jää yli ns. hukkapaloja, minkä takia myös hinta-arvioon ja tarvittavaan materiaalmäärään tulee suhtautua kriittisesti.

Numerical Analysis

Entity

Selection: Plies Group.1

Material: All

Persistent Take cut-pieces into Account

Take Core thickness into Account

Analysis

Area	0,782m ²
Volume	4,391 e-004m ³
Volumic mass	0,646kg
Aerial mass	0,253kg
Center of gravity	
XG	2693,28mm
YG	-111,088mm
ZG	257,368mm
Cost	0,015364

Export Data

C:\Users\rekou\Documents\SmarterTeam\Work\PI ...

Export

Open file after creation

OK Cancel