

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Lentokonetekniikka

Tutkintotyö

Samuel Suvanto

**LENTOKONEEN OHJAINPINTOJEN KONSEPTISUUNNITTELUN KEHITTÄMINEN**

Työn ohjaaja  
Työn teettäjä  
Tampere 2008

DI Simo Marjamäki  
Patria Aerostructures Oy, valvojana DI Antti Aho-Mantila

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Lentokonetekniikka

Suvanto, Samuel

Tutkintotyö

Työn ohjaaja

Työn teettäjä

Toukokuu 2008

Hakusanat

Lentokoneen ohjainpintojen konseptisuunnittelun kehittäminen

42 sivua + 3 liitesivua

DI Simo Marjamäki

Patria Aerostructures Oy, valvojana DI Antti Aho-Mantila

parametrointi, mallinnus, ohjainpinnat

## TIIVISTELMÄ

Tämän työn tavoitteena oli luoda lyhyt katsaus lentokoneiden liikkuvien ohjainpintojen rakenteisiin sekä niiden 3D-mallinnuksessa käytettävän parametroinnin hyödyntämiseen. Tarkoituksena oli tehdä Patria Aerostructures Oy:lle tiivis teos, joka toimisi johdantona aikaisemmin lentokoneteollisuuteen perehtymättömille suunnittelijoille ja antaisi kokeneemmillekin vinkkejä parametroidun mallinnuksen tarjoamista mahdollisuuksista. Ohjainpintojen rakenteista käsiteltiin alumiinista ja komposiitista valmistettuja kaarirakenteita sekä kerroslevyyn perustuvia komposiititiratkaisuja, koska nämä ovat teollisuudessa yleisimmin käytettyjä. Näihin rakenteisiin perehdyttiin yleisten ominaisuuksien tasolla sekä erityisesti suunnitteluun liittyvien seikkojen tiimoilta. Mallinnuksessa käytettiin Catia V5 -ohjelmistoa. Catian parametriominaisuudet ovat huomattavat, mutta jäävät usein hyödyntämättä. Parametroinnilla tavoiteltiin tässä työssä erityisesti helppoa muunneltavuutta. Luotuja parametroituja 3D-malleja voitiin muuttaa pelkästään numeroarvoja muuttamalla, jolloin muutoksiin ei tarvittu mallinnusosaamista. Tavoitteena ei ollut saavuttaa rakenteellisesti kovinkaan viimeisteltyä mallinnusta, vaan selkeitä ja havainnollistavia esimerkkejä. Yksinkertaisilla ja yleispiirteisillä malleilla on tarvetta etenkin projektien aloitusvaiheissa, jolloin esitellään rakennetta tarjouksissa, aloitetaan konseptimalleja ja suoritetaan alustavaa rakenneanalyysiä. Työssä käsiteltiin hyödynnettäviä ominaisuuksia tuloksekkaasti ja arvioitiin näiden käyttömahdollisuuksia.

TAMPERE POLYTECHNIC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCE

Mechanical and Production Engineering

Aircraft engineering

Suvanto, Samuel

Development of concept design for airplane control surfaces

Engineering Thesis

42 pages, 3 appendices

Thesis Supervisor

Simo Marjamäki (MSc)

Commissioning Company

Patria Aerostructures Oy. Supervisor: Antti Aho-Mantila (MSc)

May 2008

Keywords

parametrization, modelling, control surfaces

## **ABSTRACT**

Aircraft structures are designed and calculated with 3D software. Usually the stress calculation is done by different personnel with another software system. This thesis was produced for Patria Aerostructures in order to give a short description of airplane control surfaces and their structures and to study the possibilities of parametrization in 3D modelling. In this thesis the main concern was on pre-design phase. There is a great need for generic models that can be modified without the experience of actual 3D modelling. This comes in handy when different structure solutions are compared and calculated before the design phase. The basic Catia V5 tools for parametric design were introduced and several implementations were created. Created models had features that allowed changing the model structure with numerical values or imported elements. The structures presented consisted of aluminium and composites because they are the most common materials used in aircraft structure solutions. Based on these studies the advantages of the tools available were considered and some recommendations were given. With every 3D tool and method there was something useful that could be exploited in design process.

## ALKUSANAT

Aloitin tämän tutkintotyön tekemisen harjoittelija-aikanani marraskuussa 2007 Patria Aerostructures Oy:ssä Tampereella. Tutkintotyön tekemisen lisäksi olen jatkanut tehtäviäni Airbus A400M -projektin DMU-integraattorina. Patrian osuus projektissa on vastata sivuvakaajan kärjen muotosuojien valmistuksesta Airbus Deutschlandin alihankkijana. Tehtäviini on kuulunut tuotteidemme tiedonsiirto Saksaan sekä 3D-kokoonpanojemme paikoitus asiakkaan järjestelmään. Projektissa tapahtuneet pienet ruuhkautumat aiheuttivat kevään 2008 aikana vain vähän häiriöitä tutkintotyön valmistumiselle. Tutkintotyössä esiteltyjen toimintojen käyttöä voidaan jo suunnitella A400M -projektin jälkeen tulevaa projektin aloitusta silmällä pitäen. Ainakin omalta osaltani uskon näistä tuloksista olevan hyötyä, kunhan vain uuden projektin reunaehdot sallivat tämän verran suunnittelutoimintojen kehitystyötä. Tutkintotyöni valmistumisesta haluan esittää kiitokseni valvojalleni Antti Aho-Mantilalle, joka työni suuntailun lisäksi ehti aina tarvittaessa osallistumaan myös A400M -projektiin liittyviin tehtäviini.

Tampereella toukokuussa 2008

Samuel Suvanto

## SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT .....	3
ALKUSANAT.....	4
1 JOHDANTO.....	6
2 LENTOKONEIDEN OHJAINPINNAT .....	7
3 OHJAINPINTOJEN RAKENTEET.....	11
3.1 Kaarirakenne.....	12
3.2 Kennorakenne.....	13
3.3 Rakennevaihtoehtoja .....	15
4 MALLINNUKSEEN LIITTYVÄT SEIKAT.....	18
4.1 Catia V5.....	18
4.2 Parametroitu mallintaminen .....	20
4.3 Publication-kopiointi .....	22
4.4 Power copy -työkalu.....	23
4.5 Design table .....	24
4.6 If-lauseen korvaaminen .....	25
5 KAAIRAKENTEEN PARAMETROINTI.....	27
5.1 Siivekkeen parametointi Power copy -työkalun avulla.....	27
5.1.1 Geometrian suunnittelu .....	27
5.1.2 Kaarien parametointi.....	29
5.1.3 Siivekemallin käyttö .....	29
5.2 Siivekkeen parametointi Design table -työkalun avulla.....	31
5.2.1 Geometrian suunnittelu .....	31
5.2.2 Siivekemallin parametointi .....	32
5.2.3 Siivekemallin käyttö .....	33
6 KENNORAKENTEEN PARAMETROINTI .....	34
6.1 Spoilerin suunnittelu ja geometria.....	34
6.2 Spoilerin parametointi.....	35
7 PARAMETROINTI MUOTIN SUUNNITTELUSSA .....	37
7.1 Muotin suunnittelu ja geometria.....	37
7.2 Muotin parametointi.....	38
8 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	39
LÄHTEET .....	42
LIITTEET	

## 1 JOHDANTO

Patria on ilmailu- ja puolustusvälineteollisuudessa kansainvälisesti toimiva konserni, jonka Aerostructures-liiketoiminnan erikoisalaa ovat lentokonerakenteiden vaativat komposiittiosat. Patria Aerostructures Oy toimittaa rakenneosia Airbus A320- ja A380-matkustakoneisiin, A400M-sotilaskuljetuskoneeseen sekä NH90-kuljetushelikopteriin.

Tässä työssä käsitellään lentokonerakenteiden suunnittelussa käytettävää tietokone-mallinnusta. Tarkoituksena oli tutkia Patria Aerostructures Oy:lle lentokoneiden liikkuvien ohjainpintojen parametroitua mallinnusta, jonka avulla olisi helppoa tuottaa erilaisia rakenneratkaisuja ilman erityistä mallinnusosaamista.

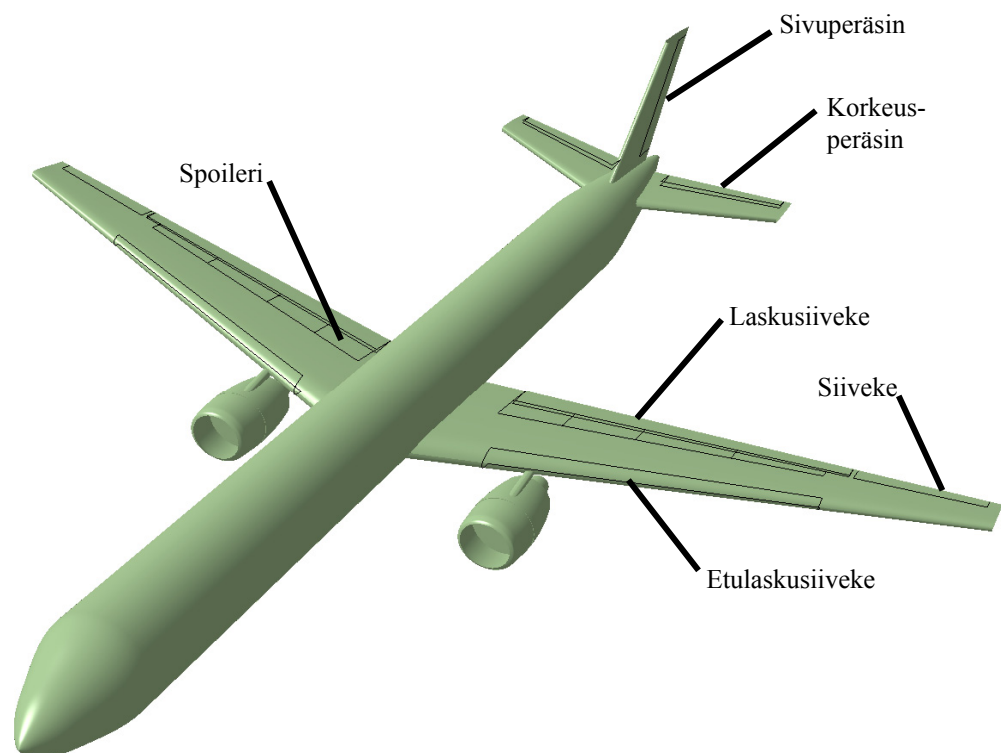
Kolmiulotteista mallia ohjaavat parametrit ovat pääosin numeerisia arvoja, joilla muutetaan esimerkiksi pituuksia tai lukumääriä. Helposti muutettavasta mallista hyötyisivät ennen kaikkea lujuuslaskennan henkilöstö, kun suunniteltua malliratkaisua ei tarvitse lähettää takaisin suunnittelijalle korjattavaksi. Lisäksi myös suunnittelijan on tarvittaessa helpompi ja nopeampi vaihtaa rakenteen ominaisuuksia.

Tavoitteena oli tuottaa ohjainpintojen 3D-mallinnuksen kehitysratkaisuja suunnitteluprojektien konseptitarkoituksiin. Konseptivaiheen 3D-mallien tarkoituksena on toimia pohjana varsinaiselle suunnittelutyölle ja luoda yleiskäsitys suunniteltavasta tuotteesta ja sen rakenteesta. Lisäksi alustavia malleja voidaan käyttää tilavarauksen ennakkointiin, alustavaan lujuuslaskentaan tai rakenteen yleiseen esittelyyn.

Työn raportoinnin on tarkoitus toimia myös eräänlaisena johdantona ja virikkeenä suunnittelutapojen kehittämiseen. Melko monet lentokoneteollisuuden palkatut suunnittelijat eivät ole perehtyneet aikaisemmin lentokonerakenteisiin yleisessä mittakaavassa, jolloin katsaus näihin asioihin ei ole haitaksi. Parametroinnin hyödyntäminen on myös hyvin vähäistä, joten tämän työn tavoitteena on valottaa kyseisen mallinnustekniikan avaamia mahdollisuuksia.

## 2 LENTOKONEIDEN OHJAINPINNAT

Liikkuvilla ohjainpinnoilla tarkoitetaan siivekkeitä, spoilereita sekä korkeus- ja sivuperäsimiä. Lentokoneen ohjainpinnat jaetaan joissain tapauksissa ensi- ja toissijaisiin, joista ensimmäisiin kuuluvat siivekkeet, sivuperäsin ja korkeusperäsin. Toissijaisia ohjainpintoja ovat laskusiivekkeet, spoilerit ja etulaskusiivekkeet. Laskusiivekkeillä ei tarkkaan ottaen ohjata lentokonetta, mutta ne ohjaavat yhtälailla ilmavirtaa ja käytettäessä niiden tarkoitus on lisätä siiven nostovoimaa, jolloin ne liittyvät oleellisesti koneen ohjattavuuteen. Kuvassa 1 on esitetty lentokoneen liikkuvien ohjainpintojen tavanomaisimmat sijainnit. /1; 2/



**Kuva 1** Lentokoneen liikkuvat ohjainpinnat

Ohjainpintojen rakenne on hyvin samankaltainen kuin sivu- ja korkeusvakaajien, mutta liikkuvuutensa vuoksi ne ovat usein jonkin verran kevyempiä rakenteeltaan. Taivutuspalkkina toimiva salko tuo rakenteelle jäykkyyden. Se on sijoitettu lähelle etureunaa, ja siihen kiinnittyvät kaaret ja pintalevyt sekä saranointi. /2/

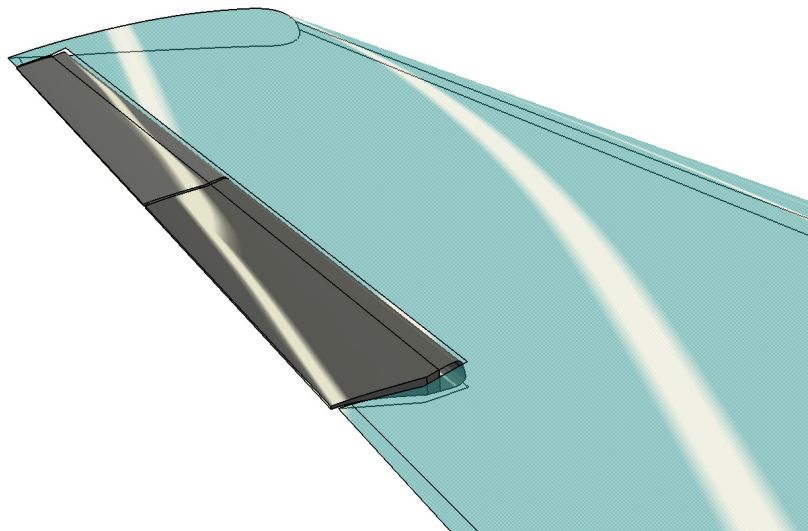
Siivekkeiden ja spoilerien tarkoituksena on mahdollistaa koneen liikkumisen ohjattavuus joko lisäämällä tai vähentämällä siiven nostovoimaa. Spoilerit toimivat nostovoiman vähentämisen lisäksi ilmajarruina ja estävät myös koneen pomppimisen laskeutumisessa poistamalla riittävästi nostovoimaa siivistä. Peräsimet muuttavat koneen asentoa ilmavirran suunnan muuttamisesta aiheutuvan reaktivoiman avulla. Ohjainpintojen rakenteet koostuvat nykyisissä liikennelentokoneissa pääosin alumiini- ja komposiittiosien erilaisista yhdistelmistä, joskin komposiittirakenteiden määrä on uusissa koneissa jatkuvassa kasvussa. /1; 2/

Liikennelentokoneissa ohjainpintoja liikutetaan pääosin hydraulitehosteisilla järjestelmillä. Täysin sähköinen liikkeenvälitys, eli fly-by-wire-järjestelmä, siirtää tiedon ohjausliikkeestä lennonohjausjärjestelmälle, joka päättää suoritettavasta toimenpiteestä, jotta haluttu tulos saavutetaan. Näin tapahtuu esimerkiksi kallistettaessa lentokonetta, kun lennonohjausjärjestelmä valitsee toimenpiteeseen suorittajaksi joko ohjausspoilerin, siivekkeen tai molemmat. Tällä tavoin päästään huomattavasti tarkempaan ohjaukseen ja voidaan lentää mahdollisimman taloudellisesti ylittämättä koneen suoritusarvoja tai menettämättä sen hallintaa. Lentäjä suorittaa siis ohjaussauvalla liikkeitä, jotka siirtyvät sähköiseen muotoon tietokonejärjestelmien käsiteltäväksi. Lentokonetyypistä riippuen lennonohjausjärjestelmiä voi olla useita rinnakkaisia sekä eri järjestelmiä eri ohjainpinnoille. Lentotilasta ja olosuhteista riippuen järjestelmä siirtää käskyjä hydraulitoimilaitteiden sähköventtiileille, jotta haluttu lopputulos saavutetaan. Mikäli käyttö on varmistettu kahdella hydraulisyylinterillä, toimii toinen vaimentimena niin kauan, kunnes toiseen tulee jokin vika. Pääsylinderin vioituttua siirtyy se automaattisesti vaimentimeksi. /3/

Siivekkeet sijaitsevat normaalisti siiven jättöreunalla lähellä kärkeä. Ne ohjaavat koneen kallistumista pituusakselinsa ympäri. Useimmissa kuljetuskoneissa on kahdet siivekkeet, joista sisemmät siivekkeet voivat olla siiven puolivälin tietämillä. Kaikkien siivekkeiden jänneväli tulisi olla pienin mahdollinen, jotta siiven nostovoimaa parantavista laskusiivekkeistä saataisiin mahdollisimman leveät. Siivekkeiden tulee kuitenkin olla riittävän leveät, jotta tarvittavat kallistusominaisuudet saavutetaan. Kuvassa 2 on esitetty yksi siivekekonsepti. Ulommat siivekkeet on tar-



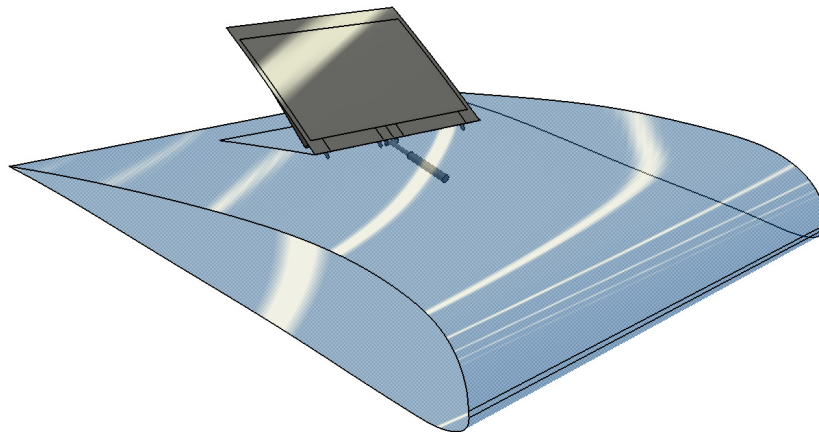
koitettu käytettäväksi pienemmillä nopeuksilla, kun taas sisemmät aiheuttavat lyhyemmän etäisyytensä ansiosta siipeen pienempiä rasituksia suuremmilla nopeuksilla. Käytettäessä siivekettä suurella nopeudella kohdistuu siihen myös suurempi voima, joka saattaa aiheuttaa siiven kiertymistä, jolloin siivekkeen ohjauskyky heikkenee asennon muutoksesta johtuen ja siiven rakenne rasittuu erittäin paljon. Sisemmät siivekkeet ovat lähempänä siiven tyveä ja jänneväliltään lyhyempiä, mutta suuremman nopeuden ansiosta ne pystyvät synnyttämään riittävät ohjausvoimat. Siivekkeen tulee olla myös tasapainotettu kääntöakselinsa suhteen, sillä muuten se on altis flutter-ilmilölle. Koska akselilinja on selvästi rakenteen edessä, hoidetaan tasapainotus lisäämällä painoa akselin etupuolella. Lisäpainojen sijasta voidaan käyttää myös hydraulista vaimennusta. Saranoinnissa tulee huomioida siiven taipuminen nostovoiman aiheuttamassa kuormituksessa. Useamman saranan käyttö vähentää taipumisen aiheuttamaa vaikutusta siivekkeeseen ja sen tehokkuuteen, koska siiveke ei pääse vääntymään haitalliseen asentoon. /1/



**Kuva 2** Kaksiosainen siivekekonsepti

Spoilerit ovat siiven yläpinnalla olevia ohjainpintoja, jotka käytettäessä häiritsevät nostovoiman kannalta oleellista virtausta. Spoileripinnat nousevat tarvittaessa melkein pystyasentoon, jolloin siiven nostovoima heikkenee rajusti. Kuvassa 3 on esitetty yksittäisen spoilerin konsepti. Spoileri kehittää lisäksi myös ilmanvastusta. Näitä ominaisuuksia voidaan hyödyntää niin ilmajarrutuksessa kuin ohjauksessakin. Toisin kuin siivekkeillä ohjattaessa spoileriohjauksessa vastus syntyy halutun

kaartosuunnan sisäkaarten puolelle, mikä on eduksi lentokoneen sivuluisua ajatellen. Siivessä ulompana olevia spoileriteitä käytetään ilmassa, kun taas siiven tyvessä olevat spoilerit on tarkoitettu nostovoiman poistamiseen maassa laskeutumisen yhteydessä tai keskeytetyssä lentoonlähdössä. Tyvessä olevia spoileriteitä ei käytetä ilmassa, koska ne häiritsevät virtausta liikaa ja saattavat aiheuttaa rakenteisiin tärinää eli niin sanottua buffeting-ilmiötä. Nostovoiman poistaminen ehkäisee lentokoneen hyppimistä liian kovassa laskussa ja lisää normaalivoimaa laskutelineille, jolloin jarrutusteho paranee. Ilmajarrutukseen käytettävien ulompien spoileriteiden avulla vauhti pienenee myös suuresti kasvaneen vastuksen vuoksi, millä saadaan tarvittaessa aikaan jyrkkä laskukulma. Spoilereiden jäykkyys on tärkeää, jotta ei syntyisi flutter-ilmiötä eli lepatusta suurilla nopeuksilla. Saranoinnissa tulee samalla huomioida siiven taipumisesta aiheutuvat rasitukset. /1/

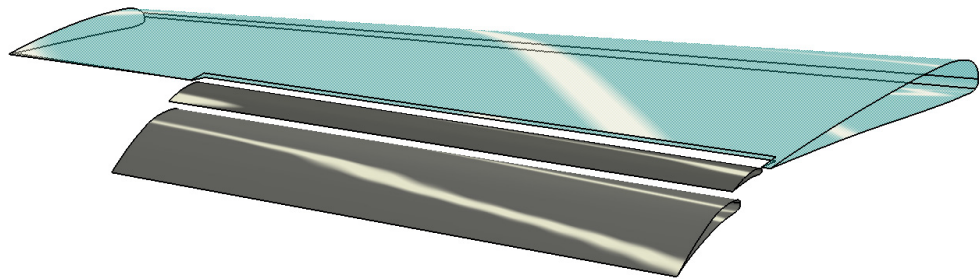


**Kuva 3** Konsepti spoilerista saranoiden ja aktuaattorin kanssa

Periaatteeltaan sivu- ja korkeusperäsimen rakenne on samanlainen kuin siivekkeiden. Tämä käsittää myös tasapainotuksen ja rakenteellisen koostumuksen. Suurien rasitusten vuoksi joudutaan kaarirakenteissa käyttämään suhteessa enemmän kaaria, kuin siivekkeissä. Vääntöjäykkyys flutter-ilmiön vuoksi tulee huomioida kuitenkin samaan tapaan kuin muidenkin ohjainpintojen kohdalla. Korkeusvakaajien taipumisen vuoksi joudutaan joissain tapauksissa jakamaan korkeusperäsimet ulompaan ja sisempään peräsimeen. Kuten jaettuina siivekkeinä, myös korkeusperäsimiä käytetään yhtä aikaa, mutta suurissa nopeuksissa vain sisempiä peräsimiä. Erillisten korkeusperäsinten tulee olla yhdistetty toisiinsa siten, että ne liikkuvat ai-

na yhtenevästi. Peräsimien läheisyydestä johtuen on tärkeää, etteivät ne ota toisiinsa kiinni missään mahdollisissa ohjausasennoissa. /1/

Laskusiivekkeet sijaitsevat siiven johto- ja jättöreunoilla. Ne muuttavat siiven poikkileikkausprofiilia, jolloin siiven nostovoima ja vastus muuttuvat. Kun laskusiivekkeet otetaan ulos kasvavat sekä nostovoima että vastus suuresti. Tästä seurauksena ovat pienempi sakkausnopeus ja jyrkempi nousu- ja laskukulma. Laskusiivekkeiden liikuttamiseen on kehitetty monenlaisia ratkaisuja, kuten sarana-, kisko- ja vipuvälitteisiä, mutta rakenteeltaan ne ovat samankaltaisia muiden ohjainpintojen kanssa. Laskusiivekkeet voivat olla moniosaisia, jolloin niiden välistä pääsevä ilmavirta parantaa siiven nostovoimaominaisuuksia. Kuvassa 4 on esitetty konsepti kaksiosaisesta laskusiivekkeestä ulosotetussa asennossa.



**Kuva 4** Kaksiosaisen laskusiivekkeen konsepti

### 3 OHJAINPINTOJEN RAKENTEET

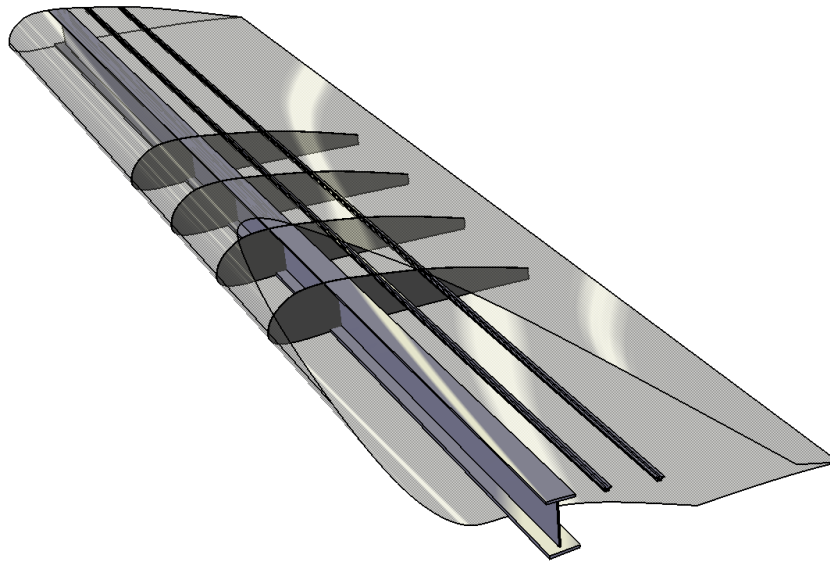
Ohjainpinnoissa käytetään yleisimmin kahta rakennetyyppiä, kaari- ja kennorakennetta. Kummassakin rakenteessa voidaan yhdistellä niin metalli- kuin komposiittimateriaalejakin. Molemmat rakenteet tavoittelevat suuria lujuusominaisuuksia mahdollisimman pienellä kokonaismassalla.

Ohjainpintojen rakenne muistuttaa hyvin paljon siipien ja vakaajien rakennetta. Toisin kuin ohjainpintojen, siipien täytyy kestää useita erilaisia rasituksia. Pelkääntään staattisessa kuormituksessa vaikuttavat jo polttoaineen ja moottoreiden massat,

laskutelineistä aiheutuvat voimat sekä siiven omasta rakenteesta johtuvat rasitukset. Lentokoneen ollessa liikkeessä ilmassa muuttuvat kuormitukset nostovoiman ja lentokoneen massan sekä työntövoiman ja ilmanvastuksen ansiosta. Nämä aiheuttavat siiven rakenteelle erilaisia taivutus- ja vääntörasituksia. Lisäksi siiven kokonaiskuormitukseen vaikuttavat lentokoneen liikesuuntaan vaikuttaessa ohjainpinoista aiheutuvat rasitukset. Muita erilaisia rasitustiloja ovat muun muassa lento-  
lähtö ja laskeutuminen sekä liikehtiminen maassa. Ohjainpintojen rasitukset ovat hieman yksinkertaisemmat. Suurimpana tekijänä ovat luonnollisesti aerodynaamiset voimat lentokoneen liiketilaa muutettaessa. Sen lisäksi on otettava huomioon etenkin siiven taipumisesta aiheutuva rasitus saranoinnille. /1; 2/

### 3.1 Kaarirakenne

Kaarirakenne toteutetaan yksinkertaisimmillaan pintalevyillä ja kohtisuoraan asetetuilla tukilevyillä eli kaarilla. Tämän lisäksi rakennetta voidaan vahvistaa pituusjäykisteillä ja saloilla. Kaaren tehtävä on antaa siivelle tai esimerkiksi siivekkeelle sen profiili, eli poikkileikkausmuoto. Muodon aikaansaamisen lisäksi kaari siirtää pintalevyn kautta tulevaa rasitusta siipisalolle. Salko on taivutuspaalkki, joka kantaa suurimman osan siipeen kohdistuvasta rasituksesta. Useamman salon rakenteissa kaaret myös vakauttavat siiven lujuutta kiertymisen suhteen. Kaarien ympärillä kulkevat pituusjäykisteet tukevat pintalevyjä ja vaikuttavat myös rakenteen lujuuteen. Kuvassa 5 on esitetty tyypillinen kaarirakenne, jossa on nähtävillä pintalevy, salko, neljä kaarta ja kaksi pituusjäykistettä.



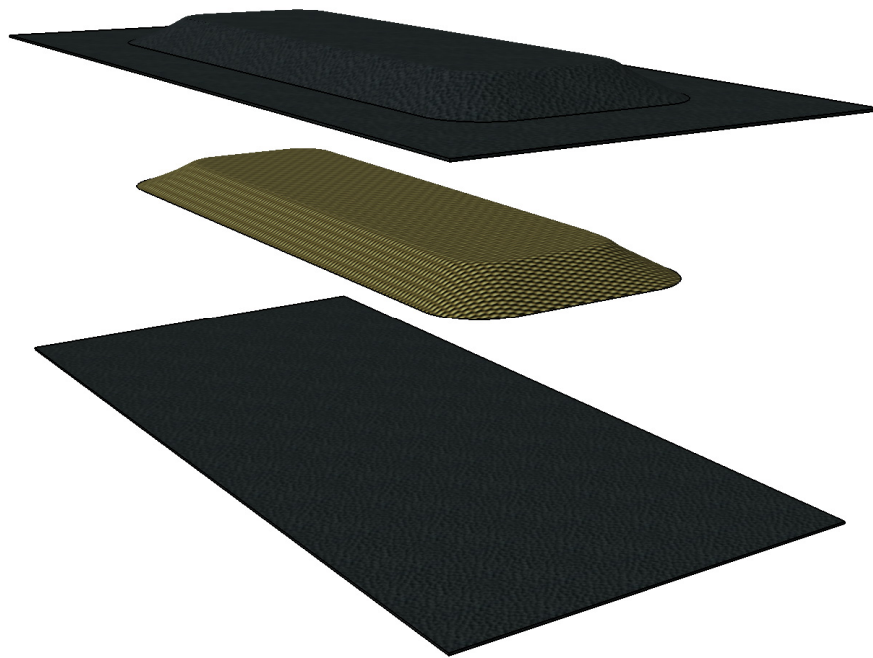
**Kuva 5** Tyypillinen kaarirakenne

Kaarirakenteissa käytetyimpiä materiaaleja ovat olleet alumiiniseokset. Suunnittelun kehitys suuntautuu kuitenkin hiilikuitulaminaattien puolelle, sillä hiilikuidusta pystytään valmistamaan niin ohuita siipikaaria kuin massiivisia salkojakin. /2/

### 3.2 Kennorakenne

Kennorakenteinen ohjainpinta, eli komposiittikerroslevy, valmistetaan laminoiduista pintalevyistä ja ydinaineesta, jotka on esitetty kuvassa 6. Pintalevyinä voivat toimia myös metallilevyt. Komposiitiksi kutsutaan eri materiaalien yhdistelmää, joka yhdistää niiden ominaisuuksia uudeksi materiaaliksi. Komponentteina toimivat materiaalit ovat kuitenkin erotettavissa alkuperäisessä muodossaan, sillä täydellistä sulautumista tai muodonmuutosta ei tapahdu materiaalien kesken. Lentokoneteollisuudessa käytetyimmät yhdistelmät ovat lasi- tai hiilikuitulujitteen yhdistäminen matriisina toimivaan hartsiin. Näistä materiaaleista hiilikuitu on selvästi kevyempää, ja se lasketaankin kuuluvaksi kehittyneiden komposiittien luokkaan. Kova hartsi tukee kuituja ja toimii kuormien välittäjänä kuitujen välillä. Lujitekuidut kantavat itse kuorman rasitukset, ja ovat tehokkaimmillaan silloin, kun kuormat ovat kuitujen suuntaiset. /4/

Oikein suunnattu kuitulujite antaa laminaatille veto- ja puristuslujuutta, mutta yhdessä ontelosuunnassa puristuslujan kennon kanssa tuloksena on myös taivutus- suunnassa luja kerroslevy. Kennorakenne koostuu pintalevyjen ja ydinaineen lisäksi myös liitoskerroksista, jotka liimaavat kennon paikalleen. Liimakerroksen pitävyys on olennainen tekijä kerroslevyn lujuusominaisuuksissa. Valmistuksessa tulee huomioida kerroslevyn ehdoton tiiviys osiensa kesken, jottei kenno pääse keräämään kosteutta. Yleisimmin pintalevyt ovat hiilikuitulaminaattia ja ydinaine hunajakennon kaltaista aramidikuidulla vahvistettua paperia. Toinen ilmailuteollisuuden käyttämä hunajakennomateriaali on alumiini. Nämä ovat kennomateriaaleista lujuuteensa nähden kevyimmät, mutta myös kalleimmat. /2; 4/

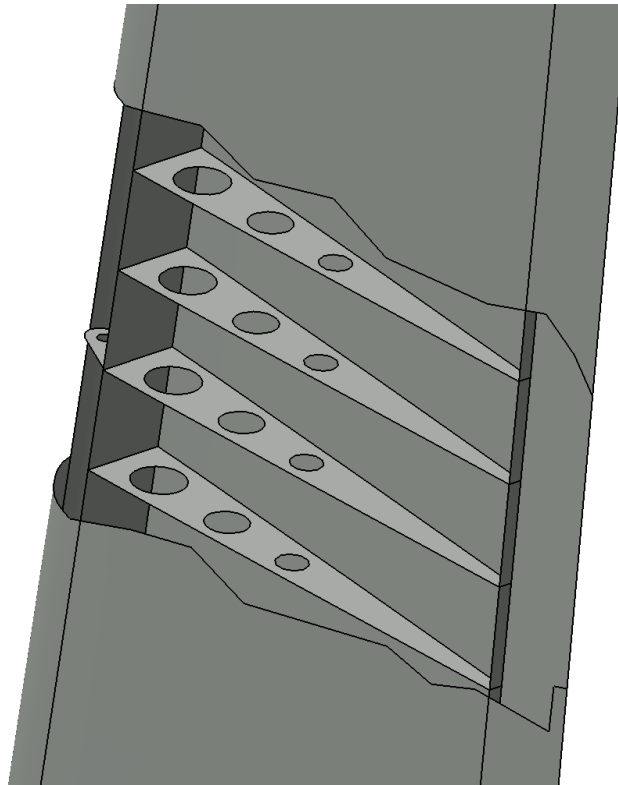


**Kuva 6** Räjätyskuva pintalevyistä ja kennosta

Kennorakennetta on käytetty aiemmin paljolti ohjainpintojen pintalevyissä ja jättöreunoissa, mutta sittemmin kennorakenteen käyttöä on laajennettu. Kerroslevyyn perustuva ohjainpinta on keveyteensä nähden erittäin kestävä, mutta rakenteen välissä vaikuttavat myös muut seikat, kuten valmistuskustannukset ja korjaus. Kerroslevyn korjaaminen on monin verroin vaikeampaa kuin erillisiin komponentteihin perustuvan kaarirakenteen. /2; 4/

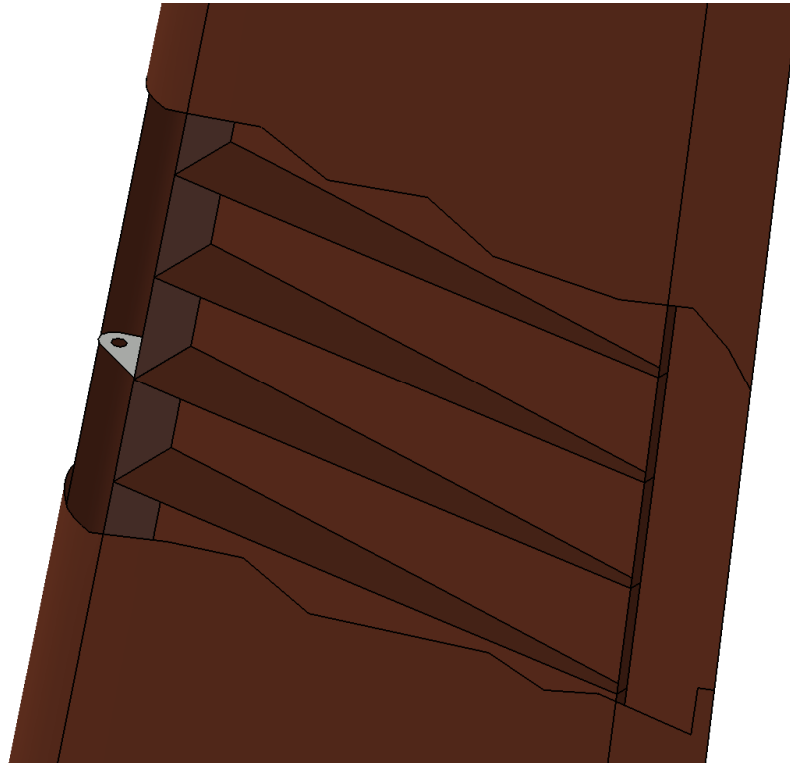
### 3.3 Rakennevaihtochoja

Kuvassa 7 on esitetty alumiiniratkaisuun perustuva liikennelentokoneen sivupe-  
räsimen rakenne. Kyseessä on perinteinen kaarirakenne, jollaisia voidaan löytää lä-  
hes jokaisesta lentokoneesta jossain muodossa. Rakenne on myös painavin vaihto-  
ehto tässä esitetyistä ratkaisuista. Lisäksi lukuisat osat joudutaan niittaamaan toi-  
siinsa, mikä lisää kiinnitystarvikkeiden määrää verrattuna komposiittiosiin, joita  
voidaan kasata myös liimaamalla. /5/



**Kuva 7** Alumiinista valmistettu perinteinen kaarirakenne

Kuvassa 8 on esitetty komposiittikaariin perustuva liikennelentokoneen sivupe-  
räsimen rakenne. Pintalevyinä tässä ratkaisussa toimivat monoliittiset kuitulujite-  
laminaatit. Ohuen pintalevyn vuoksi kaarien lukumäärä on huomattava. Jättöreunan  
muotosuoja on tässä tapauksessa voitu suunnitella ontoksi, mutta usein niiden koh-  
dalla on päädytty kerroslevyyn. Saranalinjan muotosuojaksi on valittu samanlainen  
ontto laminaattirakenne. /5/

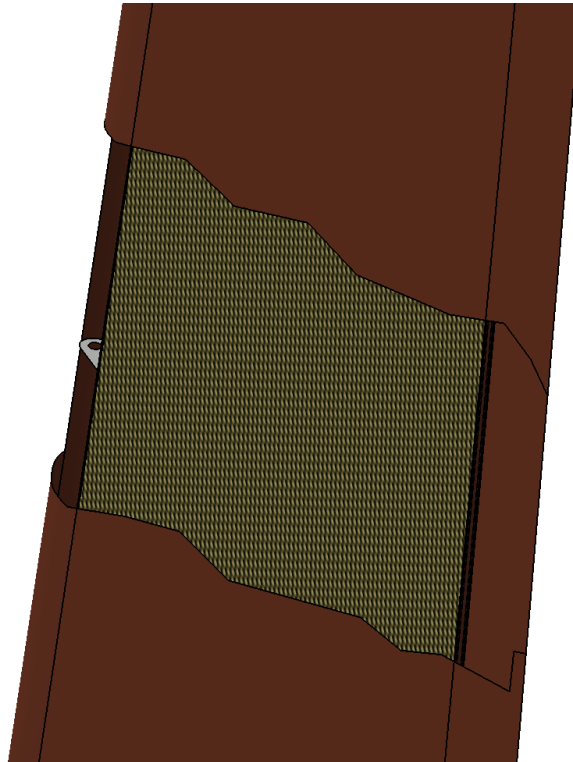


**Kuva 8** Kuitulujitelaminaateista valmistettu kaarirakenne

Kuvassa 9 on nähtävissä samasta peräsimestä kerroslevyyn perustuva konsepti. Ydinaineena on aramidikuitupaperista valmistettu kenno ja pintalevyinä kuitulujitelaminaatit. Saranalinjan muotosuoja ja jättöreuna ovat kuten edellisessä konseptissä, sillä kennoalue päättyy etu- ja takasalkoon. Kerroslevyn tiiveys on erittäin tärkeä asia, ja usein vaikeuksia tuottavat juuri viistävämmän kennon reuna-alueet.

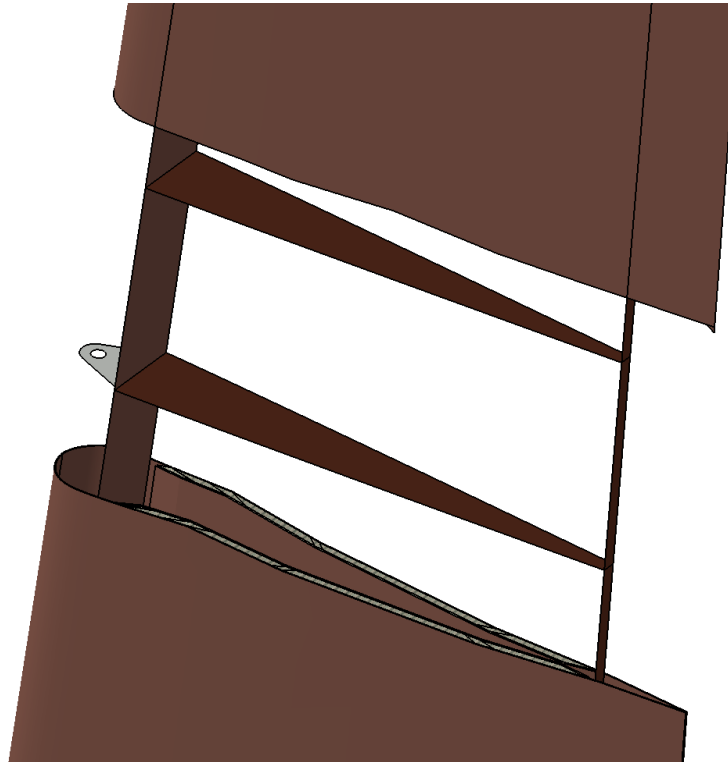
/5/





**Kuva 9** Kerroslevyyn perustuva peräsimen rakenne

Kuvassa 10 esitetyssä konseptissa on valittu pintalevyiksi ohuet kerroslevyt. Tämä ratkaisu on heti huomattavissa vähäisempänä kaarien tarpeena, mikä on seurausta kerroslevyjen merkittävästä jäykkyydestä ohuisiin pintalevyihin verrattuna. Kaaret ovat kuitulujitelaminaattia ja saranalinjan sekä jättöreunan muotosuojat onttoja kuten aikaisemmissa. /5/



**Kuva 10** Kerroslevyistä valmistettu pintalevyrakente

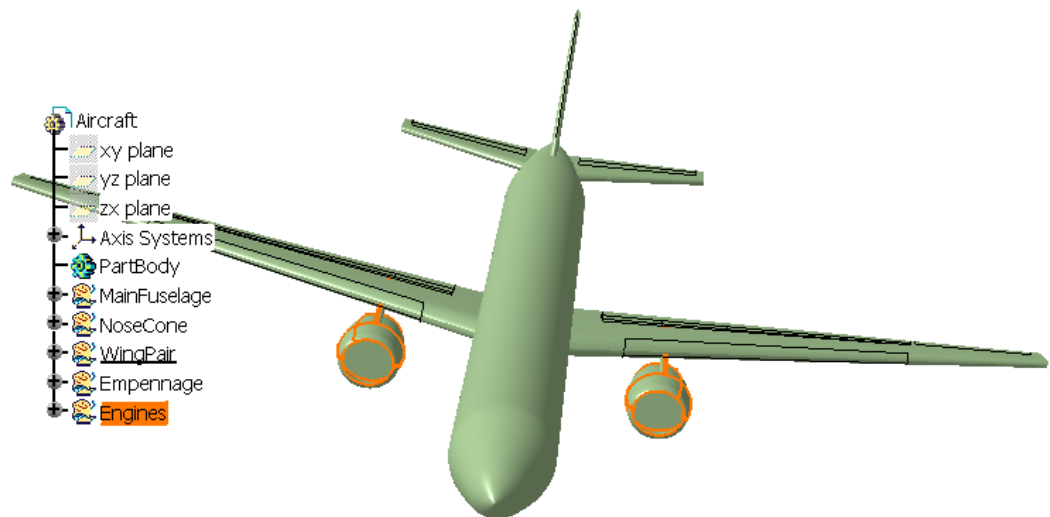
## **4 MALLINNUKSEEN LIITTYVÄT SEIKAT**

### **4.1 Catia V5**

Catia on yksi maailman johtavista 3D-mallinnusohjelmistoista, joka on suunniteltu toimimaan joka vaiheessa tuotteen suunnittelusta valmistuksen kautta simulaatioihin. Näistä osa-alueista käytetään yleisesti nimityksiä CAD, CAM ja CAE, Computer aided design, manufacturing and engineering. Alun perin tietokoneavusteinen suunnittelu käsitti lähinnä vain kaksiulotteista CAD-piirtämistä, mutta myöhemmin mukaan tuli myös kolmiulotteisten kappaleiden mallinnus. Catia on Dassault Systèmes -yhtiön kehittämä ohjelmisto, jonka uusin versio V5 Release 18 julkaistiin syksyllä 2007. Suurena osana ohjelmistoa ovat myös integroidut mahdollisuudet tietokantaohjelmiin, joilla hallitaan niin tuotekehitystä kuin elinkaartakin. Catia

on käytössä useissa johtavissa suuryrityksissä ympäri maailmaa liittyen moniin teollisuudenaloihin, kuten auto-, ilmailu- ja prosessiteollisuuteen.

Ohjelmisto perustuu mallinnettavan tuotteen piirteisiin, jotka tallentuvat rakennepuuhun. Rakenteen etuna on muun muassa mahdollisuus käyttää aikaisempia piirteitä apuna myöhemmin luotavien piirteiden hahmottelemisessa. Esimerkiksi pyöristetyn särmän pyöristämätön muoto voidaan käyttää uudestaan vaikka apuna uutta geometriaa luodessa. Kuvassa 11 on esitetty rakennepuuhun perustuvaa järjestelmää.

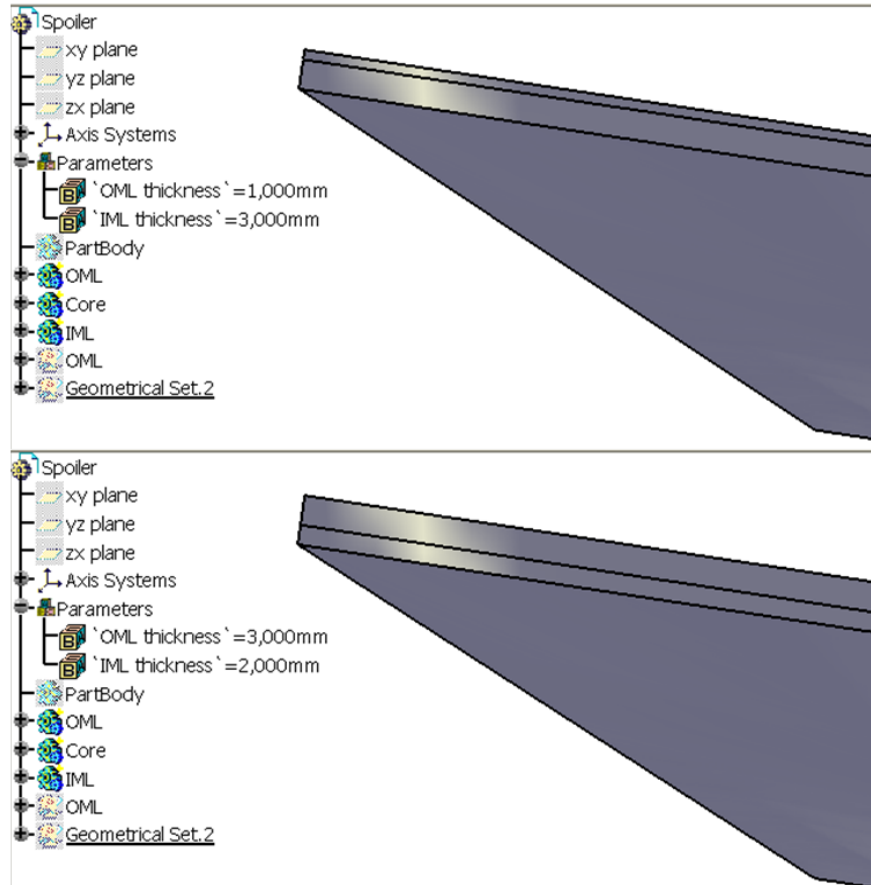


**Kuva 11** Catian rakennepuu ja havainnollistus erillisistä piirteistä

Syksyllä 2007 järjestetyssä European Catia Forum 2007 -konferenssissa esiteltiin useita edistyksellisiä ratkaisuja, joista merkittävimpiä olivat tietokantaohjelmistot, joihin hyödynnettiin jo Catialla luotuja malleja, jolloin tuloksena on kolmiulotteinen tuotehallinta. Tuoterakenteen visualisointi tuo huomattavia etuja hallintaan etenkin tuotteissa, jotka sisältävät tuhansia osia ja satoja alikokoonpanoja.

## 4.2 Parametroitu mallintaminen

Parametreilla ohjatun mallin tärkein ominaisuus on muunneltavuus. Parametrit ovat yksinkertaisimmillaan numeroarvoja, jotka ohjaavat mallin tiettyjä piirteitä, kuten on esitetty kuvassa 12. Yleisimmin käytetyt parametrit ohjaavatkin ensisijaisesti mittoja ja jäsenten lukumäärää esimerkiksi reikäryhmissä. Hieman monipuolisemmassa mallinnustekniikassa hyödynnetään piirteiden välisiä yhteyksiä matemaattisten operaattoreiden avulla. Tällöin käytetään yhtäläisyyksiä, jolloin useampi piirre saa saman arvon tai laskukaavoja, jolloin yhdellä arvon muutoksella saadaan useampaan piirteeseen muutettu arvo tarpeellisella korjauksella. Tämä periaate auttaa ennen kaikkea hyödyntämään jo ennestään olevia mallinnustuotteita, jolloin se on parhaimmillaan suunniteltaessa tuotteita, jotka eroavat toisistaan vain vähän. Muutosten tekemiseen käytetty aika on myös oleellisesti lyhyempi, ja mallin muuttaminen onnistuu myös helpommin eri henkilön toimesta. /6/



**Kuva 12** Parametreilla muutettavat pintalevyjen paksuudet

Parametrien suunnittelu ja käyttöönotto on kuitenkin hankalaa. Mallinnusta aloitettaessa tulisi olla hahmotelma siitä, miten mittoja ja ominaisuuksia tullaan tekemään riippuvaisiksi parametreista. Tärkeimpänä seikkana on tieto tuotteen tulevista mahdollisista muutoksista ja niiden laajuudesta, mikä on tavallisesti erittäin vaikeasti ennakoitavissa. Etenkin muutosten laajuus on merkittävä tekijä, sillä ainakin kokemattomammalle 3D-suunnittelijalle juuri muuteltavuuden varmistaminen on erittäin työllistävä osuus. Näin myös mallin tekoon käytetty aika kasvaa. Jos tuotetta lähdetään muodostamaan ulkopintoihin perustuen, niin pelkän ulkopintamuodon muuttaminen saattaa aiheuttaa yllättäviä tapahtumia itse tuotteessa, kun kaikki muodostetut piirteet mallissa perustuvat juuri sen varaan. Kappaleen leveyksien ja halkaisijoiden muuttaminen ei itsessään ole vaikeaa, mutta mallin sisäiset riippuvuussuhteet, piirteiden kiintopisteet, leikkauskohdat, apugeometriat tai linkittömät yhteydet varmistavat helpon muutoksen mahdottomuuden. Tästä syystä kaikki suunnittelun alkuvaiheessa käytetty aika muuteltavuuden kehittämiseen on aina hyödyksi. /6/

Numeerisilla arvoilla ja muilla parametreilla muuteltavan mallin etuina on, ettei tuotteeseen muutoksia tekevän tarvitse välttämättä osata käyttää kolmiulotteisen mallinnuksen työkaluja, vaan tarvittavat muutokset voidaan tehdä vain käskyjä syöttämällä. Tällöin esimerkiksi suunnittelijoiden ja lujuuslaskijoiden välinen tuotteen edestakainen siirtely vähenee, kun mallia ei tarvitse palauttaa suunnittelijalle vain jonkin alueen paksuuden lisäämiseksi tai haluttaessa vain kokeilla sen vaikutuksia tuotteen kestävyys. Lujuuslaskija voi itse muuttella kappaletta, vaikka hän ei välttämättä olisikaan kovin perehtynyt 3D-mallinnukseen.

Parametroinnin suurimpana haasteena on mallin muodostaminen tukevalle pohjalle. Mitä varhaisemmassa vaiheessa 3D-mallin syntyä muuteltavuus otetaan huomioon, sitä parempi. Tässä ovat tärkeässä asemassa mitoituksen käyttö, ehtojen, kuten kohtisuoruus tai peilikuva, asettaminen sekä viittaukset pysyviin elementteihin, eikä esimerkiksi reunoihin tai muihin kappaleen osiin, jotka muutoksia tehtäessä kaotavat. Parametrointia voidaan kehittää jollain tasolla myös huonosti muuteltaviin

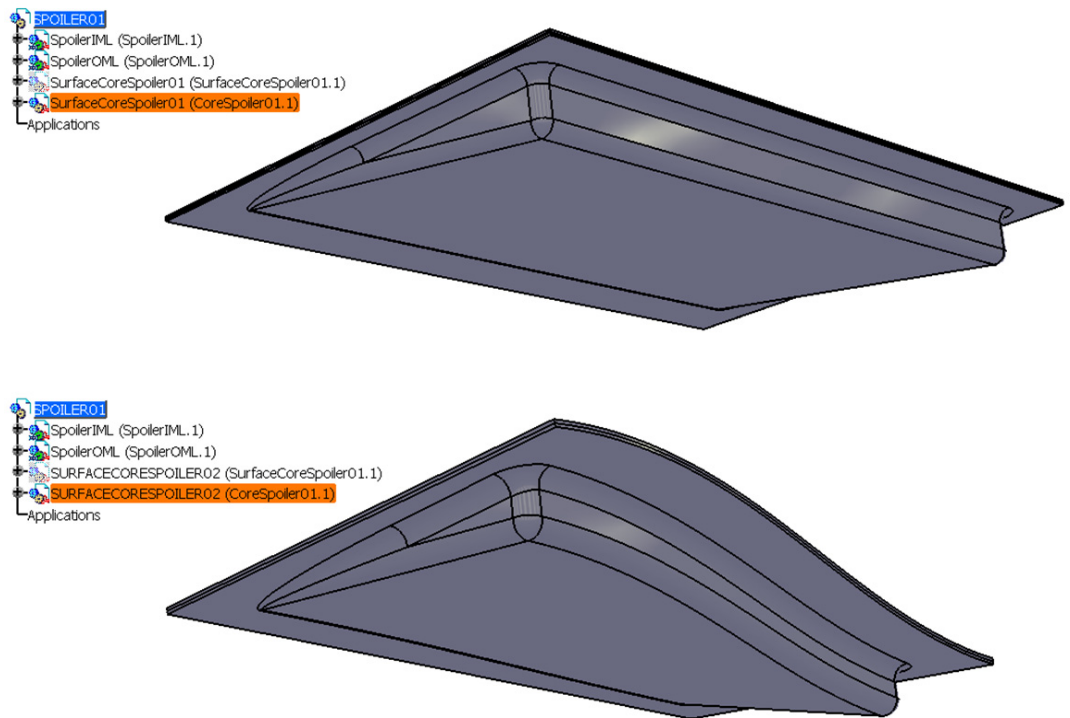
malleihin, mutta kyse on silloin melko pinnallisista muutoksista, koska parametrien soveltamista ei ole otettu huomioon mallia luodessa.

### 4.3 Publication-kopiointi

Kopioitaessa Catian copy-paste-toiminnolla saadaan aikaiseksi irtonaisen, linkittömän kopion lisäksi myös linkkinsä alkuperäiseen säilyttävä kopio. Linkin säilyminen tarkoittaa, että muutettaessa alkuperäistä myös kopioitu elementti muuttuu. Tämä ei kuitenkaan riitä, kun kyseessä on kokoonpanon sisällä kappaleesta toiseen kopioituja elementtejä. Normaalilla copy-käskyllä, linkki säilyttäen, kopioitu elementti kyllä päivittyy aluksi, mutta mikäli kappale, josta elementti on kopioitu, korvataan uudella versiolla tai nimellä, linkki katkeaa. Tämä johtuu siitä, että kopioitu elementti viittaa alkuperäiseen kappaleeseen sen nimen mukaan. Lisäksi, kun katsotaan kappaleen, johon elementti on kopioitu, osoittamia linkkejä, niin elementtiä koskeva linkki osoittaa suoraan kokoonpanoon, mikä tekee varsinkin isoissa kokoonpanoissa alkuperäisen lähdekappaleen löytämisen vaikeaksi.

Catia V5 tunnistaa kokoonpanon osat sekä nimellä että instanssinimellä. Instanssinimi on erillinen tunniste tilanteisiin, kun samaa kappaletta on useampi kuin yksi samassa kokoonpanossa. Tavallisesti instanssi on muotoa ”osan\_nimi.1”, ”osan\_nimi.2” ja niin edelleen. Kappaleen sisällöstä voidaan julkaista eri elementtejä Publication-toiminnolla, jonka kopioiminen ja liittäminen mahdollistaa, että kopiolla on viittaus kappaleen instanssiin eikä nimeen. Tällöin kappale voidaan korvata toisella, eikä linkki katkea. Tämä on mahdollista siksi, että kappaleen instanssin nimi ei muutu, vaikka kappaleen nimi vaihtuisikin esimerkiksi uuden version vuoksi. Myös kopiokappaleen osoittamat linkit viittaavat instanssin nimeen, jolloin käytettäessä instanssin nimen alkuosana itse kappaleen nimeä tai osanumeroa on lähdekappaleen löytäminen helpompaa isojen kokoonpanojen kohdalla. Toisella nimellä tai instanssinimellä varustettu kappale voidaan myös tuoda kokoonpanoon ja linkit yhdistää, kunhan publication-nimi on sama. Kuvassa 13 on esitetty Publication-toiminnolla mahdollistettu tilanne, jossa kokoonpanon vanha osa voi-

daan korvata toisella nimellä varustetulla osalla. Kennorakenteisen spoilerin pinta-levyt on määritelty muodostumaan CoreSpoiler01.1-instanssinimen mukaisesti, jolloin itse osan nimen muutos 02-versioon ei haittaa. /6/



**Kuva 13** Publication-kopioinnilla mahdollistettu osan korvaaminen

#### 4.4 Power copy -työkalu

Catian työkalusovelluksista löytyvä Power copy on toiminto, joka kopioi mallin valittuja piirteitä niin, että halutut ominaisuudet voidaan määrätä erikseen jokaiselle kopiolle. Kun työkalulle ilmoitetaan elementti, joka halutaan kopioida, se ilmoittaa seuraavaksi, mistä aikaisemmasta elementistä kopioitava kohde on tehty tai mitä se tarvitsee määrittelynsä. Tämä tilanne on esitetty liitteessä 1. Power copy on siis tavallista kopioi-liitä-toimintoa huomattavasti monipuolisempi, koska se pystyy hyödyntämään elementtien riippuvaisuusketjua edellä kuvatulla tavalla. /6/

Otetaan esimerkiksi tilanne, jossa on muodostettu viiva, jolle on asetettu kaksi pistettä. Ensimmäiseen pisteeseen on luotu viivan normaalin suuntainen taso, joka halutaan kopioida myös toisen pisteen kohdalle. Taso valitaan Power copy -toimintoon, jolloin sen syötteenä tulevat sekä viiva että piste. Näiden kahden tilalle voidaan valita jotkin toiset vastaavat elementit, jolloin syntyy uusi taso valitulle viivalle normaalin suuntaisesti kulkien valitun pisteen kautta. Mikäli syötteenä oleva viiva valitaan mukaan kopioitaviin elementteihin, saadaan syötteenä viivan tilalle elementit, joilla viiva on määritelty. Jos viiva on määritelty esimerkiksi kahden pisteen väliseksi, pystytään kopiointia suorittaessa valitsemaan nämä kaksi pistettä uudelleen, jolloin työkalu muodostaa uuden viivan. Vielä, kun osoitetaan kolmas syöte, eli piste, jonka kautta taso kulkee, on kopiointi valmis ja uusi taso luotu.

Työkalussa on lisäksi huomioitu syöte-elementtien parametrit huomioiva ominaisuus. Jos edellisen elementin normaalin suuntainen taso olisikin asetettu normaalin sijasta johonkin kulmaan viivaan nähden, voidaan tämä kulma-arvo julkaista, jolloin se voidaan määrittellä uudelleen kopiointia suorittaessa. Kun Power copy -työkalua on käytetty saman kappaleen sisällä, eikä kokoonpanossa, voidaan kaikki syöte-elementit valita alkuperäisiksi yhdellä painikkeella ja sitten vaihtaa tarvittavat, mikä nopeuttaa toimenpidettä huomattavasti, jos syöte-elementtejä on paljon ja vaihdettavia elementtejä vähän.

## 4.5 Design table

Catian Design table -työkalu mahdollistaa 3D-mallin määrittelyn Excel-taulukon avulla. Toiminto luo taulukkotiedoston, johon voidaan valita halutut parametrit ja mitat, joita voidaan myöhemmin muuttaa suoraan taulukosta käsin. Parametrien valintaikkuna on esitetty liitteessä 2. Kun muutettu taulukko tallennetaan, ilmoittaa Catia päivityksestä, jolloin malli muuttuu vastaamaan taulukossa esitettyjä arvoja. Taulukossa voidaan yksinkertaisimmillaan esittää esimerkiksi mitta-arvoja tai tosi- ja epätosikomentoja ohjaamaan jonkin elementin aktiivisuusparametria. /6/



Design table ymmärtää myös useamman arvorivin sisältävän taulukon, jolloin taulukon eri riveille saadaan tietynlaisia versioita halutusta kappaleesta. Tällöin voidaan suoraan valita jokin arvosarjan sisältävä rivi, eikä jokaista mitta tai parametria tarvitse muuttaa erikseen.

Tämän työn tavoitteiden kannalta Design table tarjoaa laajat mahdollisuudet. Oikein toteutettuna 3D-mallista saadaan helposti ja nopeasti muokattava ilman tarvittava mallinnusosaamiselle.

#### **4.6 If-lauseen korvaaminen**

Ohjelmointikielissä tunnetaan yleisesti aina jonkinlainen jos-niin-lauseke. Myös Catian Knowledgeware-moduulin perustyökaluihin kuuluu perinteiseen tapaan toimiva if-lauseoperaattori. Lause toimii nimensä mukaan: jonkin asian ollessa tietyllä tavalla on sillä määriteltäviä seurauksia. Knowledgeware-moduulia ei kuitenkaan ole aina käytettävissä, sillä sen ei yleensä katsota kuuluvan tavanomaiseen lisenssipakettiin. Ensimmäisten suunnitteluvaiheiden mukana tulleissa pulmissa suurin huolenaihe olikin juuri tämän lauseen korvaaminen. Catian kaavojen käytössä olevista ominaisuuksista tarjolla oli toki monilukuinen lista parametreja, kuten matemaattiset operaattorit, boolean true or false -parametri ja pelkät lukuarvoparametrit.

Suunnittelun avuksi kehitettiin if-lauseen korvaamiseksi eräs kiertotapa, joka on suhteellisen yksinkertainen ja helppo tehdä kohtuullisen kokoisille sarjoille. Se ei sisällä kaavojen osalta kuin kaksi vaihetta, mikä saattaa tosin olla työlästä, jos sarjaan kuuluu jo toistakymmentä elementtiä.

Otetaan esimerkiksi tapaus, jossa tarvitaan siivekemalliin yhdensuuntaisia kaaria tasavälein, joiden lukumäärää ohjataan kokonaislukuparametrilla. Pohjan kaarien paikoitukselle luo helpoiten pistejonotyökalu, joka pystyy samalla luomaan myös jonon normaalin suuntaiset tasot. Tasot toimivat hyvin leikkaustyökaluina, joilla

kaarien muodostus luonnistuu. Pisteiden lukumäärä on tarvittavien kaarien maksimimäärä. Lähtökohtana on ilmoittaa kokonaisluvulla kaarien lukumäärä, joka ohjaa käytännössä pistejonon välimatkoja. Tämä on seurausta Catian tavasta ohjata pistejonotyökäluä, jossa helpoin julkaistava parametri on juuri kyseinen välimatkan mita. Työkälu kysyy luotaessa ainoastaan viittausta ja lukumäärää, jossa viittaus on tässä tapauksessa suora viiva. Lukumäärä on tälle viivalle tulevien pisteiden lukumäärä lukuun ottamatta pääty pisteitä, mutta mikäli tätä parametria muutetaan jälkeinpäin, eivät ylimääräiset pisteet lakkaa olemasta, vaan pistejono jatkaa matkaansa viivan suunnassa. Tällöin olisi helppoa luoda vain jos-lause, joka määritteli si, että tarvittavien kaarien lukumäärän ollessa jokin tietty ylimääräiset deaktivoituisivat. Tämä tarkoittaa Catiassa jokaiselle elementille olemassa olevan activity-parametrin muuttumista epätodeksi.

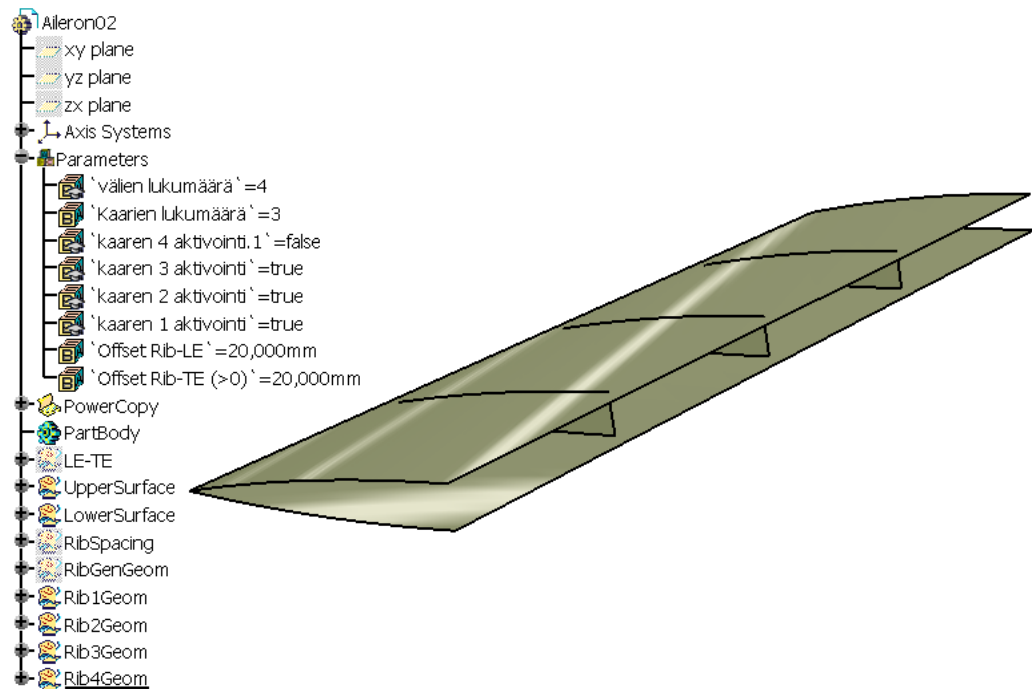
Kaksivaiheisessa ratkaisuehdotuksessa luotiin ensin boolean-parametri, joka voidaan nimetä vaikka ”kaaren nro 4 aktivointi” -nimiseksi. Parametrin antama tulos on joko tosi tai epätosi. Parametrin kaava on tällöin

$$\text{'kaaren nro 4 aktivointi'} = \text{'kaarien lukumäärä'} > 3 \quad (1)$$

Tämän parametrin tulosta hyödynnettiin seuraavaksi liittämällä se tällä kertaa kaaren numero 4 aktiivisuusparametriin:

$$\text{'.../Activity'} = \text{'kaaren nro 4 aktivointi'} \quad (2)$$

Liittäminen tapahtuu Catian kaavojen muokkausikkunassa, joka on esitetty liitteessä 3. Lopputuloksena oli tilanne, jossa kaari numero 4 sai aktiivisuudelleen epätoimen parametrin yhtälön 1 mukaan, jos kaarien lukumääräksi asetettiin kolme tai vähemmän. Näin saavutettiin myös tilanne, jossa jos-niin-lause korvattiin vain hieinan työläämmällä ratkaisulla. Kuvassa 14 on esitetty koko parametrijoukko ohjaamassa neljän kaaren ryhmää.



Kuva 14 Kaarien lukumäärää ohjaava parametrijoukko

## 5 KAARIRAKENTEEN PARAMETROINTI

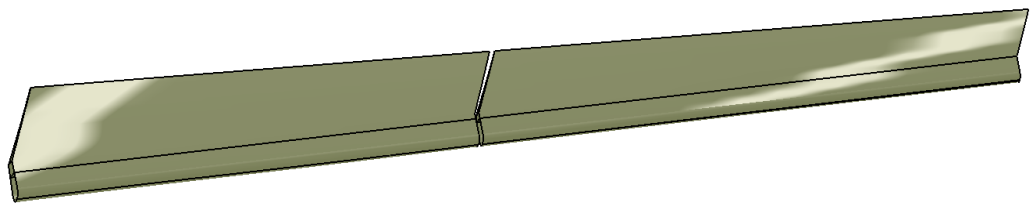
### 5.1 Siivekkeen parametointi Power copy -työkalun avulla

#### 5.1.1 Geometrian suunnittelu

Tehtävänä oli mallintaa liikennelentokoneen kaksiosainen siiveke. Alkutilanteessa käytössä oli ainoastaan akselilinja ja pari siivekeprofiilin leikkauskuvaa. Tarkoituksena oli saada aikaan kummastakin siivekkeestä oma kappaleensa, jotka sisältäisivät siivekkeen ylä- ja alapinnat, päätykaaret sekä parametreilla muutettava määrä kaaria, joiden kulma lentosuuntaan nähden tuli olla säädettävä. Tarkempia mittoja tai muotoja ei tässä vaiheessa vielä tarvittu, sillä pintamallia tulisi käyttää vasta alustaviin lujuuslaskentoihin, eikä tarkkoihin viimeistelyihin tai suunnitteluun. Tällöin pintamallin helppo muuteltavuus olisi ensisijaista, koska näin ollen

lujuustekniset vaikutukset rakennetta muutettaessa voitaisiin nopeasti todeta. Lujuuslaskentaa ei suoritettu mallinnusohjelmistolla, vaan erillisellä järjestelmällä, johon mallin geometria syötetään pelkkänä pintatiedostona, jolloin kaikki muutokset tuli tehdä ennen mallin tallentamista toiseen järjestelmään. Lisäksi siivekkeen pilkkominen jokaisen kaaren kohdalta oli tarpeellista johtuen lujuuslaskentaohjelmiston käytön nopeuttamisesta.

Koska käytössä ei ollut millintarkkaa määräävää geometriaa, tyydyttiin siivekkeen ulkomuodon määrittelevissä ulko- ja sisäpinnoissa kokoluokassaan oikeanmittaiseen ratkaisuun. Käytettävissä olleiden siivekkeen profiilin leikkauskuvista muodostettiin malliin profiilit leikkauskohtiinsa, jotka etureunastaan leikkaamalla saatiin muodostamaan profiilit ulko- ja sisäpinnalle erikseen. Takareuna oli jo valmiiksi auki, sillä siivekkeen jättöreunan tulisi muodostamaan erillinen kiilamainen reunakappale. Koska leikkauskohtia oli kummastakin siivekkeestä vain kaksi, oli profiileille helppo tehdä ohjauskäyrät yhdistämällä vain päädyt viivalla ja jatkamalla sitä reilusti yli siivekkeen reunakohtien. Sitten pinnat muodostettiin Multisection surface -työkalulla. Näin saatu pintamalli leikattiin molemmista päistään oikeaan muotoon, ja päihin muodostettiin päätykaaret. Siivekkeen rakenteen perustana oli alun perin yksisalkoinen kaarirakenne, joten malliin tuotiin myös itse salko, jonka etäisyys akselilinjasta oli säädettävissä mittaluvulla. Tuloksena oli näin kuvassa 15 esitetty pohja pintamallille, jossa tähän saakka mallinnettu geometria tulisi pysymään muuttelottomana.



**Kuva 15** Kaksiosaisen siivekkeen konseptimallin perusta

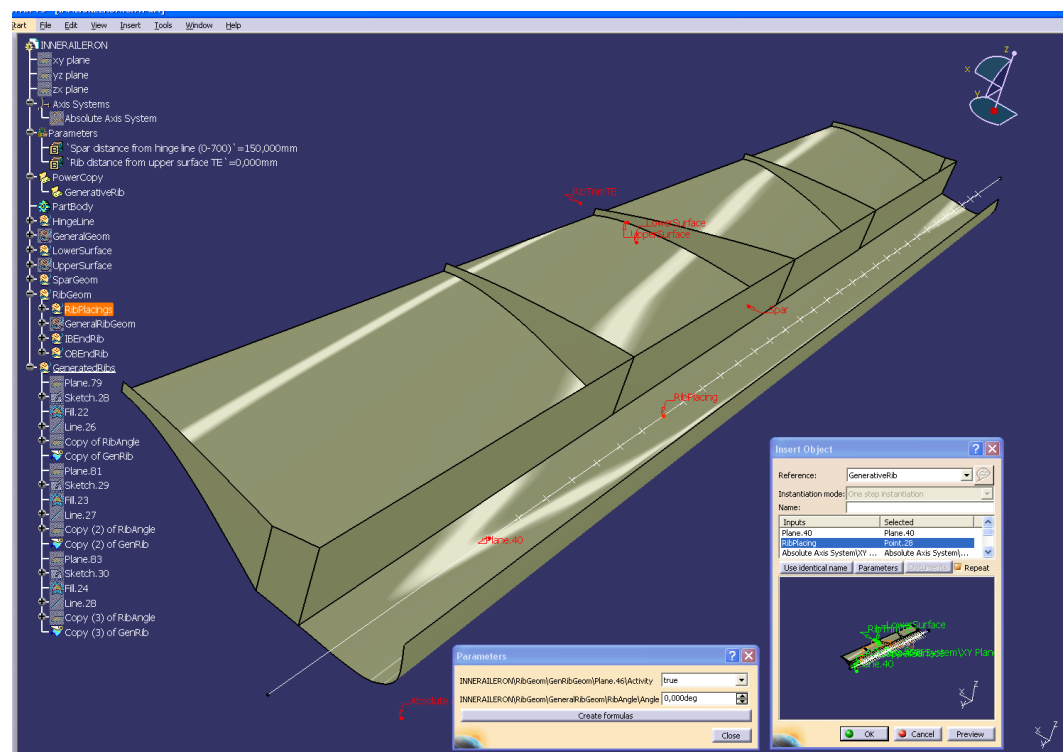
### 5.1.2 Kaarien parametointi

Kaarien muodostamiseen valittiin Power copy -menetelmä. Kaarien asemointia varten akselilinjalle muodostettiin tasavälein useita pisteitä ja jokaiselle pisteelle akselilinjaa vastaan kohtisuora taso. Pisteiden määrä johtui lähinnä välimatkojen selkeydestä siivekkeen pituuteen nähden. Muuteltavia kaaria varten mallinnettiin GeneralRib, joka toimii kaikkien tulevien kaarien pohjana. Se myös piilotettiin näkyvistä, jotta uusien kaarien asettelu voitaisiin aloittaa tyhjältä siivekkeeltä. GeneralRib-kaaren muodosti pintalevy, joka leikattiin siivekkeen profiilin muotoon ylä- ja alapinnoilla. Lisäksi se leikattiin takapästä liikutettavalla tasolla ja etupäästä salkopinnalla. Kaarien päättymiskohdat asetettiin täten parametreilla ohjattavaksi niin, että toinen parametri määrittelee kaaren takaosan leikkaustason paikan pintamallin jättöreunasta ja toinen parametri määrittelee siivekkeen salon paikoituskohdan, johon kaaret päättyvät etuosastaan. Itse pintalevyn luonnoksen perustana toimi asemointipisteessä akselilinjaa kohtisuoraan olevaan tasoon määrättyssä kulmassa oleva uusi taso. Tämän uuden tason tekeminen mahdollisti sen, että otettaessa GeneralRib-piirteestä Power copy, tulivat sen muodostavat tekijät valittaviksi ja haluttaessa muuteltaviksi, jolloin kulmassa olevan tason kulman arvo oli julkaistavissa ja asetettavissa parametriksi Power copy -toiminnon yhteyteen. Lisäksi muuteltavaksi tuli myös asemointipiste, jonka voi valita akselilinjalta vapaasti.

### 5.1.3 Siivekemallin käyttö

Siivekkeen pintamallin muuttaminen rajoittuu ainoastaan salon etäisyyteen akselilinjasta sekä kaarien lukumäärään, etäisyyteen jättöreunasta, asemaan akselilinjansuunnassa ja kulmaan pysty akselin suhteen. Näiden ominaisuuksien muuttaminen tapahtuu parametreilla ja Power copy -työkalun käyttöönotossa. Parametreilla osoitetaan ensinnäkin siivekkeen salon etäisyys akselilinjasta sekä kaarien takareunan etäisyys jättöreunasta. Valittaessa Power copy -työkalun Instantiate-käsky avautuu ikkuna, jossa tulee valita piirteen, tässä tapauksessa GeneralRib, muodostavat elementit. Koska Power copy on otettu samassa kappaleessa olevista elementeistä,

voidaan käyttää Use identical names -käskyä, jolloin Power copy muodostuisi täsmälleen samaan paikkaan, kuin piilotettu GeneralRib -piirre. Kun asemointipisteen elementti RibPlacement vaihdetaan halutuksi asemointipisteeksi, siirtyvät kaikki muut määräävät elementit tuohon kohtaan. Tällöin myös pysty akselin ympäri kierrettävä taso siirtyy. Parameters-valikon alta voidaan vaihtaa tason kulman arvo nolasta haluttuun arvoon. Tämä vaihe on esitetty kuvassa 16. Haluttaessa poistaa luotuja kaaria, täytyi ne tuhota rakennepuusta GeneratedRibs-ryhmän alta.



**Kuva 16** Kaaren luominen Power copy -työkalulla

Pintamallin käyttöön liittyy tiettyjä rajoitteita, jotka johtuvat pääosin eri pintojen leikkauskohtien muuttumisesta ja viistojen muotojen päättymisestä. Rakenteellisesti ajatellen mallin parametrit ja muuntelemisominaisuudet toimivat täysin normaalien arvojen rajoissa, mutta asetettaessa esimerkiksi salon etäisyys akselilinjasta suureksi on tuloksena mallin virhetila. Yksipalkkisessa kaarirakenteessa salkopalkin sijoittaminen lähemmäksi jättöreunaa kuin johtoreunaa on kuitenkin täysin turhaa, joten mallia ei lähdetty korjaamaan absoluuttisen muuteltavaksi. Lisäksi uuden kaaren kulman arvon ollessa liian suuri, jolloin kaari on jo rakenteellisesti ajatellen turhan paljon vinossa, tapahtuu myös eri pintojen ylityksiä ja leikkausongelmia,

jolloin pintamallista tulee jälleen punainen virheen merkiksi. Kaaren asettamiseksi suureen kulmaan ei kuitenkaan ole mitään tarvetta, joten tätäkään ei lähdetty parantelemaan. Rajoitukset parametrien arvoihin asetettiin näkymään parametrien nimien yhteyteen vihjeeksi. Lopputuloksena oli joka tapauksessa siivekemalli, jonka kaarirakennetta pystyttiin muokkaamaan helposti ja nopeasti.

## 5.2 Siivekkeen parametointi Design table -työkalun avulla

### 5.2.1 Geometrian suunnittelu

Tarkoituksena oli tehdä pintamalli lentokoneen siivekkeestä, joka hyödyntää Design table -työkalua. Tavoitteena oli muodostaa kaarirakenteisesta siivekemallista yksinkertainen esimerkki työkalun mahdollisuuksista helppoa muuteltavuutta suunniteltaessa.

Siivekkeen pinnan geometrialla ei ollut tässä tapauksessa niinkään merkitystä, joten ulkopinta muodostettiin vain vastaamaan suhteellisen yleistä konseptia lentokoneen siivekkeestä. Ulkopinnan määrittämisen jälkeen siivekkeeseen asetettiin 18 valmista kohtaa kaaria varten. Näille paikoille kopioitiin Power copy -työkalulla siivekkeen kaaret, joilla oli yhteinen leikkaustaso jättöreunalla ja jotka päättyivät etuosassa salkoon. Kopiointilähteenä toimi kaikille yhteinen kaaren malli, jota ei itsessään käytetä rakenteessa.

Käytännössähän tällaista asetelmaa voidaan muuttaa suoraan Catian rakennepuusta pelkästään piilottamalla sellaiset kaaret, joita siivekkeeseen ei haluta. Myös jokainen taso, joka määrää yksittäisen kaaren kulman akselilinjaan nähden, voidaan asettaa haluttuun kulmaan erikseen. Tässä mallissa oli kuitenkin tarkoitus esittää Design table -työkalun käyttöä ja sen tuomia mahdollisuuksia monimutkaisempia rakenteita ajatellen. Lisäksi mallin muuttelu on paljon helpompaa suoraan Excel-taulukolla kuin rakennepuuta penkomalla.

Kaarien lisäksi malliin lisättiin myös mahdollisuus valita siivekkeelle saranointikohdat sekä korvakkeet aktuaattorin kiinnittymistä varten. Saranoille ja korvakkeille kehitetyt pintamallit kiinnittyivät siivekkeen salkoon ja rajoittuivat etuosasta saranalinjan mukaan.

### 5.2.2 Siivekemallin parametointi

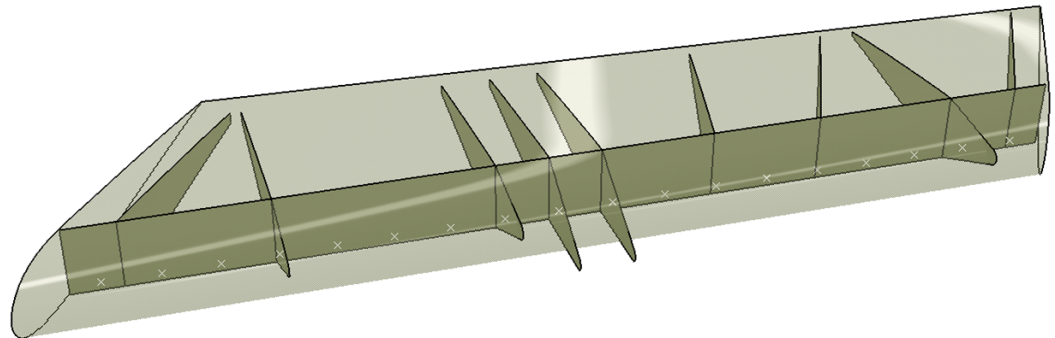
Parametointi aloitettiin siivekkeen kaarien aktiivisuuden määrittämisestä. Catian sisäisistä ominaisuuksista johtuen eteen tuli ongelma peräkkäisten elementtien käsittelystä. Yksittäinen kaari sisälsi luonnollisesti aikaisempia elementtejä, kuten Fill-työkalulla tehdyn pintalevyn, josta Split-työkalulla oli muotoiltu siivekkeen poikkileikkauksen muotoinen ja edelleen trimmattu Splitillä etu- ja takareunoistaan. Näistä elementeistä muut ovat piilotettuja, ja vain viimeinen elementti on näkyvässä. Kun viimeisen elementin, eli päistään trimmatun kaaren, aktiivisuus asetettiin false-tilaan, tuli tämän elementin tilalle näkyviin aikaisempi elementti, eli koko siivekkeen poikkileikkauksen kokoinen Split-kaari. Ilmeisesti Catia käsittelee aktiivisuuden koskevan vain split-elementin viimeisintä sisäistä toimintoa. Tätä asiaa ei lähdetty tutkimaan tarkemmin Catian osalta, vaan aktiivisuusparametrin taakse asetettiin kaikki kaaren näkyvillä olemiseen liittyvät elementit. Mallin teon osalta tämä ei lisännyt työmäärää olennaisesti, sillä kyse oli vain kahden ylimääräisen elementin valitsemisesta parametria määrittellessä.

Saranoiden ja aktuaattorin korvakkeiden parametreiksi asetettiin pelkät aktiivisuuskomennot, jolloin on myös mahdollista asettaa saranoita kohtiin, joissa ei ole ollenkaan siivekekaaria. Rakenteellisesti tästä tuskin on mitään hyötyä, mutta ainakaan malliin ei asetettu turhaan ylimääräisiä riippuvaisuussuhteita, kuten parametria, joka estäisi saranan tai korvakkeen asettamisen ilman kaarta.

Seuraavaksi Design table -työkaluun valittiin muuttujiksi kaarille tehdyt aktiivisuusparametrit, niiden asennon määrittelevien aputasojen kulma-arvot sekä sara-



noiden ja korvakkeiden aktiivisuusparametrit. Lisäksi Design table valittiin ohjaamaan myös siivekkeen salon paikkaa. Kuvassa 17 on esitetty osa Design table -työkalun luomaa taulukkoa. Taulukon sarakkeissa on nähtävillä muutettavaksi valittuja parametreja.



	BA	BB	BC	BD	BE	BF
1	Rib18	'Rib18 Hinge'	'Rib18 Fitting'	GeneratedRibs\Rib01	GeneratedRibs\Rib02	GeneratedRibs\Rib03 Gen
2	TRUE	FALSE	FALSE	-30	-30	-30
3						
4						
5						
6						

**Kuva 17** Design table ohjaamassa siivekemallia

### 5.2.3 Siivekemallin käyttö

Tuloksena syntynyt 3D-malli osoittaa melko hyvin jo yksinkertaisetkin edut Design table -työkalun käytöstä. Näinkin pienessä mallissa saavutetut edut ovat tavoitteiden mukaiset, eli tarvittavat muutokset ovat helposti tehtävissä eikä mallinnustaitoa tarvita ollenkaan. Lisäksi mallin elementtirakenne pysyy koskemattomana, mikä taas on melko mahdotonta, mikäli mallia muuttelevat eri suunnittelijat. Jokaisella on aina oma tekniikkansa mallintaa, eikä yhtä ja ainoata oikeata tyyliä ole. Design table -työkalun avulla mallin sisäiset riippuvuussuhteet tai keskinäiset lähdetiedot joutuvat ristiriitoihin paljon pienemmällä todennäköisyydellä, koska elementteihin ei tarvitse kajota.

Ongelmana ovat kuitenkin aina tavalla tai toisella mallin sisäiset ristiriidat. Esimerkiksi siirrettäessä siivekkeen salkoa riittävästi jompaankumpaan suuntaan saattaa se joissain malleissa ylittää jonkin kohdan, jossa jokin poikkileikkauselementti lakkaa olemasta, ja tämän tuloksena malli on jälleen virhetilassa. Luotettavan ja varman mallin aikaan saaminen on haaste jo itsessään. Muuteltavuus tulee ottaa huomioon alusta asti, eikä juuri missään kohtaa voida oikaista helpoimman kautta. Tällaisen vankan mallin suunnittelu on tietenkin sitä vaikeampaa, mitä monimutkaisemmasta mallista on kyse. Kyseinen esimerkkisiiveke on varsin yksinkertainen, mutta jo pienissäkin malleissa saatetaan havaita puutteita muutoksia tehtäessä.

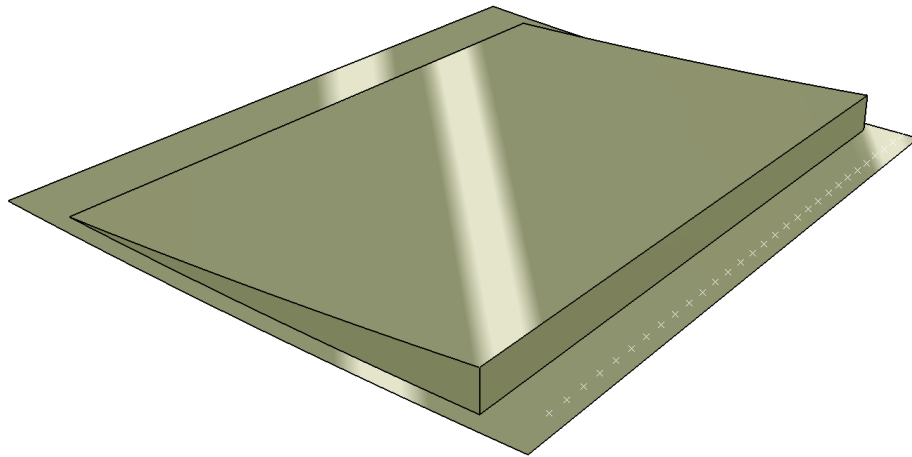
Suurimpana hyötynä on kuitenkin mallin muuttamisen nopeus ja helppous. Tämä käy esille varsinkin, jos muutoksen tekee suunnittelija, jotta lujuuslaskija voi laskea muutosten vaikutuksia. Tällaisessa tilanteessa prosessia nopeuttaa huomattavasti, että lujuuslaskijalla on mahdollisuus muuttella mallia itse, eikä hänen tarvitse palauttaa työtä takaisin suunnittelijalle, jolla saattaa olla meneillään jo toinen työ, jolloin kyseisen mallin muuttaminen viivästyy edelleen. Kun muutostyö on nopea ja helppo, voidaan tässä vaiheessa hakea vielä optimaalista ratkaisua pelkästään kokeilemalla erilaisia vaihtoehtoja huomattavasti vapaammin, kuin mihin muuten ei välttämättä olisi aikaa ja resursseja.

## **6 KENNORAKENTEEN PARAMETROINTI**

### **6.1 Spoilerin suunnittelu ja geometria**

Tarkoituksena oli muodostaa muuteltava malli kerroslevyyn perustuvasta spoilerista. Tärkeimpiä kohteita spoilerissa ovat sen yläpinta eli lentopinta sekä saranointi. Spoilerin alapinnan muotoilu riippuu hyvin pitkälti siivessä käytettävissä olevasta tilasta ja tietenkin lujuusvaatimuksista kennon osalta. Saranoinnin suunnitteluun kuuluu myös oleellisesti aktuaattorin korvakkeiden suunnittelu.

Lentopinnan geometrian määrittely oli yksinkertaista, koska se toimitettaisiin joka tapauksessa asiakkaan toimesta ja olisi näin ollen etukäteen määrätty. Tässä tapauksessa lentopinta suunniteltiin tarpeen mukaan helposti muuteltavaksi yksinkertaisella profiililla ja ohjauskäyrän yhdistelmällä. Lähtökohdaksi valittiin aavistuksen kupera ja reunoiltaan suorakaiteen muotoinen pintageometria. Kennon laminaattiin muodostama alue ennakoitiin viistoksi jo valmiiksi, jolloin sen pintatason kulmaa säätämällä saadaan haluttu viistekulma ja näin myös kennoalueen laajuus taaksepäin määritellyiksi. Pintamallinnus on esitetty kuvassa 18.



**Kuva 18** Spoilerin pintamallinnus saranoiden paikoituskohtineen

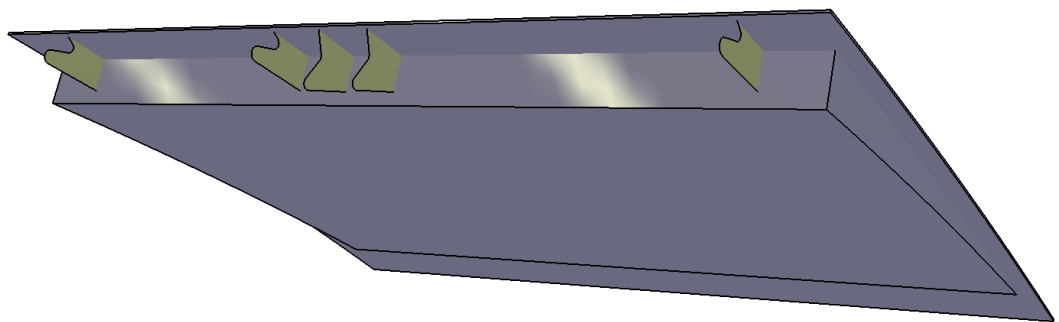
## 6.2 Spoilerin parametointi

Parametointiin soveltuvia kohteita olivat kennon viistekulma ja koko leveys suunnassa. Kennoalueen offset oli säädettävissä, mikä tarkoittaa käytännössä kennon paksuuden muuttamismahdollisuutta. Tällä ja viistekulmalla asetetaan tällöin myös takareunan monoliittisen, eli kennottoman alueen laajuus. Saranoiden ja aktuaattorin korvakkeet olivat asetettavissa Power copy -työkalun avulla.

Kennon paksuus asetettiin lentopinnan avulla offset-työkalulla, jonka mitta-arvosta saatiin kennon paksuutta määrittelevä parametroitava luku. Tätä pintaa kallistettiin,

jolloin kulma-arvosta saatiin erilliselle parametrille ohjattava kohde, mikä tulisi määrittämään kennon viistekulman. Kennoalueen pystyreunat muodostettiin luonnoksella ja vetosuunnalla, mistä luonnoksen reunamittoja parametroimalla muodostettiin kennon sivureunojen muuteltavuus. Lopullinen muoto kennoalueelle saatiin trimmaamalla näitä elementtejä keskenään, josta tuloksena oli spoilerin alapinta.

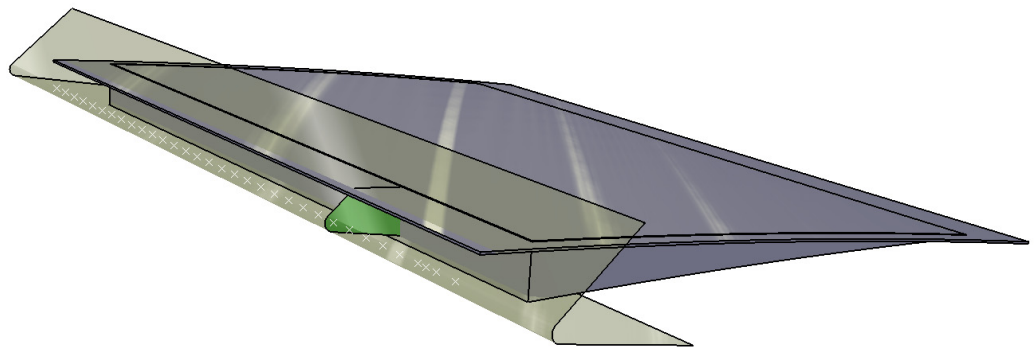
Saranat ja korvakkeet toteutettiin Power copy -työkalulla aikaisempien esimerkkien tapaan. Kappaleille oli saranointilinjalla useita valmiita paikoituskohtia, jotka vaihdettiin Power copyn syöteikkunaan osoittamaan aina kyseisen saranan tai korvakkeen paikan. Kappaleiden profiilit muodostettiin luonnoksella, johon asetettiin apugeometriaksi kennon etureuna. Koska kappaleet olivat etuosastaan asetettu seuraamaan saranointilinjaa, venyivät ne tarpeen mukaan, kun kennon mittoja ja paikoitusta muuteltiin. Valmis konseptimalli on esitetty kuvassa 19. Niin kennon reunamitat kuin saranoiden profiilitkin muodostettiin luonnoksella, jolloin näiden muokkaaminen tapahtuu manuaalisesti. Mitoilla ja apugeometriasta saaduilla viitteillä voidaan näitäkin saada paremmin muutoksia seuraaviksi, kuten esimerkiksi muuttamaan muotoaan kiinnitysalueen mukaan, mikäli alueen mitat vaihtelevat. Kyseisessä mallissa kennon etureuna ajateltiin saman vahvuiseksi koko matkalta, jolloin saranat ja korvakkeet olivat myös keskenään samankokoisia.



**Kuva 19** Spoilerin konseptimalli saranoiden ja aktuaattorin korvakkeiden kanssa

Koska Power copy -työkalu vaatii kopioitavan elementin syötteenä myös profiilin luonnoksen, mikäli kopioelementin halutaan päivittyvän automaattisesti luonnosta muutettaessa myös kopioinnin jälkeen, joudutaan tässä tapauksessa jokaista kopioi-

tavaa elementtiä varten tekemään oma luonnoksensa. Tämä johtuu siitä, että luonnos on tehty aputasolle, joka on muodostettu paikoituspisteeseen. Jotta paikoituspiste saadaan syötteenä eli toimimaan myös luonnoksen paikoituksena, joudutaan sekä luonnos että taso valitsemaan kopioitavien elementtien joukkoon, jolloin niistä tulee vain uusia linkittömästi kopioituja elementtejä uusilla nimillä. Syötteenä oleva paikoituspiste sen sijaan ei kopioitu. Muutettaessa paikoituspisteen paikkaa siirtyy myös siihen paikoitetut kopioidut elementit. Tätä voitaisiin tarvittaessa kehittää siten, että valmiin profiililuonnoksen sijaan käytettäisiin esimerkiksi tasopintoja ja leikkauksia muodostamaan profiileja, jolloin välttyttäisiin tapahtumaketjulta, jossa profiilin määrittelevä elementti on alun perin riippuvainen paikoituspisteestä. Esimerkki tällaisesta ratkaisusta on esitetty kuvassa 20.



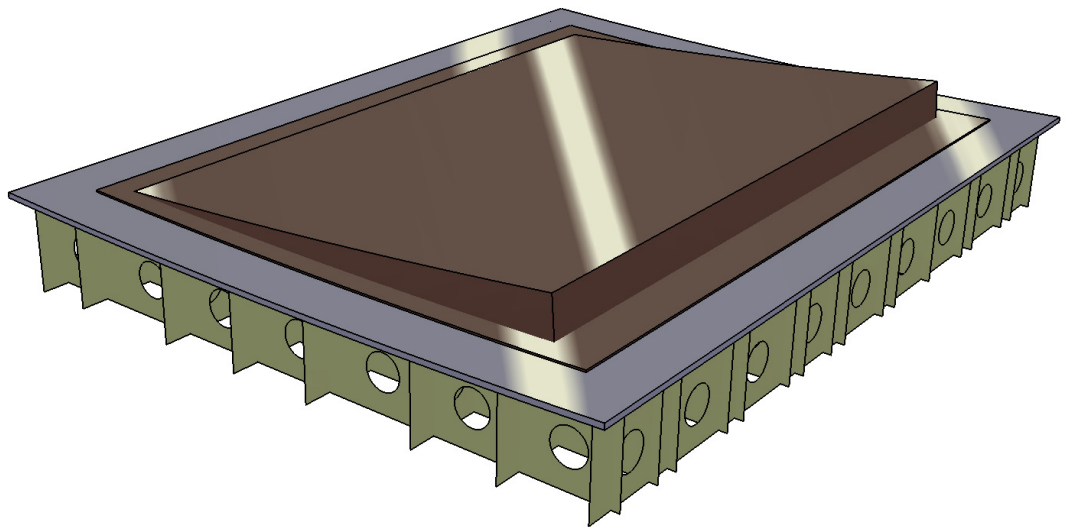
**Kuva 20** Saranan määrittäminen profiilitason avulla

## 7 PARAMETROINTI MUOTIN SUUNNITTELUSSA

### 7.1 Muotin suunnittelu ja geometria

Tarkoituksena oli tehdä havainnollistava malli komposiittiosien muottisuunnittelua ajatellen. Kyseisessä mallissa käytettiin samoja työkaluja ja menetelmiä kuin ohjainpintojen rakenteiden kohdalla, sillä ne ovat sujuvasti hyödynnettävissä monissa tilanteissa. Muotin pinnan muodosti edellisessä kappaleessa käsitellyn spoilerin lentopinta, jota levennettiin joka suuntaan Extrapolate-työkalulla laminoinnin mah-

dollistamiseksi. Muotin jalustaksi määriteltiin ristikkäinen levyistä koostuva rakenne. Tukirakenteen osalta tuli huomioida reikien lisääminen, jotta lämpö pääsisi jakautumaan tasaisesti muotin alla. Koko muottimalli luotiin pintamallina, jossa käytettiin pääasiassa Split-työkalua tukirakenteiden ja muottipinnan välillä. Kuvassa 21 on esitetty muotin mallinnus yhdessä spoilerin mallin kanssa.



**Kuva 21** Spoilerin ja muotin kokoonpanokuva

## 7.2 Muotin parametointi

Esimerkkimalliin valittu selkeä rakenne helpotti parametointia tuntuvasti. Siinä voitiin helposti hyödyntää tarpeen mukaan niin Power copya, kuin Design table -työkalua. Parametreilla oli yksinkertaisinta ohjata reikien paikoitusta niiden etäisyyksinä ja välimatkoina.

Power copy -työkalulla saatiin aikaisempien mallien tapaan kopioitua valmiille aputasoille tukirakenteen seinämiä. Seinämät muotoutuivat kaarien tapaan muottipinnan mukaan. Tärkeintä tässä oli seinämärakenteiden sijoittelun mahdollistaminen, jotta paras lopputulos rakenteen kannalta saavutettaisiin. Toisaalta valmiiden aputasojen paikkaa pystyi siirtämään aputasojen etäisyyden määrittelyn kautta, mi-

kä toi sijoitteluun vielä enemmän tarkkuutta, kun ei tarvinnut tyytyä vain valmiisiin paikoituskohtiin.

Vastaavasti Design table -toiminnolla rakenteiden ohjaaminen onnistui vielä helpommin, mutta itse valmiin mallin muodostaminen, ainakin aktiivisuuteen perustuvan parametrin kanssa, oli työläämpää. Tämä johtui samasta seikasta kuin siivekkeidenkin kohdalla, jolloin aktiivisuusparametrin sammuttua elementistä jäi jäljelle sitä edeltänyt Split-elementti. Jotta koko seinämä saatiin poistumaan, tehtiin jokaiselle seinämäelementille parametri, joka ohjasi kaikki tarvittavia elementin osasia. Näin seinämän aktiivisuutta voitiin ohjata yhdellä käskyllä, eli yhdellä solulla taulukossa. Tämä oli lopputuloksen kannalta selkeä ratkaisu, mutta hidas tehdä.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä esiteltiin lentokoneiden liikkuvia ohjainpintoja ja pohdittiin 3D-suunnittelun kehittämistä selkeiden konseptimallien osalta. Ohjainpintojen osalta perehdyttiin tarkemmin eri rakennevaihtoehtoihin ja nykyisiin käytettyihin ratkaisuihin. Mallinnusta käsiteltäessä keskityttiin parametrien sekä nopean muuteltavuuden hyödyntämiseen lentokonerakenteiden suunnittelutyössä.

Lentokoneiden ohjainpinnat ja niiden rakenteet esiteltiin tiiviisti, mutta kattavasti. Ensisijaisena tarkoituksena oli antaa kokonaiskuvaa sellaisille työntekijöille, jotka eivät ole aikaisemmin perehtyneet lentokonerakenteisiin tai ohjainpintojen nimityksiin. Työssä esiteltyt esimerkit saavuttivat tämän tarpeen onnistuneesti. Työtehtävien kautta rakenteista saa usein melko suppean näkökulman, sillä varsinkin yhden projektin parissa työskennellessä ei tule juuri oltua tekemisissä muiden rakennevaihtoehtojen kanssa. Muiden rakenneratkaisujen yleinen tuntemus on joka tapauksessa hyödyksi.

Parametrien ja työkalujen käyttöön perehdyttäessä esiin tuli muutamia seikkoja, joiden hyödyntäminen ja kehittäminen toisivat etuja alustavan suunnittelutyön pariin. Työssä käsitellyt aiheet olivat Catian perustoimintoja, mutta niiden soveltaminen työtehtävissä jää vähemmälle. Suurin osa suunnittelijoista on perehtynyt Catian käyttöön työn kautta, jolloin esimerkiksi Power copy -työkalun kokeileminen jää suurella varmuudella tekemättä. Ongelmana on yleensäkin Catian toimintojen vaikeaselkoinen ulosanti, jolloin ilman taustatietoja on erittäin vaikeaa syventyä uusiin piirteisiin. Hyvänä ketjuna onkin tuntunut aina olevan varman peruskäytön hallinta, minkä jälkeen käyttäjä on valmiimpi vastaanottamaan vinkkejä uusista toiminnoista. Tämän jälkeen vuorossa on ainoastaan kokeilemista ja soveltamista, jolloin uusi toiminto alkaa vasta hahmottua.

Työn edetessä havaittiin monia sellaisia asioita Catia V5 -ohjelmiston käytöstä, jotka auttoivat myös työskentelemään tehokkaammin. Monimutkaista ohjelmistoa oppii käyttämään parhaiten juuri yrittämällä ja tekemällä, mutta käynnissä olevasta projektista riippuen uusien tapojen ja työkalujen kokeilemiseen ja kehittämiseen on hyvin vähän aikaa ja mahdollisuuksia työn ohella. Etenkin meneillään oleva projekti määrää hyvin paljon, miten uusia tapoja voidaan soveltaa. Joissakin yhteyksissä ei ole juuri lainkaan pelivaraa erilaisille toimintatavoille, kun taas eräät projektit antavat paljon mahdollisuuksia 3D-suunnittelun kehittämiseksi ja monipuolisten toimintojen hyödyntämiselle.

3D-mallien muunneltavuus vaatii huomioimista heti alusta alkaen. Kun malli on rakennettu tukevalle pohjalle, on se helposti muokattavissa muutosten hetkellä. Jälkeenpäin parametrien ja kehittyneiden ominaisuuksien hyödyntäminen on vaikeaa, sillä aikaisemmin kasattu monimutkainen vyyhti viittauksia ja ristiriitoja ei ole ohjattavissa minkäänlaisilla hallituilla toimenpiteillä. Pitkälliset toimenpiteet tällaisten pakettien setvimiseen ovat lisäksi kannattamattomia. Mallien muuntautumiskykyä kaavailtaessa on muistettava myös ennakoitavat rajat, sillä hyvin harvoin on tarvetta muodostaa täydellisesti muuteltavaa tuotetta. Tästä aiheutuu mallinnuksen alkuvaiheessa huomattava määrä turhaa työtä. Kun muutoksille on onnistuttu rajaamaan selkeät tavoitteet, on 3D-mallin perustan luominen huomattavasti helpompaa ja kannattavampaa.



Työn aikana selvinneistä asioista merkittävin oli se määrä, kuinka paljon Catian resursseista jääkään hyödyntämättä. Nämä toiminnot eivät pääsääntöisesti ole mitenkään mahdottomia, vaan hyvin yksinkertaisia, kunhan niiden olemassaolon vain tietää. Tässä työssä esiteltyt työkalut ovat vain pintaraapaisu, mutta uskonkin, että niiden läpikäynti tuo varmasti monelle uusia ajatuksia mallinnustekniikan kehittämisestä omassa projektissaan.

## LÄHTEET

- 1 Niu, Michael Chun-yung, Airframe structural design. Conmilit Press Ltd. 1995.
- 2 Kroes, Michael J – Watkins, William A – Delp, Frank, Aircraft maintenance & repair. Glencoe/McGraw-Hill. 2002.
- 3 Lähteenmäki, Esko, Lentokonejärjestelmät. Valtion painatuskeskus. Helsinki 1992.
- 4 Saarela, Olli – Airasmaa, Ilkka – Kokko, Juha – Skrifvars, Mikael – Komppa, Veikko, Komposiittirakenteet. Muoviyhdistys. Helsinki 2007.
- 5 Loken, Hal – Hollman Martin, Designing with core. 2003.
- 6 Aho-Mantila, Antti, rakennesuunnittelija. Keskustelut 2008. Patria Aerostructures Oy. Tampere.

## **LIITTEET**

- 1 Power copy -työkalun syötteiden valinta
- 2 Design table -työkalun parametrien valinta
- 3 Kaavojen hallinta

