

Olli-Pekka Pelttari

**SEKOITETTU SIIPIRUNKO -LENTO-  
KONE MATKUSTAJALENTOLIIKEN-  
TEESSÄ**

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Jussi Aaltonen  
Huhtikuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Olli-Pekka Pelttari: Sekoitettu siipirunko -lentokone matkustajalentoliikenteessä  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikan kandidaattiohjelma  
Huhtikuu 2023

---

Lentoliikenteen määrä on kasvanut huomattavasti vuosittain 2000-luvulla muutamaa koronavuotta lukuun ottamatta. Ilmailun tuottamien haitallisten kasvihuonepäästöjen vähentäminen vaatii uusien teknologioiden käyttöönottoa. Useita erilaisia ratkaisuja lentoliikenteen vihertämiseen on ehdotettu, joista yhtenä lupaavimmista pidetään sotilasilmailusta jo osittain tunnettua sekoitetun siipirungon (engl. Blended Wing Body, BWB) käyttöä lentokoneen matkustajalentokoneen runkona. Tämä opinnäytetyö on kirjallisuustutkimus sekoitetun siipirungon potentiaaleista ja haasteista matkustajalentoliikenteessä. Työssä analysoidaan kirjallisuudessa esiintyviä sekoitetun siipirungon kehityskulkuja viimeisiltä vuosikymmeniltä, mitä sekoitetussa siipirungossa nähdään potentiaalina ja haasteina sekä esitellään sekoitetun siipirungon tunnuspiirteitä ja aerodynaamista sekä rakenteellista tehokkuutta.

Sekoitettu siipirunko -lentokone on lentokonekonfiguraatio, jossa rungon ja siipien jatkuva ja tasainen sekoittuminen johtaa korkeasti integroitua ja aerodynaamisesti tehokkaaseen runkoon. Toisin kuin perinteiset lentokonekonfiguraatiot, joissa siipien ja rungon välinen ero on selkeästi havaittavissa, BWB-rakenne luo leveän ja tasaisen rungon leveällä nostovoimaa tuottavalla pinnalla, joka ulottuu koko lentokoneen yli.

Tämä konfiguraatio tarjoaa useita etuja perinteisiin lentokonekonfiguraatioihin verrattuna, kuten pienentyneen vastuksen suhteessa nostovoimaan, mikä parantaa polttoainetehokkuutta ja vähentää päästöjä. Konfiguraatiossa on kuitenkin haasteita muun muassa lennonhallinnan ja stabiiliuden sekä painetilavuuksien integroinnin myötä ja sitä kehitetään edelleen laajaan kaupalliseen käyttöön.

Vaikka BWB-lentokoneita ei kaupallisessa käytössä ole vielä vuonna 2022, osoittavat useat siitä tehdyt tutkimukset sen kyseenalaistamattoman potentiaalin. Lennonhallintajärjestelmien sekä materiaalitekniikan kehittyessä voidaan BWB-lentokoneen adaptoinnin matkustajalentoliikenteeseen olevan realistinen tulevana vuosikymmeninä, useiden matkustajalentoliikenteen ekologisuuden parantamiseen pyrkivän aloitteen puskemana.

Avainsanat: Sekoitettu siipirunko, Blended Wing Body, kostea pinta-ala, ilmailu, lentotekniikka

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. VIIMEISIMMÄT KEHITYSKULUT MATKUSTAJALENTOLIIKENTEESSÄ .....	3
2.1 Uusien lentokoneiden kehitystavoitteita.....	3
2.2 Putkisiipirungon aerodynaamisen tehokkuuden parantaminen.....	4
3. LENTOKONEESEEN VAIKUTTAVA VASTUS .....	5
4. SEKOITETTU SIIPIRUNKO, BLENDED WING BODY .....	8
5. SEKOITETUN SIIPIRUNGON TEKNINEN POTENTIAALI JA HAASTEET .....	10
5.1 BWB-lentokoneen aerodynamiikka .....	10
5.2 BWB-lentokoneen lennonhallinta ja stabiilius .....	12
5.3 BWB-lentokoneen rakenteet .....	17
5.4 Propulsion integrointi sekoitettuun siipirunkoon.....	20
6. SEKOITETTU SIIPIRUNKO -KONSEPTIEN POTENTIAALI MATKUSTAJALENTOLIIKENTEESSÄ .....	23
6.1 BWB-lentokoneen turvallisuus ja ympäristöystävällisyys .....	23
6.2 BWB-lentokoneen markkinointi ja tuotantopotentiaali.....	25
7. YHTEENVETO.....	28
8. LÄHTEET .....	30

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

BWB	Sekoitettu siipirunko (engl. Blended Wing Body)
TAW	Diskreetti putkisiipirunko (engl. Tube And Wing)
FW	Lentävä siipi (engl. Flying Wing)
L/D	Nostovoima-vastus -suhde (engl. Lift to Drag ratio)
FCS	Lennonohjausjärjestelmä (engl. Flight Control System)
BLI	Rajakerrosvirtaus (engl. Boundary Layer Ingestion)
ACARE	Euroopan (EU) ilmailututkimuksen neuvoo-antava toimikunta, engl. Advisory Council for Aeronautics Research in Europe (EU)
NASA	Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallintovirasto, engl. National Aeronautics and Space Administration
$NO_x$	Typen oksidi
$CO_2$	Hiilidioksidi

# 1. JOHDANTO

Lentokoneinsinöörit ovat jo useiden vuosikymmenten aikana etsineet ja keksineetkin ratkaisuja matkustajalentoliikenteeseen, jotka tekevät matkustamisesta turvallisempaa, ekologisempaa ja kustannustehokkaampaa. Aikana, jossa etsimme jatkuvasti vihreämpiä ratkaisuja matkustamiseen, on esimerkiksi autoteollisuudessa jo sulavasti osittain siirrytty hybridautojen myötä sähköautoiluun. Kuitenkin lentoliikenteessä nämä muutokset ovat olleet suhteellisen inkrementaalisia. Matkustajalentoliikenteen tulevaisuutta on arvioitu laajasti epävarmaksi, mikäli ratkaisuja vihreämpään liikenteeseen ei löydetä, eikä niitä saada käyttöön.

Inkrementaaliset muutokset ovat lähinnä olleet nykyisin taivaalla näkyviin runkoihin tehtyjä aerodynaamisen tehokkuuden parantamisia moottorien tai siipigeometrioiden muutosten myötä. Muutamia radikaalimpia muutoksia on kuitenkin myös ehdotettu matkustajalentoliikenteeseen viimeisten vuosikymmenten aikana, joista yksi perustuu siiven ja rungon sulauttamiseen keskenään, muodostaen sekoitetun siipirungon (engl. Blended Wing Body, BWB).

BWB-konsepti ainutlaatuisen konfiguraation ja potentiaalin myötä sopii hyvin ympäristöystävällisen roolin, pitkän kantaman, suuren kapasiteetin matkustajalentokoneeksi. Kuitenkin hallinta- ja stabiiliusongelmat, matkustamon paineistus ja lentokoneen käsitteilyominaisuudet on asioita, joihin on löydettävä ratkaisuja

BWB-rungon eduista ja ongelmista on tehty lukuisia tutkimuksia ja aiheesta löytyy suhteellisen paljon kirjallisuutta. Siitä huolimatta aihetta tulee tutkia edelleen enemmänkin, sillä muutamiin kysymyksiin ovat vastaukset edelleen kateissa, mikä on esteenä BWB-rungon matkalla matkustajalentoliikenteeseen.

Työn tavoitteena on selvittää, mikä BWB-runko on, mitkä ovat sen etuja suhteessa nykyisiin runkoihin ja mitä haasteita sillä on edessään matkallaan toimivaksi ratkaisuksi matkustajalentokoneen rungoksi. Tämä kandidaatintyö tehdään kirjallisuustutkimuksena, jossa pyritään käyttämään useita 2000-luvun tutkimusartikkeleja ja kirjallisuutta.

Luvussa 2 käsitellään viimeisimpiä kehityskulkuja matkustajalentoliikenteen osalta, joka pohjautuu aerodynaamisen tehokkuuden parantamiseen. Luvussa mainitaan EU:n ke-

hottamat kehitystavoitteet uusien lentokoneiden osalta vuodelle 2050. Vuotta 2050 voidaan pitää sopivana viitekehyksenä uusien lentokonekonfiguraatioiden esiin tulemiselle, sillä kehitys lentokoneteollisuudessa on hidasta.

Kolmannessa luvussa käsitellään yleisesti lentokoneeseen vaikuttavaa vastusta. Vastustyyppit jaotellaan lyhyin selityksin yleisestä vastuskaaviosta, painottaen vastustyyppisiä, joilla on sekoitetun siipirungon aerodynamiikan ja sitä kautta tutkielman kannalta eniten merkitystä.

Neljännessä luvussa esitellään sekoitetun siipirungon eli BWB:n lentokonekonfiguraation peruspiirteet. Luvussa esitellään BWB:n lupaavimmat piirteet matkustajalentoliikenteen osalta, kuten polttoainetehokkuus ja suurempi suhteellinen sisätilavuus. BWB:n esittelyssä pidetään tärkeänä erotella se lentävän siiven konfiguraatiosta.

Viidennessä luvussa käsitellään BWB-lentokonekonseptien teknistä potentiaalia ja haasteita matkustajalentoliikenteessä. Tekninen potentiaali ja haasteet käsittävät tässä tapauksessa BWB-lentokoneelle ominaisia rakenteellisia ja aerodynaamisia piirteitä, jotka erottavat kyseisen konseptin nykyisistä matkustajalentokoneista.

Kuudennessa luvussa syvennyttään BWB-lentokonekonseptien muihin tärkeisiin ominaisuuksiin, jotka ovat eduksi ja haitaksi sen matkallaan kohti matkustajalentoliikennemarkkinoita. Tärkeitä käsiteltäviä asioita tässä suhteessa ovat muun muassa konseptin turvallisuus, ympäristöystävällisyys, markkinointi tai houkuttelevuus sekä tuotantopotentiaali. Tutkimuskysymyksien kannalta työn tärkeimmät tulokset tulevat ilmi viidennessä ja kuudennessa luvussa, joskin tulokset eivät ole triviaaleja.

## 2. VIIMEISIMMÄT KEHITYSKULUT MATKUSTA- JALENTOLIIKENTEESSÄ

Tämän päivän kaupalliset matkustajalentokoneet ovat kaikki pitkälti samanlaisia, eivätkä ne ole olennaisesti muuttuneet viimeisen 50 vuoden aikana. Pohjimmiltaan ne koostuvat putkesta, joka sisältää matkustajat, sekä taaksepäin pyyhkäistyistä siivistä, joiden alapuolelle on kiinnitetty moottorit pyloneilla. Lentokonevalmistajat pyrkivät jatkuvasti kehittämään polttoainetehokkaampia malleja, johon muun muassa EU:n kaltaiset tahot kehittävät esimerkiksi Flightpath 2050 -aloitteen kautta. Aloitteet asettavat tiukkoja päästö- ja melutavoitteita tuleville matkustajalentokonekonfiguraatioille.

### 2.1 Uusien lentokoneiden kehitystavoitteita

Kaupallisen lentoliikenteen markkinoiden on ennustettu kasvavan tasaisesti ainakin vuoteen 2030 asti. Se kuitenkin tulee kokemaan muutoksia lähitulevaisuudessa. Yksi niistä on fossiilisten polttoaineiden puute ja sen vaikutus toimintakustannuksiin ja lentoyhtiöiden liiketoimintamalleihin. Lisäksi tietoisuus päästöistä, kuten melusta ja saasteista on kasvanut ja kasvaa poliitikkojen ja siviilihenkilöiden keskuudessa. Tuloksena, tulevaisuuden lentokoneiden tulee olla kustannus- ja polttoainetehokkaampia. Tämän lisäksi melutasoja, varsinkin lentoonlähdön ja laskun aikana on laskettava huomattavasti, jotta liikenne lentokentillä voi lisääntyä. Strateginen tutkimusohjelma "ACARE vision 2050" julkaistiin osana ACFA 2020 -konferenssia, mikä tähtää 75 %:n CO<sub>2</sub>-, 65 %:n melu- ja 90 %:n NO<sub>x</sub> -vähennyksiin, kaikki per matkustajakilometri. (Kozek & Schirrer 2015, s. 5–6) Parannuksien tavoitearvot on asettanut Euroopan komissio, katso taulukko 1.

**Taulukko 1.** ACARE tavoitearvot vuodelle 2050 (muokattu lähteestä (Kozek & Schirrer 2015, s. 5-6))

	Flightpath 2050 [%]
<i>Hiilidioksidi CO<sub>2</sub></i>	-75
<i>Typenoksidit NO<sub>x</sub></i>	-90
<i>Melu</i>	-65

## 2.2 Putkisiipirungon aerodynaamisen tehokkuuden parantaminen

Suurin osa nykyisistä matkustajalentokoneista käyttää tyypillistä siipi-sylinterirunko-koonpanoa (engl. Tube And Wing, TAW), jonka propulsio syntyy turbiinipuhallinmoottorien (engl. Turbofan engines) myötä. Yksinkertaisin ja ilmeisin aerodynaamisen tehokkuuden lisäys voitaisiin saavuttaa parantamalla edelleen lentokoneen runkoa ja moottoreita jatkaen tämän perinteisen konfiguraation käyttöä, kuten on viimeiset 70 vuotta tehty. Tämä on mahdollista saavuttaa soveltamalla seuraavien vaihtoehtojen yhdistelmiä:

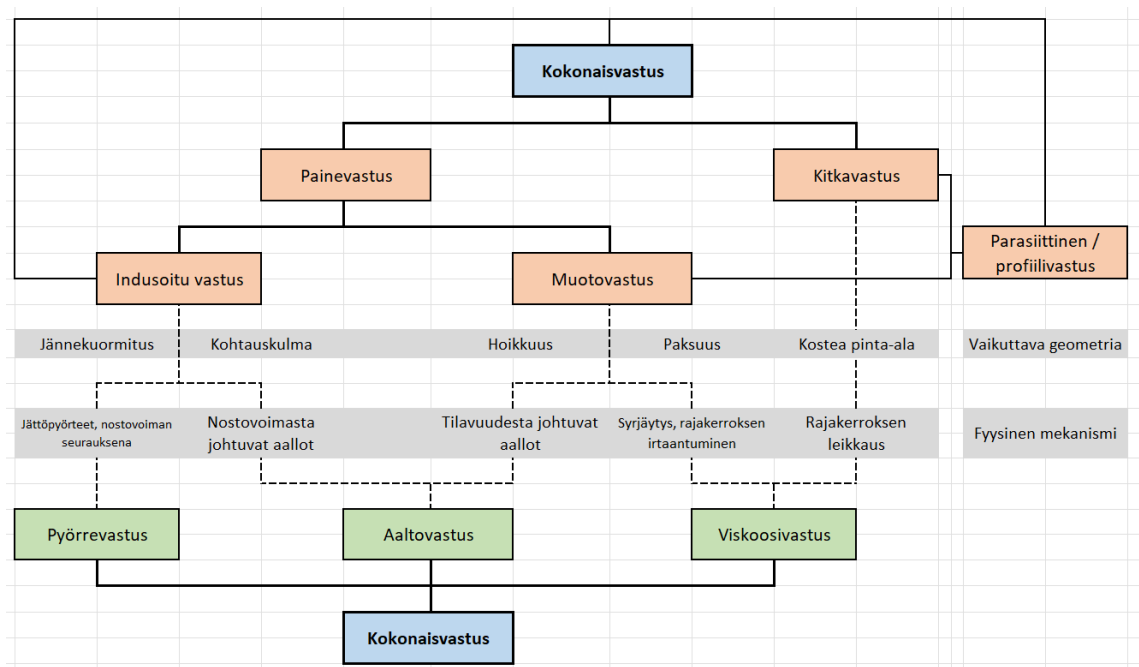
- parannettu aerodynamiikka, esimerkiksi laminaarivirtaus, uudet kantopinnat ja siivet
- seuraavan sukupolven moottorit, esimerkiksi vaihteistoturbiinipuhaltimet (engl. Geared turbofan GTF), kanavattomat puhaltimet (engl. Unducted fans UDF)
- kevyemmät rakenteet, esimerkiksi materiaalit, uudet rakennekonseptit
- innovatiiviset järjestelmät, esimerkiksi sähköisempi järjestelmäarkkitehtuuri, aktiivinen ja mukautuva ohjausjärjestelmä. (Kozek & Schirrer 2015, s. 6)

Konventionaalinen layout on kuitenkin kehittynyt toistaiseksi niin paljon viime vuosikymmeninä, että se on vähitellen saavuttamassa aerodynaamisen tehokkuuden asymptoottisen rajan, erityisesti lentokoneen rungon näkökulmasta. Jos nykyinen trendi tässä suhteessa jatkuu, Flightpath 2050 -tavoitteet on todennäköisesti mahdotonta saavuttaa. (Buttazzo & Frediani 2012, s. 386) Tästä syystä useat tahot ovat tutkineet täysin uusia lentokonekonfiguraatioita, joista yhtenä lupaavimmista nousee esiin sekoitettu siipirunko- eli BWB-lentokone.



### 3. LENTOKONEESEEN VAIKUTTAVA VASTUS

Vastuksen pienentäminen on ollut pääasiallinen kehityskohta jo pitkään. Aerodynaamisen vastuksen ennustaminen koetaan kuitenkin edelleen hankalana. Lentokoneen kema vastus voidaan jakaa parasitiivastukseksi, ottamatta huomioon nostovoimaa sekä indusoiduksi vastukseksi, joka johtuu nostovoimaa tuottavista kappaleista. Kuva 1 esittää, kuinka virtausilmiöillä, rungon muodolla ja dimensioilla on vaikutusta vastuksen eri komponentteihin. Kaavio kuvassa 1 on yleinen, koska se pätee mielivaltaisille suljetuille kappaleille, joita ympäröivät kokoon puristumattomat ja puristuvat virtaukset. (Torenbeek 2013, s. 81–84)



**Kuva 1.** Lentokoneen yleinen vastuskaavio (muokattu lähteestä Torenbeek 2013, s. 84)

Vastuskaavion yksinkertaisuus on osaltaan harhaanjohtava, koska monet vastuslähteet ovat peräisin perusmekanismien vuorovaikutuksista. Esimerkiksi viskoosiset vaikutukset saattavat vaikuttaa jättöpyörteen voimakkuuden tangentiaaliseen vaihteluun, kun taas kolmiulotteiset ei-viskoosiset virtaukset voivat myötävaikuttaa viskoosiseen vastukseen. (Torenbeek 2013, s. 81–84)

Vastus voidaan jakaa alkeellisimmillaan kahteen tapaan, joilla aerodynaaminen voima kohdistuu kohdistetulle pinnalle. Ilmanpaine kohdistaa jokaiselle pintaelementille normaalivoiman, kun taas kitka ilmapirran ja pinnan välillä aiheuttaa tangentiaalisen voiman.

Näiden voimien vektorisumma antaa tulokseksi aerodynaamisen voiman, joka voidaan jakaa nostovoimaksi ja vastusvoimaksi. Vastaavasti vastus jaetaan edelleen paine- sekä pintakitkavastukseksi. Tasaisella matkalentonopeudella lennettäessä paine- ja kitkavastus ovat usein samansuuruisia, kun taas painevastus hallitsee alhaisilla nopeuksilla. (Torenbeek 2013, s. 81–95)

Ilman viskoosisuus aiheuttaa rajakerroksen muodostumisen rungon pinnan ympärille, lukuun ottamatta pintoja, joita ympäröi täysin erottunut virtaus. Suurin osa viskoosista vastuksesta aiheutuu rajakerroksen leikkausjännityksen aiheuttamasta pintakitkasta. Viskoosi vastus on ainutlaatuinen kontekstissaan, sillä se on ainoa vastuksen lähde, jossa voimaa tuottava mekanismi vaikuttaa tangentiaalisesti ulkopinnalle. Tietyllä Reynolds-luvulle kitkavastus on lähes kokonaan riippuvainen rajakerroksen tilasta, onko se laminaari vai turbulenti. Rungon takana rajakerros irtoaa turbulentissa muodossa aiheuttaen liikemäärän vähenemisen. (Torenbeek 2013, s. 81–95)

Pyörrevastus syntyy, kun nostovoimaa tuottavan pinnan rajallinen kärkiväli saa alapinnan virtauksen liikkumaan ulospäin kärkeä kohti, kun taas yläpinnan virtaus liikkuu sisäänpäin kohti keskilinjaa. Tuloksena olevat poikkivirtausnopeudet takareunoissa yhdistyvät vapaan virtauksen kanssa, mikä johtaa pyörteisen virtauksen irtoamiseen, joka on erityisen voimakasta siivenkärkien lähetyvillä. Pyörteen voimakkuus jännevälillä pitkin on suoraan verrannollinen nostovoiman sivuttaiseen jakautumiseen. Takareunan pyörteet sisältävät pyörimisenergiaa, joka realisoituu lentokoneelle vastuksen muodossa. Koska pyörteen muodostuminen on väistämätön seuraus nostovoimasta, on pyörrevastus tunnettu täten myös osana indusoitua vastusta lentokoneelle. (Torenbeek 2013, s. 81–95)

Korkeilla aliaääninopeuksilla (yli Mach 0,7) virtauksen laajentumiset luovat ylääänivirtauksen taskuja, jotka sulautuvat aliaäänivirtaukseen, ja lentokone siirtyy niin sanotulle transonic-lentoalueelle. Jos tasku saavuttaa riittävän yläääninopeuden, se määrittellään shokkiaalloksi. Shokkiaallon myötä virtausominaisuudet (paine, nopeusvektori, tiheys ja lämpötila) muuttuvat äkillisesti ja kokonaispainehäviö seuraa. Tätä vastustyyppiä kutsutaan aaltovastukseksi. (Torenbeek 2013, s. 81–95)

Vaikuttaen nostovoimaa tuottaviin ja ei-nostovoimaa tuottaviin komponentteihin, parasiittivastus voidaan jakaa pinnan kitkavastukseksi ja painevastuksen termiksi, muotovastukseksi. Parasiittivastuksen suuruus riippuu vahvasti lentokoneen kostean pinta-alan suuruudesta. (Torenbeek 2013, s. 81–95)

Kuvassa 1 esiintyvä käsite kostea pinta-ala (engl. wetted area) esiintyy tutkielmassa useasti. Käsite tulee laivateollisuudesta, jossa se tarkoittaa pinta-alaa, joka on altistunut veden virtauksen aiheuttamille vastuksille. Samaa ideologiaa noudattaen kostea pinta-ala

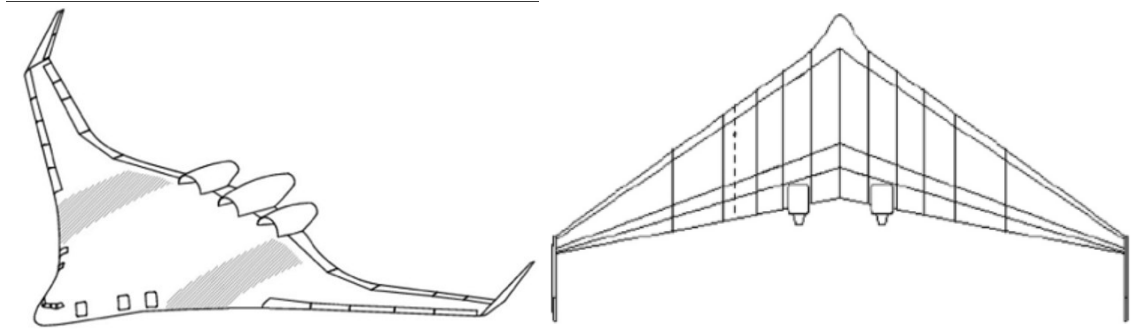
tarkoittaa ilmailussa lentokoneen pinta-alaa, joka on kohdistunut ilmavirtauksille. Jokaisen lentokoneen komponentin pintakitkavastus, joka on altistettu virtaukselle, on suhteellinen sen kosteaan pinta-alaan (Liebeck 2004). Koska kostean pinta-alan pienennys ei vähennä pelkästään lentokoneen painoa mutta myös vastusta, on sen pienennystavat pyörineet insinöörien mielessä jo pitkään (Liebeck 2004). Käytännöllisistä syistä konventionaaliselle TAW-rungolle ei kostean pinta-alan huomattava pienennys ole mahdollista, vaan todellisia muutoksia lentokoneen konfiguraatioon on tehtävä, kuten BWB (Liebeck 2004).

## 4. SEKOITETTU SIIPIRUNKO, BLENDED WING BODY

Perinteisillä lentokonekonfiguraatioilla voidaan saavuttaa luvussa 2 esitellyt tavoitteet vain inkrementaalisilla kevyiden rakenteiden ja moottoreiden kehitysaskelleilla. Kuitenkin perusteelliset muutokset lentokoneen konfiguraatiossa lupaa huomattavasti suurempia marginaaleja kehitykselle. Monet BWB-konseptit erottavat lentokoneen siiven ja rungon sekä vastaavasti rungon ja pyrstön toisistaan huomattavasti minimaalisemmin kuin perinteiset TAW-lentokoneet. Tämän seurauksena sen tilavuus on huomattavasti keskiteympi kuin vastaavan, tavanomaisen lentokoneen venytetty sylinterimäinen muoto. Tilavuuden keskittyneisyys on yksi ominaisuuksista, joka erottaa BWB-konseptit perinteisistä lentokoneista. Tämä ominaisuus on erityisen suotava, mikäli tarkoituksena on kuljettaa suuria ihmismääriä. Muutoinkin BWB-konseptit tarjoavat varsin houkuttelevia etuja verrattuna nykyisiin matkustajaliikenteen verrokkeihin, kuten esimerkiksi:

- suurempi sisäinen tilavuus
- aerodynamiikka ja rakenteellinen tehokkuus
- melun vähennys
- vähennetty hinta per matkustajakilometri. (Kozek & Schirrer 2015, s. 2)

BWB-konseptien uskotaan tarjoavan parempaa lentoaikaa, lentoetäisyyttä sekä kanto-kuormaa 27 % polttoainekulutuksen vähennyksen myötä, per matkustaja (Liebeck 2004). Nämä hyödyt ovat mahdollisia sekoittamalla keskenään yhdeksi kokonaisuudeksi nostovoimaa tuottava keskirunko siivillä, saavuttaakseen kompakti, aerodynaamiseksi tehokas lentävä siipirunko tarjoten rakenteen, aerodynamiikan ja hyötykuorman synergiaa (Martinez-Val et al. 2010). BWB-lentokone kuitenkin eroaa traditionaalisesta lentävästä siivestä (engl. Flying Wing, FW) sillä, että lentävässä siivessä on suorat johto- ja takareunat ilman varsinaista keskirunkoa, kuten kuvasta 2 nähdään.



**Kuva 2.** Konseptuaalinen ero BWB- (vas.) ja FW-lentokoneen (oik.) välillä (lähteestä *Martinez-Val et al. 2010*)

BWB-konseptien aerodynamiikan on arvioitu omaavan noin 15–20 % paremman nostovoiman ja vastuksen suhteen (eng. Lift-to-Drag ratio, L/D) pienentyneen vastuksen vuoksi, joka johtuu 33 % pienemmästä kosteasta pinta-alasta verrattuna perinteiseen TAW-lentokoneeseen. Tämän lopullinen hyöty liikenteeseen on noin 12 %:n lasku tyhjöpainoon ja alhaisemmat melutasot. (Liebeck 2004)

## 5. SEKOITETUN SIIPIRUNGON TEKNINEN POTENTIAALI JA HAASTEET

Varsin houkuttelevista hyödyistä huolimatta BWB ei ole monien kohtaamiensa haasteiden myötä päässyt valloittamaan matkustajalentokone markkinoita. BWB:n kohtaamia haasteita ovat muun muassa stabiiliuden ja lennonhallinnan puutteet, matkustamon painistus, propulsio integroinnin ongelmat runkoon ja ongelmat saavuttaa optimaalinen konfiguraatio ristiriidassa keskenään olevien suunnitteluparametrien kesken.

### 5.1 BWB-lentokoneen aerodynamiikka

BWB:n aerodynaamiset edut johtuvat sen rungon ja siipien integroinnista matalan kostean pinta-alan ja tilavuuden suhteen sekä pienemmän vuorovaikutuksesta indusoidun vastuksen vuoksi. Tämä alentaa kokonaisvastusta ja tarjoaa paremman L/D-suhteen verrattuna perinteiseen TAW-konfiguraatioon (Qin et al. 2004). BWB-rungolla on kuitenkin alhainen sivusuhte (engl. aspect ratio), joka johtaa indusoidun vastuksen nopeaan kasvuun, mikä tuottaa alhaisen optimaalisen nostovoimakertoimen (Kozek & Schirrer 2015). Kozek ja Schirrer (2015) vertasivat BWB:n L/D-suhdetta ja optimaalista nostovoimakertoimista tavanomaiseen TAW-lentokoneeseen. Tutkimus osoitti 470 matkustajan BWB-lentokoneen omaavan L/D-suhteen 24,2 sekä optimaalisen nostovoimakertoimen 0,25. Puolestaan 464 matkustajan TAW-lentokoneella vastaavat luvut olivat 21,7 ja 0,47 (Kozek & Schirrer 2015). Tavanomaiselle lentokoneelle saatu korkeampi optimikerroin johtuu sen korkeasta sivusuhteesta, mikä vähentää indusoidun vastusta BWB-konfiguraatioon verrattuna (Kozek & Schirrer 2015).

Liebeck (2004) vertasi pienemmän kostean pinta-alan vaikutusta nostovoimakertoimeen 800 matkustajan BWB:n ja saman matkustajakapasiteetin TAW:n välillä. Tätä ilmiötä tutkittiin muuntamalla 650 m<sup>2</sup>:n pallo sylinteriseksi nostovoimaa tuottavaksi kappaleeksi ja mitoittamalla kappale sisältämään 800 matkustajaa. Myöhemmin siiven, pyrstön ja moottorien integroinnin jälkeen Liebeck (2004) osoitti, että neljällä siiven alaisella moottorilla varustetun TAW-lentokoneen kostea pinta-ala on 4 100 m<sup>2</sup>, kun taas takareunaan BLI-moottoreilla (rajakerrosvirtausmoottori, engl. Boundary Layer Ingestion Engine) varustetun BWB-koneen kostea pinta-ala on vain 2 800 m<sup>2</sup>. 33 % pienempi kostea pinta-ala alentaa BWB:n parasiittivastusta edelleen kasvattaen sen L/D-suhtetta 10-15 %:lla verrattuna konventionaaliseen TAW-lentokoneeseen. Tätä tulosta tukevat myös University Of Oklahoman (2007) tekemä tutkimus. University Of Oklahoma (2007) tutki 800 mat-

kustajan BWB-lentokoneen aerodynaamisia ominaisuuksia vertaamalla tuloksia sen tavanomaiseen vastinelentokoneeseen Mach 0,82:n olosuhteissa. BWB-konfiguraatio antoi  $ML/D$  ( $L/D$  suhteessa Mach-lukuun) -arvon 17,6 verrattuna TAW:n arvoon 15,6 (University Of Oklahoma 2007). Huolellinen aerodynaaminen muotoilu vaaditaan kuitenkin BWB-konfiguraatiolta, jotta aerodynaamiset parannukset ovat mahdollisia sekä stabiiliuden vaatimukset täyttyvät (Hileman et al. 2010).

BWB-konfiguraatio tuottaa lähes täydellisen elliptisen siipivälisuuntaisen nostovoimajakauman yhdistämällä keskirungon ulompiin ylikriittisiin kantopintoihin tuoden kaltevuustrimmaamiseen vakautta (Liebeck 2004). Ylikriittiset kantopinnat siirtävät siipien kuorman lentokoneen massakeskipisteen taakse, vastavaikuttaen nostovoiman keskipisteen sijainnin vaikutuksiin, joka on keskirungon etuosassa (Hileman et al. 2010). Siitä huolimatta siipien kuormitus aiheuttaa huomattavan iskuaallon, mikä heikentää BWB:n aerodynaamista tehokkuutta (Liebeck 2004). Lisäksi ulomman siiven kuormitus lisää taivutusmomenttia ja siten myös vaadittua rakenteellista painoa (Liebeck 2004).

BWB:n nähdään omaavan suhteellisen huonot lentoonlähtöominaisuudet sen alemman enimmäisnostovoimakertoimen myötä, joka johtuu korkean nostovoiman komponenttien puutteesta tai rajoitetusta määrästä (Siouris & Qin 2007). Etu- ja takareunasiivekkeet voisivat olla vaihtoehtona parantamaan alhaisen nopeuden enimmäisnostovoimakertoimaa ja tarjoamaan haluttu kohtauskulma BWB:lle (Siouris & Qin 2007; Hileman et al. 2010). Sakkauksesta toipuminen voi kuitenkin olla hankalaa kyseisten laitteiden hystereeriominaisuuksien myötä (Siouris & Qin, 2007; Hileman et al. 2010). Tästä syystä Liebeck (2004) kannattaa ulkonevien etureunasiivekkeiden käyttöä alhaisten nopeuksien sakkauksen välttämiseen. Ulkonevaa etureunaa ehdotetaan auttamaan myös melun vähentämisessä (Hileman et al. 2010).

Torenbeekin (2013) kokoama taulukko 2 vertailee BWB:n ja TAW:n geometristä dataa sekä aerodynaamista tehokkuutta muutamalla tunnusluvulla, kuten kokonaishyötytilavuudella  $Q_{tot}$ , kostealla pinta-alalla  $S_{wet}$ , nostovoiman ja vastuksen suhteella  $L/D$  kyseisissä olosuhteissa sekä sen maksimilla  $(L/D)_{max}$ . BWB:n kostea pinta-ala on 21 % pienempi kuin tutulla TAW-mallilla. BWB-lentokoneella on huomattavasti korkeampi aerodynaaminen tehokkuus ja se saavuttaa 93,5 % tästä arvosta matkatessaan samalla korkeudella ja nopeudella kuin TAW-lentokone. Kun operationaalista matkalentokorkeutta nostetaan, on BWB-konfiguraatiolla potentiaalia saavuttaa jopa 24 % parannus  $L/D$ -suhteessa TAW-konfiguraatioon verrattuna. (Torenbeek 2013, s. 145–146)

**Taulukko 2.** Geometrian ja aerodynaamisen tehokkuuden vertailu TAW:n ja BWB:n välillä, olosuhteissa Mach 0,85 @ 35 000 ft (muokattu lähteestä Torenbeek 2013, s. 145-146)

Malli	$Q_{tot}$ [ $m^3$ ]	$S_{wet}$ [ $m^2$ ]	$(L/D)_{max}$	$L/D$
Tube And Wing (TAW)	3 262	3 852	20,6	19,7
Blended Wing Body (BWB)	3 319	3 040	26,1	24,4

Tällä hetkellä trendi matkustajalentokoneiden osalta osoittaa lentokonevalmistajien, kuten Boeingin, olevan erityisen kiinnostunut nimenomaan korkean sivusuhteen lentokoneista alhaisemman indusoidun vastuksen vuoksi, mistä esimerkkinä on juuri Boeingin esittelemä Truss-Braced Wing -konsepti (Kretov & Tiniakov 2022). BWB:n ollessa päinvastaisesti matalan sivusuhteen lentokone, on vaikea nähdä, miten molempia konsepteja puskettaisiin samanaikaisesti matkustajalentoliikenteeseen.

## 5.2 BWB-lentokoneen lennonhallinta ja stabiilius

BWB:n pyrstötön luonne tekee siitä paremmin soveltuvan vallankumouksellisten ohjauskonseptien, kuten vektoroidun työntövoiman ja aktiivisen lennonohjausjärjestelmän hyödyntämiseen. BWB:n vahva kytkentä inertiaivoimien, aerodynaamisten kuormien, elastisten muodonmuutosten ja lennonohjausjärjestelmän vasteiden välillä vaikuttaa sen suorituskykyyn ja stabiiliuteen. Moottorien sijoittaminen lentokoneen yläpinnalle takareunan lähelle keskittää työntövoiman akselin lähemmäs painopistettä, mikä vähentää alapäin suuntautuvaa kallistusmomenttia ja yksittäisen moottorin vikaantumisesta johtuvaa momenttia pystyakselin ympäri. Tämä lievittää BWB:n trimmausongelmia pienempien ohjauspintojen ja työntövoimatarpeiden myötä. (Martinez-Val et al. 2010)

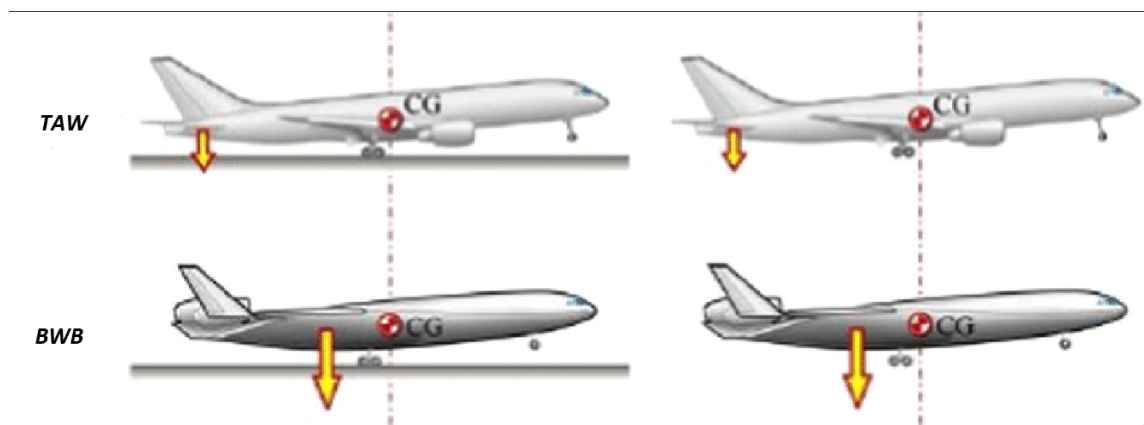
Takareunasiivekkeitä ei varsinaisesti käytetä BWB:ssä nostovoimaa lisäävinä siivekeinä, johtuen sen pyrstön puutteesta, joka vähentää nousukulmamomenttia (Liebeck 2004; Rahman & Whidborne 2010). Näin ollen BWB:n suurin nostovoimakerroin on pienempi kuin tavanomaisen TAW-konfiguraation. Tämä vähentää siipien kuormitusta, mikä johtaa suurempaan siiven pinta-alaan ja siten parempaan nostovoiman jakaumaan (Liebeck 2004; Martinez-Val et al. 2010).

Matalampi siipien kuormitus vähentää lentoonlähtö- ja laskunopeuksia lyhentäen vaadittuja lentokenttäpituuksia. Lisäksi se mahdollistaa erinomaisen noususuorituskyvyn li-



sääntyneen nousunopeuden (engl. climb rate) ansiosta. Myöhemmin tämä vielä vähentää tarvittua ilmanopeutta tuottamaan lisänostovoima lentokorkeuden lisäämiseksi. Matala siipikuormitus myös parantaa BWB:n jatkuvan kääntymisen suoritusta, koska se mahdollistaa sen tuottavan enemmän nostovoimaa tietyllä työntövoimalla verrattuna TAW-lentokoneeseen. BWB kuitenkin saavuttaa enimmäisnostovoiman suhteellisesti korkeammalla kohtauskulmalla kuin perinteinen lentokone. Korkea kohtauskulma yhdistettynä suurempaan siiven pinta-alaan lisää BWB:n herkkyyttä puuskasta johtuviin kuormituksiin. Tämä lisää edelleen paikallisen kohtauskulman läheisyyttä sakkausolosuhteisiin, mikä vähentää ohjauspintojen tehokkuutta. (Rahman & Whidborne 2010; Roysdon & Khalid 2010)

BWB:llä on matala nousukulma- ja kääntymisauktoriteetti lyhyiden momenttivarsiensa myötä, kuten kuvassa 3 havainnollistetaan (Liebeck, 2004; 26th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences Icas 2009). Siksi useita nopeasti liikkuvia ohjauspintoja tarvitaan riittävän ohjauksen aikaansaamiseksi pituus- ja sivuttaissuunnassa (Liebeck, 2004; Hileman et al., 2010). Korkeusohjainpinnan (engl. elevon) negatiivinen kohtauskulma kuitenkin luo huomattavaa nostovoimahäviötä, joka aiheuttaa BWB:n vajoamisen ennen sen asettumistaan haluttuun kohtauskulmaan (Staelens et al. 2007). Tämä heikentää lentoradan hallintaa erityisesti lentoonlähdon ja laskeutumisen tilanteissa. Lisäksi tarvitaan erityistä tehoa suurten monitoimisten ohjauspintojen ohjaamiseen suurilla momenteilla (Staelens et al. 2007). Nämä BWB:n ominaisuudet lisäävät lateraalisen ja pitkittäisen stabiiliuden saavuttamisen haastetta.

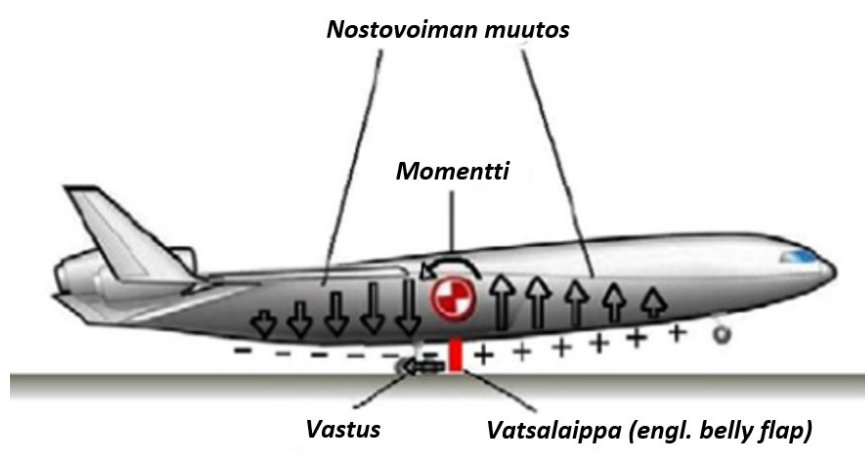


**Kuva 3.** Momenttivarsiensa ja nousukulman kontrollien vertailu tavanomaisen TAW- ja BWB-lentokoneen välillä (muokattu lähteestä Staelens et al. 2007)

Useita konsepteja on ehdotettu parantamaan BWB:n stabiiliutta ja hallintaa. Näitä ovat muun muassa työntövoiman vektorointi, keskirungon aerodynaaminen muotoilu yhdistettynä kehittyneeseen kokonaisrungon muotoiluun sekä älykäs korkeusohjainpintojen ja

vatsalaippojen (engl. belly flaps) yhdistelmät. Työntövoiman vektorointi tuottaa saman nousumomentin kuin korkeusohjainpinnan  $10^\circ$  poikkeuttaminen (Martinez-Val et al. 2010). On kuitenkin muistettava, että työntövoiman vektorointi lisää konseptiin painoa ja monimutkaisuutta, sekä vähentää aksiaalista nettotyöntövoimaa (Hileman et al. 2010). Liebeck (2004) muistuttaa vielä työntövoiman vektoroinnin vaikutuksesta ominaiskuluksen lisääntymiseen. Liebeck (2004) kannattaakin korkeusohjainpintojen käyttöä ensisijaisena nousun ja kallistuksen säätölaitteistona, kun taas Hileman et al. (2010) ehdottavat juuri työntövoiman vektoroinnin käyttöä lentoonlähden climb-out-vaiheessa ja korkeusohjainpintojen ja työntövoiman vektoroinnin yhdistelmää lentoonlähden rotation-vaiheessa.

Työntövoiman vektorointia suositellaan lentoonlähden climb-out -vaiheeseen, sillä se parantaa noususuorituskykyä ja minimoi L/D-häviön korkeusohjainpinnan poikkeuman puutteen myötä (Hileman et al. 2010). Toinen ohjauslaite, jota voitaisiin käyttää nousukulmaohjaukseen, on vatsalaipat. Staelens et al. (2007) tutkivat vatsalaippojen vaikutusta BWB:n nostovoimakertoimeen ja nousukulmamomenttiin. Tutkimus osoittaa, että vatsalaipat lähellä BWB:n painopistettä lisää staattista painetta painopisteen etupuolella ja vähentää sitä perässä, jolloin syntyy nousumomentti, joka auttaa BWB:tä lentoonlähden rotation- ja laskeutumisen flare-vaiheissa (Staelens et al. 2007). Staelens et al. (2007) havaitsivat, että vatsalaippa  $90^\circ$ :n asennossa kasvattaa lentoonlähden nostovoimakertoimaa 35 % sekä nousukulmamomenttia 10 %, jolloin vastusvoimat kasvoivat vain noin 10 %. Luodun nousukulmamomentin trimmaaminen nähdään kuitenkin suurena ongelmana tälle järjestelmälle. Vatsalaippojen vaikutuksia BWB:lle on havainnollistettu kuvassa 4.



**Kuva 4.** BWB:hen integroitujen vatsalaippojen generoimat painekentät (muokattu lähteestä Staelens et al. 2007)

BWB-lentokone on altis korkeille kääntymisnopeuksille ja autorotaatioefekteille. Tämä edellyttää tehokkaita keinoja tarjota riittävästi kääntymiskontrollia ja stabiiliutta ilman varsinaista pyrstöä. Wildscheck et al. (2014) osoittivat, että yksinkertaiset winglet-ohjainpinnat eivät ole riittäviä kääntymisliikkeen ohjaamiseen erityisesti engine-out tilanteissa rajallisen korkeutensa ja wingletien kokonaispinta-alan vuoksi. Siten he suosittelivat niin sanottujen krokotiililaippojen käyttöä tehokkaana käännöksen stabiloijana. (Wildscheck et al. 2014) Tämän näkemyksen jakaa myös osittain Liebeck (2004), joka ehdottaa winglet-peräsien käyttöä primääriohjainpintoina kääntymisstabiiliuden ylläpitämiseksi, kun taas ulkonevat korkeusohjainpinnat (engl. elevons) ovat käytössä matalan nopeuden engine-out olosuhteissa.

BWB:n pitkittäinen ja poikittainen dynamiikka on yhteydessä keskenään, aiheuttaen taipumuksen juuttua suunta-kallistusheilauksen tilaan. Korkea sivuluisukulma luo nousukulmamomentin, joka hajaantuu suunta-kallistusheilaukseksi, luoden epästabiilin parin BWB-lentokoneelle. Lisäksi sen on vaikea saavuttaa käännöskoordinaatiota sivuluisukulman nopean kasvun myötä. Nämä ominaisuudet siis vaativat joko lentäjältä huomattavia lisäponnisteluja tai tietokoneilta uudenlaisia kykyjä hallita lentokonetta. (AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference 2011)

Suunta-kallistusheilauksen hallinta on vaikeaa BWB:n pitkistä värähtelyperiodista ja riittämättömästä vaimennuksesta johtuen. Pitkä värähtelyperiodi ja riittämätön vaimennus johtuu BWB:n lyhyistä momenttivarsista ja suuresta hitausmomentista, jotka johtavat redusoituihin kääntymisen vaimennusominaisuuksiin ja vähentyneeseen stabiiliuteen. (AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference 2011)

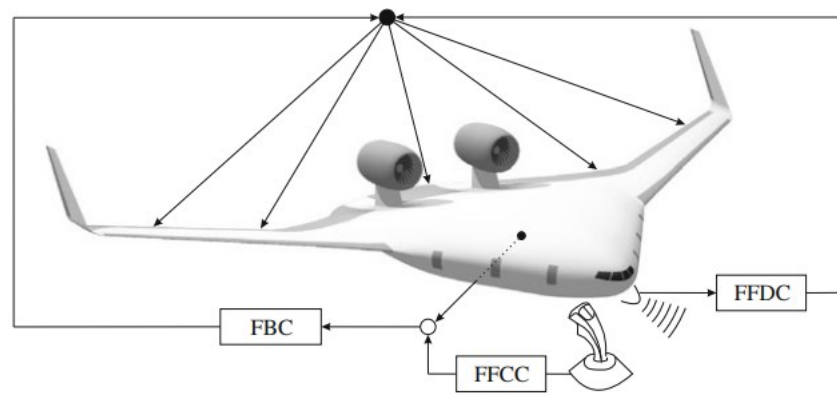
BWB on myös altis ohjaajan indusoimiin oskillaatioihin (engl. Pilot Induced Oscillations, PIO) johtuen hitaasta vasteesta ohjausinputeihin, mikä saa ohjaajan pahentamaan suunta-kallistusheilautta samalla, kun ohjaaja yrittää kompensoida sivuluisukulmaa. Hitaat vasteet ohjausinputeihin johtuu suurista ohjainpinnoista ja niihin ominaisista hitausmomenteista. BWB:n suunta-kallistusheilauksen ominaisuuksia ja ohjauksen laatua voidaan parantaa aktiivisen ohjausjärjestelmän (engl. Active Flight Control System, Active FCS) käytön myötä. (AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference 2011; Kozek & Schirrer 2015, s. 18–21)

On tärkeää huomata, ettei aktiivista FCS:ää voida yksinkertaisesti lisätä olemassa oleviin lentokonekonfiguraatioihin, vaan sen sijaan tarvitaan integroitu lähestymistapa: Koko silmukka antureineen, koneen tietokoneineen, ohjaajan ohjaimin, sähkömekaanisin tai sähköhydraulisin toimilaittein ja aerodynaamisien kontrollein tulee olla optimoitu lentokoneen aeroelastisen rakenteen kanssa. Aktiivisen FCS:n hyödyllinen ja syvä integrointi

tulee siksi ottaa huomioon jo lentokoneen suunnittelun alkuvaiheessa. (Kozek & Schirrer 2015, s. 18–21)

Yleinen ohjauskaavio on esitetty kuvassa 5, jossa yleinen aktiivisen ohjauksen malli on jaettu kolmeen osaan:

- Takaisinkytketty ohjaus (engl. Feedback Control FBC), jossa relevanttia mekaanista dataa ja mittauksia, jotka reflektivat lentokoneen aeroelastista käyttäytymistä käytetään parantamaan ja yhtenäistämään sen lentodynamiikkaa suhteessa ohjaajan tarpeisiin lennon aikana ja vähentämään mittaamattomien häiriöiden vaikutusta.
- Myötäkytketty ohjaus (engl. Feed-forward command control FFCC), jossa haluttu ohjaajan input muunnetaan ohjauspintojen komennoiksi optimoidulla tavalla suhteessa lentokoneen käsittelyominaisuuksiin ja pienempiin ohjauksen aiheuttamiin rakenteellisiin kuormituksiin.
- Myötäkytketty häiriöohjaus (engl. Feed-forward disturbance control FFDC), jossa ennakkotietoa häiriöistä riittävien mittausten aikaansaamana käytetään ohjaamaan ohjauspintoja jo varhaisessa vaiheessa, jälleen optimoidulla tavalla vähentämään häiriön aiheuttamia rakenteellisia kuormituksia, tärinää ja mukavuutta. (Kozek & Schirrer 2015, s. 18–21; Mohr et al. 2012)



**Kuva 5.** BWB-konfiguraatio ja kaavio aktiivisesta ohjauskonseptista (lähteestä Kozek & Schirrer 2015, s. 21)

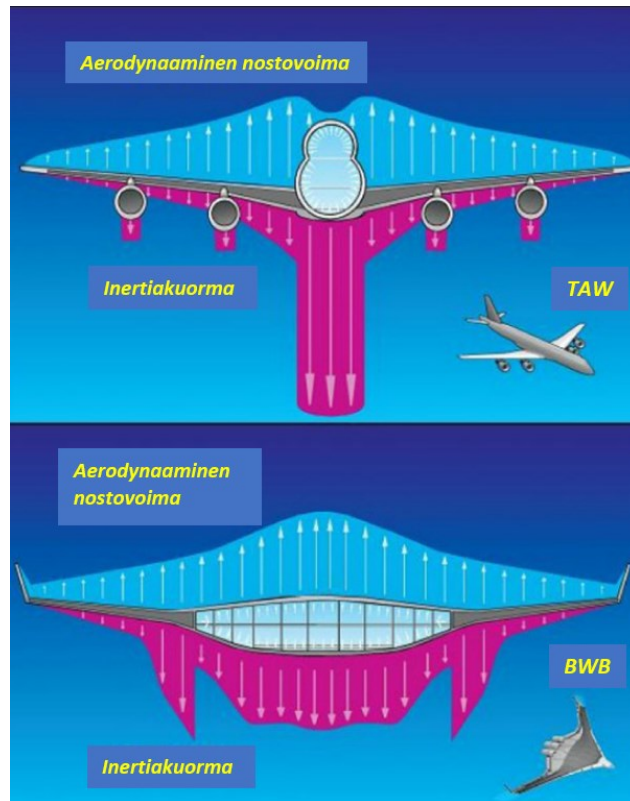
Ehlers sekä muut tutkijat suorittivat lennon aikaista simulaatiota BWB:n aktiivisen ohjausjärjestelmän käytöstä. Simulaation mukaan aktiivinen FCS lisää suunta-kallistusheilauksen vaimennusta ja ominaistaajuutta, parantaen siten kääntymisominaisuuksia ja lentokoneen käsittelyn laatua. Aktiivinen FCS ei kuitenkaan estä suuria sivuluisukulmia

käännöksen alkaessa eikä käännöksen hidasta vastetta, joka johtuu suurista hitausmomenteista suhteessa lentokoneen keskiviivaan. Tästä syystä BWB:lle nousee tarve dynaamiselle ohjainpintojen allokoinnille, tukeakseen ohjaus- ja stabiiliusjärjestelmän toimintaa. (*AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference 2011*)

Yksi aktiivisen FCS:n tärkeimmistä ominaisuuksista on vääntömomentin vähentäminen siiven tyven tuntumassa tasaisten ja epätasaisten liikkeiden aikana. Tämä vähennys voidaan hyödyntää sen sallien kevyempiä rakenteita ja sitä kautta saaden hyötyjä kuten hyötykuorman kasvu, pidempi rakenteellinen elinkaari ja korkeampi polttoainetehokkuus. On kuitenkin huomattava, että sertifiointivaatimukset matkustajalentoliikenteen puolella asettavat merkittävän haasteen aktiivisille FCS:lle. Kokonaiskustannukset, sisältäen suunnittelun kustannukset sekä epäsuorat ja suorat käyttökustannukset, voivat nousta siihen pisteeseen, jossa systeemin hyödyntämisestä tulee ekonomisesti vastenmielistä. (Kozek & Schirrer, 2015) Tämän lisäksi tulee ottaa myös huomioon lentävien matkustajien mielipiteet ja asenteet aktiiviseen lennonohjausjärjestelmään, joka on lähivuosina ollut suuressa roolissa esimerkiksi Boeing 737-Max turmissa (Palmer 2020).

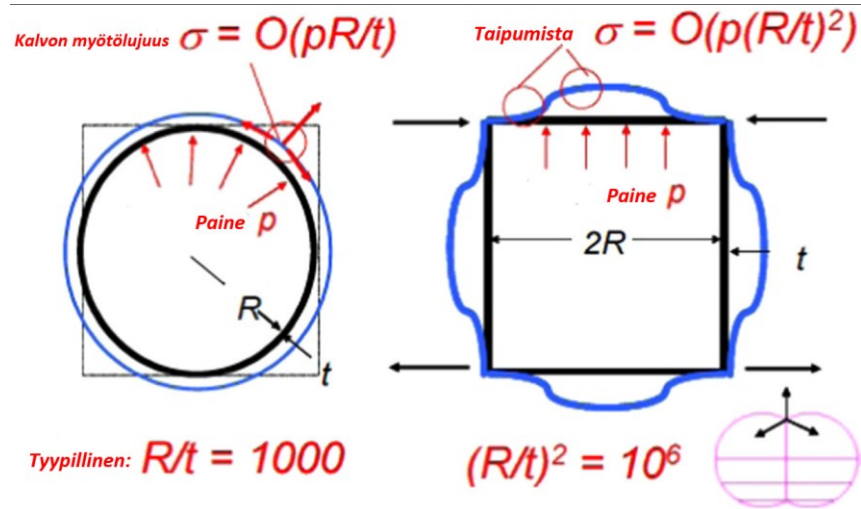
### **5.3 BWB-lentokoneen rakenteet**

BWB tarjoaa tehokasta hyötykuorman jakaumaa ja sallii moottorien sijoittamisen siiven päälle. Lisäksi BWB:n keskirunko tuottaa nostovoimaa alhaisen sivusuhteensa myötä, mikä vähentää siipien kuormitusta. Nämä ominaisuudet minimoivat siipien taivutusmomenttia ja leikkausvoimaa, mikä luo suotuisan inertian, katso kuva 6, ja siten pienemmän rakenteellisen painon. Lisäksi integroimalla keskirunko ja ulkosiivet, saadaan pienempi kostea pinta-ala. Tämä tarkoittaa suurempaa sivusuhdetta ja siten rakenteellisesti tehokkaampaa siipeä.



**Kuva 6.** Aerodynaamisen ja inertiakuormituksen jakauman vertailu tavanomaisen TAW-lentokoneen ja BWB:n välillä (muokattu lähteestä Liebeck 2004)

BWB:n keskirungon laatikkomainen rakenne asettaa sen rakenteelliselle suunnittelulle merkittävän haasteen. Matkustajien sijoituessa keskirungon sisään, siihen kohdistuu sekä painetta että siipivälisuuntaista taivutusmomenttia (26th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences Icas 2009). Paineen ja taivutuskuormien yhdistelmä luo erittäin suuria epälineaarisia jännityksiä, kuten kuvassa 7 on esitetty. Epälineaarinen jännitys syntyy, koska BWB vastustaa painekuormia taipumalla, toisin kuin tasainen taipuminen tai kehäjännitys, joka esiintyy tavanomaisissa TAW-lentokoneissa käytetyissä sylinterimäisissä painerungoissa. Äärimmäisissä liikkeissä tai puuskissa nämä epälineaariset jännitykset aiheuttavat huomattavia muodonmuutoksia ja lisääntyneitä jännitystasoja, joita on vaikea ennustaa. (26th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences Icas 2009; Martinez-Val et al. 2010)



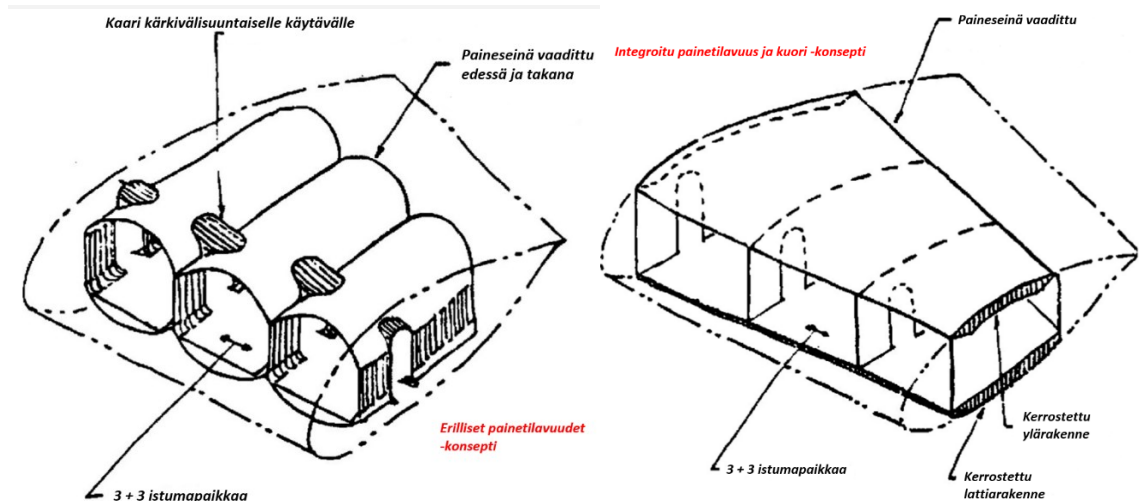
**Kuva 7.** Suuret taivutusjännitykset, jotka johtuvat paineen vaikutuksesta BWB:n laatikkomaiseen sisärakenteeseen (muokattu lähteestä Zhang & Wang 2011)

Useita rakenteellisia konsepteja on ehdotettu hallitsemaan BWB:n rungon suuria epälineaarisia jännityksiä. Näiden konseptien joukossa on erillinen painekuori, joka tunnetaan myös nimellä kaksoiskalvo, mutta myös integroitu ulko- ja sisäkuori, jota kutsutaan joskus paksuksi litteäksi kerroskuoreksi (Liebeck 2004).

Kuvassa 8 vasemmalla esitetty painekuorikonsepti koostuu ohuesta kaarevasta painetilavuudesta jokaisen matkustamokappaleen ylä- ja alapuolella. Sisäpinta kantaa painekuorman jännityksessä, matkustamon seinät tukevat matkustamon yläpuolella olevaa painoa samalla kun ulkopaneeli ottaa vastaan BWB-lentokoneeseen vaikuttavien aerodynaamisten kuormien aiheuttamia taivutuskuormia ja leikkausvoimia. Erillisten painetilavuuksien käyttö mahdollistaa laminaarivirtauksen saumattoman ohjauksen, siten vähentäen ulkopinnan kitkavastusta. Lisäksi erillinen painekuori estää väsymishalkeamien leviämisen ja lisää paisumisjäykkyyttä. Erotellut painetilavuudet takaavat myös kevyemmän rakenteen tehokkaalla kuorman diffuusiolla ja fail-safe ominaisuuksilla. (Martinez-Val et al. 2010)

Erillisen painekuoren suurin vika on, että se vaatii ulkokuoren mitoittamista kestäämään painekuormitusta tilanteessa, jossa sisäinen kalvo repeytyy, mikä johtaa ylimääräiseen rakenteelliseen painoon (Liebeck, 2004). Martinez-Val et al. (2010) kuitenkin väittävät, ettei ulkokuori olisi ylimitoitettu, jos sisäkuori on sopivan kokoinen, koska repeämisen aiheuttama painehäviö olisi silloin minimaalinen. Siitä huolimatta Liebeck (2004) ehdottaa kaksoiskalvokonseptin syrjäytystä ja ehdottaa integroidun konseptin ulkoisen pinnan vahvistamista sen selviytyäkseen painekuormituksista, mikä vähentäisi murtumishuolia.

NASA:n konsepti (Larrimer 2020) vastaa pitkälti Liebeckin (2004) matkustamokonseptia, joka esitellään kuvassa 8 oikealla. Liebeckin (2004) integroidussa rakenteessa paine- ja vääntömomenttikuormat hallitaan kerroskuorimatkustamon ylä- ja alaosissa. Integroitu konsepti on vankka, eikä vaadi ylimääräisiä suunnitteluparametreja murtuman sattuessa (Liebeck, 2004; Larrimer, 2020). Se on kuitenkin altis epälineaarisille jännityksille paine- ja taivutuskuormista. Tämä lisää rakenteellista painoa ja lisää huoltovaatimuksia. (Martinez-Val et al. 2010)



**Kuva 8.** BWB:lle ehdotettujen matkustamokonseptien vertailu (muokattu lähteestä Liebeck 2004)

Toistuva paineistus ja paineenalenemat voivat johtaa rakenteelliseen väsymiseen (Liebeck, 2004). Liebeck (2004) suosittaleekin tämän pohjalta komposiittien käyttöä keskirungon rakenteessa, johtuen sen vastustuskyvystä väsymistä kohtaan sekä alemmasta rakenteellisesta painosta. Komposiitit ovatkin jo valloittaneet matkustajalentokoneemarkkinoita, joten komposiitit tuntuvat lähes itsestään selvyydeltä BWB-lentokoneelle.

## 5.4 Propulsion integrointi sekoitettuun siipirunkoon

BWB-lentokoneen moottorit on useissa konsepteissa sijoitettu rungon päälle, keskirungon perälle. Tämä konfiguraatio auttaa hyötykuorman, laitteiden ja muiden systeemien vastapainottamisessa parantaen lentokoneen tasapainoisuutta. Rungon päälle sijoitetut moottorit mahdollistavat suuremman ohivirtaussuhteen moottorien implementoinnin, sillä riskiä maavararajoitusten alittamisesta ei ole. Moottorien sijoittaminen rungon päälle hyödyntää lisäksi niin sanottua coanda-ilmiötä lisätäkseen nostovoimaa ja parempaa lyhyen kiitotien lentoonlähden ja laskun suorituskykyä. Rungonpäällinen sijoitus myös vä-



hentää riskiä vieraan esineen aiheuttamista vaurioista (FOD), moottorien ollessa kauempana maasta. Tämä konfiguraatio kuitenkin häiritsee nostovoiman jakaumaa tuottaen heikompaa matkalentoaerodynamiikkaa. Häirintä voidaan kuitenkin minimoida huolellisen keskirungon suunnittelun myötä, jossa rungon rakenne on synergiassa propulsiojärjestelmän kanssa. (Hall & Crichton 2006)

Moottorien sijoittaminen keskirungon takaosaan siirtää koneen painopistettä taaksepäin, lähemmäs nostovoimakeskustaa, joka vähentää vaadittua trimmausta (Hall & Crichton 2006). Moottorien sijainti keskirungon perässä parantaa myös laminaarivirtausta, mikä vähentää pinnan kitkavastusta (Hall & Crichton, 2006). BLI-moottorikonfiguraatio, jonka yksi konsepti on esitelty kuvassa 9, on myös tehokkaampi takaosaan sijoitettuna, sillä rajakerros on suurella varmuudella täysin kehittynyt keskirungon takaosassa (Hileman et al., 2010). Takaosaan sijoitettu propulsio lisää myös mahdollisten moottorivaihtoehtojen kirjoa (Liebeck, 2004). Moottorit voisivat olla pyloneissa, irrallaan rungosta, tai rungon kanssa linjassa, niin sanotussa upotetussa ohjatun rajakerroksen (engl. Boundary Layer Diverter BLD) konfiguraatiossa BLI-moottoreina. Pylonoitu moottorien sijoittelu tuottaa kuitenkin epäsuotavan nokka-alas-momentin, sekä se lisää painoa ja kosteaa pinta-alaa, kasvattaen BWB:n kokemaa vastusta (Liebeck, 2004).



**Kuva 9.** NASA:n BWB-konsepti, jossa kolme takareunaan upotettua BLI-moottoria (lähteestä (Leifsson et al. 2013))

Upotettu propulsiojärjestelmä aiheuttaa päänvaivaa suunnittelijoille, sillä virtauksen ohjaamisen tulee varmistaa tulovirtauksen tasaisuus kaikissa suunnissa moottoreille. Tämä on haasteellista, sillä rajakerroksen virtausnopeus on lähes väistämättä pienempi, kuin häiriöttömän virtauksen sen yläpuolella (Leifsson et al. 2013). Mikäli tulovirtaus ei ole

tasaista, aiheuttaa se moottoreille huomattavaa rasitusta ja ahtimen räjähdysmäinen rikkoutuminen voi seurata (Leifsson et al. 2013). Tulee myös muistaa, että vaikka erilaisia ratkaisuja tulovirtauksen ohjaamiseen on esitetty, tuo tulovirtauksen ohjaus poikkeuksetta lisävastusta järjestelmään, mikä syö upotetun järjestelmän etuja edelleen suhteessa pylonoituun järjestelmään. Eri lähteissä esiintyvät BWB-konseptit koostuvat lähes yhtä paljon upotetuista kuin pylonoiduista propulsiojärjestelmistä, joten selkeyttä toisen paremmuudesta operationaalisesti ei löydy.

## 6. SEKOITETTU SIIPIRUNKO -KONSEPTIEN POTENTIAALI MATKUSTAJALENTOLIIKENTEESSÄ

BWB-lentokonekonseptit ovat perinteisiä lentokonekonfiguraatioita polttoainetehokkaampia ja ympäristöystävällisempiä. BWB-lentokoneen turvallisuus ja markkinointi- sekä tuotantopotentiaali herättävät kuitenkin aiemmin käsiteltyjen lennonhallinta- ja painekestävyysaasteiden lisäksi kysymyksiä konseptien mahdollisuuksista menestyä matkustajalentoliikennemarkkinoilla.

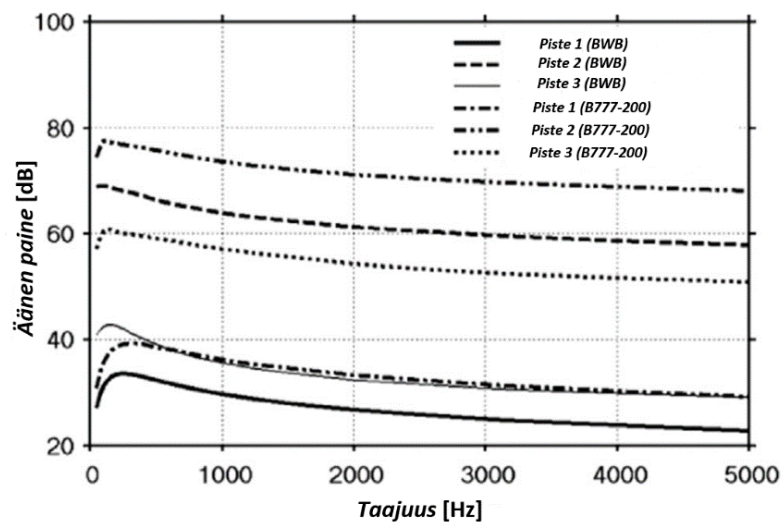
### 6.1 BWB-lentokoneen turvallisuus ja ympäristöystävällisyys

BWB on erittäin korkeasti integroitu lentokone. Turvallisuutta on kohotettu varmistamalla, että sisätiloihin sijoitetut esineet ja kappaleet eivät aiheuta mahdollisia vaaroja matkustajille. Moottorien sijoittaminen takareunan läheisyyteen painetilavuuksien taakse minimoi matkustajien loukkaantumisriskiä moottorivian sattuessa, sillä painetilavuus auttaa pitämään moottorin sirpaleet poissa matkustamosta. Myös rahtitilat sijaitsevat polttoainesäiliöiden ja matkustamon välissä, joissain konfiguraatioissa, joka suojaa matkustamoa rajuilta palopurkauksilta. Verrattuna tavanomaisiin TAW-runkoihin, BWB:n keskirungossa sijaitseva painetilavuus on huomattavasti vahvempi. Matkustamorakenne on vahvistettu kestäväksi sekä painetta että siipien tuottamaa taivutuskuormaa, mikä parantaa törmäysturvallisuutta. (Liebeck 2004)

Ympäristön kannalta tarkasteltuna, BWB omaa pienemmät saastepäästöt sekä pienemmän melun tuoton, jotka johtuvat alhaisemmasta vaaditusta työntövoimasta, alhaisemmasta polttoaineen kulutuksesta, tehokkaasta aerodynaamisesta konfiguraatiosta, yksinkertaisten takareunalaitteiden käytöstä sekä kevyemmästä rungosta (Liebeck, 2004; Martinez-Val et al., 2010). Liebeckin (2004) mukaan BWB tarjoaa 17 %:n vähennyksen NO<sub>x</sub>-päästöissä pelkästään sen alhaisemman polttoaineen kulutuksen myötä.

Horisontaalisen pyrstön puuttuminen sekä siipikuorman keveneminen BWB:n tehokkaan hyötykuorman jakautumisen ja jännekuorman ansiosta tuottaa siitä kompaktimman ja puhtaamman aerodynaamisen konfiguraation kevyemmällä rungolla (Liebeck 2004). Vähennetyllä tyhjäpainolla ja pienemmällä parasiittivastuksella, BWB-konfiguraatio on noin 20 % tehokkaampi L/D-suhteen osalta kuin TAW-konfiguraatiot. Tämä tarkoittaa noin 20–30 % säästöjä polttoaineissa, kun sitä verrataan konventionaalisen lentokoneen kanssa, joka omaa suunnilleen saman painon. (Torenbeek, 2013)

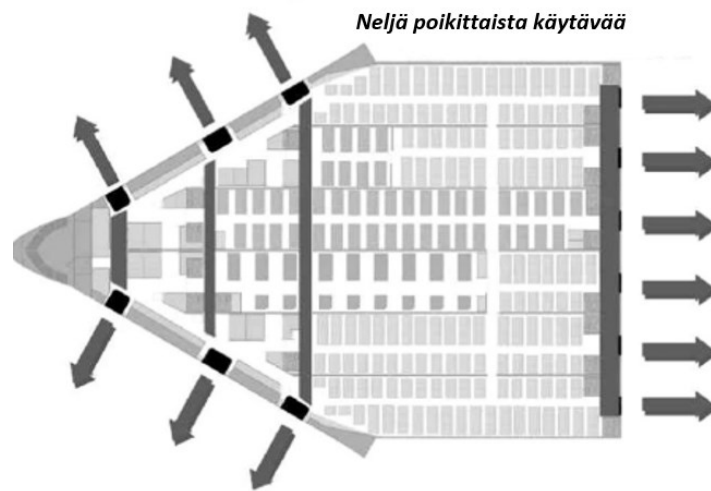
Martinez-Val et al. (2010) vertasivat lähestymismelua tavanomaisen Boeing 777–200-lentokoneen ja 300 matkustajan kapasiteetin BWB:n välillä kolmessa eri referenssipisteessä, jotka olivat 1150 m, 2300 m, 3450 m. Tuotettu melu B777:n ja BWB:n välillä on esitetty kuvassa 10 (Martinez-Val et al., 2010). Tulos osoittaa, että BWB tuottaa noin 7–10 dB vähemmän melua kaikilla taajuuksilla, kuin konventionaalinen B777–200-lentokone (Martinez-Val et al. 2010). Efektiivinen melutaso, joka saadaan integroimalla äänen painetasot kuultavalla äänitaajuudella, on 79,6 dB 300-paikkaiselle BWB:lle ja 88,2 dB B777–200:lle (Martinez-Val et al. 2010). Melun alenema korreloitiin siis desibelien mukaan noin 81,5 prosenttiin.



**Kuva 10.** B777-200-lentokoneen ja 300 matkustajan BWB:n tuottaman melun vertailu kolmessa referenssipisteessä lähestymisen aikana (muokattu lähteestä Martinez-Val et al. 2010)

ACARE tavoitearvot (taulukko 1) vuodelle 2050 on 65 %:n vähennys melussa ja vastaavasti 90 %:n vähennys  $NO_x$ -päästöissä nykyisiin lentokoneisiin. Tässä esiintyvät parannukset näissä parametreissa ovat siis noin 82 % vähemmän melua sekä 17 % alhaisemmat typenoksidipäästöt, joten BWB:n tuottamien  $NO_x$ -päästöjen voidaan todeta olevan vielä sen huomattava kehityskohta. Typenoksidipäästöt ovat kuitenkin asia, joihin voidaan vaikuttaa muun muassa uudenlaisten polttoaineiden ja propulsioratkaisujen myötä. Hätäpoistumissäädösten noudattaminen saattaa osoittautua haasteelliseksi BWB-lentokoneiden suunnittelijoille. Tämä johtuu epätasaisesta hyötykuorman kapasiteetin vaihtelusta ja käytettävissä olevasta pinta-alasta poistumisteille pituussuunnassa (Liebeck 2004). Tämä rajoittaa tilaa, johon hätäuloskäynnit on sijoitettavissa (Liebeck 2004). Hä-

täpoistumisteiden sijoitukseen vaikuttavia tekijöitä on väkijoukon käyttäytyminen ja etäisyys hätäuloskäynteihin (Liebeck 2004). Liebeck (2004) ehdottikin matkustamomallia, joka antaa matkustajille suoran näkymän yhteen tai useampaan uloskäyntiin useimmista positioista matkustamossa, ilman tarvetta tehdä 90 asteen käännöksiä päästäkseen ulos (Liebeck 2004). Tämä saavutetaan asettamalla matkustamon pääovi jokaisen poistumistien eteen ja takaosan paineseinän yhteyteen, yhdessä neljän siipivälisuuntaisen käytävän kanssa, jotka leikkaavat pitkittäiset käytävät kuvan 11 mukaisesti (Liebeck 2004).



**Kuva 11.** Matkustamokonsepti, joka helpottaa hätäpoistumista (muokattu lähteestä Liebeck 2004)

Hätäpoistuminen BWB-lentokoneessa saattaa siis vaikuttaa matkustajille haasteellisemmalta, sillä etäisyys oville tuntuu pidemmältä. Liikkuminen matkustamossa helpottuu kuitenkin huomattavasti useamman käytävän vuoksi. Tämä on helppo ymmärtää toimivaksi, kun miettii tavanomaisesta TAW-lentokoneesta poistumista, jossa yksi matkustaja tukkii kaikkien muiden kulun käytävällä.

## 6.2 BWB-lentokoneen markkinointi ja tuotantopotentiali

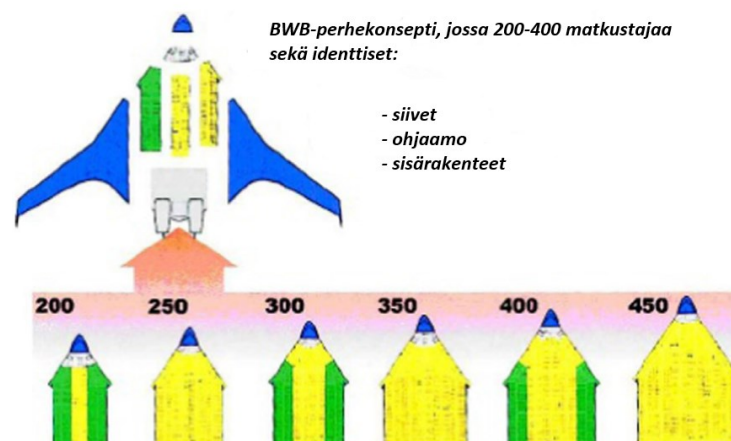
BWB tarjoaa kiistatta aerodynaamista etua verrattuna tavanomaiseen TAW-lentokoneeseen, johtaen polttoaineen kulutuksen vähenemiseen 20–25 %. Tämä tarkoittaa suorissa käyttökustannuksissa 10–12 % säästöjä ja vastaava lisäys tuottoa tuottavassa hyötykuormassa (Liebeck 2004). Vaikka tiedämme lähiaikojen käänneistä liittyen lentoyhtiöiden tyytymättömyyteen esimerkiksi Airbusin A380-lentokoneeseen, mikä on johtanut jopa niiden ennenaikaiseen eläköitymiseen, on mainittava Boeingin tekemä vertailu polttoaineen kulutuksesta A380-700:n ja BWB-450:n välillä. Vertailussa molemmilla lentokoneilla oli hyötykuormana 480 matkustajaa, matkanopeus Mach 0,85 ja lentoetäisyys

8700 nm (Liebeck 2004). Saadut tulokset osoittivat, että BWB-450:n polttoaineenkulutus matkustajaa kohden on 32 % pienempi verrattuna A380-700:aan (Liebeck 2004).

BWB-lentokoneen integroitu luonne johtaa siihen, ettei siinä ole kompleksisia siiven ja rungon liitoksia tai korkeasti kuormitettuja rakenteita 90° kulmassa toisiinsa. Tämän lisäksi BWB-konsepteissa on harvoin spoilereita. Nämä seikat johtavat 30 % pienempiin osien määrään, alentuneisiin valmistusvaikeuksiin ja -kustannuksiin. (Liebeck, 2004)

BWB:n keskirunko on pituussuunnassa lyhyt, joten lastaus ja purku voidaan suorittaa lyhyemmässä ajassa. Lisäksi se voi nousta ilmaan lyhyemmiltä kiitoteiltä ilman tarvetta monimutkaisille korkean nostovoiman laitteille. BWB vaatii kuitenkin paksun keskirungon matkustajien ja hyötykuorman kuljettamiseksi, mikä muodostaa haasteen matalan parašiitivastuksen säilyttämisessä. (Leifsson et al. 2013)

BWB-lentokoneen kokoonpano on integroitu yhdistelmästä erillisiä osia, erityisesti keskirungon matkustajatilat, ulommat siipipaneelit ja nokkaosa tai ohjaamo. Vaikka ulommat siipipaneelit ja nokkaosa ovat identtisiä kaikille BWB:ille matkustajakapasiteetista huolimatta, keskirungon geometria vaihtelee hyötykuorman kapasiteetin mukaan (Liebeck 2004). NASA:n ja Boeingin tekemän yhteistutkimuksen mukaan BWB-lentokoneiden perhe voitaisiin valmistaa vastaamaan lentoyhtiöiden laivaston vaatimuksia matkustajajaloja lisäämällä tai poistamalla keskirungosta, kuten kuvassa 12 on esitetty (Martinez-Val et al. 2010). Tutkimus määrittä, että BWB:n tarjoama yhtenäisyys 250 ja 450 matkustajan mallien välillä vähentää kertaluonteisia kustannuksia 23 % ja toistuvia 12 % (Martinez-Val et al. 2010). On kuitenkin tärkeää mainita, ettei tässä tutkimuksessa otettu lainkaan huomioon aerodynaamisia, rakenteellisia ja propulsiojärjestelmän muutoksia, jotka todennäköisesti liittyisivät konfiguraation laajetessa matkustajakapasiteetin lisäämiseksi.



**Kuva 12.** Yhteneväisyydet eri kapasiteetin BWB-lentokonekonseptien välillä (muokattu lähteestä Liebeck 2004)

BWB:n fyysisen koon merkitystä on yritetty selvittää. Samalla kun käytännön seikkoja saattaa tulla vastaan, rakenteellinen paino ja aerodynaaminen tehokkuus sallisi noin 600–800 matkustajan BWB:n operoinnin. Tämä johtuu BWB:n paremmasta  $L/D$ -suhteesta suuremmalla koolla, johtuen Reynoldsin luvun vaikutuksista ja suhteellisen pienestä kosteasta alueesta. (Bradley & Kimmel 2004) Ongelma, joka kuitenkin haastaa tätä ideologiaa on niin sanotun neliökuutiolain (engl. Square Cube Law) vaikutukset suuremman kokoluokan BWB:lle.

Neliökuutiolaki ilmaisee, että fyysisen objektin tiheyden pysyessä samana ja sen kokoa kasvatetaan, sen massa kasvaa kolmannessa potenssissa, kun taas sen pinta-ala kasvaa toisessa potenssissa (Bradley & Kimmel 2004). Näin ollen BWB:n konseptin suurenus saa massan kasvamaan huomattavasti radikaalimmin kuin pinta-ala. Tämä tulee kasvattamaan taivutusmomenttia ja sitä kautta rakenteellista painoa, johtaen korkeampaan siipikuormitukseen negatiivisilla vaikutuksilla kriittiseen alhaisen nopeuden suorituskykyyn (Bradley & Kimmel 2004). Myös lisätty propulsio ja aerodynaamisten muutosten haaste seuraa (Bradley & Kimmel 2004). Tämän vuoksi Bradley & Kimmel (2004) suosittelee BWB:n maksimikapasiteetiksi 450 matkustajaa. On myös helppo todeta tämänhetkisistä trendeistä matkustajalentoliikenteessä, että yli 450 matkustajan kapasiteetin lentokoneet eivät ole varsinaisesti houkuttelevia lentoyhtiöiden operoitavaksi. Bradley & Kimmel (2004) mainitsevat vielä, että BWB:n matkustamon koostuessa pitkitäissuuntaisista painelapioista, jotka erottavat eri matkustamon tilavuudet toisistaan, ei BWB:tä tässä konfiguraatiossaan ole edes realistista muuttaa matkustajalentokoneesta rahtilentokoneeksi.

## 7. YHTEENVETO

Tässä työssä selvitettiin mikä BWB-lentokonekonfiguraatio on ja millaisia erityispiirteitä sillä on suhteessa nykyisiin putkisiipirungollisiin lentokoneisiin. Luvussa 2 esiteltiin pintapuolisesti, mitä matkustajalentokoneilta odotetaan päästöjen ja melujen osalta vuoteen 2050 mennessä suhteessa vuoteen 2020, sekä mitä keinoja nykyisillä rungoilla on kehittyä näissä parametreissa. Tästä luvusta ilmenee tarve syventyä radikaalimpiin ratkaisuihin kuin nykyiset lentokoneen rungot tarjoavat, mikäli vuoden 2050 tavoitteisiin tähdätään. Tästä päästään sekoitetun siipirungon käsitteeseen yhtenä ratkaisuna kyseiseen ongelmaan.

Kolmannessa luvussa esiteltiin yleisesti lentokoneeseen vaikuttavia vastuksia. Tämä on oleellista tutkielman kannalta, sillä myöhemmin BWB:n aerodynaamista tehokkuutta tarkastellessa on hyvä ymmärtää mitä erilaiset vastuksen käsitteet tarkoittavat sen suorituskyvyn kannalta. Luvussa esitellään myös BWB:n aerodynaamisen tehokkuuden keskiössä oleva suunnitteluparametri, kostea pinta-ala.

Neljännessä luvussa keskityttiin sekoitetun siipirungon lentokoneen käsitteeseen ja erityisesti sen lupaavimpiin etuihin suhteessa nykyisiin putkisiipirunkolentokoneisiin. Näistä oleellisimpana voidaan pitää 33 % pienempi kostea pinta-ala, joka mahdollistaa 27 %:n polttoaineenkulutuksen vähennyksen sekä aerodynaaminen ja rakenteellinen tehokkuus.

Sekoitetulla siipirungolla on kuitenkin huomattavia haasteita, joita sen tulee ylittää, jotta sen adaptaatiota matkustajalentoliikenteeseen voidaan pitää mahdollisena. Näistä oleellisimpia todetaan olevan sen lennonhallinta ja stabiilius sekä painetilavuuksien integrointi runkoon tavalla, jolla se kestää lennonaikaisia painevaihteluita luotettavasti. BWB:n lennonhallintaan ja stabiiliuteen on esitetty monia ratkaisuja, joilla luonnostaan epästabiilimman lentokoneen hallinta olisi luotettavampaa, kuten esimerkiksi ennakoiva aktiivinen lennonohjausjärjestelmä, työntövoiman vektorointi ja runkoon integroidut vatsalaipat. Painetilavuuksien integrointiinkin on tietenkin esitetty ratkaisuja, joista parhaana nähdään yhtenäisen painekuoren integrointi runkoon komposiittirakenteiden myötä, joskin ongelmitta tämäkin.

Alun perin yli 600 matkustajan kuljettamiseen suunniteltu BWB-lentokone kohtaa nykyisin myös haasteita houkuttelevuuden myötä, sillä tarve näin suurten matkustajamäärien kuljettamiseen on ollut laskussa. Tämän lisäksi nykyinen trendi lentokonevalmistajilla tuntuu olevan korkean sivusuhteen lentokoneet, kuten Boeingin Truss-Braced



Wing, joka on konfiguraatioltaan lähes päinvastainen kehityssuunta matalan sivusuhteen BWB-lentokoneeseen. Mikäli BWB-lentokoneen kriittisiin ongelmiin löydetään kuitenkin definiittiset vastaukset turvalliseen ja kannattavaan liikennöintiin, ei sen potentiaali ole suotavaa jättää hyödyntämättä.

## 8. LÄHTEET

*26th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences Icas 2008.*

(2009). Curran Associates Inc.

*AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference.* (2011). American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Bradley, K., Kimmel, W. (2004) A Sizing Methodology for the Conceptual Design of Blended Wing Body Transports, technical Report, NASA.

Buttazzo, G., & Frediani, A. (2012). *Variational analysis and aerospace engineering: Mathematical challenges for aerospace design ; contributions from a workshop held at the School of Mathematics in Erice, Italy.* Springer.

Hall, C. A., & Crichton, D. (2006). Engine Design Studies for a Silent Aircraft. *Volume 6: Turbomachinery, Parts A and B*, 1653–1662. Saatavissa:

<https://doi.org/10.1115/GT2006-90559>

Hileman, J. I., Spakovszky, Z. S., Drela, M., Sargeant, M. A., & Jones, A. (2010). Airframe Design for Silent Fuel-Efficient Aircraft. *Journal of Aircraft*, 47(3), 956–969. Saatavissa: <https://doi.org/10.2514/1.46545>

Kozek, M., & Schirrer, A. (Eds.). (2015). *Modeling and Control for a Blended Wing Body Aircraft: A Case Study.* Springer International Publishing. Saatavissa:

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-10792-9>

Kretov, A., & Tiniakov, D. (2022). Evaluation of the Mass and Aerodynamic Efficiency of a High Aspect Ratio Wing for Prospective Passenger Aircraft. *Aerospace*, 9(9), 497.

Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/aerospace9090497>

Larrimer, B. I. (2020). *Beyond tube-and-wing: The X-48 blended wing-body and NASA's quest to reshape future transport aircraft*. NASA.

Leifsson, L., Ko, A., Mason, W. H., Schetz, J. A., Grossman, B., & Haftka, R. T. (2013). Multidisciplinary design optimization of blended-wing-body transport aircraft with distributed propulsion. *Aerospace Science and Technology*, 25(1), 16–28. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2011.12.004>

Liebeck, R. H. (2004). Design of the Blended Wing Body Subsonic Transport. *Journal of Aircraft*, 41(1), 10–25. Saatavissa: <https://doi.org/10.2514/1.9084>

Martinez-Val, R., Cuerno, C., Perez, E., & Ghigliazza, H. H. (2010). Potential Effects of Blended Wing Bodies on the Air Transportation System. *Journal of Aircraft*, 47(5), 1599–1604. Saatavissa: <https://doi.org/10.2514/1.C000214>

Mohr, B., Paulus, D., Baier, H., & Hornung, M. (2012). Design of a 450-passenger blended wing body aircraft for active control investigations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 226(12), 1513–1522. Saatavissa: <https://doi.org/10.1177/0954410011426031>

Palmer, C. (2020). The Boeing 737 Max Saga: Automating Failure. *Engineering*, 6(1), 2–3. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.11.002>

Qin, N., Vavalle, A., Le Moigne, A., Laban, M., Hackett, K., & Weinerfelt, P. (2004). Aerodynamic considerations of blended wing body aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 40(6), 321–343. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2004.08.001>

Rahman, N. U., & Whidborne, J. F. (2010). Propulsion and Flight Controls Integration for a Blended-Wing-Body Transport Aircraft. *Journal of Aircraft*, 47(3), 895–903. Saatavissa: <https://doi.org/10.2514/1.46195>

Roysdon, P., & Khalid, M. (2010, September 13). Lateral-Directional Stability Investigation of a Blended-Wing Body. *10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*. 10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, Fort Worth, Texas. Saatavissa: <https://doi.org/10.2514/6.2010-9167>

Siouris, S., & Qin, N. (2007). Study of the effects of wing sweep on the aerodynamic performance of a blended wing body aircraft. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 221(1), 47–55. Saatavissa: <https://doi.org/10.1243/09544100JAERO93>

Staelens, Y., Blackwelder, R., & Page, M. (2007, June 25). Study of Belly-Flaps to Enhance Lift- and Pitching Moment Coefficient of a BWB-Airplane. *25th AIAA Applied Aerodynamics Conference*. 25th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Miami, Florida. Saatavissa: <https://doi.org/10.2514/6.2007-4176>

Torenbeek, E. (2013). *Advanced Aircraft Design: Conceptual Design, Analysis and Optimization of Subsonic Civil Airplanes* (1st ed.). Wiley. Saatavissa: <https://doi.org/10.1002/9781118568101>

University Of Oklahoma. (2007). *25th congress of the international council of the aeronautical sciences 2006*. Curran Associates Inc.

Wildschek, A., Bartosiewicz, Z. & Mozyrska, D. (2014). A multi-input multi-output adaptive feed-forward controller for vibration alleviation on a large blended wing body airliner. *Journal of Sound and Vibration*, 333(17), 3859–3880. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.04.021>

Zhang, Y. J. & Wang, B. T. (2011). Non-Cylindrical Fuselage Structural Optimization of BWB Civil Aircraft. *Key Engineering Materials*, 474–476, 1736–1739. Saatavissa: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.474-476.1736>

