

Paavo Ojala

MASSAKESKIPISTEEN SIJAINNIN OPTIMOINTI LENTOKONEEN LASTAUSPROSESSISSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Konetekniikka
Toukokuu 2025

TIIVISTELMÄ

Paavo Ojala: Massakeskipisteen sijainnin optimointi lentokoneen lastausprosessissa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Toukokuu 2025

Alati kiristynvä kilpailu ilmailualalla vaatii lentoyhtiöiltä uusia ratkaisuja kustannuksissa säästämiseksi. Lentokoneet tuottavat tulosta vain siirtyessään paikasta toiseen, joten jokainen maassa käytetty minuutti on suoraan rahaa pois lentoyhtiöiltä. Näin ollen, erityisesti kääntöaikojen minimointi on äärimmäisen tärkeää rahallisen tuloksen maksimoinniksi. Tätä nopeuttamista voidaan tehdä esimerkiksi erilaisilla optimointimalleilla, joilla saataisiin lastausmestarille mahdollisimman nopeasti valmistettua lastausohje. Koska ilmailu alana on erittäin turvallisuuskriittinen, on syytä myös tarkastella, millaisia vaikutuksia tällaisella optimoinnilla olisi lentokoneen lento-ominaisuuksiin.

Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia, mitä massakeskipiste tarkoittaa fysiikan näkökulmasta ja miten lentokoneen massakeskipisteen sijainti vaikuttaa kyseisen lentokoneen lento-ominaisuuksiin ohjattavuuden ja polttoaineenkulutuksen kannalta. Tämän jälkeen tutkimuksessa selvitettiin, miten massakeskipisteen sijaintia voidaan optimoida luomalla kuormausohje lastausmestarille kombinatorisilla optimointimalleilla ja simulaatiolla.

Tutkimuksessa huomattiin, että epäoptimaalisella ja optimaalisella massakeskipisteen sijainnilla voi olla jopa 10 % ero kokonaisilmanvastuksessa trimmin asennon takia, jolla taas on suora vaikutus polttoaineenkulutukseen. Tämän lisäksi todettiin erään lentoturman tutkintaraportin kautta, että massakeskipisteen siirtyminen liian taakse voi aiheuttaa jopa maahansyöksyn. Tutkiessa massakeskipisteen sijainnin optimointia huomattiin, että kombinatorisilla optimointimalleilla sekä simulaatiolla on mahdollista luoda huomattavasti nopeammin lastausohje kuin käsin tekemällä. Normaalisti lastausohjeen tekeminen prosessina vie noin kymmenen minuuttia, mutta mainittuja optimointityökaluja hyödyntäen voidaan laskenta-aikaa lyhentää vain muutamiin sekunteihin. Etuna näissä on myös se, että mikäli lentokoneeseen lastattava kuorma muuttuukin lastauksen aikana, saadaan uusi lastaussuunnitelma nopeasti tehtyä ilman, että lastausmestarin tarvitsee käyttää uudestaan kymmentä minuuttia uuden suunnitelman laatimiseen tai tyytyä kompromisseihin.

Vertaillen käsin tehtyjä sekä optimointimallien luomia lastaussuunnitelmia, voitiin tutkimuksessa osoittaa, että optimointimallit suoriutuvat nopeammin. Jos optimointimallin matematiikka on kuitenkin liian monimutkainen, saattaa se johtaa laskenta-ajan merkittävään pidentymiseen liian usean ulottuvuuden takia. Eroa massakeskipisteen sijainnille verrattuna optimaaliseen sijaintiin ei vertailussa syntynyt. Breguetin kantamayhtälöä hyödyntäen voitiin kuitenkin todistaa, että mikäli massakeskipisteen sijaintia ei optimoida, voi se aiheuttaa jopa usean tuhannen kilometrin teoreettiseen kantaman lyhenemisen.

Avainsanat: lentokone, massakeskipiste, optimointi, rahti, ilmailu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. MASSAKESKIPISTE.....	2
2.1 Laskennallinen määritelmä	2
2.2 Massakeskipisteen sijainti.....	3
2.3 Vaikutus lento-ominaisuuksiin.....	4
2.4 Vaikutus lentoturvallisuuteen	6
3. LENTOKONEEN LASTAUSPROSESSI.....	7
3.1 Rahtilentokoneen lastaaminen.....	7
3.2 Lastausyksiköt.....	9
4. MASSAKESKIPISTEEN SIJAINNIN OPTIMOINTI	12
4.1 Matemaattinen optimointi.....	12
4.2 Optimointi simulaation avulla	15
4.3 Saavutettavat hyödyt	17
5. YHTEENVETO.....	20
LÄHTEET	21
LIITE A: KOMBINATORISEN OPTIMOINNIN PARAMETRIT	24
LIITE B: BOM OPTIMOINTIMALLI	25
LIITE C: COM OPTIMOINTIMALLI.....	26
LIITE D: IOM OPTIMOINTIMALLI	27

KUVALUETTELO

Kuva 1. CG taulukko (muokattu lähteestä Shpati 2011)	4
Kuva 2. Aerodynaamisen vastuksen muutos, Mach 0,9 ja 45 000 ft (muokattu lähteestä Nicolai et al. 2010, s. 604).	5
Kuva 3. Rahdin kulku lentokentällä (muokattu lähteestä Ashford et al. 2013, luku 10.3)	7
Kuva 4. Sähköinen kuormausohje (muokattu lähteestä Amadeus 2015)	8
Kuva 5. AKE-standardin ULD (DSV 2025).....	9
Kuva 6. AKE kontit vierekkäin ruumassa (LGrima 2021)	10
Kuva 7. Kaksi pallettia aseteltuna vierekkäin rahtilentokoneen ylätasolle (Bruce 2016)	11
Kuva 8. Optimointimallien suoriutumisen keski- ja maksimiarvot (muokattu lähteestä Zhou et al. 2023)	14
Kuva 9. Listaus koneeseen menevistä palleteista taulukkomuodossa (muokattu lähteestä Abgas et al. 2021, s. 26).....	15
Kuva 10. Simulaatiolla generoitu kuormausohje (Abgas et al. 2021, s. 28)	16
Kuva 11. Massakeskipisteen sijainnin ja laskenta-ajan vertailun tulokset (muokattu lähteestä Abgas et al. 2021 s. 29)	17

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CG	engl. Center of Gravity, Massakeskipiste
MAC	engl. Mean Aerodynamic Chord, Jänteen keskipituus
ULD	engl. Unit Loading Device, Lastausyksikkö
CLC	engl. Centralized Load Control, Keskitetty lastauksen ohjaaja
LIR	engl. Loading Instruction Report, Lastausohje
LM	engl. Loadmaster, Lastausmestari
WBP	engl. Weight and Balance Problem, Paino- ja tasapaino ongelma
BOM	engl. Bi-objective Optimization Model, Kaksitavoite optimointimalli
COM	engl. Combinatorial Optimization Model, Kombinatorinen optimointimalli
IOM	engl. Improved combinatorial Optimization Model, Paranneltu kombinatorinen optimointimalli
VLR	engl. Volume Loading Ratio, Tilavuuden täyttösuhde
MZFW	engl. Maximum Zero Fuel Weight, Maksimipaino ilman polttoainetta
MLW	engl. Maximum Landing Weight, Maksimilaskeutumispaino
MTOW	engl. Maximum Take-Off Weight, Maksimilento-ohjelmakäyttöpaino
MRW	engl. Maximum Ramp Weight, Maksimiramppipaino
TSFC	engl. Thrust Specific Fuel Consumption, Polttoaineen ominaiskulutus
TOF	engl. Take-Off fuel, Lento-ohjelmakäyttöpolttoaine
TRIP	engl. Trip Fuel, Matkapolttoaine

1. JOHDANTO

Ilmailun kaupallistaminen käsitteenä syntyi maailmansotien välisellä rauhan ajalla. Jo ensimmäisen maailmansodan aikana eri valtiot olivat aloittaneet kilpajuoksun ilmailuun liittyvien innovaatioiden saralla, sillä ilma-alukset antoivat taistelutilanteisiin suurta etulyöntiasemaa perinteisiin taisteluvälineisiin verrattuna. Sodan aiheuttamat jännitteet maiden välillä eivät kuitenkaan antaneet tämän innovaatioaallon pysähtyä sodan loputtua, sillä eri valtiot kokivat tärkeäksi saada ylivoiman taivaalla mahdollisen uuden maailmansodan koittaessa. Hetkellinen rauhanaika antoi kuitenkin lentokonevalmistajille mahdollisuuden keskittyä myös siviilipuolen ilma-aluksiin. Näin syntyi kaupallinen ilmailu. (Wittmer 2011, s. 7–12)

Viime vuosikymmenien aikana kilpailu ilmailualalla on vain kiristynyt entisestään. Asiakkaat kilpailuttavat entistä enemmän lentoyhtiöitä pelkästään hinnan perusteella, mikä on ajanut niitä keksimään tapoja minimoida operatiivisia kustannuksia, esimerkiksi luomalla alliansseja muiden lentoyhtiöiden kanssa. Näiden allianssien vastareaktioksi on syntynyt niin sanotut halpalentoyhtiöt, joiden liiketoimintamalli perustuu eri toimintojen karsimiseen. (Wittmer 2011, s. 18–19) Esimerkiksi vuonna 2012 Ryanairin toimitusjohtaja Michael O’Leary yritti hintojen vähentämiseksi kehittää seisomapaikkoja lennoilleen, mutta testilentojen suorittamiselle ei saatu lupaa (Milmo 2012).

Eräs tapa vähentää kaupallisen lentotoiminnan kustannuksia on lentokoneen massakeskipisteen sijainnin optimointi. Esimerkiksi Desai et al. (2023) ovat kehittäneet rahtilentokoneen lastauksen suunnittelussa hyödynnettävän optimointityökalun, jolle he ovat todenneet jopa 18 % paremman rahallisen tuloksen tavallisiin toimintamalleihin verrattuna. Näin ollen tätä tutkimusta ohjaa seuraavat kaksi tutkimuskysymystä:

1. Miten lentokoneen massakeskipisteen sijainti vaikuttaa sen lento-ominaisuuksiin?
2. Miten massakeskipisteen sijaintia voidaan optimoida lastausprosessissa?

Tutkimuskysymysten avulla työssä tullaan siis ensin perehtymään massakeskipisteen määritelmään fysiikassa, ja mitä se tarkoittaa ilmailukontekstissa. Tämän jälkeen esitellään kaksi eri lähestymistapaa rahtilentokoneen lastauksen optimoimiseksi.

2. MASSAKESKIPISTE

2.1 Laskennallinen määritelmä

Fysiikassa massakeskipiste (CG, engl. Center Of Gravity) tarkoittaa kappaleen pistettä, josta voidaan piirtää aina kappaleeseen vaikuttavan painovoiman resultanttivoima sen asennosta riippumatta. Homogeenisessä kappaleessa, eli jossa tiheys on koko kappaleessa vakio, massakeskipiste on sama kuin sen geometrinen tilavuuden V keskipiste. Tämän sijainti koordinaatistossa voidaan laskea seuraavilla kaavoilla:

$$x_c = \frac{\int x dV}{\int dV} \quad (1)$$

$$y_c = \frac{\int y dV}{\int dV} \quad (2)$$

$$z_c = \frac{\int z dV}{\int dV}. \quad (3)$$

Mikäli kappaleella ei ole vakiotiheyttä, vaan se on muotoa $\rho(x, y, z)$, lisätään jokaiseen integraaliin myös tiheyden yhtälö. Tällaisessa tilanteessa

$$x_c = \frac{\int x \rho dV}{\int \rho dV} \quad (4)$$

olisi kappaleen massakeskipisteen x -koordinaatin esitys. (Gross et al. 2017, s. 31–32)

Tarkastellaan seuraavaksi massakeskipisteen laskemista lentokoneen tapauksessa. Ajatellaan, että rungon suuntainen suora on x -akseli ja siipien suuntainen suora on y -akseli. Kun konetta tarkastellaan ylhäältä päin, on se molemmin puolin kuvitteellista x -akselia lähes symmetrinen. Koska tämä symmetrisyys pätee myös massaan, ei massakeskipisteen y -koordinaattia ole yleisesti tarpeellisesta tarkastella. (Asselin 2021, s. 143)

Helpoin tapa havainnollistaa lentokoneen massakeskipistettä on kuvitella runkoon piste, josta tuettuna lentokone ei lähde kallistumaan mihinkään suuntaan, eli pysyy tasapainossa. Yksiulotteisessa tarkastelussa tämä tarkoittaa fysiikan näkökulmasta sitä, että pisteen molemmin puolin painovoiman aiheuttamat momentit kumoavat toisensa. (Asselin 2021, s. 137) Momentti M jonkin pisteen suhteen lasketaan kaavalla

$$M = r \times F, \quad (5)$$

jossa r on paikkavektori tarkasteltavan pisteen ja voiman vaikutuspisteen välillä, ja F on voima (Awrejcewicz 2012, s. 30). Näin ollen lentokoneen tapauksessa massakeskipiste on jokin piste, johon pätee

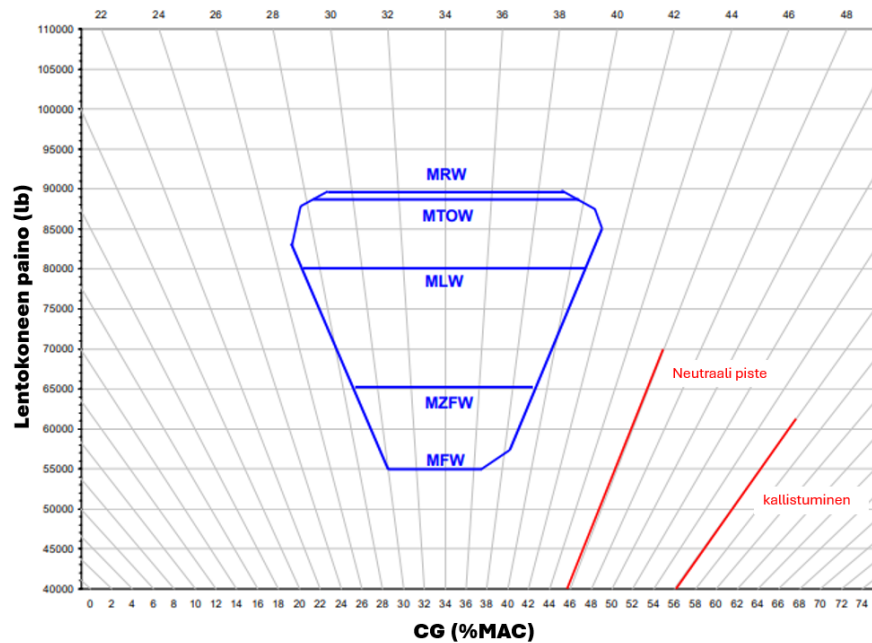
$$\sum W_i x_i = 0. \quad (6)$$

Tässä siis painon W ja sijainnin x aiheuttamien momenttien summa tulee olla nolla. (Asselin 2021, s. 138)

2.2 Massakeskipisteen sijainti

Jokaiselle lentokonetyypille on määritetty sallitut arvot massakeskipisteen sijainnille lentokoneen aerodynaamisen vakauden takaamiseksi. Yleisesti voidaan määrittellä, että massakeskipisteen tulisi olla hieman lähempänä koneen nokkaa kuin aerodynaamisen keskipisteen. (Kroes et al. 2013, luku 7.1) Aerodynaaminen keskipiste on siis se piste koneessa, jossa aerodynaaminen momentti pysyy vakiona kohtauskulmasta riippumatta, ja se voidaan määrittellä erikseen siivelle, korkeusvakaimelle tai koko koneelle. Esimerkiksi siivellä sen sijainnin tulisi olla noin 25 % etäisyydellä siiven johtoreunasta koko siiven jänteen keskimääräiseen pituuteen nähden (MAC, engl. Mean Aerodynamic Chord), mutta yleensä varsinkin suuremmissa lentokoneissa se on merkittävästi taaempana. (Nikolai et al. 2010 s. 34–40)

Massakeskipisteen sallitut arvot sijainnille ovat kuitenkin riippuvaisia myös lentokoneen massasta. Tämän takia sallittuja arvoja kuvataan yleensä taulukossa, jossa x -akselilla on massakeskipisteen sijainti ja y -akselilla lentokoneen massa. (Dusenbury et al. 2015, s. 168–169). Alla olevassa kuvassa 1 on esimerkki tällaisesta taulukosta.



Kuva 1. CG taulukko (muokattu lähteestä Shpati 2011)

Kuvassa 1 on siis merkattuna sinisellä viivalla sallitut rajat, sekä tietyt raja-arvot. MZFW tarkoittaa maksimipainoa ilman polttoainetta (engl. Maximum Zero Fuel Weight), MLW on maksimilaskeutumispaino (engl. Maximum Landing Weight), MTOW on maksimilento-
 toonlähtöpaino (engl. Maximum Take-Off Weight) ja MRW on maksimiramppipaino (engl. Maximum Ramp Weight), eli kuinka paljon koneen laskutelineet kestävät painoa paikallaan maassa. Myös oikeanpuoleisin punainen viiva on tärkeä huomata, sillä lentokoneen lastauksen aikana ei massakeskipiste saa missään vaiheessa olla tuon viivan oikealla puolella, sillä seurauksena on koneen kallistuminen perälleen. (Shpati 2011)

Massakeskipiste ei siis ole riippuvainen pelkästään koneen tyhjäpainosta, vaan myös polttoaineesta, matkustajista, miehistöstä ja rahdista, jolloin sen sijainti liikkuu todellisuudessa jatkuvasti lennon aikana. Tämä johtuu esimerkiksi matkustajien ja miehistön jäsenten liikkumisesta koneen sisällä, ja polttoaineen palamisesta lennon aikana. (Kroes et al. 2013, luku 7.5.1) Näin ollen laskiessa mahdollisimman tarkkaa arviota massakeskipisteen sijainnista eri lennon vaiheissa, tulee huomioida useiden eri muuttujien vaikutukset.

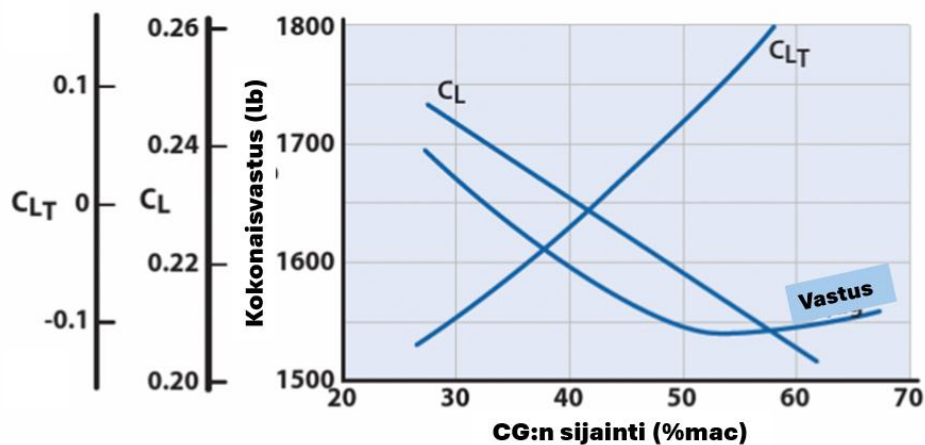
2.3 Vaikutus lento-ominaisuuksiin

Vaikka massakeskipiste vaikuttaakin monella eri tavalla siihen, kuinka vakaa lentokone on lentää, on massakeskipisteen sijainnilla tämän työn kannalta merkittävin vaikutus trimmin aiheuttamaan aerodynaamiseen vastukseen (engl. trim drag). Trimmaus tarkoittaa

taa ilmailussa tilannetta, jossa lentokoneen korkeusvakaajan kulmaa muutetaan lentokoneen tasapainottamiseksi. Epätasapainon aiheuttaa lentokoneessa nosteen aiheuttama momentti massakeskipisteen suhteen, eli korkeusvakaajalla tuotetaan vastakkais-suuntainen momentti. (Benson 2025b) Trimmin aiheuttama aerodynaaminen vastus määritetään Nicolai et al. (2010) mukaan kaavalla

$$D_{\text{trim}} = \eta_T q_\infty S_T K_T C_{LT}^2. \quad (7)$$

Yksiselitteisiä muuttujia yhtälössä (7) ovat ilmakehän aiheuttama dynaaminen paine q_∞ ja korkeusvakaajan pinta-ala S_T . Koska siivet aiheuttavat jättöpyörteen, ei ilmavirtaus korkeusvakaajan ohi ole yhtä tasaista kuin siivellä. Tämän takia tulee laskussa ottaa huomioon myös η_T eli pyrstön hyötysuhde (engl. tail efficiency factor). (Nicolai et al. 2010 s. 583) Jäljelle jäävät muuttujat K_T ja C_{LT} ovat korkeusvakaajaan aerodynaamisiin ominaisuuksiin liittyviä kertoimia. K_T on yksi tapa esittää indusoitu vastuskerroin (engl. induced drag coefficient). Indusoitu vastus syntyy, kun siiven eri puolilla vallitseva paine-ero aiheuttaa ilmapyörteen siiven kärkiin, mikä aiheuttaa koko siipeen vaikuttavan aerodynaamisen vastusvoiman. (Benson 2025c) C_{LT} on taas siiven asennosta ja muodosta riippuvainen nostekerroin, joka määrittää nosteen yhtälössä juuri kyseisen siiven ominaisuudet (Benson 2025d). Alaindeksi T viittaa näissä kaikissa muuttujissa nimenomaan pyrstöön (engl. tail). Alla olevassa kuvassa 2 on esitettynä erään lentokoneen aerodynaamisen vastuksen vaihtelu riippuen massakeskipisteen sijainnista.



Kuva 2. Aerodynaamisen vastuksen muutos, Mach 0,9 ja 45 000 ft (muokattu lähteestä Nicolai et al. 2010, s. 604).

Kuten kuvasta 2 huomataan, on aerodynaamiselle vastukselle löydettävissä optimaalinen arvo tietyllä massakeskipisteen sijainnilla. Kokonaisvastusta voidaankin siis näin parantaa jopa 10 %.

2.4 Vaikutus lentoturvallisuuteen

Mikäli lentokoneen massakeskipiste ei ole sallituissa rajoissa, voivat seuraukset olla jopa hengenvaarallisia. Liian edessä oleva massakeskipiste saattaa aiheuttaa esimerkiksi kasvanutta polttoaineen kulututusta, taipumusta syöksymiseen pienemmillä tehoasetuksilla ja hankaluuksia nokan nostamisessa laskeutumisen loppuviedon yhteydessä. Liian takana oleva massakeskipiste taas lisää sakkauksen riskiä sekä vähentää lentonopeutta ja kantamaa. (Kroes et al. 2013, luku 7.5.2)

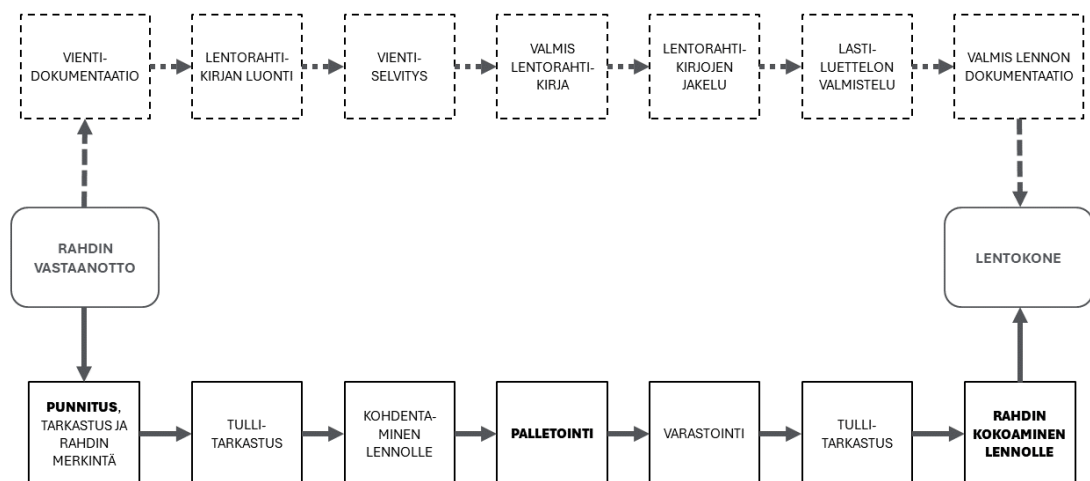
Massakeskipisteen väärästä sijainnista tai sijainnin äkillisestä muutoksesta johtuvia lentoturmia löytyy useita. Tästä yhtenä tunnetuimpana esimerkkinä on National Airlinesin lennon 102 Boeing B747-400 lentokoneen maahansyöksy heti lentoonlähdön jälkeen. NTSB:n (2015) tutkintaraportin mukaan maahansyöksy johtui huonosti kiinnitetyistä solitasajoneuvoista, jotka lentoonlähdön yhteydessä valuivat koneen takaosaan aiheuttaen massakeskipisteen siirtymisen taaksepäin. Siirtynyt massakeskipiste aiheutti lentokoneen nokan nousemisen, mikä taas johti sakkaamiseen. Samalla vahingoittuivat myös lentokoneen korkeusvakaajan ohjausjärjestelmät, sillä ajoneuvot olivat menneet ruuman takaosassa sijaitsevan paineseinän läpi. NTSB:n (2015) tutkintaraportin tuloksissa sanotaan, ettei miehistöllä vahingoittuneitten ohjausjärjestelmien takia ollut mahdollisuutta pelastaa tilannetta.

Erilaiset katastrofiesimerkit alleviivaavat massakeskipisteen sijainnin tärkeyttä, sillä kyseessä ei ole pelkästään tapa, jolla voidaan hakea rahallisia säästöjä kaupallisesta ilmailusta, vaan myös asia, jolla turvataan lentokoneen normaali operointi. Tätä myötä on myös hyvä tutkia itse lastausprosessia rahtilentokoneen osalta ennen kuin siirrytään erilaisiin optimointimalleihin.

3. LENTOKONEEN LASTAUSPROSESSI

3.1 Rahtilentokoneen lastaaminen

Rahdin kuljettaminen on yhä useammalle lentoyhtiölle merkittävä tulonlähde (Ashford et al. 2013, luku 10.1). Esimerkiksi Covid-19 pandemian aikana matkustusrajoitusten takia lentokoneet olivat kaukoreiteillä tyhjiillään, joten lentoyhtiö Finnair muunsi laajarunkoiset matkustajakoneensa täysin rahtikäyttöön. Näiden avulla voitiin kuljettaa esimerkiksi rokotteita nopeasti maasta toiseen. (Minihane 2020) Lentorahdin edut ovat sen nopeudessa ja turvallisuudessa. Lentokenttien olemassa olevat turvallisuusjärjestelyt helpottavat myös esimerkiksi arvokkaan tai vaarallisen rahdin käsittelyä. (Ashford et al. 2013 luku 10.1) Alla olevassa kuvassa 3 on esiteltynä rahdin kulku saapuvasta kuljetuksesta lentokoneeseen.



Kuva 3. Rahdin kulku lentokentällä (muokattu lähteestä Ashford et al. 2013, luku 10.3)

Tämän työn kannalta merkittävimpinä osina kuvassa 3 ovat alussa tapahtuva rahdin punnitus, palletointi (engl. palletization) ja rahdin kokoaminen lennolle. Palletointi tarkoittaa rahdin pakkaamista lastausyksiköihin (ULD; engl. Unit Loading Device), joiden tarkoituksena on nopeuttaa lentokoneen lastausprosessia sekä estää rahdin liikkumista koneen sisällä eri lennon vaiheissa. (Ashford et al. 2013) Lastausyksiköistä kerrotaan lisää kappaleessa 3.2. Rahdin liikehännän estäminen onkin luvussa 2.4 esitellyistä syistä tärkeää lentoturvallisuuden kannalta. Pallettien ja konttien muodoille sekä niiden pohjan suuruudelle on määritelty Kansainvälisen Ilmakuljetusliiton (IATA, engl. International Air

Transport Association) julkaisuissa standardit, jotta samoja kontteja ja palleja voidaan käyttää ristiin eri lentokonetyypeissä (IATA 2010).

Lastausyksiköiden sijoittelun avulla voidaan massakeskipiste saada haluttuun paikkaan lentokoneessa. Kuitenkin esimerkiksi Lufthansa Cargon (2025a) Boeing 777F rahtilentokoneissa on yhteensä paikat 28 palletille ylätasolla, ja 32:lle AKE-standardin kontille ruumassa, joten optimaalinen sijoittelun suunnittelu ei välttämättä ole yksinkertainen tehtävä, sillä Ashford et al. (2013, luku 10.6) mukaan suurten rahtilentokoneiden kääntöajat saattavat olla vain hieman alle tunnin mittaisia. Tämän takia lastausyksiköiden sijoittelun suunnittelun tekee yleensä keskitetty lastauksen ohjaaja (CLC, engl. Centralized Load Controller). Yksinkertaisuudessaan CLC siis antaa sähköisessä muodossa kuormaus-esihenkilölle tai lastausmestarille (LM, engl. loadmaster) tekemänsä kuormausohjeen (kuva 4) (LIR, engl. Loading Instruction Report), jonka pohjalta lastausmestari valvoo tämän suunnitelman toteutumista. Näin saavutetaan tehokkaampi henkilöstön käyttö, parempi tehokkuus käynnön aikana ja mahdollisuus standardoituihin prosesseihin riippumatta lentokentästä. (Muzik 2017) Alla olevassa kuvassa 4 on esimerkkinä esitetty kuormausohje Altéa FM lastauksenhallintaohjelmassa.

CPT 4 + 3 Remain 21035 kg							
CPT 4 Remain 12853 kg				CPT 3 Remain 8182 kg			
45L AKE 6X 21 SIN BJr 8 PCS	44L AKE 6X 23 SIN BFr 5 PCS	43L AKE 6X 19 SIN BWr 7 PCS	42L AKE 6X 15 SIN BM 40 PCS	41L	33L	32L	31L
AKE 6X 22 MAA BJr 8 PCS	AKE 6X 24 MAA BFr 10 PCS	AKE 6X 20 MAA BWr 21 PCS	AKE 6X 18 MAA BM 18 PCS	AKE 6X 13 MAA BM 40 PCS	AKE 6X 14 MAA BM 40 PCS	AKE 6X 16 MAA BM 40 PCS	
45R	44R	43R	42R	41R	33R	32R	31R

Kuva 4. Sähköinen kuormausohje (muokattu lähteestä Amadeus 2015)

Kuvassa 4 näkyvässä kuormausohjeessa harmaat palkit ovat lastausyksiköitä. Nämä lastausyksiköt ovat sijoiteltuina koneen eri positiioihin, joiden numeroinnit näkyvät jokaisen palkin ylä- tai alapuolelta. Tarkemmat tiedot lastausyksiköistä näkyvät tekstistä har-

maan palkin sisältä, eli esimerkiksi kolme ensimmäistä kirjainta merkkäavat lastausyksikön standardin, jonka jälkeen tulee lentoyhtiön tunnus ja lastausyksikön sarjanumero. Tämän jälkeen on merkattuna kohdelentokenttä, kuorman tyyppi ja lastausyksikön sisältö kappalemäärinä tai kiloina. (Amadeus 2015)

3.2 Lastausyksiköt

Jo aikaisemmin mainitut ULD:t tarkoittavat joko palleja tai kontteja, joita käytetään rahdin ja matkatavaroiden kuljettamiseen lentokoneessa. Vaikka kyseessä onkin vain lentokoneen lastauksen helpottamiseksi ja nopeuttamiseksi kehitetty työkalu, lasketaan ULD:t silti lentokoneen osiksi. Näin ollen tulee jokaisen ULD:n täyttää tarkkaan asetetut vaatimukset suunnittelun, testauksen, valmistuksen, käytön, korjauksen ja kunnossapidon osalta. (IATA 2025). Erilaisten lastausyksiköiden käyttämiseksi eri valmistajien lentokoneisiin, on jokainen ULD tarkkaan standardoitu IATA:n sääntöjen mukaisesti (DSV 2025). Esimerkiksi kuvan 4 sähköisestä kuormausohjeesta löytyy 11 kappaletta AKE-standardin ULD:tä, josta löytyy esimerkki alta olevasta kuvasta 5.



Kuva 5. AKE-standardin ULD (DSV 2025)

Kuvan 5 AKE-kontin vasemmasta kyljestä sekä edestä löytyvät samat tiedot kuin kuvasta 3, eli ympyrät 1, 2 ja 3 osoittavat kontin standardin, ympyrä 4 kontin sarjanumeron ja ympyrä 5 lentoyhtiön IATA-koodin. Lisäksi ympyrät 6 ja 7 havainnollistavat, mistä löytyvät kontin tekniset tiedot sekä dokumentaatiotasku. (DSV 2025) Lähtökohtaisesti kaikki

ULD-standardit on nimetty kolmen merkin yhdistelmällä, eli tässä tapauksessa koodi AKE koostuu DSV (2025) mukaan seuraavista asioista:

- kirjain A tarkoittaa lentokonekäyttöön hyväksyttyä konttia
- kirjain K tarkoittaa kontin pohjan kokoa, joka tässä tapauksessa on $1.534\text{ m} \times 1.562\text{ m}$
- kirjain E tarkoittaa kontin muodolle määritettyä standardia, joka yleensä vastaa lentokoneen ruuman muotoa.

Merkittävän juuri AKE konteista tekee sen, että kuten kuvasta 4 huomataan, voidaan AKE kontteja muotonsa ansiosta asetella laajarunkoisten koneiden ruumaan 2 vierekkäin (Lufthansa Cargo 2025b). Näin ollen, kun tarkastellaan lastausyksiköiden aiheuttamia momenteja, tulee ottaa huomioon myös tietyissä tapauksissa sivuttaissuuntainen vakaus, sillä vierekkäiset kontit saattavat olla eri painoisia. Alla olevassa kuvassa 6 on esitelty kaksi AKE konttia vierekkäin Norwegian Airlinesin Boeing B787-9 lentokoneen ruumassa.



Kuva 6. AKE kontit vierekkäin ruumassa (LGrima 2021)

Rahtikoneiden tapauksessa myös palleita voidaan asetella vierekkäin lentokoneen ylätasolla. Pallettien standardit noudattavat samaa kaavaa kuin kontitkin muodon ja pohjan koon osalta, mutta kirjaimen A sijaan palletin koodi alkaa aina kirjaimella P (ACL Airshop 2025). Alla kuvassa 7 on kaksi palleita aseteltuna vierekkäin Boeing B777F rahtilentokoneen ylätasolle.



Kuva 7. Kaksi pallettia aseteltuna vierekkäin rahtilentokoneen ylätasolle (Bruce 2016)

Koska esimerkiksi PGA palletin maksimikantokyky on lähes 14 tonnia, on entistä tärkeämpää tehdä tasapainotarkastelua myös sivuttaissuunnassa. Palletit voivat myös olla lähes 2,5 m leveitä, joten myös momenttivarret kasvavat merkittävästi verrattuna esimerkiksi ruumaan sijoiteltuihin AKE kontteihin. Konttien painot ja koot ovatkin merkittävässä roolissa, kun aloitetaan mahdollisimman optimaalisen massakeskipisteen etsiminen tietyillä kuormilla.

4. MASSAKESKIPISTEEN SIJAINNIN OPTIMOINTI

4.1 Matemaattinen optimointi

Zhou et al. (2023) ovat ottaneet kombinatorisen lähestymistavan paino- ja tasapaino-ongelman (WBP, engl. weight and balance problem) ratkaisemiseksi. Tämä matemaattinen ratkaisu toimii alla olevan taulukon 1 määrittelemien rajoitusten puitteissa.

Taulukko 1. Ongelman kuvaus kombinatoriselle WBP optimoinnille (muokattu lähteestä Zhou et al. 2023)

<i>Maksimoi</i>		Kokonaishyötykuorma
<i>Minimoi</i>		CG:n ero tavoitearvosta
<i>Riippuen</i>	ULD rajoituksista	Painorajat
		Kapasiteettirajat
		Sijoittelu
	Positorajoituksista	Position kokorajoitukset
		Position painorajoitukset
	Painorajoituksista	Epäsymmetrisen lastauksen rajoitukset
		Kokonaishyötykuorman rajoitukset
	Tasapainorajoituksista	Sivu-epätasapainon rajoitukset
		CG:n sijainnin rajoitukset

Näiden taulukossa 1 annettujen ongelmien määrittelyyn Zhou et al. (2023) ovat kehittäneet kolme matemaattista optimointimallia: kaksitavoite optimointimalli (BOM, engl. Bi-Objective Optimization Model), kombinatorinen optimointimalli (COM, engl. Combinatorial Optimization Model) ja paranneltu kombinatorinen optimointimalli (IOM, engl. Improved Combinatorial Optimization Model).

Liitteessä B esitellyssä BOM:ssa lähtökohtana ovat Zhou et al. (2023) mukaan taulukossa 1 mainitut kokonaishyötykuorman maksimointi ja CG:n eron minimointi tavoitearvosta, eli:

$$\sum_{j \in \mathbf{P}} \sum_{u \in \mathbf{U}} w_u * y_{uj} \quad (8)$$

$$|CG_{TOW} - CG_{target}|. \quad (9)$$

Kaavassa (8) siis summataan jokaisen ULD:n paino, ja mikäli ULD u on sijoitettu positioon j , saa y_{uj} arvon 1. Kaavassa (9) taas yksiselitteisesti otetaan itseisarvo massakeskipisteen sijainnin ja tavoitesijainnin erotuksesta. Selitteet kaikille optimointimalleissa käytetyille joukoille, indekseille ja muuttujille löytyvät liitteestä A. Liitteen B BOM:ssa rajoitukset 8–11 varmistavat, että jokainen ULD on lastattu vain yhteen positioon ja että jokaisessa positiossa on vain yksi ULD sekä position yhteensopivuuden siihen lastattavan ULD:n kanssa. Rajoitukset 12–16 varmistavat taas taulukossa 1 mainitut painorajoitukset eli etteivät sallitut sektiopainot, lineaariset lastausrajoitukset, painojakauman epäsymmetrisyys tai kokonaishyötykuorman määrä ylity. Lopuksi rajoituksissa 17–19 varmistetaan, että kone on sivuttaissuunnassa tasapainossa ja massakeskipiste on sallittujen CG:n arvojen sisällä. (Zhou et al. 2023, s. 7–9)

Liitteessä C esitellään COM, jossa Zhou et al. (2023) ovat ottaneet kokonaishyötykuorman maksimoinnissa huomioon myös yksittäisen rahtipaketin. Näin ollen lähtötilanne muuttuu muotoon

$$\sum_{j \in \mathbf{P}} \sum_{u \in \mathbf{U}} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i * x_{iuj}. \quad (10)$$

Tässä tapauksessa siis x_{iuj} saa arvon 1, mikäli paketti i on sijoitettuna ULD:ssä u ja u on sijoitettuna positioon j (Zhou et al. 2023, s. 9). Muuten COM:ssa on samat vaiheet ja tehtävät kuin BOM:ssa.

Liitteessä D esitellyssä IOM:ssa erona COM:iin on yksi ulottuvuus vähemmän eli sen sijaan, että x saisi arvon 1 vasta kun paketti on sijoitettuna ULD:ssä ja ULD taas sijoitettuna sille allokoituun positioon, IOM:ssa paketti sijoitetaan suoraan positioon. Näin ollen Zhou et al. (2023) mukaan lähtötilanteen kaava muuttuu muotoon

$$\sum_{j \in \mathbf{P}} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i * x_{ij}, \quad (11)$$

jossa x_{ij} saa arvon 1, kun paketti i on sijoitettuna positioon j . Tämä muutos yksinkertaistaa laskutoimitusta merkittävästi eli laskenta nopeutuu (Zhou et al. 2023, s. 11). Muutoin laskenta on jälleen samanlainen.

Zhou et al. (2023) ovat kokeilleet optimointimalliensa toimivuutta 25 erilaisella testillä, joissa jokaisessa arvottiin satunnainen määrä erikokoisia ja -painoisia paketteja sekä eri

standardin lastausyksiköitä. Testikoneena käytettiin Boeing 777F -rahtilentokonetta. Eri-laisten optimointimallien suoriutumista mitattiin kolmella eri mittapuulla: ero massakeskipisteen tavoitearvoon, laskenta-aika ja tilavuuden täyttösuhde (VLR, engl. Volume Loading Ratio). Näiden testien tulokset löytyvät tiivistetysti alla olevasta kuvasta 8.



Kuva 8. Optimointimallien suoriutumisen keski- ja maksimiarvot (muokattu lähteestä Zhou et al. 2023)

Kuvan 8 kaavioissa ei ole otettu huomioon Zhou et al. (2023) tekemää kymmentä viimeistä testiä, sillä näissä on testattu optimointimallien ratkaisukykyä mahdottomista tehtävistä, mikä vääristää laskenta-aikoja. On siis helppo huomata, että COM:n lähes 10 minuutin keskimääräinen laskenta-aika muodostaa suurimman heikkouden BOM:iin ja IOM:iin verrattuna. Tämä johtuu jo aikaisemmin mainitusta COM:n kolmiulotteisuudesta. VLR:ssä ei ole merkittäviä eroja, mutta BOM:ssa $|\Delta CG|$ on hiukan korkeampi kuin muissa malleissa. $|\Delta CG|$ on siis lopullisen massakeskipisteen ja tavoitemassakeskipisteen sijainnin erotus eli kaavan (9) ratkaisu. Vaikka ero ei näytä suurelta, Zhou et al. (2023) mukaan se on kuitenkin merkittävä, sillä useimmiten lentoyhtiöt eivät salli yli 2 % eroa, ja esimerkiksi testien antama maksimi $|\Delta CG|$ arvo BOM:lla ylittää 2 % rajan. Näin ollen BOM:n

$|\Delta CG|$ arvon ja COM:n laskenta-ajan heikkouden takia, yltää IOM näistä ylivoimaisesti parhaaksi vaihtoehdoksi.

4.2 Optimointi simulaation avulla

Luvussa 3.2 esitetty matemaattisen optimointimallin heikkous on sen sovellettavuudessa. Jotta jotain laskentatapaa voidaan käyttää, vaatii se ympärilleen tietokoneohjelman. Agbas et al. (2021) esittelevät simulaatiota hyödyntävän tietokoneohjelman, jolla voidaan nopeuttaa LM:n työskentelyä käynnön aikana. Agbas et al. (2021, s. 24) listauksen mukaan, tietokoneohjelman takana toimiva simulaatio käyttää käytännössä samoja rajoitteita kuin luvussa 3.2 esitelty Zhou et al. (2023).

Tietokoneohjelman käyttö alkaa siihen syötettävästä Excel-tiedostosta, joka sisältää tiedot koneeseen lastattavista ULD:istä (Abgas et al. 2021, s. 25). Alla kuvassa 9 on esimerkkinä kuormatiedot sisältävästä Excel-taulukosta.

YLÄTASON SEKTIOT				
	KOHDE	ULD NUMERO	PAINO	KORKEUS
1	ISL	PMC00001EA	1 771	160
2	ISL	PMC00002EA	2 335	160
3	ISL	PAG00003EA	2 565	200
4	ISL	PAG00008EA	2 496	240
5	ISL	PAG00009EA	2 120	240
6	ISL	PAG00010EA	2 405	240
7	ISL	PAG00011EA	2 360	240
8	ISL	PAG00012EA	2 620	240
9	ISL	PAG00013EA	1 826	235
10	ISL	PAG00014EA	1 640	235
11	ISL	PAG00015EA	2 435	240
12	ISL	PAG00016EA	2 180	240
13	ISL	PAG00017EA	2 245	240
14	ISL	PMC00018EA	1 960	240
15	ISL	PMC00019EA	2 451	220
16	ISL	PMC00020EA	1 925	220
17	ISL	PMC00021EA	2 282	230
18	ISL	PAG00022EA	2 290	240
19	ISL	PAG00023EA	1 611	200
20	ISL	PAG00024EA	2 100	240
21	ISL	PAG00025EA	1 170	210
22	ISL	PMC00026EA	2 165	210
23	ISL	PMC00027EA	1 035	150

Kuva 9. Listaus koneeseen menevistä palleista taulukkomuodossa (muokattu lähteestä Abgas et al. 2021, s. 26)

Kuvassa 9 näkyvät tiedot ovat samoja kuin aikaisemmin esitettyssä kuvassa 4: ULD:n numero, paino ja lisäksi kuvaan 3 verrattuna palleitin korkeus. ULD:n numeroon sisältyy

siis ULD:n standardi, sarjanumero ja lentoyhtiön tunnus. Kun tiedot on syötetty, sijoittaa tietokoneohjelma ULD:t optimaalisimmalla tavalla lentokoneen ruuman eri positiioihin (Abgas et al. 2021, s. 28). Alla olevassa kuvassa 10 on kuvakaappaus valmiista sähköisestä kuormausohjeesta.

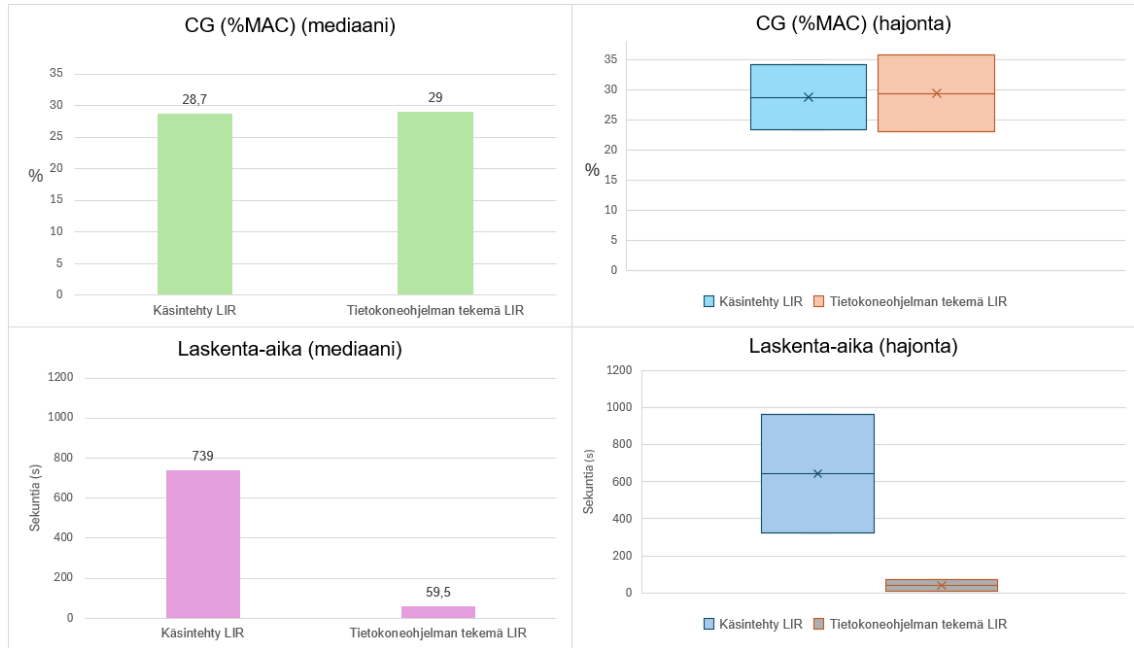
The screenshot displays a cargo loading simulation interface. At the top, there are grid positions for ULDs, labeled A through U and AA through PP. Below this, there are sections for CFR, FJR, JLR, LPR, AB, BC, CE, EF, FH, HJ, JK, KM, MP, and CFG, FJG, JLG. A central summary box shows '67030 Total Loaded' and '67030 Total Planned' with an 'INDEX: 34.13'. Below this, there are sections for FWD LD: 8415 | MAX: 18869 and AFT LD: 9025 | MAX: 16828. The bottom right shows 'Flight Info' and a trash icon.

ULD	Weight (Kg)
PAG 00025EA	1170
PAG 00014EA	1640
PMC 00020EA	1925
PAG 00024EA	2100
PMC 00026EA	2165
PAG 00017EA	2245
PAG 00022EA	2290
PAG 00010EA	2405
PMC 00019EA	2451
PAG 00012EA	2620
PMC 00027EA	1035
PAG 00023EA	1611
PAG 00013EA	1926
PMC 00018EA	1960
PMC 00009EA	2120
PAG 00018EA	2180
PAG 00021EA	2285
PAG 00011EA	2360
PAG 00015EA	2435
PMC 00008EA	2495
PMC 00034EA	1600
PMC 00033EA	1860
PMC 00031EA	1865
PMC 00032EA	2100
PLA 00000EA	990
31P	2380
32P	2375
33P	2145
41P	2145
42P	2125
43P	2125
51B	1900
53B	1900
54B	1900
55B	1900

Kuva 10. Simulaatiolla generoitu kuormausohje (Abgas et al. 2021, s. 28)

Kuvassa 10 eri positiokonfiguraatiot ovat aseteltu riveittäin ja allekkain, sekä jokainen ULD on sijoitettu johonkin positiioon, mahdollistaen myös eri positiokonfiguraatioiden ristiin käytön. Tämän jälkeen tietokoneohjelmasta saa ulos kuormauslaskelmat, jonka avulla lentokoneen kapteeni tekee tarvittavat suorituskykylaskelmat lentoonlähtöä ja lentoa varten. (Abgas et al. 2021)

Samoin kuin luvussa 3.2 esitellyissä optimointimalleissa, Abgas et al. (2021) ovat myös tehneet suorituskykyvertailua omalle työkalulleen. Koska Abgas et al. (2021) mukaan Turkish Airlines käyttää edelleen vain LM:n käsintekemiä kuormausohjeita, verrataan tietokoneohjelman lopputulosta nimenomaan käsintehtyyn kuormausohjeeseen. Testejä suoritettiin 50 kappaletta, ja niissä hyödynnettiin oikeita kuormia eri lennoilta (Abgas et al. 2021). Tulokset tästä vertailusta löytyvät alla olevasta kuvasta 11.



Kuva 11. Massakeskipisteen sijainnin ja laskenta-ajan vertailun tulokset (muokattu lähteestä Abgas et al. 2021 s. 29)

Kuvasta 11 voidaan selvästi huomata tietokoneen nopeuden edun ihmisen aivotyöhön verrattuna. Vaikka massakeskipisteen sijainnin arvoissa ei juurikaan ole eroa, lyhyillä lentokoneen käännoillä on huomattava merkitys, meneekö kuormausohjeen laatimiseen yli kymmenen minuuttia vai alle minuutti. Abgas et al. (2021) huomauttavat myös, että mikäli lastaukseen tulee viimehetken muutoksia, mikä on yleistä, pystyy heidän tietokoneohjelmansa laskemaan uuden kuormausohjeen hetkessä. Käsintehtyillä suunnitelmalla jokainen muutos toisi merkittävää lisätyötä LM:lle.

4.3 Saavutettavat hyödyt

Kuten jo luvussa 2.3 mainittiin, massakeskipisteen sijainnilla on merkittävä lentokoneen kokemaan aerodynaamiseen vastukseen. Kuvan 2 mukaisesti epäoptimaalinen massakeskipisteen sijainti saattaa aiheuttaa jopa 10 % lisän kokonaisvastukseen. Kokonaisvastuksen lisääntyminen taas pienentää koneen kantamaa, joka määritellään Nicolai et al. (2010 s. 84) mukaan

$$R = \frac{V}{C} \frac{L}{D} \ln \left[\frac{W_i}{W_f} \right]. \quad (12)$$

Yhtälöä 12 kutsutaan *Breguetin kantamayhtälöksi*. Siinä termi $\frac{V}{C}$ on lentonopeuden suhde polttoainen ominaiskulutukseen (TSFC, engl. Thrust Specific Fuel Consumption), $\frac{L}{D}$ on nosteen suhde lentokoneen kokemaan kokonaisvastukseen ja $\ln \left[\frac{W_i}{W_f} \right]$ on luonnollinen

logaritmi lentokoneen lentoonlähtöpainon ja laskeutumispainon suhteesta. Kuten suoraan kaavasta voidaan huomata, mitä isompi kokonaisvastus D on, sitä pienempi on kantama R . Lasketaan seuraavaksi optimaalisen ja epäoptimaalisen massakeskipisteen vaikutus lentokoneen teoreettiseen kantamaan Airbus A330 lentokoneen tapauksessa, jota käytettiin esimerkkinä myös Abgas et al. (2021) esittelemässä simulaatiossa luvussa 4.2. Niinpä Van Der Zalm (2024a, 2024b) mukaan

$$V = 880 \frac{km}{h} \quad (13)$$

$$C = 45.0 \frac{kg}{kNh} = 0.045 \frac{kg}{Nh} \quad (14)$$

$$\frac{L}{D} = 15.42. \quad (15)$$

Annettu kaavan 15 nosteen ja vastuksen suhde on optimaalisin arvo kyseiselle lentokoneelle. Laskiessa lopullista kantamaa tulee C :n arvo kertoa kahdella, sillä kyseessä on kaksi moottorin kone. Painot W_i ja W_f voimme ottaa Abgas et al. (2021) esimerkkinä käyttämässä lastauksessa. W_i siis Abgas et al. (2021) mukaan koostuu kuivapainosta (DOW, engl. Dry Operating weight), hyötykuormasta ja polttoaineen määrästä. W_f on taas DOW ja hyötykuorma, sekä jäljelle jäävän polttoaineen määrä, eli matkapolttoaineen (engl. trip fuel) määrän erotus lentoonlähtöpolttoaineen (TOF, engl. take-off fuel) määrästä. Näin ollen

$$W_i = DOW + w_{kuorma} + TOF = 221\,825 \text{ kg} \quad (16)$$

$$W_f = DOW + w_{kuorma} + TOF - TRIP = 183\,825 \text{ kg}. \quad (17)$$

Näillä arvoilla voimme laskea siis optimaalisella massakeskipisteellä teoreettisen kantaman esimerkin lentokoneelle, eli

$$R = \frac{880}{0.045 * 2} \times 15.42 \times \ln \left[\frac{221\,825}{183\,825} \right] \approx 28\,300 \text{ km}. \quad (18)$$

Kuten jo mainittu, pahimmassa skenaariossa epäoptimaalisen massakeskipisteen sijainnin seurauksena voi aerodynaaminen vastus nousta 10 %. Mikäli D :n arvo siis nousisi 10 %, olisi sen seurauksena

$$\frac{L}{D} = \frac{15.42}{1.10} \approx 14.02. \quad (19)$$

Näin ollen uusi teoreettisen kantaman arvo olisi

$$R = \frac{880}{0.045 * 2} \times 14.02 \times \ln \left[\frac{221\,825}{183\,825} \right] \approx 25\,800 \text{ km.} \quad (20)$$

Kun vertailee siis laskujen 18 ja 20 tuloksia, voi huomata, että tässä esimerkkitapauksessa kantama epäoptimaalisella massakeskipisteen sijainnilla laskisi jopa 2 500 *km*. Koska polttoainetta kuluu sama määrä molemmilla matkoilla, on huomattavaa, että optimaalisella massakeskipisteellä voidaan saada merkittävä rahallinen hyöty, kun laskeaan polttoaineen kulutusta per kilometri.

5. YHTEENVETO

Ilmailun hektisessä ja tarkkaan säädellyssä maailmassa on tärkeää saada säästöjä polttoainekulutuksen minimoimisen ja lentokoneiden kääntöaikojen lyhentämisen kautta. Sen lisäksi, että optimointimallien hyödyntämisellä lastaussuunnitelmaa tehdessä voidaan sekä parantaa lentokoneen suorituskykyä ja nopeuttaa suunnitteluprosessia, on sillä myös merkittävä vaikutus lentoturvallisuuteen. Huolimattomasti tehdyllä lastaussuunnitelmalla voi olla katastrofaaliset vaikutukset, jotka pahimmassa tapauksessa vievät ihmishenkiä.

Massakeskipisteen sijainti vaikuttaa monella tapaa lentokoneen kykyyn lentää. Liian takana sijaitseva massakeskipiste lisää sakkauksen riskiä, kun taas liian edessä se voi aiheuttaa lisääntyntä taipumusta syöksymiseen. Merkittävin vaikutus löytyy kuitenkin polttoaineen kulutuksesta. Kun massakeskipisteen ja aerodynaamisen keskipisteen aiheuttamaa momenttia kompensoidaan lentokoneen korkeusvakaimella, syntyy lisääntyneen nosteen tarpeesta indusoitua vastusta. Tämä trimmin aiheuttama indusoitu vastus saattaa kasvattaa lentokoneen kokemaa kokonaisvastusta jopa 10 %. Suuremmilla rahetikoneilla tällainen kasvu vastuksessa saattaa vähentää teoreettista kantamaa tuhansia kilometrejä, jotka ovat taas suoraa rahallista menetystä lentoyhtiölle.

Jotta sijaintia saataisiin mahdollisimman optimaaliseksi, on lastausmestareille kehitetty apuvälineeksi erilaisia työkaluja. Vaikka erilaisilla optimointimalleilla ei lähtökohtaisesti saavuteta parempaa massakeskipisteen sijaintia kuin kokeneen lastausmestarin tekemällä lastausohjeella, voidaan lastauksen suunnitteluun käytettävää laskenta-aikaa kuitenkin lyhentää vain muutamia sekunteihin. Näin ollen yllättävien muutoksien jälkeen, joilta ei voi ilmailussa välttyä, saadaan kääntöprosessin aikana muodostettua useita uusia lastausohjeita.

Optimointimallien heikkous piilee kuitenkin siinä, että jokainen lentokone on täysin erilainen, joten jokaiselle konetyypille tarvitsee muodostaa oma mallinsa. Kombinatorisissa malleissa täytyy myös ottaa huomioon mahdollinen ulottuvuuksien liiallinen määrä, tai niiden riittämättömyys. Mikäli ulottuvuuksia on liian vähän, on hajonta CG:n arvoissa liian suuri, ja jos niitä on liikaa, pitenee laskenta-aika pidemmäksi kuin mitä käsin tehdyssä suunnitelmassa menisi.

LÄHTEET

- ACL Airshop (2025). *Pallets + Specifications*. ACL Airshop. Saatavilla (viitattu 20.5.2025): https://www.aclairshop.com/pallets_specs.php
- Agbas, E. & Kusakci, A.O. (2021). *A simulation approach for aircraft cargo loading considering weight and balance constraints*. International journal of business ecosystem & strategy. vol.3(1), pp. 21–31.
- Amadeus (2015). *Altéa Departure Control – Flight Management*. Youtube. Saatavilla (viitattu 18.4.2025.): <https://youtu.be/el02owGYiH4?si=DipBK1QKtBWjGi63>
- Ashford, N., Stanton, H. P. M., & Moore, C. A. (2013). *Airport operations* (Third edition.). McGraw-Hill.
- Asselin, M. (2021). *Operational aircraft performance and flight test practices*. 1st ed. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 1037 p.
- Awrejcewicz, J. (2012). *Classical mechanics: kinematics and statics*. 1st ed. 2012. New York, NY: Springer. 453 p.
- Benson, T. (2025a). *Aerodynamic Center*. NASA. Saatavilla (viitattu 24.3.2025): <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/ac.html>
- Benson, T. (2025b). *Trimmed Aircraft*. NASA. Saatavilla (viitattu 24.3.2025): <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/trim.html>
- Benson, T. (2025c). *Induced Drag Coefficient*. NASA. Saatavilla (viitattu 24.3.2025): <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/induced.html>
- Benson, T. (2025d). *The Lift Coefficient*. NASA. Saatavilla (viitattu 24.3.2025): <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/liftco.html>
- Desai, J., Srivathsan, S., Lai, W. Y., Li, L. & Yu, C. (2023). *An optimization-based decision support tool for air cargo loading*. Computers & industrial engineering. vol.175, 13 p.
- DSV (2025). *Unit load devices*. DSV. Saatavilla (viitattu 19.5.2023): <https://www.dsv.com/en/our-solutions/modes-of-transport/air-freight/unit-load-devices>
- Dusenbury, M., Daku, S., & Laux, R. (2015). *Multi-engine flying: all the aeronautical knowledge required to earn a multi-engine rating on your pilot certificate* (1st ed.). Aviation Supplies & Academics, Inc. 284 p.
- Dusenbury, M. & Ullrich, G. M. (2016). *Aerodynamics for aviators*. Second edition. Newcastle, Washington: Aviation Supplies & Academics, Inc. 230 p.
- Bruce G. (2016). *Boeing B-777F MainDeck Loading timelapse*. Youtube. Saatavilla (viitattu 20.5.2025): <https://youtu.be/OINg49Dz8J0?si=9Yo5tKVDZmbrjgr7>

Gross, D., Ehlers, W., Wriggers, P., Schröder, P. & Müller, R. (2017). *Statics – Formulas and Problems: Engineering Mechanics 1*. 1st ed. 2017. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 240 p.

International Air Transport Association (IATA) (2010). *ULD Technical Manual*. Montreal, Canada: IATA.

International Air Transport Association (IATA) (2025). *Unit Load Devices (ULD)*. IATA. Saatavilla (viitattu 19.5.2025): <https://www.iata.org/en/programs/cargo/cargo-operations/unit-load-devices/>

Kroes, M.J., Rardon, J.R. & Nolan, M.S. (2013). *Aircraft: basic science*. 8th ed. New York, New York: McGraw-Hill Education. 480 p.

LGrima (2021). *Ramp Life: Norwegian B787-9 Cargo Holds HD (26 July 2017)*. Youtube. Saatavilla (viitattu 20.5.2025): https://youtu.be/4mLcl8UyXwU?si=uulSYk_3ezcmuzdH

Lufthansa Cargo (2025a). *Boeing 777F*. Lufthansa Cargo. Saatavilla (viitattu 25.3.2025): <https://www.lufthansa-cargo.com/en/fleet-ulds/fleet/b777f>

Lufthansa Cargo (2025b). *Our Containers. Well packed is half the work*. Lufthansa Cargo. Saatavilla (viitattu 20.5.2025)

Milmo, D. (2012). *Ryanair plan for standing-only plane tickets foiled by regulator*. The Guardian. Saatavilla (viitattu 5.3.2025): <https://www.theguardian.com/business/2012/feb/28/ryanair-standing-only-plane-tickets-regulator>

Minihane, J. (2020). *How Finnair is keeping cargo moving with passenger planes*. Finnair. Saatavilla (viitattu 25.3.2025): <https://www.finnair.com/en/bluewings/world-of-finnair/how-finnair-is-keeping-cargo-moving-with-passenger-planes-2105304>

Nicolai, L.M. & Carichner, G. (2010). *Fundamentals of aircraft and airship design*. Volume 1, Aircraft design. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 908 p.

Muzik, M. (2017). *Improve Your Load Control Efficiency, Part 5.1: Organizational Aspects*. Lufthansa Systems. Saatavilla (viitattu 25.3.2025): <https://www.lhsystems.com/blog-entry/improve-your-load-control-efficiency-part-51-organizational-aspects>

NTSB (2015). *Steep Climb and Uncontrolled Descent During Takeoff*, Accident Report. National Transportation Safety Board. 98 p.

Shpati, G. (2011). *Aircraft CG Envelopes*. Society of Allied Weight Engineers (SAWE). 40 p.

Van Der Zalm, B. (2024a). *performance calculations for the General Electric CF6-80E1A2 aircraft engine*. Aircraft investigation. Saatavilla (viitattu 20.5.2025): https://aircraftinvestigation.info/airplanes/GE_CF6-80E1.html

Van Der Zalm, B. (2024b). *weight and performance calculations for the Airbus A330-200 WV020*. Aircraft Investigation. Saatavilla (viitattu 20.5.2025): <https://aircraftinvestigation.info/airplanes/A330-200.html>

Wittmer, A. (2011). *Aviation Systems: Management of the Integrated Aviation Value Chain* (1st ed. 2011.). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20080-9>. 247 p.

Zhao, X., Dong, Y. & Zuo, L. (2023). *A Combinatorial Optimization Approach for Air Cargo Palletization and Aircraft Loading*. Mathematics (Basel). Vol.11(13), 16 p.

LIITE A: KOMBINATORISEN OPTIMOINNIN PARAMETRIT

Alla olevassa taulukossa on listattuna lähteestä Zhou et al. (2023) liitteissä B, C ja D käytettävät parametrit.

Para.	Explanation	Para.	Explanation
j	Index of predefined positions.	(M)TOW	(Maximum) takeoff weight
P	The set of all available positions.	(M)LW	(Maximum) landing weight
w_j	The loading weight in position j .	(M)ZFW	(Maximum) zero-fuel weight
W_j	The maximum weight of position j .	MPL	Maximum payload of aircraft
T_j	The type of position j	OEW	Operation empty weight
BA_j	The balance arm of position j .	CG_{TOW}	The CG of TOW
%MAC	The value of CG.	CG_{target}	The given target CG
O_j	The overlapping position set of j .	TOF	Takeoff fuel
Sp	A set of pairs of positions side by side in the main deck.	TF	Trip fuel
Lp	The set of left positions.	FI	Index of TOF
Rp	The set of right positions.	IND_{ω}	The INDEX at weight ω
Cp	A set of pairs of combined positions that have approximate values of BAs between main deck and low decks.	IND_{ω}^{FWD}	The forward index limit at weight ω
		IND_{ω}^{AFT}	The aft index limit at weight ω

Para.	Explanation	Para.	Explanation
i	Index of items of bulk cargo	u	Index of ULD
I	The set of items available	U	The set of ULDs available
N_I	The total number of items available	N_U	The total number of ULDs available
w_i	The weight of item i	w_u	The weight of ULD u
v_i	The volume of item i	T_u	Type of ULD u
W_u	Maximum weight of ULD u	V_u	Maximum volume of ULD u

LIITE B: BOM OPTIMOINTIMALLI

BOM optimointimalli lähteestä Zhou et al. (2023). Juokseva numerointi oikealla viittaa tehtävän numeroon.

$$\text{Maximize} \quad \sum_{j \in \mathbf{P}} \sum_{u \in \mathbf{U}} w_u \cdot y_{uj} \quad (6)$$

$$\text{Minimize} \quad |CG_{TOW} - CG_{\text{target}}| \quad (7)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{j \in \mathbf{P}} y_{uj} \leq 1 \quad \forall u \in \mathbf{U} \quad (8)$$

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} y_{uj} \leq 1 \quad \forall j \in \mathbf{P} \quad (9)$$

$$M \cdot (1 - y_{uj}) \geq |T_u - T_j| \quad \forall u \in \mathbf{U}, j \in \mathbf{P} \quad (10)$$

$$y_{u_1, j_1} + y_{u_2, j_2} \leq 1 \quad \forall u_1, u_2 \in \mathbf{U}, u_1 \neq u_2; \forall j_1 \in \mathbf{P}; \forall j_2 \in \mathbf{O}_{j_1} \quad (11)$$

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} w_u y_{uj} \leq W_j \quad \forall j \in \mathbf{P} \quad (12)$$

$$\alpha_{j_m} \cdot \sum_{u_1 \in \mathbf{U}} w_{u_1} \cdot y_{u_1, j_m} + \sum_{u_2 \in \mathbf{U}} w_{u_2} \cdot y_{u_2, j_l} \leq \text{Max}W_{(j_m, j_l)} \quad \forall (j_m, j_l) \in \mathbf{C}_P \quad (13)$$

$$\sum_{u_1 \in \mathbf{U}} w_{u_1} \cdot y_{u_1, j_{\text{left}}} \leq a_{\text{unsym}} \sum_{u_2 \in \mathbf{U}} w_{u_2} \cdot y_{u_2, j_{\text{right}}} + b_{\text{unsym}} \quad (14)$$

$$\forall (j_{\text{left}}, j_{\text{right}}) \in \mathbf{S}_P$$

$$\sum_{u_1 \in \mathbf{U}} w_{u_1} \cdot y_{u_1, j_{\text{right}}} \leq a_{\text{unsym}} \sum_{u_2 \in \mathbf{U}} w_{u_2} \cdot y_{u_2, j_{\text{left}}} + b_{\text{unsym}} \quad (15)$$

$$\forall (j_{\text{left}}, j_{\text{right}}) \in \mathbf{S}_P$$

$$\sum_{j \in \mathbf{P}} \sum_{i \in \mathbf{U}} w_u \cdot y_{uj} \leq \text{MPL} \quad (16)$$

$$\left| \sum_{j_{\text{left}} \in \mathbf{P}_L} \sum_{u_1 \in \mathbf{U}} w_{u_1} \cdot y_{u_1, j_{\text{left}}} - \sum_{j_{\text{right}} \in \mathbf{P}_R} \sum_{u_2 \in \mathbf{U}} w_{u_2} \cdot y_{u_2, j_{\text{right}}} \right| \quad (17)$$

$$\leq a_{\text{LatTOW}} \cdot \text{TOW} + b_{\text{LatTOW}}$$

$$\left| \sum_{j_{\text{left}} \in \mathbf{P}_L} \sum_{u_1 \in \mathbf{U}} w_{u_1} \cdot y_{u_1, j_{\text{left}}} - \sum_{j_{\text{right}} \in \mathbf{P}_R} \sum_{u_2 \in \mathbf{U}} w_{u_2} \cdot y_{u_2, j_{\text{right}}} \right| \quad (18)$$

$$\leq a_{\text{LatLW}} \cdot \text{LW} + b_{\text{LatLW}}$$

$$\text{IND}_{\omega}^{\text{FWD}} \leq \text{IND}_{\omega} \leq \text{IND}_{\omega}^{\text{AFT}} \quad \omega \in \{\text{TOW}, \text{LW}, \text{ZFW}\} \quad (19)$$

$$y_{uj} \in \{0, 1\} \quad \forall u \in \mathbf{U}, j \in \mathbf{P} \quad (20)$$

LIITE C: COM OPTIMOINTIMALLI

COM optimointimalli lähteestä Zhou et al. (2023). Juokseva numerointi oikealla viittaa tehtävän numeroon.

$$\text{Maximize} \quad \sum_{j \in \mathbf{P}} \sum_{u \in \mathbf{U}} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i x_{iuj} \quad (26)$$

$$\text{Minimize} \quad |CG_{TOW} - CG_{\text{target}}| \quad (27)$$

$$\text{Subject to:} \quad \sum_{j \in \mathbf{P}} \sum_{u \in \mathbf{U}} x_{iuj} \leq 1 \quad \forall i \in \mathbf{I} \quad (28)$$

$$\sum_{j \in \mathbf{P}} x_{iuj} \leq 1 \quad \forall i \in \mathbf{I}, u \in \mathbf{U} \quad (29)$$

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} x_{iuj} \leq 1 \quad \forall i \in \mathbf{I}, j \in \mathbf{P} \quad (30)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{I}} v_i x_{iuj} \leq V_u \quad u \in \mathbf{U}, j \in \mathbf{P} \quad (31)$$

$$\mathbf{M} \cdot (1 - x_{iuj}) \geq |T_u - T_j| \quad \forall i \in \mathbf{I}, u \in \mathbf{U}, j \in \mathbf{P} \quad (32)$$

$$x_{i_1, u_1, j_1} + x_{i_2, u_2, j_2} \leq 1 \quad \forall i_1, i_2 \in \mathbf{I}, u_1, u_2 \in \mathbf{U}, j_1 \in \mathbf{P}, j_2 \in \mathbf{O}_{j_1} \quad (33)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{I}} w_i x_{iuj} \leq \min\{W_u, W_j\} \quad \forall u \in \mathbf{U}, j \in \mathbf{P} \quad (34)$$

$$\alpha_{j_m} \cdot \sum_{u_1 \in \mathbf{U}} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{i, u_1, j_m} + \sum_{u_2 \in \mathbf{U}} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{i, u_2, j_l} \leq \text{Max}W_{(j_m, j_l)} \quad (35)$$

$$\forall (j_m, j_l) \in \mathbf{C}_P$$

$$\sum_{u_1 \in \mathbf{U}} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{i, u_1, j_{\text{left}}} \leq a_{\text{unsym}} \sum_{u_2 \in \mathbf{U}} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{i, u_2, j_{\text{right}}} + b_{\text{unsym}} \quad (36)$$

$$\forall (j_{\text{left}}, j_{\text{right}}) \in \mathbf{S}_P$$

$$\sum_{u_1 \in \mathbf{U}} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{i, u_1, j_{\text{right}}} \leq a_{\text{unsym}} \sum_{u_2 \in \mathbf{U}} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{i, u_2, j_{\text{left}}} + b_{\text{unsym}} \quad (37)$$

$$\forall (j_{\text{left}}, j_{\text{right}}) \in \mathbf{S}_P$$

$$\sum_{j \in \mathbf{P}} \sum_{i \in \mathbf{U}} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{iuj} \leq \text{MPL} \quad (38)$$

$$\left| \sum_{j_{\text{left}} \in \mathbf{P}_L} \sum_{u_1 \in \mathbf{U}} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{i, u_1, j_{\text{left}}} - \sum_{j_{\text{right}} \in \mathbf{P}_R} \sum_{u_2 \in \mathbf{U}} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{i, u_2, j_{\text{right}}} \right| \quad (39)$$

$$\leq a_{\text{LatTOW}} \cdot \text{TOW} + b_{\text{LatTOW}}$$

$$\left| \sum_{j_{\text{left}} \in \mathbf{P}_L} \sum_{u_1 \in \mathbf{U}} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{i, u_1, j_{\text{left}}} - \sum_{j_{\text{right}} \in \mathbf{P}_R} \sum_{u_2 \in \mathbf{U}} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{i, u_2, j_{\text{right}}} \right| \quad (40)$$

$$\leq a_{\text{LatLW}} \cdot \text{LW} + b_{\text{LatLW}}$$

$$\text{IND}_{\omega}^{\text{FWD}} \leq \text{IND}_{\omega} \leq \text{IND}_{\omega}^{\text{AFT}} \quad \forall i \in \mathbf{L}, \omega \in \{\text{TOW}, \text{LW}, \text{ZFW}\} \quad (41)$$

$$x_{iuj} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathbf{I}, u \in \mathbf{U}, j \in \mathbf{P} \quad (42)$$

LIITE D: IOM OPTIMOINTIMALLI

IOM optimointimalli lähteestä Zhou et al. (2023). Juokseva numerointi oikealla viittaa tehtävän numeroon.

$$\text{Maximize} \quad \sum_{j \in \mathbf{P}} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{ij} \quad (43)$$

$$\text{Minimize} \quad |CG_{TOW} - CG_{\text{target}}| \quad (44)$$

$$\text{Subject to:} \quad \sum_{i \in \mathbf{I}} x_{ij} \leq 1 \quad j \in \mathbf{P} \quad (45)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{ij} \leq W_j \quad \forall j \in \mathbf{P} \quad (46)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{I}} v_i \cdot x_{ik} \leq V_j \quad j \in \mathbf{P} \quad (47)$$

$$x_{i_1, j_1} + x_{i_2, j_2} \leq 1 \quad \forall i_1, i_2 \in \mathbf{I}, i_1 \neq i_2; \forall j_1 \in \mathbf{P}; \forall j_2 \in \mathbf{O}_{j_1} \quad (48)$$

$$\alpha_{j_m} \cdot \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{ij_m} + \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{ij_l} \leq \text{Max}W_{(j_m, j_l)} \quad \forall (j_m, j_l) \in \mathbf{C}_P \quad (49)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{i, j_{\text{left}}} \leq a_{\text{unsym}} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{i, j_{\text{right}}} + b_{\text{unsym}} \quad \forall (j_{\text{left}}, j_{\text{right}}) \in \mathbf{S}_P \quad (50)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{i, j_{\text{right}}} \leq a_{\text{unsym}} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{i, j_{\text{left}}} + b_{\text{unsym}} \quad \forall (j_{\text{left}}, j_{\text{right}}) \in \mathbf{S}_P \quad (51)$$

$$\sum_{j \in \mathbf{P}} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{ij} \leq \text{MPL} \quad (52)$$

$$\left| \sum_{j_{\text{left}} \in \mathbf{P}_L} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{i, j_{\text{left}}} - \sum_{j_{\text{right}} \in \mathbf{P}_R} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{i, j_{\text{right}}} \right| \leq a_{\text{LatTOW}} \cdot TOW + b_{\text{LatTOW}} \quad (53)$$

$$\left| \sum_{j_{\text{left}} \in \mathbf{P}_L} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{i, j_{\text{left}}} - \sum_{j_{\text{right}} \in \mathbf{P}_R} \sum_{i \in \mathbf{I}} w_i \cdot x_{i, j_{\text{right}}} \right| \leq a_{\text{LatLW}} \cdot LW + b_{\text{LatLW}} \quad (54)$$

$$\text{IND}_{\omega}^{\text{FWD}} \leq \text{IND}_{\omega} \leq \text{IND}_{\omega}^{\text{AFT}} \quad \forall l \in \mathbf{L}, \omega \in \{TOW, LW, ZFW\} \quad (55)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathbf{I}, j \in \mathbf{P} \quad (56)$$