



Boeing 737 MAX LOC-I-lento- onnettomuudet

Mikko Räihä

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2024

Konetekniikka
Lentokonetekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Lentokonetekniikka

RÄIHÄ, MIKKO:
Boeing 737 MAX LOC-I-lento-onnettomuudet

Opinnäytetyö 66 sivua
Toukokuu 2024

Tämä opinnäytetyö käsittelee lokakuussa 2018 ja maaliskuussa 2019 tapahtuneita Boeing 737 MAX 8 -lentokoneiden LOC-I-lento-onnettomuuksia. Nämä kaksi onnettomuutta vaativat yhteensä 346 kuolonuhria ja johtivat lähes kaksi vuotta kestäneeseen globaaliin 737 MAX:n lentokieltoon. Opinnäytetyö on kirjoitushetkellä todennäköisesti ainoa Suomessa julkaistu tutkimus, jossa tarkastellaan kyseisiä onnettomuuksia. Opinnäytetyö toteutettiin kvalitatiivisena tutkimuksena, jossa tutkimusmenetelmänä on narratiivinen kuvaileva kirjallisuuskatsaus ja tutkimustapana ekstensiivinen tapaustutkimus. Opinnäytetyön teoreettisena viitekehysenä toimii ilmailun onnettomuustutkinnassa yleisesti käytetty James T. Reasonin teoria latenteista inhimillisistä virheistä kompleksisissa järjestelmissä. Teoria tunnetaan yleisemmin Reasonin reikäjuustomallina. Opinnäytetyö pyrkii selvittämään, tukevatko Boeing 737 MAX:n LOC-I-onnettomuudet Reasonin reikäjuustomallia onnettomuuksien synnystä ja millä toimenpiteillä lentäjät voivat varmistaa lennon turvallisen jatkumisen, kun MCAS aktivoituu ei-toivotusti.

Molempien tapausten onnettomuustutkinnat osoittivat, että onnettomuudet syntyivät latenttien ja aktiivisten virheiden yhteisvaikutuksesta. Suurin osa onnettomuustutkintaviranomaisten esiin nostamista juurisyistä olivat keskeisin osin lähestulkoon identtisiä molemmissa onnettomuuksissa. Opinnäytetyön havaintojen perusteella tutkimuksessa käsiteltävät onnettomuudet tukevat Reasonin reikäjuustomallia. Tutkimuksessa tunnistettiin neljä erilaista vaihtoehtoista toimintatapaa, joilla lentäjät voivat varmistaa lennon turvallisen jatkumisen kohdatessaan ei-toivotun MCAS:n aktivoitumisen. Mahdollisesti suurin yksittäinen juurisyy onnettomuuksien syntymiselle oli kuitenkin Boeingin päättämä ja FAA:n hyväksymä linjaus jättää kaikki tieto MCAS:sta kokonaan pois lentäjien eroavaisuuskoulutuksesta ja käsikirjoista.

Opinnäytetyössä tunnistettuja jatkotutkimusaiheita ovat esimerkiksi, miten MAX-varianttien alkuperäinen tyyppihyväksyntäprosessi eteni ja kuinka paljon valvontavastuutaan FAA delegoi Boeingille, minkälainen oli uusi tyyppihyväksyntäprosessi globaalin lentokiellon jälkeen ja miten käytännöt erosivat eri ilmailuviranomaisten menettelyssä sekä miten MCAS:n järjestelmäarkkitehtuuri olisi pitänyt suunnitella ja ohjelmoida, jotta onnettomuuksia ei olisi syntynyt.

Asiasanat: onnettomuustutkinta, lento-onnettomuus, boeing 737 max, mcas

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Aircraft Engineering

RÄIHÄ, MIKKO:
Boeing 737 MAX LOC-I Accidents

Bachelor's thesis 66 pages
May 2024

This bachelor's thesis deals with the Loss of Control In-flight (LOC-I) accidents of Boeing 737 MAX 8 aircraft that occurred in October 2018 and March 2019. These two accidents resulted in a total of 346 fatalities and led to a nearly two-year-long global grounding of the 737 MAX. At the time of writing, this thesis is likely the only published study in Finland examining these accidents. The thesis was conducted as a qualitative study, utilizing a narrative descriptive literature review as the research method and an extensive case study as the research approach. The theoretical framework of the thesis is based on James T. Reason's theory on the contribution of latent human failures to the breakdown of complex systems, commonly known as Reason's Swiss cheese model of accident causation. The thesis aims to determine whether the Boeing 737 MAX LOC-I accidents support Reason's Swiss cheese model of accident causation and what possible actions pilots can take in the event of uncommanded MCAS activation to ensure the safe continuation of flight.

The accident investigations showed that both accidents occurred as a result of multiple latent and active failures. Most of the root causes highlighted by accident investigation authorities were largely identical in both cases. Based on the observations of the thesis, the accidents discussed in the study support Reason's Swiss cheese model of accident causation. Four different possible courses of action were identified in the thesis, through which pilots can ensure the safe continuation of flight when facing uncommanded MCAS activation. However, the potentially largest single root cause for the accidents was Boeing's decision, approved by the FAA, to entirely omit all information concerning MCAS from pilot differences training and relevant flight manuals.

Some of the further research topics identified in the thesis include investigating how the original type certification process of the MAX variants progressed and the extent to which the FAA delegated its oversight responsibility to Boeing, examining the new type certification process after the global grounding and how practices differed among various aviation authorities, and exploring how the system architecture of MCAS should have been designed and programmed to prevent the accidents discussed in this study.

Key words: accident investigation, aviation accident, boeing 737 max, mcas

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	BOEING.....	10
	2.1 Boeing yrityksenä.....	10
	2.1.1 Commercial Airplanes	10
	2.1.2 Defense, Space & Security.....	11
	2.1.3 Boeing Global Services	12
	2.2 Boeing 737:n historia	12
	2.2.1 Original	13
	2.2.2 Classic.....	16
	2.2.3 Next Generation	21
	2.2.4 MAX.....	26
3	737 MAX LOC-I-ONNETTOMUUDET.....	33
	3.1 James T. Reasonin reikäjuustomalli.....	33
	3.2 Lion Air JT610.....	35
	3.2.1 Tapahtumien kulku	35
	3.2.2 Lion Air JT043	39
	3.2.3 Keskeiset löydökset.....	41
	3.2.4 Vaikuttavat tekijät	43
	3.3 Ethiopian Airlines ET302.....	45
	3.3.1 Tapahtumien kulku	45
	3.3.2 Keskeiset löydökset.....	48
	3.3.3 Vaikuttavat tekijät	51
4	MCAS	53
	4.1 Järjestelmän toiminta	53
	4.2 Functional Hazard Assessment.....	54
	4.3 Toimenpiteet MCAS:n ei-toivotussa aktivoitumisessa.....	55
5	POHDINTA	57
	LÄHTEET.....	59

LYHENTEET JA TERMIT

AFM	Aircraft Flight Manual (suom. Lentokoneen lentokäsikirja)
AFML	Aircraft Flight Maintenance Log (suom. Lentokoneen huoltoloki)
AND	Aircraft Nose Down (suom. Lentokoneen negatiivinen asentokulma)
ANU	Aircraft Nose Up (suom. Lentokoneen positiivinen asentokulma)
AOA	Angle of Attack (suom. Kohtauskulma)
ASR	Air Safety Report (suom. Lentoturvallisuusraportti)
BAC	British Aircraft Corporation. Brittiläinen lentokonevalmistaja (1960–1977).
BBJ	Boeing Business Jet. Liikelentokoneeksi muokattu Boeingin matkustajalentokone.
BCA	Boeing Commercial Airplanes. Boeingin kaupallisten ilma-alusten liiketoimintayksikkö.
BDS	Boeing Defense, Space & Security. Boeingin puolustus toimialan liiketoimintayksikkö.
BGS	Boeing Global Services. Boeingin tukitoimien liiketoimintayksikkö.
CBT	Computer-Based Training (suom. Tietokoneavusteinen opiskelu)
CRM	Crew Resource Management (suom. Miehistöresursien hallinta)
CVR	Cockpit Voice Recorder (suom. Ohjaamonauhuri)
DFDR	Digital Flight Data Recorder (suom. Digitaalinen lentoarvotallennin)
EAIB	Ethiopian Aircraft Accident Investigation Bureau. Etiopian turvallisuustutkintaviranomainen.
EFIS	Electronic Flight Instrument System (suom. Elektroninen lennonvalvontamittaristo)

EGPWS	Enhanced Ground Proximity Warning System (suom. Laajennettu maan läheisyydestä varoittava järjestelmä)
EICAS	Engine-Indicating and Crew-Alerting System (suom. Moottorinvalvonta- ja miehistön hälytysjärjestelmä)
EWIS	Electrical Wiring Interconnection System (suom. Sähköinen johdotusliitännäjärjestelmä)
FAA	Federal Aviation Administration (suom. Yhdysvaltain ilmailuhallinto)
FCOM	Flight Crew Operating Manual (suom. Ohjaamomiehistön lentokäsikirja)
FD	Flight Director (suom. Lennonohjausjärjestelmä)
FDR	Flight Data Recorder (suom. Lentoarvotallennin)
FHA	Functional Hazard Assessment (suom. Toiminnallinen riskikartoitus)
FMC	Flight Management Computer (suom. Lennonhallintatietokone)
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis (suom. Vika- ja vaikutusanalyysi)
FTA	Fault Tree Analysis (suom. Vikapuuanalyysi)
IAS	Indicated Airspeed (suom. Mittarinopeus)
KLM	Koninklijke Luchtvaart Maatschappij. Hollantilainen lentoyhtiö.
KNKT	Komite Nasional Keselamatan Transportasi. Indonesian turvallisuustutkintaviranomainen.
LOC-I	Loss of Control In-flight (suom. Ilma-aluksen hallinnan menetys lennon aikana)
MAX	Boeing 737:n neljännen sukupolven mallinimi
MCAS	Maneuvering Characteristics Augmentation System. Boeing 737 MAX:n sakkauksenestojärjestelmä.
MSA	Malaysia-Singapore Airlines. Malesialais-singaporelainen lentoyhtiö (1966–1972).
MSA	Minimum Sector Altitude (suom. Minimi sektorikorkeus)
MTOW	Maximum Take-Off Weight (suom. Suurin sallittu lentoonlähtömassa)

NASA	National Aeronautics and Space Administration (suom. Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallinto)
NG	Next Generation. Boeing 737:n kolmannen sukupolven mallinimi.
NTSB	National Transportation Safety Board (suom. Yhdysvaltain kansallinen liikenneturvallisuuslautakunta)
P&W	Pratt & Whitney. Yhdysvaltalais-kanadalainen moottorivalmistaja.
PF	Pilot Flying (suom. Ohjaava ohjaaja)
PFD	Primary Flight Display (suom. Perusmittarinäyttö)
PM	Pilot Monitoring (suom. Avustava ohjaaja)
QRH	Quick Reference Handbook (suom. Pikaohjekirja)
SID	Standard Instrument Departure (suom. Vakiolähtöreitti)
SMYDC	Stall Management and Yaw Damper Computer. Boeing 737 MAX:n ohjausjärjestelmän tietokone.
SOP	Standard Operating Procedure (suom. Vakioitu toimintaohje)
STS	Speed Trim System. Boeing 737:n Classic- ja NG-sukupolvien nopeusstabiliteettia parantava järjestelmä.
TAS	True Airspeed (suom. Tosi-ilmanopeus)
UA	United Airlines. Yhdysvaltalainen lentoyhtiö.
V_{MIN}	Minimum Operating Speed (suom. Pienin sallittu ope- rintinopeus)
V_{MO}	Maximum Operating Speed (suom. Suurin sallittu ope- rintinopeus)

1 JOHDANTO

Koko maailma järkyttyi 29.10.2018, kun Lion Airin Boeing 737 MAX 8 törmäsi Jaavanmereen Jakartan edustalla Indonesiassa. Kaikki lentokoneessa olleet 189 ihmistä menehtyivät. Kun alle viisi kuukautta myöhemmin, 10.3.2019, Ethiopian Airlinesin 737 MAX 8 törmäsi maahan Addis Abeban vieressä Etiopiassa vaatiin 157 kuolonuhria, kävi selväksi, ettei kyse ollut enää yksittäistapauksesta tai pelkästä lentäjien inhimillisestä virheestä. Näitä valitettavia tapahtumia seurasi 737 MAX:n lähes kaksi vuotta kestänyt globaali lentokielto ja kattavat onnettomuustutkinnot. Tässä tutkimuksessa pyritään pureutumaan kyseisten onnettomuuksien tapahtumiin, taustoihin, juurisyihin ja jossain määrin myös seuraamuksiin.

Tämä opinnäytetyö lienee ensimmäinen ja siten toistaiseksi ainoa tutkimus Suomessa, jossa tarkastellaan kyseisiä onnettomuuksia. Suomalaisissa korkeakouluissa on muutenkin julkaistu verrattain vähän opinnäytteitä tai tutkimuksia, jotka käsittelevät lento-onnettomuustutkimusta. Havaittavissa on siis selvä tutkimusaukko, johon tällä työllä pyritään osaltaan vastaamaan. Kyseessä on kvalitatiivinen tutkimus, jossa tutkimusmenetelmänä on narratiivinen kuvaileva kirjallisuuskatsaus ja tutkimustapana ekstensiivinen tapaustutkimus. Narratiivista kirjallisuuskatsausta käytetään, kun halutaan luoda laaja ymmärrys käsiteltävästä aihealueesta, tai halutaan valottaa aiheen historiaa ja kehityskulkua. Narratiivisen kirjallisuuskatsauksen lopputuotteena on ytimekäs ja johdonmukainen kuvaileva synteesi (Salminen 2011, 7). Ekstensiivisessä tapaustutkimuksessa vertaillaan useampia tapauksia ja pyritään tunnistamaan niistä yhteisiä ominaisuuksia, malleja, teoreettisia ideoita sekä käsitteitä. Tapaukset toimivat välineinä ilmiöiden tutkimisessa (Eriksson & Koistinen 2005, 17).

Opinnäytetyön teoreettisena viitekehyksenä toimii ilmailun onnettomuustutkinnaissa yleisesti käytetty James T. Reasonin teoria latenteista inhimillisistä virheistä kompleksisissa järjestelmissä. Teoria tunnetaan yleisemmin Reasonin reikäjuustomallina. Työn lähdeaineistona on käytetty virallisten onnettomuustutkimusraporttien lisäksi useita vertaisarvioituja tieteellisiä artikkeleita sekä lukuisia uutisia ja muita ei-tieteellisiä lähteitä. Työ pyrkii vastaamaan kahteen tutkimuskysymykseen, jotka ovat:

1. Tukevatko Boeing 737 MAX:n LOC-I-onnettomuudet James T. Reasonin reikäjuustomallia onnettomuuksien synnystä?
2. Millä toimenpiteillä lentäjät voivat varmistaa lennon turvallisen jatkumisen, kun MCAS aktivoituu ei-toivotusti?

Opinnäytetyön toisessa luvussa esitellään Boeing yrityksenä, sekä perehdytään 737:n historiaan ja ominaisuuksiin aina koneperheen ensimmäisestä sukupolvesta uusimpiin MAX-variantteihin. Tämä tuo lukijalle historiallista perspektiiviä tiettyihin 737:n keskeisiin suunnitteluvalintoihin, jotka ovat vaikuttaneet omalta osaltaan myös MAX-variantteihin ja opinnäytetyön keskiössä olevaan MCAS-järjestelmään (Maneuvering Characteristics Augmentation System). Kolmannessa luvussa esitellään työn teoreettinen viitekehys ja käsitellään työn aineistona olevien onnettomuuksien tapahtumat, sekä keskeiset syyt kyseisten onnettomuuksien syntyyn. Neljännessä luvussa tiivistetään ja osittain myös laajennetaan ymmärrystä MCAS:n toiminnasta ja järjestelmän suunnittelusta. Työn viimeisessä, viidennessä luvussa, muodostetaan narratiivisen kirjallisuuskatsauksen hengessä ytimekäs johdonmukainen kuvaileva synteesi ja vastataan edellä esiteltyihin tutkimuskysymyksiin.

2 BOEING

Tässä luvussa tutustutaan pintapuolisesti Boeingiin yrityksenä sekä perehdytään 737:n historiaan ja kehityskaareen ensimmäisen sukupolven lentokoneista aina nykypäivään. Tutkimuksessa on keskitytty lentoyhtiötoiminnan kannalta keskeisiin matkustajavariantteihin, eikä luvussa käsitellä juurikaan 737:ään pohjaavia sotilaskoneita tai siviilikäyttöön rakennettuja erikoisversioita.

2.1 Boeing yrityksenä

Boeing on yhdysvaltalaislähtöinen monikansallinen yritys, joka suunnittelee, valmistaa ja myy muun muassa lentokoneita, helikoptereita, puolustustarvikkeita ja satelliitteja. Boeing on globaalisti yksi ilmailu- ja puolustusteollisuusalan suurimmista yrityksistä ja Yhdysvaltain suurin vientiyritys. Boeingin pääkonttori sijaitsee Arlingtonissa Virginian osavaltiossa ja yrityksellä on palveluksessaan noin 171 000 työntekijää. Boeingin liikevaihto vuonna 2023 oli 77,79 miljardia dollaria. (Boeing n.d.)

Boeing jakaantuu nykymuodossaan kolmeen liiketoimintayksikköön, jotka ovat *Commercial Aeroplanes*, *Defense, Space & Security* ja *Boeing Global Services*. Näiden kolmen liiketoimintayksikön lisäksi Boeingilla on muuta ydinliiketoimintaa tukeva erillinen rahoitusalan tytäryhtiö *Boeing Capital Corporation*, joka on jätetty tämän työn tarkastelun ulkopuolelle. (Boeing n.d.)

2.1.1 Commercial Airplanes

Boeing Commercial Airplanes (BCA) suunnittelee, kokoonpanee, markkinoi ja myy matkustajakäyttöön tarkoitettuja lentokoneita. BCA:n liikevaihto vuonna 2023 oli 33,9 miljardia dollaria, joten se kattaa noin 43,6 % koko Boeing-konsernin liikevaihdosta. Työntekijöitä BCA:lla oli vuoden 2023 lopussa hieman alle 48 000. (Boeing 2023, 3)

BCA:lla on kolme merkittävää tehdasta Yhdysvalloissa. Kaksi niistä sijaitsee Washingtonin osavaltiossa; Rentonissa (kuva 1) valmistetaan nykyään neljännen sukupolven Boeing 737 MAX -variantteja, kolmannen sukupolven 737-800:n runkoon pohjautuvia P-8 Poseidon merivalvontakoneita, sekä 737:ään pohjautuvia erikoiskäyttöön tilattuja Boeing Business Jet (BBJ) -liikemieskoneita, Everetissä valmistetaan puolestaan Boeing 767 ja Boeing 777 -laajarunkokoneita, sekä 767:ään pohjautuvaa KC-46 Pegasus sotilaskuljetus- ja ilmatankkauskonetta. Boeingin kolmas suuri lentokonetehdas sijaitsee North Charlestonin kaupungissa Etelä-Carolinassa, jossa valmistetaan Boeing 787 Dreamliner -laajarunkokoneita. (Boeing 2022b)



KUVA 1. Rentonin tehdas vuonna 2010 (U.S. Department of the Treasury 2010)

2.1.2 Defense, Space & Security

Boeing Defense, Space & Security (BDS) -liiketoimintayksikkö vastaa Boeing-korporaation puolustus- ja avaruusteollisesta tuoteportfoliosta. BDS on yksi maailman suurimmista puolustusalan alihankkijoista. Yksikön palveluksessa on lähes

18 000 työntekijää kahdessakymmenessä maassa ja vuonna 2023 BDS:n liikevaihto oli 24,93 miljardia dollaria. Noin 26 % BDS:n liikevaihdosta tulee ulkomailta asiakkailta, erityisesti Yhdysvaltain keskushallinnon koordinoimasta puolustusteollisuudesta ulkomaisten asevoimien käyttöön. (Boeing 2023, 3)

BDS on uudelleenorganisoitu vuonna 2022 neljään liiketoimintaosa-alueeseen, jotka ovat maailman suurin sotilashelikopterien tuottaja *Vertical Lift*, valvonta-, tiedustelu-, taistelunjohto-, kuljetus- ja pommikonekalustoon erikoistunut *Mobility, Surveillance & Bombers*, ilmaherruushävittäjiä valmistava *Air Dominance*, jonka alaisuuteen kuuluu myös kokeellinen sotilasilma-alusten kehitysyksikkö *Phantom Works*, sekä avaruus-, tiedustelu- ja asejärjestelmiä kehittävä *Space, Intelligence & Weapon Systems*. (Boeing 2022a)

2.1.3 Boeing Global Services

Boeing Global Services (BGS) on tukitoimia tarjoava liiketoimintayksikkö, jonka palvelut keskittyvät toimitusketjun hallintaan, insinööri- ja huoltopalveluihin, koulutus- ja simulaattoritoimintaan, sekä ilmailun digi- ja data-analytiikkaratkaisuihin. BGS:ssa työskentelee noin 22 000 työntekijää yli 70:ssä maassa ja se tarjoaa palveluitaan sekä kaupallisille, että valtiollisille toimijoille. BGS:n liikevaihto oli vuonna 2023 noin 19,13 miljardia dollaria. (Boeing 2018a)

2.2 Boeing 737:n historia

Boeing 737 on kaksimoottorinen kapearunkoinen matkustajasuihkukone, jonka kehitystyö aloitettiin toukokuussa 1964 kahden ilmailuinsinöörin Joe Sutterin ja Jack Steinerin johdolla (Endres 2001, 122). Boeingin tuolloisen markkinatutkimuksen mukaan nähtiin kysyntää 50–60-matkustajapaikkaiselle lentokoneelle, jolla operoitaisiin lyhyitä 100–1600 km pituisia reittejä (Sharpe & Shaw 2001, 12). Boeing oli kehitystyön alkaessa kilpailijoitaan jäljessä, sillä Sud Aviation SE 210 Caravelle oli ollut toiminnassa jo vuodesta 1955 lähtien ja BAC One-Eleven, Douglas DC-9 ja Fokker F28 Fellowship olivat sertifiointiprosessin loppuvaiheissa. Jouduttaakseen kehitystyötä Boeing hyödynsi 737:n suunnittelussa noin

60 % edellisen mallinsa 727:n runkorakenteesta ja järjestelmistä, jonka myötä myös 737:ään saatiin kuusi istuinpaikkaa riviä kohden. Kilpailijoiden kapearunkokoneissa rivikohtaisia istuinpaikkoja oli ainoastaan viisi (Sharpe & Shaw 2001, 13).

Boeing 737-100:n ensilento tapahtui huhtikuussa 1967 (Boeing 1997) ja Yhdysvaltain ilmailuviranomainen Federal Aviation Administration (FAA) myönsi koneelle tyyppihyväksynnän joulukuussa 1967. Boeing 737-100 oli ensimmäinen lentokone joka sai hyväksynnän myös heikon näkyvyyden CAT II -lähestymisiin suoraan osana tyyppihyväksyntää (Redding & Yenne 1997, 183). Lufthansa oli ensimmäinen Boeing 737:a tilannut asiakas ja heille toimitettiin yhteensä 22 kappaletta 737-100 -variantteja joulukuusta 1967 alkaen (Sharpe & Shaw 2001, 20).

Boeing 737 -koneiden variantteja on tuotettu neljässä eri sukupolvessa, jotka ovat *Original*, *Classic*, *Next Generation* ja *MAX*. 737 oli pitkään maailman myydyin matkustajalentokone, mutta Airbus A320 -sarja ohitti sen myyntitilastoissa loppuvuodesta 2019 (Kaminski-Morrow 2019). Erilaisia 737-variantteja on valmistettu tähän mennessä noin 12 000 kappaletta (Boeing 2024).

2.2.1 Original

Boeing 737:n ensimmäinen sukupolvi, Original, kattaa 737-100, 737-200 ja 737-200 Advanced -variantit. Original-sarjan koneet olivat tuotannossa vuosien 1967–1988 välillä.

737-100 (kuva 2) oli Original-sukupolven ensimmäinen variantti ja samalla niistä pienin 28,65 m pituisella rungollaan. Lufthansan kanssa talvella 1964 käytyjen keskustelujen perusteella 737-100:n istuinmäärä päätettiin korottaa noin sataan (Sharpe & Shaw 2001, 13). Variantin moottoreiksi valikoitui Boeing 727:sta tuttu matalan ohivirtaussuhteen suihkuturbiini Pratt & Whitney (P&W) JT8D, joka tuotti 64 kN työntövoiman (Shaw 1999, 6).

737-100:a valmistettiin kaiken kaikkiaan 30 kappaletta vuosien 1967–1969 aikana; Lufthansa tilasi niitä 22, Malaysia-Singapore Airlines (MSA) viisi ja Avianca

kaksi kappaletta. Viimeinen 737-100 valmistui lokakuussa 1969 ja se toimitettiin MSA:lle. Koneen ensimmäinen vuonna 1967 valmistunut prototyyppi siirtyi Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallintovirasto NASA:n (National Aeronautics and Space Administration) käyttöön heinäkuussa 1973. NASA:n omistama 737-100 oli viimeinen lentävä koneyksilö ja se poistui aktiivikäytöstä syyskuussa 2003, jonka jälkeen se on siirretty Seattlessa sijaitsevaan *Museum of Flight* -ilmailumuseoon. (Shaw 1999, 8)



KUVA 2. Lufthansan 737-100 Zürichissä elokuussa 1981 (Marmet 1981)

Yhdysvaltalainen United Airlines (UA) tilasi huhtikuussa 1965 40 kappaletta 737-variantteja, mutta Unitedilla oli tarve hieman 737-100:aa suuremmalle matkustajakoneelle. UA:n toiveiden mukaisesti Boeing päätti pidentää 737-100:n runkoa 91 cm siiven etupuolelta ja 102 cm siiven takapuolelta. Näin syntyi 130-matkustajapaikkainen 737-200. (Sharpe & Shaw 2001, 17)

737-200:n ensilento tapahtui elokuussa 1967 ja se sai FAA:n tyyppihyväksynnän joulukuussa 1967 (Endres 2001, 124). Variantissa oli käytössä samat P&W JT8D-moottorit (kuva 3) kuin 737-100:ssa. Ensimmäisten 737-200 -koneiden lentotestit paljastivat noin 5 % odotettua suuremman aerodynaamisen vastuksen,

joka johti jopa 30 solmua pienempään TAS:iin (True Airspeed) matkalentovaiheessa. Tämän havainnon jälkeen Boeing suoritti noin vuoden ajan erinäisiä tuulitunneli- ja lentotestejä, jotka johtivat muun muassa 737-200:n johtoreunasolakoiden, jättöreunalaippojen ja moottorirakenteen muutoksiin. Nämä muutokset pantiin täytäntöön tuotantolinjalla maaliskuusta 1969 eteenpäin, jolloin koneyksilönumero 135 valmistui. Muutostyöt tehtiin jälkijättöisesti myös ennen kyseistä ajankohtaa valmistuneisiin, jo käytössä oleviin alkupään 737-200:iin. (Sharpe & Shaw 2001, 41)



KUVA 3. 737-200:n Pratt & Whitney JT8D-moottori (Stumpf 2017)

Boeing jatkoi 737-200:n aerodynaamisten ominaisuuksien kehittämistä ja suurimmat parannukset saatiin jälleen aikaiseksi johtoreunasolakon kokoonpanoa ja ulostulokulmia muuttamalla. Nämä aerodynaamiset muutokset yhdessä automaattisten päätelinejarrujen, automaattisten siiven yläpinnan spoilerien, suuremman polttoainekapasiteetin ja muiden pienempien parannusten kanssa saivat aikaan jopa 15 % paremman hyötykuorman ja toimintaetäisyyden (Redding & Yenne 1997, 183).

Paranneltu versio sai nimekseen 737-200 Advanced (kuva 4) ja ensimmäiset koneyksilöt toimitettiin japanilaiselle All Nippon Airwaysille toukokuussa 1971 (Bowers 1989, 496). Vuodesta 1973 eteenpäin valmistettuihin malleihin asennettiin Boeing ja Pratt & Whitneyn yhdessä parantelemat JT8D-17 -moottorit. Suihkuturbiinin tekniikkaa oli päivitetty yksikompressorisesta rakenteesta kaksikompressoiseksi, jolla saatiin aikaiseksi enemmän työntövoimaa ja vähemmän melua. Uudistetun moottorin työntövoima oli 77 kN. (Sharpe & Shaw 2001, 41)



KUVA 4. 737-200 Advancedin ohjaamo (Ryabtsev 2012)

Erilaisia 737-200 -variantteja valmistettiin yhteensä 1095 kappaletta vuosien 1967–1988 välillä. Viimeinen koneyksilö toimitettiin kiinalaiselle Xiamen Airlinesille elokuussa 1988 (Boeing 2004). Loppuvuodesta 2023 noin 50 kappaletta 737-200:aa oli edelleen aktiivisessa käytössä noin 30:llä eri lentoyhtiöllä ympäri maailmaa (Chen, 2023).

2.2.2 Classic

Boeing 737:n toinen sukupolvi, Classic, sisältää 737-300, 737-400 ja 737-500 -variantit. Classic-sarjan koneita valmistettiin vuodesta 1984 vuoteen 2000.

737-200 Advanced oli saavuttanut merkittävää kaupallista menestystä, joten Boeing halusi edelleen kehittää 737:n kapasiteettia ja toimintasädettä. Malli haluttiin myös päivittää moderneihin matkustajakoneen standardeihin, kuitenkin säilyttäen samankaltaisuuden riittävänä ensimmäisen sukupolven variantteihin. 737-300:n kehitystyö alkoi näistä lähtökohdista vuonna 1979. (Endres 2001, 126–128)

Suunnittelutiimiä johtamaan valittiin ilmailuinsinööri Mark Gregoire, joka ryhtyi ensitöikseen kehittämään yhteistyössä ranskalais-amerikkalaisen moottorivalmistaja CFM Internationalin kanssa taloudellisempaa ja hiljaisempaa suihkuturbiinia uuteen 737-varianttiin. Tätä kehitystyötä lähdettiin rakentamaan jo olemassa olevan, suuren ohivirtaussuhteen CFM56-suihkumoottorin pohjalle. Haasteeksi kuitenkin muodostui 737:n matala maavara ja uusinta moottoritekniikkaa edustavien ohivirtausmoottorien suuri halkaisija verrattuna ensimmäisen sukupolven P&W JT8D-moottoreihin. Ongelmat ratkaistiin pienentämällä moottorin ensimmäisen ahtimen halkaisijaa, sijoittamalla apulaitevaiheteisto moottorin toiselle sivustalle alareunan sijaan ja sijoittamalla moottorit siiven etupuolelle perinteisen siiven alapuolisen kiinnityksen sijaan. Näin syntyi 89 kN työntövoiman tuottava CFM56-3B1 -ohivirtausmoottori. (Endres 2001, 128)



KUVA 5. Helioksen Boeing 737-300 Prahassa maaliskuussa 2005 (Lebeda 2005)

737-300:n (kuva 5) kehitystyössä 737-200:n runkoa pidennettiin 2,87 m siiven ympäriltä ja samalla matkustajapaikkoja saatiin 149. Myös siiven aerodynamiikka parannettiin pidentämällä siivenkärkeä 23 cm ja siipien kärkiväliä kokonaisuudessaan 53 cm. Lisäksi johtoreunasolakoita ja jättöreunalaippoja hienosäädettiin (Endres 2001, 128). Koneen sivuvakain suunniteltiin kokonaan uudestaan ja ohjaamoympäristöä (kuva 6) modernisoitiin nykyaikaisemmalla avioniikalla ja sähköisillä EFIS-näytöillä (Electronic Flight Instrument System) (Shaw 1999, 10).

737 Classicieihin suunniteltiin myös uusi korkeusperäsimen toimintaan vaikuttava automaatiojärjestelmä Speed Trim System (STS). STS säättää automaattisesti korkeusperäsintä ja sitä kautta koneen nopeustrimmiä seuraavissa lentotiloissa; pieni ilmanopeus, pieni paino, lentokoneen massakeskipiste takana ja korkea tehoasetus lennettäessä käsin (US4676460A 1987). STS:n aktivointikriteereiden myötä se toimii useimmiten lentoonlähdön ja ylösvedon aikana, eli sellaisissa lennon vaiheissa, joissa lennetään käsiohjauksella lähellä maata ja lentoesteitä.

STS on suunnittelultaan poikkeuksellinen, sillä se ei noudata ilmailualalla yleisesti käytössä olevaa fail-safe -periaatetta, jonka mukaan turvallisuuskriittisten laitteiden tai järjestelmien toiminta tulee lähtökohtaisesti olla tuplattu tai jopa triplattu. STS käyttää kuitenkin vain yksinkertaisia sensoreita ja yhtä tietokonetta korkeusperäsimen ohjaamiseen. Tämä suunnittelu hyväksyttiin sillä ehdolla, että ohjaamoon asennetaan riittävä määrä tappokytkimiä, joilla STS:n voi kytkeä pois päältä mahdollisessa vikatilanteessa (Lemme 2019). Myöhemmin tässä työssä esiteltävät 737:n kolmannen sukupolven (Next Generation, NG) rajatut lentotilasuojaukset ja neljännen sukupolven (MAX) MCAS-järjestelmä ovat käytännössä STS:n laajennuksia ja pohjaavat samaan suunnitteluun.



KUVA 6. 737-300 Classicin ohjaamo (McLellan 2010)

737-300:n ensilento tapahtui helmikuussa 1984 ja tyyppihyväksynnän variantti sai marraskuussa 1984. Ensimmäinen asiakas yhdysvaltalainen USAir sai niin ikään ensimmäiset koneet käyttöönsä marraskuussa 1984 (Endres 2001, 126–128). Viimeinen 737-300 valmistui joulukuussa 1999, jonka jälkeen se toimitettiin uusiseelantilaiselle Air New Zealandille. Varianttia valmistettiin yhteensä 1113 kappaletta vuosien 1984–1999 välillä ja niitä on edelleen aktiivikäytössä ympäri maailmaa (Endres 2001, 129).

Jälleen suuremman 737-variantin kehitystyö alkoi Boeingilla vuonna 1985. Koneetta suunniteltiin paikkaamaan rakoa tuoteportfoliossa 737-300:n ja selvästi suuremman 757-200:n välillä. 737-400 syntyi pidentämällä 737-300:n runkoa 3,05 m, jolloin matkustajapaikkoja koneeseen saatiin jo 188. Pidentetty runko ja kasvaneet kuormat vaativat uuteen varianttiin rakenteellisia muutoksia, joista merkittävimmät olivat takarungon alapuolta suojaava perärauta (tail bumper), vahvistettu siipisalkorakenne, kaksi ylimääräistä siipiuloskäyntiä molemmille puolille runkoa sekä tehostettu ilmanvaihtojärjestelmä. Myös moottorit päivitettiin tehokkaampaan CFM56-3B2 -versioon (kuva 7), joka kykeni tuottamaan 98 kN työntövoimaa. (Shaw 1999, 7–14)



KUVA 7. Boeing 737-400:n CFM56-3B2 -moottori (Wikimedia Commons 2008)

737-400:n lentotestaus aloitettiin helmikuussa 1988 ja tyyppihyväksyntä myönnettiin syyskuussa 1988. Ensimmäiset koneyksilöt toimitettiin pian sen jälkeen yhdysvaltalaiselle Piedmont Airlinesille (Shaw 1999, 14). Viimeiset koneyksilöt valmistettiin helmikuussa 2000, ja ne toimitettiin Czech Airlinesille. 737-400:aa valmistettiin 486 kappaletta vuosien 1988–2000 aikana ja niitä on edelleen käytössä kaupallisessa ilmailussa (Boeing 2000).

Markkinoilla oli kysyntää alkuperäisen Boeing 737-200:n modernille korvaajalle, joka mahdollistaisi aiempaa pidempien reittien operoimisen taloudellisesti pienemmillä matkustajakuormilla. Boeing vastasi tähän kysyntään kehittämällä Classic-sarjan pienimmän variantin. 737-500:n kehitystyö alkoi 1987 ja ensimmäiset koelennot päästiin aloittamaan kesäkuussa 1989. Tyyppihyväksynnän variantti sai helmikuussa 1990 ja ensimmäiset koneet toimitettiin yhdysvaltalaiselle Southwest Airlinesille (Endres 2001, 126–129).

737-500:n runko on 48 cm alkuperäistä 737-200:a pidempi ja matkustajapaikkoja koneessa on noin 140. Päivitetty CFM56-3C1 -moottori tuotti 100 kN työntövoiman ja 25 % paremman polttoainetehokkuuden 737-200:n alkuperäiseen P&W JT8D-moottoreihin verrattuna (Shaw 1999, 14). 737-500:a valmistettiin 389 kappaletta vuosien 1989–1999 välillä ja viimeiset koneyksilöt toimitettiin japanilaiselle Air Nipponille heinäkuussa 1999 (Boeing 2004). Myös näillä Classic-variantteilla liikennöidään edelleen.

2.2.3 Next Generation

737:n kolmas sukupolvi Next Generation (NG) kattaa variantit 737-600, 737-700, 737-800 ja 737-900 (kuva 11). NG-sarjan koneita valmistettiin vuosien 1997–2019 välisenä aikana.

Airbus A320-sarja oli noussut 737:n merkittäväksi kilpailijaksi 1980-luvun loppupuolelta lähtien ja 1990-luvun alkuun mennessä moni Boeingin vakioasiakas oli valinnut lentokonetoimittajakseen ranskalaislähtöisen Airbusin (Leeham 2017). Boeingilla tunnistettiin tarve päivittää Classic-sarjaa kilpailukykyisemmäksi ja näin ollen 737:n kolmannen sukupolven kehitystyö alkoi vuonna 1991 (Endres 2001, 132). Virallisesti NG julkaistiin marraskuussa 1993 ensimmäisten koneti-lausten myötä (Shaw 1999, 8).

Kolmannen sukupolven suunnittelun lähtökohdaksi valikoitui moderni CFM56-7B -ohivirtausmoottori, jolla saatiin tuotettua versiosta riippuen 87–121 kN työntövoimaa. Uudet moottorit olivat hiljaisempia sekä kestävämpiä ja niillä kyettiin säästämään 8 % pienempi polttoaineenkulutus ja 15 % pienemmät huoltokustannukset verrattuna aikaisemman Classic-sukupolven CFM56-3B -moottoreihin (Safran 2011). Samalla 737:n siipi ja korkeusperäsin suunniteltiin kokonaan uudelleen. Siiven ohuempi rakenne, suurempi siipiprofiilin jänne ja kärkivälin pidentäminen 4,9 metrillä lisäsivät siipipinta-alaa 25 % ja polttoainekapasiteettia 30 % (Endres 2001, 133). Parannusten yhteisvaikutuksella koneen suurinta lentoonlähtömassaa (Maximum Take-Off Weight, MTOW) ja toimintasädettä saatiin kasvatettua toisen sukupolven Classic-eihin nähden. Uusi, parhaimmillaan yli 5600

km toimintasäde mahdollisti 737:lle ensimmäistä kertaa myös taloudellisen manertenvälisen operoinnin (Shaw 1999, 8).

New Generationin avioniikkaa modernisoitiin ja kaikkiin variantteihin asennettiin jo tehtaalla digitaalisiin mittareihin perustuva lasiohjaamo (kuva 10). Classiceissa käyttöön otettu Speed Trim System päivitettiin ja siihen lisättiin sakkauksen tunnistukseen perustuvia toimintoja. Classiceissa STS:n toiminta oli estetty siiven lentäessä suurella kohtauskulmalla, mutta NG:ssa STS toimii koko lentokoneen nopeusalueella. STS aktivoituu ilmanopeussensorin vaikutuksesta ja se laskee automaattisesti lentokoneen nokan asentoa peräsintrimmin avulla ilmanopeuden pienentyessä. (Lemme 2019)

Joulukuussa 1996 Boeing ilmoitti halukkuudestaan fuusioitua Yhdysvaltain toiseksi suurimman lentokonevalmistaja McDonnell Douglasin kanssa. Euroopan komissio vastusti vahvasti fuusiota, mutta lopulta McDonnell Douglas sulautettiin Boeingiin elokuussa 1997 (Skapinker 1997). Verrattain pian fuusion jälkeen Boeing päätti lakkauttaa 737-sarjan kanssa kilpailevien McDonnell Douglas MD-80 ja MD-90 -suihkukoneiden valmistamisen. Viimeinen MD-80 valmistui vuonna 1999 ja MD-90 vuonna 2000 (Becher 2002, 106–107).

Ensimmäiset NG-sukupolven lentotestit suoritettiin 737-700:lla helmikuussa 1997. Tyyppihyväksyntä ja ensimmäisen koneyksilön toimitus yhdysvaltalaiselle Southwest Airlinesille tapahtuivat joulukuussa 1997 (Shaw 1999, 8). 737-700 (kuva 8) korvasi 737-300:n Boeingin portfolioissa ja se oli suunniteltu suoraan kilpailemaan Airbus A319:n kanssa. Variantin rungon pituus on 33,58 m, matkustajapaikkoja on 126–149 kappaletta matkustamokonfiguraatiosta riippuen ja moottoreina 92 kN työntövoiman tuottava CFM56-7B20. 737-700:n eri versioita tuotettiin vuosien 1997–2018 välillä yhteensä 1133 kappaletta ja suurin osa niistä on edelleen aktiivikäytössä ympäri maailmaa (Boeing 2024).



Kuva 8. Southwestin 737-700 Las Vegasissa (Del Coro 2010)

737-800 luotiin pidentämällä 737-700:n runkoa 5,84 m, optimoimalla siipeä ja päälaskutelinettä suuremmille painoille ja asentamalla koneisiin tehokkaammat 108 kN työntövoimaa tuottavat CFM56-7B24 -moottorit (kuva 9) (Brady 2023, 31). 737-800 korvasi Classicista 737-400:n ja se luotiin kilpailemaan 162-189 matkustajapaikallaan Airbus A320:n kanssa. Koneen prototyyppi lensi ensimmäisen kerran heinäkuussa 1997 ja ensimmäinen koneyksilö toimitettiin tyyppihyväksynnän jälkeen saksalaiselle Hapag-Lloyd Flugille huhtikuussa 1998 (Boeing 1998). 737-800:a valmistettiin vuosien 1997–2019 välillä 4989 kappaletta ja se onkin selkeästi kolmannen sukupolven suosituin variantti. Viimeinen koneyksilö toimitettiin hollantilaiselle KLM:lle joulukuussa 2019 (Hemmerdingen 2020). 737-800 on edelleen laajassa kaupallisessa käytössä.



KUVA 9. 737-800:n CFM56-7B24 -moottori (Wikimedia Commons 2017)

737-600 on kolmannen sukupolven varianteista pienin. Se suunniteltiin korvaamaan Classic-sarjan 737-500 ja kilpailemaan samassa kokoluokassa Airbus A318:n kanssa. Variantin runko on 2,38 m 737-700:n runkoa lyhyempi ja siinä on 108–132 matkustajapaikkaa. 737-600:ssa käytettiin vähemmän tehokkaita 87 kN työntövoiman tuottavia CFM56-7B18 -moottoreita (Brady 2023, 29). 737-600:n lentotestit aloitettiin tammikuussa 1998 ja FAA:n tyyppihyväksyntä myönnettiin elokuussa 1998. Ensimmäinen koneyksilö luovutettiin ruotsalaislähtöiselle Scandinavian Airlinesille syyskuussa 1998 (Doyle, Kingsley-Jones, Lewis & Norris 1999). 737-600 ei saavuttanut suurta menestystä ja niitä valmistettiin vain 69 kappaletta vuosien 1998–2006 välillä. Viimeinen kone toimitettiin kanadalaiselle WestJetille vuonna 2006. Joitakin 737-600:ja on edelleen käytössä afrikkalaisissa lentoyhtiöissä (Boeing 2024).

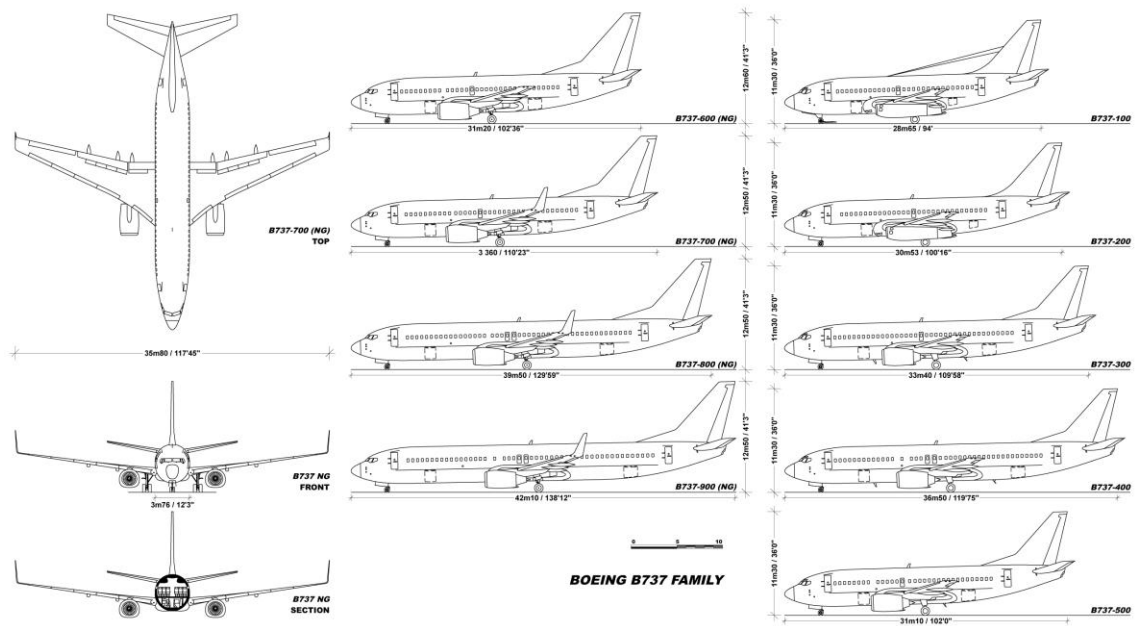


KUVA 10. Kolmannen sukupolven 737 NG:n ohjaamo (Belyukov 2012)

Kolmannen sukupolven suurin variantti 737-900 syntyi pidentämällä 737-800:n runkoa 2,4 m. Varianttiin asennettiin aluksi sama määrä uloskäyntejä kuin 737-800:n, joten sen suurin matkustajapaikkamäärä, 189, oli sama kuin 737-800:ssa. Rungon suurempi koko mahdollisti suuremman rahtimäärän kuljettamisen, mutta samalla koneen toimintasäde pieneni, sillä polttoainekapasiteetti ja suurin lentoonlähtöpaino olivat samat kuin 737-800:ssa. 737-900 lensi ensimmäisen kerran elokuussa 2000 ja ensimmäinen koneyksilö toimitettiin yhdysvaltalaiselle Alaska Airlinesille tyyppihyväksynnän jälkeen toukokuussa 2001 (Brady 2023, 32). Alkuperäinen 737-900 ei osoittautunut rajoitteidensa vuoksi kovinkaan suosituksi ja niitä valmistettiin 52 kappaletta vuosien 2000–2005 välillä. Viimeinen koneyksilö toimitettiin kiinalaiselle Shenzhen Airlinesille elokuussa 2005. Variantteja on edelleen aktiivikäytössä (Boeing 2024).

Boeing ryhtyi parantelemaan 737-900:n puutteita pystyäkseen kilpailemaan Airbus A321:n kanssa ja paikatakseen vuonna 2004 lakkautetun 757-200:n jättämää aukkoa portfoliossaan. 737-900:n runkoon lisättiin yksi ovipari lisää, jolloin matkustajapaikkamäärä saatiin kasvatettua 220:een ja koneen ruumaan oli mahdollista asentaa kaksi lisäpolttoainesäiliötä, jolloin myös toimintasädettä saatiin

kasvatettua. Varianttiin asennettiin tehokkaammat, 121 kN työntövoimaa tuottavat, CFM56-7B27 -moottorit. Uusi paranneltu versio sai nimen 737-900ER (Extended Range). 737-900ER:n lentotestit aloitettiin elokuussa 2006 ja ensimmäinen koneyksilö toimitettiin tyyppihyväksynnän jälkeen indonesialaiselle Lion Airille huhtikuussa 2007 (Brady 2023, 32). Paranneltua 737-900ER -varianttia tuotettiin 505 kappaletta vuosina 2006–2019, viimeinen koneyksilö toimitettiin yhdysvaltalaiselle Delta Air Linesille kesäkuussa 2019. Koneita on edelleen laajasti kaupallisessa käytössä (Boeing 2024).



KUVA 11. Boeing 737 -koneperheen variantteja (Scavini 2011)

2.2.4 MAX

737:n neljäs sukupolvi, MAX, kattaa 737 MAX 7, MAX 8, MAX 9 ja MAX 10 -variantit. MAX-sarjan koneita on valmistettu Boeingin Rentonin tehtaassa elokuusta 2015 alkaen.

Boeing oli suunnitellut vuodesta 2006 alkaen korvaavansa 737:n täysin uudella designilla, johon otettaisiin mallia 787 Dreamlinerin komposiittirakenteesta ja edistyneistä sähköjärjestelmistä. Tätä uutta 737:n korvaajaa suunniteltiin osana Boeingin Yellowstone Projectia ja se tunnettiin työnimellä Y1 (FlightGlobal 2006). Airbus kuitenkin julkisti uusilla moottoreilla varustetun A320neo-koneperheen

joulukuussa 2010 ja saavutti sillä uuden tilausennätyksen Pariisin ilmailunäyttelyssä kesäkuussa 2011 (Airbus 2011), joten Boeing päätti lykätä Y1:n kehittämistä tuonemmaksi (Juma & Rao, 2020, 56). 737:n neljäs MAX-sukupolvi julkaistiin elokuussa 2011 (Boeing 2011).

737 MAX:n kehitystyö aloitettiin Ed Clarken johdolla 2011. Yksi suunnittelutyön keskeisimpiä tavoitteita oli saavuttaa 15 % pienempi polttoaineenkulutus verrattuna kolmannen sukupolven NG-sarjaan. Kehitystyön lähtökohdaksi valikoitui korkean ohivirtaussuhteen moderni hiljainen ja polttoainetaloudellinen CFM LEAP-1B -suihkumoottori. LEAP:n suuremman lapapituuden vuoksi moottorit sijoitettiin korkeammalle ja entistä enemmän siiven etupuolelle. Lisäksi nokkapyörätelinettä jouduttiin korottamaan riittävän maavaran aikaansaamiseksi. Siipien kärkiin suunniteltiin uudenlaiset split-tip -siipiulokkeet ja koneen peräkartio suunniteltiin aerodynaamisesti tehokkaammaksi. Myös koneen vuodatusilmajärjestelmä päivitettiin sähköisesti ohjattavaksi (Trimble 2017).

MAX-variantteihin suunniteltiin LCD-näytöillä varustettu lasiohjaamo (kuva 14), mutta muuten koneen ohjaamo ja järjestelmät haluttiin pitää mahdollisimman samankaltaisena kolmannen sukupolven NG-variantteihin nähden. Ainoastaan siiven yläpinnan spoilerit muutettiin toimimaan sähköisellä fly-by-wire -ohjausjärjestelmällä. Tarkoituksena oli, että lentäjät voisivat siirtyä NG-sarjasta MAX:iin mahdollisimman pienellä eroavaisuuskoulutuksella (George 2017). Moottoreiden uudelleensijoittelu muutti kuitenkin koneen aerodynaamisia lento-ominaisuuksia NG:iin verrattuna (Palmer 2020, 2). Boeing lisäsi STS:iin uuden ohjelmistopohjaisen ohjainlain, jonka oli tarkoitus paikata moottoreiden uudelleensijoittelusta aiheutuvaa koneen ei-toivottavaa aerodynaamista käyttäytymistä. Tämän uuden laajennuksen nimeksi tuli MCAS (Maneuvering Characteristics Augmentation System) (Herkert, Borenstein & Miller 2020, 2958).

MAX 8 (kuva 12) oli ensimmäinen neljännen sukupolven 737-variantti. Se suunniteltiin korvaamaan NG-sarjan 737-800 ja kilpailemaan suoraan Airbus A320neon kanssa. Koneen 39,52 m pitkä runko on sertifioitu maksimissaan 189:lle matkustajapaikalle, toimintasäde on 6510 km ja variantin oletusmoottoreina toimivat 125 kN työntövoiman tuottavat CFM LEAP-1B27:t (Brady 2023, 42). MAX 8:n lentotestaus aloitettiin tammikuussa 2016 ja variantti sai FAA:n

tyyppihyväksynnän maaliskuussa 2017 (Boeing 2017). Ensimmäinen koneyksilö toimitettiin malesialaiselle Malindo Airille toukokuussa 2017 (Hashim 2017). Myöhemmin on käynyt ilmi, että FAA delegoi MAX-sarjan sertifiointiprosessin aikana useita tyyppihyväksyntään liittyviä kriittisiä arviointeja Boeingille, johtaen tilanteeseen, jossa lentokonevalmistaja käytännössä tyyppihyväksyi itse uuden koneensa (Gates 2019). Boeing on toimittanut helmikuuhun 2024 mennessä 1085 MAX 8:aa ja avoimia tilauksia on 2838 kappaletta (Boeing 2024).



KUVA 12. Gol Linhas Aéreas Inteligentesin 737 MAX 8 (Coats 2019)

Sarjan toinen variantti oli 737-900ER:n korvaava ja Airbus A321neon kanssa kilpaileva MAX 9. Variantin rungon pituus 42,1 m on sama kuin 737-900ER:ssa, maksimi matkustajapaikkamäärä on 220 ja toimintasäde sama kuin MAX 8:ssa. MAX 9:n moottorina käytetään hieman tehokkaampaa 130 kN työntövoiman tuottavaa CFM LEAP-1B28:a (kuva 13) (Brady 2023, 44). Variantin lentotestit aloitettiin huhtikuussa 2017 (Goold 2017) ja FAA:n tyyppihyväksyntä myönnettiin helmikuussa 2018 (Trimble 2018). Ensiasiakas thaimaalainen Thai Lion Air vastaanotti ensimmäisen koneyksilön maaliskuussa 2018 (Boeing 2018b). MAX 9:ää on toimitettu helmikuuhun 2024 mennessä 217 kappaletta ja avoimia tilauksia Boeingilla on 126 (Boeing 2024).



KUVA 13. 737 MAX 9:n CFM LEAP-1B28 -moottori (Vasters 2017)

MAX-koneperheen varianteista kolmantena päivänvalon näki sarjan pienin kone, MAX 7. Variantti suunniteltiin korvaamaan NG-sarjan 737-700 ja kilpailemaan Airbus A319neon kanssa. MAX 7:stä piti alun perin tulla saman pituinen 737-700:n kanssa, mutta Boeing päätti pidentää runkoa 1,93 m heikon ennakkomyynnin vuoksi. Näin koneeseen saatiin matkustamokonfiguraatiosta riippuen 153–172 istuinpaikkaa. Variantissa käytetään MAX 8:n siipeä ja laskutelineitä sekä 119 kN työntövoiman tuottavia CFM LEAP-1B25 -moottoreita. MAX 7:llä on neljännen sukupolven koneista pisin toimintasäde, noin 7080 km (Brady 2023, 42).

MAX 7:n lentotestit aloitettiin maaliskuussa 2018, mutta sertifiointiprosessi keskeytettiin lokakuussa 2018 ja maaliskuussa 2019 tapahtuneiden tuhoisien 737 MAX -lento-onnettomuuksien jälkeen. MAX 7:n lentotestausta jatkettiin vuoden 2020 puolella maailmanlaajuisen MAX-koneperheen lentokiellon päätyttyä (FAA 2020). Uudelleen aloitetuissa lentotesteissä ilmeni vakavia ongelmia moottorien jäänehkäisyjärjestelmässä, jotka voisivat pahimmillaan johtaa moottorinasellin irttoamiseen kesken lennon. Tilanne koskee kaikkia MAX-koneperheen variantteja, myös aikaisemmin tyyppihyväksytyjä kaupallisessa käytössä olevia koneita. Ongelmaa ei ole saatu korjattua ja Boeing anoi joulukuussa 2023 FAA:lta poikkeus-

lupaa, jotta MAX 7 voitaisiin tyyppihyväksyä, vaikka se ei täytä vaadittavia turvallisuusstandardeja (Gates 2024a). Boeingin poikkeusanomus nostatti kohua erityisesti Yhdysvalloissa ja se vedettiin pois tammikuussa 2024 Boeingiin kohdistuneen valtaisan poliittisen paineen seurauksena. MAX 7:n tyyppihyväksynnän aikataulusta ei ole tällä hetkellä tarkkaa arviota, se riippunee ensisijaisesti Boeingin kyvystä ratkaista moottorien jäänehkäisyn ongelma FAA:ia tyydyttävällä tavalla (Gates 2024b). Avoimia MAX 7 -tilauksia on 363 kappaletta helmikuussa 2024 (Boeing 2024).

Boeing julkisti syyskuussa 2014 yhteistyössä irlantilaisen Ryanairin kanssa MAX 8:n 200-paikkaisen version, mallinimeltään MAX 200. Variantti vastaa muuten MAX 8:a, mutta matkustamon istuinpaikkojen asettelua on tiivistetty ja koneeseen on asennettu ylimääräinen ovipari, joka mahdollistaa koneen sertifioidun 200 matkustajapaikalle (Boeing 2014). MAX 200:n lentotestit aloitettiin tammikuussa 2019 ja ne keskeytettiin MAX-koneperheen lentokiellon ajaksi (Norris 2019). Variantti sai lopulta FAA:n tyyppihyväksynnän maaliskuussa 2021 ja ensimmäinen koneyksilö toimitettiin Ryanairille kesäkuussa 2021 (Wolfsteller 2021). Boeing on toimittanut helmikuuhun 2024 mennessä 143 MAX 200:aa ja avoimia tilauksia varianteista on 369 kappaletta (Boeing 2024).

737:n neljännen sukupolven suurin variantti on MAX 10, joka suunniteltiin ylittämään Airbus A321neon matkustajapaikkamäärä. MAX 10 käyttää samoja siipiä ja moottoreita kuin MAX 9, mutta varianttiin on saatu maksimissaan 230 istuinpaikkaa pidentämällä MAX 9:n runkoa 1,7 m (Norris 2017). Pidennetty runko vaatii pieniä muutoksia koneen laskutelineisiin ja variantin suurempi paino pienensi toimintasädettä hieman noin 5950 km:iin (Brady 2023, 44). MAX 10:n lentotestit aloitettiin ensimmäisen kerran kesäkuussa 2021, mutta tyyppihyväksyntä on viivästynyt FAA:n vaatiessa parannuksia kohtauskulmatiedon käsittelyyn koneen avioniikkajärjestelmässä. On myös odotettavissa, että muutoksia vaaditaan lisäksi siihen, miten informaatiota esitetään lentäjille koneen EICAS-järjestelmässä (Engine-Indicating and Crew-Alerting System) (Kaminski-Morrow 2021). MAX 7:n tavoin myös MAX 10:n tyyppihyväksynnän aikataulu on auki ja riippuvainen edellä mainittujen muutostarpeiden lisäksi moottorien jäänehkäisyyttä koskevan ongelman ratkaisusta (Negroni 2024). Boeingilla oli avoimia MAX 10 -tilauksia 1063 kappaletta helmikuussa 2024 (Boeing 2024).



KUVA 14. 737 MAX:n ohjaamo (Dawson 2018)

Koko MAX-koneperhe oli kahden samankaltaisen tuhoisan MAX-variantin onnettomuuden jälkeen yli 41 maata kattavassa globaalissa lentokiellossa pisimmillään maaliskuusta 2019 joulukuuhun 2020. Lion Airin MAX 8 tuhoutui törmättyään Jaavanmereen lokakuussa 2018 ja Ethiopian Airlinesin MAX 8 törmättyään maahan Etiopiassa maaliskuussa 2019. Onnettomuudet vaativat yhteensä 346 ihmisen hengen (Travica 2020, 26). MAX:n lentokielto oli siinä mielessä poikkeuksellinen, että se liittyi ensisijaisesti ohjelmistopohjaiseen ongelmaan (Kuczynski, Wang, Glass & Hoffman 2021, 52).

Onnettomuuksia seuranneissa FAA:n tutkinnoissa MAX-varianteissa havaittiin lukuisia ongelmia, jotka eivät kaikki suoranaisesti liittyneet edellä mainittuihin onnettomuuksiin. Puutteita löytyi muun muassa MCAS:iin liittyvästä ohjelmistosta, tietokone- ja sensoriarkkitehtuurista, dokumentaatiosta, sähköjärjestelmien kaapeloinnista, tiettyjen koneyksilöiden salamaniskusuojauksesta, polttoainesäiliöistä sekä johtoreunasolakoiden rakenteesta (German 2021). Useat 737 MAX:n

lentäjät olivat kirjoittaneet Lion Airin onnettomuuden jälkeen lentoturvallisuusraportteja puutteellisesta koulutuksesta MCAS:n ja myös muiden lentokoneen järjestelmien osalta (Johnston & Harris 2019, 6). Tammikuussa 2020 FAA määräsi Boeingille 5,4 miljoonan dollarin sakon, sillä FAA:n mukaan Boeing oli tietoisesti asentanut määrästenvastaiset johtoreunasolakon ohjaimet 178:aan MAX-koneyksilöön (Aerospace Technology 2020).

FAA asetti noin 170 kappaletta MAX 9:ää 19 päivää kestäneeseen lentokieltoon tammikuussa 2024, kun Alaska Airlinesin koneesta irtosi ovirakenne kesken lennon (Koenig 2024). Helmikuussa 2024 valmistuneen Yhdysvaltain kansallisen liikenneturvallisuuslautakunnan (National Transportation Safety Board, NTSB) alustavan raportin mukaan ovirakenteen irtoaminen johtui valmistusvirheestä, jossa rakennetta kasassa pitäviä pultteja ei ollut asennettu laisinkaan kyseiseen koneyksilöön (NTSB 2024, 14–15).

Maaliskuussa 2024 kolme Boeingin johtajaa ilmoittivat jättävänsä yrityksen. Boeing-korporaation toimitusjohtaja David Calhoun jättää tehtävänsä vuoden 2024 lopussa, yhtiön hallituksen puheenjohtaja Larry Kellner ei aio enää asettua ehdolle tehtävään seuraavassa äänestyksessä ja Commercial Airplanes -yksikön toimitusjohtaja Stan Deal lopetti tehtävässään jo maaliskuussa. David Calhoun aloitti koko korporaation toimitusjohtajan tehtävässä tammikuussa 2020 ja nimitys keräsi tuolloin kritiikkiä, sillä Calhounille luvattiin seitsemän miljoonan dollarin bonus, mikäli hän saisi 737 MAX:n lentokiellon purettua. (Aratani, Gregg & Duncan 2024)

3 737 MAX LOC-I-ONNETTOMUUDET

Tässä luvussa esitellään ilmailun onnettomuustutkinnassa yleisesti käytetty James T. Reasonin reikäjuustomalli, sekä käsitellään kaksi tuhoisaa 737 MAX:lle tapahtunutta LOC-I-lento-onnettomuutta (Loss of Control In-flight). Lion Air JT610 ja Ethiopian Airlines ET302 lentojen onnettomuudet käsitellään tässä työssä tutkintavastuullisten viranomaisten virallisiin onnettomuustutkintaraportteihin perustuen. Käsitelyä on tiivistetty ja vain onnettomuuksien syntymisen kannalta olennaiset asiat on sisällytetty lukuun. Onnettomuuksien tarkkoihin yksityiskohtiin voi perehtyä virallisissa onnettomuustutkintaraporteissa, jotka ovat kumpikin hyvin kattavia yli 300 sivun pituudellaan.

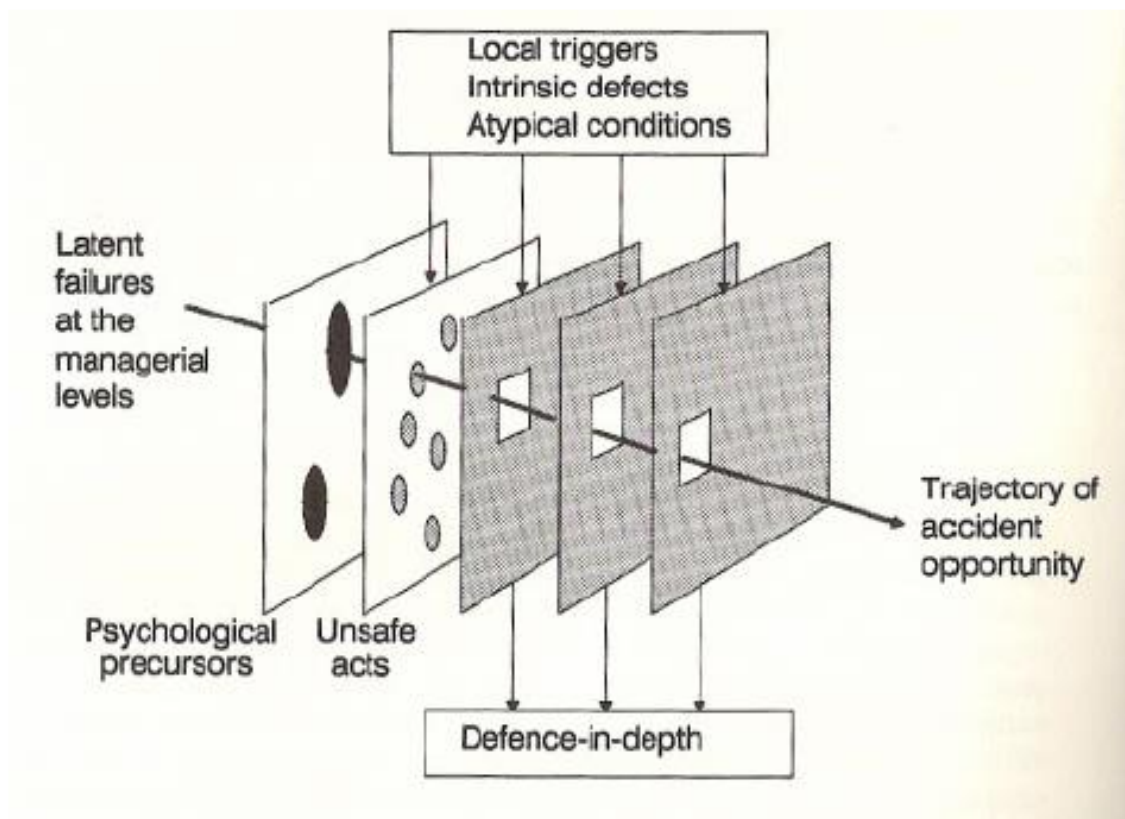
3.1 James T. Reasonin reikäjuustomalli

Manchesterin yliopiston entinen psykologian professori James T. Reason esitteli vuonna 1990 artikkelissaan *The contribution of latent human failures to the breakdown of complex systems* teorian piilevien ja aktiivisten virheiden yhteisvaikutuksesta onnettomuuksien syntyyn. Kyseinen teoria on osoittautunut varsin käyttökelpoiseksi myös ilmailualalla. Sitä käytetään yleisesti muun muassa lentäjien ja lennonjohtajien koulutuksessa, sekä onnettomuustutkinnoissa. Teoriaa kutsutaan usein Reasonin reikäjuustomalliksi (Swiss cheese model of accident causation).

Teoriassaan Reason (1990, 476) esittää, että onnettomuudet syntyvät useiden aktiivisten ja piilevien virheiden yhteisvaikutuksesta. Aktiiviset virheet ovat tekoja, joilla on välitön turvallisuutta heikentävä vaikutus ja ne tapahtuvat suoraan ihminen-kone-rajapinnassa. Ilmailun kontekstissa tässä rajapinnassa työskentelevät erityisesti lentäjät ja lennonjohtajat. Piilevät eli latentit virheet ovat puolestaan päätöksiä tai tekoja, jotka tapahtuvat ajallisesti ja paikallisesti erillään ihminen-kone-rajapinnasta. Latentit virheet voivat pysytellä pitkiä aikoja piilossa, kunnes ne paljastuvat sopivien laukaisevien tekijöiden esiintyessä. Näitä laukaisevia tekijöitä voivat olla muun muassa aktiiviset virheet tai tekniset ongelmat. Latenttien

virheiden syntyyn saattavat vaikuttaa esimerkiksi järjestelmän ja laitteen suunnittelijat, yrityksen ylin johto ja työnjohto, valvontaviranomainen, tai huoltohenkilökunta.

Reasonin (1990, 476) mukaan monimutkaisissa järjestelmissä, kuten esimerkiksi ilmailussa, on onnistuttu rakentamaan useita turvallisuuskerroksia teknisillä ratkaisuilla ja vakioituilla toimintatavoilla (Standard Operating Procedure, SOP). Tällaiset järjestelmät on pitkälti suojattu yksittäisten virheiden tai vikaantumisten varalta, mutta onnettomuuksia tapahtuu silloin kun yksittäisissä turvallisuuskerroksissa piilevät, sinänsä satunnaiset, reiät asettuvat kohdakkain ja syntyy sopiva ikkuna onnettomuudelle (kuva 15). Suurimmat riskit liittyvät siten järjestelmäsuunnittelusta, organisaatiosta ja johtoportasta kumpuaviin latentteihin virheisiin, eikä näitä riskejä voi enää tehokkaasti pienentää insinööriyön tai teknisten ratkaisujen avulla. Inhimillisten virheiden rooli korostuu kompleksisissa toimintaympäristöissä.



KUVA 15. Reasonin reikäjuustomalli (Reason, Hollnagel & Paries 2006)

Reasonin reikäjuustomallia on kritisoitu liiallisesta pintapuolisuudesta ja siitä, ettei se sovellu suoraan onnettomuustutkinnan työkaluksi. Reasonin teoriaa hyödyntämällä voidaan löytää ”juuston reiät”, mutta teoria ei ota suoraan kantaa reikien syntymisen taustoihin tai niiden mahdollisiin keskinäisiin suhteisiin ja riippuvaisuuksiin. Toisaalta voidaan myös ajatella, että näiden avoimeksi jäävien kysymysten selvittäminen on onnettomuustutkijan työn ydinsisältöä. Teoria on saanut kritiikkiä myös latenttien virheiden liiallisesta painottamisesta, sillä joidenkin onnettomuuksien taustalla voi olla pääasiassa aktiivisia virheitä tai muita syitä. Samassa yhteydessä Reasonin on esitetty sysäävän liikaa vastuuta yrityksen johdolle latenttien virheiden syntymisestä (Reason, Hollnagel & Paries 2006, 12–13). Kritiikistä huolimatta Reasonin reikäjuustomalli on pitänyt pintansa ja on edelleen yleisesti käytetty erityisesti ilmailukontekstissa.

3.2 Lion Air JT610

Indonesialaisen Lion Airin Boeing 737 MAX 8, rekisteritunnukseltaan PK-LQP ja lennon numerolla JT610, suoritti 29.10.2018 kello 6.20 paikallista aikaa (23.20 UTC) lentoonlähdon Jakartalla sijaitsevalta Seokarno-Hattan kansainväliseltä lentoasemalta määränpäänään Depati Amirin kansainvälinen lentoasema Pangkal Pinangissa. Lennon aikana sää oli kirkas ja pilvetön, tuuli oli Seokarno-Hattalla tapahtuma-aikaan lähes tyyni. Kone kaartoi kiitotieltä 25L suoritettun lentoonlähdon jälkeen vasemmalla kaarrolla Jaavanmeren päälle kohti koillista. 11 minuuttia lentoonlähdon jälkeen, kello 6.31, lento JT610 iskeytyi suurella nopeudella mereen 61 km Jakartasta koilliseen. Kaikki lentokoneessa olleet 189 ihmistä menehtyivät välittömästi. (KNKT 2019, 19–28)

3.2.1 Tapahtumien kulku

Indonesian turvallisuustutkintaviranomaisen KNKT:n (Komite Nasional Keselamatan Transportasi) lopullisen onnettomuustutkintaraportin mukaan lentokoneen digitaalinen lentoarvotallennin (Digital Flight Data Recorder, DFDR) indikoi 21° eroa vasemman ja oikean kohtauskulma-anturin lukemassa lähtökiidosta (klo

6.20.16) koneen viimeisiin hetkiin saakka. Kaksi sekuntia rotaation jälkeen lentovuorossa (pilot flying, PF) olleen kapteenin stick shaker -sakkausvaroitin aktivoitui (6.20.33) ja pysyi aktiivisena lähes koko lennon ajan. 11 sekuntia vasemman stick shakerin aktivoitumisen jälkeen monitorointivuorossa (pilot monitoring, PM) toiminut perämies ilmoitti PFD:n (Primary Flight Display) nopeusmittarilla eräistä ilmanopeusindikaatioista varoittavan IAS DISAGREE -viestin (6.20.44), joka pysyi aktiivisena koko lennon ajan. (KNKT 2019, 19–20)

Laskuteline otettiin sisään kello 6.20.51 ja 21 sekuntia myöhemmin perämies ilmoitti korkeusmittarien näyttävän eri lukemaa vasemmalla ja oikealla puolella (6.21.12). 25 sekuntia tästä kapteeni pyysi perämiestä suorittamaan epäluotettavan nopeusindikaation muistinvaraiset toimenpiteet (memory item) (6.21.37). Perämies ei reagoanut kapteenin pyyntöön. Lähtökiidon aloittamisesta oli ehtinyt kuluua noin 96 sekuntia, kun perämies ilmoitti ensimmäisen kerran lähestymisalueen tutkalennonjohtajalle koneen ohjaamiseen liittyvästä ongelmasta (6.21.52). (KNKT 2019, 20–21)

Kello 6.22.15 lennonjohtaja havaitsi alkunousussa olevan koneen korkeuden laskeeneen 1700 jalasta (ft) 1600 jalkaan. Lennonjohtaja tiedusteli mihin korkeuteen lentäjät aikoivat nousta, jolloin kapteeni päätti kiivetä alustavasti 5000 jalkaan ongelmanratkaisua varten. Koneen johtoreunasolakot ja jättöreunalaipat otettiin sisään ja kone oli sileä (0° laippakulma) kello 6.22.33. Tällöin MCAS-järjestelmä trimmasi automaattisesti koneen korkeusperäsintä nokka alas -asentoon (Aircraft Nose Down, AND) noin 10 sekunnin ajan. MCAS:n aikaansaama automaattinen AND-trimmaustendessi jatkui lennon loppuun asti. (KNKT 2019, 21)

Kello 6.22.41 kapteeni pyysi perämiestä ottamaan laipat 1-asentoon (8° laippakulmaan) ja trimmasi korkeusperäsintä manuaalisesti nokka ylös -asentoon (Aircraft Nose Up, ANU) koneen sähkökäyttöisellä trimmillä. Perämies valitsi kapteenin pyytämän laippa-asetuksen. Neljä sekuntia myöhemmin (6.22.45) kone oli jyrkässä liu'ussa 3570 ft/min pystynopeudella. Kello 6.22.57 perämies kysyi lennonjohtajalta lentokoneen nopeutta lennonjohdon tutkajärjestelmässä. Lennonjohtaja vastasi koneen maanopeuden olevan 322 solmua (kn). (KNKT 2019, 21–22)

Lentokoneessa aktivoitui EGPWS:n (Enhanced Ground Proximity Warning System) AIR SPEED LOW -varoitusta kello 6.23.00, vaikka koneen nopeus oli todellisuudessa lähellä maksimaalista sallittua operointinopeutta (V_{MO} 340 kn). Vasemman PFD:n ilmanopeusmittari näytti lukemaa 306 kn ja oikean PFD:n ilmanopeusmittari lukemaa 318 kn. Kello 6.23.00 miehistö valitsi laippa-asetuksen 5 (14° laippakulma) ja kapteeni jatkoi koneen trimmaamista ANU-asentoon manuaalisesti. Koneetta oli helpompi hallita, kun laippa-asetus ei ollut 0. (KNKT 2019, 22)

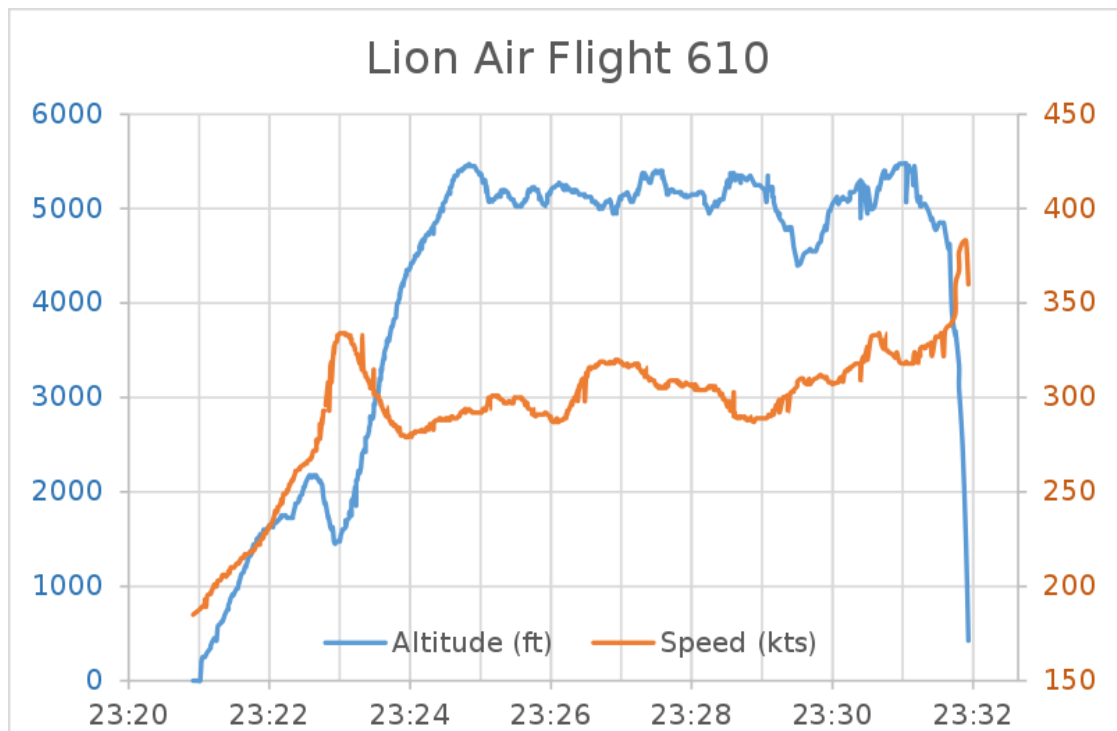
Kello 6.23.04 lentäjät olivat saaneet koneen nousun puolelle ja pystynopeus oli noin 1500 ft/min. Viisi sekuntia tämän jälkeen kapteeni pyysi toisen kerran perämiestä suorittamaan memory itemit (6.23.09). Perämies kysyi kapteenilta mitkä memory itemit hänen pitäisi suorittaa, johon kapteeni vastasi ainoastaan ”check” (6.23.17). Kello 6.23.34 perämies ehdotti kapteenille QRH:n (Quick Reference Handbook) Flight Control -osion avaamista, kapteeni vastasi myöntävästi. CVR:iin (Cockpit Voice Recorder) tallentui QRH:n sivujen kääntelyn ääntä. 31 sekunnin kuluttua kapteeni pyysi perämiestä tekemään QRH:sta epäluotettavan nopeusindikaation tarkistuslistan (6.24.05). Kone oli edelleen nousussa noin 1600 ft/min pystynopeudella. (KNKT 2019, 22–23)

Kello 6.24.31 perämies ilmoitti kapteenille, ettei löydä kyseistä tarkistuslistaa QRH:sta. 12 sekuntia myöhemmin kone oli ylittänyt suunnitellun 5000 ft korkeuden (6.24.43) ja kapteeni oli pienentänyt pystynopeutta, joka oli edelleen noin 460 ft/min nousun puolella. Kello 6.24.52 laippavipu siirrettiin asentoon 1 (8° laippakulma), CVR:iin ei tallentunut lentäjien keskustelua asiasta. 21 sekuntia myöhemmin laippavipu siirrettiin 0-asentoon (6.25.13). Kello 6.25.17 perämies löysi QRH:sta epäluotettavan nopeusindikaation tarkistuslistan ja alkoi lukea sitä. Kello 6.27.58 perämies ilmoitti kapteenille siirtyvänsä tarkastelemaan tarkistuslistaan kuuluvia suorituskykytaulukoita. 11 sekuntia myöhemmin perämies soitti sisäpuhelimella ja pyysi matkustamohenkilökunnan jäsenen ohjaamoon (6.28.09). (KNKT 2019, 23–25)

Kapteeni oli onnistunut pääpiirteittäin säilyttämään vaakalennon ja koneen hallinnan trimmaamalla korkeusperäsintä jatkuvasti MCAS:n automaattista AND-trim-

mausta vastaan. Kello 6.28.18. matkustamohenkilökunnan jäsen saapui ohjaamoon ja kapteeni pyysi häntä hakemaan lennolla mukana olleen mekaanikon paikalle. Mekaanikko saapui ohjaamoon 23 sekuntia myöhemmin (6.28.41). Kello 6.29.45 lennonjohtaja ohjeisti lentäjiä vaihtamaan radiotaajuutta. Seuraava tutkalennonjohtaja ryhtyi vektoroimaan konetta takaisin lähtökentälle lähestymiseen kiitotielle 25L (6.30.02). Kello 6.30.48 kapteeni vaihtoi kontrollit perämiehelle ja ryhtyi itse keskustelemaan lennonjohtajan kanssa PM:n roolissa. Perämies ei kuitenkaan trimmannut korkeusperäsintä riittävästi ANU-asentoon ja MCAS ajoi koneen nokkaa koko ajan voimakkaammin alas. (KNKT 2019, 25–26)

Kello 6.31.27 ohjainvoimat perämiehen puolella ovat ylittäneet 37,2 kg, sertifiointirajojen mukaan ne eivät saisi missään vaiheessa ylittää 34 kg:aa. Tästä kuuden sekunnin kuluttua perämies ilmoitti kapteenille, ettei kykene pitämään konetta vaakalennossa (6.31.33). Kone oli tuolloin liu'ussa noin 1920 ft/min pystynopeudella. Perämies ilmoitti hätäntyneenä jälleen kolmen sekunnin päästä kapteenille, että kone putoaa. Tähän kapteeni vastasi "it's ok" (6.31.36). Kello 6.31.46 koneen lentokorkeus oli alle 4000 ft ja kone syöksyi merta kohti yli 10 000 ft/min pystynopeudella. Vaadittavat ohjainvoimat olivat ylittäneet jo 46,7 kg. Viisi sekuntia myöhemmin ylinopeusvaroitukset, sekä EGPWS:n TERRAIN ja SINK RATE -varoitukset olivat aktivoituneet (6.31.51). Kone törmäsi Jaavanmereen kello 6.31.53, alle 12 minuuttia lentoalähdöstä (kuva 16). Törmäysenergia oli niin suuri, ettei se jättänyt minkäänlaista selviytymisen mahdollisuutta. (KNKT 2019, 27, 86)



KUVA 16. JT610:n korkeus- ja nopeuskuvaajat (Wikimedia Commons 2018)

3.2.2 Lion Air JT043

KNKT:n onnettomuustutkintaraportissa käsitellään laajasti myös turmaa edeltänyttä lentoa JT043, sillä sen tapahtumat liittyvät keskeisesti JT610:n onnettomuuteen.

Lentoturmaa edeltävänä päivänä, 28.10.2018, koneella operoitiin Lion Airin lento JT043 Denpasarista Jakartaan. Ennen lentoa kapteeni keskusteli paikallisen mekaanikon kanssa koneessa aikaisemmin esiintyneistä vioista ja siitä, että koneen vasen kohtauskulma-anturi oli juuri vaihdettu. Lennon JT043 ongelmat alkoivat noin 400 jalan korkeudessa, kun vasemmalle PFD:lle ilmestyi IAS DISAGREE -varoitus ja stick shaker aktivoitui. (KNKT 2019, 165–166)

Lentovuorossa (PF) ollut kapteeni toimi tilanteessa oikein säilyttäen 15° nokan asennon ja lento-ohjainten asetuksen. Tämän jälkeen kapteeni suoritti vertailua hänen ja perämiehen PFD:n mittareiden välillä. Kapteeni pystyi päättelemään, että perämiehen PFD näyttää oikeaa dataa ja hänen indikaationsa ovat virheellisiä. Seuraavaksi kapteeni siirsi kontrollit perämiehelle, ryhtyi toteuttamaan epä-

luotettavan nopeusindikaation muistinvaraisia toimenpiteitä ja vaihtoi väärin näyttävän, lentäjälle ohjauskäskyjä antavan, vasemman puolen Flight Directorin (FD) toimivaan oikean puolen FD:iin. (KNKT 2019, 166)

Saatuaan muistinvaraiset toimenpiteet valmiiksi kapteeni kumartui ottamaan koneen QRH:ia, jolloin lennolla matkustajana ohjaamon kolmannella istuimella istunut Lion Airin 737-perämies mainitsi koneen joutuneen syöksyn puolelle. Kapteeni ohjeisti lentävää perämiestä trimmaamaan konetta jatkuvasti, jotta koneen pystynopeus pysyy positiivisena eivätkä vaadittavat ohjainvoimat pääse kasvamaan liian suureksi. (KNKT 2019, 166)

Kapteeni seurasi hetken aikaa perämiehen lentämistä sekä koneen toimintaa ja huomasi, että peräsintrimmi ajaa itseään automaattisesti nokka alas -asentoon. Tämän huomattuaan kapteeni suoritti karanteen peräsintrimmin muistinvaraiset toimenpiteet, jossa sähkötrimmin tappokytkimet kytketään päälle. Automaattiset peräsintrimmin liikkeet lakkasivat välittömästi ja konetta pystyi trimmaamaan manuaalisesti trimmipyörää säätämällä. Muutaman minuutin kuluttua kapteeni laittoi sähkötrimmin tappokytkimet pois päältä, jolloin automaattiset AND-trimmaukset jatkuivat välittömästi. Kapteeni laittoi tappokytkimet takaisin päälle ja perämies jatkoi koneen manuaalista trimmaamista loppulennon ajan. Myös eriävän korkeusindikaation tarkistuslista suoritettiin lennon aikana. (KNKT 2019, 166–167)

Kapteeni teki poikkeuksellisen päätöksen olla palaamatta muutaman minuutin lentomatkan päässä sijaitsevalle lähtökentälle ja lento JT043 jatkoi määränpäähänsä Jakartalle. Perämies jatkoi PF:na ja kapteeni monitoroi perämiehen lentämistä toimivista oikean puolen mittareista. Stick shaker oli aktiivinen koko lennon ajan. JT043 laskeutui onnistuneesti Jakartalle 96 minuutin lentoajan jälkeen, jolloin sähkötrimmin tappokytkimet laitettiin jostain syystä takaisin normaaliasentoon. (KNKT 2019, 167–168)

Perillä Jakartassa kapteeni mainitsi paikalle saapuneelle mekaanikolle suullisesti lennolla esiintyneistä ongelmista ja teki vikakirjaukset koneen tekniseen lokiin. Hän ei kuitenkaan maininnut stick shakerin aktivoitumista tai peräsintrimmin tappokytkimien käyttöä mekaanikolle, eikä hän myöskään kirjannut niitä koneen lo-

kikirjaan. Kapteeni kirjoitti tapahtuneesta seuraavana aamuna ASR-lentoturvallisuusraportin (Air Safety Report), jossa hän mainitsi automaattisen peräsintrimmin epäloogisen toiminnan. Hän myös välitti kirjoittamansa ASR:n sisällön suoraan Lion Airin turvallisuusosastolle. (KNKT 2019, 168)

3.2.3 Keskeiset löydökset

KNKT mainitsee tutkintaraportissaan 89 keskeistä löydöstä (finding) ja niistä on jalostettu yhdeksän JT610:n onnettomuuden syntyyn vaikuttanutta tekijää (contributing factor).

MCAS oli alun perin suunniteltu toimimaan ainoastaan käsinlennossa, laippa-asetuksella 0 (sileänä) ja suurella kohtauskulmalla. Myöhemmin MCAS:n toiminta-aluetta laajennettiin alhaisille Machin luvuille ja samalla sille annettiin auktoriteetti toteuttaa suurempia korkeusperäsimen poikkeutuksia (maksimissaan 2,5°). (KNKT 2019, 204)

MAX 8:n tyyppihyväksyntäprosessin aikaisessa FHA-riskianalyysissä (Functional Hazard Assessment) Boeing luokitteli MCAS:n aktivoiman ei-toivotun AND-trimmauksen kuuluvan merkittävän (major) riskin kategoriaan. Riskin luokittelu vaaralliseen (hazardous) tai katastrofaaliseen (catastrophic) kategoriaan olisi vaatinut tarkempaa turvallisuusanalyysiä ja muutoksia MCAS:n järjestelmäsuunnitteluun. Boeing pohjasi riskikategorian oletukseen, että tilanne voitaisiin hallita pelkästään korkeusperäsinohjauksella, eikä sähkötrimmiä tai sähkötrimmin tapokytкимиä tarvitsisi käyttää. Oletus osoittautui vääräksi. DFDR:iin tallentui onnettomuuslennon viimeisillä hetkillä 46,7 kg ohjainvoimia, vaikka sertifiointiprosessin mukaan ne saavat olla suurimmillaan 34 kg. (KNKT 2019, 206)

MCAS:n ohjelmisto käyttää ainoastaan yhden kohtauskulma-anturin dataa, vaikka antureita on koneessa kaksi kappaletta. Näin ollen yhden anturin vikaantuminen voi johtaa ei-toivottuun MCAS:n aktivoitumiseen. Jos MCAS:iin liittyvä riskikategoria olisi ollut suurempi kuin merkittävä, järjestelmä olisi pitänyt suunnitella vertailemaan vähintään kahden erillisen anturin kohtauskulmadataa (KNKT 2019, 206)

Kohtauskulma-anturien eriävät lukemat aiheuttivat lennolla lukuisia eri varoituksia ja vikaindikaatioita. Kuitenkaan missään vaiheessa järjestelmässä ei aktivoitunut ongelman juurisyystä kertovaa, eriävistä kohtauskulmalukemista varoittavaa AOA DISAGREE -viestiä. Boeingin tyyppihyväksyntää varten luoman järjestelmäkuvauksen mukaan kyseinen varoitusviesti olisi pitänyt aktivoitua. Tämä heikensi lentäjien tilannetietoisuutta ja vaikeutti ongelmanratkaisua. (KNKT 2019, 207, 211)

Normaalissa lentotilassa ohjaimista vetäminen keskeyttää sähköisen korkeusperäsintrimmin toiminnan, mutta MCAS:n ohittaa tämän turvaominaisuuden ollessaan aktiivinen. Boeing ei tuonut asiaa ilmi lentäjien koulutusmateriaaleissa, sillä MCAS:n olemassaoloa ei mainittu laisinkaan lentokoneen operatiivisessa käsikirjassa (Flight Crew Operating Manual, FCOM). Boeing ei ollut myöskään luonut toimenpiteitä tai tarkistuslistoja virheellisen kohtauskulmaindikaation tapauksessa. (KNKT 2019, 207)

Koulutus MCAS:sta ja siihen liittyvistä poikkeustilanteista olisi auttanut lentäjiä tunnistamaan ongelman ja toimimaan tilanteenmukaisesti. Boeing ei kuitenkaan toimittanut operaattoreille tietoa MCAS:sta tai koulutusvaatimuksia järjestelmän toimintaan liittyen, sillä sen toimintaa pidettiin riittävän samankaltaisena 737:n aikaisempien sukupolvien varianttien kanssa. (KNKT 2019, 213)

Mekaanikko vaihtoi koneen vasemmanpuoleisen kohtauskulma-anturin Denpasarissa ennen JT610:aa edeltänyttä lentoa (JT043). Työohjeisiin kuului asennustyön jälkeinen molempien kohtauskulma-antureiden lukemien tarkastaminen ja eroavaisuuslukeman ylös kirjaaminen. Tätä kirjausta ei kuitenkaan jälkikäteen löytynyt, joten on todennäköistä, ettei mekaanikko myöskään tarkastanut antureiden lukemia. Kohtauskulma-antureiden eroavaisuudeksi jäi virheellisen kalibroinnin seurauksena 21°. (KNKT 2019, 209)

JT043:n lentäjät tekivät lennon jälkeen koneen tekniseen lokikirjaan (Aircraft Flight Maintenance Log, AFML) ainoastaan kirjaukset "IAS and ALT Disagree shown after take-off" ja "FEEL DIFF PRESS light illuminated". Kirjaukset eivät

anna oikeaa kuvaa lennolla esiintyneiden ongelmien vakavuudesta tai laajuudesta, eikä raporttiin kirjattu toimenpiteitä, joilla lentäjät kykenivät ratkaisemaan ongelmat. Kirjaukset eivät olleet Lion Airin toimintakäsikirjan OM-A:n mukaisia. Oikein kirjattuna raportti olisi potentiaalisesti tunnistettu heti vakavaksi lentoturvallisuutta vaarantavaksi tapahtumaksi (serious incident), mikä olisi puolestaan johtanut kyseisen koneyksilön lentokieltoon ja KNKT:n tutkintaan jo lennosta JT043. (KNKT 2019, 210–211)

Lennon JT610 perämies ei kyennyt tekemään epäluotettavan nopeusindikaation muistinvaraisia toimenpiteitä, eikä hän myöskään myöhemmin kyennyt löytämään riittävällä nopeudella tilannetta koskevaa tarkistuslistaa QRH:sta. Perämiehen koulutustaustaa tutkittaessa kävi ilmi, että hänellä oli ollut jo aikaisemmin koulutuksessa haasteita oikeiden tarkistuslistojen löytämisessä ja tunnistamisessa. Lentäjät eivät saaneet tehtyä oikeaa tarkistuslistaa loppuun asti lennolla. Tämä hankaloitti omalta osaltaan lentäjien kykyä hahmottaa käsillä olevan ongelman syytä ja oikeita toimenpiteitä tilanteen korjaamiseksi. (KNKT 2019, 212)

Kapteeni ei kuvaillut kontrollien vaihdon yhteydessä perämiehelle, miten vaakalento on mahdollista säilyttää MCAS:n trimmatessa koneen nokkaa alaspäin. Hän ei maininnut perämiehelle, että kone vaatii normaalista lentotilasta poiketen jatkuvaa sähköisen peräsintrimmin käyttöä. Tällä saattoi olla vaikutusta siihen, ettei perämies kyennyt säilyttämään vaakalentoa ja koneen nokkaa painui niin alas, ettei tilannetta pystynyt enää korjaamaan. (KNKT 2019, 213)

3.2.4 Vaikuttavat tekijät

KNKT on listannut raportissaan yhdeksän lennon JT610 onnettomuuden syntyyn vaikuttanutta tekijää, jotka on tunnistettu tutkinnan löydösten perusteella (KNKT 2019, 215):

1. Boeing teki 737 MAX 8:n suunnittelu- ja tyyppihyväksyntäprosessien aikana vääräksi osoittautuneita oletuksia lentäjien reaktioista tiettyihin MCAS:n vikatilanteisiin.

2. MCAS:n yhteen kohtauskulma-anturiin perustuva järjestelmäsuunnittelu katsottiin riittäväksi ja sertifiointivaatimukset täyttäväksi perustuen edellä mainittuihin väriin oletuksiin lentäjien reaktioista MCAS:n vikatilanteissa.
3. MCAS suunniteltiin toimimaan ainoastaan yhden kohtauskulma-anturin datan perusteella, mikä teki siitä erityisen haavoittuvasen kyseisen anturin virheindikaatioille.
4. MCAS:sta tai sen vaikutuksesta peräsintrimmin käyttäytymiseen ei ollut mainintaa lentäjien käsikirjoissa tai koulutuksessa, mikä vaikeutti lentäjien oikeaa toimintaa MCAS:n ei-toivotussa aktivoitumisessa.
5. AOA DISAGREE -varoitusta ei aktivoitunut eriävien kohtauskulmalukemien tilanteessa, vaikka se oli mainittu sertifiointiperusteena toimineessa järjestelmäkuvauksessa. Onnettomuutta edeltäneen JT043-lennon lentäjät eivät siten voineet kirjata varoitusta koneen tekniseen lokikirjaan lennon jälkeen. Tällainen kirjaus olisi auttanut huolto-organisaatiota tunnistamaan kalibroimattoman kohtauskulma-anturin ennen onnettomuuslentoa.
6. Kalibroimaton kohtauskulma-anturi oli asennettu jo ennen onnettomuuslentoa. Kohtauskulma-anturien eriäviä lukemia ei huomattu asennuksen yhteydessä.
7. Onnettomuustutkinnassa ei saatu varmuutta siitä, seurattiinko kohtauskulma-anturin asennuksen työohjetta asianmukaisesti ja tehtiinkö kaikkia asennuksenjälkeisiä testejä. Joka tapauksessa kohtauskulma-anturin väärää kalibrointia ei havaittu.
8. Koneen teknisessä lokikirjassa ei ollut mainintaa stick shakerin aktivoitumisesta tai karanneen peräsintrimmin toimenpiteiden suorittamisesta lennolla JT043. Tieto ei siten ollut Jakartan mekaanikkojen tai onnettomuuslennon miehistön käytettävissä. Tämä heikensi molempien toimijoiden kykyä reagoida asianmukaisesti.
9. Lentäjät eivät kyenneet tehokkaasti käsittelemään ja hallinnoimaan onnettomuuslennolla esiintyneitä useita erillisiä varoituksia, toistuvia MCAS:n aktivoitumisia ja lukuisia lennonjohdon aiheuttamia häiriötekijöitä. Haasteet koneen lentämisessä, oikeiden muistinvaraisten toimenpiteiden ja tarkistuslistojen suorittamisessa ja ohjaamomiehistön keskinäisessä kommunikoinnissa johtivat epäoptimaaliseen ohjaamoyhteistyöhön (CRM) ja työkuorman hallintaan. Samoja ongelmia oli tunnistettu kyseisillä lentäjillä jo koulutuksen aikana ja ne ilmenivät uudestaan onnettomuuslennolla.

3.3 Ethiopian Airlines ET302

Etiopialaisen Ethiopian Airlinesin Boeing 737 MAX 8, rekisteritunnukseltaan ET-AVJ ja lennon numerolla ET302, suoritti 10.3.2019 kello 8.38 paikallista aikaa (5.38 UTC) lentoonlähdön Addis Abebassa sijaitsevalta Bolen kansainväliseltä lentoasemalta määränpäänään Jomo Kenyattan kansainvälinen lentoasema Nairobissa, Keniassa. Vallitseva lentosää oli kirkas ja pilvetön, tuuli oli Bolen lentoasemalla heikko. Kone jatkoi lentoonlähdön jälkeen kohti koillista. Kuusi minuuttia lentoonlähdön jälkeen, kello 8.44, lento ET302 iskeytyi suurella nopeudella peltoon 62 km Bolen lentoasemalta kaakkoon. Kaikki lentokoneessa olleet 157 ihmistä menehtyivät välittömästi. (EAIB 2022, 17–18)

3.3.1 Tapahtumien kulku

Etiopian turvallisuustutkintaviranomaisen EAIB:n (Ethiopian Aircraft Accident Investigation Bureau) mukaan ET302 suoritti normaalin lentoonlähdön Bolen lentoaseman kiitotieltä 07R kello 8.36.12. Lentoonlähdön aikana vasen ja oikea kohtauskulma-anturi mittasivat paikkansa pitäviä, keskenään yhteneväisiä arvoja. Hieman lentoonlähdön jälkeen (8.38.44) vasemman kohtauskulma-anturin lukema lähti kasvamaan, indikoiden lopulta 74,5° kohtauskulmaa. Oikeanpuoleinen anturi mittasi todenmukaista, noin 15° kohtauskulmaa. (EAIB 2022, 20–21)

Viallisen kohtauskulmaindikaation seurauksena vasemman puolen ohjainten stick shaker -sakkausvaroitin aktivoitui ja pysyi aktiivisena lennon loppuun asti. Vasemman puolen PFD näytti virheellisiä korkeus- ja nopeuslukemia. Kello 8.38.48 MASTER CAUTION ja ANTI-ICE varoitusvalot syttyivät. Kahdeksan sekuntia myöhemmin (8.38.56) lentovuorossa ollut kapteeni (PF) pyysi perämiestä (PM) laittamaan autopilotin päälle. Autopilotti ei kuitenkaan mennyt päälle ja autopilotin irtikytkemisen varoitusääni kuului kahden sekunnin ajan. Kello 8.39.01 lentäjät yrittivät uudestaan kytkeä autopilotin päälle, mutta sama varoitusääni toistui. Kapteeni trimmasi korkeusperäsintä sähkötrimmillä ja ohjainvoimat pysyivät jotakuinkin neutraalina. (EAIB 2022, 21–22)

Kello 8.39.23, noin 1000 ft korkeudella, lentäjät yrittivät kolmatta kertaa kytkeä vasemman autopilotin päälle, tällä kertaa siinä onnistuen. Vasemmanpuoleisen kohtauskulma-anturin virheellisten arvojen vuoksi vasen, muun muassa sakkausnopeuksia laskeva tietokone, Stall Management and Yaw Damper Computer (SMYDC), laski koneelle virheellisiä operatiivisia nopeuksia ja autopilotti laski koneen nokkaa kiihdyttäen kohti virheellisesti laskettua miniminopeutta (V_{MIN}). Kello 8.39.42 lentäjät säätivät autopilotin nopeus- ja korkeusmoodeja saaden koneen nousun puolelle. (EAIB 2022, 23–24)

Kello 8.39.45 kapteeni pyysi perämiestä silittämään koneen ja perämies siirsi laippavivun 0-asentoon. Autopilotti ryhtyi jälleen laskemaan koneen nokkaa tavoitellakseen vasemman SMYDC:n laskemaa virheellistä miniminopeutta ja kello 8.39.56 autopilotti tippui pois päältä, sillä se ei pystynyt toteuttamaan siltä LVL CHANGE -moodilla pyydettyä nousua. Tässä vaiheessa koneen pystynopeus oli noin 1400 ft/min liu'un puolella ja jättöreunalaipat sekä johtoreunasolakot olivat vielä liikkumassa sisäänpäin. (EAIB 2022, 24)

Autopilotin irrottua kapteeni pyrki pitämään koneen nousun puolella vetämällä ohjaimista. Kello 8.39.59 kapteeni ilmoitti ensimmäistä kertaa radiolla lennonjohtajalle koneen ohjaamiseen liittyvistä ja ongelmista ja pyysi saada jatkaa lentämistä suoraan kiitotien suuntaan. Jotakuinkin samaan aikaan (8.40.00) laipat saavuttivat 0-asennon ja samalla MCAS alkoi automaattisesti trimmata korkeuseräsinä nokka-alas asentoon virheellisestä vasemman puolen kohtauskulmalukemasta johtuen. MCAS oli aktiivisena täyden yhdeksän sekunnin syklin ajan ja samalla EGPWS:n negatiivisesta vertikaalisesta lentoradasta sekä maastonesteiden läheisyydestä kertovat DON'T SINK ja PULL UP -varoitukset aktivoituivat. (EAIB 2022, 25)

Kello 8.40.04 perämies kertoi lennonjohdolle, etteivät he pysty noudattamaan heille selvitettyä vakiolähtöreittiä (SID SHALA 1A). Kapteenin puolen ohjainvoimat olivat ylittäneet jo 40 kg, kun hän ryhtyi trimmaamaan koneen peräsinä sähkötrimmillä. Kello 8.40.22 MCAS aloitti jälleen automaattisen AND-trimmauksen ja samalla DON'T SINK sekä PULL UP -varoitukset aktivoituivat uudelleen. Kapteeni pyysi perämiestä käyttämään peräsintrimmin tappokytкимиä ja lyhyen varmistuksen jälkeen tappokytkimet aktivoitiin (8.40.38). (EAIB 2022, 26)

Tässä vaiheessa lentokorkeus oli noin 1500 ft maan pinnasta ja lentäjät olivat saaneet koneen nousun puolelle 350 ft/min pystynopeudella. Koneen lennonhallintatietokone (Flight Management Computer, FMC) tunnisti merkittävän eron vasemman ja oikean TAS-lukeman välillä, mutta ei kuitenkaan antanut asiasta varoitusta lentäjille. Eriävien TAS-lukemien takia myöskään koneen autokaasu ei aktivoitunut. Virheellisen vasemmanpuoleisen kohtauskulma-arvon myötä vasen SMYDC laski stick shaker -nopeuden ja miniminopeuden olevan suurempia kuin koneen suurin sallittu operointinopeus (V_{MO}). Kone ei antanut varoituksia asiasta, eikä SMYDC vertailut laskemiaan nopeuksia virheellisten indikaatioiden tunnistamiseksi. (EAIB 2022, 26–27)

Kello 8.40.43 MCAS antoi korkeusperäsimmelle kolmannen AND-trimmauskäskyn, mutta korkeusperäsin ei liikkunut, sillä sähkötrimmin tappokytkimet oli aktivoitu. Tässä vaiheessa kapteeni oli saanut koneen nousun puolelle noin 1800 ft/min pystynopeudella, mutta konetta oli haastavaa lentää suureksi kasvaneiden ohjainvoimien vuoksi. Kapteeni pyysi perämiestä avustamaan häntä koneen ohjauksessa. Seuraavien noin 2,5 minuutin aikana koneen nokan asento vaihteli 2° AND ja 7° ANU välillä, samalla pystynopeus oskilloi 2500 ft/min liu'un ja 4400 ft/min nousun välillä. Vaadittavat ohjainvoimat ylittivät paikoitellen 50 kg. (EAIB 2022, 27)

Kello 8.41.21 koneen nopeus ylitti suurimman sallitun operointinopeuden (V_{MO}) ja ylinopeusvaroitusta alkoi soida ohjaamossa, pysyen aktiivisena lennon loppuun asti. Kaksi sekuntia myöhemmin kone saavutti 14 000 ft MSA-estevarakorkeuden (Minimum Sector Altitude) (8.41.23) ja 24 sekuntia tästä kapteeni kysyi perämieheltä, toimiiko koneen peräsintrimmi (8.41.47). Perämies totesi, ettei trimmi toimi ja ehdotti että hän yrittäisi pyörittää trimmipyörää manuaalisesti käsivoimilla, johon kapteeni suostui. Kello 8.41.56 perämies ilmoitti kapteenille, ettei onnistu säätämään trimmiä käsin. Kapteeni pyysi jälleen perämiestä auttamaan koneen ohjauksessa suurien ohjainvoimien vuoksi. (EAIB 2022, 28)

Kello 8.42.15 perämies pyysi lennonjohtajalta vektoreita paluuseen takaisin lähtökentälle. 32 sekuntia myöhemmin lentäjät keskustelivat koneen varoitustietokoneen antaman MASTER CAUTION -varoituksen syystä (8.42.47). Kone indikoi jäänpoistojärjestelmän vikaa vasemmassa kohtauskulma-anturissa. Kello

8.43.04 kapteeni sanoi perämiehelle, ettei kykene säilyttämään koneen nokan asentoa ja pyysi perämiestä asettamaan sähköisen peräsintrimmin tappokytkimet takaisin normaaliasentoon. (EAIB 2022, 28–29)

Kello 8.43.11 tappokytkimet olivat normaaliasennossa ja lentäjät yrittivät kytkeä autopilottia päälle, siinä kuitenkaan onnistumatta. Kapteeni trimmasi koneen nokkaa ylöspäin sähkötrimmillä. Kello 8.43.21 MCAS aktivoitui neljännen kerran ja ajoi peräsintrimmiä alaspäin viiden sekunnin ajan. Koneen nokka laski asentoon $-7,8^\circ$ AND, pystynopeus tippui liu'un puolelle 5000 ft/min ja ilmanopeus kasvoi. Tässä vaiheessa edes yli 80 kg ohjainvoimat eivät riittäneet pysäyttämään koneen syöksyä. Kello 8.43.36 EGPWS:n TERRAIN ja PULL UP varoitukset aktivoituivat jälleen ja kahdeksan sekuntia myöhemmin kone iskeytyi maahan (8.43.44). Törmäyshetkellä koneen nopeus oli yli 500 kn, nokan asento -40° AND ja pystynopeus yli 33 000 ft/min. Törmäysenergia oli niin suuri, ettei selviytymisen mahdollisuuksia ollut. (EAIB 2022, 30)

3.3.2 Keskeiset löydökset

EAIB mainitsee tutkintaraportissaan 88 keskeistä löydöstä (finding) ja kymmenen onnettomuuden syntyyn vaikuttanutta tekijää (contributing factor). Alla on esitelty niistä keskeisimmät.

Lähtökiidon alkaessa lentokoneen molemmat kohtauskulma-anturit näyttivät todenmukaista lukemaa, mutta hieman rotaation jälkeen vasemmanpuoleisen anturin lukema lähti kasvamaan holtittomasti. Suurimmillaan kohtauskulma-anturien lukemat erosivat toisistaan 59° . Vasen stick shaker -sakkausvaroitin aktivoitui heti lentoonlähdon jälkeen ja pysyi aktiivisena lennon loppuun asti. Samaan aikaan myös MASTER CAUTION -valo syttyi ja kone antoi varoituksen vasemman puolen kohtauskulma-anturin jäänpoistojärjestelmän vikatilasta. Vasemman ja oikean puolen eriävistä nopeus- ja korkeuslukemista varoittavat IAS DISAGREE ja ALT DISAGREE viestit eivät koskaan aktivoituneet koneen lentoarvotallentimen (Flight Data Recorder, FDR) mukaan. Tällä oli myötävaikutusta siihen, etteivät lentäjät tehneet epäluotettavan nopeusindikaation muistinvaraisia toimenpiteitä ja tarkistuslistaa. (EAIB 2022, 247)

Vasemman kohtauskulma-anturin virheellinen kohtauskulmadata aktivoi MCAS:n, joka laski toistuvasti lentokoneen nokkaa, kunnes lentäjät lopulta menettivät koneen hallinnan. MCAS oli suunniteltu toimimaan yksittäisen kohtauskulma-anturin datan perusteella, mikä teki siitä erityisen haavoittuvasen anturivioille. MCAS:iin liittyvä FHA-riskianalyysi käsitteli ainoastaan MCAS:n epätoivotun aktivoitumisen vaikutusta lentokoneen ohjaimiin, mutta se ei ottanut huomioon virheellisen kohtauskulmaindikaation kumulatiivisia vaikutuksia lentokoneen muihin järjestelmiin, näyttöihin tai varoituksiin. (EAIB 2022, 247, 250)

Boeingin riskianalyysissä oletettiin, että MCAS:n epätoivotun aktivoitumisen voisi hallita käyttämällä pelkästään koneen normaalia korkeusperäsinohjausta, eikä trimmipyörän tappokytкимиä tarvitsisi välttämättä käyttää. Oletus osoittautui vääräksi, sillä lentäjiltä vaadittavat ohjainvoimat kasvoivat onnettomuuslennolla niin suuriksi, ettei koneen pitäminen vaakalennossa ilman peräsintrimmin käyttöä ollut mahdollista. Boeing ei myöskään testannut useiden peräkkäisten MCAS-aktivoitumisten kumulatiivisia vaikutuksia MAX:n tyyppihyväksyntävaiheessa, eikä Boeing luokitellut MCAS:ia turvallisuuskriittiseksi järjestelmäksi, mikä olisi todennäköisesti johtanut tyyppihyväksyntäviranomaisen FAA:n tarkempaan analyysiin järjestelmästä. (EAIB 2022, 252–253)

Manuaalisen trimmipyörän pyörittämiseen tarvittavia voimia tutkittiin myöhemmin onnettomuustutkinnan yhteydessä simulaattorissa, missä havaittiin vaadittavien voimien olevan kohtuuttoman suuria sekä pienen, että suuren ilmanopeuden tapauksissa. Yhden yksikön trimmimuutos vaati 15 täyttä trimmipyörän poikkeutusta ja onnettomuutta vastaavissa olosuhteissa peräsintrimmin tuominen neutraaliin asentoon olisi vaatinut 40 täyttä trimmipyörän poikkeutusta. (EAIB 2022, 249–250)

Onnettomuuden syntymiseen myötävaikutti myös se, että lentäjät eivät tieneet MCAS:n olemassaolosta eikä järjestelmän toiminnasta ollut annettu lentäjille koulutusta. Lisäksi lennolla aktivoituneet useat yhtäaikaiset varoitukset aiheuttivat hämmennystä ja yllättivät lentäjät (startle effect). Lentäjien työkuorma oli valtaisa heti lentoonlähdestä lennon viimeisiin hetkiin asti. Boeing oli luonut MAX-sarjasta CBT-koulutuspaketin (Computer-Based Training), jonka oli tarkoitus käsitellä eroavaisuudet 737:n NG- ja MAX-sukupolvien välillä. Tässä koulutuspaketissa ei

kuitenkaan ollut mainintaa MCAS:sta. Järjestelmää ei mainittu lentäjille suunnatuissa lentokoneen FCOM- tai AFM-käsikirjoissa (Aircraft Flight Manual), eikä Boeing maininnut myöskään operaattoreille järjestelmän olemassaolosta. Boeingin NG:sta MAX:iin siirtyville lentäjille luoma eroavaisuuskoulutus todettiin EAIB:n tutkinnassa riittämättömäksi. (EAIB 2022, 247–248, 250–252, 254)

Vasemmanpuoleinen SMYDC 1 laski kapteenin nopeusmittarilla näkyvän pienimmän sallitun operointinopeuden (V_{MIN}) ja sakkausvaroitusten aktivoitumisnopeuden olevan suurempia kuin koneen maksimaalinen sallittu operointinopeus (V_{MO}). SMYDC 1 ei suorittanut laskentaan järkevyytarkastelua, eikä myöskään verrannut nopeuslaskennan tuloksia oikeanpuoleista kohtauskulma-anturia käyttävän SMYDC 2:n laskemiin arvoihin. Stick shaker varoitti lentäjiä vaarallisen alhaisesta nopeudesta ja samalla nopeusmittarin lukemat sekä ylinopeusvaroitukset varoittivat liian suuresta nopeudesta. Tilanne oli lentäjille sekava ja vaikea tulkita oikein. (EAIB 2022, 248–249)

Autopilottia ei pitäisi kytkeä päälle silloin kun stick shaker on aktivoitunut. ET302:n lentäjät yrittivät kuitenkin kytkeä autopilottia päälle useita kertoja ja lopulta onnistuivat siinä hetkellisesti. Koneen automatiikka sai virheellistä dataa vialliselta kohtauskulma-anturilta, eikä se toiminut odotetulla tavalla. Automatiikka päästi koneen kiihtymään yli tavoitenopeuden ja kone päättyi lopulta liukuun, vaikka autopilotti oli säädetty kiipeämään MSA-korkeuteen. Autokaasu pysyi koko lennon ajan suuren tehoasetuksen lento-ohjelmointimoodissa, sillä viallisen kohtauskulmaindikaation takia koneen FMC ei tunnistanut tehonvähennyskorkeutta. Lentäjät eivät saaneet varoituksia autokaasun viallisesta toiminnasta. (EAIB 2022, 247–248)

Onnettomuustutkinnassa selvisi, että kyseisessä koneyksilössä oli alkanut esiintyä selittämättömiä sähkövikoja vain muutamia viikkoja koneen käyttöönoton jälkeen ja niitä oli esiintynyt myös onnettomuuslentoa edeltävinä päivinä ja viikkoina. Samanlaisia sähkövikoja esiintyi myös Lion Airin turmakoneessa ennen onnettomuutta. Boeing ei ole ottanut kantaa kyseisiin sähkövikoihin tai niiden mahdolliseen osallisuuteen onnettomuuksissa. EAIB:n tutkinnan mukaan vasemman kohtauskulma-anturin vikaantuminen johtui todennäköisesti valmistusviasta

koneen EWIS-johdotusjärjestelmässä (Electrical Wiring Interconnection System). (EAIB 2022, 248, 251–252)

MCAS on suunniteltu toimimaan ainoastaan lentokoneen ollessa sileänä (laippakulma 0°), joten sen AND-trimmaukset olisi voinut välttää jättämällä jättöreuna-laipat johonkin muuhun asetukseen. Tätä kriittistä informaatiota ei sisällytetty Lion Airin lento-onnettomuuden jälkeen julkaistuihin MAX:n FCOM:ia koskevaan lisätiedotteeseen (bulletin), tai lentokelpoisuusmääräykseen (airworthiness directive). (EAIB 2022, 253)

Lion Airin onnettomuuden jälkeen, ennen ET302:n onnettomuutta, Ethiopian Airlinesin koulutusosasto pyysi lisätietoa Boeingilta MCAS:n toiminnasta ja oikeista toimintatavoista ei-toivotun MCAS:n aktivoitumisen tapauksessa. Yhteydenotossa tiedusteltiin muun muassa, riittääkö tilanteessa karanneen peräsintrimmin tarkistuslistan suorittaminen, vai tulisiko myös epäluotettavan nopeusindikaation tarkistuslista ottaa huomioon. Boeing ei vastannut kaikkiin Ethiopian Airlinesin koulutusosaston kysymyksiin. EAIB:n tulkinnan mukaan Ethiopian Airlinesin esittämät kysymykset olivat turvallisuuskriittisiä. Mikäli Boeing olisi vastannut kysymyksiin, sekä tuonut kyseisen informaation muillekin 737 MAX -operaattoreille FCOM-päivitysten ja koulutuksen muodossa, olisi sillä EAIB:n mukaan ollut merkittävä vaikutus ET302-lennon tapahtumiin ja lopputulemaan. (EAIB 2022, 254–255)

3.3.3 Vaikuttavat tekijät

EAIB on listannut raportissaan kymmenen lennon ET302 onnettomuuden syntyyn vaikuttanutta tekijää, jotka on tunnistettu tutkinnan löydösten perusteella (EAIB 2022, 255–256):

1. MCAS suunniteltiin toimimaan yksittäisen kohtauskulma-anturin datan perusteella, mikä tekee järjestelmästä haavoittuvaisen kyseisen anturin virheindikaatioille.
2. Boeing ei kyennyt tunnistamaan MCAS:n ei-toivotun aktivoitumisen potentiaalisia vaikutuksia ja seuraamuksia 737 MAX:n suunnittelu- ja tyyppihi-

väksyntäprosessin aikana. Boeing oletti, että lentäjät kykenisivät tunnistamaan tilanteen ja hallitsemaan sen käyttämällä koneen normaaleja ohjaimia, sähkötrimmiä ja NG:sta tuttua karanneen peräsintrimmin tarkistuslistaa. Lion Airin onnettomuuden jälkeen julkaistut FCOM-tarkennus ja lentokelpoisuusmääräys eivät sisältäneet riittävästi informaatiota estämään toista MCAS:iin liittyvää lento-onnettomuutta.

3. Vaikka Boeing käsitteli MCAS:n ei-toivottua aktivoitumista järjestelmän FHA-analyysissä, se ei kuitenkaan ottanut huomioon erilaisten ohjaamoindikaatioiden ja hälytysten yhteisvaikutusta, jotka saattavat aiheutua MCAS:n virheelliseen aktivoitumiseen johtavasta viasta.
4. MCAS:n toistuvien aktivoitumisten kumulatiivista vaikutusta lentokoneen kohtauskulmaan ei arvioitu tyyppihyväksyntäprosessin aikana.
5. Lukuisten indikaatioiden ja varoitusten yhteisvaikutus vaikutti lentäjien ongelmantunnistukseen ja toimenpiteiden priorisointiin. Boeing ei ottanut huomioon tai arvioinut tätä yhteisvaikutusta tyyppihyväksyntävaiheessa.
6. Eriävistä kohtauskulmaindikaatioista varoitettava AOA DISAGREE -viesti ei aktivoitunut missään vaiheessa lentoa, vaikka tyyppihyväksyntäperusteena olevan järjestelmälogiikan mukaan näin olisi pitänyt tapahtua.
7. Boeingin lentäjille luoma 737 MAX:n CBT-eroavaisuus koulutus ei käsitellyt laisinkaan MCAS-järjestelmää.
8. Boeing ei luonut lentäjille simulaattorikoulutusohjelmaa MCAS:iin liittyvistä vikatilanteista. Boeing ei luokitellut MCAS:ia turvallisuuskriittiseksi järjestelmäksi, eikä kyennyt hahmottamaan, että sen vikaantumisella olisi potentiaalisesti katastrofaaliset seuraamukset.
9. Boeing ei toimittanut lentäjille tietoja MCAS-järjestelmästä ja siihen liittyvistä proseduureista koulutuksessa tai lentokoneen operatiivisessa käsikirjassa (FCOM).
10. Boeing ei vastannut Ethiopian Airlinesin koulutusosaston esittämiin turvallisuuskriittisiin kysymyksiin MCAS:n toiminnasta ja siihen liittyvien vikatilanteiden oikeaoppisesta hallinnasta. Ethiopian Airlinesin kysymä tieto olisi vähentänyt lentäjien hämmennystä, sekä auttanut toimenpiteiden ja tarkistuslistojen priorisoinnissa.

4 MCAS

Tässä luvussa käsitellään MCAS:n suunnittelua ja toimintaa sekä esitellään mahdollisia toimintamalleja lentäjille MCAS:n ei-toivotussa aktivoitumisessa. MCAS:n suunnitteluperiaatteita ja järjestelmän teknistä toimintaa on kuvattu osittain myös onnettomuuksia käsittelevässä luvussa 3, joten tämä luku toimii tiivistävänä ja osin näkökulmaa laajentavana läpileikkauksena aiheeseen.

4.1 Järjestelmän toiminta

CFM LEAP-1B -moottorit toimivat 737 MAX:n suunnittelun keskeisenä lähtökohdana. Boeingin aikaisessa suunnitteluvaiheessa tekemät analyysit osoittivat, että LEAP-1B:n suurempi turbiinin halkaisija ja uudelleensuunniteltu moottorinaselli vaikuttavat negatiivisesti koneen käsiteltävyyteen suurilla kohtauskulmilla (MacArthur 2020, 5). Boeing tutki erilaisia vaihtoehtoja ja lopulta ratkaisi asian aerodynaamisilla muutoksilla sekä ohjelmistopohjaisella MCAS-järjestelmällä. MCAS rakennettiin aikaisemmista sukupolvista tutun STS:n pohjalle ja sen perimmäinen tarkoitus oli saada MAX:n käsiteltävyys riittävän samanlaiseksi kolmannen sukupolven NG-varianttien kanssa, jotta 737-tyyppikelpuutetuille lentäjille ei tarvitsisi antaa simulaattorikoulutusta osana eroavaisuuskoulutusta. (KNKT 2019, 189)

MCAS suunniteltiin aktivoitumaan ainoastaan manuaaliohjauksessa suurella kohtauskulmalla, jättöreunalaipat ja johtoreunasolakot sisäänvedettynä (Faiyetole 2023, 265). Alkuperäisessä suunnittelussa MCAS kykeni liikuttamaan korkeusperäsintä maksimissaan $0,6^\circ$, mutta järjestelmän auktoriteettia kasvatettiin myöhemmin $2,5^\circ$ poikkeutukseen lentotestauksessa tehtyjen havaintojen perusteella. Lentokoneen aerodynaamista käyttäytymistä sakkauksessa on haastavaa mallintaa etukäteen pelkän teoreettisen analyysin pohjalta, joten ei ole mitenkään tavatonta, että lentokoneen ohjelmistoja muokataan lentotestauksen perusteella. (KNKT 2019, 198)

Boeing oletti lentäjien trimmaavan korkeusperäsimen poikkeutuksen takaisin neutraaliksi aina MCAS:n ei-toivotun aktivoitumisen jälkeen. FHA-analyysissä ei

kuitenkaan otettu huomioon mahdollisuutta, että lentäjät eivät välttämättä heti ymmärtäisi trimmata korkeusperäsintä neutraaliin asentoon, tai trimmaus jäisi vaajaaksi ennen MCAS:n seuraavaa aktivoitumista. Toistuvien MCAS:n aktivoitumisten tilanteessa järjestelmä pystyy kumulatiivisesti trimmaamaan korkeusperäsintä yli $2,5^\circ$ ja mikäli lentäjät eivät käytä laisinkaan vastatrimmausta, kaksi MCAS:n aktivoitumista riittää saavuttamaan korkeusperäsimen täyden $4,2^\circ$ poikkeutuksen. Tällaisessa lentotilassa koneen ohjaaminen alkaa olla jo likimain mahdotonta. (KNKT 2019, 189)

4.2 Functional Hazard Assessment

FHA:ssa käytetään neliportaista riskiarviointiasteikkoa, jonka kategoriat ovat lievimmästä suurimpaan: vähäinen (minor), merkittävä (major), vaarallinen (hazardous) ja katastrofaalinen (catastrophic). Boeing luokitteli tyyppihyväksyntää varten tehdyssä FHA-analyysissä MCAS:n ei-toivotun aktivoitumisen merkittävän riskin kategoriaan. Vaarallinen tai katastrofaalinen riskikategoria olisi vaatinut järjestelmästä kattavampia FMEA- (Failure Modes and Effects Analysis) ja FTA-riskianalyysijä (Fault Tree Analysis) (KNKT 2019, 189–190). Alalla vallitsevien yleisten käytänteiden mukaisesti turvallisuuskriittisiä automaatiojärjestelmiä ei pitäisi lähtökohtaisesti suunnitella toimimaan ainoastaan yhden sensorin tuottaman datan pohjalta, kuten MCAS:n tapauksessa meneteltiin (Demirci 2022, 151).

FHA:ssa tunnistettiin riskiskenaario, jossa järjestelmä liikuttaisi korkeusperäsintä maksimaalisen poikkeutuksen verran AND-asentoon. Boeing testasi tätä skenaariota lentäjillä full motion -simulaattorissa ainoastaan alkuperäisellä maksimisään $0,6^\circ$ peräsinpoikkeutuksella. Testejä ei suoritettu uudestaan sen jälkeen, kun MCAS:n auktoriteettia kasvatettiin $2,5^\circ$ maksimipoikkeutukseen. Boeing ei myöskään simuloanut tai arvioinut sellaisten vikojen kokonaisvaikutusta, joiden myötä MCAS voi aktivoitua ei-toivotusti. Suunnitteluinsinöörit ja koelentäjät keskustelivat skenaariosta, jossa MCAS aktivoituisi ei-toivotusti useita kertoja peräkkäin, mutta sitä ei pidetty yksittäistä aktivoitumista riskialttiimpana (KNKT 2019, 190). Boeingin taustaoletuksena oli, että lentäjät trimmaisivat aina korkeusperäsimen takaisin neutraaliin asentoon ennen MCAS:n seuraavaa aktivoitumista (Englehardt, Werhane & Newton 2021, 3).

FMEA:n avulla Boeing olisi kyennyt tunnistamaan MCAS:n todennäköisiä toimintahäiriöpisteitä (single point of failure) ja latentteja virheitä. FMEA olisi ottanut kantaa siihen, miten järjestelmän vikatiloja kyetään tunnistamaan, miten lentäjät reagoivat niihin ja miten niitä hallitaan linjahuollossa. FTA olisi tarkastellut MCAS:n järjestelmäarkkitehtuuria kokonaisuudessaan sekä FHA:ssa määriteltyjen numeeristen kriteerien täyttymistä. FTA olisi tarkastellut myös erilaisten vika-kombinaatioiden vaikutuksia ja todennäköisyyksiä. Se olisi auttanut tunnistamaan MCAS:n osa-alueita, jotka eivät täytä kaikkia turvallisuuskriteereitä ja tarjonnut näkökulmia näiden vajaavaisuuksien paikkaamiseen. (KNKT 2019, 190–191)

4.3 Toimenpiteet MCAS:n ei-toivotussa aktivoitumisessa

Boeing oletti FHA-analyysissään, että ei-toivottu MCAS:n aktivoituminen on mahdollista hallita käyttämällä ainoastaan normaaleja lentokoneen ohjaimia. Lisäksi lentäjillä on käytössään peräsintrimmi ohjainvoimien neutraloimiseksi. Peräsintrimmin tappokytkimiä ei Boeingin analyysin mukaan välttämättä tarvita kontrollin säilyttämiseksi. Onnettomuudet kuitenkin osoittivat, että jos MCAS aktivoituu toistuvasti, eivätkä lentäjät manuaalisesti trimmaa korkeusperäsintä riittävästi, johtaa kumulatiivinen AND-trimmi lentotilaan, jota ei voi enää oikaista normaalilla korkeusperäsinohjauksella. (KNKT 2019, 193)

MCAS lähettää aktivoituessaan automaattisesti AND-herätteen korkeusperäsimmelle, jonka seurauksena lentokoneen nokka laskee ja kone lähtee vaakalennosta liukuun. Tähän lentäjä vastaa todennäköisesti vetämällä ohjaimista säilyttääkseen vaakalennon, jolloin syntyy positiivisia ohjainvoimia. Mikäli lentäjä käyttää koneen manuaalista sähkötrimmiä ohjainvoimien neutraloimiseksi, resetoi se MCAS:n toimintasyklin. Tämä puolestaan johtaa siihen, että MCAS aktivoituu uudestaan viiden sekunnin kuluttua ja trimmaa jälleen korkeusperäsintä AND-asettoon. Mikäli lentäjä vastaa tähän seuraavaan MCAS:n aktivoitumiseen samalla tavalla, syntyy käytännössä loputon toisiaan seuraavien MCAS:n aktivoitumisten ja manuaalisen ohjainvoimien trimmaamisen silmukka. (KNKT 2019, 193)

Lentäjillä on muutamia vaihtoehtoisia tapoja ratkaista tilanne. Yksi mahdollinen tapa on lopettaa ohjainvoimien trimmaaminen sähkötrimmillä, jolloin MCAS:n toimintasykli ei resetoitu. Tämä saattaa kuitenkin johtaa hankaluuksiin ohjata lentokonetta, jos ohjainvoimat ovat ehtineet jo kasvaa suuriksi. Toinen vaihtoehto on trimmata korkeusperäsintä aina riittävästi siten, että se neutraloi MCAS:n aiheuttaman peräsintrimmin muutoksen. Tällöin kumulatiivinen trimmi ei missään vaiheessa pääse kasvamaan niin suureksi, että lentokonetta ei pysty enää ohjaamaan (KNKT 2019, 193). Kuormittavassa tilanteessa voi olla haastavaa varmistua manuaalisen trimmaamisen riittävydestä ja riskinä on kumulatiivisen AND-trimmin kasvaminen hiljalleen liian suureksi.

Kolmas, Boeingin suosittama vaihtoehto on soveltaa tilanteeseen karanteen peräsintrimmin tarkistuslistaa, jossa peräsintrimmin tappokytkimet kytketään päälle. Toimenpide katkaisee sähköisen trimmiohjauksen ja fyysisen aktuaattorin välisen yhteyden, jolloin MCAS ei enää pääse liikuttamaan korkeusperäsintä. Tällöin lentäjille jää käyttöön manuaalinen trimmipyörä, jolla korkeusperäsimen trimmiä voi säätää (KNKT 2019, 193). Mikäli kumulatiivinen AND-trimmi on ehtinyt kasvaa suureksi ennen tappokytkimien aktivointia, voi peräsintrimmin neutraloiminen manuaalisen trimmipyörän avulla olla mahdotonta, sillä sen pyörittäminen osoittautui onnettomuustutkinnan aikaisissa simulaattoritesteissä erittäin raskaaksi ja hitaaksi. Lentäjien tulisi siten tunnistaa tilanne nopeasti ja soveltaa karanteen peräsintrimmin tarkistuslistaa viiveettä. Neljäs vaihtoehto on valita laippa-asetukseksi jokin muu laippakulma kuin 0° , jolloin MCAS:n aktivointikriteerit eivät enää täyty ja se lakkaa toimimasta (EAIB 2022, 241, 249–250). Tässä haasteeksi muodostuu se, että laippaa ulos otettaessa lentokoneen täytyy olla tietyllä nopeus- ja korkeusalueella, eikä se siten ole mahdollista kaikissa tilanteissa.

MCAS:n ei-toivottu aktivoituminen on lentäjille monimutkainen ongelma tunnistaa ja ratkaista, varsinkin kun järjestelmän olemassaolosta tai suositeltavista toimenpiteistä ei kerrottu lentäjille ennen Lion Airin onnettomuutta. Lentäjien eroavaisuuskoulutuksen NG- ja MAX-varianttien välillä voidaan siten todeta olleen erityisesti MCAS:n osalta riittämätön.

5 POHDINTA

Tutkimuskysymykset, johon tällä opinnäytetyöllä pyritään vastaamaan, määriteltiin johdannossa. Niitä oli kaksi kappaletta:

1. Tukevatko Boeing 737 MAX:n LOC-I-onnettomuudet James T. Reasonin reikäjuustomallia onnettomuuksien synnystä?
2. Millä toimenpiteillä lentäjät voivat varmistaa lennon turvallisen jatkumisen, kun MCAS aktivoituu ei-toivotusti?

Molempien tapausten onnettomuustutkinnat osoittivat, että onnettomuudet syntyivät useiden latenttien ja aktiivisten virheiden yhteisvaikutuksesta. KNKT nosti esiin yhdeksän merkittävää tekijää lennon JT610 tapauksessa ja EAIB kymmenen merkittävää tekijää lennon ET302 tutkinnassa, jotka on esitelty tarkemmin luvussa 3. Onnettomuuksissa oli paljon samanlaisia elementtejä ja siten myös suurin osa onnettomuustutkintaviranomaisten esiin nostamista onnettomuuden juurisyistä olivat keskeisin osin lähestulkoon identtisiä. Edellä mainitut merkittävät tekijät voidaan mieltää James T. Reasonin reikäjuustomallin mukaisiksi juuston rei'iksi ja latenteiksi virheiksi kaupallista ilmailua ympäröivissä turvakerroksissa.

Valitettavasti näillä kahdella lennolla riittävän moni juuston reikä asettui kohdakkain ja onnettomuus pääsi syntymään. Lion Airin onnettomuuslentoa edeltäneellä lennolla JT043 lentäjät toimivat viimeisenä turvakerroksena ja saivat tukittua juustopalan reiän kytkemällä peräsintrimmin tappokytkimet päälle, jolloin onnettomuutta ei päässyt syntymään, vaikka hyvin lähellä se olikin. Nämä kaikki havainnot vaikuttaisivat siten tukevan James T. Reasonin reikäjuustomallia ensimmäisen tutkimuskysymyksen mukaisesti.

Toista tutkimuskysymystä käsiteltiin tarkemmin luvussa 4. Siinä tunnistettiin neljä erilaista vaihtoehtoista toimintatapaa, joilla lentäjät voivat varmistaa lennon turvallisen jatkumisen kohdatessaan ei-toivotun MCAS:n aktivoitumisen. Tiivistetynä ongelmaa voi lähestyä neljällä erilaisella toimintatavalla, joista jokaisella on omat haasteensa ja potentiaaliset ongelmansa. Lentäjät voivat joko (1) lopettaa manuaalisen ohjainvoimien trimmaamisen sähkötrimmillä, jolloin MCAS:n toimintasykli ei enää resetoidu, (2) trimmata korkeusperäsintä aina riittävästi siten, että

se neutraloi MCAS:n aiheuttaman peräsintrimmin muutoksen, (3) soveltaa tilanteeseen karanneen peräsintrimmin tarkistuslistaa, jossa peräsintrimmin tappokytkimet kytetään päälle, tai (4) valita laippa-asetukseksi jokin muu laippakulma kuin 0°, jolloin MCAS:n aktivointikriteerit eivät enää täyty ja se lakkaa toimimasta.

Boeing suosittaa tilanteessa karanneen peräsintrimmin muistinvaraisten toimenpiteiden ja tarkistuslistan suorittamista. Oleellista on, että MCAS:n ei-toivottu aktivoituminen tunnistetaan pikaisesti ja toimenpiteisiin ryhdytään viiveettä, ettei peräsintrimmin asento pääse missään vaiheessa karkaamaan liian suureksi. Äärimmäisessä tapauksessa manuaalisen trimmipyörän pyörittämiseen ei ole riittävästi aikaa tai voimaa, sillä se on tarkoitettu ensisijaisesti pienten muutosten tekemiseen lähellä peräsintrimmin neutraalipistettä. Nopea oikeaoppinen toiminta vaatii lentäjiltä hyvää tilannetietoisuutta ja järjestelmäosaamista. Mahdollisesti suurin yksittäinen juurisyy onnettomuuksien syntymiselle oli siten Boeingin päättämä ja FAA:n hyväksymä linjaus jättää kaikki tieto MCAS:sta kokonaan pois lentäjien eroavaisuuskoulutuksesta ja käsikirjoista.

Opinnäytetyön keskeisenä teoreettisena viitekehyksenä toimii James T. Reasonin reikäjuustomalli, joka on kohdannut myös kritiikkiä tietyiltä osin. Ilmailuturvallisuudessa ja onnettomuustutkinnassa ei ole kuitenkaan noussut esiin merkittäviä kilpailevia teorioita, joten tutkimukseen ei ollut mahdollista sisällyttää teoreettista vuoropuhelua tai erilaisia näkökulmia. Onnettomuustutkintaraportit ja tämän työn johtopäätökset kuitenkin tukevat Reasonin reikäjuustomallia, antaen teorialle lisää validaatiota ja osoittaen sen hyödyllisyyden myös käytännön työkaluna.

Valitettavasti onnettomuuksiin kulminoitunut 737 MAX:n ja MCAS:n suunnittelu, valmistus, tyyppihyväksyntä ja koneen operatiivinen käyttö on mielenkiintoinen ja laaja kokonaisuus, joka kehittyy edelleen työn kirjoitushetkellä. Tästä kokonaisuudesta voi helposti löytää myös mielekkäitä jatkotutkimusaiheita, esimerkiksi miten MAX-varianttien alkuperäinen tyyppihyväksyntäprosessi eteni ja kuinka paljon valvontavastuutaan FAA delegoi Boeingille, minkälainen oli uusi tyyppihyväksyntäprosessi globaalin lentokiellon jälkeen ja miten käytännöt erosivat eri ilmailuviranomaisten menettelyssä, tai miten MCAS:n järjestelmäarkkitehtuuri olisi pitänyt suunnitella ja ohjelmoida, jotta onnettomuuksia ei olisi syntynyt.

LÄHTEET

Aerospace Technology. 2020. FAA to fine Boeing for faulty slat tracks on 737 MAX aircraft. Luettu 24.2.2024.

<https://www.aerospace-technology.com/news/faa-to-fine-boeing-for-faulty-slat-tracks-on-737-max-aircraft/>

Airbus. 2011. Airbus with new order record at Paris Air Show 2011. Lehdistöiedote. Luettu 23.2.2024.

<https://web.archive.org/web/20170317054849/http://www.airbus.com/presscentre/pressreleases/press-release-detail/detail/airbus-with-new-order-record-at-paris-air-show-2011/>

Aratani, L., Gregg, A. & Duncan, I. 2024. Boeing CEO Dave Calhoun will step down amid management shakeup. The Washington Post. Luettu 7.4.2024.

<https://www.washingtonpost.com/business/2024/03/25/boeing-ceo-stepping-down/>

Bailey, A. 2023. No Time Wasted: Boeing Starts 737 MAX 10 Certification Flights. Simple Flying. Luettu 24.2.2024.

<https://simpleflying.com/boeing-starts-737-max-10-certification-flights/>

Becher, T. 2002. Douglas Twinjets, DC-9, MD-80, MD-90 and Boeing 717. Wiltshire, Iso-Britannia: The Crowood Press.

Belyukov, A. 2012. VQ-BKW (cn 37085/3654) Cockpit a new aircraft for S7 - Siberia Airlines in color scheme ONE WORLD Alliance. Kuva. Katsottu 22.2.2024.

https://en.wikipedia.org/wiki/File:S7_Airlines_Boeing_737-8ZS_flight_deck_Belyukov.jpg

Boeing. 1997. Original 737 Comes Home to Celebrate 30th Anniversary. Luettu 18.2.2024.

<https://boeing.mediaroom.com/1997-05-02-Original-737-Comes-Home-to-Celebrate-30th-Anniversary>

Boeing. 1998. First Boeing Next-Generation 737-800 Goes To Hapag-Lloyd. Luettu 22.2.2024.

<https://boeing.mediaroom.com/1998-04-23-First-Boeing-Next-Generation-737-800-Goes-To-Hapag-Lloyd>

Boeing. 2000. Boeing Delivers 737-400s to CSA Czech Airlines. Luettu 19.2.2024.

<https://boeing.mediaroom.com/2000-02-28-Boeing-Delivers-737-400s-to-CSA-Czech-Airlines>

Boeing. 2004. The Boeing Next-Generation 737 Family. Luettu 18.2.2024.

<https://web.archive.org/web/20041209163449/http://www.boeing.com/commercial/737family/background.html>

Boeing. 2011. Boeing Launches 737 New Engine Family with Commitments for 496 Airplanes from Five Airlines. Lehdistöiedote. Luettu 23.2.2024.
<https://boeing.mediaroom.com/2011-08-30-Boeing-Launches-737-New-Engine-Family-with-Commitments-for-496-Airplanes-from-Five-Airlines>

Boeing. 2014. Boeing Launches 737 MAX 200 with Ryanair. Luettu 24.2.2024.
<https://boeing.mediaroom.com/2014-09-08-Boeing-Launches-737-MAX-200-with-Ryanair>

Boeing 2017. Boeing 737 MAX 8 Earns FAA Certification. Luettu 23.2.2024.
<https://boeing.mediaroom.com/2017-03-09-Boeing-737-MAX-8-Earns-FAA-Certification>

Boeing. 2018a. Service Strength Around the Globe. Luettu 17.2.2024.
https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/services/government/intl_govt_svcs_brochure.pdf

Boeing. 2018b. Boeing Delivers First 737 MAX 9. Luettu 24.2.2024.
<https://boeing.mediaroom.com/2018-03-21-Boeing-Delivers-First-737-MAX-9>

Boeing. 2022a. Boeing Reorganizes Defense, Space & Security Business Unit. Luettu 17.2.2024.
<https://boeing.mediaroom.com/2022-11-17-Boeing-Reorganizes-Defense,-Space-Security-Business-Unit>

Boeing. 2022b. The Boeing Company 2022 Annual Report. Luettu 17.2.2024.
https://s2.q4cdn.com/661678649/files/doc_financials/2022/ar/boeing-2022-annual-reportvF.pdf

Boeing. 2023. Quarterly Results: Q4 2023. Luettu 17.2.2024.
https://s2.q4cdn.com/661678649/files/doc_financials/2023/q4/2023-12-Dec-31-8K-PR-Ex-99-1.pdf

Boeing. 2024. Commercial. Orders & Deliveries. Luettu 18.2.2024.
<https://www.boeing.com/commercial/#orders-deliveries>

Boeing. n.d. Our Company. General Information. Luettu 17.2.2024.
<https://www.boeing.com/company/general-info#overview>

Bowers, P. 1989. Boeing Aircraft Since 1916. Annapolis, Maryland: Naval Institute Press.

Brady, C. 2023. The Boeing 737 Technical Guide. 85. painos. Cheshire, Iso-Britannia: Tech Pilot Services Ltd.

Chen, A. 2023. Where Are Boeing 737-200s Flying in 2023? AirlineGeeks. Luettu 18.2.2024.
<https://airlinegeeks.com/2023/09/01/where-are-boeing-737-200s-flying-in-2023/>

Coats, N. 2019. GOL B738M PR-XMA KMIA NASEDIT. Kuva. Katsottu 24.2.2023.

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:02142019_GOL_B738M_PR-XMA_KMIA_NASEDIT_\(33286349418\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:02142019_GOL_B738M_PR-XMA_KMIA_NASEDIT_(33286349418).jpg)

Dawson, S. 2018. 737 Max Cockpit. Kuva. Katsottu 24.2.2024.

https://en.wikipedia.org/wiki/File:737_Max_Cockpit.jpg

Del Coro, T. 2010. Southwest Airlines 1998 Boeing 737-7H4 (cn 27841-1) at Las Vegas - McCarran International Airport (LAS / KLAS). Kuva. Katsottu 21.2.2024.

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:N707SA_Southwest_Airlines_1998_Boeing_737-7H4_\(cn_27841-1\)_5289274531.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:N707SA_Southwest_Airlines_1998_Boeing_737-7H4_(cn_27841-1)_5289274531.jpg)

Demirci, S. 2022. The requirements for automation systems based on Boeing 737 MAX crashes. Aircraft Engineering and Aerospace Technology 94 (2), 140–153.

Doyle, A., Kingsley-Jones, M., Lewis, P. & Norris, G. 1999. Putting the family to work. FlightGlobal. Luettu 22.2.2024.

<https://web.archive.org/web/20180612145307/https://www.flightglobal.com/news/articles/putting-the-family-to-work-51106/>

EAIB. 2022. Aircraft Accident Investigation Report B737- MAX 8, ET-AVJ. Onnettomuustutkintaraaportti. Luettu 6.3.2024.

https://avherald.com/files/ethiopian_b38m_et-avj_190310_final_report_20221226.pdf

Endres, G. 2001. The Illustrated Directory of Modern Commercial Aircraft. Saint Paul, Minnesota: MBI Publishing Company.

Englehardt, E., Werhane, P. & Newton, L. 2021. Leadership, Engineering and Ethical Clashes at Boeing. Science and Engineering Ethics 27 (12), 1–17.

Eriksson, P. & Koistinen K. 2005. Monenlainen tapaustutkimus. Kuluttajatutkimuskeskus, julkaisuja 4:2005. Kuluttajatutkimuskeskus.

Faiyetole, A. 2023. Accident propensity assessment of Boeing 737 Aircraft variants using the Gompertz distribution model. Aerospace Systems 6 (1), 259–283.

FAA. 2020. FAA Statement on Certification Flights. Luettu 24.2.2024.

<https://www.faa.gov/newsroom/faa-updates-boeing-737-max-0?newsId=93206>

FlightGlobal. 2006. Boeing firms up 737 replacement studies by appointing team. Luettu 23.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden.

<https://www.flightglobal.com/boeing-firms-up-737-replacement-studies-by-appointing-team/66022.article>

Gates, D. 2019. Flawed analysis, failed oversight: How Boeing, FAA certified the suspect 737 MAX flight control system. The Seattle Times. Luettu 24.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden.

<https://www.seattletimes.com/business/boeing-aerospace/failed-certification-faa-missed-safety-issues-in-the-737-max-system-implicated-in-the-lion-air-crash/>

Gates, D. 2024a. Boeing wants FAA to exempt MAX 7 from safety rules to get it in the air. The Seattle Times. Luettu 24.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden.

<https://www.seattletimes.com/business/boeing-aerospace/boeing-wants-faa-to-exempt-max-7-from-safety-rules-to-get-it-in-the-air/>

Gates, D. 2024b. Under pressure, Boeing drops request for a 737 MAX 7 safety exemption. The Seattle Times. Luettu 24.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden.

<https://www.seattletimes.com/business/boeing-aerospace/under-pressure-boeing-drops-request-for-a-max-7-safety-exemption/>

George, F. 2017. Pilot Report: Flying the 737-8, Boeing's New Narrowbody Breadwinner. Aviation Week. Luettu 23.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden.

<https://aviationweek.com/air-transport/pilot-report-flying-737-8-boeings-new-narrowbody-breadwinner>

German, K. 2021. 2 years after being grounded, the Boeing 737 Max is flying again. CNET. Luettu 24.2.2024.

<https://www.cnet.com/tech/tech-industry/boeing-737-max-8-all-about-the-aircraft-flight-ban-and-investigations/>

Goold, I. 2017. Boeing Forges Ahead with Flight-test Campaigns. Aviation International News. Luettu 24.2.2024.

<https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2017-11-08/boeing-forges-ahead-flight-test-campaigns>

Hashim, F. 2017. Malindo operates world's first 737 Max flight. FlightGlobal. Luettu 23.2.2024.

<https://web.archive.org/web/20181113205531/https://www.flightglobal.com/news/articles/malindo-operates-worlds-first-737-max-flight-437454/>

Hemmerdingen, J. 2020. Boeing delivered final commercial 737NG in January, ending 23 years of production. FlightGlobal. Luettu 22.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden.

<https://www.flightglobal.com/airframers/boeing-delivered-final-commercial-737ng-in-january-ending-23-years-of-production/137879.article>

Herkert, J., Borenstein, J. & Miller, K. 2020. The Boeing 737 MAX: Lessons for Engineering Ethics. Science and Engineering Ethics 26 (1), 2957–2974.

Johnston, P. & Harris, R. 2019. The Boeing 737 MAX Saga: Lessons for Software Organizations. Software Quality Professional 21 (3), 4–12.

Juma, N. & Rao, S. 2020. Ethics in the grounding of the Boeing 737 MAX. Journal of Critical Incidents 13 (1), 56–58.

Kaminski-Morrow, D. 2019. A320's order total overtakes 737's as Max crisis persists. FlightGlobal. Luettu 18.2.2024.
<https://www.flightglobal.com/orders-and-deliveries/a320s-order-total-overtakes-737s-as-max-crisis-persists/135347.article>

Kaminski-Morrow, D. 2021. Boeing 737-10 processes to undergo revision after EASA's Max scrutiny. FlightGlobal. Luettu 24.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden.
<https://www.flightglobal.com/safety/boeing-737-10-processes-to-undergo-revision-after-easas-max-scrutiny/142149.article>

Koenig, D. 2024. FAA approves inspection process that could clear the way for grounded Boeing planes to fly again. AP News. Luettu 24.2.2024.
<https://apnews.com/article/boeing-ceo-congress-senate-hearing-calhoun-cant-well-f83248428fc32b968a5b9192b79d88ff>

KNKT. 2019. KNKT.18.10.33.04 FINAL. Onnettomuustutkintaraaportti. Luettu 25.2.2024.
<https://knkt.go.id/Repo/Files/Laporan/Penerbangan/2018/KNKT.18.10.33.04-Final-Report.pdf>

Kuczynski, J., Wang, C., Glass, M. & Hoffman, F. 2021. Boeing 737 MAX: A case study of failure in a supply chain using system of systems framework. Issues in Information Systems 22 (1), 51–62.

Lebeda, A. 2005. A Helios Airways Boeing 737-31S at Ruzyně Airport (PRG / LKPR). This aircraft crashed on Greek soil on 14 August 2005. Kuva. Katsottu 19.2.2024.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Helios_Airways_Boeing_737-300_5B-DBY_PRG_2005-3-31.png

Leeham News and Analysis. 2017. Leahy reflects on 33 years at Airbus. Luettu 21.2.2024.
<https://leehamnews.com/2017/11/28/leahy-reflects-33-years-airbus>

Lemme, P. 2019. Flawed Assumptions Pave a Path to Disaster. Blogi. Luettu 19.2.2024.
<https://www.satcom.guru/2019/10/flawed-assumptions-pave-path-to-disaster.html>

MacArthur, J. 2020. Cost Savings Versus Redundant Systems: The Case of the Boeing 737 MAX Debacle. Journal of Business and Accounting 13 (11), 4–21.

Marmet, E. 1981. Boeing 737-130 – Lufthansa. Kuva. Katsottu 18.2.2024.
<https://www.airliners.net/photo/Lufthansa/Boeing-737-130/0223671/L>

McLellan, A. 2010. Cockpit of a Boeing 737-300 LN-KKU operated by Norwegian Air Shuttle. Kuva. Katsottu 19.2.2024.
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Cockpit_of_737-300_LN-KKU.jpg

Negrone, C. 2024. How airlines, passengers and Boeing are dealing with the 737 Max crisis. New York Post. Luettu 24.2.2024.

<https://nypost.com/2024/02/16/lifestyle/airlines-and-passengers-are-dealing-with-the-737-max-crisis/>

Norris, G. 2017. Boeing Defines Final 737 MAX Stretch Offering. Aviation Week Network. Luettu 24.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden.

<https://web.archive.org/web/20170131222215/http://aviationweek.com/technology/boeing-defines-final-737-max-stretch-offering>

Norris, G. 2019. First High-Capacity Boeing 737-8 Enters Flight Test. Aviation Week Network. Luettu 24.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden.

<https://aviationweek.com/air-transport/first-high-capacity-boeing-737-8-enters-flight-test>

NTSB. 2024. DCA24MA063. Aviation Investigation Preliminary Report. Luettu 24.2.2024.

<https://www.nts.gov/investigations/Documents/DCA24MA063%20Preliminary%20report.pdf>

Palmer, C. 2020. The Boeing 737 Max Saga: Automating Failure. Engineering 6 (1), 2–3.

Reason, J. 1990. The Contribution of Latent Human Failures to the Breakdown of Complex Systems. Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series B, Biological Sciences 327 (1), 475–484.

Reason, J., Hollnagel, E. & Paries, J. 2006. Revisiting the Swiss Cheese Model of Accidents. Eurocontrol Experimental Center. Tutkimusraportti. Luettu 2.4.2024.

<https://www.eurocontrol.int/publication/revisiting-swiss-cheese-model-accidents>

Redding, R. & Yenne, B. 1997. Boeing: Planemaker to the World. Berkeley, California: Thunder Bay Press.

Ryabtsev, S. 2012. Boeing 737-200 Advanced Cockpit Dubai Air Show. Kuva. Katsottu 18.2.2024.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boeing_737-2V6_Advanced_Cockpit_Dubai_Air_Show_Ryabtsev.jpg

Safran. 2011. Commercial Aircraft Engines: CFM56-7B. Tuote-esite. Luettu 21.2.2024.

https://web.archive.org/web/20161220201436/http://www.safran-aircraft-engines.com/file/download/fiche_cfm56-7b_ang.pdf

Salminen, A. 2011. Mikä kirjallisuuskatsaus?: Johdatus kirjallisuuskatsauksen tyypeihin ja hallintotieteellisiin sovelluksiin. Vaasan yliopiston julkaisuja, Opetusjulkaisuja 64, Julkisjohtaminen 4. Vaasan yliopisto.

Scavini, J. 2011. Comparative drawings of the Boeing 737 family, from side view. Kuva. Katsottu 18.2.2024.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boeing_737_family_v1.0.png

Sharpe, M. & Shaw, R. 2001. Boeing 737-100 and 200. Saint Paul, Minnesota: MBI Publishing Company.

Shaw, R. 1999. Boeing 737-300 to -800. Saint Paul, Minnesota: MBI Publishing Company.

Skapinker, M. 1997. Boeing completes McDonnell Douglas takeover. Financial Times 5.8.1997. Lontoo.

Stumpf, A. 2017. Boeing 737-200 (Brasilia Air Base). Kuva. Katsottu 18.2.2024.
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boeing_737-200_\(Brasilia_Air_Base\)_JT8D.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boeing_737-200_(Brasilia_Air_Base)_JT8D.jpg)

Travica, B. 2020. Mediating Realities: A Case of the Boeing 737 MAX. Informing Science: the International Journal of an Emerging Transdiscipline 23 (1), 25–46.

Trimble, S. 2017. ANALYSIS: 737 Max cutaway and technical description. Flight Global. Luettu 23.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden.
<https://www.flightglobal.com/analysis/analysis-737-max-cutaway-and-technical-description/124069.article>

Trimble, S. 2018. Boeing 737 Max 9 receives certification. FlightGlobal. Luettu 24.2.2024.
<https://web.archive.org/web/20190510153424/https://www.flightglobal.com/news/articles/boeing-737-max-9-receives-certification-445995/>

U.S. Department of the Treasury. 2010. Secretary Geithner toured a Boeing 737 plant in Renton, WA on May 18, 2010. Kuva. Katsottu 21.2.2024.
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boeing_Plant_in_Renton,_5-18-2010_\(4622746048\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boeing_Plant_in_Renton,_5-18-2010_(4622746048).jpg)

US4676460A. 1987. LONGITUDINAL STABILITY AUGMENTATION SYSTEM AND METHOD. Patentti. Yhdysvallat: United States Patent and Trademark Office.
<https://patentimages.storage.googleapis.com/6f/da/21/d8ee4ff51e084a/US4676460.pdf>

Vasters, C. 2017. N7379E - Boeing 737 MAX 9. Kuva. Katsottu 24.2.2024.
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Boeing_737-9_MAX_CFM_LEAP-1B_PAS.jpg

Wikimedia Commons. 2008. Boeing 737-400 Engine. Kuva. Katsottu 19.2.2024.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boeing_737-400_Engine.JPG

Wikimedia Commons. 2017. CFM International CFM56-7B engine of Lauda Air Boeing 737-800 OE-LNT. Kuva. Katsottu 22.2.2024.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CFM-56_Lauda_737.jpg

Wikimedia Commons. 2018. Altitude and speed of Lion Air Flight 610. Kuva. Katsottu 26.2.2024.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lion_Air_Flight_610.svg

Wolfsteller, P. 2021. FAA certificates Boeing 737 Max 8-200 variant. FlightGlobal. Luettu 24.2.2024.

<https://web.archive.org/web/20210401100100/https://www.flightglobal.com/airframers/faa-certificates-boeing-737-max-8-200-variant/143145.article>