

Iiro Toivanen

# TEKOÄLYTEKNOLOGIAT ILMAILUSSA



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO  
INFORMAATIOTEKNOLOGIAN TIEDEKUNTA  
2022

# TIIVISTELMÄ

Toivanen, Iiro

Tekoälyteknologiat ilmailussa

Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2022, 37 s.

Tietojärjestelmätiede, kandidaatintutkielma

Ohjaaja(t): Clements, Kati

Tutkielmassa perehdytään kirjallisuuskatsauksen muodossa tekoälyteknologioiden hyödyntämiseen ilmailun eri aloilla. Tutkielmassa tarkastellaan koneoppimismallien käyttöä ennustetyökaluina ilmailun kontekstissa sekä älykkäiden teknologioiden käyttöä ohjaamomiehistön apuvälineinä sekä lennonjohdon työkaluna. Lisäksi luodaan katsaus siihen, miten tekoälyteknologioita voitaisiin hyödyntää tulevaisuudessa ja mitkä voisivat olla tulevaisuuden kehityssuuntia tekoälyteknologioiden hyödyntämisessä.

Asiasanat: tekoäly, koneoppiminen, ilmailu, lennonjohto, lentoyhtiöt, maapalvelut

## **ABSTRACT**

Toivanen, Iiro

AI Technologies in Aviation

Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2022, 37 pp.

Information Systems, Bachelor's Thesis

Supervisor(s): Clements, Kati

This bachelor's thesis is a literature review focused on the use of artificial intelligence technologies within the field of aviation. In the paper we study the use of machine learning models in forecasting within the aviation context and the use of intelligent technologies in assisting the pilots and in air traffic management. The paper also takes a look into the future and the possibilities in implementing AI in aviation.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, aviation, air traffic management, airlines, ground handling

## KUVIOT

Kuvio 1 syväoppimismalli kaaviokuvana (Russell & Norvig, 2022) .....	12
Kuvio 2 Lentoliikenteen kasvuennuste 2021–2027 (EUROCONTROL, 2021) ....	14
Kuvio 3 Maapalveluiden arvoketju Kovynovin ja Mikutin (2019) mukaan .....	17

## TAULUKOT

Taulukko 1, automaation tasojen kuvaukset (Anderson ym., 2018) .....	20
Taulukko 2 Tekoälyteknologiat ilmailussa .....	27

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVIOT JA TAULUKOT

1	JOHDANTO.....	6
2	TEKOÄLY.....	9
	2.1 Automaatio .....	9
	2.2 Mitä on tekoäly?.....	10
	2.3 Koneoppiminen.....	10
	2.4 Neuroverkot ja syväoppiminen.....	11
	2.5 Selitettävä tekoäly .....	12
	2.6 Heikko ja vahva tekoäly .....	13
3	ILMAILUN ERI MUODOT.....	14
	3.1 Kaupallinen ilmailu .....	14
	3.2 Yleisilmailu .....	15
	3.3 Sotilasilmailu .....	15
	3.4 Ilmailua tukevat palvelut .....	15
	3.4.1 Lennonvarmistuspalvelut .....	16
	3.4.2 Maapalvelut .....	16
	3.4.3 Kaupalliset toiminnot .....	17
	3.5 Ilmailualan sääntely ja rajoitukset.....	18
4	TEKOÄLYTEKNOLOGIOIDEN HYÖDYNTÄMINEN ILMAILUSSA .....	20
	4.1 Ohjaamomiehistöä avustavat järjestelmät .....	21
	4.2 Ennustetyökalut .....	22
	4.3 Lennonvarmistuspalvelua tukevat järjestelmät .....	23
	4.4 Autonomiset ilma-alukset .....	24
	4.5 Merkittävimmät haasteet.....	25
5	YHTEENVETO JA POHDINTA .....	26
	LÄHTEET .....	30

# 1 JOHDANTO

Tämän kandidaatintutkielman tavoitteena on kirjallisuuskatsauksen muodossa selvittää, minkälaista tutkimusta on tehty tekoälyteknologioiden hyödyntämisestä ilmailun parissa. Tämän tutkielman kannalta sekä tekoäly, että ilmailu ovat aihealueina siinä määrin laajoja, että joitain osa-alueita on rajattu pois. Ilmailun eri lajien joukosta selvästi yksityinen ja harrastustoimintana suoritettu ilmailu on suurelta osin rajattu pois. Toisaalta myöskään tutkimusta tekoälyn hyödyntämisestä tämän tyyppisessä ilmailutoiminnassa ei juuri ole, joten rajausta on siksikin mielekäs. Päähuomio tässä tutkielmassa on kaupallisessa ilmailussa ja erityisesti matkustajaliikenteessä sekä ilmatilan hallinnassa. Sotilasilmailun käsittely on tässä tutkielmassa myös hyvin rajallista.

Ilmailu koetaan teknologiamyönteisenä toimialana, jolla uusia teknologioita otetaan käyttöön ensimmäisten joukossa. Tämä mielikuva on kuitenkin monella tapaa peräisin ilmailun alkua ajoilta, jolloin rohkeasti kokeiltiin kaikkea mahdollista, millä ilma-aluksen ja toisaalta myös lentäjän suorituskykyä saatettiin parantaa (Anderson, 2016). Nykyään ilmailualaa leimaa erittäin vahva turvallisuushakuisuus (Fortońska, 2021) ja uusien innovaatioiden käyttöönotto alalla on varsin hidasta. Erityisesti kaupallisen ilmailun parissa uuden teknologian soveltaminen valtavan laajaan sääntelyn kirjoon on hyvin haastavaa (Bonnín Roca ym., 2017). Tähän haasteeseen on eri viranomaistahoilla tartuttu ja esimerkiksi hiljattain julkistettu Suomen ilmailun turvallisuusohjelma (Traficom, 2020) ottaa voimakkaasti mukaan uudet teknologiat ja toimintamallit. Turvallisuushakuisuus

on toisaalta johtanut myös siihen, että ilmailu on nykyään kuljetusmuotona erittäin turvallinen (ICAO, 2021; Sampigethaya & Poovendran, 2013). Tekoälyteknologiat ovat tehneet tuloaan ilmailun pariin jo pitkään, mutta leimallista on, että itse ilma-aluksissa käytetty teknologia on monilta osin perua 1940- ja 1950-lukujen tutkimus- ja kehitystyöstä (Lim & Mavris, 2010; Mowery & Rosenberg, 1981). Merkittävimpiä yksittäisiä teknologisia edistysaskelia viime vuosikymmeninä on ollut toisaalta suihkumoottorien mittava käyttöönotto lentokoneiden voimälähteenä sekä autopilotin kehittäminen toisen maailmansodan jälkeen, ja toisaalta GPS-pohjaisen navigoinnin käyttöönotto kaupallisessa reittiliikenteessä 1990-luvulta alkaen (Durak ym., 2018). Tästä syystä on mielekästä ja hyödyllistä tutkia, miten tekoälyteknologioita voidaan sovittaa ilmailun viitekehykseen.

Tutkielmassa esitellään lyhyesti tekoälyteknologioita omassa luvussaan, ilmailun eri osa-alueet omassaan ja tehdään katsaus tekoälyteknologioiden hyödyntämiseen ilmailun eri osa-alueilla. Lopuksi luodaan katsetta tulevaisuuteen ja tarkastellaan, minkälaisia kehityssuuntia tutkimuksissa on löydetty tekoälyteknologioiden hyödyntämiseen ilmailussa.

Tämä tutkielma on jäsennetty siten, että sisältöluvussa 2 esitellään lyhyesti tekoälyteknologioita ja sisältöluvussa 3 ilmailun eri osa-alueita. Sisältöluke 4 sisältää katsauksen tekoälyteknologioiden hyödyntämiseen ilmailun eri osa-alueilla sekä tulevaisuuden mahdollisuuksiin. Luvussa 5 tehdään yhteenveto ja pohditaan mahdollisia tutkimuskohteita jatkossa.

Lähdemateriaalin kokoamisessa tutkielmaa varten on käytetty tieteellisten julkaisujen tietokantoja, kuten Jyväskylän yliopiston julkaisutietokanta JYKDOK, Scopus ja Google Scholar. Käytettävän materiaalin etsimisessä käytettiin hakusanoja "artificial intelligence", "machine learning", "aviation OR aeronautics", "ground handling", "air traffic management" joko yksin tai yhdessä. Pyrkimyksenä oli valita lähdemateriaaliksi pääosin vertaisarvioituja tieteellisiä julkaisuja arvostetuista julkaisuista, mutta erityisesti ilmailualan julkaisuista suuri osa jäi julkaisufoorumin luokituksen osalta tasolle 1 tai 0. Tämä voi johtua muun muassa siitä, että kyseisiä julkaisuja ei ole julkaisufoorumissa luokiteltu.

Näiden osalta julkaisujen laadukkuutta ja luotettavuutta on pyritty arvioimaan muilla keinoin, kuten viittausten lukumäärää ja Scopusin CiteScore -pisteytystä hyväksi käyttäen sekä käyttämällä mahdollisuuksien mukaan useampia lähteitä.



## 2 TEKOÄLY

Tässä luvussa esitellään joitakin tekoälyyn läheisesti liittyviä käsitteitä ja joitakin tekoälyteknologioita. Tässä tutkielmassa tekoälyteknologioita ei ole tarkoituksenmukaista käydä läpi erityisen yksityiskohtaisesti, vaan tavoitteena on esitellä lyhyesti sellaisia teknologioita, joita ilmailun parissa on käytössä tai mahdollista ottaa käyttöön.

### 2.1 Automaatio

Automaatiolla tarkoitetaan toimintoja, jotka suoritetaan tietyn logiikan mukaisesti ilman ihmisen apua prosessin käynnistämisen jälkeen (Grier, 2015). Automatisoidut järjestelmät toimivat ennalta ohjelmoidun logiikan (Escudier & Atkins, 2019) mukaisesti eivätkä tällaiset järjestelmät ole oletusarvoisesti älykkäitä, vaan toteuttavat ennalta määriteltä tehtäväänsä mahdollisimman tarkasti. Automatisoitua järjestelmää voidaan kuitenkin ohjata myös tekoälyä käyttäen, jolloin voidaan puhua autonomisesta järjestelmästä, kuten itse ajava auto tai miehittämätön ilma-alus (Durak ym., 2018).

## 2.2 Mitä on tekoäly?

Tekoäly viittaa tutkimukseen ja teknologiaan, jolla pyritään jäljittelemään ihmisen älykkyyttä (Russell & Norvig, 2022). Tämän pyrkimyksen toteuttamiseksi on tarvittu paljon tutkimusta ihmisen ajattelusta ja kognitiivisista prosesseista. Tekoälytutkimus on kiinnostunut paitsi älyllisten toimijoiden tutkimuksesta, myös sellaisten rakentamisesta – koneista, jotka voivat laskea, kuinka toimia tehokkaasti ja turvallisesti monissa erilaisissa uusissa tilanteissa (Russell & Norvig, 2022, s. 19).

Tekoälyllä ei ole tarkkaa yleistä määritelmää, vaan määritelmä riippuu asiayhteydestä (Tuominen & Neittaanmäki, 2019). Käsitteenä tekoäly viittaa teknologioihin – ohjelmiin ja laitteisiin, jotka ovat kykeneviä oppimiseen ja jotka voivat auttaa ihmistä niissä toiminnoissa, joita varten ne on suunniteltu. Tietokone on hyvä ja nopea toteuttamaan suoraviivaisia ja kompleksejakin matemaattisia operaatioita ja tällaisen tehtävän opettaminen tietokoneelle on varsin triviaalia ohjelmointia. On kuitenkin paljon sellaisia tehtäviä, jotka ihmiselle ovat helppoja, mutta niiden ratkaiseminen voi olla tietokoneelle vaikeaa.

## 2.3 Koneoppiminen

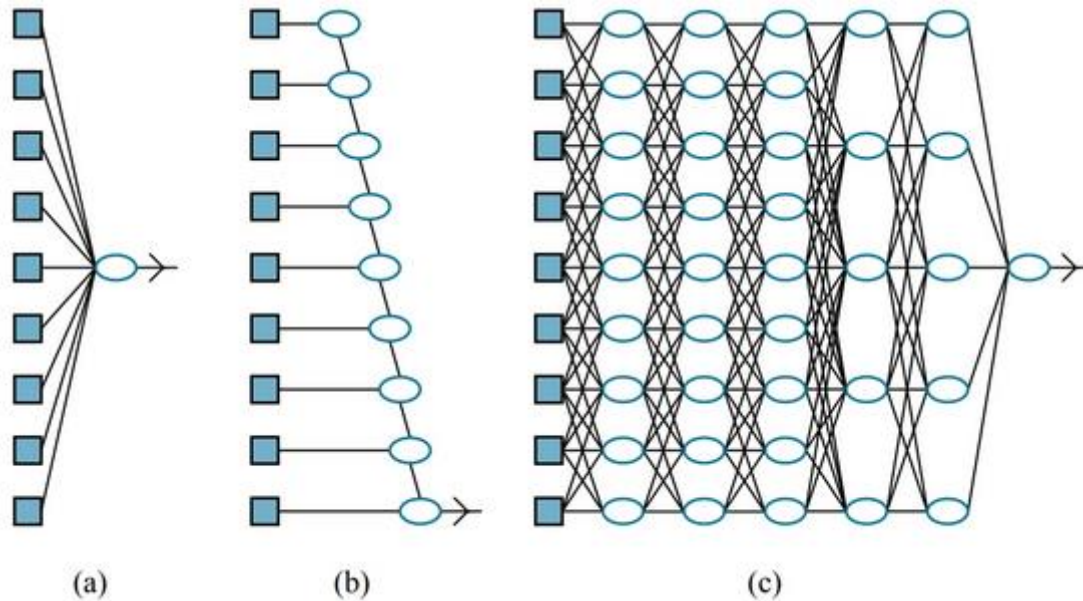
Toimija oppii, mikäli se parantaa suoritustaan tehtyään havaintoja maailmasta. Kun toimijana on kone, puhutaan koneoppimisesta (Russell & Norvig, 2022).

Koneoppiminen on tekoälyn yksi kulmakivistä ja yksi tekoälyn edellytyksistä (Alpaydin, 2016). Koneoppimisen tavoitteena on rakentaa tietokoneohjelma, joka kykenee muuttuvissa olosuhteissa oppimaan ja mukautumaan ympäristössä tapahtuviin muutoksiin ja tuottamaan ratkaisuja kaikkiin mahdollisiin tilanteisiin (Alpaydin, 2016). Koneoppimista hyödyntävän ohjelman suunnittelijan ei siis tarvitse ennakoida kaikkia mahdollisia tulevia tilanteita (Russell & Norvig, 2022, s. 669). Ohjelmoijan ei myöskään ole välttämätöntä osata ratkaista ongelmaa itse,

vaan ongelman voi antaa koneoppimisalgoritmin ratkaistavaksi (Russell & Norvig, 2022, s. 669). Tällainen ratkaisu ongelmaan voi olla esimerkiksi kasvontunnistusalgoritmi.

## 2.4 Neuroverkot ja syväoppiminen

Russellin ja Norvigin (2022) mukaan syväoppiminen käsittää laajan joukon koneoppimistekniikoita, joissa hypoteesit muodostavat kompleksisia matemaattisia kehiä ja joiden kytkentöjen voimakkuutta voidaan säädellä. Sana ”syvä” viittaa siihen, että kehät tyypillisesti järjestyvät kerroksiksi, joka johtaa siihen, että laskennassa syötteen ja tuloksen välillä on monia askelia (Russell & Norvig, 2022, s. 801). Koska ilmailun parissa ratkaistavat ongelmat ovat usein moniulotteisia, voivat syväoppivat työkalut olla hyvin käyttökelpoisia. Syväoppimisen juuret ovat tekoälytutkimuksen alkuajoissa, kun tietokoneissa pyrittiin mallintamaan neuronien kytkentöjä aivoissa. Tästä syystä syväoppimisen menetelmillä opettuja verkkoja kutsutaan usein neuroverkoiksi (Russell & Norvig, 2022, s. 801). Kuviossa 1 on kuvattu kohdassa a) matala malli, kuten lineaariregressio, jossa laskentapolut ovat lyhyitä, kohdassa b) päätöslistaverkko (decision list network), jossa jotkin laskentapolut ovat toisia pidempiä joillakin syötteen arvoilla ja kohdassa c) syväoppimisverkko, jossa jokainen muuttuja voi vuorovaikuttaa jokaisen toisen muuttujan kanssa.



Kuvio 1 syväoppimismalli kaaviokuvana (Russell & Norvig, 2022)

## 2.5 Selitettävä tekoäly

Tekoälyteknologiat ovat tehokkaita ongelmarratkaisijoita, mutta usein ongelmana on se, että ei niiden kompleksisuuden vuoksi niiden toimintaa tai itsenäisiä ratkaisuja ei aina kyetä helposti selittämään (Gunning ym., 2019). Gunningin ym. tutkimuksen (2019) ja Barredo Arietan (2020) mukaan tämä koskee monia koneoppimismalleja, kuten syväoppimista. Tutkimuksen mukaan kaikkein tehokkaimmat mallit, kuten syväoppivat mallit ja erityisesti neuroverkot ovat vaikeimmin selitettävissä ja helpoimmin selitettävät, kuten päätospuu (decision tree) taas ovat epätarkimpia (Barredo Arrieta ym., 2020; Gunning ym., 2019).

Eryityisesti turvallisuuskriittisissä kohteissa, joissa väärät ratkaisut, voivat olla hengenvaarallisia, tulee tekoälyn päätöksentekoprosessin riittävän läpinäkyvä, jotta se koetaan turvalliseksi ja luotettavaksi (Barredo Arrieta ym., 2020).

Läpinäkyvyyden lisäämiseksi on esitetty uudenlaisia koneoppimismalleja, joiden toiminta olisi helpommin selitettävää. Tämän tyyppisistä teknologioista käytetään nimitystä selitettävä tekoäly (eXplainable Artificial Intelligence, XAI) (Barredo Arrieta ym., 2020).

## 2.6 Heikko ja vahva tekoäly

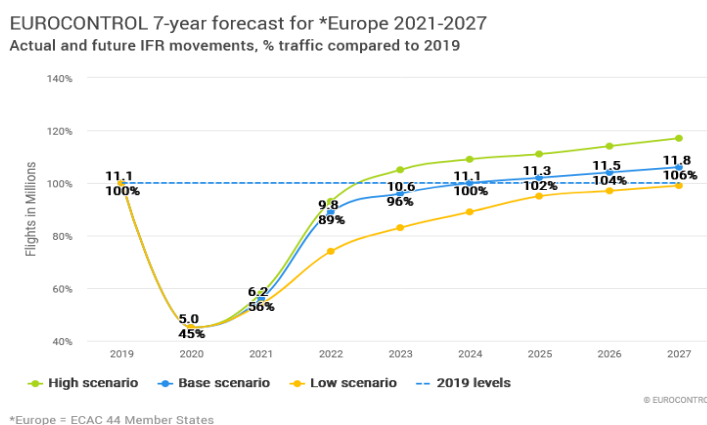
Tekoäly voidaan jakaa heikkoon ja vahvaan tekoölyyn (artificial superintelligence tai general artificial intelligence) (Russell & Norvig, 2022, s. 1072; Tuominen & Neittaanmäki, 2019). Määritelmän mukaan ihmisen älykkyyden ylittävää tekoälyä, joka toimii täysin irrallaan ihmisälystä kutsutaan vahvaksi tekoölyksi (Tuominen & Neittaanmäki, 2019). Käytännössä kaikki tällä hetkellä käytössä oleva tekoälyteknologia on heikkoa tai kapeaa tekoälyä, joka on tehokasta siinä, mihin se on suunniteltu, mutta ei osaa muuta (Russell & Norvig, 2022).

### 3 ILMAILUN ERI MUODOT

Tässä luvussa esitellään lyhyesti ilmailun eri muotoja, ilmailun tukipalveluita sekä tehdään katsaus ilmailualan sääntelyyn ja rajoituksiin. Kunkin muodon yhteydessä on otettu esimerkinomaisesti käsittelyyn kyseisessä toiminnassa tyypillisiä tekoälyteknologioiden sovelluksia ja hyödyntämistapoja.

#### 3.1 Kaupallinen ilmailu

Kaupallisella ilmailulla tarkoitetaan ilma-aluksen käyttämistä matkustajien, rahdin tai postin kuljettamista maksua tai muuta korvausta vastaan (Komission Asetus 2018/1139, 2018). Kaupallinen ilmailu on kasvanut viime vuosiin saakka hyvin voimakkaasti ja COVID-19-pandemian jälkeen tämän kasvun uskotaan jatkuvan, tosin aiempaa hieman maltillisemmin (EUROCONTROL, 2021) (Kuvio 2).



Kuvio 2 Lentoliikenteen kasvuennuste 2021–2027 (EUROCONTROL, 2021)

## 3.2 Yleisilmailu

Euroopan lentoturvallisuusvirasto EASA määrittelee yleisilmailun käsitteenä kattamaan kaiken sellaisen ilmailutoiminnan, joka ei ole kaupallista tai sotilasilmailua (Komission Asetus 2018/1139, 2018), kun taas Yhdysvalloissa yleisilmailuksi luetaan kaikki sellainen siviili-ilmailu, joka ei ole aikataulunmukaista matkustajareittiliikennettä (Burns & Bonaceto, 2020). Tämä käsittää myös erittäin laajan joukon harrasteilmailun muotoja lennokeista moottorilentoon ja laskuvarjourheilusta riippuliittoon (Traficom, 2021).

## 3.3 Sotilasilmailu

Sotilasilmailu käsitteenä viittaa valtioiden sotilaallisessa tarkoituksessa suorittamaan ilmailutoimintaan sotilasilma-aluksella. Sotilasilmailussa on osittain omat sääntönsä ja määräyksensä, jotka saattavat poiketa siviili-ilmailun vastaavista vaatimuksista.

Sotilasilmailu jätetään tässä tutkielmassa vähälle huomiolle, mutta voidaan todeta, että erilaiset tekoälysovellukset ovat sotilasilmailussa olleet käytössä jo jonkin aikaa erilaisissa tehtävissä, kuten esimerkiksi maalin seurannassa ja ilmasta ilmaan -ohjusten ohjauksessa. Lentäjää avustavia järjestelmiä on sotilaskäytössä varsin paljon esimerkiksi lisätyn todellisuuden muodossa (Kulida & Lebedev, 2020). Lisäksi sotilaskäytössä on runsaasti autonomisia tai miehittämättömiä ilma-aluksia (Kulida & Lebedev, 2020).

## 3.4 Ilmailua tukevat palvelut

Tutkielmaa varten on mielekästä tarkastella myös ilmailua tukevia palveluita. Näiden palveluiden tuotannossa tekoälyteknologioita on jo jossain määrin käytössä ja tulevaisuudessa mahdollisesti vielä vahvemmin.

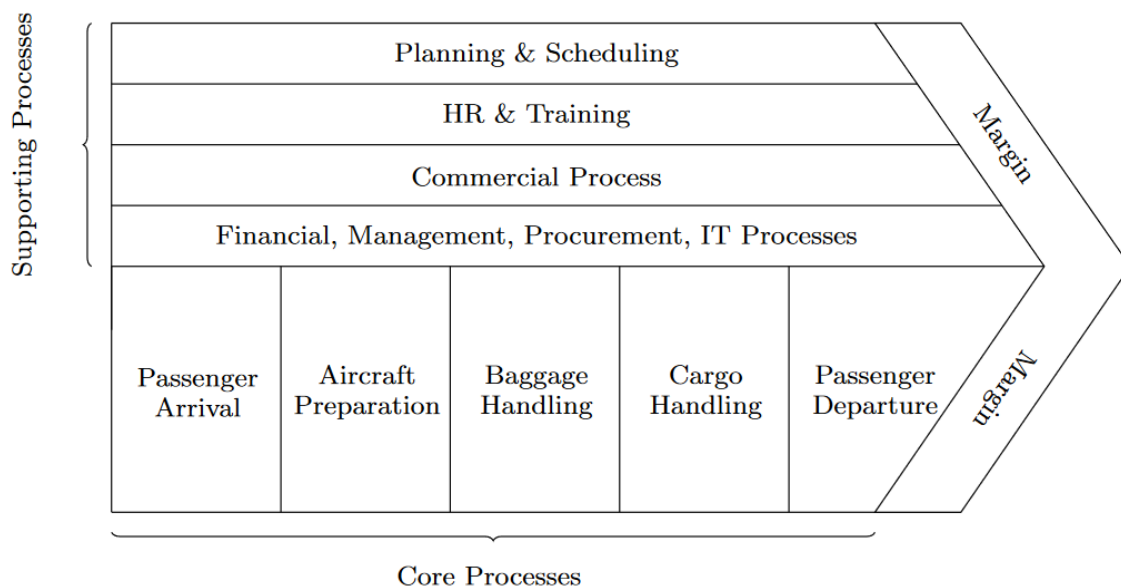
### 3.4.1 Lennonvarmistuspalvelut

Lennonvarmistuspalveluilla viitataan lennonjohtoelimien tuottamiin palveluihin ilmaliikenteen hallinnassa. Lennonvarmistuspalveluiden perustehtävä on porrastaa vastuualueellaan tapahtuva lentoliikenne siten, että ilma-alukset ovat kaikkina ajanhetkinä sijoittuneena siten, että vähimmäisetäisyys muihin ilma-aluksiin täyttyvät eikä yhteentörmäysriskiä synny. Tämä vaatii optimointia neljän ulottuvuuden, eli pituus- ja leveyskoordinaattien, lentokorkeuden ja ajan suhteen (Zeng ym., 2022). Lennonvarmistuspalveluissa tekoälyteknologiat ovat tulossa käyttöön ja joitakin koneoppimiseen perustuvia ratkaisuja on jo käytössä ilmatilanhallinnan apuna. Tekoälyteknologiat tarjoavat lennonvarmistuspalveluissa mahdollisuuksia ilmatilan tehokkaampaan ja turvallisempaan käyttöön sekä lentoreittien optimointiin. Lentoliikenteen lisääntymisen myötä ilmatilan hallinta on käymässä yhä vaativammaksi tehtäväksi yksin ihmisvoimin suoritettavaksi ja Euroopan Unionissa on otettu tavoitteeksi lisätä teknisiä apuvälineitä ilmatilan hallintaan ja tekoälyteknologioiden laajempi hyödyntäminen ilmatilan hallinnassa on yksi merkittävistä kehityskohteista Euroopassa (AAI HLG, 2020).

### 3.4.2 Maapalvelut

Maapalveluilla viitataan ilma-alukselle maassa tarjottaviin palveluihin, jotka käsittävät muun muassa ilma-aluksen kuormaukseen, matkustajahuolintaan, lentorahdin ja -postin huolintaan, ilma-alusten liikutteluun maassa sekä polttoaineen jakeluun ilma-aluksille liittyvät palvelut (Kovynyov & Mikut, 2019).





Kuvio 3 Maapalveluiden arvoketju Kovynovin ja Mikutin (2019) mukaan

Maapalveluissa nojataan hyvin voimakkaasti tietojärjestelmiin. Kovynovin ja Mikutin (2019) mukaan toimintojen digitalisointi maapalveluyrityksissä on tapahtunut ensisijaisesti kustannusten karsimiseksi. Maapalveluprosessit toimivat hyvin pitkälti digitaalisen ohjauksen mukaan ja esimerkiksi resurssisuunnittelussa on otettu mukaan tekoälyteknologioita (Kovynov & Mikut, 2019). Tietojärjestelmien ongelmat maapalveluissa voivat olla lentoyhtiöiden operaatioille erittäin haitallisia, kuten British Airwaysin käyttämän matkustaja- ja kuormatietojärjestelmän kaatuminen kahdeksi päiväksi vuonna 2019 (Mehrizi ym., 2022) ja maapalveluiden tuottajan Swissportin joutuminen ransomware-hyökkäyksen kohteeksi vuonna 2022 (Jones, 2022) osoittavat. Näistä ongelmista koitui lentoyhtiöille merkittäviä taloudellisia ja operatiivisia ongelmia, johtuen muun muassa lentojen myöhästymisistä ja peruutuksista.

### 3.4.3 Kaupalliset toiminnot

Kaupallisilla toiminnoilla viitataan erityisesti lentoyhtiöiden myynti- ja markkinoitustoimintoihin. Tähän kuuluu muun muassa kysynnän arviointi eri lentoreiteille ja lentolippujen hinnan määrittäminen. Kysynnän ja hinnoittelun optimoinnissa lentoyhtiöillä on käytössä erilaisia tekoälysovelluksia (Sison ym., 2021).

Lentoyhtiöt ovat viime vuosikymmeninä digitalisoineet kaupallisia toimintojaan hyvin voimakkaasti ja esimerkiksi loppuasiakkaalle ei välttämättä ole fyysistä lipputoimistoa lentokentällä enää lainkaan, vaan kaikki asiointi tapahtuu verkossa. Asiakkaita palvellaan myös sosiaalisessa mediassa ja usein käytössä on myös asiakaspalvelurobotteja (Ukpabi ym., 2019).

Asiakaspalvelun digitalisoituminen on tuonut mukanaan uusia ongelmia, kuten esimerkiksi asiakaspalautteen antajan seuraajien lukumäärän vaikutus vastauksen saamisen nopeuteen sosiaalisessa mediassa (Gunarathne ym., 2018). Gunarathne ym. (2018) huomasivat tutkimuksessaan, että mikäli asiakaspalautteen antajalla oli miljoona seuraajaa, hän sai sosiaalisessa mediassa antamaansa palautteeseen vastauksen välittömästi, kun taas henkilö, jolla seuraajia oli vain vähän, saattoi jäädä kokonaan ilman vastausta tai vastauksen saaminen kesti kauan.

### 3.5 Ilmailualan sääntely ja rajoitukset

Ilmailu on hyvin voimakkaasti säännelty toimiala ja toimijoiden on mukauduttava hyvin laajaan joukkoon hyvinkin yksityiskohtaisia määräyksiä ja rajoituksia.

Kansainväliset ilmailun säännökset perustuvat YK:n alaisen kansainvälisen ilmailujärjestön ICAO:n julkaisemiin määräyksiin ja säädöksiin, joiden noudattamiseen kukin jäsenvaltio sitoutuu (Milde, 2016).

Järjestönä ICAO muodostettiin vuoden 1947 kokouksessa vuoden 1944 Chicagon kokouksessa (Chicagon sopimus) päätetyn mukaisesti (Milde, 2016). Järjestön tavoitteet listattiin tuolloin kansainvälisen siviili-ilmailun yleissopimuksen artiklassa 44 (*Kansainvälisen siviili-ilmailun yleissopimus, 1949*):

Päämäärä

Järjestön tavoite ja päämäärä on luoda periaatteet ja tekniikat kansainväliselle ilmailukuljetukselle ja tukea kansainvälisen lentoliikenteen suunnittelua ja kehitystä

- a) varmistamalla kansainvälisen siviili-ilmailun turvallinen ja hyvin järjestetty kehitys kaikkialla maailmassa,

- b) edistämällä ilma-alusten suunnittelua ja käyttöä rauhanomaisia tarkoituksia varten,
- c) edistämällä lentoreittien, lentoasemien ja maaorganisaation kehittämistä kansainvälistä siviili-ilmailua varten,
- d) tyydyttämällä maailman kansojen turvallisen, säännöllisen, tehokkaan ja taloudellisen ilmakuljetuksen tarve,
- e) estämällä epäterveen kilpailun aiheuttama taloudellinen tuhlaus,
- f) varmistamalla sopimusvaltioiden oikeuksien täydellinen kunnioittaminen ja jokaisen sopimusvaltion yhtäläinen mahdollisuus harjoittaa kansainvälistä lentoliikennettä,
- g) välttämällä diskriminointia sopimusvaltioiden kesken,
- h) edistämällä lentoturvallisuutta kansainvälisessä ilmailussa,
- i) edistämällä yleensä kansainvälisen siviili-ilmailun kaikinpuolista kehitystä.

Suomi valtiona ratifioi yleissopimuksen asetuksella 11/1949 (*Asetus 11/1949*, 1949) vuonna 1949.

ICAO järjestönä koostuu jäsenvaltioista, joissa toimivaltaisen ilmailuviranomaisen tehtävänä on varmistaa, että kansainvälisen ilmakuljetusjärjestön standardit ja mahdolliset muut vaatimukset, kuten Euroopan Unionin asetukset (Komission Asetus 2018/1139, 2018) ilmailussa täyttyvät. Suomessa tätä viranomais-tehtävää suorittaa liikenne- ja viestintävirasto Traficom (Traficom, 2020).

Euroopan Unionin alueella ilmailun sääntelystä vastaa Euroopan ilmailuturvallisuusvirasto EASA (Komission Asetus 2018/1139, 2018).

## 4 TEKOÄLYTEKNOLOGIOIDEN HYÖDYNTÄMINEN ILMAILUSSA

Tekoälyteknologioiden hyödyntäminen ilmailussa on ollut toistaiseksi varsin vähäistä ja tutkimusta tästä on toistaiseksi julkaistu varsin niukasti. Teknologinen kehitys ja erityisesti tekoälyteknologioiden nopea kehitys viime vuosikymmeninä on saanut myös kaupallisen lentoliikenteen toimijat kiinnostumaan älykkäästä automaatiosta entistä enemmän (Demirci, 2022). Eri toimijoilla on erilaisia tavoitteita tekoälyteknologioiden hyödyntämisen suhteen, mutta kaiken kaikkiaan tavoitteena on toimintojen automatisointi joko kokonaan tai ihmisen tukemiseksi (E. Anderson ym., 2018). Automaatio itsessään on enemmän kuin kaksijakoinen ominaisuus, jossa sitä joko on, tai ei ole (Demirci, 2022). Anderson ym. (2018) ovat esittäneet ilmailussa käytetyille järjestelmille kuusiportaisen autonomisuuden asteikon (Taulukko 1), jossa tasolla 0 ei ole käytössä mitään automaatiota ja tasolla 5 on täysin autonominen järjestelmä (E. Anderson ym., 2018).

Taulukko 1, automaation tasojen kuvaukset (E. Anderson ym., 2018)

Taso	Nimi	Kuvaus
<b>Ihminen on pääasiallinen tarkkailija ja toimija lennon suhteen</b>		
0	<b>Ei automaatiota</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ihminen suorittaa kaikki lentoon liittyvät tehtävät</li> <li>Varoitus- ja puuttumisjärjestelmiä saattaa olla</li> </ul>

1	<b>Tehtävässä avustaminen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ihminen delegoi tietyn toiminnon jostakin tehtävästä tietylle järjestelmälle</li> <li>• Ihminen suorittaa kaikki muut lentoon liittyvät tehtävät</li> <li>• Ihminen tarkkailee järjestelmän toimintaa</li> </ul>
2	<b>Osittainen automaatio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ihminen delegoi useita tehtävän osia yhdelle tai useammalle järjestelmälle</li> <li>• Ihminen suorittaa kaikki muut lentoon liittyvät tehtävät</li> <li>• Ihminen tarkkailee järjestelmän toimintaa</li> </ul>
3	<b>Hyvin automatisoitu</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ihminen delegoi tietyn lennon vaiheen tehtävät automatisoidulle järjestelmälle</li> <li>• Ihminen suorittaa rajallisesti tehtävää tukevia toimenpiteitä</li> <li>• Ihminen valvoo automaatiota ja puuttuu sen toimintaan tarvittaessa</li> </ul>
<b>Automaatio on pääasiallinen tarkkailija ja toimija lennon suhteen</b>		
4	<b>Täysin automatisoitu</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ihminen delegoi kaikkien lennon vaiheiden kaikki tehtävät automatisoidulle järjestelmälle</li> <li>• Automaatio suoriutuu suurimmasta osasta tehtäviä suurimmassa osassa olosuhteita</li> <li>• Automaatio kykenee järkevään tai tilanteenmukaiseen toimintaan, mikäli ihminen ei reagoi pyyntöön puuttua toimintaan</li> <li>• Ihminen valvoo automatisoitua järjestelmää ja ihmisellä on mahdollisuus ottaa järjestelmä täysin hallintaan</li> </ul>
5	<b>Autonominen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lennon kaikkien vaiheiden kaikki toiminnat tapahtuvat automatisoidusti</li> <li>• Automaatio kykenee suorittamaan kaikki tehtävät, joista ihminen suoriutuisi</li> </ul>

#### 4.1 Ohjaamomiehistöä avustavat järjestelmät

Ohjaamomiehistöä avustavien järjestelmien kehitys älykkäämpään suuntaan on ollut kehityskulkuna nähtävissä jo jonkin aikaa kaupallisessa ilmailussa (Kulida & Lebedev, 2020) ja pitkillä reittilennoilla lentäjä itse ohjaa lentokonetta

vain hyvin pienen osan lentoajasta, lähinnä lentoonlähdön ja laskeutumisen aikana. Perinteisen autopilotin lisäksi ohjaamomiehistön avuksi on saatu erilaisia avustavia järjestelmiä päätöksenteon tueksi sekä varoitusjärjestelmiä mm. yhteentörmäysten välttämiseksi (Sampigethaya & Poovendran, 2013).

Yleisilmailun parissa lentäjän kognitiivisen kuormituksen vähentämiseksi on kehitetty erilaisia avustavia järjestelmiä, kuten Digital Copilot (Estes ym., 2016). Digital Copilot, eli digitaalinen perämies on yleisilmailijoille suunnattu järjestelmä, joka kokoaa lentoa varten tarvittavan informaation ja toimii lennon aikana avustavana järjestelmänä, jolle lentäjä voi esittää lentoa kokevia kysymyksiä ja saada lennon aikana tilanteen vaatimia ilmoituksia. Estes ym. tulivat tutkimuksessaan (2016) siihen tulokseen, että tällainen järjestelmä voi parantaa yleisilmailun turvallisuutta muun muassa lentäjän työkuorman vähentämisen kautta (Estes ym., 2016).

## **4.2 Ennustetyökalut**

Kaupallisen lentoyhtiön kannalta on ensiarvoisen tärkeää pystyä ennakoimaan lentojen kysyntää sekä lyhyellä, että pitkällä aikavälillä (Sison ym., 2021). Lyhyen aikavälin kysyntäennusteen avulla voidaan valita sopiva konetyyppi lennettävälle reitille, jotta lennon täyttöaste saadaan mahdollisimman korkeaksi. Lisäksi jokaisesta lennolle myydystä lipusta tulisi saada paras mahdollinen hinta. Pitemmän aikavälin ennusteen perusteella voidaan tehdä ratkaisuja lennettävistä reiteistä ja mahdollisesti lentoyhtiön käyttöön hankittavista lentokoneista. Tutkimusta kysyntäennustetyökaluista on tehty paljon, mutta ilmailukontekstiin sovitettuna tutkimusta on vielä varsin vähän (Sison ym., 2021). Tutkimuksessaan Sison ym. (2021) ovat vertailleet erilaisia ennustemalleja ja mallien sopivuutta sekä simulaatiomalleja lentoyhtiöiden kysynnän ennustamiseen. Tutkimuksen perusteella koneoppimismallit ovat tehokkaita monimutkaisen optimointiongelman ratkaisua haettaessa.

Sekä lentoyhtiöiden, että maapalveluja tuottavien yritysten kannalta on erittäin tärkeää, että lähtevän ja saapuvan liikenteen täsmällisyyttä voidaan mahdollisimman hyvin ennakoida (McCarthy ym., 2019). Lentoyhtiön kannalta poikkeamat aikataulun mukaisesta liikennöinnistä johtavat helposti reaktiivisiin vaikutuksiin, kuten miehistön tai lentokoneen käytön estyminen tai viivästyminen, joiden rahallinen ja operatiivinen vaikutus voi olla merkittävä (Evler ym., 2022). Tutkimuksessaan McCarthy ym. (2019) vertailivat erilaisia koneoppimismalleja yhden halpalentoyhtiön lentojen saapumistäsmällisyyden ennustamisessa ja lopputuloksena tutkimuksessa todetaan, että tutkimuksessa esitelty Transfer Learning -malli toimi tähän tarkoitukseen tarkasti ja saattaisi olla laajennettavissa myös toisenlaisiin lentoyhtiöihin (McCarthy ym., 2019).

Jotta maapalvelutuotantoon tarvittavat resurssit voidaan määritellä mahdollisimman tarkasti jopa minuuttien tarkkuudella, tarvitaan keinoja, joilla poikkeamat lentoaikatauluista saadaan mahdollisimman hyvissä ajoin tietoon. Tähän on käytetty erilaisia koneoppimismalleja (Evler ym., 2022; Thiagarajan ym., 2017) ja tulokset ovat olleet lupaavia. Suomessa eräs maapalveluja tuottava yritys toteutti yhdessä lentoyhtiön ja koneoppimISRatkaisuja tuottavan yrityksen kanssa vuonna 2018 dynaamisen työkalun saapuvien lentojen myöhästymisen ennustamiseen, jonka saavuttamat tulokset olivat varsin hyviä ja sovellus palkittiin alalla arvostetulla innovaatiopalkinnolla (Swissport International, 2018).

### **4.3 Lennonvarmistuspalvelua tukevat järjestelmät**

Lennonvarmistuspalveluiden osalta tekoälyteknologioille nähdään valtavasti hyödyntämismahdollisuuksia, mutta toistaiseksi näitä on otettu käyttöön varsin niukalti. Tällä hetkellä suuri osa lennonjohdon ja ilma-aluksen välillä tapahtuvasta tiedonsiirrosta tapahtuu puheella radion välityksellä (Mondoloni & Rozen, 2020) eikä tätä tietoa automaattisesti syötetä mihinkään järjestelmään, mikä johtaa siihen, että datan syöttäminen tietojärjestelmään sisältää sekä viivettä, että virheiden mahdollisuuden (Mondoloni & Rozen, 2020). Muun muassa tästä

johtuen laajamittainen automaation hyödyntäminen lennonvarmistuspalveluissa on ollut toistaiseksi vähäistä. Viime aikojen kehitys, jossa osasta puheella välitetyistä lennonjohtoselvityksistä on siirrytty sähköisessä muodossa välitettävään dataan, on mahdollistanut sen, että tämä tieto saadaan automaation käyttöön (Mondoloni & Rozen, 2020). Yhdysvaltojen ilmailuviranomainen FAA ja Euroopan keskitetty lennonvarmistuspalvelu Eurocontrol ovat yhteistyössä laatineet Action Plan 16 (AP16) -nimellä kutsutun suunnitelman, jossa pyritään automatisoimaan kunkin lennon lentoradan ennustaminen neljän ulottuvuuden suhteen (Zeng ym., 2022). Jotta tämän tyyppisen ennusteen tuottaminen on mahdollista, tulee ennustetyökalun saada reaaliaikaista tietoa ilma-aluksen liikkeistä, mahdollisista poikkeavista olosuhteista, kuten sääilmiöt, ruuhkautunut ilmatila tai reitin varrella oleva aktiivinen rajoitus- tai vaara-alue (Mondoloni & Rozen, 2020).

Degas ym. (2022) tutki tekoälyn ja selitettävän tekoälyn käyttömahdollisuuksia lennonvarmistuspalvelussa ja toteaa, että on laaja joukko toimintoja, joita on pidetty mahdollisina käyttötapauksina. Tutkimuksen mukaan tekoälyä ja selitettävää tekoälyä voitaisiin käyttää ennustetyökaluna, optimointiin ja erilaisiin simulaatioihin (Degas ym., 2022).

#### **4.4 Autonomiset ilma-alukset**

Autonomisten ilma-alusten odotetaan lähitulevaisuudessa integroituvan muun siviili-ilmailun joukkoon (Durak ym., 2018). Täysin itsenäisesti operoivien ilma-alusten järjestelmä- ja ohjelmistosuunnittelun vaatimukset poikkeavat perinteisistä ilma-aluksista siinä, että toimintaa ei valvota fyysisesti ilma-aluksesta käsin ja ilma-aluksen tulee pystyä ratkaisemaan ongelmatilanteet itsenäisesti. Turvallisuuksien säilyttäminen autonomisten ilma-alusten operoinnin lisääntyessä on haaste, johon ilmailuviranomaiset ovat tahoillaan pyrkinet vastaamaan (EASA, 2015). Jotta ilma-alus voi toimia kaupallisesti, sen tulee olla tyyppihyväksytty eikä tällä hetkellä ole valmista mallia autonomisten ilma-alusten



tyyppihyväksyntää koskien (Durak ym., 2018). Ilmailuviranomaiset sekä Euroopassa, että Yhdysvalloissa tekevät kuitenkin valmistelemaa työtä tyyppihyväksyntäprosessia varten ja odotettavissa on, että lähitulevaisuudessa nähdään ensimmäiset tyyppihyväksytyt autonomiset ilma-alukset kaupallisessa käytössä. Käyttö voi olla pienillä ilma-aluksilla tehtävää tavarankuljetusta tai jopa matkustajaliikennettä ilmataksimallilla. Toimijoita alalle on ilmoittautunut jo monia. Ilma-alukset alkavat olla teknisesti varsin valmiita ja tyyppihyväksynnän saaminen todennäköisesti aloittaisi merkittävän määrän operaatioita lyhyessä ajassa (Straubinger ym., 2020).

#### **4.5 Merkittävimmät haasteet**

Tekoälyteknologioiden yleistymistä ilmailun parissa on hidastanut erityisesti voimakkaasta sääntelystä johtuva jäykkyys koko toimialalla. Myös läpinäkyvyyden puute ongelmanratkaisumalleihin on turvallisuushakuisella toimialalla haaste (Kulida & Lebedev, 2020). Varoittavana esimerkkinä läpinäkyvyyden puutteesta voi pitää Boeing 737MAX -koneille syksyllä 2018 ja keväällä 2019 tapahtuneita lento-onnettomuuksia (Demirci, 2022; Hallamaa ym., 2021). Juuri-syynä onnettomuuksiin pidetään sitä, että ilma-aluksen tietokone sai anturivian vuoksi virheellistä dataa ja reagoi odottamattomalla tavalla. Konetyyppiin oli asennettu uudentyyppinen automaattinen tietokoneohjattu ohjausjärjestelmä, jonka toimintaa ei ollut käyttäjille kuvattu tai koulutettu lainkaan, eikä ohjaamomiehistö ymmärtänyt, miksi kone toimi, kuten se toimi, eikä siten osannut reagoida oikealla tavalla (Demirci, 2022).

## 5 YHTEENVETO JA POHDINTA

Tekoälyteknologioiden yleistyminen ilmailun parissa on ollut paikoin hyvinkin ripeää, mutta koska alalla on turvallisuushakuisuudesta johtuen hyvin voimakas sääntely, on teknologioiden tuominen erityisesti kaupallisiin ilma-aluksiin varsin hidasta. Ilmailun palveluissa erilaiset tekoälysovellukset ovat jo arkipäiväistyneet ja tuovat tehokkuutta toimintaan. Erityisesti ilmaliikennepalvelut ja ilmatilanhallinta saavat lisääntyneestä laskentatehosta ja älykkäistä algoritmeista paljon apua lentojen porrastamiseen ruuhkaisilla lentoreiteillä ja vilkasliikenteisien lentokenttien ympäristöissä.

Eräänä tekoälyteknologioiden yleistymistä hidastavana tekijänä on mainittu läpinäkyvyyden puute päätöksenteossa (Kulida & Lebedev, 2020). Aina tutkijatkaan eivät tarkkaan tiedä, miten tekoäly on päätynyt tekemiinsä ratkaisuihin. Tällaista epävarmuutta ilmailun parissa karsastetaan voimakkaasti. Tähän dilemmaan ratkaisu voisi olla selitettävä tekoäly (eXplainable AI, XAI), joka tarjoaa parempaa ymmärrettävyyttä, tulkittavuutta ja läpinäkyvyyttä perinteisiin tekoälyalgoritmeihin ja teknologioihin nähden (Barredo Arrieta ym., 2020; De ym., 2020). Tekoälyteknologioiden kehittyessä ihmisen rooli on herättänyt keskustelua ja jopa puheenvuoroja siitä, onko ihminen toimijana ajautumassa pois toiminnan keskiöstä (Fügener ym., 2021). Ilma-alusten autonomisuuden lisääntyessä myös ihmisen rooli ilmailun kokonaisuudessa muuttuu väistämättä. Turvallisuuskriittisenä ympäristönä lentoliikenne vaatii käytettäviltä järjestelmiltä paljon ja järjestelmien toimintalogiikan tulisi olla ymmärrettävissä. Tämän

tyyppisissä ympäristöissä on tarpeellista käydä keskustelua tekoälyn etiikasta ja vastuullisuudesta yleisemminkin.

Euroopassa tekoälyteknologioiden käyttöönottoa pyritään edistämään useilla Euroopan Unionin tukemilla hankkeilla, kuten esimerkiksi korkean tason työryhmän raportista ” *The FLY AI Report Demystifying and Accelerating AI in Aviation/ATM*” käy ilmi (AAI HLG, 2020). Raportissa myös listataan 24 erilaista teknologiaa, sovellusta tai projektia, joissa tekoälyteknologioita hyödynnetään ilmailun parissa. On siis toivoa, että teknologinen kehitys ilmailun parissa jatkuu myös tekoälyteknologioiden osalta ja mahdolliset sääntelyyn ja lainsäädäntöön liittyvät haasteet eivät osoittaudu liian suuriksi. Tekoälyteknologioiden laajempi käyttö toimialalla toisi varmasti tehokkuutta ja ennustettavuutta toimintaan ja saattaisi osaltaan myös parantaa lentoturvallisuutta.

Taulukko 2 kokoaa tämän tutkielman teossa lähdemateriaalina käytettyä kirjallisuutta.

Taulukko 2 Tekoälyteknologiat ilmailussa

Miten tekoälyteknologioita on käytetty ilmailussa?	Tekijä	Aihe	käyttökohde
Ennustetyökalut	Zeng ym (2022)	4D lentorataennuste	Lennonjohto
	Thiagarajan ym. (2017)	Koneoppimismalli lentojen täsmällisyyden ennustamiseen	Maapalvelut / lennonjohto
	Swissport (2018)	Koneoppimismalli lentojen täsmällisyyden ennustamiseen	Maapalvelut
	Sison ym. (2021)	Kone- ja syväoppimismallit kysynnän ennustamisessa	Kaupalliset toiminnot
	Mondoloni & Rozen (2020)	Ilma-aluksen lentoradan ennustaminen	Lennonjohto

	McCarthy ym. (2019)	LSTM/Transfer Learning myöhästymisen enustamisessa	Kaupallinen ilmailu
	Evler ym. (2022)	Koneoppimismalli myöhästymisten vaikutusten minimointiin	Kaupallinen ilmailu / Maapalvelut
Avustavat järjestelmät	Demirci (2022)	Automaattisten järjestelmien vaatimukset	Kaupallinen ilmailu
	Anderson ym. (2018)	Automaation tasot	Kaupallinen ilmailu / yleisilmailu / autonomiset ilma-alukset
	Estes ym. (2016)	Digital copilot	Yleisilmailu
	Kulida & Lebedev (2020)	Päätöksenteon tuki, kuormituksen vähentäminen	Kaupallinen ilmailu / sotilasilmailu
	Sampigethaya & Poovedran (2013)	Päätöksenteon tuki, kuormituksen vähentäminen, varoitussjärjestelmät	Kaupallinen ilmailu
Lennonvarmistuspalvelua tukevat järjestelmät	Degas ym. (2022)	XAI, AI käyttötapaukset lennonjohdossa	Lennonjohto
	Mondoloni & Rozen (2020)	Tekoälyn haasteet, lentoradan ennustaminen	Lennonjohto
	Zeng ym (2022)	4D lentorata-ennuste, AP16	Lennonjohto
Autonomiset ilma-alukset	Durak ym. (2018)	Luku 8, autonomiset ilma-alukset	Autonomiset ilma-alukset
	Straubinger ym. (2020)	Urban Air Mobility, toimijat	Autonomiset ilma-alukset
Tekoälyteknologiat	Barrieda Arrieta ym. (2020)	XAI	tekoälytutkimus

	De ym. (2020)	XAI	tekoälytutkimus
	Grunning ym. (2019)	XAI	tekoälytutkimus
	Fügener ym. (2021)	Ihmisen roolin muutos	tekoälytutkimus
	Russell & Norvig (2022)	Tekoäly (kirja)	tekoälytutkimus
	Alpaydin (2019)	Koneoppiminen (kirja)	tekoälytutkimus
	Tuominen & Neittaanmäki (2019)	Tekoäly (kirja)	tekoälytutkimus
Ilmailun sääntely ja rajoitukset			Uusien teknologioiden ja innovaatioiden hyväksyntäprosessi
	Bonnín Roca ym. (2017)	Uudet teknologiat ja rajoitukset, ilmailumääräykset	Uusien teknologioiden ja innovaatioiden hyväksyntäprosessi
	EASA (2015)	Autonomisia ilma-aluksia koskevat säädökset	Kansainvälisten ilmailun säädösten perusta
	ICAO (1949)	Siviili-ilmailun yleissopimus (Chicagon sopimus)	

Koska tekoälyteknologioiden hyödyntämistä ilmailussa on tutkittu vielä varsin vähän, on jatkotutkimusta varten varsin suuri tilaus. Erityisesti selitettävän tekoälyn osalta, jonka tutkimus itsessäänkin on vielä varsin vähäistä.

## LÄHTEET

- AAI HLG. (2020). *The FLY AI Report Demystifying and Accelerating AI in Aviation/ATM*.  
[https://www.eurocontrol.int/archive\\_download/all/node/12080](https://www.eurocontrol.int/archive_download/all/node/12080)
- Alpaydin, E. (2016). *Machine Learning: The New AI*. MIT Press.  
<http://ebookcentral.proquest.com/lib/jyvaskyla-ebooks/detail.action?docID=4714219>
- Anderson, E., Fannin, T., & Nelson, B. (2018). Levels of Aviation Autonomy. *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 1–8.  
<https://doi.org/10.1109/DASC.2018.8569280>
- Anderson, J. D. (2016). *Introduction to flight* (Eighth edition). McGraw-Hill Education.
- Asetus 11/1949*. (1949). Oikeusministeriö.  
[https://www.finlex.fi/fi/sopimukset/sopsteksti/1949/19490011/1949011\\_1](https://www.finlex.fi/fi/sopimukset/sopsteksti/1949/19490011/1949011_1)
- Barredo Arrieta, A., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Bennetot, A., Tabik, S., Barbado, A., Garcia, S., Gil-Lopez, S., Molina, D., Benjamins, R., Chatila, R., & Herrera, F. (2020). Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information Fusion*, 58, 82–115.  
<https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.12.012>

Bonnín Roca, J., Vaishnav, P., Morgan, M. G., Mendonça, J., & Fuchs, E. (2017).

When risks cannot be seen: Regulating uncertainty in emerging

technologies. *Research Policy*, 46(7), 1215–1233.

<https://doi.org/10.1016/j.respol.2017.05.010>

Burns, K., & Bonaceto, C. (2020). An empirically benchmarked human reliability

analysis of general aviation. *Reliability Engineering & System Safety*, 194,

106227. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.07.028>

De, T., Giri, P., Mevawala, A., Nemani, R., & Deo, A. (2020). Explainable AI: A

Hybrid Approach to Generate Human-Interpretable Explanation for

Deep Learning Prediction. *Procedia Computer Science*, 168, 40–48.

<https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.255>

Degas, A., Islam, M. R., Hurter, C., Barua, S., Rahman, H., Poudel, M., Ruscio,

D., Ahmed, M. U., Begum, S., Rahman, M. A., Bonelli, S., Cartocci, G.,

Flumeri, G. D., Borghini, G., Babiloni, F., & Aricó, P. (2022). A Survey on

Artificial Intelligence (AI) and eXplainable AI in Air Traffic

Management: Current Trends and Development with Future Research

Trajectory. *Applied Sciences*, 12(3), 1295.

<http://dx.doi.org/10.3390/app12031295>

Demirci, S. (2022). The requirements for automation systems based on Boeing

737 MAX crashes. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 94(2),

140–153. <https://doi.org/10.1108/AEAT-03-2021-0069>

Durak, U., Becker, J., Hartmann, S., & Voros, N. S. (Toim.). (2018). *Advances in*

*Aeronautical Informatics: Technologies Towards Flight 4.0*. Springer

International Publishing : Imprint: Springer.

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-75058-3>

- EASA. (2015). Introduction of a regulatory framework for the operation of unmanned aircraft, technical opinion. *European Aviation Safety Agency*.
- Escudier, M., & Atkins, T. (2019). Programmable logic controller. *Teoksessa A Dictionary of Mechanical Engineering*. Oxford University Press.  
<http://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780198832102.01.0001/acref-9780198832102-e-4880>
- Estes, S. L., Burns, K. J., Helleberg, J. R., Long, K. M., Pollack, M. E., & Stein, J. L. (2016). Digital Copilot: Cognitive Assistance for Pilots. *The 2016 AAAI Fall Symposium Series*.  
<https://www.aaai.org/ocs/index.php/FSS/FSS16/paper/view/14112/13679>
- EUROCONTROL. (2021). *EUROCONTROL Forecast Update 2021-2027*.  
<https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-forecast-update-2021-2027>
- Evler, J., Lindner, M., Fricke, H., & Schultz, M. (2022). Integration of turnaround and aircraft recovery to mitigate delay propagation in airline networks. *Computers & Operations Research*, 138, 105602.  
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105602>
- Fortońska, A. (2021). Measures Taken by the European Union Agency for Aviation Safety to Ensure Aviation Safety. *Journal of KONBiN*, 51(2), 117–125. <https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.2478/jok-2021-0026>



- Fügener, A., Grahl, J., Gupta, A., & Ketter, W. (2021). Will Humans-in-the-Loop Become Borgs? Merits and Pitfalls of Working with Ai. *MIS Quarterly*, 45(3), 1527–1556. <https://doi.org/10.25300/MISQ/2021/16553>
- Grier, D. A. G. A. (2015). Automation and Computerization. Teoksessa *The Oxford Encyclopedia of the History of American Science, Medicine, and Technology*. Oxford University Press.  
<http://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780199766666.01.0001/acref-9780199766666-e-42>
- Gunarathne, P., Rui, H., & Seidmann, A. (2018). When Social Media Delivers Customer Service: Differential Customer Treatment in the Airline Industry. *MIS Quarterly*, 42(2), 489-A10.  
<https://doi.org/10.25300/MISQ/2018/14290>
- Gunning, D., Stefik, M., Choi, J., Miller, T., Stumpf, S., & Yang, G.-Z. (2019). XAI-Explainable artificial intelligence. *Science Robotics*, 4(37), eaay7120.  
<https://doi.org/10.1126/scirobotics.aay7120>
- Hallamaa, J., Haikarainen, R., & Kalliokoski, T. (2021). Tekoälyteknologiat ja turvallisuus. *Tieteessä tapahtuu*, 39(4), Article 4.  
<https://journal.fi/tt/article/view/111214>
- ICAO. (2021). *ICAO Safety Report 2021 Edition*.  
<https://www.icao.int/safety/Documents/ICAO%20Safety%20Report%202021%20Edition.pdf>
- Jones, C. (2022, helmikuuta 7). *Swissport ransomware attack leads to flight delays*. IT PRO.

<https://www.itpro.co.uk/security/ransomware/362171/swissport-ransomware-attack-flight-delays>

*Kansainvälisen siviili-ilmailun yleissopimus.* (1949). Oikeusministeriö.

[https://www.finlex.fi/fi/sopimukset/sopsteksti/1949/19490011/19490011\\_2#idm45237816322656](https://www.finlex.fi/fi/sopimukset/sopsteksti/1949/19490011/19490011_2#idm45237816322656)

Kovynyov, I., & Mikut, R. (2019). Digital Transformation in Airport Ground Operations. *NETNOMICS: Economic Research and Electronic Networking*, 20(1), 1–30. <https://doi.org/10.1007/s11066-019-09132-5>

Kulida, E., & Lebedev, V. (2020). About the Use of Artificial Intelligence Methods in Aviation. *2020 13th International Conference "Management of large-scale system development" (MLSD)*, 1–5.

<https://doi.org/10.1109/MLSD49919.2020.9247822>

Lim, D., & Mavris, D. (2010, tammikuuta 4). A Design Methodology for Lifelong Aircraft Evolution. *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida.

<https://doi.org/10.2514/6.2010-283>

McCarthy, N., Karzand, M., & Lecue, F. (2019). Amsterdam to Dublin Eventually Delayed? LSTM and Transfer Learning for Predicting Delays of Low Cost Airlines. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 33, 9541–9546. <https://doi.org/10.1609/aaai.v33i01.33019541>

Mehrizi, M. H. R., Nicolini, D., & Mòdol, J. R. (2022). How Do Organizations

Learn from Information System Incidents? A Synthesis of the Past,

Present, and Future. *MIS Quarterly*, 46(1), 531–590.

<https://doi.org/10.25300/MISQ/2022/14305>

Milde, M. (2016). *International Air Law and ICAO: (Third Edition)*. Eleven

International Publishing.

<http://ebookcentral.proquest.com/lib/jyvaskyla->

[ebooks/detail.action?docID=4711772](http://ebookcentral.proquest.com/lib/jyvaskyla-ebooks/detail.action?docID=4711772)

Mondoloni, S., & Rozen, N. (2020). Aircraft trajectory prediction and

synchronization for air traffic management applications. *Progress in*

*Aerospace Sciences*, 119, 100640.

<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2020.100640>

Mowery, D. C., & Rosenberg, N. (1981). Technical change in the commercial

aircraft industry, 1925–1975. *Technological Forecasting and Social Change*,

20(4), 347–358. [https://doi.org/10.1016/0040-1625\(81\)90065-2](https://doi.org/10.1016/0040-1625(81)90065-2)

Regulation (EU) 2018/1139, Pub. L. No. 2018/1139, 174 (2018).

<https://www.easa.europa.eu/downloads/107247/en>

Russell, S., & Norvig, P. (2022). *Artificial Intelligence: A Modern Approach, eBook*,

*Global Edition*. Pearson Education Limited.

<https://bookshelf.vitalsource.com/reader/books/9781292401171/pageid/20>

d/20

Sampigethaya, K., & Poovendran, R. (2013). Aviation Cyber-Physical Systems: Foundations for Future Aircraft and Air Transport. *Proceedings of the IEEE*, 101(8), 1834–1855. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2235131>

Sison, N., Li, L., & Han, M. (2021). Survey of Machine Learning and Deep Learning Techniques for Travel Demand Forecasting. *2021 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence Computing, Advanced Trusted Computing, Scalable Computing Communications, Internet of People and Smart City Innovation (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/IOP/SCI)*, 606–613. <https://doi.org/10.1109/SWC50871.2021.00090>

Straubinger, A., Rothfeld, R., Shamiyeh, M., Büchter, K.-D., Kaiser, J., & Plötner, K. O. (2020). An overview of current research and developments in urban air mobility – Setting the scene for UAM introduction. *Journal of Air Transport Management*, 87, 101852. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101852>

Swissport International. (2018). *Swissport wins award for dynamic delay prediction tool*. <https://www.swissport.com/en/news/current-news/2018/swissport-wins-award-for-dynamic-delay-prediction-tool>

Thiagarajan, B., Srinivasan, L., Sharma, A. V., Sreekanthan, D., & Vijayaraghavan, V. (2017). A machine learning approach for prediction of on-time performance of flights. *2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/DASC.2017.8102138>

Traficom. (2020). Suomen ilmailun turvallisuusohjelma. *Traficom*in julkaisuja, 2020(231).

<https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/Traficom%20Suomen%20ilmailun%20turvallisuusohjelma%20versio%207.pdf>

Traficom. (2021). *Sanasto ja määritelmät*. Liikennefakta.

<https://www.liikennefakta.fi/fi/turvallisuus/ilmailu/sanasto>

Ukpabi, D. C., Aslam, B., & Karjaluoto, H. (2019). Chatbot Adoption in Tourism Services: A Conceptual Exploration. Teoksessa S. Ivanov & C. Webster (Toim.), *Robots, Artificial Intelligence, and Service Automation in Travel, Tourism and Hospitality* (ss. 105–121). Emerald Publishing Limited.

<https://doi.org/10.1108/978-1-78756-687-320191006>

Zeng, W., Chu, X., Xu, Z., Liu, Y., & Quan, Z. (2022). Aircraft 4D Trajectory Prediction in Civil Aviation: A Review. *Aerospace*, 9(2). Scopus.

<https://doi.org/10.3390/aerospace9020091>