

Sähköinen lentäminen Suomessa

Edellytykset, mahdollisuudet ja kehitysnäkymät

Jorma Mäntynen
Riku Huhta
Markus Pajarre

Julkaisun nimi Sähköinen lentäminen Suomessa – edellytykset, mahdollisuudet ja kehitysnäkymät			
Tekijät Jorma Mäntynen, Riku Huhta ja Markus Pajarre, Destia Oy			
Toimeksiantaja ja asettamispäivämäärä Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 10.3.2022			
Julkaisusarjan nimi ja numero Traficomın tutkimuksia ja selvityksiä 16/2022		ISSN(verkkojulkaisu) 2669-8757 ISBN(verkkojulkaisu) 978-952-311-804-1 URN http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-311-804-1	
Asiasanat Sähköinen lentäminen, sähkölentokoneet, akkusähkö, polttokennosähkö			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Selvityksen tavoitteena on tuottaa tietoa Suomen sähköisen lentoliikenteen kehittämiseksi ja päätöksenteon tueksi. Selvityksessä on kartoitettu sähköisen lentämisen edellytykset, mahdollisuudet sekä kehitysnäkymät Suomessa vuoteen 2040. Työssä käsitellään sähköisen lentämisen kalustoa, teknologiaa, infrastruktuuria, regulaatiota, markkinoita sekä sovellusmahdollisuuksia osana Suomen liikennejärjestelmää. Sähköinen lentäminen voi perustua akkusähköön, polttokennosähköön tai hybriditeknologiaan.</p> <p>Liikenteen sähköistymisen megatrendi koskee lentoliikenteessä erityisesti lyhyemmän kantaman ja kapasiteetin kalustoa. Muilla käyttövoimilla, kuten kestävien lentopolttoaineiden ja vedyn polttamisella polttomoottorissa on keskeinen rooli pitkämatkaisen lentoliikenteen päästöjen vähentämisessä. Sähköautojen ja akkuteknologian kehitys ovat tärkeitä ajureita lentoliikenteen sähköistymiselle, mikä alkaa pienistä ilma-aluksista. Akkujen energiatiheyden kasvaessa sähkökäyttö mahdollistaa hieman suurempien lentokoneiden lennot. Vedystä voidaan tuottaa polttokennoissa sähköenergiaa, joka soveltuu suurempien lentokoneiden käyttöön. Pystysuoraan nousevat ja laskeutuvat eVTOL-koneet (<i>eng. electric vertical take-off and landing</i>) ovat myös kehityksen alla ja ne soveltuvat muutaman henkilön kuljettamiseen esimerkiksi syöttöyhteyksillä lentokentille. 2030-luvulla akkujen energiatiheys kasvaa ja vetykäyttöisyys yleistyy, jolloin konekokoja ja kantamaa voidaan kasvattaa. Tavoitetasosta mallia näyttää Norja, jossa tavoitteena on vuonna 2040 järjestää kaikki kotimaan lennot sähköisesti.</p> <p>Suomessa sähköiselle lentämiselle on monella tapaa suotuisat olosuhteet. Pinta-alaltaan suuressa ja väestöltään pienessä maassa asutusta, elinkeinoelämää ja matkailua on kaikilla alueilla. Se johtaa ohuisiin matkustajavirtoihin, ja osa niistä voidaan tulevaisuudessa kuljettaa sähköisellä lentoliikenteellä. Sähköisen lentämisen kilpailullinen tila liikennejärjestelmän näkökulmasta on yli 200 kilometrin matkoilla sekä reiteillä, joilla junaliikennettä ei ole tai maantieteellisten esteiden, kuten vesistöjen, ylittämässä. Sähköisiä lentokoneita voidaan hyödyntää reitti- tai taksilentoliikenteessä sekä pienien volyymien tavarakuljetuksissa. Suomessa on kattava lentoasemien ja lentopaikkojen verkosto, joka toimii alustana sähköiselle ilmailulle. Tämä edellyttää kuitenkin investointeja lataus- tai vedynjakelu-infrastruktuuriin.</p> <p>Sähköisten lentokoneiden matalammat operointikustannukset ovat eduksi, mutta kannattava toiminta edellyttää riittävää kysyntää. Sähköisen lentämisen kysyntä muodostuu tulevaisuudessa erityisesti teollisuuden ja matkailun tarpeista. Teollisuudessa kehityssuuntaus on kohti hiilineutraalia tuotantoa sekä logistiikkaa, ja sähköisellä lentämisellä voidaan tarjota hiilineutraalia saavutettavuutta. Matkailussa sähköisen lentämisen ympärille voidaan muodostaa kestäviä matkailukonsepteja. Sähköiselle lentämiselle on vasta kehitteillä regulaatio, joka ottaa huomioon sen erityispiirteet. Muilta osin sovelletaan yleisesti ilma-aluksia ja lentotoimintaa koskevia sääntöjä.</p> <p>Aikaikkuna sähköisen lentämisen kehittämiseksi on auki. Nyt on oikea hetki edistää digitaalista ja vähäpäästöistä lentoliikennejärjestelmää Suomessa. Toimenpiteinä työssä ehdotetaan sähköisen lentämisen taloudellisten kannustimien ja lentämisen yhteiskunnallisten hyötyjen tarkempaa tarkastelua sekä konkretiaan tähtäävää kansallista ja kansainvälistä TKI-toimintaa ja pilotointia sähköisen lentämisen ja siihen liittyvien matkaketjujen edistämiseksi.</p>			
Yhteyshenkilö Jari Pöntinen	Raportin kieli suomi	Luottamuksellisuus Julkinen	Kokonaissivumäärä 124
Jakaja	Kustantaja Liikenne- ja viestintävirasto Traficom		

Publikation Elflyg i Finland – förutsättningar, möjligheter och framtidsutsikter			
Författare Jorma Mäntynen, Riku Huhta ja Markus Pajarre, Destia Oy			
Tillsatt av och datum Transport- och kommunikationsverket Traficom 15.3.2022			
Publikationsseriens namn och nummer Traficoms forskningsrapporter och utredningar 16/2022		ISSN (webbpublikation) 2669-8757 ISBN (webbpublikation) 978-952-311-804-1 URN http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-311-804-1	
Ämnesord Elflyg, eldrivna flygplan, el från batterier, el från bränsleceller			
Sammandrag			
<p>Syftet med utredningen är att producera information för utvecklingen av elflyg i Finland och som stöd för beslutsfattandet.</p> <p>I utredningen kartläggs förutsättningarna, möjligheterna och framtidsutsikterna för elflyg i Finland fram till 2040. I utredningen behandlas materiel, teknologi, infrastruktur, reglering, marknader och tillämpningsmöjligheter för elflyg som en del av Finlands transportsystem. Elflyg kan baseras på el från batterier, el från bränsleceller eller hybridteknologi.</p> <p>Elektrifieringen av trafiken är en megatrend som inom flygtrafiken är relevant främst för materiel med kortare räckvidd och mindre kapacitet. Andra drivkrafter såsom hållbara flygbränslen och förbränning av väte i förbränningsmotor har en central roll då det gäller att minska utsläppen från långdistansflyg. Utvecklingen av elbilar och batteriteknologi är viktiga drivkrafter i elektrifieringen av flygtrafiken som börjar från små luftfartyg. Då batteriernas energitäthet växer möjliggörs användningen av el i också i lite större flygplan. Av väte kan man producera elenergi i bränsleceller som passar för bruk i större flygplan. EVTOL-flygplan (<i>eng. electric vertical take-off and landing</i>) som kan lyfta och landa vertikalt är också under utveckling och de passar för transporter av några personer till exempel i anslutningstrafik till flygplatser. På 2030-talet då batteriernas energitäthet växer och vätgasdrift blir allt vanligare kan man börja använda större flygplan med längre räckvidd. Då det gäller målnivån är vägvisaren Norge där målet är att alla inrikesflyg ska vara eldrivna år 2040.</p> <p>Finland har på många sätt rätt förhållanden för elflyg. Finland är ett till ytan stort land med en liten befolkning och har bosättning, näringsliv och turism på alla områden. Detta leder till små passagerarströmmar och en del av dessa kan i framtiden transporteras med elflyg. Från transportsystemets perspektiv är elflyget mest konkurrenskraftigt i resor över 200 kilometer och på rutter där det inte finns tågtrafik eller där det finns geografiska hinder som till exempel vattendrag. Eldrivna flygplan kan användas i reguljär- eller taxifygtrafik samt i godstransporter av små volymer. Finland har ett omfattande nätverk av trafikflygplatser och andra flygplatser som utgör en plattform för eldriven luftfart. Detta förutsätter ändå investeringar i laddningsinfrastrukturen eller infrastrukturen för vätgasdistribution.</p> <p>De lägre operativa kostnaderna för eldrivna flygplan är en fördel, men en lönsam verksamhet förutsätter tillräcklig efterfrågan. I framtiden består efterfrågan på elflyg främst av industrins och turismens behov. Inom industrin går utvecklingen mot en koldioxidneutral produktion och logistik och elflyg kan erbjuda koldioxidneutral tillgänglighet. Inom turismen kan man använda elflyg som en utgångspunkt för att skapa hållbara turismkoncept. Reglering för elflyg som tar dess särdrag i beaktande håller på att utvecklas. I övrigt tillämpas regler gällande luftfartyg och flygverksamhet i allmänhet.</p> <p>Tidsfönstret är öppet för utveckling av elflyg. Nu är tiden inne för att främja ett digitalt och utsläppssnålt flygtrafiksystem i Finland. I utredningen föreslås som åtgärder närmare granskning av ekonomiska incitament och samhällseliga fördelar för elflyg samt konkret nationell och internationell FoUI-verksamhet och pilotprojekt för främjande av elflyg och relaterade resekedjor.</p>			
Kontaktperson Jari Pöntinen	Språk finska	Sekretessgrad offentlig	Sidoantal 124
Distribution		Förlag Transport- och kommunikationsverket Traficom	

Title of publication Electric aviation in Finland: prerequisites, possibilities and potential			
Author(s) Jorma Mäntynen, Riku Huhta ja Markus Pajarre, Destia Oy			
Commissioned by, date Finnish Transport and Communications Agency Traficom 15.3. 2022			
Publication series and number Traficom Research Reports 16/2022		ISSN (online) 2669-875 ISBN (online) 978-952-311-804-1 URN http://urn.fi/URN:ISBN: 978-952-311-804-1	
Keywords Electric aviation, electric aircraft, battery power, fuel cell power			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this report is to provide information for developing aviation in Finland and supporting related decision-making.</p> <p>The report maps the prerequisites, possibilities and development prospects of electric aviation in Finland up to 2040. The report provides information on the aircraft, technologies, infrastructure, regulation, market and application opportunities as part of the Finnish transport system. Electric air transport can be based on battery power, fuel cell power or hybrid technologies.</p> <p>In aviation, the electrification megatrend is relevant to short-range and low-capacity aircraft in particular. Alternative fuels, such as sustainable aviation fuels and hydrogen combustion, play a key role in reducing the emissions of long-range air transport. The development of electric cars and battery technologies are important drivers for the electrification of aviation, starting with small aircraft. As the energy density of batteries continues to increase, electricity will become a viable power source for larger aircraft as well. Meanwhile, fuel cells can be used to generate electricity from hydrogen, which is suitable for larger aircraft. Also under development are eVTOL (<i>electric vertical take-off and landing</i>) aircraft, which are suitable for transporting small numbers of passengers to airports via feeder lines, for example. The energy density of batteries will continue to grow and hydrogen will become increasingly common as a transportation fuel in the 2030s, making it possible to increase the size and range of the aircraft powered by them. When it comes to setting targets for electrification, Norway is leading the way, having set the goal of carrying out all domestic flights electrically by 2040.</p> <p>In Finland, the conditions for electric air transport are favourable in many respects. Finland covers a large area and has a small population, with settlements, business and tourism spread across the whole country. These factors result in small passenger flows, some of which can be handled with electric air transport services in the future. From the perspective of Finland's transport system, electric air transport is most competitive over distances of more than 200 km and routes for which there are no rail connections or that require crossing geographical obstacles, such as water bodies. Electric aircraft can be utilised for regular scheduled or taxi air services and low-volume goods transport services. Finland boasts an extensive network of airports and aerodromes that serve as a foundation for electric aviation. However, using this network for electric aviation will require investments in charging or hydrogen distribution infrastructure.</p> <p>The lower operating costs of electric aircraft are an advantage, but the profitability of operations hinges on sufficient demand. The future demand for electric aviation will be driven primarily by industrial and tourism needs. The industrial sector is developing towards carbon neutral production and logistics, and electric air transport can provide carbon neutral accessibility. In the tourism sector, electric air transport can serve as a basis for building sustainable travel concepts. Regulation that takes into account the special characteristics of electric air transport is still being developed. For now, electric air transport is subject to the same regulation as general aircraft and flight operations.</p> <p>The time window for the development of electric aviation is open. An opportunity to promote a digital and low-emission air transport system in Finland is right now. Regarding measures, the report proposes closer examination of financial incentives for and the social benefits of electric aviation as well as concrete national and international R&D&I activities and pilots for promoting electric aviation and related transport chains.</p>			
Contact person Jari Pöntinen	Language Finnish	Confidence status Public	Pages, total 124
Distributed by		Published by Finnish Transport and Communications Agency Traficom	

ALKUSANAT

Tämän selvityksen tavoitteena oli kartoittaa sähköisen lentämisen edellytykset, mahdollisuudet, vaatimukset ja kehitysnäkymät Suomessa. Selvitys kattaa niin kaluston, infrastruktuurin, tekniikan kuin palvelutkin.

Selvityksen toteuttivat Riku Huhta, Jorma Mäntynen ja Markus Pajarre Destia oy:stä. Selvityksen ohjausryhmässä toimivat Heidi Auvinen, Jukka Hannola, Jarno Ilme, Kirsti Laurila, Jari Pöntinen, Jukka Sironen ja Asta Tuominen Traficomista sekä projektiryhmässä Heidi Auvinen, Kirsti Laurila, Jari Lyytinen sekä Jari Nurmi Traficomista.

Helsingissä, 15. kesäkuuta 2022

Jari Pöntinen

Ilmailusta vastaava johtaja

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom

Sisällysluettelo

1	Tavoite, selvityksen rajaus ja menetelmät	8
1.1	Selvityksen tavoite.....	8
1.2	Selvityksen sisältö	8
1.3	Tarkastelualue.....	10
1.4	Käytetyt menetelmät.....	10
2	Sähköisen lentämisen kehitysnäkymät ja edellytykset	11
2.1	Sähköinen lentoliikenne EU-tason, pohjoismaisissa ja kansallisissa linjauksissa	11
2.1.1	EU-tason ohjaus	11
2.1.2	Nordic Sustainable Aviation -raportti	13
2.1.3	Suomen 12-vuotinen liikennejärjestelmäsuunnitelma	14
2.1.4	Fossiilittoman liikenteen tiekartta	15
2.1.5	Valtioneuvoston periaatepäätös lentoliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisestä	16
2.2	Lentoliikenteeseen kohdistuvia muutosvoimia	18
2.2.1	Poliittinen.....	18
2.2.2	Taloudellinen	19
2.2.3	Sosiaalinen.....	20
2.2.4	Teknologinen	21
2.2.5	Ekologinen	22
2.3	Sähkö osana lentoliikenteen uudistuvia käyttövoimia	23
2.3.1	Lentoliikenteen käyttövoimien esittely	23
2.3.2	Käyttövoimien kokonaishyötysuhteet.....	25
2.3.3	Käyttövoimien lennonaikaiset päästöt.....	26
2.3.4	Käyttövoimien koontitaulukko.....	27
2.4	Akkuteknologian kehitys ja reunaehdot	29
2.4.1	Akkujen energiatiheys	29
2.4.2	Akkujen hinta	30
2.4.3	Akkuteknologian tulevaisuus	30
2.4.4	Akkujen turvallisuus.....	31
2.4.5	Akkujen käyttöikä, eettisyys ja saatavuus	32
2.5	Sähköiset lentokoneet	32
2.5.1	Sähköisen lentämisen eri muodot.....	33
2.5.2	Sähkölentokoneiden kantaman ja kapasiteetin kehitysnäkymät	35
2.5.3	Potentiaalisia akkusähkölentokoneita Suomeen vuoteen 2030 mennessä	37
2.5.4	Sähköinen lentäminen talviolosuhteissa	39
2.6	Lentoliikenteen yleinen regulaatio	39
2.6.1	Kansainvälinen regulaatio ja kotimainen viranomaistoiminta.....	39
2.6.2	Lentopaikkoja koskeva regulaatio.....	40
2.6.3	Lentotoimintaan liittyvät vaatimukset	41
2.6.4	Siviili-ilmailun turvaamiseen liittyvät vaatimukset	43
2.6.5	Helikoptereita, drooneja ja VTOL-laitteita koskeva regulaatio.....	43
2.7	Sähköisen lentoliikenteen regulaatio	44
2.7.1	Sähköisen lentämisen regulaatio kehitysvaiheessa	44
2.7.2	Sähköisen ilma-aluksen tyyppihyväksyntä.....	45
2.7.3	Sähköisen ilma-aluksen liikennöinti	45
2.8	Sähköisen lentoliikenteen infrastruktuuri	46
2.8.1	Latausstandardit	47
2.8.2	Sähköverkko	47
2.8.3	Latauspuistot lentoasemilla	48

2.8.4	Latausinfran kustannukset	49
2.8.5	Akkujen latausominaisuudet	50
2.8.6	Hiilineutraalin sähkön tarjonta Suomessa	51
2.8.7	Sähkövarastot	51
2.9	Sähköisen lentämisen kustannukset	53
2.9.1	Lentoliikenteen kustannusrakenne	53
2.9.2	Sähköisen lentämisen vaikutukset lentämisen kustannuksiin	54
2.9.3	Sähköisen lentämisen kustannuslaskelmia FAIR-hankkeessa	57
2.9.4	Sähköisen lentämisen kustannuslaskelmia Linköpingin yliopistossa	58
2.9.5	Sähköisen lentämisen kustannuslaskelmia Saksassa	58
2.9.6	Lentoliikenteen yhteiskunnalliset hyödyt ja kustannukset	60
2.10	Kansainvälinen katsaus sähköiseen lentoliikenteeseen	62
2.10.1	Norja	62
2.10.2	Ruotsi	64
2.10.3	Muita maita	66
2.11	Sähköisen lentoliikenteen hankkeet Suomessa	67
3	Sähköinen lentoliikenne osana liikennejärjestelmää	70
3.1	Suomen liikennejärjestelmän tasot	70
3.2	Liikennemuotojen nopeus	71
3.3	Liikennemuotojen turvallisuus	72
3.4	Liikennemuotojen infrastruktuuri	72
3.5	Liikennemuotojen käyttövoimat ja lataus- ja jakeluinfrastruktuuri	74
3.6	Liikennemuotojen kapasiteetti	74
3.7	Liikennemuotojen kilpailukyky	76
4	Sähköisen lentämisen kehitys Suomessa vuoteen 2040	78
4.1	Sähköisen lentämisen kysynnän muodostuminen	80
4.1.1	Nykyinen lentämisen kysyntä	80
4.1.2	Lisääkö sähköinen lentäminen lentämisen kysyntää Suomessa?	83
4.2	Sähköisen lentämisen kehityksen arviointi	84
4.3	Sähköinen lentäminen vuoteen 2030	85
4.3.1	Kaupallisesti saatavilla oleva kalusto 2030	85
4.3.2	Kysyntäarvio 2030	86
4.3.3	Sähköisen lentoliikenteen toimintamallit ja markkinat 2030	88
4.3.4	Kaluston kapasiteetin näkökulmasta potentiaalisia käyttökohteita ...	91
4.3.5	Saavutettavuuden näkökulmasta potentiaalisia käyttökohteita	93
4.3.6	Matka-aikojen näkökulmasta potentiaalisia käyttökohteita	95
4.3.7	Investoinnit lentoasemainfrastruktuuriin 2030	97
4.4	Sähköinen lentäminen vuoteen 2040	97
4.4.1	Kaupallisesti saatavilla oleva kalusto 2040	97
4.4.2	Sähköisen lentoliikenteen toimintamalleja 2040	99
4.4.3	Kysyntäarvio 2040	103
4.4.4	Investoinnit lentoasemainfrastruktuuriin 2040	105
4.5	Sähköisen lentämisen mahdollisuudet Suomen sisäisessä lentorahdissa	105
5	Yhteenveto ja johtopäätökset	108
5.1	Sähköisen lentämisen vaikutuksia	108
5.2	Sähköisen lentoliikenteen edistäminen suomalaisessa toimijakentässä	109
5.3	Arvio tulosten tuomisesta osaksi liikennejärjestelmäanalyyysiä	111

5.3.1	Johtopäätökset sähköisestä lentämisestä ja liikennejärjestelmästä	111
5.3.2	Ehdotetut toimenpiteet	112

Lähteet	115
----------------------	------------

1 Tavoite, selvityksen rajausta ja menetelmät

1.1 Selvityksen tavoite

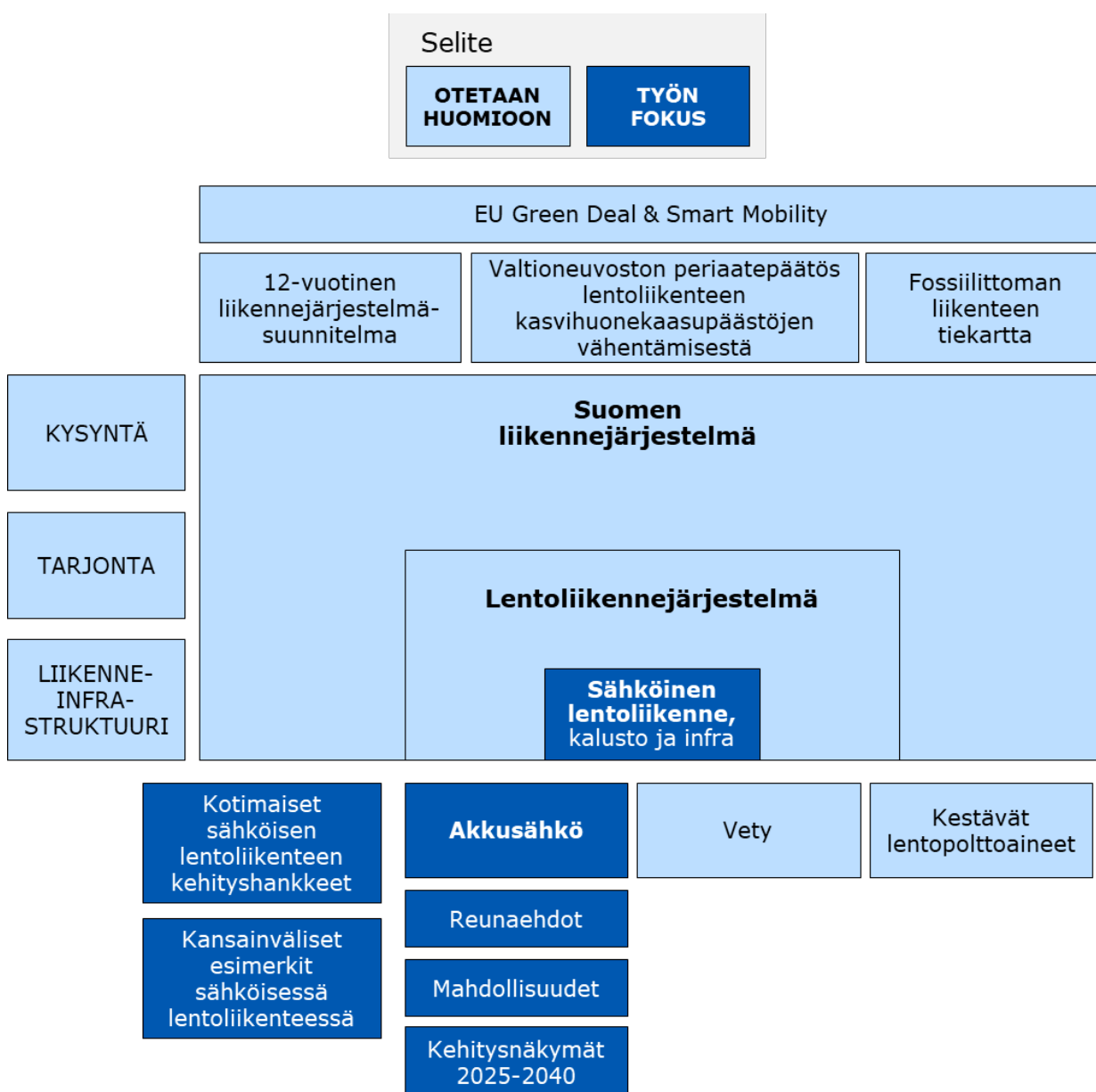
Selvityksen tavoitteena on tuottaa tietoa Suomen sähköisen lentoliikenteen kehittämiseksi ja päätöksenteon tueksi. Selvityksessä kartoitetaan sähköisen lentämisen edellytyksiä, mahdollisuuksia ja kehitysnäkymiä Suomessa. Työssä tarkastellaan sähköistä lentoliikennettä osana lentoliikennettä, mutta myös koko liikennejärjestelmän näkökulmasta. Työn tuloksena esitetään sähköisen lentoliikenteen mahdollinen kehityspolku Suomessa 2025–2040.

1.2 Selvityksen sisältö

Raportissa tarkastelu painottuu sähköiseen lentämiseen, joka on yksi lentoliikennejärjestelmän nopeasti kehittyvä osa-alue. Sähköisen lentämisen kehittämistä on tarkasteltu kansainvälisten ja kotimaisten lähteiden, hankkeiden ja esimerkkien avulla. Useilla lentoalan asiantuntijoiden haastatteluilla on kartoitettu sähköisen lentämisen edellytyksiä ja mahdollisuuksia tulevaisuuden lentoliikenteen osana. Sähköisen lentämisen energiateknologisia ja taloudellisia kysymyksiä on käsitelty laajan kansainvälisen aineiston perusteella.

Suomessa tapahtuvaa sähköisen lentämisen kysynnän ja tarjonnan tulevaisuutta on arvioitu tekijöiden asiantuntijatyönä. Erityisesti lentoliikenteen regulaation kuvaamisessa on käytetty Traficomın asiantuntijoilta saatua tietoa. Myös markkinoiden tulevaisuuden näkymiä on tarkasteltu vuorovaikutuksessa Traficomın kanssa. Tarkastelun taso on strateginen. Työssä luodaan ymmärrys sähköisen lentämisen kokonaisuudesta ja sen roolista osana lentoliikennettä ja liikennejärjestelmää. Työssä on nostettu esiin keskeisiä ratkottavia asioita sekä epävarmuustekijöitä.

Sähköinen lentäminen voi sisältää monenlaisia propulsiotekniikoita. Sähköinen lentokone on ilma-alus, joka toimii sähkömoottoreilla. Sähköinen ilma-alus voi perustua akkusähköön, polttokennoihin tai hybriditeknologiaan. Työn fokus on akkukäyttöisissä sähkölentokoneissa.



Kuva 1. Tutkimuksen tarkastelukehikko.

Sähköistä lentämistä tarkastellaan kuvan 1 mukaisesti. Luvut 2 ja 3 ovat työn teorialukuja ja luvut 4 ja 5 kerätyn tiedon soveltamista Suomeen. Luvussa 2 tarkastellaan lentoliikenteen kehitysnäkymiä ja edellytyksiä toimintaympäristön, teknologian, regulaation ja infrastruktuurin näkökulmista. Luvussa luodaan katsaus myös muualla Pohjoismaissa tapahtuvaan kehitykseen. Luvussa 3 tarkastellaan sähköistä lentämistä osana liikennejärjestelmää. Luvussa 4 käsitellään sähköisen lentämisen markkinakehitystä vuoteen 2040 mennessä. Luvussa 5 esitetään työn johtopäätökset sekä ehdotetaan toimenpiteitä.

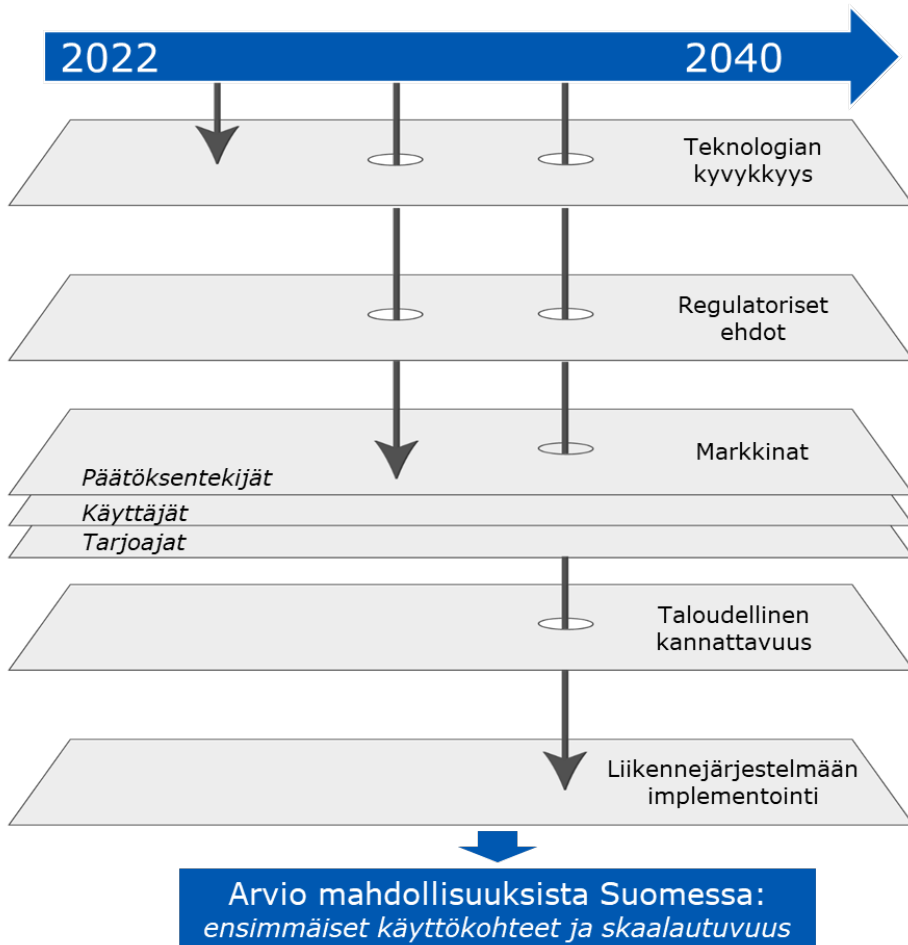
Tässä työssä pyritään selkeyden vuoksi käyttämään termiä "lentoasema" niistä EU-määritelmän mukaisista lentopaikoista, joilla on tällä hetkellä valmius kaupallisten matkustaja- tai rahtilentojen operointiin. Termillä "lentopaikka" tarkoitetaan niitä EU-määritelmän mukaisia lentopaikkoja, joilla tätä kaupallisten lentojen valmiutta ei nykyisellään ole. Tarkemmin lentopaikkojen ja -asemien regulaatiosta sekä mainitusta EU-määritelmästä on kerrottu alaluvussa 2.6.

1.3 Tarkastelualue

Työn maantieteellinen raja on Suomi ja sen sisäiset lennot, mutta se sisältää myös soveltuvia sähköisiä lentoja lähimaihin. Työssä tarkastellaan sekä nykyisiä lentoyhteyksiä että sähköisen lentämisen mahdollistamia uusia lentoyhteyksiä.

1.4 Käytetyt menetelmät

Työssä käytetään useita erilaisia tutkimusmenetelmiä. Luvut 2 ja 3 pohjautuvat erityisesti kirjallisuuskatsaukseen sekä toimija- ja asiantuntijahaastatteluihin. Luvut 4 ja 5 puolestaan pohjautuvat työryhmän omaan työhön ja analyysiin sekä hankittuun pohjatietoon eri asiantuntijoilta ja lähdeaineistoista.



Kuva 2. Selvityksen logiikka.

2 Sähköisen lentämisen kehitysnäkymät ja edellytykset

2.1 Sähköinen lentoliikenne EU-tason, pohjoismaisissa ja kansallisissa linjauksissa



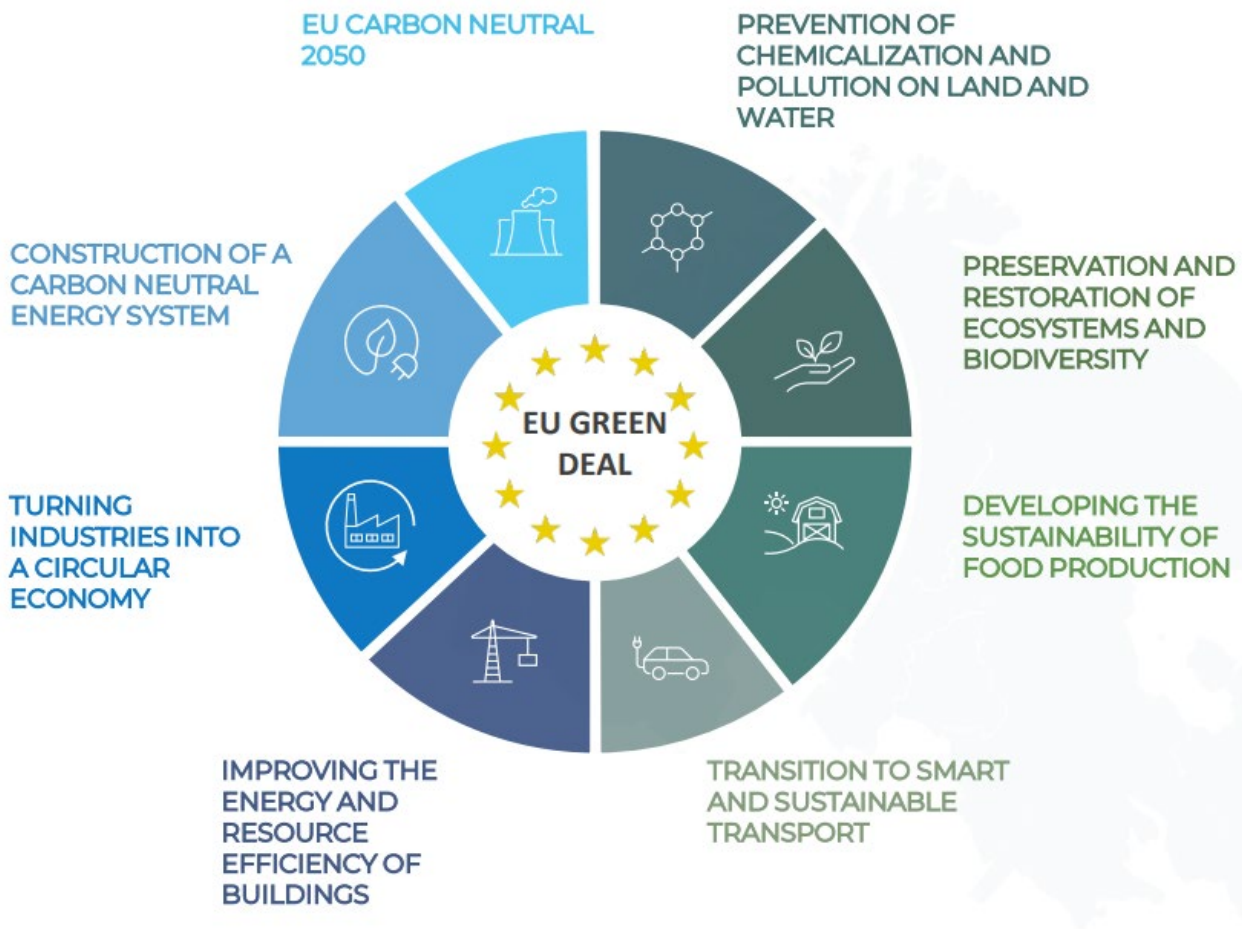
LUVUN KESKEINEN SISÄLTÖ

- **Lentoliikenteeseen** kohdistuu merkittäviä päästövähennystavoitteita muun liikennesektorin ohella.
- **Globaalilla** tasolla CORSIA-järjestelmä tavoittelee hiilineutraalia lentoliikenteen kasvua vuodesta 2020 eteenpäin.
- **Euroopan talousalueen** sisäisten lentojen päästöjä pyritään vähentämään EU:n lentoliikenteen päästökaupan avulla.
- **CORSIA:n ja EU:n lentoliikenteen päästökaupan** mahdollisesta yhteensovittamisesta päätetään EU:ssa vuoden 2023 loppuun mennessä.
- **EU:n vihreän siirtymän** kehityksen ohjelmassa lentoliikenteeseen kohdistuu monipuolisia ohjauskeinoja, jotka ohjaavat vähäpäästöisempään kalustoon ja kestäviin lentopolttoaineisiin.
- **Pohjoismaisen ministerineuvoston** suosituksena on kestävien lentopolttoaineiden käytön kasvattaminen lentoliikenteessä sekä sähköisen lentämisen hyödyntäminen aluksi lyhyillä reiteillä.
- **Suomessa** 12-vuotinen liikennejärjestelmäsuunnitelma, Fossiilittoman liikenteen tiekartta sekä Valtioneuvoston periaatepäätös lentoliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisestä käsittelevät lentoliikenteen merkitystä Suomelle sekä keinoja vähentää päästöjä.

2.1.1 EU-tason ohjaus

Lentoliikenne on yksi nopeimmin kasvavista kasvihuonekaasupäästöjen lähteistä EU-alueella. EU on ryhtynyt toimenpiteisiin, joilla vähennetään lentoliikenteen päästöjä Euroopassa ja on mukana kansainvälisten toimenpiteiden laatimisessa.

EU:n vihreän siirtymän kehityksen ohjelma tavoittelee Euroopasta ensimmäistä ilmastoneutraalia maanosaa. Se toimii EU:n kasvustrategiana vuosille 2021–2027. Ohjelma jakautuu kahdeksaan eri temaattiseen osaan, jotka on esitetty kuvassa 3. Valtaosa näistä koskee myös lentoliikennettä tavalla tai toisella.



Kuva 3. EU:n vihreän siirtymän 8 temaattista aluetta. (Rantala et al., 2021)

Kesällä 2021 komissio julkaisi ensimmäisen vihreän siirtymän toimenpidekokonaisuuden, joka sisältää seuraavat neljä pakettia:

1. 55-valmiuspaketti (eng. *Fit for 55*)
2. Kiertotalous -paketti
3. Biodiversiteetti ja myrkytön ympäristö -paketti
4. Kestävä ja älykäs liikkuminen -paketti

Näistä erityisesti 55-valmiuspaketti sekä Kestävän ja älykkään liikkumisen paketti tuovat mukanaan merkittäviä muutoksia lentoliikenteeseen.

55-valmiuspaketin lentoliikennettä koskevia nostoja (Euroopan Komissio, 2021a):

EU:n päästökauppajärjestelmän ("emissions trading system, ETS") revisio

- EU-alueen sisäiset lennot pysyvät järjestelmän piirissä
- Päästöoikeuksien määrää vähennetään ja lentoliikenteen ilmaiset päästöoikeudet ajetaan alas
- Meriliikenteen ja kansainvälisten Euroopan talousalueen (EEA) ja EU:n syrjäisten alueiden (OMRs) välisten lentojen sisällyttäminen järjestelmään
- Samaan aikaan päästökaupan rinnalla Komissio ehdottaa, että kansainvälisen lentoliikenteen hiilidioksidipäästöjen hyvitysjärjestelmää CORSIA:a sovelletaan lentoihin, jotka ovat EU:n päästökauppajärjestelmän ulkopuolella ja lähtevät tai saapuvat maihin, jotka soveltavat CORSIA:a

Uusiutuvaa energiaa koskevan direktiivin muutos

- 40 % energiasta uusiutuvaa energiaa vuonna 2030

Vaihtoehtoisten polttoaineiden jakeluinfrastruktuurin direktiivin tarkistaminen

- Puhdasta sähköä tulee olla saatavilla keskeisillä lentoasemilla

Energiaverodirektiivin tarkistaminen

- Verotuksen yhdenmukaistaminen energia- ja ilmastopolitiikan kanssa

ReFuelEU Aviation Initiative

- Vaatimuksia polttoaineenjakeilijoille kestävien lentopolttoaineiden (eng. SAF, *Sustainable Aviation Fuels*) jakelumäärien kasvattamiselle

Kestävän ja älykkään liikkumisen strategian nostoja lentoliikenteestä (Euroopan Komissio, 2022):

- 2030 mennessä alle 500 km:n aikataulutettujen joukkoliikennematkojen tulee olla hiilineutraaleja
- 2035 nollapäästöiset suuret matkustajakoneet ovat kypsiä markkinoille
- 2050 täysin toimintakykyinen multimodaalinen TEN-T-verkko kestäväälle ja älykkäälle liikenteelle ja nopeille yhteyksille
- Kestävyyden toimenpiteitä tavoitteiden toteuttamiseksi ovat mm. nollapäästöisten lentokoneiden käyttöönoton nopeuttaminen, nollapäästöisten lentoasemien kehittäminen, vihreän rahdin kehittäminen, hiilen hinnoittelu ja käyttäjille parempien kannustimien tarjoaminen
- Älykkyyden toimenpiteitä ovat yhdistetyn ja automatisoidun multimodaalisen liikkumisen mahdollistaminen mm. multimodaalisia lippujärjestelmiä kehittämällä ja kannustamalla innovaatioihin sekä datan ja tekoälyn hyödyntämiseen liikenteessä esim. miehittämättömän ilmailun mahdollistamiseksi.
- Resilienssiä koskevia toimenpiteitä ovat muun muassa koronan jälkeisen uudelleenrakennuksen investoinnit kaluston uusimiseen, tasapuolisen liikennejärjestelmän ja alueiden saavutettavuuden kehittäminen sekä liikenteen fyysinen ja digitaalinen turvallisuus.

2.1.2 *Nordic Sustainable Aviation -raportti*

Pohjoismaiden ministerineuvosto on teettänyt *Nordic Sustainable Aviation* -raportin lentoliikenteen kehittämisestä ympäristöystävällisemmäksi. Raportin tavoitteena on tutkia lentoliikenteen päästövähennyskeinoja pohjoismaisesta näkökulmasta, ja raportissa esitetään yhteispohjoismainen visio kestävästä lentoliikenteestä sekä tavoitteita kestävien lentopolttoaineiden käytön kasvattamiselle. (Ydersbond et al., 2020)

Raportissa arvioidaan, että 2020-luvun aikana merkittävin päästövähennys-potentiaali lentoliikenteessä liittyy kestävien lentopolttoaineiden käytön kasvattamiseen. Tämän edistämiseksi raportti suosittaa, että Pohjoismaissa otettaisiin käyttöön yhtenäinen lentovero (jollainen oli jo raportin kirjoitusaikaan käytössä Ruotsissa ja Norjassa) ja että luotaisiin yhteispohjoismainen SAF-rahasto, jolla voitaisiin kompensoida lentoyhtiöille kestävien lentopolttoaineiden käytöstä aiheutuvia lisäkuluja. Sähköisen lentämisen arvioidaan raportissa

soveltuvan ensi alkuun lyhyille, enintään 500 kilometrin lentoreiteille. Lisäksi raportissa arvioidaan, että sähköisten lentokoneiden käyttöönotto saattaa vaatia kannustimia julkiselta sektorilta muun muassa koneiden pienestä matkustajakapasiteetista johtuen. (Ydersbond et al., 2020, s. 16–20) Lentämisen kaupallinen kannattavuus on siten vahvasti riippuvainen lentojen täyttöasteesta.

2.1.3 Suomen 12-vuotinen liikennejärjestelmäsuunnitelma

Valtakunnallinen liikennejärjestelmäsuunnitelma vuosille 2021–2032 on valtionhallinnon laatima strateginen suunnitelma Suomen liikennejärjestelmän kehittämisestä. Se sisältää kuvauksen liikennejärjestelmän nykytilanteesta ja toimintaympäristön muutoksista, vision liikennejärjestelmän kehittämiselle vuoteen 2050 asti, suunnitelmalle asetetut tavoitteet ja niitä tarkentavat strategiset linjaukset sekä toimenpideohjelman tavoitteisiin pääsemiseksi valtiolle ja kunnille. Suunnitelma sisältää myös valtion rahoitusohjelman sekä tiivistelmän vaikutusten arvioinnista. (Valtioneuvosto, 2021a)

Suunnitelman kolme keskeistä tavoitetta ovat: (Valtioneuvosto, 2021a)

- Saavutettavuus: Liikennejärjestelmä takaa koko Suomen saavutettavuuden ja vastaa elinkeinojen, työssäkäynnin ja asumisen tarpeisiin.
- Kestävyys: Ihmisten mahdollisuudet valita kestävämpiä liikkumismuotoja paranevat – erityisesti kaupunkiseuduilla.
- Tehokkuus: Liikennejärjestelmän yhteiskuntataloudellinen tehokkuus paranee

Lentoliikenne suunnitelmassa: (Valtioneuvosto, 2021a)

Suunnitelmassa tunnistetaan, että lentoliikenteen merkitys kaikkien Suomen alueiden elinkeinoelämälle ja saavutettavuudelle on suuri. Kansainvälisessä henkilöliikenteessä lentoliikenne on Suomen kannalta tärkein kulkumuoto, johtuen Suomen sijainnista. Lentoliikenteen ja lentoasemien merkitys korostuu niin liike-elämän kuin matkailuelinkeinon näkökulmasta. Erityisesti pääkaupunkiseudun ja Lapin ulkopuolella lentoliikenteen kysyntään vaikuttaa aluekeskusten taloudellinen kehitys, koska liikematkustuksen osuus matkustajavirroista on huomattava.

Kaikkien lentoasemien merkitys kansainväliselle saavutettavuudelle tunnistetaan, riippumatta niiden etäisyydestä Helsinki-Vantaan lentoasemalle. Lentoliikenteen avulla syntyvä saavutettavuus mahdollistaa sekä suomalaisten yritysten läsnäolon kansainvälisillä markkinoilla, että ulkomaisten yritysten sijoittumisen Suomeen. Lentoliikenteessä käyttäjä maksaa -periaate on laajasti käytössä. Tosin suunnitelmassa arvioidaan, että tulevaisuudessakin valtion kenttien ylläpito- ja investointikulut katetaan lähinnä Helsinki-Vantaalta saaduista tuloista.

Ilmailualalla on käynnissä laajamittainen teknologinen murros, josta sähköinen lentäminen on vain pieni osa. Murros vaikuttaa myös pienilmailuun ja miehittämättömään ilmailuun, ja sen tarjoamia mahdollisuuksia on arvioitava laajasti niin valtakunnallisen liikennejärjestelmän kuin liikenteen päästöjen vähentämisen näkökulmasta. Aihetta käsiteltiin digi-ilmailun työryhmässä vuonna 2020 ja raportin tuloksia hyödynnetään myös tässä työssä.

Suunnitelman toimenpiteitä: (Valtioneuvosto, 2021a)

12-vuotisessa liikennejärjestelmäsuunnitelmassa on esitetty useita lentoliikenteen kehittämisen toimenpiteitä. Sähköisen lentämisen lyhyen aikavälin potentiaalin kannalta merkittävimmät toimenpiteet on korostettu *kursiivilla*.

Helsinki-Vantaan lentoaseman toimintaa kehitetään valtion, kuntien ja yritysten yhteistyöllä. Helsinki-Vantaan lentoaseman kehittymisedellytyksien ylläpito

mahdollistaa toiminnan muillakin lentoasemilla, kun lentoasematoimintaa voidaan jatkaa verkostoperiaatteella; valtio vaikuttaa tähän EU-tasolla.

Valtio arvioi ja seuraa lentoliikenteen kehitysnäkymiä Suomessa. Valtio myös seuraa lentoliikenteen tai sen puutteen vaikutuksia alueiden saavutettavuuteen mm. koronatilanteen vaikutukset huomioon ottaen. Seuranta tehdään yhteistyössä muiden toimijoiden, kuten kuntien kanssa.

Valtio pyrkii huolehtimaan *kolmen tunnin saavutettavuustavoitteen toteutumisesta niillä alueilla, joilla tavoite ei täyty raideliikenteen keinoin. Valtio sitoutuu tarpeen mukaan turvaamaan lentoliikennettä erillispäätöksin*. Matkaketjuja lentoasemille kehitetään koko Suomessa.

Lentopaikkojen tuen kohdentamisessa *painotetaan reittiliikenteen edellytysten parantamista, mikä vastaa elinkeinoelämän tarpeisiin*. Tavoitteena on erityisesti lentopaikkojen toiminnan kehittäminen sekä kannattavuuden edellytysten parantaminen. Toissijaisesti tuetaan muun ilmailun liiketoiminnan ja muiden toimintojen kehitystä.

Lentoasemien ja lentopaikkojen toimintaedellytyksiä kehitettäessä otetaan huomioon myös huoltovarmuuden, varautumisen ja valmiuden sekä poikkeusolojen ylläpidolliset tarpeet. Finavian lentoasemien ylläpidossa otetaan huomioon myös sairaanhoidon tarpeet.

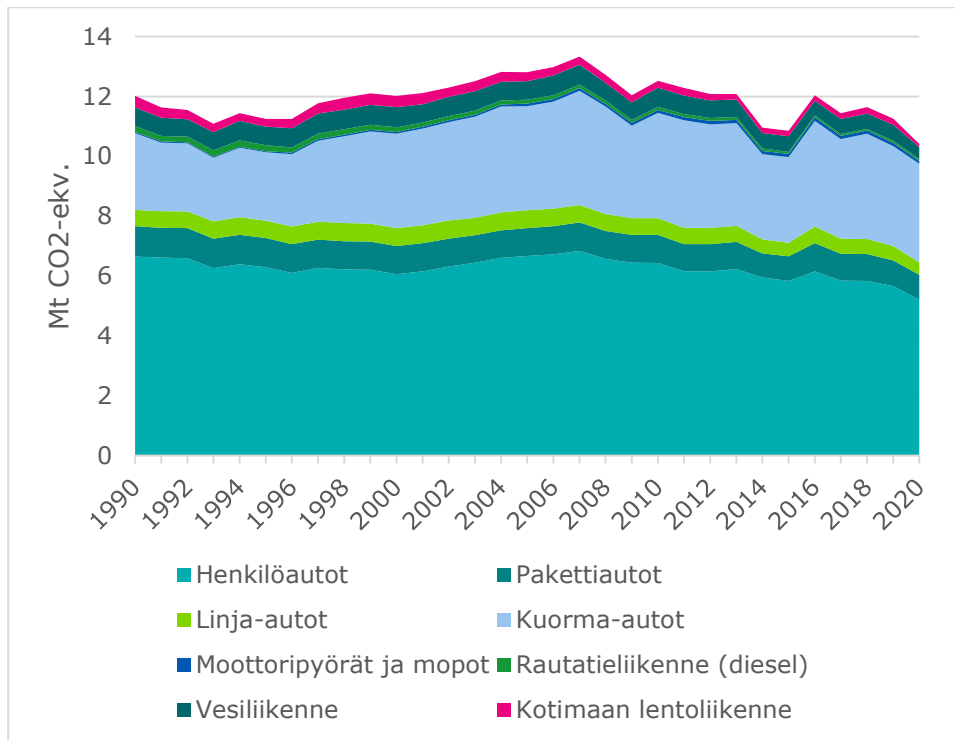
2.1.4 Fossiilittoman liikenteen tiekartta

Hallitusohjelman mukaan Suomi on hiilineutraali vuonna 2035. Fossiilittoman liikenteen tiekartassa todetaan, että "liikenteen päästövähennystavoitteiden tulee vastata tähän tavoitteeseen" ja että "Suomi vähintään puolittaa kotimaan liikenteen päästöt vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoden 2005 tasoon". Tavoitteena on, että vuoteen 2045 mennessä liikenne voisi toimia kokonaan fossiilittomasti. Ensisijaisesti fossiilittoman liikenteen tiekartan tavoitteet ja toimet kohdentuvat tieliikenteeseen, koska tieliikenne tuottaa suurimman osan liikenteen päästöistä ja siten tieliikenteessä päästövähennyspotentiaali on suurin. (Valtioneuvosto, 2021b)

Tiekartta pitää sisällään kolme eri vaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa toteutetaan erilaisia tukia ja kannustimia liikenteen päästöjen vähentämiseksi. Toisessa vaiheessa kesällä 2021 on selvitetty eräitä lisäkeinoja tai kehitystrendejä, joiden on arvioitu vaikuttavan liikenteen päästöihin, mutta joiden vaikutuksista ei vielä toukokuussa 2022 ollut riittävästi tietoa. Näitä keinoja tai kehitystrendejä ovat etätyön lisääntyminen, yhdistettyjen kuljetusten edistäminen tavaraliikenteessä ja liikenteen palveluiden edistäminen. On myös selvitetty sitä, onko biopolttoaineiden jakeluvaikeutta mahdollista nostaa nykyisestä 30 prosentista 34 tai jopa 40 prosenttiin ja onko kestävästi tuotettuja raaka-aineita riittävästi saatavilla. Tiekartan kolmas vaihe käynnistyy, kun kaikkien edellä kuvattujen toimenpiteiden, kehitystrendien ja EU-aloitteiden päästövähennysvaikutukset on arvioitu. Kolmannessa vaiheessa hallitus arvioi ja päättää mahdollisesta kansallisten lisätoimien tarpeesta liikenteelle. (Valtioneuvosto, 2021b)

Lentoliikenne tiekartassa

Kotimaan lentoliikenteen osuus Suomen liikenteen päästöistä oli noin 2 prosenttia vuonna 2019 ja 1 prosentin vuonna 2020 koronapandemiasta johtuen. Lentoliikenteen päästöjä ei lasketa osaksi ns. taakanjakosektorin päästöjä, johon kuuluvat liikenteestä kotimaan tie-, vesi- ja raideliikenne. (Valtioneuvosto, 2021b)



Kuva 4. Suomen kotimaan liikenteen hiilidioksidipäästöt 1990–2020. (LIPASTO & Tilastokeskus, 2021)

2.1.5 Valtioneuvoston periaatepäätös lentoliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisestä

Valtioneuvoston periaatepäätös lentoliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisestä sisältää kuvauksen Suomen kotimaisen ja kansainvälisen lentoliikenteen nykytilasta ja ennustetusta kehityksestä. EU:lla ei ole erillistä lentoliikenteen päästövähennystavoitetta, mutta lentoliikenne kuuluu toistaiseksi ainoana liikennemuotona päästökaupan piiriin ja on siten osa päästökauppa-sektorin päästövähennystavoitetta. Käytännössä tavoitteena on 43 %:n päästövähennys vuoden 2005 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Myös kansainvälisellä siviili-ilmailujärjestö ICAO:lla on päästövähennystavoitteita, joihin Suomikin on sitoutunut. (Valtioneuvosto, 2021c)

Suomen sisäisen lentoliikenteen päästöt olivat vuonna 2018 alle kaksi prosenttia liikenteen kokonaispäästöistä. Vuosien 2005–2019 välillä päästöjen määrä on vähentynyt 33 prosenttia, eikä kotimaan lentoliikenteen päästöjen ”myöskään odoteta juuri kasvavan tulevaisuudessa, koska liikennesuoritteen ennustetaan pysyvän suunnilleen nykyisellä tasolla”. (Valtioneuvosto, 2021c)

Sähköinen lentäminen voisi nimenomaisesti mahdollistaa lentotarjonnan kasvattamisen monilla reiteillä ilman päästöjen kasvua. Mikäli sähkölentokone korvaa reitillä jo lentävän polttomoottorikäyttöisen lentokoneen, päästöt kyseisellä reitillä luonnollisesti vähenisivät.

Suomesta lähtevän kansainvälisen lentoliikenteen määrä ja samalla myös päästöt ovat sen sijaan kasvaneet vuoteen 2019 asti merkittävästi. Tuolloin Suomen kansainvälisen lentoliikenteen päästöt olivat lähes 13-kertaiset kotimaan lentoliikenteen päästöihin verrattuna. Fossiilittoman liikenteen tiekarttatyössä on arvioitu Suomen kotimaan ja lähtevän kansainvälisen liikenteen lentojen lukumäärän kasvavan 15–20 prosenttia ja päästöjen 20–25 prosenttia vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoden 2018 tasoon, jos uusia päästövähennyskeinoja ei oteta käyttöön. Vuoteen 2045 mennessä lentojen määrän kasvuprosentin ennustetaan tästä vielä kaksinkertaistuvan 30–40 prosenttiin, mutta päästöjen

arvioidaan kasvavan suhteessa hieman vähemmän eli 25–40 prosenttia verrattuna vuoden 2018 tasoon, muun muassa teknologisen kehityksen ansiosta. Koronapandemian odotetaan olevan ohi menevä markkinahäiriö. Lentoliikenteen ja samalla lentämisen kokonaispäästöjen määrän voimakkaimman kasvuvaiheen ennakoitaan Suomessa olevan kuitenkin jo ohi. (Valtioneuvosto, 2021c)

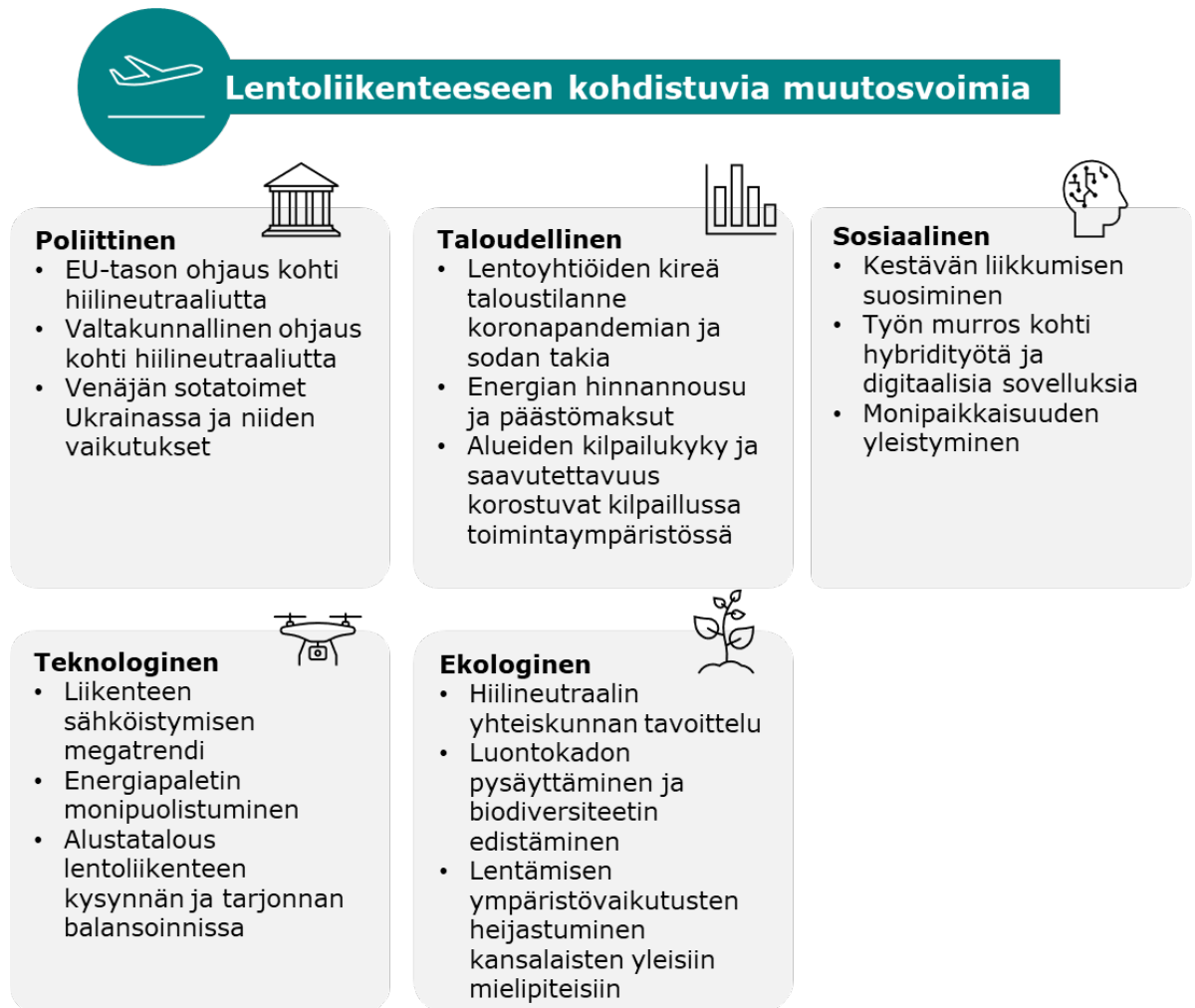
Lentoliikenteessä vaihtoehtoisten käyttövoimien puute korostaa uusiutuvien lentopolttoaineiden käyttöönoton tärkeyttä nopeiden päästövähennysten mahdollistamiseksi. Sähkölentämisen merkittävänä haasteena on toistaiseksi akkujen energiatihedyyden riittämättömyydestä johtuva sähköistymisen hitaus. Tämän hetken arvioiden mukaan nestemäisiä lentopolttoaineita käytetään laajamittaisesti vielä ainakin 30 vuoden ajan, joten ”päästöjen vähentämiseksi on välttämätöntä pyrkiä korvaamaan fossiilisen kerosiinin käyttöä uusiutuville lentopolttoaineilla mahdollisimman nopeasti”. Uusiutuvan sähkön avulla valmistettavien sähköpolttoaineiden kehitystä ja tuotantoa tulisi edistää, sillä erityisesti kaukolentojen päästöjä on vaikea vähentää tehokkaasti ilman sähköpolttoaineita. (Valtioneuvosto, 2021c)

Periaatepäätöksessä tunnistetaan tavoitteet ja toimenpiteet lentoliikenteen kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi. Ne on jaettu kolmeen osa-alueeseen: (1) Vaihtoehtoisten käyttövoimien edistäminen, (2) Liikennejärjestelmän ja liikennevälineiden energiatehokkuuden edistäminen, ja (3) Hinnoittelu. Tässä kontekstissa erityisesti 1. osa-alue liittyy olennaisesti sähköiseen lentoliikenteeseen. (Valtioneuvosto, 2021c)

Osa-alueen 1 toimenpiteitä ovat muun muassa:

- *”Uusiutuvien lentopolttoaineiden jakeluvuorituksen tai siihen rinnastuvan kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisvelvoitteen taso, vaikutukset toimialaan ja kansainvälinen kehitys arvioidaan hallitusohjelman toimeenpanoa koskevan lainsäädäntöprosessin yhteydessä.”*
- *”Suomi kannattaa uusiutuvien lentopolttoaineiden käyttöä edistävien kunnianhimoisten toimenpiteiden, kuten vähimmäistason asettavan jakeluvuorituksen, käyttöönottoa EU:ssa.”*
- *”Edistetään tutkimus- ja innovaatorahoituksella kestäviin uusiutuviin lentopolttoaineisiin ja erityisesti sähköpolttoaineisiin liittyvää teknologiaa ja tuotantoa Suomessa.”*
- *”Suomi tukee aktiivisesti ICAO:n ja EASA:n (European Union Aviation Safety Agency) pyrkimyksiä luoda standardointipohja täyssähkö- ja hybridi-lentokoneille ja niiden vaihtoehtoisille käyttövoimaratkaisuille.”*
(Valtioneuvosto, 2021c)

2.2 Lentoliikenteeseen kohdistuvia muutosvoimia



Kuva 5. Lentoliikenteeseen kohdistuvia muutosvoimia Suomessa.

2.2.1 Poliittinen

EU-tason ohjaus kohti hiilineutraaliutta. Euroopan komission käynnistämä vihreän kehityksen ohjelma eli Green Deal on laaja ja kunnianhimoinen toimenpidepaketti. Sen avulla EU tähtää siihen, että Eurooppa olisi ilmastoneutraali vuoteen 2050 mennessä – ensimmäisenä maanosana. Tavoitteena on vähentää huomattavasti päästöjä, investoida huippututkimukseen ja innovaatioihin sekä säilyttää Euroopan luonnonympäristö.

Vihreän kehityksen ohjelman tarkoituksena on koko EU:n talouden muuttaminen kestäväksi tulevaisuuden kannalta siten, että siirtyminen vihreään talouteen hyödyttää sekä kansalaisia että yrityksiä. Laajaan kokonaisuuteen liittyy niin maataloutta, energia-asioita, liikennettä, rahoituskysymyksiä, teollisuutta kuin EU:n ulkosuhteitakin. (Ulkoministerön Eurooppatiedotus, 2020)

Valtakunnallinen ohjaus kohti hiilineutraaliutta. Myös kotimainen poliittinen ohjaus, kuten edellä kuvatut *Valtioneuvoston periaatepäätös lentoliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisestä* sekä *Fossiilittoman liikenteen tiekartta* vaikuttavat suoraan ja epäsuorasti lentoliikenteeseen. Ylätason tavoitteena valtakunnallisessa ohjauksessa on lentoliikenteen aiheuttamien päästöjen vähentäminen, missä sähköisen lentämisen odotetaan auttavan. Pääpaino ohjauksessa on kuitenkin uusiutuviissa lentopolttoaineissa ja esimerkiksi niiden

sekoite- ja jakeluvaihteen käyttöönotossa kuluvan vuosikymmenen aikana. Sähköiselle lentämiselle ei ole asetettu erityisiä tavoitteita.

Euroopan turvallisuustilanteen muutoksen vaikutukset. Sotatoimien lisääntyminen on muuttanut Euroopan geopolitiikkaa ja geokonomista asemaa pitkäksi aikaa. Sotatoimet Itä-Euroopassa ovat johtaneet länsimaiden pakotteisiin, minkä johdosta Venäjän ilmatila on suljettu toistaiseksi läntisiltä lentoyhtiöiltä. Tämä osuu monien läntisten lentoyhtiöiden toimintaan. Erityisen suuri isku ilmatilan sulkeminen on Finnairille. Sen Aasian strategian ydin on ollut lentää Pohjois-Euroopan ja Pohjois-Aasian välisiä lentoja Helsinki-Vantaan kautta lyhintä reittiä Venäjän ilmatilaa käyttäen. Nyt Finnairin kilpailuetu on kaventunut ja muutamia tarjottavia Aasian lentoja joudutaan lentämään pidempiä reittejä joko Venäjän pohjois- tai eteläpuolitse. Se lisää lentojen matka-aikaa, ja polttoaineenkulutusta vähentäen lentojen kannattavuutta. Eteläisemmät reitit Euroopasta Aasiaan saavat kilpailuetua, samoin Lähi-idässä sijaitsevat lentoliikenteen solmukohdat.

2.2.2 Taloudellinen

Lentoyhtiöiden kireä taloustilanne koronapandemian ja sodan takia. Kaupallinen lentoliikenne joutui historiansa syvimpään kriisiin keväällä 2020 alkaneen koronapandemian takia. Jopa 90 % lentokoneista oli maassa pandemian alkuaikoina. Lähes 70 lentoyhtiötä on joutunut konkurssimenettelyyn tai lopettanut toimintansa (Cirium, 2021). Merkittävä osa Euroopan ja Pohjois-Amerikan lentoyhtiöistä on saanut valtioilta taloudellista tukea eri muodoissa. Osa lentoyhtiöistä on joutunut selviämään omillaan. Pandemian jälkeen sekä kysyntä että tarjonta muuttuvat, ja myös niiden välinen suhde hakee uuden tasapainotilan markkinoilla. Bisnesmatkoista osa korvautuu etäyhteyksillä, kun yritykset ovat tottuneet uuteen työskentelytapaan ja haluavat säästää matkakuluja ja aikaa. Vapaa-ajan matkat tuovat lentoliikenteelle suuremman volyymin, mutta ovat erittäin kilpailtuja ja matalakatteisempia kuin bisnesmatkat. Matkatyyppien jakauman muutos ja kiristynyt kilpailutilanne lentoyhtiöiden välillä tulee vaikeuttamaan erityisesti verkostolentoyhtiöiden taloudellista tilannetta. Euroopan sisäinen markkina on Finnairille auki, mutta kilpailu on kireää ja varsinkin ns. halpalentoyhtiöt valtaavat Euroopan sisäisiä lentomarkkinoita. Transatlanttinen yhteys Euroopan ja Pohjois-Amerikan välillä on sekin vahvasti kilpailtua, mutta Finnair on jo lisännyt tarjontaansa Amerikkaan.

Energian hinnannousu ja päästömaksut. Euroopan unionissa sovelletaan lentoliikenteeseen päästökauppaa. Useissa maissa, kuten Ruotsissa ja Norjassa, on myös käytössä lentovero, jolla toivotaan olevan vaikutusta käyttäjien valintapäätöksiin. Ympäristöohjausta sovelletaan esim. Ranskassa niin, että lyhyet lentomatkat ovat kiellettyjä, mikäli vastaava junayhteys on olemassa. Fossiilisen energian hinnannousu on ollut nähtävissä jo ennen sotatoimien lisääntymistä, mutta sen jälkeen hinnat ovat kohonneet voimakkaasti. Raakaöljyn hinnan ennustetaan nousevan korkealle tasolle. Pörssisähkön hinnanvaihtelut ovat olleet voimakkaita. Kaiken kaikkiaan Euroopan tulevaisuutta leimaa korkean energian hinnan kausi, uusiutuvien polttoaineiden kehitystyö sekä sähköisen liikenteen voimakas kasvu.

Alueiden kilpailukyky ja saavutettavuus. Kansainvälisessä toimintaympäristössä Suomen talousalueiden täytyy olla kilpailukykyisiä. Työvoiman saatavuus ja saavutettavuus ovat Keskuskauppakamarin kyselytutkimuksissa olleet useina vuosina tärkeimmät yritysten sijoittumiseen vaikuttavat tekijät. Nykyisten yritysten pysyminen Suomessa edellyttää näiden tekijöiden toteutumista. Uusien yritysten houkuttelemisessa kilpaillaan muiden Pohjoismaiden kanssa. Esimerkiksi eteläinen Skandinavia on erittäin hyvin saavutettavissa Manner-Euroopasta katsoen sekä maa- että lentoyhteyksin. Erityisesti teknologiateollisuuden yrityksiä sijaitsee eri puolilla Suomea ja ne toimivat kansainvälisillä vientimarkkinoilla. Vihreän siirtymän synnyttämät

työpaikat akkuklusterin, biotuoteteollisuuden ja uusiutuvan energian ympärillä kiristävät kansainvälistä kilpailua osaavasta työvoimasta. Saavutettavuus ja hyvät työolot korostuvat tulevaisuudessa entisestään.

Pitkien etäisyyksien Suomessa lentoliikenne on nopea liityntäyhteys suuremmille lentoasemille ja tärkeä osa matkaketjua. Pohjoisen ja itäisen Suomen alueilla matkailu on tärkeä elinkeino ja se edellyttää hyvää saavutettavuutta. Kansainvälisten matkailijoiden aikabudjetti on tiukka, jolloin nopea pääsy matkakohteeseen on keskeinen valintakriteeri. Jos jokin matkailukohde ei ole nopeasti saavutettavissa, kohde valitaan jostakin muusta maasta ja Suomi menettää matkailutulot.

Resurssitehokkuus - olemassa olevan infrastruktuurin tehokas hyödyntäminen. Suomen talouden ja kestäväen kehityksen kannalta on ensisijaista käyttää nykyistä infrastruktuuria mahdollisimman tehokkaasti. Investoinnit uuteen infraan tulevat vasta sen jälkeen. Suomessa on maan hyvin kattava lentoasemien verkosto. Finavian lentoasemien kiitoteiden yhteismäärä on noin 60 km, kun taas Väyläviraston hallinnoiman tieverkon pituus on noin 80 000 km, rataverkon noin 6 000 km, sisävesiväylien noin 8 000 km ja meriväylien noin 8 000 km. Väyläviraston hallinnassa on siis yhteispituudeltaan noin 100 000 km:n infrastruktuuri. Finavian lentoasemien lisäksi on muutamia muulla omistuspohjalla toimivia lentoasemia sekä useita kymmeniä valvomattomia lentopaikkoja.

2.2.3 Sosiaalinen

Kestäväen liikkumisen suosiminen. Suomi on eturivin maita Euroopan unionissa edistämässä kestäväen kehityksen ja hiilineutraaliuden tavoitteita. Liikenne merkittävänä energiankäyttäjänä on uudistumassa nopeasti kestäväen suuntaan. Mielikuva lentoliikenteestä ei ole ollut erityisen suotuisa, vaikka lentoliikenteen osuus päästöistä on varsin pieni. Sähköinen lentoliikenne tarjoaa mahdollisuuden vähentää merkittävästi operationaalisia päästöjä sekä lentoliikenteen mainetta alueellisilla lyhyen kantaman lennoilla seuraavan vuosikymmenen aikana. Tällöin lentoliikenteen nopeuden merkitys kasvaa ja ihmiset voivat alkaa vähitellen käyttää lentoliikennettä Suomen sisäisiin matkoihin nykyistä enemmän. Suomeen ei ole muodostunut lentämisen kulttuuria, kuten vaikka Yhdysvalloissa. Kun lentämisestä tulee paitsi nopea myös hiilineutraali liikennemuoto, tilanne voi muuttua lentoliikenteelle suotuisammaksi.

Työn murros kohti hybridityötä ja digitaalisia sovelluksia. Suomi on tavoitellut jo pitkään ns. digiloikkaa. Digitaalisten sovellusten käyttöön otolla on pyritty yhteiskunnan ja ihmisten arkipäivän toimintojen tehostumiseen ja helppouteen. Vasta keväällä 2020 koronapandemian yllättäessä digitaalisuuden käyttö yleistyi nopeasti ja laajasti aiheuttaen työn murroksen. Parin vuoden ajan jatkunut tilanne on ollut omiaan vakiinnuttamaan etätöiden ja digitaalisten sovellusten käyttöä pysyvästi. Todennäköinen tuleva työn malli onkin ns. hybridityö, jossa osa työstä tehdään etänä ja osa läsnä yhdistäen näiden työmuotojen parhaat puolet. Tähän tulokseen on päätynyt mm. Työterveyslaitoksen työryhmä keväällä 2021. Säännöllisten työmatkojen määrä tulee vähenemään, mutta ei poistumaan. Tämä näkyy varsinkin joukkoliikenteessä, joka on joutunut vähentämään tarjontaansa merkittävästi. Vapaa-ajan matkojen kysyntä osaltaan kompensoi työmatkojen vähenemistä varsinkin rautateillä. Pitkän matkan bussiliikenne on ollut vaikeuksissa kysynnän vähentyessä ja maaseudun linjastoa on karsittu. Kotimaan lentoliikenteelle ovat olleet tyypillisiä ohuet matkustajavirrat muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Kuitenkin eri alueilla sijaitsevien toimintojen kannalta lentoyhteydet ovat tärkeitä. Kun työn murroksen takia matkamäärät hieman vähenevät, on perusteltua käyttää useilla lentoyhteyksillä nykyistä pienempää kalustoa. Tähän tarpeeseen sähkölentokoneet voivat vastata.

Monipaikkaisuuden yleistyminen. Työn ja vapaa-ajan rajan hämärtyminen on johtanut siihen, että työtä on alettu tehdä yhä enemmän vapaa-ajan asunnoissa. Perinteisesti vapaa-ajan asunnolla on oleskeltu vain loma-aikoina. Monipaikkaisuus on yleistynyt ilmiö, joka vaikuttaa matkojen määrään ja suuntautumiseen. Asuntoja voi olla useita, niissä viivytään pitkään ja niiden välillä sukkuloidaan harvakseltaan. Matkat voivat olla pitkiä, mutta matkojen frekvenssi ei välttämättä ole suuri. Verrantona on säännöllinen työmatkaliikenne, joka voi olla lyhytmatkaista tai pitkämatkaista usein toistuvaa pendelöintiä. Monipaikkaisuuden myötä ihmisille tulee tarve siirtyä eri puolille Suomea ja matkat voivat olla hyvinkin pitkiä. Sähköinen lentoliikenne on yksi mahdollinen ratkaisu pitkien matkojen tekemiseen lyhyessä ajassa.

2.2.4 Teknologinen

Liikenteen sähköistyminen. Sähköistyminen on megatrendi, joka ilmenee laajasti yhteiskunnan toiminnoissa. Liikenteen sähköistyminen on lähtenyt liikkeelle junista ja kaupunkiliikenteen busseista ja on etenemässä henkilöautoihin ja vähitellen myös raskaampaan tieliikenteen kalustoon. Lentoliikenteen sähköistymistä pidettiin aiemmin epärealistisena, mutta viime vuosina kehitys on lähtenyt vauhtiin ja ollut jopa odotettua nopeampaa. Sähkölentokoneita ja muita sähköisiä ilma-aluksia on jo valmistettu ja tuotekehitystä tehdään intensiivisesti. Ruotsalainen Heart Aerospace on esimerkki yrityksestä, joka kehittää 19-paikkaista ES-19-sähkölentokonetta. Sen odotetaan olevan kaupallisessa käytössä 2020-luvun jälkipuoliskolla. Monet maailman lentoyhtiöistä ovat osoittaneet suurta kiinnostusta konetyyppejä kohtaan ja tehneet aiesopimuksia valmistajan kanssa. Akkuteknologian ja lentokoneiden materiaalitekniikan kehitys ovat keskeisiä ajureita sähkölentokoneen tulolle.

Energiapaletin monipuolistuminen. Liikenteen energia on tähän asti perustunut valtaosin nestemäisiin polttoaineisiin. Syynä tähän on, että ne ovat erittäin tehokkaita energian kantajia, eli pieneen tilavuuteen mahtuu suuri määrä energiaa. Suihkumoottori- ja potkuriturbiinikoneissa lentopetroli ja mäntämoottorikoneissa lentobensiini ovat olleet vallitsevat polttoaineet. Perinteinen akku on ollut raskas ja nestemäiseen polttoaineeseen nähden melko heikko energian kantaja. Akkuteknologian kehitys tulee kuitenkin keventämään akkuja ja lisäämään niiden energiatihelyttä. Kehitteillä on myös lentokoneita, jotka voisivat hyödyntää vetyä nestemäisessä muodossaan. Fossiilisia nestemäisiä polttoaineita pyritään korvaamaan biopohjaisilla tai synteettisillä polttoaineilla. Biokomponenttien tulo markkinoille laajentaa uusiutuvien lentopolttoaineiden palettia, mutta niiden riittävyys on rajallinen. Vedyn potentiaaliin vaikuttavat pitkälti uusiutuvan energian investoinnit. Seuraavassa luvussa käsitellään lentoliikenteen energiaratkaisuja syvällisemmin.

Miehittämätön ilmailu on voimakkaasti kasvava ilmailun osa-alue. Miehittämättömien ilma-alusten ja erityisesti multikopterien (drooni, drone) käyttö on lisääntynyt huomattavasti viimeisten kymmenen vuoden aikana. On arvioitu, että miehittämätön ilmailu tulee olemaan tulevien vuosien suurimpia kasvualoja Euroopassa ja maailmalla. Pienempien ilma-aluksien hyödyntämistä testataan laajasti eri toimialoilla muun muassa tunnistus-, valvonta- ja kartoitustehtävissä. Suurempia ilma-aluksia voitaisiin hyödyntää logistiikan tehostamisessa ja uusissa multimodaaleissa palveluissa, kuten niin sanotussa *first & last mile* -toiminnassa. Nämä ilma-alukset voivat olla joko kiinteäsiipistä tai vertikaalisesti eli pystysuoraan nousevaa ja laskeutuvaa kalustoa.

Alustatalous lentoliikenteen kysynnän ja tarjonnan balansoinnissa. Perinteinen reittiliikenne on aikatauluihin sidottua ja vain muutamilla Suomen kaupunkien välisillä reiteillä on vahvat matkustajavirrat. Tarjonnan järjestäminen ohuemmille, mutta tärkeille matkustajavirroille on lentoyhtiön kannalta kannattavuuskysymys. Riittävä vuorotarjonta pitää palvelutasoa yllä, mutta matkustajia ei välttämättä riitä koneen täyttöasteen saamiseksi kannattavalle

tasolle. Uuden ajan ratkaisuna voi joillakin yhteysväleillä olla digitaalinen kysyntätiedon kerääminen, johon tarjotaan sopivan kokoista kalustoa sopivaan aikaan. Sähköinen lentokone on kohtuullisen pienen kapasiteettinsa takia sopiva juuri ohuemmille matkustajavirroille. Digitaalisen alustan avulla voidaan kerätä riittävät matkustajavirrat tarpeen mukaan. Myös perinteisessä reittiliikenteessä voidaan käyttää sähkölentokoneita.

2.2.5 Ekologinen

Hiilineutraalin yhteiskunnan tavoittelu. Ilmastonmuutoksen uhkaan vastaamiseksi ja ilmaston lämpenemisen hillitsemiseksi pyritään useissa maailman maissa hiilineutraaliuteen eli siihen, että hiilidioksidipäästöjä tuotetaan enintään sen verran kuin niitä voidaan sitoa ilmakehästä pois, esimerkiksi metsiin tai valtameriin. Suomessa hallituksen tavoitteena on, että Suomi on hiilineutraali vuonna 2035. Suomessa on tavoitteena, että kotimaan liikenteen päästöt vähintään puolittuisivat vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoden 2005 tasoon, ja että vuonna 2045 kaikki liikenne voitaisiin hoitaa fossiilittomasti. Sähköinen lentäminen mahdollistaisi lentämisen päästöjen merkittävän vähenemisen lyhyillä lennoilla, tulevaisuudessa myös keskipitkillä lennoilla.

EU-alueen hiilidioksidipäästöistä 3–4 prosenttia tulee lentoliikenteestä, ja globaalisti vastaava osuus on noin 2 prosenttia. Lentoliikenteen voimakkaan kasvun vuoksi päästöt kasvavat moninkertaisiksi, jos ei ryhdytä entistä tehokkaampiin toimenpiteisiin päästöjen vähentämiseksi. CORSIA-päästökauppajärjestelmän avulla (ks. alla) pyritään kansainvälisen lentoliikenteen hiilineutraaliin kasvuun vuodesta 2020 alkaen eli lentoliikenteen kasvaessa tulisi päästöjen jäädä vuoden 2020 tasolle. ICAO:n tavoitteiden mukaisesti päästöjen vähentämiseen pyritään ensisijaisesti ilma-alusteknologian, vaihtoehtoisten kestävien polttoaineiden sekä energiatehokkaan lentotoiminnan ja ilmatilan käytön avulla. Nämä keinot eivät lähitulevaisuudessa kuitenkaan ole riittäviä, joten tarvitaan markkinaehtoinen hyvitysjärjestelmä. (Niemi et al., 2019; Traficom, 2022a)

- **CORSIA-järjestelmän tavoitteet.** *”Kansainvälisen siviili-ilmailujärjestön ICAOn yleiskokouksessa vuonna 2016 jäsenvaltiot päättivät kansainvälisen lentoliikenteen hiilidioksidipäästöjen kasvun hyvittämiseen velvoittavan järjestelmän eli CORSIA:n (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) toteuttamisesta. Yleiskokouksen päätöksen myötä ilmailu on ensimmäinen ala, jolle on asetettu maailmanlaajuinen markkinaehtoinen päästöjärjestelmä.”* (Traficom, 2022a)

Luontokadon pysäyttäminen ja biodiversiteetin edistäminen. Muihin liikennemuotoihin verrattuna lentoliikenteen etuna on sen vaatima kevyt infrastruktuuri. Yksinkertaistetusti voidaan sanoa, että kahden paikkakunnan välinen lentoyhteys edellyttää kaksi noin 1–2 kilometrin kiitotietä sekä kaksi terminaalirakennusta, riippumatta paikkakuntien välisestä etäisyydestä. Tie- tai rautatieyhteys vaatii infrastruktuurin koko matkalle, millä voi olla suurikin haitallinen vaikutus luontoon, eri lajien elinympäristöihin sekä biodiversiteettiin. Fossiilisten polttoaineiden käytöstä aiheutuvat päästöt kuitenkin vähentävät kevyestä infrasta saatavaa ympäristöhyötyä. Sen sijaan sähköistä lentämistä voidaan pitää ympäristöystävällisenä myös liikennesuorituksen näkökulmasta.

Lentämisen ympäristövaikutusten heijastuminen kansalaisten yleisiin mielipiteisiin. Nykymuotoisen lentämisen ympäristöhaittojen takia kielteinen suhtautuminen lentämiseen on yleistynyt väestön joukossa. Tällainen ilmiö on havaittu muun muassa Ruotsissa (Euronews, 2020). Sähköisen lentämisen ansiosta ympäristöhaitat vähentyvät lyhyen matkan lennoilla lähes olemattomiksi, jolloin lyhyehköjen matkojen lentämiseen olisi helpompi suhtautua neutraalisti tai myönteisesti.

2.3 Sähkö osana lentoliikenteen uudistuvia käyttövoimia



LUVUN KESKEINEN SISÄLTÖ

- Sähköisellä lentämisellä tarkoitetaan lentämistä, joka tapahtuu akkusähkö- ja polttokennosähkölentokoneilla
- Muita vähäpäästöisiä vaihtoehtoja ovat nestemäisten kestävien polttoaineiden (SAF) käyttö sekä vedyn polttaminen turbiineissa
- Akkusähkön keskeinen etu on korkea kokonaishyötysuhde – akkusähkö vaatii vaihtoehtoista vähiten investointeja uusiutuvan energian tuotantoon
- Akkusähköllä ei ole käytön aikaista ilmastovaikutusta
- Polttokennosähköllä ei synny CO₂-päästöjä, NO_x-päästöt vähenevät sekä tiivistymisvanat vähenevät, mutta vesihöyryä syntyy fossiilista polttoainetta enemmän
- Kaikki vaihtoehtoiset käyttövoimat ovat osa tulevaisuuden lentoliikennettä ja niille löytyy omat sovelluskohteensa

2.3.1 Lentoliikenteen käyttövoimien esittely

Lentoliikenteen päästövähennystavoitteiden mukaisesti lentoala etsii jatkuvasti uusia, tehokkaampia ja vähäpäästöisiä ratkaisuja korvaamaan fossiilipohjaisia polttoaineita. Tällä hetkellä maailman lentoliikennejärjestelmä pohjautuu lähes täysin fossiilisiin lentopolttoaineisiin, vaikka tietyt biopohjaiset polttoaineet ovatkin kasvattaneet suosiotaan. Vaihtoehtojen kirjo on melko suuri ja onkin oletettavaa, että myös lentoliikenteessä tullaan näkemään nykyistä laajempi valikoima eri energiaratkaisuja. Käyttövoimamurros ei ole yksinkertainen prosessi, sillä tulevaisuuden liikennepolttoaineet tulevat vaatimaan biopohjaisten raaka-aineiden käytön lisäämistä ja fossiilivapaan sähkön tuotannon voimakasta kasvua.

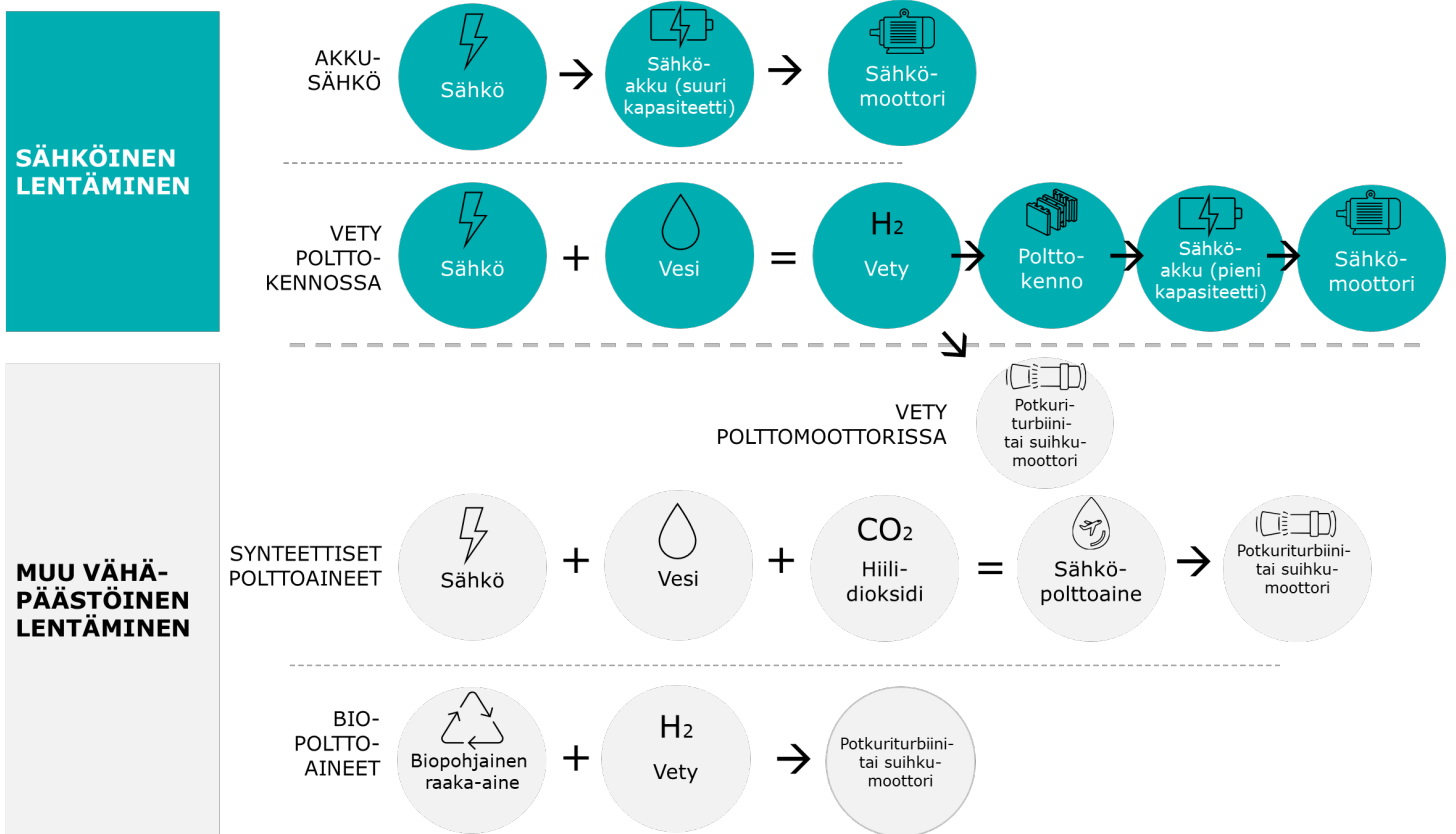
Kuvassa 6 on esitetty yksinkertaistettu kuvaus lentoliikenteen tulevaisuuden käyttövoimista. Luvussa käsitellään kaikkia lentoliikenteen energiamuotoja yleiskuvan aikaansaamiseksi ja Suomen lentoliikenteen energiamuotojen kehitysjänteen hahmottamiseksi.

Akkusähkö

Uudet käyttövoimat voidaan jakaa siis neljään kategoriaan: akkusähköön, vetyyn, sähköpolttoaineisiin ja biopolttoaineisiin. Akkuratkaisussa sähköakkuja ladataan suoraan sähköverkosta saatavalla sähköllä tai esimerkiksi lentokoneeseen asennettujen aurinkopaneelien avulla. Akkuun varastoidun energian avulla pyöritetään sähkömoottoria.

Vety

Vetykäyttöinen lentokone hyödyntää nestemäistä vetyä (LH₂) joko polttokennossa tai polttomoottorissa. Vety on maailman yleisin alkuaine ja se sisältää nestemäisessä muodossaan 2,5 kertaa enemmän energiaa kiloa kohti kuin lentopetroli. Nestemäisellä vedyllä on kuitenkin pienempi tilavuustiheys kuin lentopetrolilla, mikä tarkoittaa, että keveydestään huolimatta se veisi 4 kertaa enemmän tilaa lentokoneessa kuin lentopetroli. Vedyn hyödyntäminen vaatisi siis lentokoneiden runkojen uudelleensuunnittelua.



Kuva 6. Lentoliikenteen tulevaisuuden käyttövoimien yksinkertaistettu kuvaus.

Vety valmistetaan elektrolyysillä sähkön ja veden avulla. Polttokennossa vety reagoi hapen kanssa tuottaen sähköä ja vettä. Sähköllä ladataan pienikapasi- teettista akkua, joka pyörittää sähkömoottoria. Vaihtoehtoisesti vetyä voidaan hyödyntää suoraan polttomoottorissa, jolloin palamistuotteena syntyy vain vesihöyryä. Tällöin ei puhuta sähköisestä lentämisestä.

Sähköpolttoaineet

Sähköpolttoaineilla (synonyymejä: synteettiset polttoaineet; PtL, *Power to Liquids*; RFNBOs, *Renewable fuels of non-biological origin*) tarkoitetaan polttoaineita, jotka valmistetaan sähkön, veden ja hiilidioksidin avulla. Vety valmistetaan prosessissa elektrolyysin avulla. Vety yhdistetään esimerkiksi sellu- tai sementtitehtaan tuotannosta syntyvään hiilidioksidiin tai suoraan ilmasta otettuun hiilidioksidiin ja lopputuotteena saadaan nestemäisessä muodossa olevaa hiilivetyä. Tällaiset polttoaineet voivat soveltua lentopetroltiin sekoitettuna nykyisiin potkuriturbiini- ja suihkumoottoreihin. Siksi niiden arvioidaan olevan tärkeässä roolissa nykyisen lentoliikennejärjestelmän päästöjen vähentämisessä.





Biopolttoaineet

Biopolttoaineet ovat polttoaineita, jotka valmistetaan biopohjaisista raaka-aineista erilaisin menetelmin. Biopolttoaineet jaetaan tyypillisesti biopolttoaineisiin ja edistyneisiin biopolttoaineisiin. Esimerkiksi suomalaisen Nesteen tarjoama biopohjainen lentopolttoaine luetaan biopolttoaineisiin. Sitä valmistetaan kasvi- öljyistä, eläinrasvoista ja jätelipideistä HEFA-menetelmällä (eng. *Hydrotreated Esters and Fatty Acids*). Edistyneet biopolttoaineet puolestaan valmistetaan lignoselluloosasta, jota saadaan mm. maa- ja metsätalousjätteistä, levästä ja biojätteistä. Nämä polttoaineet nähdään yhtenä lupaavimmista tavoista valmistaa kestäviä lentopolttoaineita. Valmistuksen teknologia on kuitenkin vasta esittely- asteella ja valmistuskustannukset korkeat. (ReFuelEU Aviation, 2021, s. 14)

Kun käytetään termiä SAF eli Sustainable Aviation Fuels, tarkoitetaan tässä mainittuja biopolttoaineita tai sähköpolttoaineita, joita voidaan käyttää nykyisessä lentokalustossa ns. drop-in-polttoaineena eli sekoitteena lentopetrolin kanssa (ReFuelEU Aviation, 2021, s. 5). Tällä hetkellä biopolttoaineita ei voi käyttää sellaisenaan, vaan sekoitussuhde on rajattu 50 %:iin. Vuoden 2021 lopussa on kuitenkin käynnistynyt hanke, jossa selvitetään edellytyksiä 100-prosenttisen biopolttoaineen käyttöön (Neste, 2021).

2.3.2 Käyttövoimien kokonaishyötysuhteet

Yksi tapa tarkastella eri käyttövoimia, on arvioida tuotannon ja käytön kokonaishyötysuhdetta. Kokonaishyötysuhteen tarkastelu on tärkeää, koska liikenteen tulevaisuuden käyttövoimat tulevat vaatimaan valtavia investointeja uusiutuvan sähkön tuotantoon. Tällöin kaikista energiatehokkaimmista kehityspoluista tulisi saada mahdollisimman suuri hyöty.

	 Akkusähkö	 Vety polttokennossa	 Synteettinen polttoaine	 Fossiilinen polttoaine
Tuotannosta	100 % Uusiutuvaa sähköä (tuulivoima)	100 % Uusiutuvaa sähköä (tuulivoima)	100 % Uusiutuvaa sähköä (tuulivoima)	100 % fossiilista nestemäistä polttoainetta
Tankkiin	94 % Energiansiirto	66 % Elektrolyysi: vihreän vedyn tuottaminen	66 % Elektrolyysi: vihreän vedyn tuottaminen	99 % Pieniä energiahäviöitä kuljetusprosessin ja tankkauksen aikana mm. haihtumisesta johtuen
		54-80 % Paineistus ja nesteytys + kuljetus ja tankin täyttö	88 % Hiilidioksidin talteenotto + nestemäisen hiilivedyn valmistaminen metanolimenetelmällä	
Tuotannosta tankkiin hyötysuhde	85 %	36~53 %	57 %	99 %
Tankista	65~82 % Suurikapasiteettisen akun sähkön käyttö sähkömoottorissa	45 % Polttokennossa vedystä sähköenergian tuotto ja käyttö sähkömoottorissa	30 % Nestemäisen hiilivedyn polttaminen potkuriturbiini-moottorissa	30 % Nestemäisen hiilivedyn polttaminen potkuriturbiini-moottorissa
Moottoriin				
Kokonaishyötysuhde	55~70 %	16~24 %	17 %	30 %

Kuva 7. Akkusähkön, vedyn, synteettisen polttoaineen sekä fossiilisen polttoaineen kokonaishyötysuhteiden vertailu. Luvut ovat suuntaa antavia ja voivat muuttua tarkasteltavan teknologian, olosuhteiden ja teknologisen kehityksen myötä. (Kakriainen, 2021; Deloitte, 2020)

Kuvassa 7 on vertailtu eri lähteiden tietojen avulla akkusähkön, vedyn ja synteettisten polttoaineiden hyötysuhteita tuotannosta tankkiin ja tankista moottoriin. Tuloksista havaitaan, että akkusähkö on vaihtoehdoista selvästi tehokkain kokonaishyötysuhteeltaan. Keskeinen ero tuotannosta-tankkiin-vaiheessa syntyy nestemäisten polttoaineiden valmistuksen prosessissa: vety tulee ensiksi valmistaa sähkön avulla vedestä ja sen jälkeen paineistaa ja nesteyttää. Myös vedyn kuljetus aiheuttaa ylimääräistä hukkaa ja haasteita, toisin kuin muissa vaihtoehdoissa. Synteettisten polttoaineiden kohdalla vety tulee myös valmistaa, hiilidioksidi kaapata ilmasta tai päästölähteestä, ja valmistaa nestemäinen polttoaine. Nestemäisten polttoaineiden valmistuksen hyötysuhde

riippuu myös paljon siitä, saadaanko prosessin eri vaiheissa syntyvää hukkalämpöä hyödynnetyksi esim. kaukolämpöverkossa.

Tankista-moottoriin-vaiheen tarkastelussa sähkömoottorin tehokkuus nousee keskeiseen rooliin. Kokonaishyötysuhde voi olla sähköpolttoaineeseen verrattuna moninkertainen. Akkusähkön tapauksessa energiahäviötä syntyy sähkön muuntamisen aikana ajoneuvon siirtämiseksi. Sähkömoottorin korkea hyötysuhde tekee siitä polttomoottoria huomattavasti energiataloudellisemman. Polttomoottorissa hiilivedyn palaessa syntyy runsaasti hukkalämpöä, jota ei saada otetuksi talteen. Myös vedyn tapauksessa käytetään tehokasta sähkömoottoria, mutta vedyn kemiallisen energian muuttaminen sähköksi laskee hyötysuhdetta.

Pelkästään kokonaishyötysuhdetta tarkastellen vaikuttaa siltä, että siellä missä akkusähkö on teknologian, taloudellisuuden ja käytännön kannalta mahdollinen vaihtoehto, sitä tulisi käyttää mahdollisimman paljon. Seuraavassa luvussa käsiteltävät akkuteknologian rajoitteet kuitenkin osoittavat, ettei akkusähköstä ole yksinään ratkaisemaan lentoliikenteen energiahaastetta.

2.3.3 Käyttövoimien lennonaikaiset päästöt

Lentoliikenteen päästöistä yleisimmin mitattavia ovat käytöstä syntyvät CO₂-päästöt. Lentokoneiden polttomoottorit tuottavat 3,15 kg CO₂ per poltettu lentopetrolin kilogramma. Tämä CO₂ jää yläilmakehään jopa 100 vuoden ajaksi. Lentokoneet tuottavat kuitenkin myös muunlaisia ilmastoa lämmittäviä päästöjä. Yläilmakehässä syntyy myös NO_x-päästöjä, höyryä ja nokea. Typenoksidipäästöt pysyvät ilmakehässä vain viikkoja, mutta voivat olla vaikutuksiltaan hiilidioksidin veroisia. Vesihöyry heijastaa ilmastoa lämmittävää säteilyä, mutta ei säily korkealla ilmakehässä kauaa. Tiivistymisvanoja ja pilviä syntyy vesihöyrypäästöjen ja noen yhteisvaikutuksena, joita syntyy polttomoottorissa palamisen seurauksena. Näiden muodostus riippuu useista tekijöistä, kuten ilmankosteudesta, lämpötilasta ja lentokorkeudesta. Tiivistymisvanoista ja pilvistä seuraa ilmastoa lämmittävän säteilyn heijastumista. (Clean Sky, 2020)

Vedyn suoran palamisen alustavat simulaatiot osoittavat, että muodostuneet jääkiteet ovat painavampia (eli ne saostuvat nopeammin) ja optisesti ohuempia (eli ne ovat "läpinäkyvämpiä"). Sellaisenaan nämä vesimolekyylit johtavat pienempään, lyhyempään ilmaston lämpenemiseen. Tämä johtaa 30–50 prosenttia pienempään tiivistymisvanojen ja pilvien muodostumisen vaikutuksiin verrattuna lentopetrolin polttoon, sillä vetyä poltettaessa ei synny nokea. Polttokennojärjestelmistä ei ole vielä vastaavaa tutkimusta, mutta verrattuna vedyn suorapolttoon, polttokennon päästämä vesihöyry on viileämpää ja täysin hallittavissa lentokoneen sisällä. Synteettisillä polttoaineilla tiivistymisvanat vähenevät myös, koska niissä on vähemmän aromaattisia aineita ja palaminen synnyttää vähemmän nokea. (Clean Sky, 2020) Vedyn ilmastovaikutusten arviointi on kuitenkin vielä kesken ja aiheesta tarvitaan lisää tutkimusta.

Eri energiamuotojen käytön aikaisia päästöjä vertailtaessa täyssähkölentokone on selvästi paras, sillä se ei aiheuta mitään käytön aikaisia päästöjä. Sähkölentokoneissa akkujen valmistusprosessi on kuitenkin toistaiseksi hiili-intensiivistä, joka tulee ottaa huomioon päästöjä arvioitaessa. Biopolttoaineissa päästövähenemät riippuvat polttoaineen tuotantotavasta.

Taulukko 1. Lentämisen käyttövoimien päästövaikutukset verrattuna fossiiliseen lentopolttoaineeseen. Mukailten (Clean Sky, 2020, s. 21)

	Suorat CO ²	NO _x	Vesihöyry	Tiivistymis- vanat	Ilmastovaikutuksen vähentämispotentiaali
Synteettinen polttoaine poltto- moottorissa	-0% -100% (netto)	-0%	-0%	-10-40%	-30-60%
Vety poltto- moottorissa	-100%	-50-80%	+150%	-30-50%	-50-75%
Vety polttokennossa	-100%	-50-80%	+150%	-60-80%	-75-90%
Sähköenergia sähkö- moottorissa	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%

2.3.4 Käyttövoimien koontitaulukko

Taulukkoon 2 on koottu ReFuelEU -hankkeessa määritellyt nestemäiset polttoaineet täydennettynä akkusähköllä ja vedyllä. Kaikissa energiamuodoissa on omat hyvät ja huonot puolensa niin lentämisen kuin energiantuotannon näkökulmista. Tulevaisuuden lentoliikenne tulee hyödyntämään kaikkia taulukossa mainittuja käyttövoimia, mutta käyttöalueet määrittävät lentoreittien ominaisuuksien ja infrastruktuurin mukaan.

Taulukko 2. Käyttövoimien ominaisuuksien vertailu. Mukailten (ReFuelEU Aviation, 2021)

Energiamuoto	Tuotantotapa	Käyttötapa	Keskeisiä etuja	Keskeisiä haasteita
Kerosiini-pohjaiset lentopolttoaineet, kuten Jet A1	Fossiilisen raakaöljyn jalostus.	Suihku- tai potkuriturbiini-moottori	+ Saatavuus ja alhainen hinta + Valmis jakelu-infrastruktuuri	- Suuret kasvihuonepäästöt ja tuotannon haittavaikutukset
Biopolttoaineet "Biofuels"	Kasviöljyistä, eläinrasvoista ja jätelipideistä tuotettavia biopohjaisia polttoaineita. Tuotetaan HEFA-menetelmällä.	Suihku- tai potkuriturbiini-moottori	+ 76...85 %:n päästövähennys fossiilisen lentopolttoaineeseen verrattuna sekä + Drop-in-polttoaine + Halvin kestävä lentopolttoaine	- Raaka-aineiden saatavuus rajattua ja tieliikenne käyttää valtaosan tuotannosta - Käytön aikana syntyy päästöjä yläilmakehässä
Edistyneet biopolttoaineet "Advanced biofuels"	Lignoselluloosasta (esim. maa- tai metsätalousjätteistä, levästä, biojätteestä ja muista). Tuotetaan Gas+FT tai Alcohol-to-Jet-menetelmillä.	Suihku- tai potkuriturbiini-moottori	+ 94 %:n päästövähennys elinkaaren aikana puupohjaisella, 91 %:n päästövähennys yhdyskuntajätteestä tehdyllä + Drop-in-polttoaine + Raaka-ainetta saatavilla paljon	- Muut talussektorit tulevat käyttämään samoja raaka-aineita - Käytön aikana syntyy päästöjä yläilmakehässä. - Tuotanto toistaiseksi kallista
Synteettiset nestemäiset polttoaineet, "Renewable fuels of non-biological origin, RFNBOs"	Uusiutuvan energian, veden elektrolyysin ja hiilidioksidin talteenoton avulla tuotettuja hiilivetyyhdisteitä. Tuotetaan joko Fischer-Tropsch- tai metanolimenetelmällä	Suihku- tai potkuriturbiini-moottori	+ 85 %:n päästövähennys + Drop-in-polttoaine + Raaka-aineita lähes rajattomasti	- Korkeat tuotanto-kustannukset - Uusiutuvan energian riittämättömyys, - CO ₂ -talteenoton teknologiat kehitysvaiheessa - Käytön aikana syntyy päästöjä yläilmakehässä
Litiumioniakut	Akkumateriaaleja, kuten nikkeliä, kobolttia, litiumia ja hiiltä sisältävä akkurakenne.	Akuista sähkövirtaa sähkömoottorin pyörittämiseen	+ Akkusähkö ja sähkömoottorin yhdistelmällä kaikista vaihtoehdoista paras hyötysuhde. + Käytöllä ei ilmastovaikutuksia	- Akkujen energiatiheys pienempi kuin nestemäisillä polttoaineilla - Akkumateriaalien rajallisuus - Vaatii lataus-infrastruktuurin rakentamista
Nestemäinen vety	Uusiutuvalla energialla vedestä erotetaan vety ja happi toisistaan. Vety nesteytetään alhaisissa lämpötiloissa.	Vedyn polttaminen joko polttokennossa tai suihku- tai potkuriturbiini-moottorissa	+ Maailman yleisin alkuaine + Suoraviivainen tuotantoprosessi + Nestemäisessä muodossa suhteellisen hyvät energiankantajan ominaisuudet	- Vedyn korkeat tuotanto-kustannukset - Kilpailukyky riippuu uusiutuvan energian tuotannon kasvusta - Vaikea käsitellä - Vaatii paljon uutta infrastruktuuria

2.4 Akkuteknologian kehitys ja reunaehdot



LUVUN KESKEINEN SISÄLTÖ

- Akkuteknologian käyttökohteisiin vaikuttavat erityisesti akkujen energiatiheys ja hinta
- Akkujen hinnat ovat laskeneet viimeisen kymmenen vuoden aikana merkittävästi
- Akkujen energiatiheys kehittyy jatkuvasti
- Litiumioniakut ovat vakiintunutta teknologiaa
- Kiinteäelektrolyyttiset akut lupaavalla kehityspolulla
- Ilma-akut ja muut variaatiot vielä spekulatiivisia
- Akuilla on akkupalojen riski, jota kiinteäelektrolyyttiset akut voivat pienentää
- Autoteollisuus on keskeinen akkuteknologian kehityksen ajuri – sähköinen lentäminen hyötty ohessa
- Akkumateriaalien eettisyys ja rajallisuus asettavat reunaehdoja – pohjoismaiden kestäväällä akkuklusterilla tärkeä rooli kehityksessä

Markkinoilla on saatavilla monenlaisia ladattavia akkuja, mutta sähköiselle lentoliikenteelle soveltuvimpia ovat litiumioniakut (Li-ion). Litiumioniakuista on monenlaisia konfiguraatioita ja ne voivat sisältää erilaisia metalleja sekä katodissa (+) että anodissa (-). Autoteollisuus käyttää litiumioniakuissaan mm. nikkeliä, kobolttia, mangaania ja grafiittia.

Akkuteknologia on kehittynyt historian saatossa melko hitaasti, mutta nyt sähköisen liikenteen megatrendin myötä kehityspanoksia laitetaan koko akkuarvoketjun tehostamiseen. Akkujen kilpailukykyyn vaikuttavat keskeisesti akkukapasiteetti ja akkujen hinta. Molemmista on nähty viime vuosina merkittäviä edistysaskeleita.

2.4.1 Akkujen energiatiheys

Energiatiheys on lentoliikenteen energiaratkaisuissa sekä akkuteollisuudessa tärkeä tekijä. Se kuvaa sitä, kuinka paljon akku tai polttoaine sisältää energiaa sen painoon nähden. Energiatiheyden yksikkönä käytetään wattitunteja per kilogramma (Wh/kg). Mitä suurempi energiatiheys on, sitä parempi se on lentokoneen energiataloudelle.

- Fossiilinen kerosiini: 11 000–12 000 Wh/kg
- Litiumioniakut 2022: 100–265 Wh/kg
- Litiumioniakkujen arvioitu saavutettava maksimi vuonna 2025: 400–450 Wh/kg (Smedberg et al., 2021a)

Ottaen huomioon sähkömoottorin ja pienen potkuriturbiinin hyötysuhteen, on kerosiinilla parhaimmassakin tapauksessa n. 20 kertaa suurempi energiatiheys nykyisiin akkuihin verrattuna. Heart Aerospacen mukaan ES-19-koneessa akkujen paino on 39 % koneen kokonaispainosta, mikä on samanlainen polttoaine-painosuhte kuin mannertenvälisten lentokoneiden kohdalla (Forslund, 2020). Akkuteknologialla pitkän kantaman lennot eivät siis ole tällä hetkellä mahdollisia,

vaan niitä kehitetään juuri tästä syystä lyhyemmän kantaman lentoihin, joissa niillä voidaan saavuttaa suurimmat edut. (Smedberg et al., 2021a)

Akkujen energiatihydestä puhuttaessa on tärkeä tunnistaa erot kenno- ja akkupaketitasolla. Ajoneuvoissa, kuten lentokoneissa, akkupaketit koostuvat useista akkukennoista sekä muista paketin muodostamiseen tarvittavista komponenteista. Komponenttien paino vähentää akkupaketin kokonaisenergiatiheyttä verrattuna kennojen energiatihyteen. Esimerkiksi tänä päivänä sähköautojen akkukennojen energiatiheys voi olla 240–270 Wh/kg, mutta akkupaketissa energiatiheys putoaa 30–50 % verrattuna akkukennojen energiatihyteen. (Trafikanalys, 2020, s. 42)

2.4.2 Akkujen hinta

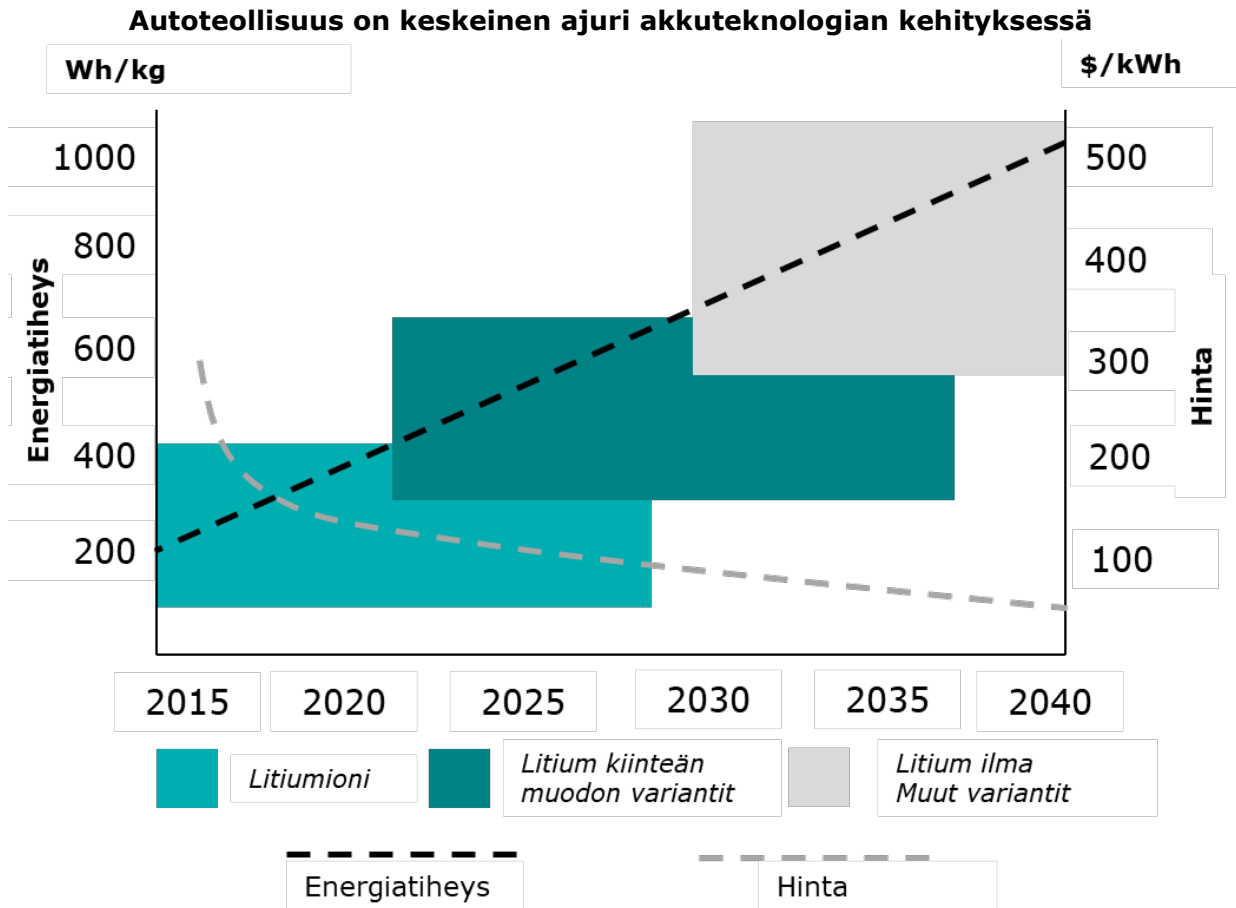
Akkujen hinta vaikuttaa energiatihyden lisäksi keskeisesti sähköisen lentoliikenteen kilpailukykyyn. Litiumioniakkujen hinnat ovat kehittyneet suotuisasti, sillä niiden hinta on laskenut vuoden 2010 hinnasta 1200 \$/kWh vuoden 2021 hintaan 132 \$/kWh. Tämä tarkoittaa 89 %:n hinnanlaskua reilussa kymmenessä vuodessa. Arvioiden mukaan hintakehitys on kuitenkin hidastumassa, kun kysyntä on kasvanut voimakkaasti ja raaka-aineiden saatavuus on rajallista. Myös markkinoiden kypsyys vaikuttaa akkujen hintaan, sillä sähköisen liikenteen edelläkävijänä pidetyssä Kiinassa akkujen hinta on 111 \$/kWh, kun Euroopassa hinnat ovat olleet jopa 60 % korkeampia. (BloombergNEF, 2021)

2.4.3 Akkuteknologian tulevaisuus

Seuraava askel akkuteknologiassa on kiinteäelektrolyyttisten akkujen (eng. *solid state batteries*) kehittyminen. Näissä nestemäinen elektrolyytti korvataan kiinteällä aineksella. Kiinteä elektrolyytti kestää huomattavasti suurempia lämpötiloja, mikä mahdollistaa suuremman energiatihyden ja pienentää paloriskiä. Niillä on myös mahdollisuus saavuttaa nykyistä suurempia energiatihyksiä, jopa 650 Wh/kg, mutta tähän liittyy vielä epävarmuuksia. (Trafikanalys, 2020, s. 43)

Kiinteäelektrolyyttisten akkujen ohella ollaan kehittämässä myös ns. ilma-akkuja (eng. *Li air*), jotka pystyisivät hyödyntämään happea. Molemmilla teknologioilla on suuri teoreettinen potentiaali, ja niiden odotetaan mahdollistavan alhaiset valmistuskustannukset ja olevan ympäristöystävällisiä. Teknologioiden potentiaalia on havainnollistettu kuvassa 8. Kolmas varhaisessa kehitysvaiheessa oleva akkutyyppi on alumiini-ioni-akku, jonka uskotaan saavuttavan 3–4 kertaa litiumioniakkuja suuremman energiatihyden. (Smedberg et al., 2021a, s. 14)

Uutena lähestymistapana akkuihin on tutkittu myös kvanttiteknologioiden soveltamista, tavoitteena luoda kvanttiakku (eng. *quantum battery*). Kvanttiakkujen teoriaan liittyviä koeasetelmia on jo luotu laboratorio-oloissa, ja on todettu, että kvanttiakun latautumisnopeus voisi kasvaa akun kapasiteetin kasvaessa. Akkujen latausnopeuden oletetaan myös olevan ylipäättään huomattavan suuri. Teknologia on kuitenkin toistaiseksi kaukana siitä, että sitä voitaisiin soveltaa kaupallisesti. (Quach et al., 2022; IEEE Spectrum, 2022)



Kuva 8. Litiumakkuteknologian ja hintojen kehityksen skenaario. Muokattu lähteestä (Reimers, 2018)

Autoteollisuus on vaihtamassa lähes yksinomaan sähköiseen voimalinjaan. Investoinnit ovat valtavia ja sähköautojen kysyntä on lähtenyt nopeaan kasvuun. Pohjoismaissa Nordic Battery Belt -vyöhyke Norjan Mo i Ranasta Ruotsin Skellefteån kautta Suomen Vaasaan on keräämässä suuren määrän investointeja eri akkuarvoketjun vaiheista. Pohjoismaista kestävyteen perustuvaa akkutuotantoa on siis tulossa lisää ja tämä on suotuista kehitys myös sähköiselle lentoliikenteelle.

2.4.4 Akkujen turvallisuus

Lentokoneiden valmistajilla ja sertifiointista vastaavilla viranomaisilla on pitkäaikainen kokemus nestemäisistä polttoaineista. Akkusähköön tuleminen ilmailuun asettaa uusia vaatimuksia kalustolle ja riskienhallinnalle. Akkujen suurin riski on ns. "thermal rush", johon liittyy kennojen energian hallitsematon purkautuminen. Se voi syntyä ylilataamisen, ylikuumentumisen tai oikosulun seurauksena ja johtaa tulipaloon, joka on hyvin vaikea sammuttaa. Palon seurauksena voi syntyä vaarallisia myrkykkaasuja. (Elsäkerhetsverket, 2020)

Vuonna 2018 testilennolla ollut kaksipaikkainen Siemensin ja Magnusin eFusion-sähkölentokone syttyi tuleen ja syöksyi maahan Unkarissa. Onnettomuudessa kuoli kaksi ihmistä. Koneen sähkömoottorin teho oli 260kW ja litiumioniakkujen moduulit sijaitsivat koneen etuosassa. (Smedberg et al., 2021a, s. 16)

Kiinteään elektrolyyttiin akkuteknologia voi olla osaratkaisu palo-ongelmiin, sillä se kestää huomattavasti suurempia lämpötiloja, kun vastaavissa olosuhteissa nestemäinen elektrolyytti kiehuu. (Smedberg et al., 2021a).

Kiinteäelektrolyttiset akut voisivat siis pienentää akkupaloriskiä tulevaisuudessa.

2.4.5 Akkujen käyttöikä, eettisyys ja saatavuus

Litiumioniakkujen käyttöikä mitataan ja ilmoitetaan tyypillisesti joko käyttösykleinä, eli montako kertaa akku puretaan ja ladataan täydestä tyhjäksi, tai läpimenneen energian määränä. Heart Aerospace arvioi, että sen 19-paikkaisen sähkölentokoneen akut tulee vaihtaa 1 000–3 000 syklin jälkeen. Vaihtotiheys riippuu siitä, kuinka monta kertaa akkua ladataan päivän aikana. Arvion mukaan tällaisen sähkölentokoneen akut tulisi vaihtaa 1–3 vuoden välein. (Trafikanalys, 2020, s. 19)

Akkujen käytön nopeaan kasvuun liikennesektorilla liittyy olennaisesti kriittisten materiaalien riittävyys. Neitseellisiä materiaaleja on maapallolla rajallinen määrä ja niiden louhimiseen liittyy myös eettisiä ongelmia. Noin 97 prosenttia maailman koboltista tuotetaan nikkelin ja kuparin sivutuotteena pääosin Afrikassa. Koboltin tuotantoa on erityisesti epästabiilissa Kongon demokraattisessa tasavallassa, johon liittyy ihmisoikeusrikkomuksia. Suomi on ainoa EU-maa, joka tuottaa kobolttia malmista omissa kaivoksissaan. Euroopan suurimmat kobolttivarannot löytyvät Sotkamon nikkeli-kupari-sinkki-koboltti-monimetalliesiintymästä Talvivaarasta. (Kriittiset materiaalit, 2022).

Akkumateriaaleihin liittyy myös geopolitiikka, joka voi aiheuttaa häiriöitä toimitusketjuihin ja markkinoihin. Venäjä on yksi maailman isoimmista nikkelin tuottajista, ja helmikuussa 2022 lisääntyneet sotatoimet ovat nostaneet nikkelin hintaa merkittävästi. (LME, 2022)

Haasteet on tunnistettu laajasti alalla, ja akkujen sekä niiden materiaalien kierrätykseen ollaan panostamassa. Muun muassa Northvolt on kehittämässä akkujen kierrätystä ja tavoittelee 50 %:n kierrätettyjen akkumateriaalien osuutta kaikista valmistetuista akuista vuoteen 2030 mennessä. (Northvolt, 2022)

2.5 Sähköiset lentokoneet



LUVUN KESKEINEN SISÄLTÖ

- Maailmassa on käynnissä yli 100 sähköisten ilma-alusten projektia
- Sähköinen lentäminen voidaan jakaa akkusähköön, polttokenno-sähköön sekä hybriditeknologiaan
- Sähköisessä lentokalustossa teknologia asettaa rajoitteita kantamalle ja kapasiteetille – kehitystä tapahtuu asteittain
- Vuonna 2030 on käytössä pienen kapasiteetin akkusähkökalustoa
- Vetykalustoa tulee laajemmin markkinoille vuoteen 2040 mennessä
- Akkusähkö soveltuu parhaiten alle 500 km:n matkoille vuoteen 2040 mennessä
- Polttokennosähkön käyttöalue on alle 1 000 km:n matkoilla vuoteen 2040
- Muut käyttövoimaratkaisut ovat käytössä mainittua pidemmällä matkoilla

2.5.1 Sähköisen lentämisen eri muodot

Sähköisellä ilmailulla on pitkä historia. Ensimmäinen sähköinen kiinteäsiipinen ilma-alus lensi Itävallassa vuonna 1973 useita 9–15 minuutin koelentoja (Smedberg et al., 2021a; Stadlbauer, 2018). Sen jälkeen sähköisen lentämisen kehitys on ollut verkkaista. Akkuteknologian hidaskas kehitys on tähän keskeinen syy.

Tällä hetkellä maailmassa on käynnissä yli 100 sähköisten ilma-alusten projektia. Teknologian rajoitteet ovat kuitenkin toistaiseksi ohjanneet kehitystä erityisesti alueellisen ja paikallisen lentämisen teknologiaan. Kehitystahti on kiihtynyt vuosien 2010 ja 2020 välillä useiden piensähkölentokoneiden, kuten Pipistrel Alpha Electron, julkaisun myötä. Taulukossa 3 on esitetty jako eri sähköisiin ilma-aluksiin. (Hak & Driessen, 2021)

Sähköisellä lentokoneella tarkoitetaan tässä työssä ilma-alusta, joka toimii sähkömoottoreilla ja soveltuu alueelliseen kaupalliseen lentoliikenteeseen.

Taulukko 3. Sähköisen lentämisen ilma-alustyyppit

Sähköisen lentämisen ilma-alustyyppit	Kapasiteetti-arvio vuonna 2030	Ominaisuudet
Yleis- ja harrasteilmailun ilma-alukset	Alle 5 paikkaa	Pieniä lentokoneita harraste- ja koulutuskäyttöön. Esim. Pipistrel Velis Electro
Uraanit lentotaksit	Alle 5 paikkaa	Muutamalle hengelle tarkoitettuja eVTOL-koneita (eng. <i>electric vertical take-off and landing</i>), jotka voivat nousta ja laskeutua pystysuoraan. Tarkoitettu pääosin kaupunkien välisiin lentoihin. Esim. Liliumin 6-paikkainen eVTOL.
Alueelliset lentokoneet ja liikelentokoneet	Alle 20 paikkaa	Pääosin 9–19-paikkaisia kiinteäsiipisiä sähkölento-koneita, jotka sopivat pienille lentoasemille ja lyhyille kiitoteille. Esim. Eviation Alice tai ES-19.
Suuret kaupalliset lentokoneet	Ei käytössä 2030	Pitkille lentomatkoille kehitteillä olevia vetyä hyödyntäviä lentokoneita, kuten Boeing Super VOLT ja Airbus ZEROe.

Sähköiset lentokoneet voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin niiden energiaratkaisujen mukaan: akkusähköön, polttokennosähköön ja hybrideihin (Taulukko 4). Sähkön varastointiin voidaan käyttää joko akkuja tai vetyä.

Taulukko 4. Eri sähköisen lentämisen muodot. (Trafikanalys, 2020, s. 42)

Tyyppi	Ominaisuudet
Akkusähkö	Energia moottoreita varten on varastoitu akkuihin.
Polttokenno	Energia moottoreita varten on varastoitu vetyyn, joka muunnetaan sähköksi polttokennon avulla. Polttokennolentokoneessa on myös pienikapasiteettinen sähköakku.
Rinnakkaishybridi	Sähkömoottori ja polttomoottori voivat joko yhdessä tai erikseen pyörittää potkureita.
Sarjahybridi	Potkureita pyöritetään joko yhdellä tai useammalla sähkömoottorilla, jotka saavat energiansa akuista tai polttokennoista ja generaattorista, joka saa virtansa turbiinimoottorista.

Akkusähkö on tässä työssä päätarkastelun kohteena. Akkusähkölentokoneissa kaikki käyttöenergia saadaan koneeseen sijoitetuista akkupaketeista. Akkujen energiatiheys on keskeinen edellytys koneiden kantaman ja kapasiteetin kasvattamiselle. Haasteena on, että akkujen paino on kannettava koko lennon ajan, kun nestemäistä polttoainetta käyttävässä koneessa paino vähenee polttoaineen palaessa.

Polttokennolentokoneissa pääkäyttövoimana on vety, jonka energiaa konvertoidaan sähkömoottorien käyttöön lennon aikana. Nestemäisen vedyn lentopetrolia suurempi tilavuus edellyttää suurempia polttoainetankkeja ja muutoksia ilma-alusten suunnitteluun.

Hybridilentokoneita on olemassa kahta tyyppiä: rinnakkaishybridi ja sarjahybridi. Rinnakkaishybridikoneessa on sekä sähkömoottori että polttomoottori, jotka toimivat rinnakkain työntövoiman aikaansaamiseksi. Sarjahybridissä potkurit saavat voimansa yhdestä tai useammasta sähkömoottorista, ja sähkö tulee akuista tai polttokennoista ja turbiinimoottorilla toimivasta generaattorista. Rinnakkaishybridit soveltuvat paremmin lyhyille lennoille ja sarjahybridit pidemmille. (Trafikanalys, 2020, s. 45)

Hybridilentokoneissakin keskeisenä haasteena on, että akkujen paino on kannettava koko lennon ajan, mikä näkyy korkeampana energiankulutuksena läpi lennon. Hybrideissä myös teknologinen kompleksisuus on sisäänrakennettua ja sähkömoottorien tuomat halvemmat huoltokustannukset osin poistuvat. Myöskään sähkön hinta ei auta operatiivisten kustannusten merkittävässä alentamisessa.

Kaikissa edellä mainituissa sähköisissä lentokoneissa sähkömoottorin keskeisenä etuna on sen korkea hyötysuhde: sähkömoottori pystyy siirtämään noin 90 % potentiaalisesta energiasta voimansiirron akselille. Potkuriturbiini- ja suihku-moottoreissa valtaosa polttoaineen energiasta muuntuu hukkalämmöksi. Potkuriturbiinikoneen moottorin hyötysuhde on matalilla korkeuksilla 20–25 % ja korkealla n. 35 %. Tyypillisesti lyhyet alueelliset lennot ovat hyötysuhteeltaan heikompia ja pitkän matkan lennot parempia. Sähkömoottoreiden tehokkuus säilyy korkeana riippumatta siitä, onko kyseessä pienempi vai suurempi moottori tai mikä on lentokorkeus. Tämän seurauksena pienempi alueellisiin lentoihin tarkoitettu kalusto voi olla yhtä energiatehokas per matkustajakilometri kuin pitkille matkoille tarkoitettu suuri kalusto. (Reimers, 2020)

Kuvassa 9 on esitetty koonti markkinoille tulevista kaupallisista sähkölento-koneista ja niiden ominaisuuksista. Lista ei sisällä kaikkia malleja. Osalla näistä ei vielä välttämättä ole lennetty koelentoja. Lentokoneiden tyyppihyväksyntä-prosessit ovat yleensä pitkiä, jopa vuosien mittaisia. Onkin todennäköistä, etteivät kaikki kuvassa esitellyt lentokonemallit tule pääsemään markkinoille esitetyssä aikataulussa. Tähän palataan tarkemmin luvussa 4.

	Malli	Matkustaja-määrä	Markkinoilla (arvio)	Teho (kW)	Valmistajan ilmoittama maksimikantama (km)
AKKU-SÄHKÖ	Pipistrel Velis Electro	2	2020	57,6	100
	Phinix	2	2018*	60	300
	Bye Aerospace eFlyer8	8	2024-2026	n/a	930
	MagniX –Havilland Beaver	6	2019*	560	160
	Magnix – Cessna Caravan	9	2020*	560	n/a
	Heart ES-19	19	2026	4x400	400
	Eviation Alice	9 + 2	2024	n/a	820
	Wright 1	186	2030	n/a	500
POLTTO-KENNO-SÄHKÖ	ZeroAvia Piper M-class	6	2020*/2023	n/a	n/a
	ZeroAvia	19	2023	600	569
	H4Y	4	2016*	80	750-1500
	H2FLY	40	2030	1400	1850
	De Havilland Canada DCH-8 Q300	40	2024	n/a	740
HYBRIDI-SÄHKÖ	Ampaire Cessna 337	3	2019*	n/a	640
	Ampaire Eco OtternSX	19	2024	100	320
	Boeing Sugar VOLT	135	2030-2050	n/a	n/a
	EAG HERA	70+	2028	n/a	1480

* Ensimmäinen testilento

Kuva 9. Koonti markkinoille tulevista sähköisistä lentokoneista. Muokattu lähteestä: (Smedberg et al., 2021b)

2.5.2 Sähkölentokoneiden kantaman ja kapasiteetin kehitysnäkymät

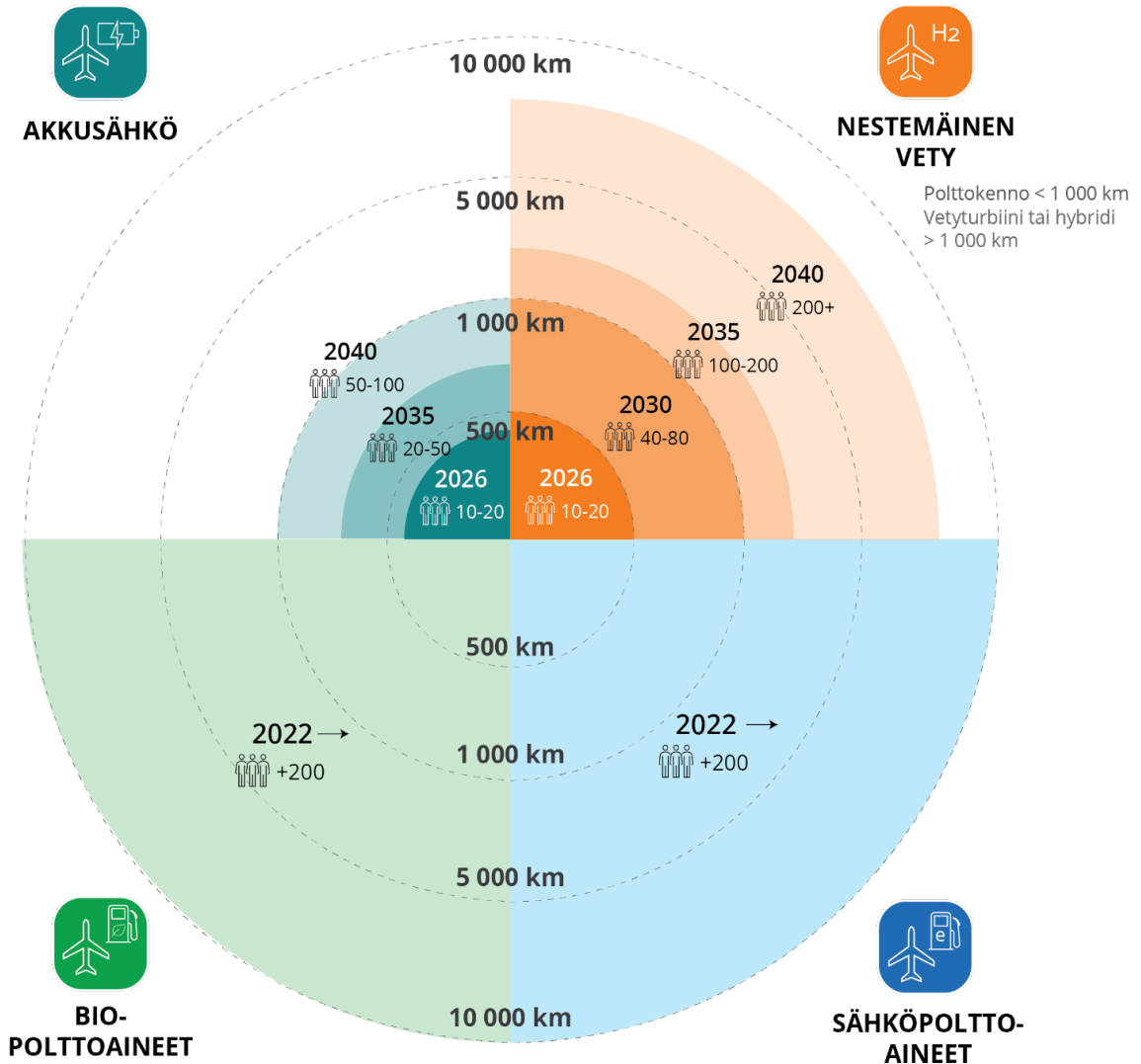
Sähköisten lentokoneiden kantama ja kapasiteetti riippuu pitkälti käytettävästä teknologiasta. Akkusähköllä kantaman ja kapasiteetin keskeinen rajoittava tekijä on akkujen energiatiheys, jonka kehitys määrittää näiden ominaisuuksien kasvumahdollisuudet. Akkujen määrää ei voida kasvattaa määräänsä enempää, koska lentokoneen paino kasvaisi liikaa.

Lentokoneilla lentokorkeudet suunnitellaan niin, että lento on mahdollisimman taloudellinen. Sähköisillä lentokoneilla lennetään ensi alkuun lyhyitä matkoja, joten ei välttämättä ole kannattavaa kiivetä esimerkiksi lentopinnoille 200 tai 300. Sähköisellä lentokalustolla voisi olla vain lentopinta 50, joka nykyään on paljolti valvomaton ilmatilaa. Valvomattomassa ilmatilassa kaupalliseen lentämiseen liittyy aina turvallisuusriskejä, sillä siellä lennonjohto ei porrasta liikennettä. Tämä saattaa aiheuttaa ilmatilan uudelleensuunnittelua (Finnair, 2022a)

Polttokennoteknologialla voidaan saavuttaa akkusähköä pidempiä kantamia, koska nestemäisen vedyn avulla koneen tankkiin saadaan suurempi määrä energiasisältöä. Nestemäinen vety häviää kuitenkin lentopetrolille, biopolttaineille sekä sähköpolttaineille energiatihedessä. Polttokennot eivät sovellu vielä hyvin pitkille matkoille, sillä polttokennojen viilennysratkaisut painavat kohtuuttomasti. Pitkillä matkoilla voidaan käyttää vetyä hyödyntäviä suihkumootoreita, mutta tässäkin tapauksessa vetytankkien paino rajoittaa

tehokkuutta. Myös edellä mainittujen teknologioiden varioidut hybridiratkaisut ovat mahdollisia.

Muun muassa kuvassa 9 esitetty isobritannialainen EAG HERA tavoittelee lentokoneelleen runkorakennetta, joka mahdollistaa voimalinjan muuttamisen joustavasti teknologian kehittymisen myötä. Valmistaja toteaa, että kone voidaan muuttaa täysin sähköiseksi tai hiilineutraaliksi akkujen energiatihedden parantuessa tai vaihtoehtoisten polttoaineiden (vety, biopolttoaineet, synteettiset lentopolttoaineet) ja niihin liittyvien voimansiirtoteknologioiden kehittyessä ja hintojen laskiessa.



Kuva 10. Arvio lentoliikenteen eri käyttövoimien kantaman ja kapasiteetin kehitymisestä teknologian näkökulmasta. Akkusähkölentokoneen kantama (Reimers, 2020), nestemäisen vedyn kantama (Clean Sky, 2020). Todelliset kaupalliset kantamat ovat esitettyjä lyhyempiä ja nämä arviot on esitetty myöhemmin työssä. On todennäköistä, että käyttöönoton aikataulut eivät ole näin optimistisia, sillä uusien lentokoneiden tyyppihyväksyntäprosessit ovat hitaita. Myös lentoyhtiöiden kaluston hankintanopeus vaikuttaa teknologian käyttöönoton yleistymiseen.

Kaluston kantamalle voidaan ilmoittaa kolme eri arvoa – teoreettinen, todellinen ja kaupallinen – joista viimeksi mainittu ottaa huomioon poikkeustilanteissa tarvittavan varapolttoaineen tai -energian, joka koostuu reittivarapolttoaineesta, varalentopaikalle lentämiseen tarvittavasta polttoaineesta, loppuvarapolttoaineesta sekä lisäpolttoaineesta (Euroopan Komissio, 2021b). Tämän selvityksen kannalta kaupallinen kantama (eng. *commercial range*) on olennainen tunnusluku, sillä varapolttoaineen merkitys korostuu voimakkaasti kantaman ollessa

lyhyehkö. Lentokonevalmistajien ilmoittama kantama voi olla kuitenkin mikä tahansa näistä kolmesta eri kantama-arvosta. Arvioiden mukaan monet kuvassa 9 esitetyt kantamat ovat todellisia kantamia, eli niissä ei ole otettu huomioon varapolttoaineen tarvetta. Kuvassa 10 on puolestaan esitetty arvioita eri käyttövoimia hyödyntävien lentokoneiden kapasiteetin ja kantaman kehityksestä.

Teknologiataarkastelun johtopäätöksenä voidaan todeta, että akkusähkö on ilmastovaikutuksiltaan ja hyötysuhteeltaan parhain vaihtoehto, mutta kantaman ja kapasiteetin rajoitteet ohjaavat kalustoa varsinkin alkuvaiheessa alueelliseen liikennöintiin sekä lentotaksitoimintaan. Tässä käytössä mahdollisuudet kannattaa hyödyntää täysimääräisesti. Polttokennosähkö kykenee teknologiana pidempään kantamaan ja on keskiuudessa kalustossa potentiaalinen tapa vähentää lentämisen ilmastovaikutusta. Pitkille matkoille ja suurelle kalustolle vetyturbiinit nousevat tärkeäksi teknologiaksi.

Biopolttoaineet ja sähköpolttoaineet ovat erityisesti siirtymäkauden ratkaisuja, kun olemassa olevan kaluston päästöjä vähennetään. Pidemmällä tähtäimellä on epävarmaa, korvaako vety ne pysyvästi. Hyötysuhteen, ilmastovaikutusten ja hyötysuhteen näkökulmasta tämä olisi perusteltua.

2.5.3 Potentiaalisia akkusähkölentokoneita Suomeen vuoteen 2030 mennessä

Heart Aerospace ES-19 – 19-paikkainen sähkölentokone

Ruotsalaisvalmisteinen 19-paikkainen (1+1 istuinta rivillä) akkusähkölentokone on valmistajan ilmoituksen mukaan tarkoitus tulla sarjatuotantoon vuonna 2026. Sitä suunnitellaan Göteborgissa Säven lentoaseman alueella. Sen ilmoitettu maksimikantama on 400 km, mutta varalaskupaikat huomioiden tämä kantama voi jopa puolittua. Lentokone on suunniteltu niin, että sillä voidaan laskeutua myös lyhyille 750 m:n kiitoteille, joita on usein pienillä lentoasemilla. ES-19 sertifioidaan 19-paikkaisten lentokoneiden CS-23-standardien mukaan sen vaativimmalle tasolle 4. ES-19-lentokoneen hankintahinta on valmistajan mukaan samaa luokkaa kuin vastaavilla potkuriturbiinikoneilla, mutta huoltokustannukset ovat valmistajan mukaan 90 % pienemmät ja polttoainekustannukset 50–75 % pienemmät. Matkanopeudeksi esitetään 333 km/h ja suurimmaksi lentonopeudeksi 398 km/h. Lentokone on varustettu neljällä 400 kW:n sähkömoottorilla. Ne saavat virtansa neljästä 180 kWh:n akusta eli lentokoneen akkukapasiteetti on noin 720 kWh. (Smedberg et al., 2021a, s. 8; Heart Aerospace, 2022)

Markkinoilla (valmistajan arvio): 2026



Kuva 11. Heart Aerospace ES-19. (Heart Aerospace, 2022)

Eviation Alice – 9-paikkainen sähkölentokone

Israelilainen startup-yritys Eviation kehittää 9-paikkaista (+2 hengen miehistö) Alice-sähkölentokonetta. Sen kantama on n. 800 km ja matkanopeus 410 km/h. Akkukapasiteetista on käytettävissä 820 kWh. Vuonna 2019 yritys julkisti, että

yhdysvaltalaisyritys Cape Air ottaa Alicen käyttöön osaksi 92 koneen laivastoaan, johon kuuluu pääosin 9-paikkaisia Cessna 402 -lentokoneita. (Eviation, 2022; Smedberg et al., 2021a)

Markkinoilla (valmistajan arvio): 2024



Kuva 12. Eviation Alice. (Eviation, 2022)

Joby Aviation – 4-paikkainen eVTOL-ilma-alus

Yhdysvaltainen Joby Aviation on kehittänyt yli 10 vuoden ajan pystysuoraan nousevaa ja laskeutuvaa (eng. *Vertical Take-off and Landing, VTOL*) sähköistä ilma-alusta. Aluksella on yli 1 000 testilentoa takanaan ja kaupallinen taksilento-toiminta on tarkoitus aloittaa jo vuonna 2024. Koneen ominaisuuksien myötä sillä voitaisiin laskeutua erikseen rakennettaville lentotaksiasemille, ns. vertiporteille, joiden tilantarve on vähäinen ja ne voisivat sijaita kaupungeissa. (Joby Aviation, 2022)

Koneessa on kuusi sähkömoottoria, jotka saavat virtansa koneen neljästä erillisestä akkupaketista. Akkupaketien kapasiteettia ei ole kerrottu julkisuuteen. Koneeseen mahtuu lentäjän lisäksi neljä matkustajaa ja sen kantama on n. 240 km. Nopeutta koneella on maksimissaan 320 km/h, mutta matkanopeus on tätä hieman matalampi. Valmistajan mukaan alus on 100 kertaa helikopteria hiljaisempi. Matkanopeuksissa äänitaso on 40 dBA ja nousun aikana 65 dBA. (Joby Aviation, 2022)

Markkinoilla (valmistajan arvio): 2024



Kuva 13. Joby eVTOL. (Joby Aviation, 2022)

2.5.4 Sähköinen lentäminen talviolosuhteissa

Suomen talviolosuhteet voivat osaltaan olla haaste sähköiselle lentämiselle. Tämä onkin yksi syy siihen, miksi Suomessa ja muissa pohjoismaissa on haluttu olla sähköisen lentämisen kehityksen eturintamassa (Avinor & Luftfartstilsynet, 2020, s. 6; Finnair, 2021). Pohjoismaisen ilmaston kestävä lentokone kestää todennäköisesti muuallakin maailmassa, mutta lentokoneen muokkaaminen jälkikäteen talvioloihin sopivaksi (eng. *weather proofing*) voi olla erittäin haastavaa. Samaa logiikkaa on käytetty myös automaattisen tieliikenteen kehityksessä Suomessa.

Lämpötilalla ja sääolosuhteilla voi olla vaikutusta sähkölentokoneiden kantamaan. Tämä johtuu jäänestöjärjestelmiin vaadittavasta ylimääräisestä energiasta sekä jäännösjäästä suojaamattomissa lentokoneen komponenteissa. Vaikutusten ei kuitenkaan arvioida olevan kovinkaan merkittäviä, sillä lentokoneissa käytetään matalan energiakulutuksen järjestelmiä. (Heart Aerospace, 2022)

Ulkolämpötilan suora vaikutus energiankulutukseen on oletettavasti lentokoneiden tapauksessa maltillinen, sillä lentokorkeudessa (yli 5 km) lentokonetta ympäröivän ilman lämpötila on tyypillisesti alle -30°C , potentiaalisesti jopa -60°C (Ilmatieteen laitos, 2021). Lentokoneiden ja akkujen tulee siis kestää sekä huomattavan kylmiä lämpötiloja että huomattavan suuria lämpötilan vaihteluita, ja lentokonevalmistajien tulee ottaa tämä joka tapauksessa huomioon.

Perinteisten polttomoottorikäyttöisten lentokoneiden tapauksessa sähköä ja lämmintä ilmaa on saatu lentokoneiden moottoreista työntövoiman sivutuotteena, mutta sähkölentokoneessa ne tulisi tuottaa erikseen (Finnair, 2022a). Heart Aerospace on tutkimassa, voisiko sähkömoottorien ja niiden komponenttien tuottamaa lämpöä hyödyntää täydentämään ilmastointilaittejärjestelmää (eng. *Environmental Control System*). Tämä vähentäisi energian kulutusta. Kääntöpuolena on, että tällainen järjestelmä painaisi ja maksaisi enemmän. (Heart Aerospace, 2022)

2.6 Lentoliikenteen yleinen regulaatio



LUVUN KESKEINEN SISÄLTÖ

- Lentoliikenne on turvallisuussyistä hyvin säännelty ala
- Sääntelyssä eli regulaatiossa käsitellään yksityiskohtaisesti niin lentopaikkoja, lentotoimintaa kuin siviili-ilmailun turvaamistakin
- Regulaation ehdot on täytettävä, jotta lentoliikennettä voidaan harjoittaa
- Regulaation asettamien vaatimusten tulee täytyä kaikilta osin ennen kuin sähköisiä lentokoneita voidaan hyödyntää
- Regulaation määrittävät pitkälti kansainväliset organisaatiot, kuten ICAO ja EASA. Kansallisen regulaation merkitys ja määrä on vähentynyt 2000-luvun aikana
- Suomessa Traficom vastaa kansainvälisen regulaation noudattamisesta ja kansallisen regulaation kehittämisestä

2.6.1 Kansainvälinen regulaatio ja kotimainen viranomaistoiminta

Lentoliikenteen regulaatio eli sääntely pohjautuu kansainvälisiin standardeihin ja suosituksiin, joiden ansiosta lentoliikenteen turvallisuuteen

liittyvät käytännöt ovat globaalisti melko yhtenäiset. Sääntelyä kehittävät ja valmistelevat muun muassa YK:n alainen Kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö ICAO (*International Civil Aviation Organization*) sekä EU:n alainen Euroopan lentoturvallisuusvirasto EASA (*European Aviation Safety Agency*). EASA:n ehdottama sääntely saatetaan usein laeiksi EU:n lainsäädäntöprosessin kautta. EASA:n regulaatio on velvoittavaa kaikissa EU:n jäsenmaissa. Suomessa kansainvälisen lentoliikenteen sääntelyn noudattamisesta vastaava organisaatio on Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. (Traficom, 2021a; Trafikanalys, 2020, s. 23)

Traficom vastaa myös Suomen kansallisesta lentoliikenteen sääntelystä. Kansallisen sääntelyn merkitys on nykyisin pieni. Traficomın mukaan ”EU-sääntelyn soveltamisalan laajentuessa kansallisten ilmailumääräysten kattama alue on merkittävästi kaventunut, ja kansallisen sääntelyn piiriin kuuluvat nykyisin lähinnä valtion ilmailu sekä lentotoiminta EASA-perusasetuksen (EU) 2018/1139 liitteessä I tarkoitetuilla ilma-aluksilla (mm. historialliset, experimental- ja harrasterakenteiset ilma-alukset sekä ultrakevyet lentokoneet ja autogiroit).” (Traficom, 2021a)

Tässä ja seuraavissa alaluvuissa käsiteltävä regulaatio ei ole sidonnaista lentokoneen käyttövoimaan. Samat säännöt koskevat nykyistä polttomoottorikalustoa. Sähköiseen lentämiseen liittyvää sääntelyä on kuvattu alaluvussa 2.7. *Yleinen* lentämisen regulaatio vaikuttaa sähkölentokoneiden käyttöön matkustajaliikenteessä monelta osin enemmän kuin *sähköisen* lentämisen regulaatio, joka on vasta kehitysvaiheessa.

2.6.2 Lentopaikkoja koskeva regulaatio

Kaupallisessa lentoliikenteessä käytettävien lentopaikkojen on täytettävä EU-asetusten¹ mukaiset vaatimukset. Käytännössä vaatimukset liittyvät erityisesti lentopaikkojen toimintaan ja turvallisuuteen kaikissa oloissa. Lentopaikoille on esimerkiksi järjestettävä pelastus- ja palontorjuntavalmius.

Lentopaikka-termillä tarkoitetaan EU:n asetuksen 2018/1139 mukaan mitä tahansa ”määriteltyä aluetta maalla tai vedessä taikka kiinteällä tai merellä olevalla kiinteällä tai kelluvalla rakennelmalla, joka on tarkoitettu käytettäväksi kokonaan tai osittain ilma-alusten saapumista, lähtemistä ja maassa tai vedessä liikkumista varten, kaikki sillä olevat rakennukset, laitteet ja varusteet mukaan luettuina”, mutta tätä **EU-asetusta sovelletaan vain kaikkien alla kuvattujen ehtojen toteutuessa:**

- i. lentopaikka on julkisessa käytössä,
- ii. lentopaikalla harjoitetaan kaupallista ilmakuljetusta,
- iii. lentopaikalla on vähintään 800 metrin pituinen päällystetty mittarikiitotie tai sitä käyttävät vain helikopterit mittarilähestymis- tai -lähtömenetelmiä käyttäen

¹ Erityisesti seuraavat:

- Komission asetus (EU) N:o 139/2014, annettu 12 päivänä helmikuuta 2014, lentopaikkoihin liittyvistä vaatimuksista ja hallinnollisista menettelyistä Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen (EY) N:o 216/2008 mukaisesti
- Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2018/1139, annettu 4 päivänä heinäkuuta 2018, yhteisistä siviili-ilmailua koskevista säännöistä ja Euroopan unionin lentoturvallisuusviraston perustamisesta --
- Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EY) N:o 300/2008, annettu 11 päivänä maaliskuuta 2008, yhteisistä siviili-ilmailun turvaamista koskevista säännöistä ja asetuksen (EY) N:o 2320/2002 kumoamisesta

Asetuksen noudattamiseen on mahdollista hakea poikkeusta, mikäli lentopaikan matkustajamäärä alittaa 10 000 matkustajaa vuodessa ja rahtilentojen määrä 850 lentoa vuodessa (Euroopan Komissio, 2021c). Suomessa ei ole otettu käyttöön mahdollisuutta poiketa EU-asetuksesta, vaikka matkustajamäärä ja rahtilentojen määrä jäisivät näiden kynnyksarvojen alle.

Suomessa asetusta on tulkittu siten, että **asetuksen mukaisia lentopaikkoja ovat lentoasemina tunnetut valvotut lentopaikat**. Tällaisia ovat muun muassa Finavian omistamat Helsinki-Vantaan, Oulun, Tampere-Pirkkalan ja Savonlinnan lentopaikat (Finavian omistuksessa yhteensä 20 lentoasemaa) sekä Lappeenrannan, Enontekiön, Mikkelin ja Seinäjoen lentopaikat (kunnan, yhtiön tai säätiön omistuksessa). Ilmailulain (864/2014) 75 §:ssä lentoaseman on määritelty tarkoittavan ”lentopaikkaa, jossa lentotiedotuspalvelu, hälytyspalvelu, ilmaliikenteen neuvontapalvelu ja lennonjohtopalvelu on pysyvästi järjestetty” (Finlex, 2022). Vaikka kaikille lentoasemille ei lennetä tällä hetkellä säännöllisesti kaupallisia lentoja, on uusien lentoreittien aloittaminen näiltä lentopaikoilta toteutettavissa suhteellisen helposti.

Puhekielessä pienlentopaikoiksi tai korpikentiksi kutsutut, miehittämättömät ja valvomattomat lentopaikat (esimerkiksi Lahti-Vesivehmaan, Sodankylän ja Ylivieskan lentopaikat) eivät puolestaan kuulu EU-asetusten sovellusalueeseen niin kauan kun niillä ei ole merkittävää määrää kaupallista lentoliikennettä. Valvomattomien lentopaikkojen rakentamisesta ja ylläpidosta säädetään kansallisella ilmailumääräyksellä AGA M1-1 (Traficom, 2022b). **Mikäli sähkölentokoneilla haluttaisiin operoida kaupallisia lentoja – erityisesti kaikille avoimia matkustajalentoja – näille lentopaikoille, tulisivat kyseiset lentopaikat samalla myös EU-asetusten ja niistä aiheutuvien vaatimusten piiriin.** Tämä puolestaan aiheuttaisi merkittäviä investointitarpeita, kuten esimerkiksi lentopaikan alueen sulkemisen ulkopuolisilta (käytännössä aitaaminen), turvallisten alueiden sekä turvatarkastusten järjestämisen lentopaikalle, ilmaliikennepalvelujen (eng. *ATS*) järjestämisen (käytännössä lennonjohto), sekä jo edellä mainitun pelastus- ja palontorjuntavalmiuden järjestämisen.

2.6.3 Lentotoimintaan liittyvät vaatimukset

Lentotoimintaan liittyvät vaatimukset riippuvat siitä, minkä tyyppisestä lennosta on kyse. Tässä alaluvussa keskitytään kaupallisen matkustajalentotoiminnan regulaatioon (CAT, *Commercial Air Transport*) ja EU-asetukseen 965/2012² sen tulevine muutoksineen³. **Kaupallisella lentotoiminnalla** tarkoitetaan edellä mainitun asetuksen mukaan ”yleisön saatavilla olevaa lentotoimintaa ilma-aluksella maksusta tai muutoin vastikkeellisesti, tai silloin, kun lentotoiminta ei ole yleisön saatavilla, lentotoiminnan harjoittajan ja asiakkaan välisen sopimuksen nojalla harjoitettua lentotoimintaa, jossa lentotoiminnan harjoittaja ei ole asiakkaan määräysvallassa.”

Taksilentoja⁴ koskeva regulaatio on erilaista kuin kaikille avointa matkustajaliikennettä koskeva regulaatio. Taksilentoja voidaan esimerkiksi sääntelyn puitteissa lentää miltä tahansa lentopaikalta, kunhan lento-olosuhteet ovat

² Komission asetus (EU) N:o 965/2012, annettu 5 päivänä lokakuuta 2012, lentotoimintaan liittyvistä teknisistä vaatimuksista ja hallinnollisista menettelyistä Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen (EY) N:o 216/2008 mukaisesti

³ Komission täytäntöönpanoasetus (EU) 2021/1296, annettu 4 päivänä elokuuta 2021, asetuksen (EU) N:o 965/2012 muuttamisesta ja oikaisemisesta polttoaine-/energiasuunnittelua ja polttoaineen/energian kulutuksen hallintaa koskevien vaatimusten sekä tukiohjelmia, ohjaamomiehistön psykologista arviointia ja psykoaktiivisten aineiden testausta koskevien vaatimusten osalta; voimaan 30.10.2022

⁴ EU:n komission asetus 965/2012, 2. artiklan kohdan 6 mukaan taksilentotoiminnalla tarkoitetaan ”lento- ja työaikarajoitusten yhteydessä ei-aikataulunmukaista tilauksesta harjoitettavaa kaupallista ilmakuljetustoimintaa lentokoneella, jonka suurin käytettävä matkustajapaikkaluku (MOPSC) on enintään 19”

suotuisat. Sää voi kuitenkin olla merkittävä rajoite, sillä lähes kaikki Suomen valvomattomista lentopaikoista ovat olleet sellaisia, joille laskeudutaan näkölento-olosuhteissa (VFR, *visual flight rules*). Näitä lentopaikkoja voidaan siten käyttää liikennöinnissä lähinnä päiväsaikaan ja pilvisyyden ollessa riittävän vähäistä. Mittarilentoon (IFR, *instrument flight rules*), jonka avulla voitaisiin laskeutua myös pimeällä tai huonon näkyvyyden aikana, tarvittavia laitteita on käytössä kaikilla lentoasemilla, mutta vain harvoilla valvomattomista lentopaikoista (Fintraffic, 2021a). Valvomattomalle lentopaikalle on kuitenkin mahdollista hyväksyä mittarilentomenetelmiä (Traficom, 2022b; Traficom, 2019).

Taksilentoja on myös mahdollista operoida valvomattomilta lentopaikoilta tai -paikoille ilman lennonvarmistusta. Kaikille avoimessa matkustajaliikenteessä tämä ei sen sijaan ole mahdollista. Koska valvomattomilla lentopaikoilla ei ole lennonvarmistusta, ei näitä voida myöskään käyttää kaikille avoimen matkustajaliikenteen operointiin⁵. Lennonvarmistuksen näkökulmasta, mikäli avointa matkustajaliikennettä haluttaisiin lentää joltakin nykyisistä valvomattomista lentopaikoista, voisi etälennonjohdon hyödyntäminen olla kustannustehokas ratkaisu.

Jotta lentopaikkaa voitaisiin käyttää edes varalaskupaikkana kaupallisilla lennoilla, tulee lentopaikan olla talvihoitettu. Useimmilla Suomen pienistä lentopaikoista ei kuitenkaan nykyisin suoriteta säännöllistä talvihoitoa. Lisäksi mittarilaskeutumismahdollisuuden puute estää myös useiden lentopaikkojen käytön varalaskupaikkoina, kun kyse on kaikille avoimesta matkustajaliikenteestä.

Sekä kaupallisille että ei-kaupallisille lennoille tulee varata riittävästi polttoainetta – sähkölentämisen tapauksessa energiaa – että suunnitellun varsinaisen reitin lisäksi voidaan tarvittaessa lentää alkuperäisestä määränpäästä varalentopaikalle, ja vielä tämän jälkeen jatkaa lentämistä jonkin aikaa (ns. loppuvarapolttoaine). EU-sääntelyn mukaan sekä kaupallisilla että ei-kaupallisilla lennoilla loppuvarapolttoainetta tulee olla lentokoneen moottorityypistä riippuen 30 tai 45 minuutin lentoajaksi normaalilla lentonopeudella. USA:ssa loppuvarapolttoaineen on aina riitettävä 45 minuutin lennolle. (EASA, 2019; Euroopan Komissio, 2021b; eCFR, 2022)⁶

EU-sääntelyyn lokakuussa 2022 voimaan tulevissa muutoksissa on huomioitu sähkölentokoneiden käyttöönotto siten, että polttoaineiden rinnalla puhutaan energiasta (esim. loppuvaraenergia). Sähkölentokoneiden kannalta tulkinnanvaraista on, että loppuvarapolttoaineen tai -energian määrä on sekä voimassa olevassa että tulevassa määritetty vain mäntä- ja turbiinimoottorikäyttöisille lentokoneille, joita kumpiakaan propelleilla varustetut sähkölentokoneet eivät välttämättä ole. Tältä osin regulaation voi olettaa vielä tarkentuvan tulevaisuudessa. (Euroopan Komissio, 2021d; EASA, 2019)⁷

Sähkölentokoneiden kannalta varalentopaikalle lentämiseen ja loppuvarapolttoaineeseen liittyvät vaatimukset ovat merkittäviä. Mikäli lentokonevalmistajien sähkölentokoneille ilmoittamat kantamat ovat teoreettisia tai todellisia kantamia (ks. alaluku 2.5.2), kaupallinen kantama voi olla jopa alle puolet tästä ilmoitetusta kantamasta. Tämä rajoittaisi sähkölentokoneille soveltuvien reittien määrää huomattavasti.

⁵ EU:n komission asetus 965/2012, kohta CAT.OP.MPA.107 Riittävä lentopaikka: ”Lentotoiminnan harjoittajan on katsottava lentopaikka riittäväksi, jos lentopaikka on aiottuna käyttöajankohtana käytettävissä ja sillä on saatavissa tarvittavat lisäpalvelut, kuten ilmaliikennepalvelu (ATS), riittävä valaistus, viestintäyhteydet, säätiedotukset, suunnistuslaitteet ja pelastuspalvelut.” Käänteisesti tulkiten lentopaikka ei ole riittävä kaikille avoimen matkustajaliikenteen käyttöön, mikäli edes yksi edellä kuvatuista lisäpalveluista ei ole saatavissa.

⁶ EASA 2019: kohta AMC1 CAT.OP.MPA.150(b)
Euroopan Komissio 2021b: kohdat CAT.OP.MPA.150 sekä NCC.OP.130

⁷ Euroopan Komissio 2021d: kohta CAT.OP.MPA.181; EASA 2019: kohta AMC1 CAT.OP.MPA.150(b)

2.6.4 *Siviili-ilmailun turvaamiseen liittyvät vaatimukset*

Siviili-ilmailun turvaamista koskee erityisesti Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EY) N:o 300/2008. **Mikäli lentoasemalta halutaan operoida kaupallista lentoliikennettä, tulee asetusta noudattaa täysimääräisesti.** Siten lentoasemilla tulee esimerkiksi olla rakennettuna turvavalvottu alue, sillä kaikki matkansa aloittavat matkustajat sekä heidän matkatavaransa "on turvatakkastettava, jotta estetään kiellettyjen esineiden tuominen turvavalvotuille alueille ja ilma-alueeseen". (Euroopan Komissio, 2010)

Turvatakkastusvaatimus ei riipu lentokoneen koosta, joskin säännöistä olisi maakohtaisesti mahdollista poiketa, mikäli lentoasemalla tai sen merkityllä alueella operoitaisiin pelkästään lentokoneilla, joiden suurin sallittu lentoonlähtöpaino on alle 15 tonnia (Euroopan Komissio, 2016). **Suomessa tällainen poikkeamispäätös on tehty.** Ruotsissa sellainen on voimassa vain alle 10 tonnin lentokoneille (Transportstyrelsen, 2021; Trafikanalys, 2020, s. 24). Turvatakkastusvaatimus olisi voimassa myös, jos kaikille avoimia matkustajalentoja operoitaisiin valvomattomilta lentopaikoilta (Traficom, 2021b).

Taksilennot ovat kaupallista lentoliikennettä, mutta kuten edellä kuvattiin, lennettäessä valvomattomalta lentopaikalta toiselle riittävän kevyillä lentokoneilla ei siviili-ilmailun turvaamiseen liittyviä vaatimuksia sovelleta. Traficom on tehnyt valvomattomille lentopaikoille riskiarvioinnin, jonka perusteella niillä ei vaadita erityisiä turvatoimia silloin, jos taksilentoja operoidaan vain satunnaisesti. Jos jollakin näistä lentopaikoista alettaisiin operoida säännöllisiä taksilentoja, tulee Traficomin toteuttaa uusi riskiarvio kyseiselle lentopaikalle.

Mikäli taksilento operoidaan joltakin varsinaisista lentoasemista, tilanne muuttuu edelleen. Tällöin taksilennon matkustajien tulee joko käydä ennen lentoa turvatakkastuksessa, tai lentoaseman henkilökunnan tulee saattaa matkustajat lentokoneelle. Vastaavasti Traficomin mukaan "valvomattomilta lentopaikoilta lentoasemille saapuvia lentoja käsitellään niin sanottuina likaisina lentoina, joiden matkustajat eivät saa sekoittua turvatakkastettujen matkustajien kanssa, eivätkä he voi siirtyä lentoasemalla toiselle lennolle ilman turvatakkastusta". Toiminta näissä tilanteissa on lisäksi kuvattava lentoyhtiön turvaohjelmassa, ja ilma-alueen turvaetsintä on myös suoritettava tarpeen mukaan. Useimmilla Suomen lentoasemista on käytössä yleisilmailulle sekä taksilennoille tarkoitettu ns. merkitty alue, jolta ja jonne voidaan operoida soveltaen erikseen määritellyjä, riskiarvioon perustuvia turvatoimenpiteitä, esimerkiksi lentoaseman palveluaikojen ulkopuolella. (Traficom, 2021b)

2.6.5 *Helikoptereita, drooneja ja VTOL-laitteita koskeva regulaatio*

Helikoptereiden ja muiden pienten lentolaitteiden matkustaja- ja rahtiliikennettä säädellään samoilla asetuksilla kuin lentokoneiden liikennöintiä. Suomessa ei tällä hetkellä ole säännöllistä liikennettä näillä lentolaitteilla.

Ilma-alueen lentoonlähtöön tai laskeutumiseen saa ilmailulain 76 § mukaan "tilapäisesti käyttää avointa vesialuetta sekä alueen omistajan tai haltijan suostumuksella muuta maa- tai vesialuetta, vaikka aluetta ei ole sellaiseen tarkoitukseen erityisesti järjestetty" (Finlex, 2022). Säännöllinen matkustaja- tai rahtiliikenne ei kuitenkaan olisi tilapäistä, joten tällaisessa liikenteessä lentoonlähdön ja laskeutumisen olisi tapahduttava virallisella lentopaikalla. Helikopterilentoaikoja on kuitenkin Suomessa lähinnä sairaaloiden yhteydessä – muita helikopterilentoaikoja on koko Suomessa vain kaksi, joista toinen sijaitsee Kilpisjärvellä ja toinen Kuopiossa (Fintraffic, 2021b). Helikoptereilla voidaan toki operoida myös lentokoneiden käyttämillä lentopaikoilla. Turvatakkastusvaatimukset koskisivat myös helikopteriliikennettä, jollei alaluvussa 2.6.4 mainittua kansallista poikkeusta olisi haettu (Euroopan Komissio, 2010; Euroopan Komissio, 2016).

Helikopterilentopaikan vaatima tila on huomattavan pieni verrattuna lentokoneiden käyttämän lentopaikan vaatimaan tilaan. Helikoptereiden osalta on kuitenkin myös huomioitava niiden mahdollisesti vaatimat suoja-alueet, jotka lisäävät tilantarvetta. Helikopterilentopaikkojen rakentaminen voisi silti olla tältä osin mahdollista kaupunkialueillakin. Tästä huolimatta muun muassa ympäristö- ja melusäännökset saattavat kuitenkin rajoittaa helikopterilentopaikkojen toteuttamista asutuksen lähelle. Sähköisten eVTOL-lentolaitteiden oletetaan olevan nykyisiä helikoptereita hiljaisempia, mikä voisi mahdollistaa laajemman lentopaikkaverkoston näille laitteille.

Helikopterien, droonien ja eVTOL-laitteiden ilmatilan käyttöön liittyy myös rajoituksia. EU-alueella on käynnissä U-space-hanke, jonka tarkoituksena on miehittämättömän ilmailun hallinta sekä yhteensovittaminen miehitetyn ilmailun kanssa. Hankkeella pyritään myös vastaamaan lisääntyvään pienten, usein myös automaattisesti tai etänä ohjattujen, lentolaitteiden käyttötarpeeseen (Eurocontrol, 2021). Toisaalta paikalliset lentorajoitusalueet voivat joissakin tilanteissa rajoittaa esimerkiksi eVTOL-liikenteen käytettävyyttä. Esimerkiksi Helsingissä on muutamia lentokieltoalueita, joiden ilmatilaa ei saa käyttää ilman Traficomın poikkeuslupaa (Traficom Droneinfo, 2021).

2.7 Sähköisen lentoliikenteen regulaatio



LUVUN KESKEINEN SISÄLTÖ

- Sähköistä lentoliikennettä koskeva regulaatio on vasta kehitysvaiheessa, joten sähköiseen lentämiseen sovelletaan perinteisen lentoliikenteen regulaatiota
- Tämä aiheuttaa joskus haasteita, koska regulaatio on saatettu muotoilla siihen oletukseen pohjautuen, että lentokoneessa on aina polttomoottori
- Akku- ja paloturvallisuus edellyttävät uutta regulaatiota sähköiselle lentämiselle
- Sähköisen lentokoneen tyyppihyväksyntäprosessi kestää useita vuosia
- Toistaiseksi tyyppihyväksyntä on helpompi saada enintään 19-paikkaiselle lentokoneelle, koska sen regulaatio on vapaamuotoisempaa kuin suurempien lentokoneiden
- Arvio, että sähkölentokoneita olisi käytössä matkustajaliikenteessä jo vuosina 2025–2026 saattaa olla optimistinen pitkien tyyppihyväksyntäprosessien takia

2.7.1 Sähköisen lentämisen regulaatio kehitysvaiheessa

Sähkökäyttöisten lentokoneiden kohdalla noudatetaan pääosin kaikkia muitakin lentokoneita koskevaa sääntelyä. Eryistä sähköistä lentoliikennettä koskevaa sääntelyä ei ole vielä juuri olemassa, vaan sääntely pohjautuu oletukseen, että kaikissa lentokoneissa on jonkinlainen polttomoottori. Tämä on merkittävä rajoite, sillä sähköiset lentokoneet eivät siis käyttövoimansa takia edes voi täyttää kaikkia nykyisen sääntelyn ehtoja. Toisaalta nykyinen sääntely ei ole myöskään kaikilta osin riittävää, sillä sähköiseen lentämiseen liittyy uusia riskitekijöitä, joita perinteiseen lentämiseen ei ole liittynyt. Tällaisia ovat esimerkiksi akku- ja paloturvallisuuteen liittyvät riskit.

Edellä kuvattujen puutteiden takia sähköisen lentämisen sääntelyä ollaan paraikaa kehittämässä, ja esimerkiksi EASA:n lentokoneiden tyyppihyväksyntää koskevaan sääntelyyn on tehty sähkö- ja hybridilentokoneet huomioon ottavia muutoksia vuonna 2021. Lentokelpoisuutta (eng. *airworthiness*) koskevaan sääntelyyn liittyvä lausuntopyyntö oli kommentoitavana alkuvuodesta 2022. Vetykäyttöisiä lentokoneita nämäkään sääntelyn muutokset eivät vielä salli. (EASA, 2021a; EASA, 2021b; Traficom, 2021c; Trafikanalys, 2020, s. 23–25)

Sähkölentokoneisiin liittyvässä keskustelussa esitetään välillä, että regulaation tulisi joustaa, jotta teknologiaa saataisiin nopeammin käyttöön. Lentoliikenteessä turvallisuus on ylin määrittävä tekijä, joten uuden teknologian käyttöönotossa täytyy varmistua turvallisuudesta kaikin puolin. Uuden teknologian nopea käyttöönotto ei saa heikentää lentämisen turvallisuutta eikä turvallisuuskulttuuria. Ensiarvoisen tärkeää on välttää teknologiasta johtuvia vaaratilanteita tai jopa onnettomuuksia.

2.7.2 Sähköisen ilma-aluksen tyyppihyväksyntä

Kaupalliseen ilmakuljetukseen tarvitaan EU:n lentoliikenneasetuksen mukainen liikennelupa, jonka saamiseksi hakijalla tulee olla EU:n lentotoiminta-asetuksen mukainen lento-operaattorin toimilupa (AOC). Ilma-aluksen liittämiseksi AOC-toimilupaan, tulee ilma-aluksella olla lentokelpoisuustodistus. Lentokelpoisuustodistuksen saaminen on mahdollista vain, jos ilma-alus on tyyppihyväksytty.

Tyyppihyväksynnän saamiseksi hakijan (lentokoneen tyyppisuunnittelusta vastaava organisaatio, usein valmistaja) on osoitettava, että ilma-alus täyttää kaikki sovellettavat lentokelpoisuusvaatimukset. Sovellettavat lentokelpoisuusvaatimukset (sertifiointieritelvät) määräytyvät tyyppihyväksymishakemuksen jättämispäivän mukaan, jonka jälkeen vielä sovitaan sertifiointiviranomaisen kanssa sertifiointisuunnitelma ja mahdolliset erityisehdot, joita etenkin uuden teknologian kyseessä ollen usein tarvitaan.

Tyyppihyväksyntäprosessi on tyypillisesti useiden vuosien projekti tyyppihyväksymishakemuksen jättämisestä tyyppihyväksynnän myöntämiseen. Prosessia voidaan yksinkertaistaen kuvata seuraavasti: ensin testataan kaikki lentokoneessa käytössä olevat komponentit sellaisenaan tai komponenttien muodostamana kokonaisuutena (esim. moottori). Tämän jälkeen lentokoneelle tehdään testejä koneen ollessa maassa (esim. lintuihin osumisesta aiheutuvien vahinkojen testaaminen), ja koneen suorittaessa nämä testit hyväksytysti siirrytään lopulta varsinaisiin koelentoihin. Mikäli tyyppihyväksyntään vaadittavat ehdot eivät täytyisi, joutuu lentokoneen valmistaja tilanteesta riippuen esimerkiksi vaihtamaan tiettyjä koneen komponentteja, tai pahimmillaan jopa suunnittelemaan lentokoneen suurelta osin uudelleen. (Traficom, 2022c; EASA, 2022)

Lentokoneiden tyyppihyväksyntään liittyvät säännöt riippuvat Euroopassa lentokoneen kokoluokasta. Esimerkiksi riittävän kevyet enintään 19 matkustajapaikan lentokoneet hyväksytään EASA:n CS-23-ehtoja noudattaen, kun taas suurempien lentokoneiden tyyppihyväksynnässä noudatetaan CS-25-ehtoja. Näistä CS-23-ehtoja on muutettu vuonna 2017 aiempaa vapaamuotoisemmiksi siten, että täsmällisten teknisten ehtojen noudattamisen sijaan usein riittää, että annetut suorituskyky- tai vastaavat vaatimukset täytetään. (EASA, 2018; Heart Aerospace, 2022)

2.7.3 Sähköisen ilma-aluksen liikennöinti

Varaenergia(polttoaine)vaatimukset vaihtelevat maantieteellisen alueen ja lennon tyyppin mukaan (VFR, IFR). Yleissääntönä voidaan pitää sitä, että merkittävä osa sähkölentokoneen käytettävissä olevasta energiasta on varattava keskeytettyihin lähestymisiin, epäsuotuisiin sääolosuhteisiin yms. Siksi monet valmistajat

keskittyvät alkuvaiheessa hyvin lyhyisiin reitteihin. Tätä ei nähdä operaattorien näkökulmasta ongelmana, sillä sähkölentokoneiden yksikköalous paranee mitä lyhyempi reitti on, sillä latausajat lyhenevät, akku kuluu vähemmän ja lähtöjä voidaan tehdä enemmän päivässä. (Heart Aerospace, 2022)

Säännönmukaisen lentoliikenteen mahdollistamiseksi ilma-aluksella pitää pystyä lentämään myös mittarilento-olosuhteissa. Tämä puolestaan edellyttää *monimoottorikoneille* nykyisellä regulaatiolla lentoreiteille mittarilähestymislaitteilla varustettuja varalentoasemia, joille voidaan lentää alkuperäiselle määräkentälle tehdyn lähestymisyrittöksen jälkeen. Tällä hetkellä mittarilähestymislaitteita on Suomessa käytössä vain varsinaisilla lentoasemilla, mutta niitä odotetaan otettavan käyttöön lähivuosina myös joillakin lentopaikoilla. Akkusähkölentokoneiden rajallinen toimintamatka voi tässä kohtaa muodostua haasteeksi, kun akun kapasiteetin tulee riittää myös varakentälle liikennöintiin.

2.8 Sähköisen lentoliikenteen infrastruktuuri



LUVUN KESKEINEN SISÄLTÖ

- Sähköinen lentäminen edellyttää joko sähkölatausinfrastruktuuria tai vedyn jakeluinfrastruktuuria
- Latausstandardit kehitteillä (MCS) – yli 1 MW latausteho
- Suomessa sähkön saatavuudessa ei ole ongelmia ja lentoasemien sähköinfrastruktuuri ei ole lähtökohtaisesti pullonkaula kehittymiselle
- Isommilla lentoasemilla puhutaan megawattien latauskäyväkyydestä, pienemmillä puolen megawatin
- Investoinnit lataus- ja jakeluinfrastruktuuriin tapahtuvat kysynnän ja kannattavuuden mukaan
- Energiavarastojen rooli kasvaa – siirrettävät ja kiinteät vaihtoehtoina
- Megawattilaturin kustannus arviolta n. 0,5 milj. € + mahdolliset sähkötyöt
- Sähkölatauksen mahdollistamiseen voidaan käyttää osin nykyistä maasähköinfra
- Sähkölentokoneille varataan todennäköisesti omia latauspuistoja
- Sähköinen kalusto asettaa lentoasemille turvavaatimuksia, mm. akkupaloihin varautuminen

Sähköinen lentoliikenne tulee vaatimaan lentoasemilta infrastruktuuri-investointeja. Ensivaiheessa Suomessa voidaan operoida akkusähkölentokoneilla, jotka vaativat sähkölatausinfrastruktuuria. Vuosien 2030–2040 välillä vetykäyttöinen kalusto yleistyy ja edellyttää investointeja nestemäisen vedyn varastointiin ja jakeluun. Tässä luvussa käsitellään erityisesti sähkölatausinfrastruktuurin vaatimuksia.

Alkuvaiheessa voi olla, että itse lentoyhtiöt vastaavat latausasemien rakentamisesta yhteistyössä lentoasemaoperaattorien kanssa, mutta muiden liikennemuotojen sähkölatauksen parissa työskentelevät yritykset tulevat todennäköisesti markkinoille aikanaan. Alueellisessa lentoliikenteessä tyypillinen kääntöaika on noin 30 minuuttia, jonka aikana latauksen on tapahduttava. Oheisessa kuvassa 14 on esitetty esimerkki sähkölentokoneen operointiin ja kenttätoimintoihin liittyvistä seikoista.



Kuva 14. Teoreettinen esimerkki yhdestä edestakaisesta matkasta akkusähkölentokoneella.

2.8.1 Latausstandardit

Tällä hetkellä ei ole olemassa globaalia standardia sähköisten lentokoneiden lataamiselle eikä ylipäättäen raskaille ajoneuvoille. Standardin kehittäminen on kuitenkin työn alla. CharIN-organisaatio, johon kuuluu yli 250 jäsentä globaalisti, kehittää Megawatt Charging System (MCS) -nimellä kulkevaa standardia raskaalle liikenteelle. Organisaation tavoitteena on edistää latausjärjestelmien yhteentoimivuutta pohjautuen CCS-standardiin kaikissa sähköajoneuvoissa globaalisti. Standardi keskittyy luokkien 6, 7 ja 8 hyötyajoneuvoihin, mutta sitä voidaan käyttää busseissa, lentokoneissa tai muissa suurissa akkusähköajoneuvoissa, joissa on suuret akut ja kyky vastaanottaa yli 1 MW:n latausnopeus. (CharIN, 2022)

Standardille on asetettu kattava lista vaatimuksia, mutta keskeisin on kyky ladata yli 1 MW:n teholla 1 500 V ja 3 000 A asti. Tämä teknologinen kyvykkyys riittäisi vastaamaan jopa 1 MWh:n akkupakettien tarpeisiin. MCS-standardin on noudatettava yhdistetyn CCS-latausjärjestelmän kokonaisvaltaista lähestymistapaa ja oltava yhteensopiva olemassa olevan CCS-infrastruktuurin kanssa. Standardi sisältäisi tuen myös käänteiselle virran siirrolle, joka liittyy Vehicle-to-grid (V2G) -ominaisuuteen. (CharIN, 2022) Smedberg, et al. (2021a, s. 19) arvioi, että raskaamman kaluston latauskaapelien telakkateknologia vaatinee myös oman standardinsa, sillä kaapelit voivat olla liian raskaista manuaaliselle käsittelylle.

Myös yhdysvaltalainen SAE on kehittämässä CharIN:n ohella korkeatehoisen lataamisen standardisointia. Standardityö on aloitettu vuoden 2020 lopulla ja jatkuu edelleen. SAE:n organisoima AE-7D-komitea (Aircraft Energy Storage and Charging Committee) vastaa AIR7357-standardin kehittämisestä. AIR7357 sisältää megawattitasoisen ja todella nopean latauksen standardin kehittämisen ilma-aluksille. (SAE, 2022)

2.8.2 Sähköverkko

Sähköverkolla on keskeinen rooli liikenteen sähköistymisessä, sillä se asettaa rajat käytössä olevalle latausteholle. Finavian mukaan sen lentoasemien sähköinfrastruktuuri ei ole pullonkaula kehittymiselle. Sähköinfrastruktuurin investointitarpeita tarkastellaan säännöllisesti Finavian lentoasemilla. Nyrkkisääntönä

voidaan pitää, että isommilla kentillä, kuten Helsinki-Vantaalla, Turussa, Tampereella, Jyväskylässä, Vaasassa, Kuopiossa ja Rovaniemellä puhutaan megawattien lataustehokyykytyydestä, ja näitä pienemmillä lentoasemilla puolen megawatin lataustehosta. Sähköverkko on monella Suomen lentoasemalla elinkaarensa päässä, joten ratkaisuja pohditaan aktiivisesti. (Finavia, 2022a) Tässä mielessä sähköisen lentämisen markkinoille tulon ajoitus on hyvä. On myös huomioitava, että sähköajoneuvojen yleistymisen sekä lentoasemakaluston sähköistyminen vaikuttavat nekin lentoaseman sähköverkon kapasiteetti-vaatimukseen.

2.8.3 Latauspuistot lentoasemilla

Sähköiset lentokoneet tulevat olemaan vielä pitkään nykyistä kalustoa pienempiä, jolloin niiden käyttö siltaympäristössä ei ole mahdollista korkeuseroista johtuen. Matkustajasiltoihin kytkeytyminen edellyttäisi pidempiä siirtymiä tai tasovaihtoratkaisuja, mikä veisi ylimääräistä tilaa lentoasemilta. Siksi on perustelua sekä konekoon että lentoaseman kapasiteetin hallinnan näkökulmasta, että sähkölentokoneiden pysäköinti tapahtuisi ulkopaikoilla.

Toinen ulkopaikkoja puoltava seikka on sähkölentokoneiden lataus ja sen vaatimukset. Useampi yhtä aikaa latausta vaativa sähköinen ilma-alus edellyttää lentoasemilla master planin tekemistä, jossa suunnitellaan niin sanottu oma latauspuisto ilma-aluksille. Latauspuistot mahdollistavat latauksen keskittämisen turvaetäisyyksineen, mikä helpottaa myös sähköinfran suunnittelua. Latausinfrastruktuuria ei ole vielä olemassa Suomen lentoasemilla, mutta sähkölento-koneiden ollessa vielä kehittämissvaiheessa se on luonnollista.

Maasähkö

Sähkölatauksen mahdollistamiseen voidaan käyttää osin nykyistä infraa. Finavian lentoasemilla on olemassa sähkökaivot maavirtalaitteineen. Ne voidaan todennäköisesti konvertoida niin, että paikalle saadaan sähkölatauspiste lentokoneelle maavirran lisäksi. Putkitukset ja maavirtalaitteet edellyttävät kuitenkin lisäinvestointeja. On myös huomioitava, että polttomoottorikoneita on vielä pitkään käytössä, jolloin maavirtakaivojen tilan riittävyys molempien konetyyppien käyttöön on epävarmaa.

Maahuolintakaluston sähkölataus

Maahuolinnan laitteille ja sähkölentokoneille ei voida hyödyntää samaa latausinfrastruktuuria, sillä latausteho- ja turvavaatimukset ovat erilaiset. Helsinki-Vantaalla maahuolinnan ajoneuvoja ladataan terminaalin sisällä tai alla, ja toimijoilla on myös omia varikkoja, joilla on latausmahdollisuus. Sähkölento-koneita ladataan niille määrättyillä latauskentillä turvaetäisyyksineen.

Latauksen kustannusten kohdistaminen

Latauksen kustannusten kohdistamisen tavat lentoyhtiöille ovat vielä epävarmat eikä näihin ole tehty yleisesti linjausta. Koneen tunnistautuminen tapahtuu kuitenkin keskitetyn latauspaikan luona latauksen yhteydessä.

Lataustehotarpeet

Sähkölentokoneiden lataustehotarpeet määrittyvät operatiivisen toiminnan tavoitteiden mukaisesti. Mitä lyhyempänä kääntöaika halutaan pitää, sen nopeampaa latauksen tulee olla. Suurteholataus on kalliimpaa kuin hitaampi lataus, joten kustannusten näkökulmasta suurteholatausta tulisi käyttää vain silloin, kun se on liiketoiminnallisesti perusteltua. Suuritehoinen lataaminen alentaa akun käyttöikää nopeammin kuin hidaslataus.

Suomen reittilentoliikenteen näkökulmasta hidasteholatausta voitaisiin hyödyntää yöaikaan, kun sähkö on halpaa ja koneet ovat maassa. Esimerkiksi 10 tunnin aikana voitaisiin ladata 50 kW teholla akkuihin 500 kWh energiaa. ES-19:n tapauksessa akkujen kapasiteetti on 720 kWh, mikä tarkoittaisi, että ne saataisiin ladattua tällöin lähes täyteen.

Hub-and-spoke-liikenteessä tarvitaan nopeaa latausta, koska lentokoneiden kääntöaikojen tulee pysyä mahdollisimman lyhyinä. Esimerkiksi ATR 72 kääntyy 20–30 minuutissa (Finnair, 2022a) ja vastaavaan pitäisi päästä, kun sähköistä kalustoa on käytössä. Point-to-point-liikenteessä, kuten lentotaksiliikenteessä, rajoitteita on vähemmän.

Kannattavalle lentoliikenteelle on elinehto, että kalustorotaatio on tehokkaasti toteutettu. Siksi päiväsaikaan lentovuoroja on tiheämpään ja koneet pyritään pitämään ilmassa. Näin ollen suurteholataukselle on selvä tarve. Jos ES-19:n kääntöaika lentoasemalla on puoli tuntia ja kone saapuu sinne 30 %:n akku-kapasiteetilla, vaatisi akkujen lataus 90 %:iin noin 1 megawatin lataustehon.

Eräissä tutkimuksissa arvioitiin, että Ateenasta lennettävillä paikallisenlennoilla käytettävien 14 lentokoneen lataamiseen tarvittaisiin 10 kappaletta 400 kilowatin latauslaitteita (Trainelli et al., 2021, s. 23). On arvioitu, että Helsinki-Vantaan sähköverkko mahdollistaisi kolmen sähkölentokoneen yhtäaikaisen latauksen, mikä on todennäköisesti laskettu tehokkaampiin latauslaitteisiin perustuen, mutta tämän tutkimuksen valossa sähkölentämiseen tarvittava latauslaitteiden määrä olisi noin kaksi latauslaitetta kolmea lentokonetta kohden. Todelliseen latauslaitteiden tarpeeseen vaikuttavat lataustehon lisäksi monet muut seikat, kuten lentokoneiden kalustokierto (ts. ovatko kaikki lentokoneet samaan aikaan lentoasemalla) ja niin edelleen.

Ruotsissa on esitetty näkemys, että sähköisen lentämisen aiheuttaman sähköverkon kuormituksen ja siihen liittyvien investointivaatimusten takia sähkölentokoneet soveltuisivat parhaiten pienten lentoasemien välisille lennoille täydentämään jo olemassa olevaa reittiverkostoa⁸ (Trafikanalys, 2020, s. 53). Tällöin Arlandan tai Helsinki-Vantaan kaltaisille lentoasemille ei ensi alkuun juuri lennettäisi sähkölentokoneilla. Tällaisessa ratkaisussa olisi kuitenkin Suomen oloissa heikkoutena se, että sähkölentokoneiden ympäristöhyödyt jäisivät hyvin pieniksi, jos niillä ei voitaisi osittain korvata nykyisiä Helsingin ja muun Suomen välisiä lentoja.

2.8.4 Latausinfra kustannukset

Sähkölatausinvestoinneissa itse laturin investointikustannus on vain osa koko latausinfrastruktuurin kustannuksista. Hollantilaisen selvityksen mukaan sähkölentokoneiden latausinfrastruktuurin kustannukset muodostuvat karkean arvion perusteella taulukon 5 mukaisesti, jossa on kuvattu vaiheittaista rakentamista yksittäisellä lentoasemalla. Kustannukset voivat vaihdella +/- 50 %. (Hak & Driessen, 2021, s. 40). Mitä valmiimpi olemassa oleva sähköinfra on, sen edullisempää sähkölatauksen toteuttaminen on.

Heart Aerospace on arvioinut, että yhden ES-19-koneen laturin kustannus on noin 500 000 \$ (Heart Aerospace, 2022). Tämän ja hollantilaisen tutkimuksen arviot ovat samaa suuruusluokkaa. Näiden arvioiden mukaan yksi n. 1 MW:n laturi maksaisi siis n. 450 000 €. Muut kustannukset määräytyvät olemassa olevan sähköinfrastruktuurin mukaisesti.

⁸ "Det är framförallt [sic] om det uppstår ett nav för elflyget, exempelvis på Arlanda, som innebär att flera flygplan behöver laddas samtidigt som det uppkommer riktigt stora effektbehov. Utifrån denna synvinkel vore det därför önskvärt om elflyget bygger upp ett nytt flygnät som i möjligaste mån undviker det befintliga flygets trafiknav."

Taulukko 5. Latausinfrastruktuurin kustannusten jakautuminen Bonairen lentoasemalla vaiheittaisessa tarkastelussa. Oletuksena on, että sähköliittymän kokoa joudutaan kasvattamaan, maansiirtotyötä tarvitaan uusien kaapelien asennukseen ja sähkölataus- asemien ympäristöä pitää parantaa, jotta latausasemat voidaan asentaa. (Hak & Driessen, 2021, s. 41)

Kustannuserä	2026: 400 kW laturi	2030: 400 kW + 900 kW laturi	2035: 2x 400kW + 2x 900 kW
<i>KytKentä sähköverkkoon: kaapelit ja maansiirtotyöt</i>	100 000 €	50 000 €	50 000 €
<i>Sähkölatausaseman ympäristön valmistelutyöt</i>	100 000 €	100 000 €	200 000 €
<i>Sähkölatausaseman/asemien hinta</i>	350 000 €	800 000 €	1 150 000 €
<i>Sähkövarastoasema</i>	50 000 €	100 000 €	150 000 €
<i>30 %:n riskikerroin (saarimainen ympäristö rakentamisessa)</i>	200 000 €	350 000 €	500 000 €
Yhteensä	1 000 000 €	1 500 000 €	2 200 000 €

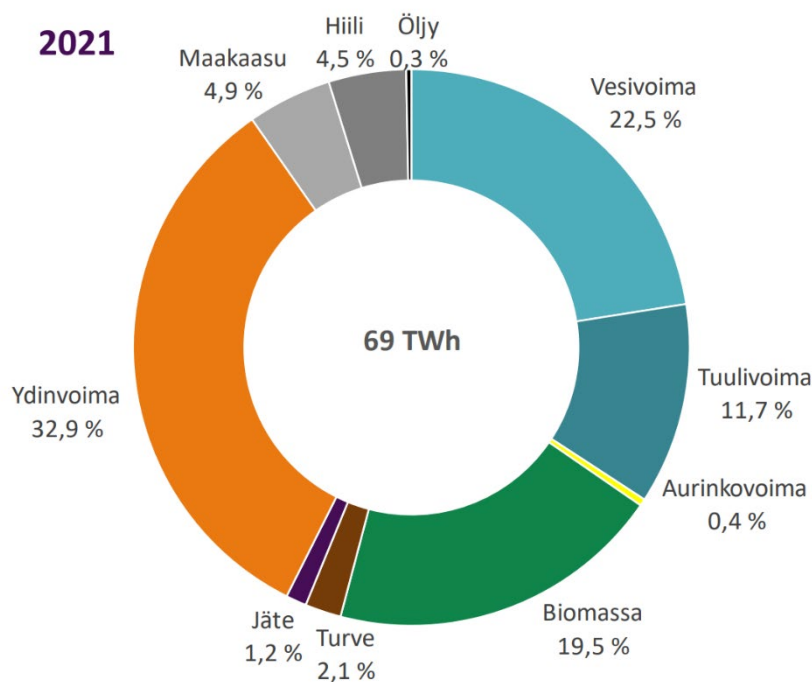
2.8.5 Akkujen latausominaisuudet

Sähkölentokoneet tulevat operoimaan hyvin vaihtelevissa olosuhteissa sekä lentoasemilla että ilmatilassa, mikä asettaa erityisvaatimuksia akkujen ominaisuuksille. Akut toimivat parhaiten 15–30 asteen lämpötiloissa, ja tämän alueen ulkopuolella niiden ominaisuudet heikkenevät. Akun lataamisen ja akun purkautumisen aikana syntyy lämpöä, joka pitää hallita. Lentokoneelle jäähdytystarvetta on erityisesti suurteholatauksen ja lentoonlähdon hetkillä. Vastaavasti laskeutumisessa ja korkealla matkanopeuksissa on tarvetta lämmön säilyttämiselle, jotta lämpötilat eivät laske liian alhaisiksi. Akkujärjestelmien jäähdytysratkaisu tulee todennäköisesti toimimaan nestejäähdytyksellä. (Reimers, 2020)

Kuten sähköautoissa, myös sähkölentokoneiden akkuja voidaan säädellä tiettyyn lämpötilaan. Esimerkiksi ennen latauksen aloittamista, akut voidaan tarvittaessa esilämmittää, jotta akku ottaa vastaan mahdollisimman suurta lataustehoa. Edistyneet akunvalvontajärjestelmät pitävät huolen, että sähkölentokoneiden akut toimivat kussakin olosuhteessa optimaalisessa lämpötilassa. Toisin kuin sähköautoissa, sähkölentokoneilla tuskin on spontaaneja käyttötarkoituksia, jolloin akkuja ei ehditä valmistella ja operointi tapahtuu epäoptimaalisissa lämpötiloissa. Näissä tapauksissa sähköautojen kantama ja akkujen käyttöikä lyhenee. Heart Aerospaceen mukaan sähkölentokoneiden akut toimivat kontrolloidussa ympäristössä, ja koska iso osa akuista toimii reservinä, virta purkautuu niistä harvoin kokonaan (Heart Aerospace, 2022). Sähkölatauksessa on myös huomioitava, että matalilla varaustasoilla akut ottavat parhaiten lataustehoa vastaan, kun taas varaustasojen kasvaessa latausteho heikkenee. Siksi litiumioniakuille tyypillinen n. 20–80 %:n varaustaso on sekä lataustehon että akkujen käyttöiän näkökulmasta optimaalinen.

2.8.6 Hiilineutraalin sähkön tarjonta Suomessa

Jotta sähköinen lentäminen olisi aidosti nollapäästöistä, tulee koko sähkölatauksen ketjun olla nollapäästöinen. Sähköinen lentokone ei tuota lennon aikana päästöjä, joten prosessin aiemmat vaiheet on tärkeä ottaa huomioon päästölaskelmissa. Suomessa sähköntuotannon päästökerroin vuonna 2021 oli 71 g CO₂/kWh, kun vuonna 2018 se oli 101 g CO₂/kWh. (Fingrid, 2022) Suomen sähköntuotannosta vuonna 2021 tuotettiin 54 % uusiutuvalla energialla ja 87 % hiilidioksidineutraalilla energialla (Energiateollisuus, 2022). Vuonna 2021 tuulivoima tuotti n. 8 TWh energiaa. Suomen Tuulivoimayhdistyksen mukaan Suomen tuulivoiman potentiaali on 30 TWh vuonna 2030.



Kuva 15. Suomen sähköntuotannon jakauma vuonna 2021. (Energiateollisuus, 2022)

Sähköenergiaa voidaan saada joko sähköverkosta tai paikallisesti tuotettuna lentoasemalla. Sähköä voidaan ottaa sähköverkosta tarpeen mukaan, mutta yhteiskunnan eri toimintojen sähköistyessä, tulee verkon kyetä vastaamaan suuriinkin kysyntäpiikkeihin. Suuret vaihtelut sähkön käytössä aiheuttavat erilaisia häiriöitä sähköverkkoihin, ja siksi regulaatiolla ja taloudellisin keinoin pyritään ohjaamaan kysyntää tasaisemmaksi ympäri vuorokauden.

Lentoasemaympäristössä tällainen aikatauluihin mukautuminen voi olla haastavaa. Siksi lentoasemat voivat varautua tulevaisuuteen tuottamalla energiaa itse lentoasemalla tuuli- tai aurinkovoimalla ja varastoimalla energiaa sähkövarastoihin. Tällä parannetaan sähkön toimitusvarmuutta, johon sujuva sähköinen lentäminen nojautuu. (Hak & Driessen, 2021) On kuitenkin arvioitu, että tuulivoiman tuotanto lentoasemilla on erittäin haasteellista turvallisuusnäkökulmien vuoksi (Finavia, 2022a).

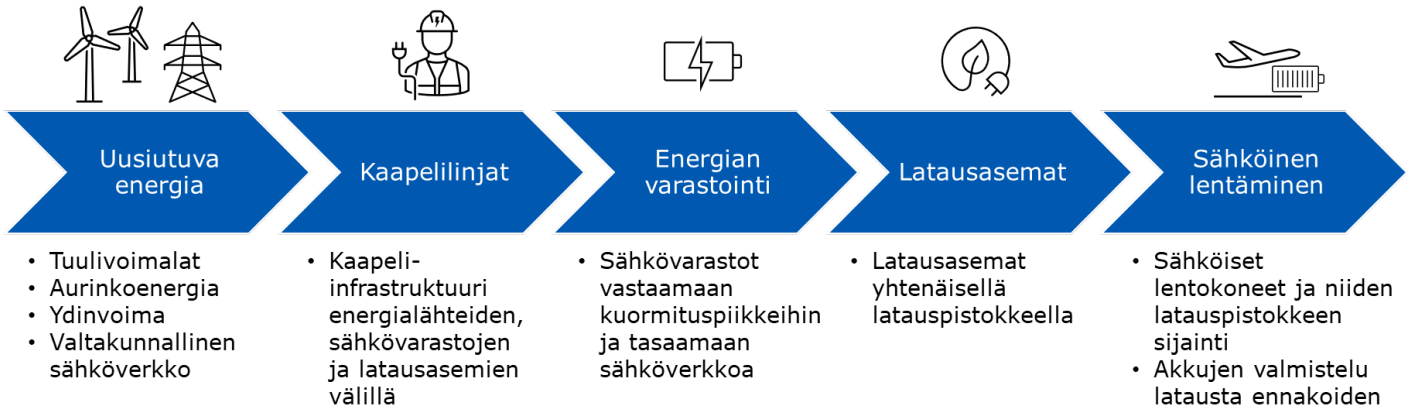
2.8.7 Sähkövarastot

Sähkövarastoilla on tulevaisuudessa tärkeä rooli uusiutuvan energian tuotannossa ja älykkäässä sähköverkossa. Akut voivat toimia sähkövarastoina sähköisten latauspisteiden yhteydessä ja tasata verkon kuormaa läpi vuorokauden. Finavian mukaan sähkövarastoihin on kaksi mahdollista ratkaisua käyttötarpeen ja kohteen

mukaan: kiinteät ja liikuteltavat sähkövarastot. Kiinteät varastot sopivat yli 1 MWh kapasiteettitarpeisiin ja siitä alaspäin voidaan käyttää siirrettäviä latausvaunuja. Siirrettävä akkuvarasto on hyvin muuntojoustava tapa ja ne sopisivat erityisesti pienemmille lentoasemille.

Sähkövarastoilla voidaan myös joissain tapauksissa välttää kalliit sähköliittymäinvestoinnit, kun osa sähkölatauksen virrasta voidaan ottaa sähkövarastoon aiemmin ladatusta energiasta eikä sähköverkosta (Finavia, 2022a). Erityisesti pienemmillä lentoasemilla suurteholaturien asentamisen yhteydessä voidaan tarkastella sähkövarastoa yhtenä keinona alentaa investoinnin kustannuksia. Sähkövarastot voivat vaikuttaa myös tehomaksujen määrään alentavasti.

Finavia käyttää tuulisähköä sähköenergiana lentoasemillaan. Aurinkosähköä tuotetaan myös osittain. Aurinkosähkön tuotannon kasvattamisessa on haasteena erityisesti talviajan heikko energiantuotto. Aurinkosähkö ei riittäisi sellaisenaan lentoaseman toiminnan pyörittämiseen, saati akkuvarastojen tai sähkölento-koneiden lataamiseen. Kuvassa 16 on esitetty kootusti sähköenergian tarjonnan ketju lentoasemille.



Kuva 16. Sähköenergian tarjonnan ketju nollapäästöiselle sähkölentämiselle. Muokattu lähteestä (Hak & Driessen, 2021, s. 17)

2.9 Sähköisen lentämisen kustannukset



LUVUN KESKEINEN SISÄLTÖ

- Lentoliikenne on kilpailtu ja matalakatteinen ala, mikä voi hidastaa uuden kaluston käyttöönottoa
- Lentämisen kustannukset voidaan jakaa suoriin, epäsuoriin ja muihin kustannuksiin
- Sähköinen lentäminen voi vaikuttaa erityisesti suoriin kustannuksiin. Valmistajat arvioivat, että energia- ja huoltokulut ovat 50–70 % vastaavaa potkuriturbiinikalustoa pienemmät
- Kalustosta aiheutuvat pääomakulut voivat olla ensi alkuun suuremmat, kun kalustoa ei ole vielä laajassa sarjatuotannossa. Tuotantomäärien kasvaessa kulut laskevat.
- Työssä tarkasteltujen tutkimusten mukaan sähköisellä kalustolla operoitaessa suorat ja epäsuorat kustannukset voivat oletuksista riippuen olla 5–22 % vastaavaa potkuriturbiinikalustoa pienempiä
- Sähköinen lentoliikenne voi parantaa eri alueiden saavutettavuutta, mikä tuo yhteiskunnallisia hyötyjä, kuitenkin ilman päästölisäystä

2.9.1 Lentoliikenteen kustannusrakenne

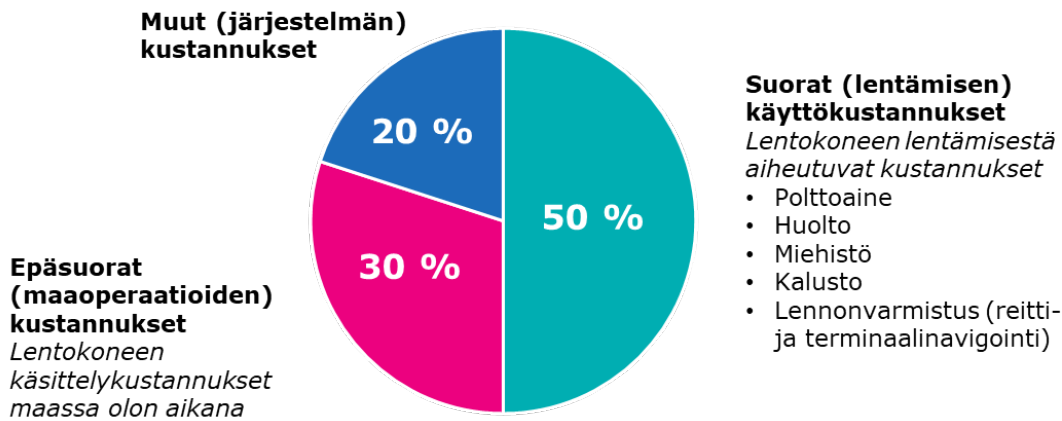
Lentoliikenne on kilpailtu ja matalakatteinen ala. Koronapandemian myötä lentoyhtiöiden tulokset ovat romahtaneet, mutta palautuminen on jo alkanut. Airbusin arvion mukaan matkustajamäärät palaisivat vuoden 2019 tasoon vuosien 2023–2025 aikana (Airbus, 2021). Lentoyhtiöt kilpailevat kohdemarkkinansa mukaan joko globaalisti, alueellisesti tai lokaalisti. Lentoyhtiöt voidaan jakaa niiden liiketoimintamallien mukaan mannertenvälisiin, mannerten sisäisiin ja alueellisiin lentoyhtiöihin sekä charter- ja liikelentoyhtiöihin. Sähköisen lentämisen teknologisten rajoitteiden vuoksi alueelliset lentoyhtiöt ja liikelentoyhtiöt ottavat ne todennäköisesti ensimmäisinä käyttöönsä. Heart Aerospace tähtää 19-paikkaisella lentokoneellaan juuri lyhyen kantaman markkinaan (Heart Aerospace, 2022).

Perinteisesti suuret lentoyhtiöt tavoittelevat suuruuden ekonomiaa. Alueelliset lentoyhtiöt puolestaan pyrkivät pienemmällä kalustolla vastaamaan pienempään matkustajakysyntään ja saamaan hyvän kalustorotaation aikaseksi.

Lentoyhtiöiden kustannusrakenne voi vaihdella merkittävästi riippuen lentoyhtiön kohdemarkkinasta, koosta ja muista ominaisuuksista. Kustannukset jaetaan myös lähteessä riippuen erilaisiin kategorioihin. Tässä työssä on valittu ICAO:n tietojen pohjalta määritetty kustannusrakenne sen selkeyden vuoksi (ICAO, 2017). Kustannukset jakautuvat tällöin kuvan 17 mukaisesti lentämisestä aiheutuviin suoriin kustannuksiin, maaoperaatioista aiheutuviin epäsuoriin kustannuksiin sekä muihin kustannuksiin.

Suorat (lentämisen) kustannukset sisältävät polttoaineen, huollon, miehistön, kaluston ja lennonvarmistuksen kulut. Polttoainekustannus on kulloisenkin käyttövoiman mukainen energiakustannus. Huolto sisältää sekä moottoreiden että lentokaluston huollon. Lentokaluston omistuksen kustannukseen sisältyvät poistot, vakuutukset ja korot. Miehistön kustannukset koostuvat ohjaamo- ja matkustamohenkilökunnan palkoista, lisistä, koulutuksesta ja etuuksista. Lennojohtokustannukset sisältävät navigointimaksut. (ICAO, 2017)

Epäsuorat (maaoperaatioiden) kustannukset muodostuvat erilaisista lentoasemamaksuista, joita käsitellään tarkemmin myöhemmin. Muut kustannukset muodostuvat lentoyhtiöllä mm. hallinto- ja yleiskuluista, reitistön kehittämiskuluista, mainonnasta ja markkinoinnista sekä matkustajapalvelujen kuluista. (ICAO, 2017)



Kuva 17. Lentoyhtiöiden tyypillinen kustannusrakenne. Prosenttiosuudet voivat vaihdella lentoyhtiöittäin ja liiketoimintamalleittain. Muokattu lähteestä (ICAO, 2017)

2.9.2 Sähköisen lentämisen vaikutukset lentämisen kustannuksiin

Energiakustannukset määräytyvät käytettävän energiamuodon markkinahintojen mukaisesti. Lentopetrolin hinta määräytyy globaaleilla markkinoilla, ja sähkön puolestaan Suomen ja Euroopan tasolla. Polttomoottoreissa tarvitaan myös moottoriöljyjä, joka lasketaan osaksi energiakustannusta. Sähköisen lentämisen energiakustannuksien arvioidaan olevan 50–70 % pienemmät, koska sähkön hinta on lentopetrolia huomattavasti alhaisempi (Heart Aerospace, 2022). On kuitenkin otettava huomioon, että sähkölentokoneet tulevat todennäköisesti vaatimaan suurteholatausta, jonka hinta on hidaslatausta suurempi. Sähkön hintavaihtelut markkinoilla voivat hetkellisesti johtaa korkeaan sähkön hintaan.

Huoltokustannukset koostuvat moottorin ja lentokaluston huoltotoimenpiteistä. Sähkömoottorit eivät ole käyntiaikarajoitteisia toisin kuin kaasuturbiinimoottorit, joten niiden huoltotarve voi olla vähäisempi. Tässä on paljon potentiaalia, mutta tämä tulee todentaa vielä käytännössä. Kaasuturbiinikoneilla pääosa kustannuksista tulee moottorin huollosta, joten jos tämä osuus alenisi merkittävästi, olisi tällä merkitystä. (Finnair, 2022a) Sähköisten lentokoneiden sähkömoottorit ovat arviolta halvempia ja niissä on vähemmän liikkuvia osia. Ne aiheuttavat myös vähemmän tärinää lentokoneen runkoon. Arvioiden mukaan huoltokustannukset olisivat 50–70 % pienemmät kuin potkuriturbiinikoneella (Heart Aerospace, 2022). Akkusähkökoneilla myös akkujen huolto, varastointi ja kuljetus ovat huoltokustannuksiksi laskettavia.

Kaluston omistuskustannukset tulevat todennäköisesti olemaan vastaavia polttomoottorilentokoneita suuremmat sähköisen lentämisen alkutaipaleella. Potkuriturbiinikoneita on ollut tuotannossa jo kymmeniä vuosia, jonka aikana tuotantokustannukset ovat volyymien kasvaessa laskeneet ja asettuneet tietyille tasolle. Potkuriturbiinikalustoa on saatavilla myös käytettynä runsain määrin. Sähköiset lentokoneet ovat edelleen kehitysvaiheessa ja tuotantolinjojen avauduttua vain uutta kalustoa on tarjolla. Sarjatuotannon skaalautuessa tuotantovolyymit kasvavat ja hinnat laskevat. FAIR-hankkeessa arvioitiin, että omistuskustannukset voisivat olla alkuun jopa kaksinkertaiset perinteiseen kalustoon verrattuna (Merenkurkun neuvosto, 2022). Heart Aerospace puolestaan

toteaa, että hankintahinta olisi vastaava kuin perinteisellä kalustolla (Heart Aerospace, 2022).

Miehistön kustannukset määräytyvät tarvittavan henkilökunnan mukaan. Kaupallisessa liikenteessä käytettävissä lentokoneissa tarvittavan lentohenkilökunnan määrä riippuu lentokoneen suurimmasta matkustajamäärästä. Mikäli lentokoneessa on enintään 19 matkustajapaikkaa, ei matkustamohenkilökuntaa tarvitse olla lainkaan. Esimerkiksi ES-19:n kohdalla tämä laskee kustannuksia. Tätä suuremmissa lentokoneissa tulee olla yksi matkustamohenkilökunnan jäsen alkavaa 50 matkustajapaikkaa kohden. Esimerkiksi Finnairin laivastoon kuuluvissa ATR 72 -koneissa on noin 70 matkustajapaikkaa (Finnair, 2022b), joten jokaisella ATR 72:lla lennettävällä lennolla tulee olla mukana kaksi (2) matkustamohenkilökunnan jäsentä riippumatta siitä, montako matkustajaa lennolla on. (Euroopan Komissio, 2021b)⁹

Lennonvarmistuskustannukset muodostuvat lentoreittipalvelumaksusta ja lentoaseman lennonvarmistuspalvelumaksusta. Lentoreittipalvelumaksu määräytyy lennetyn etäisyyden ja lentoonlähätöpainon mukaisesti, ja lentoaseman lennonvarmistuspalvelumaksu lentoonlähätöpainon mukaan (Fintraffic, 2022). Etälennonjohdon avulla pienempien lentoasemien lennonvarmistuskustannukset voisivat madaltua ja mahdollistaa kustannustehokkaammin satunnaisemmat lennot.

Lentoasemakustannukset koostuvat Suomessa laskeutumis-, paikoitus-, sähkö-, matkustaja, turva- ja melumaksuista. Finavia on ottanut käyttöön sähköinfrastruktuurimaksun Helsinki-Vantaalla. Se peritään paikoituspaikkaa käyttävältä ilma-alukselta, jolla on saatavilla lentoaseman tuottamaa lentokonesähköä. Muilla Finavian kentillä sähkömaksu kuuluu paikoitusmaksuun, mutta siihen sisältyy vain maavirtalaitteisiin käytettävä yleissähkö. (Finavia, 2022b) Sähkölentokoneet ovat akkujensa vuoksi yleensä tavallista kalustoa painavampia, joten painon mukaan määräytyvien maksujen myötä lentoasema- ja navigointikustannukset ovat tavallista kalustoa suuremmat. (Shahwan, 2021)

Lentoasemakustannusten osuus kokonaiskustannuksista on melko suuri, joten esimerkiksi painoperusteisten maksujen alentaminen parantaisi myös pienemmän lentokaluston kustannuskilpailukykyä. Jos sähköistä lentoliikennettä halutaan edistää, voitaisiin nollapäästöiselle kalustolle tarjota alennuksia lentoasemamaksuista. Sähkölentokoneille voisi olla esimerkiksi erillinen kategoria, jossa MTOW:n (suurin sallittu lentoonlähätöpaino) vaikutus olisi pienemmässä roolissa (Finnair, 2022a).

Epäsuorissa kustannuksissa ei ole eroa kaluston välillä. Toisaalta niiden osuutta kokonaiskustannuksista voitaisiin vähentää mm. kehittämällä tehokkaampia digitaalisia alustoja, jotka kokoaisivat kysynnän ja tarjonnan samaan paikkaan. Lentoliikenteen yhdistäminen muiden kuljetusmuotojen kanssa samaan alustaan voisi alentaa myös järjestelmäkustannuksia kustannusten ja hyötyjen jakautuessa laajemman yhtiöpoolin kesken.

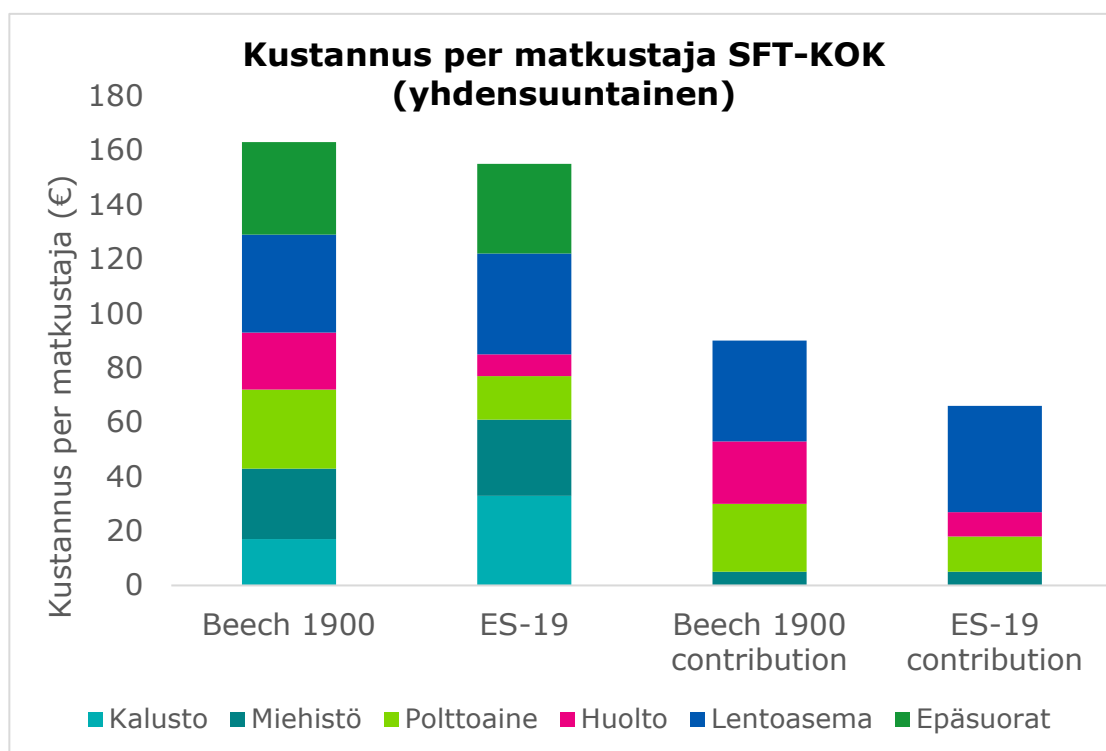
⁹ kohta ORO.CC.100

Taulukko 6. Lentoliikenteen kustannuksia.

Kustannustyyppi	19-paikkainen potkuriturbiinikone	19-paikkainen sähkölentokone
<i>Suorat (lentämisen) käyttökustannukset</i>		
Energia	Lentopetrolin hinta ja moottoriöljyt	50–70 % alemmat energiakustannukset
Huolto	Polttomoottorin ja lentokoneen rungon ylläpito.	50–70 % alemmat huoltokustannukset. Sähkömoottorit ovat halvempia, niissä on vähemmän liikkuvia osia ja aiheuttavat vähemmän tärinää.
Miehistö	Kaksi pilottia, matkustamohenkilökuntaa ei tarvita alle 19-paikkaisessa koneessa.	Sama tilanne.
Omistus	Hankintahinta miljoonia euroja. Hankintakustannus kirjataan poistoina esim. 20-vuoden aikajänteellä lentoyhtiön kirjanpidossa.	Uusi teknologia ja pienet tuotantovolyymit johtavat aluksi suurempiin pääomakustannuksiin.
Lennonvarmistus	Lennonvarmistusmaksut perustuvat kaluston lentoonlähtöpainoon.	Akkujen vuoksi sähkölentokoneet painavat enemmän kuin potkuriturbiinikoneet, jolloin maksut ovat hieman suuremmat.
<i>Epäsuorat (maaoperaatioiden) kustannukset</i>		
Lentoasema	Lentoasemamaksut perustuvat koneessa olevaan matkustajamäärään ja lentoonlähtöpainoon.	Akkujen vuoksi sähkölentokoneet painavat enemmän kuin potkuriturbiinikoneet, jolloin maksut ovat hieman suuremmat.
Muut (järjestelmän) kustannukset		
Yleiskustannukset	Hallinto, markkinointi, reitistön kehitys	Ei eroa, ellei liiketoimintamalli muutu kohti kutsuohjautuvampaa ratkaisua.

2.9.3 Sähköisen lentämisen kustannuslaskelmia FAIR-hankkeessa

Sähköisen lentämisen kustannuksia tarkasteltiin FAIR-hankkeessa Skellefteån ja Kokkolan välillä käyttäen lentämisen kustannusarviointiin tarkoitettua RDC Apex -ohjelmaa. Hankkeessa vertailtiin 19-paikkaisten Beech 1900- ja ES-19-koneiden kustannuksia per matkustaja. Oletuksina käytettiin 50 %:n täyttöastetta, Jet A1 polttoaineen hintaa 0,7 €/l, latauskustannuksena 0,5 €/kWh, 50 % alhaisempaa sähkölentokoneen huoltokustannusta sekä kaksinkertaista omistuskustannusta sähkölentokoneelle.



Kuva 18. Potkuriturbiini- ja sähkölentokoneen välisiä kustannuksia. Muokattu lähteestä (Merenkurkun neuvosto, 2022)

Kuvasta 18 nähdään, että täyssähkölentokoneen kustannus reitillä on n. 5 % pienempi matkustajaa kohden. Kuvan contribution-palkeilla tarkoitetaan lentoja tilanteessa, jossa lentoyhtiöllä olisi vapaata kapasiteettia käytössään. Eli esimerkiksi niin, että myös keskellä päivää voitaisiin toteuttaa lentopari. Tällöin ei oteta huomioon kiinteitä kustannuksia, vaan tarkastellaan vain lentämisestä aiheutuvia kustannuksia. Tässä tapauksessa sähkölentokoneen kustannus on jopa 27 % pienempi per matkustaja. (Merenkurkun neuvosto, 2022)

Hankkeessa toteutettiin myös herkkyystarkastelu, jonka tulokset ovat tiivistetysti (Merenkurkun neuvosto, 2022):

- Latauskustannus 1 €/kWh: sähköinen lentäminen 3 % kalliimpaa, contribution-lennolla 12 % halvempaa
- Jet A1 2 €/l: sähköinen lentäminen 28 % halvempaa, contribution-lennolla 54 % halvempaa
- Sähköisen lentämisen huoltokustannus 100 %: sähköinen lentäminen 1 % kalliimpaa, contribution-lennolla 16 % halvempaa
- Omistuskustannukset molemmissa tapauksissa samat: sähköinen lentäminen 15 % halvempaa, contribution-lennolla 27 % halvempaa

Vaikka kyseessä on teoreettinen tarkastelu, on huomattava, että mitä nopeammin täyssähkölentokoneiden hankintakustannukset saadaan vastaamaan potkuri-turbiinikoneiden hankintakustannusta, sitä kilpailukykyisemmäksi täyssähkölentokoneet muuttuvat. Myös öljyn hinnan nouseminen vaikuttaa merkittävästi sähköisten lentokoneiden kilpailukykyyn.

Koosteena työssä todetaan, että puolen tunnin lento maksaisi arviolta 66–155 €/matkustaja ja tuottaisi päästöjä 1 kg CO₂/matkustaja. Vastaava matka polttomoottoriautolla tarkoittaisi 7,5 tunnin ajoa ja matkustajaa kohden 100 € kustannusta sekä 59 kg CO₂-päästöjä. Yhteiskunnalliset hyödyt (aika- ja päästösäästöt) olisivat tässä tapauksessa n. 300 €/matkustaja. (Merenkurkun neuvosto, 2022)

2.9.4 Sähköisen lentämisen kustannuslaskelmia Linköpingin yliopistossa

Kawthar Shahwan tutki vuonna 2021 opinnäytetyössään alueellisen sähköisen lentämisen operatiivisia kustannuksia Ruotsissa. Työssä vertaillaan 19-paikkaisella potkuri-turbiinikoneella ja täyssähkölentokoneella lentämisen kustannuksia tietyillä yhteysväleillä. Vertailut konetyypit ovat Beechcraft 1900D, Jetstream JS31 ja Heart Aerospace ES-19. Lopputuloksena todetaan, että sähköinen lentokone on operatiivisilta kustannuksiltaan 15–22 % edullisempi kuin perinteinen kalusto.

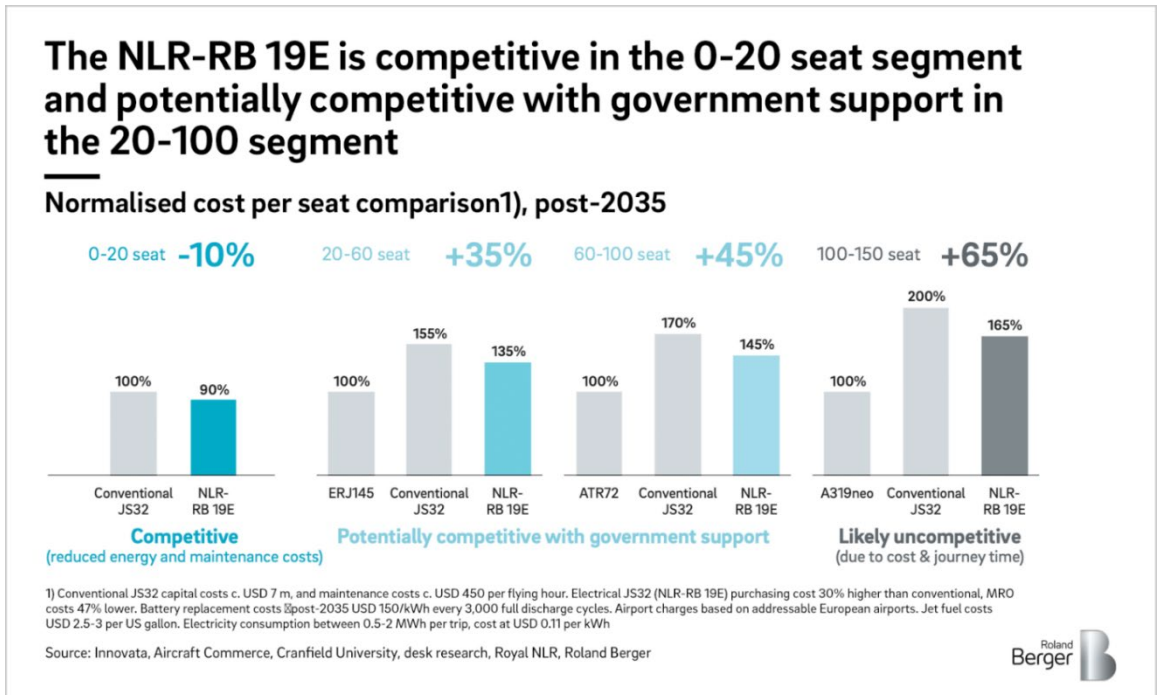
Työssä tarkasteltiin useita eri pituisia yhteysvälejä ja niiden operatiivisia kustannuksia edestakaisilla lennoilla. Tulokset osoittavat, että sähköinen lentokone on halvin kokonaiskustannuksiltaan työssä määritellyin oletuksin. Tutkimuksesta selviää, että sähköisen lentokoneen operatiiviset kustannukset ovat korkeammat seuraavissa kategorioissa: arvonalenema, lentäjän palkka, lentoreittipalvelumaksu sekä lentoaseman lennonvarmistuspalvelumaksu. Kustannukset ovat puolestaan matalammat energian ja huoltojen osalta. On kuitenkin huomioitava, että sähkölentokoneen akku tulisi vaihtaa kerran vuodessa, jos vuosittainen käyttö olisi 450 tuntia ja lentokalustoa käytettäisiin päivittäin 7–11 tuntia. Tätä ei ole huomioitu osana huoltokustannusta. (Shahwan, 2021)

Taulukko 7. Kokonaiskustannukset edestakaisella lentomatalla. (Shahwan, 2021)

Route	Distance (km)	Beechcraft 1900D	Jetstream JS31	ES-19
Linköping-Visby	178	25 518 SEK	26 014 SEK	20 358 SEK
Pajala-Luleå	194	26 476 SEK	26 846 SEK	21 276 SEK
Umeå-Östersund	296	32 362 SEK	33 575 SEK	26 824 SEK
Sälen-Arlanda	326	35 274 SEK	36 701 SEK	29 740 SEK
Sveg-Arlanda	328	35 390 SEK	36 833 SEK	29 846 SEK
Göteborg-Borlänge	359	37 096 SEK	38 801 SEK	31 467 SEK

2.9.5 Sähköisen lentämisen kustannuslaskelmia Saksassa

Saksalainen liikkeenjohdon konsulttiyhtiö Roland Berger tutki yhteistyössä The Royal Netherlands Aerospace Centren (Royal NLR) kanssa vuonna 2021 sähköisen lentämisen kustannuksia teoreettisen sähkölentokoneen pohjalta. Tutkimustiimi kehitti hypoteettisen 19-paikkaisen NLR-RB 19E -lentokoneen, joka pohjautuu Jetstream 32:n malliin. Lentokoneen kantamaksi arvioidaan 700 km. Tiimi päätyi tekemään hyvin teknologiakehitysmuotoisen mallin, jonka akkujen energiatiheys olisi 1 000 Wh/kg. Tämä tarkoittaa, että kone olisi käytössä 2035 jälkeen. (Sanchdeva & Lammen, 2021)



Kuva 19. Roland Bergerin kustannuslaskelmia (Sanchdeva & Lammen, 2021)

Tutkimuksen mukaan täyssähkölentokone olisi 10 % halvempi per matkustajapaikka verrattaessa 19-paikkaiseen Jetstream 32 -potkuriturbiinikoneeseen. Tärkeä havainto on, että pienemmällä kalustolla lennettäessä lentoasemakustannukset ovat suhteessa suurempia, koska saman matkustajamäärän kuljettamiseen vaaditaan useita lentoja ja lentoasemamaksuja. Täyssähkölentokone olisi tämän vuoksi jopa 45 % kalliimpi per matkustajapaikka kuin ATR 72. Tutkimuksessa ehdotetaan, että lentoasemamaksuja voitaisiin subventoida sähköisiä lentokoneita operoiville lentoyhtiöille (Sanchdeva & Lammen, 2021). Tosin ei välttämättä ole mielekästä vertailla 80-paikkaista ATR 72 -konetta 19-paikkaiseen sähkölentokoneeseen, sillä ne vastaavat erilaiseen kysyntään.

Tutkimus korostaa, että kustannus on vain yksi osa sähköistä lentämistä. Hiljaisempana ja pienempänä kalustona sähköiset koneet voisivat avata pääsyn pienemmille lentoasemille, mikä mahdollistaisi point-to-point-verkoston viemisen entistä pidemmälle: pienemmät sähkölentokoneet voisivat toimia syöttöliikenteenä suuremmille lentoasemille. Matkustajille, jotka nyt joutuvat tekemään välilaskuja, täyssähkölentokoneet voisivat tarjota enemmän suoria yhteyksiä, tarjoten paremman matkustusmukavuuden, lyhyemmät matka-ajat ja mahdollisesti pienemmät kustannukset. Laajemmin tarkasteltuna sähkölentokoneet voisivat mahdollistaa sen, että suuremmat koneet keskittyvät vain pitkän matkan lentoihin vähentäen matkustajakohtaisia päästöjä. Tällöin lyhyemmät lennot jäisivät pienten sähkölentokoneiden operoitaviksi. (Sanchdeva & Lammen, 2021)

Arvioita eVTOL-koneiden kustannuksista

Pystysuoraan nousevat ja laskevat eVTOL-koneet ovat kiinteäsiipisen lentokaluston ohella nopean kehityksen polulla. Markkinoilla on useita miljardiarvostuksen omaavia startup-yhtiöitä, jotka pyrkivät rakentamaan uutta liiketoimintaa ja liikennetarjontaa alalle. Globaalin ilmataksimarkkinan arvioidaan olevan vuonna 2025 n. puolitoista miljardia dollaria ja vuonna 2035 jopa 150 miljardia dollaria. Kehitysnopeus voi olla markkinoilla toivottua hitaampaa, sillä sitä hidastavat samat tekijät kuin kiinteäsiipisten alusten puolella: akkuteknologia, kilpailu autoteollisuuden kanssa samoista raaka-aineista, infrastruktuurin puute, pitkät sertifiointiprosessit sekä mahdollisesti pilottipula. (Hussain, 2021)

Arvioiden mukaan helikopterien operointikustannukset ovat n. 5 €/km, kun eVTOL-aluksilla ne ovat valmistajien mukaan n. 1,7 €/km. Uber Elevate arvioi, että vuoden 2030 jälkeen sen kustannukset olisivat 1,4 €/km. Liliium arvioi, että New Yorkissa Manhattanin ja JFK:n lentoaseman välisen matkan kustannus olisi n. 65 € eli 2,5 €/km. Joby Aviationin mukaan sen operatiiviset kustannukset olisivat n. 2,2 €/km 40 kilometrin matkalla. (Hussain, 2021)

2.9.6 **Lentoliikenteen yhteiskunnalliset hyödyt ja kustannukset**

Operatiivisten kustannusten lisäksi lentoliikennettä tarkasteltaessa on hyvä huomioida yhteiskunnallinen näkökulma. Lentoliikenne tuottaa muiden kulkumuotojen tavoin monia epäsuoria yhteiskunnallisia hyötyjä sekä kustannuksia. Toisin kuin maantie- ja rautatieliikenteen tapauksissa, lentoliikenteelle ei ole kuitenkaan Suomessa laskettu ns. yksikköarvoja näille hyödyille ja kustannuksille. Ruotsissa näitä laskelmia on sen sijaan tehty, ja tässä alaluvussa esitellään ruotsalaisia, ASEK 7.0 -raportin mukaisia yksikköarvoja (Trafikverket, 2020a). Yksinkertaistuksen nimissä valuuttamuunnokset on tehty kurssilla 1 € = 10 SEK.

Uusien liikenneyhteyksien synnyttämän uuden liikenteen tai kulkumuotosiirtymän aiheuttama nettohyöty voidaan ruotsalaisen laskentaohjeen mukaan laskea kaavalla¹⁰

$$h = 0,5 \cdot k_{\text{muutos}} \cdot m_{\text{muutos}}$$

missä h on nettohyöty, k_{muutos} liikkumiskustannuksen muutos henkilö- tai tonnikilometriä kohden ja m_{muutos} liikennemäärän muutos tai siirtymä. Tätä kaavaa kutsutaan *Rule of the half* -säännöksi eli ROTH-säännöksi. (Trafikverket, 2020a, s. 53)

Erinäisiä ASEK 7.0 -raportin mukaisia yksikköarvoja on esitetty taulukossa 8 (Trafikverket, 2020a). Yksikköarvoilla voidaan edellä kuvatusti arvioida jonkin toimenpiteen, kuten uusien lentoyhteyksien, seurauksena syntyviä yhteiskunnallisia hyötyjä ja haittoja. Esimerkiksi alueellista ostolentoliikennettä on Ruotsissa perusteltu sillä, että alueiden saavutettavuus lentäen on parempi kuin muilla kulkumuodoilla – käytännössä siis matka-aikasäästöistä muodostuva yhteiskunnallinen hyöty on lentojen ostamisen suoria kuluja suurempi.

Vastaavasti, vaikka sähköiseen lentämiseen liittyy selkeitä ympäristöhyötyjä, sen kuitenkin nähdään mahdollisesti hieman heikentävän saavutettavuutta. Tämä johtuu siitä, että sähkölentokoneet lentävät hitaammin kuin nykyiset lentokoneet, mikä pidentää matka-aikaa ja siten lisää laskennallisia kustannuksia. Tilanne on toinen, jos sähköinen lentoliikenne mahdollistaa uusia yhteyksiä. (Trafikanalys, 2020)

¹⁰ ASEK 7.0 -raportissa muotoiltu sanallisesti. Viittauksissa tähän raporttiin sivunumerot ovat pdf-tiedoston sivunumeroita, koska raportissa jokaisen luvun sivut on numeroitu erikseen.

Taulukko 8. Esimerkkejä Ruotsissa käytettävistä ASEK 7.0 -yksikköarvoista.

Kustannusperuste lentoliikenteen osalta	Yksikköarvo 2017	Yksikköarvo 2040 (ennuste)
Matka-aikasäästö vapaa-ajan matkoilla ¹¹	12,6 €/h per hlö	17,8 €/h per hlö
- mikäli kyse on liityntämatkasta	17,1 €/h per hlö	24,2 €/h per hlö
- mikäli aikasäästö liittyy kuluvälineen vaihtoon	31,5 €/h per hlö	44,4 €/h per hlö
Matka-aikasäästö työmatkoilla ¹²	33,9 €/h per hlö	47,9 €/h per hlö
Vuorovälin lyhentymisen työmatkoilla ¹³	17,3–26,0 €/h per henkilö	24,3–36,7 €/h per henkilö
Aikatauluvarmuuden parantuminen vapaa-ajan / työmatkoilla	44,1 / 118,8 €/h per hlö	62,2 / 167,5 €/h per hlö
Melukustannukset vuodessa ¹⁴		
- 50 dB	23,52 €/hlö	33,32 €/hlö
- 60 dB	1709,40 €/hlö	2454,34 €/hlö
- 70 dB	6031,48 €/hlö	8978,90 €/hlö
Päästökustannukset maan sisäisillä lennoilla ¹⁵	0,98 €/CO ₂ -kg 0,28 €/CO ₂ -kg ¹⁶	–

¹¹ Pitkillä Ruotsin sisäisillä matkoilla. Vertailun vuoksi, yksikköarvot ovat samat yksityisautoille, mutta esimerkiksi junalle 8,5 €/h (2017) / 12,0 €/h (2040). Lyhyille ja seudullisille matkoille ei lentämiseen ole laskettu matka-aikasäästön yksikköarvoja.

¹² Ei eroa tavallisen tai liityntämatkan välillä, tai varsinaisen matkaamisen ja vaihtoajan välillä.

¹³ Vuoroväliin liittyvät yksikköarvot ovat raportin alaluvussa 7.5 ja esimerkkilaskelmia näiden käytöstä alaluvussa 7.8. Yksikköarvot on raportissa laskettu myös vapaa-ajan matkoille.

¹⁴ Melukustannus lasketaan melutason muutoksesta, eli kyseessä voi myös olla säästö, mikäli melutaso vähenee. Melukustannus per henkilö kerrotaan sillä henkilömäärällä, joka altistuu melulle. Lentomelun yksikköarvot ovat Ruotsissa 1,4 kertaa suuremmat kuin tieliikennemelun yksikköarvot, mutta lentomelun nähdään kohdistuvan vain lentokenttien ympäristöön.

¹⁵ ASEK 7.0 -raportissa on myös muita lentojen päästöihin liittyviä kertoimia, mutta raportin päästöihin liittyvät luvut 11 ja 12 ovat vaikeaselkoisia eikä yksikäsitteisiä yksikkökustannusarvoja ole annettu.

¹⁶ EU:n päästökaupan piiriin kuuluvilla lennoilla.

2.10 Kansainvälinen katsaus sähköiseen lentoliikenteeseen



LUVUN KESKEINEN SISÄLTÖ

- Pohjoismaissa kohdistuu suuria odotuksia sähköiseen lentämiseen
- Norja tavoittelee vuoteen 2040 mennessä kaikkien sisäisten lentojen operointia sähköisillä lentokoneilla
- Ruotsissa sähköisen lentämisen potentiaalia on tarkasteltu tutkimuksissa ja parhaillaan kehitysprojekteissa. Yhdessä niistä ruotsalainen Heart Aerospace kehittää akkusähkölentokonetta. On myös pohdittu, miten fossiilittomaan lentämiseen voitaisiin kannustaa sisäisessä kilpailutetussa lentoliikenteessä.
- Isossa-Britanniassa on sen pitkäaikaisen lentokonevalmistuksen historian myötä meneillään lukuisia lupaavia sähkölentokoneprojekteja
- Yhdysvalloissa pienkoneita operoivat reittilentoyhtiöt ovat kiinnostuneita sähköisestä kalustosta. Maassa on myös tehty useita tutkimuksia aiheesta.
- Alankomaissa sähköisen lentämisen potentiaalia on selvitetty sille kuuluvien ABC-saarten case-tarkastelun avulla
- Suomessa FAIR-hankkeessa on tutkittu sähköisen lentämisen nopeaa implementointia Merenkurkun alueella
- Redstone AERO kehittää Pyhtäällä digitaalisen lentoaseman konseptia, jonka olennainen osa sähköinen lentäminen on
- TMP Zero: Tampere-Pirkkalan lentoaseman vähähiilisyys-hankkeessa tavoitteena on muodostaa vähähiilisiin energiaratkaisuihin perustuva ilmailu- ja logistiikkaratkaisujen kokonaisuus

Sähköisen lentoliikenteen hankkeita on käynnissä monissa maissa. Säännöllistä matkustajalentoaliikennettä sähkölentokoneilla ei kuitenkaan ole vielä tällä hetkellä (kevät 2022) missään päin maailmaa. Tämä johtuu siitä, että sähkölentokoneet ovat toistaiseksi olleet matkustajakapasiteetiltaan hyvin pieniä, enintään muutamien matkustajien kuljettamiseen soveltuvia (ks. tarkemmin luku 2.5).

2.10.1 **Norja**

Norjassa lentämisellä on huomattavan suuri rooli maan sisäisessä liikkumisessa. Eurostatin tietojen mukaan esimerkiksi vuonna 2019, ennen koronapandemiaa, keskimääräinen norjalainen matkusti vuosittain 2,9 kertaa sisäisellä lennolla, kun kaikissa muissa EU- ja ETA-maissa vastaava luku jäi alle 1,0:n ja esimerkiksi Suomessa noin 0,5:een (Eurostat, 2022a; Eurostat, 2022b). Koska sisäisen lentoliikenteen merkitys Norjan liikennejärjestelmälle on niin suuri, on Norjan valtio todennut, että lentämisestä tulisi tehdä ympäristöystävällisempää maan ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi. Toisaalta Norja haluaa olla aloitteellinen sähkölentämisen kehittämisessä maan haastavien lento-olosuhteiden vuoksi: sään ja talven asettamien vaatimusten lisäksi Norjassa on paikallisena erikoisuutena laaja matkustajaliikenteessä käytetty lyhytkiitoteisten lentoasemien verkko (norj. *kortbanenett*, eng. *STOLport network*), joille soveltuvan lentokaluston määrä on jo nykyään rajallinen. (Avinor & Luftfartstilsynet, 2020)

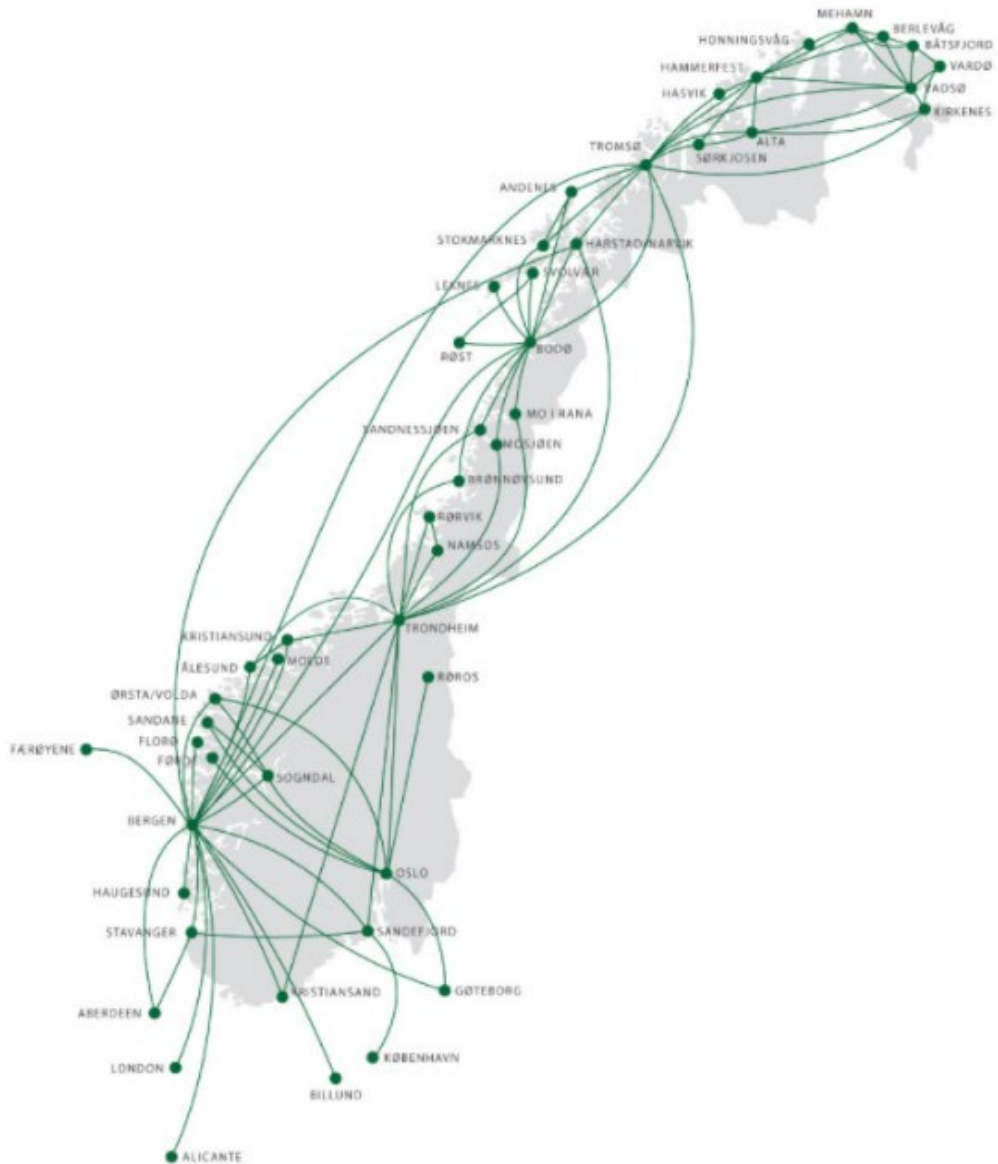
Norjassa on määritelty seuraavat tavoitteet sähköiselle lentämiselle:

- Norja on eturivin toimija testausalustana sähköisten lentokoneiden kehittämiseksi ja käyttöönotolle
- Sähköiset lentokoneet on otettu kaupalliseen käyttöön Norjan sisäisillä lennoilla vuoteen 2030 mennessä
- Vuoteen 2040 mennessä kaikki Norjan sisäiset lennot operoidaan sähköisillä lentokoneilla

Sisäisten lentojen operoinnin sähköisillä lentokoneilla odotetaan vähentävän näiden lentojen hiilidioksidipäästöjä ainakin 80 %:lla vuoteen 2020 verrattuna. Tavoite on asetettu ennen koronapandemiaa. Koska uuden teknologian käyttöönotossa on taloudellisia ja teknologisia riskejä, Norjassa on myös pohdittu keinoja pienentää niiden potentiaalisia vaikutuksia. Ehdotettujen keinojen joukossa ovat muun muassa verohelpotukset sähkölentokoneille, ympäristöystävällisyyskriteerien tiukentaminen lentoliikenteen kilpailutuksissa, sekä lentoliikenteen kilpailutuskautien pidentäminen koneiden käyttöiän ja koneinvestoinnin takaisinmaksuajan pitämiseksi kohtuullisina. (Avinor & Luftfartstilsynet, 2020, s. 52–53)

Norjassa suurta osaa sisäisistä lennoista operoiva Widerøe on vuoden 2021 maaliskuussa ilmoittanut aloittavansa yhteistyön lentokonevalmistaja Tecnamin sekä moottorivalmistaja Rolls Roycen kanssa Norjan oloihin soveltuvan sähkölentokonemalli P-Voltin kehittämiseksi. Widerøen tavoitteena on, että konetyypin ensimmäiset yksilöt voitaisiin ottaa kaupalliseen käyttöön vuonna 2026. Widerøe on ilmoittanut myös yhteistyöstä brasilialaisen lentokonevalmistaja Embraerin tytäryhtiö Even kanssa eVTOL-lentolaitteen käytännön hyödyntämiskohteiden tutkimiseksi, ja perustanut päästöttömän lentoliikenteen edistämiseen keskittyvän kehitysyhtiön Widerøe Zeron vuoden 2021 aikana. (Rolls-Royce, 2021; Widerøe, 2021)

Widerøen reittiverkosto talvella 2022 on esitetty kuvassa 20. Verkostoon kuuluu Norjassa noin 40 kohdetta. Huomionarvoista verkostossa on, että pääosa lennoista päättyy paikallisiin solmupisteisiin kuten Tromssaan ja Trondheimiin, ja että nämä solmupisteet ohittavia lentoja on hyvin vähän. Esimerkiksi Tromssan koillis- ja lounaispuolisten alueiden välillä ei ole suoraa, Tromssan ohittavia lentoja.



Kuva 20. Widerøen reittiverkosto helmikuussa 2022. Lähde: (Widerøe, 2022)

2.10.2 Ruotsi

Ruotsissa liikenteen vaikutusarviointeja ja tilastointia tekevä viranomainen Trafikanalys on toteuttanut valtion toimeksiannosta selvityksen *Elflyg – början på en spännande resa*, suomennettuna ”Sähkölentäminen – alku jännittävälle matkalle”. Selvityksen tavoitteena oli koostaa tietoa sähkölentokoneiden kehityksestä ja samalla esittää vastauksia kuuteen tutkimuskysymykseen:

- Millaisia sähkölentokoneita on olemassa ja kehitteillä?
- Käyttökohteet tulevaisuuden sähköisille lentokoneille
- Muiden maiden kannustimet ja vaikutuskeinot
- Sähkölentämisen sosioekonomiset ja muut taloudelliset vaikutukset
- Ruotsiin soveltuvat kannustimet ja vaikutuskeinot
- Sähkölentämisen vaikutus alueiden saavutettavuuteen

Edellä mainitussa selvityksessä sähkölentämisen potentiaalia on tutkittu neljän sovelluskohteen kautta. Nämä on esitelty alla. Lähtökohtana Ruotsin tarkastelussa oli, että sähkölentokoneen kaupallinen kantama olisi 400 kilometriä ja matkustajakapasiteetti 19 henkilöä. (Trafikanalys, 2020, s. 62–71)

- Yhteiskunnan kilpailuttamat lentoreitit
 - Ruotsin seitsemästä kilpailutetusta, alle 400 kilometrin pituisesta lentoreitistä neljä soveltuisi arvion mukaan myös matkustajakysyntänsä puolesta sähkölentokoneilla lennettäväksi:
 - Östersund–Uumaja, Torsby–Tukholma, Hagfors–Tukholma sekä Pajala–Luulaja; lisäksi Sveg–Tukholma kantamavarauksin
- Nykyiset markkinaehtoiset, pienehköillä (alle 50 matkustajaa) koneilla lennettävät reitit
 - Arvion mukaan sähkölentokoneet voisivat mahdollistaa tällaisilla reiteillä suuremman vuorotiheyden kuin nyt, jolloin reaalin kapasiteetti yhteysväliä ei oleellisesti pieneneisi. Sähkölentokoneiden lentonopeus on hitaampi kuin perinteisten lentokoneiden, mikä voi heikentää lentämisen kilpailukykyä muihin kulkumuotoihin verrattuna.
- Uudet lyhyet lentoreitit
 - Erityisesti suuren vesialueen ylittävillä reiteillä lentämisen matka-aikahyöty voi olla merkittävä. Toisaalta sähkölentämisen ympäristöhyödyt ovat uusilla reiteillä rajalliset, kun lentämisen päästöjä ei lähtötilanteessakaan ollut.
- Lentoreitit Pohjois-Ruotsin harvaan asutuilla alueilla

Edellä kuvatun kaltaisten lentoreittien arvioitiin Ruotsin selvityksessä olevan sähköiselle lentämiselle soveltuvia jo tarkastellun tyyppisellä, pienehköillä lyhyen kantaman kalustolla. Samoin sähkölentämisellä arvioitiin olevan näillä reiteillä yhteiskuntataloudellisesti myönteisiä vaikutuksia, vaikkakaan täsmällisiä lukuja ei juuri annettu. Selvityksessä myös todettiin, että sähkölentämisen teknologioiden kehittyessä sähkölentämisen edut todennäköisesti kasvavat. Pienten lentokoneiden kohdalla haasteena on sopivan hinnoittelutason löytäminen, koska taloudellisesta näkökulmasta kone tulisi saada mahdollisimman täyteen matkustajia. Lyhyt kantama puolestaan rajoittaa lentämisen matka-aikaetuja merkittävästi, kun otetaan huomioon aika lentoasemalle ja lentoasemalta siirtymiseen sekä kentän prosesseihin kuten turvatarkastuksiin. (Trafikanalys, 2020, s. 67–71, 83–96)

Koska Ruotsissa yhdyskuntarakenne ja asukastiheys ovat melko samankaltaiset kuin Suomessa, voidaan olettaa, että vastaavat sovelluskohteet olisivat relevantteja myös Suomen oloissa.

Ruotsin valtion Trafikverket on tehnyt selvityksen, miten maan sisäisessä kilpailutetussa lentoliikenteessä voitaisiin kannustaa fossiilittomiin energia-muotoihin. Taustalla on Ruotsin valtion tavoite olla ilmastoneutraali vuoteen 2045 mennessä. Vaikka kilpailutettu liikenne muodostaa hyvin pienen osan Ruotsin lentoliikenteestä, pidetään yleisesti hyvänä, että valtio ohjaa alan toimintaa ympäristöystävälliseen suuntaan. Selvityksen perusteella EU tulkitsee, että nykyisten lentämistä ja kilpailutuksia koskevien sääntöjen puitteissa kilpailutuksessa ei voitaisi vaatia lentokoneelta tiettyä käyttövoimaa, mutta ympäristöystävällisyydestä voitaisiin antaa kilpailutuksessa lisäpisteitä. Sähkölentämistä pidetään tavoiteltavana pitkällä aikavälillä. Lyhyellä aikavälillä biopolttoaineiden roolin kasvattamista pidetään realistisimpana keinona lentämisen päästöjen vähentämiseen. (Trafikverket, 2020b, s. 3–5, 10, 28, 51–52)

Tässä selvityksessä jo aiemmin mainittu Heart Aerospace on ruotsalainen startup-yhtiö, joka kehittää 19-paikkaista ES-19-sähkölentokonetta. Yhtiön tavoitteena on, että koneella voitaisiin lentää koelentoja vuonna 2024, ja että konetyyppi saataisiin kaupalliseen käyttöön vuonna 2026. Maaliskuussa 2022 Heart Aerospace:n toimitusjohtaja totesi *Tekniikka & Talous* -lehden haastattelussa, että ”aluksella päämarkkinamme ovat noin 200 kilometrin reitit” ja että ”mitä lyhyempi matka, sitä parempia ovat yksikkökustannuksemme”. (*Tekniikka & Talous*, 2022) Suomessa noin 200 kilometrin lentomatkan päässä ovat esimerkiksi Helsinki-Vantaalta katsoen muun muassa Pori, Jyväskylä, Mikkeli ja Lappeenranta, Jyväskylästä katsoen Vaasa ja Joensuu, ja Turusta sekä Tampereelta katsoen Tallinna. Myös Merenkurkun ylittävillä lennoilla, joita on tutkittu alueen organisoimassa FAIR-hankkeessa, lentomatkat Suomen ja Ruotsin välillä olisivat pääosin alle 200 kilometrin pituisia.

2.10.3 Muita maita

Iso-Britannia

Isossa-Britanniassa on pitkäaikainen kokemus lentokonevalmistuksesta ja kehityksestä, ja tämä näkyy maassa myös sähköisessä lentämisessä. Maassa on monia lupaavia sähkölentokoneprojekteja, kuten EAG HERA. Eryityisesti Skotlannin alueella paikallislentoja operoiva Loganair pyrkii täysin hiilineutraaliin lentämiseen vuoteen 2040 mennessä. Osana tätä Loganair osallistuu sekä sähköisten että vetykäyttöisten lentokoneiden kehityshankkeisiin. Eräissä hankkeissa Ampaire-yhtiö on muuntanut Cessna-lentokoneen sähkökäyttöiseksi. Tällä koneella on jo lennetty koelentoja Skotlannissa. Loganairin reittiverkostoon kuuluvat monien muiden reittien ohella esimerkiksi lennot Orkneysaarten sisällä sekä saarilta Skotlannin suurimpiin kaupunkeihin, kuten myös maailman lyhin, noin puolitoista minuuttia kestävä aikataulutettu reittilento. (Loganair, 2022a; *The Engineer*, 2021; Orkney.com, 2021; Loganair, 2022b)

Alankomaat

Alankomaissa on helmikuussa 2022 julkaistu tiekartta sähköiselle lentämiselle. Tiekartan tavoitteena on selvittää, millaisia toimenpiteitä vaaditaan, jotta sähköisestä lentämisestä saataisiin kilpailukykyinen vaihtoehto perinteiselle polttomoottoreilla tapahtuvalle lentämiselle. Alankomaissa on tavoitteena, että vuonna 2050 kaikki lyhyen matkan lennot voitaisiin lentää sähkölentokoneilla. Maassa on myös useita sähkölentämiseen liittyviä järjestöjä ja projekteja, kuten *Dutch Electric Aviation Centre* sekä *Power Up* -projekti, jossa osallisina ovat Eindhovenin, Groningenin, Rotterdam-Haagin sekä Maastricht-Aachenin lentoasemat. Tavoitteena on lentää kaupallisia lentoja sähkölentokoneella vuonna 2026. (Hak & Driessen, 2021, s. 1–4)

Raportissa esitetään, että Alankomaille kuuluvat niin sanotut ABC-saaret eli Karibiassa sijaitsevat Aruba, Bonaire ja Curaçao voisivat toimia sähkölentämisen pilottikohteina. Alue on esitetty kuvassa 21. Curaçao ja Bonairen välillä lentää jo nyt eräs lentoyhtiö kerran tunnissa 19-paikkaisella lentokoneella, ja Curaçao ja Aruban väliä kahden tunnin välein 9-paikkaisella lentokoneella. Monet tällä hetkellä kehitteillä olevista sähkölentokoneista ovat juuri tätä 9–19-paikkaisten kokoluokkaa, joten vaikka myös muilla lentoyhtiöillä on suuremmilla lentokoneilla lennettäviä vuoroja näiden saarten välillä, ei sähkölentokoneiden matkustajakapasiteetti ole este niiden käytölle tämän alueen lentoreiteillä. (Hak & Driessen, 2021, s. 19–26)



Kuva 21. Karibialla sijaitsevien, Alankomaille kuuluvien "ABC-saarten" välisiä lentoja pidetään soveltuvana kohteena sähköiselle lentämiselle. Kartta: Destia, pohja: (OpenStreetMap, 2022), CC BY-SA 4.0, ja taustamateriaali: (Hak & Driessen, 2021, s. 19)

Yhdysvallat

Yhdysvalloissa ja Karibian alueella paikallislentoja operoiva Cape Air on solminut aiesopimuksen 75:stä israelilaisen Eviation-yhtiön kehitteillä olevan Alice-sähkölentokoneen hankinnasta. Cape Air lentää yli 400 alueellista lentoa päivässä lähes 40 kaupunkiin. Hankinta-aikeiden taustalla on tavoite vähentää toiminnan päästöjä sekä operatiivisia kustannuksia. Jos kaikki menee suunnitelmien mukaan, Eviation Alicen tuotantoversio on lentokyykyinen vuonna 2024 ja toimitukset alkavat sertifiointiprosessin jälkeen. (Eviation, 2022)

2.11 Sähköisen lentoliikenteen hankkeet Suomessa

Suomessa on tällä hetkellä käytössä vain yksi sähköinen lentokone, Helsingin sähkölentokoneyhdistyksen Pipistrel Alpha Electro. Kyseinen kone on kaksi-paikkainen ja otettu käyttöön kesällä 2018. (Helsingin sähkölentokoneyhdistys, 2022)

Finnair on tehnyt aiesopimuksen ruotsalaisen Heart Aerospace'n kanssa jopa 20 ES-19-sähkölentokoneen hankinnasta. Finnairin kannalta sähköinen lentäminen mahdollistaisi päästöjen vähentämisen erityisesti lyhyillä kotimaan lennoilla. Laajemmin Finnairin tavoitteena on "sähkölentämisen infrastruktuurin standardisointi Pohjoismaissa, liiketoimintamallien kehittäminen alueelliseen lentämiseen, lentokoneteknologian kehittäminen pohjoisen sääolosuhteisiin ja alustan luominen eurooppalaiselle ja globaalille yhteistyölle". Haasteena Finnairin mukaan kuitenkin on, että sähköinen lentäminen vaatii lentokoneiden latausinfrastruktuurin kaikille lentoasemille, joille sähkölentokoneilla aiotaan lentää. Tarvetta on kehittää ympäristöystävällisiä tapoja lentää myös pitkiä matkoja, sillä nykyisillä sähköisen lentämisen teknologioilla "Pariisiin [ilmasto]sopimuksen vaatimukseen pääsemiseksi ei pelkkä sähköistäminen riitä". (Finnair, 2021)

FAIR-hanke

Kaksivuotinen EU-rahoitteinen FAIR-hanke tähtää kohti alueellisten sähkölentojen varhaista ja tehokasta kaupallistamista Merenkurkun alueella. Hanke toimii toukokuusta 2020 lokakuuhun 2022. Hanke lisää tietoa sähkölentämisestä,

selvittää mahdollisuuksia ja kartoittaa sekä tarpeita että tarvittavia teknisiä investointeja. Hankekumppanit ovat suurelta osin Merenkurkun alueen toimijoita, Suomesta Pohjanmaan, Etelä-Pohjanmaan ja Keski-Pohjanmaan maakunnista sekä Ruotsista Västerbottenin läänistä ja Örnköldsvikin kunnasta. Hanketta koordinoi Merenkurkun neuvosto johtavana tuensaajana. FAIR-hankkeen maantiede sisältää myös Norlannin maakunnan Norjassa.

Hanke koostuu kolmesta työpaketista: WP1 sähköisen lentämisen alueelliset vaikutukset, WP2 Käyttönoton linjaukset ja WP3 rajat ylittävä innovaatio-prosessi. Työssä on tarkasteltu laajasti sähköisten lentämisen teknologista kehitystä, liiketoimintaa ja lentoasemien vaatimuksia. Työssä on tuotettu useita raportteja ja webinaareja, joita on hyödynnetty tässä selvityksessä.

Hankkeen tähänastisia nostoja:

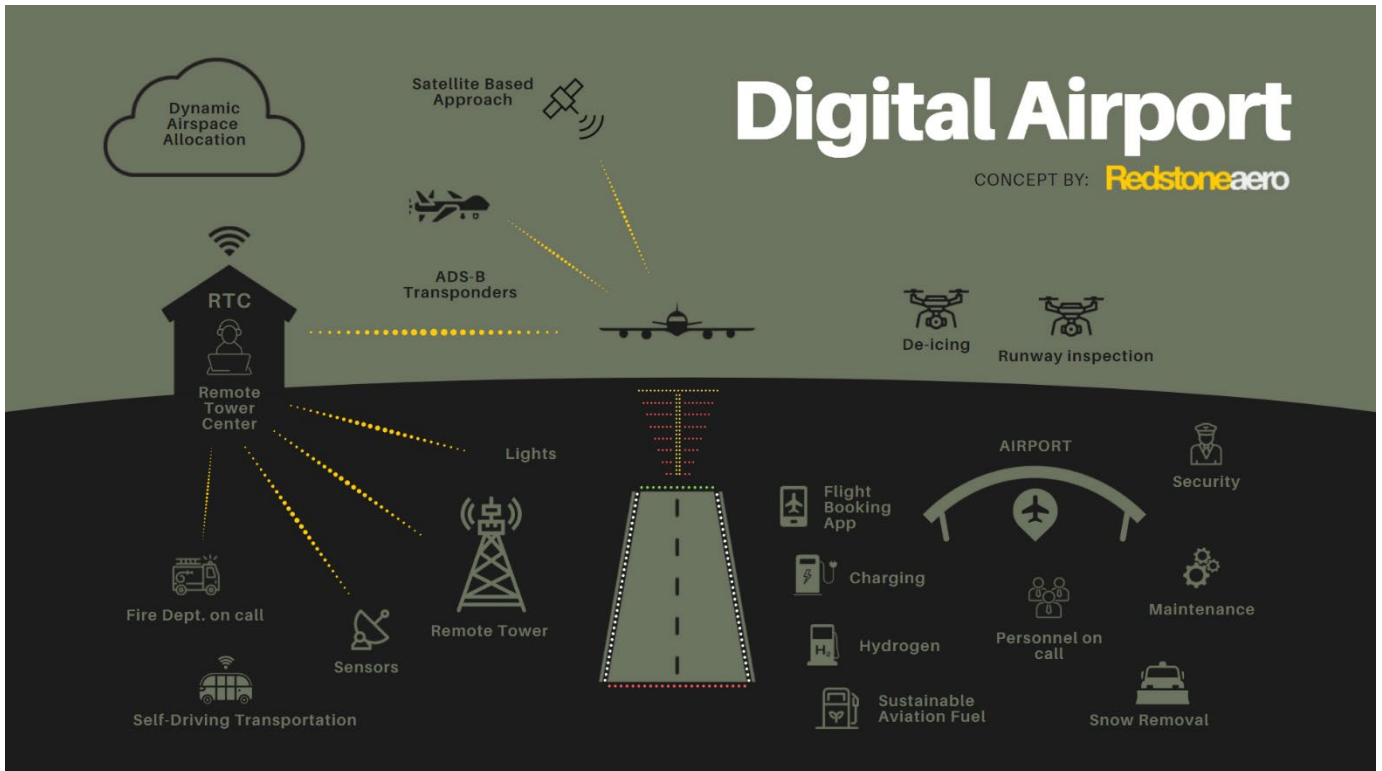
- Sähköinen lentäminen on saanut odotettua suuremman huomion. Poliitikot, lentoyhtiöt ja kysyntäpuolen yritykset ovat hyvin kiinnostuneita teknologiasta ja sen tuomista mahdollisuuksista.
- Sähköinen lentäminen tulee olemaan mahdollista Pohjoismaiden sisäisessä lentoliikenteessä.
- Pohjoismaisen teollisuuden vihreä siirtymä on tapahtumassa valtavalla nopeudella ja markkina kasvaa nopeasti. Liikennejärjestelmän on vastattava tähän kysyntään ja tarjottava fossiilivapaata saavutettavuutta. Sähköinen lentäminen on hyvin potentiaalinen vaihtoehto, joka voi tarjota nopean ja puhtaan kulkumuodon yritysten ja ihmisten liikkumistarpeille.
- Kysyntää ei voida tietää etukäteen tarkasti, vaan sille pitää luoda mahdollisuudet kehittyä. Siksi on tärkeää avata uusia lentoyhteyksiä jo ennen sähköistä kalustoa. Pienempi kalusto ja biopolttoaineet ovat avaimia tähän.
- Regulaation tulee tukea kehitystä. Esimerkiksi valtioiden välisen julkisen liikenteen yhteyksien kilpailuttaminen edistäisi sähköisen lentämisen käyttöönottoa.

Helsinki East Aerodrome (Redstone AERO, 2022)

Redstone AERO Oy kehittää digitaalisen lentoaseman konseptia. Yhtiön omistama ja operoima Helsinki East Aerodrome on Pyhtäällä sijaitseva digitaalisen lentopaikan prototyyppi, jolle valtio on myös myöntänyt 2,5 miljoonan euron investointituen. Helsinki East Aerodromeen rakennetaan tulevaisuuden ilmaliikenteen tutkimuskeskus, yhteistyössä teollisuuden ja TKI-laitosten, kuten VTT:n ja XAMK:n kanssa.

Digitaalinen lentoasemakonsepti on tuotteistettava ja skaalautuva vientituote. Konsepti pitää sisällään mm. etälennonjohtoratkaisun, satelliittipohjaiset lähestymismenetelmät sekä etäohjautuvia kunnossapidon ratkaisuja. Konsepti on tuotteistettavissa ja kaupallistettavissa.

Helsinki East Aerodromelle investoidaan myös sähköisen ilmailun latausinfra- valmiuksiin sekä kattaviin tietoliikenneyhteyksiin, 5G mukaan luettuna. Drone- ja vertiporttien kehitystyö on myös oleellinen osa sähköistä ilmailua. Redstone AERO kehittää myös infraa ja palveluita UAM (Urban Air Mobility) markkinan kasvaessa. Redstonen missio on olla rakentamassa digitaalista lentoasemaverkostoa, joka mahdollistaa kestävä kasvun sekä saavutettavuuden kehittymisen kansallisesti ja kansainvälisesti.



Kuva 22. Digitaalisen lentoaseman konseptikuvaus. (Redstone AERO, 2022)

TMP Zero: Tampere-Pirkkalan vähähiilisyysuhanke

Tampereen yliopiston ja Pirkkalan kunnan helmikuussa 2022 alkaneessa TMP Zero -hankkeessa on tavoitteena kehittää ”vähähiilisiin energiaratkaisuihin perustuva ilmailu- ja logistiikkaratkaisukokonaisuus Tampere-Pirkkalan lentoaseman alueelle ja sen ympäristöön”. Erityisenä tavoitteena on selvittää tulevaisuuden lentämissä ja lentoasematoiminnassa tarvittavan kaluston – sähkö- ja vetykäyttöisten lentokoneiden lisäksi siis myös muun muassa lentoaseman työkoneiden ja jopa lentoasemalle liikennöivien linja-autojen – asettamat vaatimukset lentoaseman infrastruktuurille. Hankkeessa toteutetaan myös lyhyt pilottikokeilu, jossa tutkitaan sähkölentokoneen käyttöä ja lataamista aurinkoenergiapuistoon tukeutuen. (EU:n rakennerahastojen hallintajärjestelmä, 2022)

3 Sähköinen lentoliikenne osana liikennejärjestelmää

3.1 Suomen liikennejärjestelmän tasot











LUVUN KESKEINEN SISÄLTÖ

- Sähköinen lentäminen on ensivaiheessa pienen kapasiteetin ja lyhyen kantaman liikennettä toisin kuin vaikka rautateiden kaukoliikenne
- Sähköinen lentäminen voi vaikuttaa positiivisesti liikenneturvallisuuteen sekä päästöihin, jos ohjaa pitkiä henkilöautomatkoja 0-päästöiseen lentämiseen
- Sähköisen lentämisen etuna nopeus, johon voidaan vaikuttaa myös matkaketjuja sujuvoittamalla – lentonopeus kuitenkin nykyistä lentokalustoa pienempi
- Sähköisen lentämisen kilpailullinen tila liikennejärjestelmän näkökulmasta on yli 200 km matkoilla sekä reiteillä, joilla junaliikennettä ei ole tai maantieteellisten esteiden, kuten vesistöjen, ylittämässä
- Voidaan hyödyntää olemassa olevaa melko hyvin Suomen kattavaa lentoasemainfrastruktuuria, mutta vaatii investointeja sähkölatausinfraan sekä myöhemmässä vaiheessa vetyinfraan
- Sähköinen lentäminen soveltuu pienten volyymien lentorahtiin syöttöliikenteenä suuremmille lentorahtia palveleville lentoasemille

Suomen liikennejärjestelmä koostuu tie-, raide-, vesi- ja ilmailiikenteen osajärjestelmistä. Kullakin on omat infrastruktuurinsa, joiden päällä liikennepalvelut tarjotaan.

Suomen liikennejärjestelmän tehtävä on tarjota saavutettavuutta kestäväällä ja tehokkaalla tavalla. Toimiva ja käyttäjiään palveleva liikennejärjestelmä on keskeinen edellytys kansainväliselle kilpailukyvyllä. Liikennejärjestelmälle asetetut tavoitteet voidaan saavuttaa hyödyntämällä kunkin liikennemuodon parhaimpia ominaisuuksia niille soveltuvilla alueilla. Liikennemuotoja yhdistelemällä ja muodostamalla saumattomia matkaketjuja voidaan saavuttaa suurimmat edut kustannustehokkaasti ja kestävästi. Liikennejärjestelmän kokonaisuus voidaan jäsenellä kuvan 23 mukaisesti. Sähköisen lentämisen kysyntää arvioidaan luvussa 4.

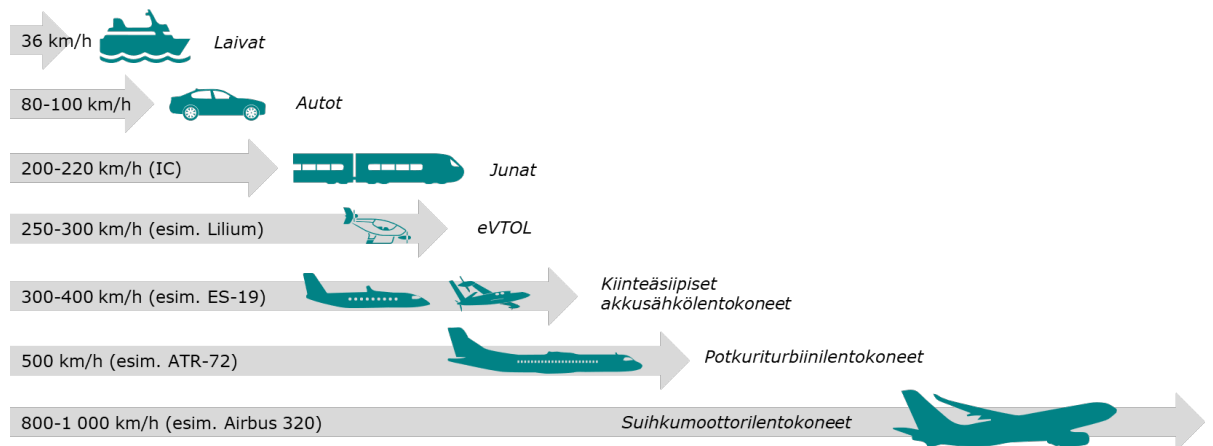
Sähköinen lentäminen on mielenkiintoinen uusi avaus liikennejärjestelmässä. Koska kyseessä on uusi teknologia, sen mahdollisuuksia voidaan tarkastella mm. teknologian, regulaation, ominaisuuksien ja toimintakonseptien kautta. Liikennejärjestelmän näkökulmasta korostuvat eri kulkumuotojen tyypilliset ominaisuudet: nopeus, turvallisuus, päästöt, kapasiteetti ja infrastruktuuri.

	KANSAINVÄLINEN KILPAILUKYKY JA SAAVUTETTAVUUS	<ul style="list-style-type: none"> Kaikki tasot yhdessä edistävät saavutettavuutta, kestävyyttä ja tehokkuutta 	Liikennejärjestelmän tavoitteita
	ELINKEINOELÄMÄ MATKAILU JA TKI	<ul style="list-style-type: none"> Saavutettavuuden parantaminen ja strategisen kilpailukyvyn parantaminen 	Kysyntä
	VÄESTÖ	<ul style="list-style-type: none"> Liikkumistarpeiden täyttäminen kestäväällä tavalla 	
	YMPÄRISTÖ JA ILMASTO	<ul style="list-style-type: none"> Akkusähköllä ei ilmastovaikutuksia Vedyn käytöllä pienet ilmastovaikutukset 	Reunaehdot
	TURVALLISUUS	<ul style="list-style-type: none"> Nollavisio 2050. Lentoliikenne turvallisimpia kulkumuotoja. 	
	LIIKKUMIS- JA KULJETUSPALVELUT	<ul style="list-style-type: none"> Optimaaliset palvelujen käyttöalueet Lentoliikenteessä reittilennot ja kutsupalvelut 	Tarjonta
	KÄYTTÖVOIMAT JA NIIDEN INFRASTRUKTUURI	<ul style="list-style-type: none"> Uusiutuva sähkö Kestävät nestemäiset polttoaineet Lataus- ja jakeluinfra 	Mahdollistajat
	LIIKKENNEINFRA	<ul style="list-style-type: none"> Tie-, rautatie-, lento- ja vesiliikenneinfra Väylät ja solmupisteet 	

Kuva 23. Suomen liikennejärjestelmän tasot.

3.2 Liikennemuotojen nopeus

Sähköinen lentäminen on auto- ja junaliikennettä nopeampaa, mutta sähköiset lentokoneet ovat hitaampia kuin potkuri- tai suihkuturbiinilentokoneet. Kiinteäsiipiset sähkölentokoneet ovat hieman nopeampia kuin pystysuoraan nousevat ja laskeutuvat sähköiset ilma-alukset (eVTOL). Ilma-alusten suuren nopeuden lisäksi myös mahdollisuus tehdä matka lyhintä reittiä linnuntietä on lentämisen etu. Kokonaismatka-ajan kannalta nopeat liityntämatkat lentoasemille ovat tärkeitä.



Kuva 24. Eri liikennemuotojen tyypilliset nopeudet.

3.3 Liikennemuotojen turvallisuus

Maaliskuussa 2022 valmistui Suomen liikenneturvallisuusstrategia vuosille 2022–2026. Aikajänteen vuoksi sähköinen lentoliikenne ei kuulu tarkasteluun, mutta työssä käsitellään miehittämätöntä ilmailua ja harrasteilmailua. (LVM, 2022)

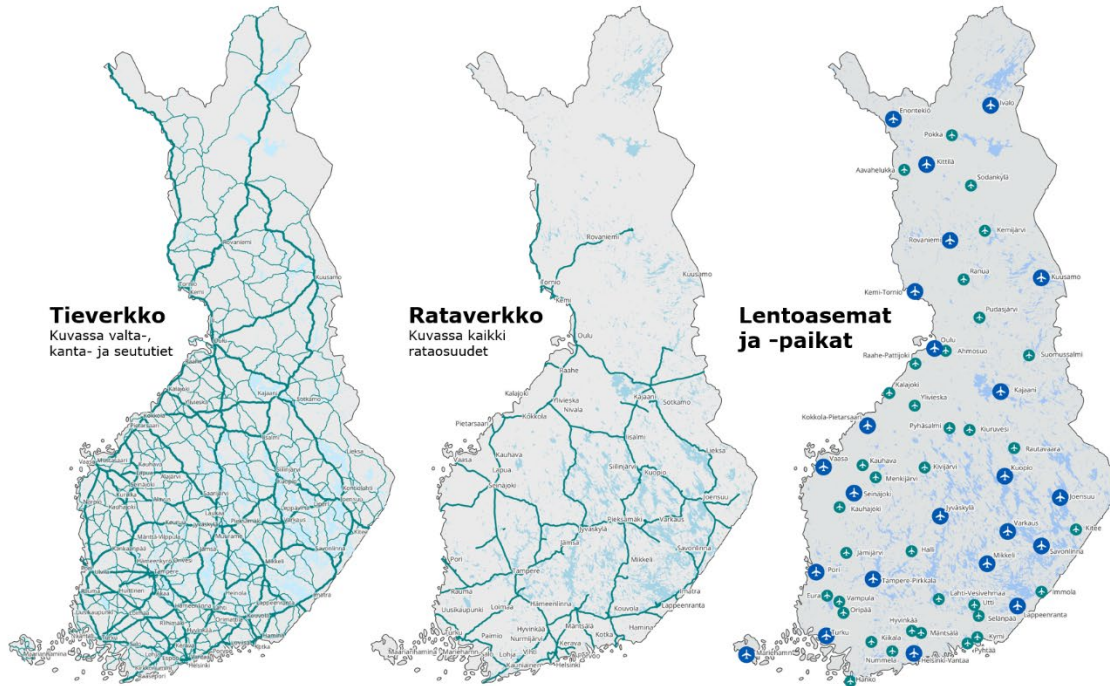
Tieliikenne on liikenneturvallisuuden näkökulmasta vaarallisin liikennemuoto. Suomen tieliikenteessä kuoli vuonna 2020 ennakkotietojen mukaan 222 ihmistä. Raideliikenteen turvallisuustaso on hyvä ja matkustajaturvallisuus erinomaisella tasolla. Vesiliikenne on myös turvallinen kuljetusmuoto, mutta erityisesti harrasteveneilyssä tapahtuu kuolemaan johtavia onnettomuuksia. Lentäminen on lennettyjä kilometrejä kohti huomattavasti turvallisempi liikennemuoto kuin tieliikenne. Lentoliikenteen turvallisuustavoitteet ja sääntely tulevat EU-tasolta ja Euroopan unionin lentoturvallisuusvirasto EASA koordinoi prosesseja. Lennonvarmistus puolestaan takaa turvallisen ja mahdollisimman viiveettömän lentoliikenteen Suomessa. Matkustajalennoilta lennon aikaisia onnettomuuksia Suomessa tai suomalaisilla ilma-aluksilla on tapahtunut vuosina 2006–2021 yhteensä 3 kertaa, eivätkä nämä onnettomuudet ole aiheuttaneet kuolonuhreja. (LVM, 2022; Traficom Liikennefakta, 2022)

Sähköisen lentoliikenteen teknologian turvallisuutta ja regulaatiota tarkastellaan erikseen tämän työn luvuissa. Uuden teknologian kehitykseen liittyy pitkiä tyyppihyväksyntäprosesseja ja muuta sääntelyä. Kaluston kehitystyö on tärkeää tehdä huolella ja laajassa vuorovaikutuksessa alan toimijoiden kesken, sillä myös sähköisen ilmailun tulee olla turvallista kaikissa sen muodoissa. Lentoliikenne on aina ollut hyvin turvallinen kulkumuoto eivätkä uudet sähköisen lentämisen mukana tulevat koneet ja toimintamallit saa tehdä tähän poikkeusta. Alan haasteena on varmistaa, että ilmatilassa miehittämättömien ja miehittyjen ilma-alusten määrän kasvaessakin ilmatila pysyy turvallisena. Kun tässä onnistutaan, on sähköisen lentoliikenteen potentiaali koko liikennejärjestelmän turvallisuutta parantavana kulkumuotona mahdollista. Jos sähköinen lentoliikenne voi korvata pitkämatkaista tieliikennettä ja aiheuttaa järjestelmien sisällä kulkumuoto-siirtymää, se auttaa osaltaan tieliikenteen turvallisuuden parantamisessa.

3.4 Liikennemuotojen infrastruktuuri

Liikennemuotojen infrastruktuuri määrittää niiden käytön skaalautuvuuden. Infrastruktuuriin liittyy infran kapasiteetin lisäksi infran laajuus ja kunto. Vesiliikenteen infrastruktuuria ei tässä käsitellä tarkemmin, mutta siihen kuuluvat kauppamerenkululle ja harrastustoiminnalle soveltuvat sisävesiväylät ja meriväylät. Tieliikenteessä infra on ylivoimaisesti laajin liikennemuodoista. Tieverkko ulottuu aina valtateiltä yksityisteille ja on pituudeltaan yli 450 000 km. Tieverkko on myös olennainen osa kaikkien muiden liikennemuotojen liityntäliikenteen infrastruktuuria. Tieverkolla on tietyillä osilla kapasiteettipuutteita ja korjausvelkaa tieverkolle on kertynyt 1,5 miljardia euroa.

Rataverkko palvelee Suomessa varsinkin kaupunkiseutujen välistä liikennettä sekä teollisuuden tarpeita. Rataverkko kattaa melko hyvin Suomen väestökeskittymät, mutta pinta-alasta vain murto-osan. Viiden kilometrin säteellä rautatieasemasta asuu 55 % ja 20 kilometrin säteellä 83 % suomalaisista, mutta pinta-alasta vastaavat osuudet ovat noin 4 % (5 km) ja 30 % (20 km) (Pajarre et al., 2021).



Kuva 25. Suomen tieverkkoa, rataverkkoa sekä lentoasemia ja -paikkoja. Kuvassa on esitetty ne lentopaikat, joilla kiitotie on vähintään 800 m pitkä.

Lentoasemien ja lentopaikkojen verkosto on melko kattava ja peittää myös sellaisia alueita, joihin ei ole rautatietä lähietäisyydellä, vaikka kokonaisuutena verkko ei olekaan aivan yhtä kattava kuin rautatieverkko. 20 kilometrin säteelle sähkölentämislle ominaisuuksiltaan soveltuvista lentoasemista ja -paikoista sijoittuu 19 % Suomen pinta-alasta ja 70 % väestöstä. Erityisesti pohjoisen Suomen matkailukohteiden, kuten Kuusamon, Kittilän ja Ivalon kannalta lentoasemat ja lentoyhteydet ovat tärkeitä, eikä ratayhteyttä näille alueille ole.

Kaupallinen kaikille avoin lentoliikenne pystyy hyödyntämään käytännössä vain lentoasemia, joiden varustelutaso vastaa kaikille avoimen liikenteelle asetettuja vaatimuksia (ks. luku 2.6.2). Suomessa on kuitenkin monia valvomattomia lentopaikkoja, joiden kiitotien pituus riittäisi sähköisille lentokoneille. Näille voidaan operoida nykyisen regulaation puitteissa satunnaisia taksilentoja. Jos sähköinen lentoliikenne generoisi laajemmin uutta taksilentotoimintaa, edellyttäisi tämä todennäköisesti merkittäviä investointeja lentopaikkojen turvallisuusinfrastruktuurin ja palvelutason parantamiseen. Lentopaikkojen käytettävyys sähköisille lentokoneille edellyttää myös investointeja lataus- tai jakeluinfran sekä lentoliikenteen kysynnän kehittymistä myös nykyisen lentoasemaverkoston ulkopuolelle.

Alueilla, joilla ei ole rautatietä eikä junayhteyksiä käytettävissä, vaihtoehtona on henkilöauton käyttö. Linja-autoliikenteen linjastoa on karsittu viime vuosina erityisesti maaseudulta. Sähköinen lentoliikenne on mahdollisuus esimerkiksi pienelle teollisuuspaikkakunnalle, josta on liikkumistarpeita ulkomaille, Helsinkiin tai maakuntakeskuksiin. Helikopterin ja lentokoneen välille asettuvilla eVTOL-koneilla voidaan lentää myös lentoasemien ja lentopaikkojen ulkopuolella olevilta lähtöpaikoilta lentotaksina. Tämä laajentaa huomattavasti pienten volyymien ja harvaan asuttujen alueiden mahdollisuuksia käyttää nopeaa liikennemuotoa. Erityisen hyvin eVTOL-koneiden ominaisuudet soveltuvat kaupunkien välisiin matkoihin sekä mahdollisesti liityntälentoihin lentoasemille.

3.5 Liikennemuotojen käyttövoimat ja lataus- ja jakeluinfrastruktuuri

Kaikkien liikennemuotojen osalta on käynnissä merkittävä murros, kun fossiilista polttoaineista pyritään eroon. Vaihtoehtoina fossiilisille polttoaineille ovat luvussa 2.3 esitellyt akkusähkö, vety, biopolttoaineet ja sähköpolttoaineet. Näiden ominaisuudet huomioon ottaen, on nähtävissä, että henkilöautoissa akkusähkö on valtavirtaa, mutta myös raskaammassa kalustossa se on kasvattamassa suosiotaan. Raideliikenne on Suomessa jo nyt pitkälti sähköistettyä. Dieselveto-kalustolle vaihtoehtoja ovat vety tai muut nestemäiset uusiutuvat polttoaineet. Meriliikenteessä kehitys etenee hybridikalustoon ja nesteytetyn maakaasun (LNG) käyttöön sekä pidemmällä tähtäimellä sähköpolttoaineisiin ja mahdollisesti vetyyn.

Lentoliikenteessä sähköistyminen tapahtuu lyhyillä lentomatkoilla käytettävässä pienehkössä kalustossa, sillä akkujen paino asettaa rajoitteet käyttökohteille. Pidemmällä lentomatkoilla ja raskaammalla kalustolla siirtymäkauden ratkaisuja ovat kestävänt lentopolttoaineet (SAF), mutta tähtäimessä näyttää olevan vetykäyttöinen lentoliikenne, jolla negatiiviset ilmastovaikutukset ovat kestäviä lentopolttoaineita (SAF) pienemmät.

Energiankulutus ja päästöt ovat erilaiset eri liikennemuodoilla ja ne vaikuttavat tulevaisuudessa myös käyttäjien asenteiden kautta liikennemuodon valintoihin. Ajan myötä kaikki liikennemuodot muuttuvat yhä energiataloudellisemmiksi ja vähitellen hiilineutraaleiksi. Tällöin päästövertailujen merkitys vähenee, mutta energiataloudellisuus nousee suurempaan rooliin. Päästöjen merkityksen vähentyessä myös liikennemuotojen muut ominaisuudet korostuvat, jolloin lentoliikenteen nopeus ja turvallisuus tulevat olemaan vahvoja kilpailutekijöitä.

Uudet käyttövoimat edellyttävät uutta infrastruktuuria ja tätä kehitystä ohjataan EU:ssa mm. vaihtoehtoisten polttoaineiden jakeluinfrastruktuuria käsittelevän direktiivin avulla (AFIR), johon on tullut uudistusehdotus vuonna 2021 (Euroopan Komissio, 2021e). Tavoitteet koskevat erityisesti tieliikennettä. Tällä hetkellä Suomen liikenneministeriö arvioi, haetaanko ehdotukseen poikkeusta.

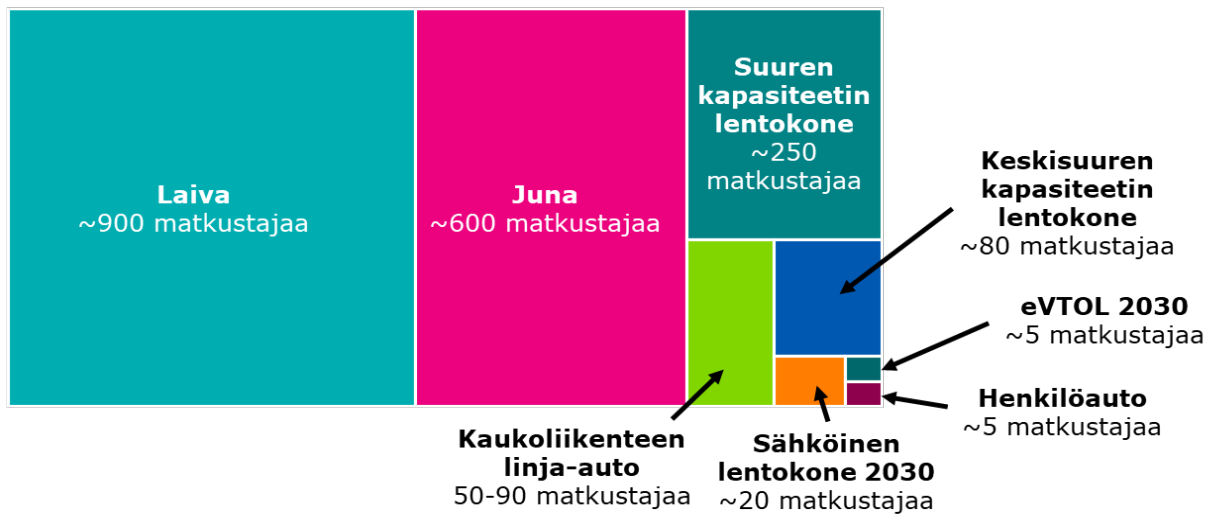
Sähköistä lentokalustoa direktiivi sivuaa TEN-T-lentoasemien maasähkövaatimusten osalta, jonka mukaan jokaisella TEN-T ydin- ja kattavan verkon lentoasemalla tulee olla maasähköä tarjolla jokaisen portin yhteydessä. Komission mukaan näkymä lentokaluston kehitykselle on vielä epäselvä, joten tarkempia infrastruktuuritavoitteita akkusähkö- ja vetykalustolle tarkastellaan vuoteen 2026 mennessä, kun markkinat ovat kypsemmät. Sillä välin jäsenvaltioita voidaan vaatia kansallisten politiikkakehysten (NPF) kautta arvioimaan kahden vuoden välein niiden alueella sijaitsevien rautateiden, satamien ja lentoasemien sähkölataus- ja tankkausinfrastruktuurin (vety, muut polttoaineet) esille nousseita tarpeita ja raportoida niistä kansallisissa täytäntöönpanoraporteissa. Lentoliikenteen sähkölatausinfrastruktuurin vaatimuksia on käsitelty tarkemmin luvussa 2.8. (Euroopan Komissio, 2021e)

3.6 Liikennemuotojen kapasiteetti

Matkustajakapasiteetti

Liikennepoliittisessa keskustelussa on tärkeä tunnistaa eri liikennemuotojen ominaisuudet ja niiden asettamat reunaehdot. Kapasiteetti on erityisesti kulloinkin soveltuvan liikennemuodon valintaan vaikuttava tekijä. Kapasiteettia voidaan tarkastella monella tapaa: matkustajakapasiteetin, tarjonnan tai fyysisen infran kautta. Sähköiset kiinteäsiipiset lentokoneet tulevat olemaan vuonna 2030 noin 20-paikkaisia ja eVTOL:iien tapauksessa 5-paikkaisia. Tämä tarkoittaa kuvan 26

mukaisesti sitä, että niiden kapasiteetti on hyvin pieni esimerkiksi juna- liikenteeseen tai nykyiseen lentoliikenteeseen nähden, joissa matkustaja- kapasiteetti on moninkertainen.



Kuva 26. Liikennemuotojen tyypillinen matkustajakapasiteetti.

Monilla Suomen nykyisillä lentoliikenteen reiteillä käytössä oleva kalusto on ollut kysyntään nähden suurehkoa, mikä on johtanut alhaisiin täyttöasteisiin. Myöhemmin työssä tarkastellaan, voitaisiinko osalla nykyisistä reiteistä lentää pienemmällä sähköisellä kalustolla, joka vastaisi paremmin kysyntään. Sähköinen lentoliikenne on tervetullut lisäys Suomen liikennejärjestelmään siksikin, että sen kapasiteetti voi sopia Suomen ohuisiin mutta tärkeisiin matkustajavirtoihin.

Tarjonnan kapasiteetti

Matkustajakapasiteettiin vaikuttaa olennaisesti tarjonnan kapasiteetti, joka määrittynyt kaupallisesti tarjonnan ja kysynnän kohtaamisen kautta. Suuri osa tieliikenteen palveluista on itse tuotettuja henkilöautolla, pyörällä tai kävellen tehtyjä matkoja. Henkilöautolla etuna on, että palvelutaso on hyvin korkea: ajoneuvo on saatavissa heti ja sillä voi mennä mihin tahansa. Kaupalliset palvelut tuotetaan tieliikenteessä takseilla ja busseilla sekä raideliikenteessä raitiovaunuilla, metroilla, lähiliikennejunilla ja kaukojunilla. Tarjonta kohdistuu pitkämatkaisessa joukkoliikenteessä tietyille vuoroväleille ja suurten kaupunkiseutujen välille. Joukkoliikenteeseen liittyy useimmiten liityntämatka molemmissa päissä matkaketjua.

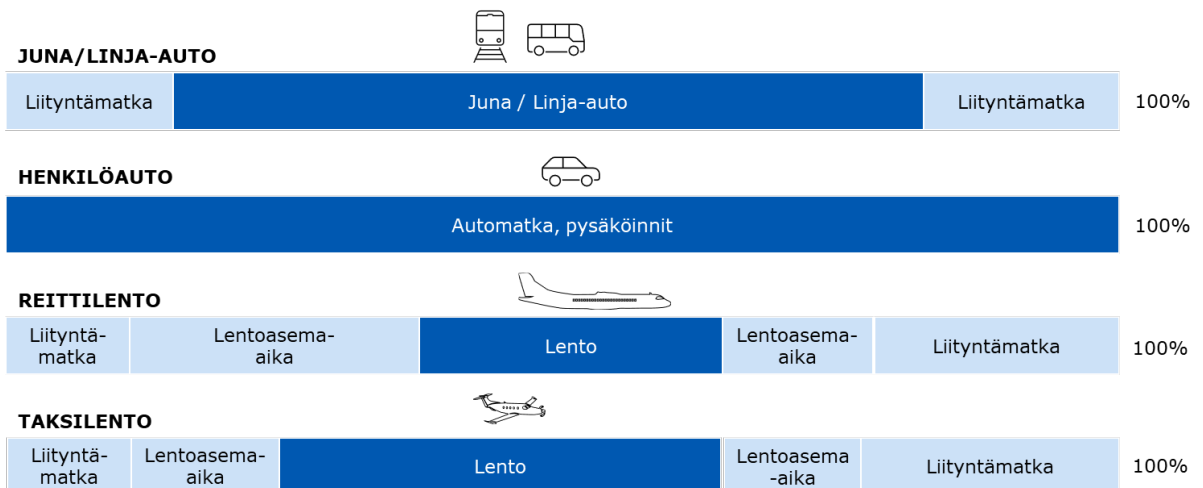
Lentoliikenne kattaa kotimaan lentoreitit alueilta Helsinki-Vantaan lentoasemalle ja sieltä yhteydet ulkomaille. Joitakin suoria yhteyksiä on ulkomaille myös muualta kuin Helsinki-Vantaalta. Alueiden välistä lentoliikenteen reittitarjontaa ei käytännössä ole. Liikelennot ovat tilausohjautuvia taksilentoja ja ne operoidaan pienehköllä lentokalustolla. Valtaosaan matkoista kuuluvat liityntämatkat lentoasemalle ja sieltä pois. Lentovuorojen frekvenssi määrää osaltaan palvelutason, joka on Suomen sisäisillä reiteillä tyypillisesti muutama lentovuoro per päivä per kohde. Nämä vuorot on yleensä aikataulutettu sopimaan yhteen Helsinki-Vantaan ulkomaan lentojen, erityisesti Euroopan-lentojen, kanssa. Useilla kotimaan reiteillä on mahdollista myös tehdä työpäivän kestävä matka Helsingin seudulle. Maakuntakeskusten suuntaan tämä ei onnistu yhtä hyvin.

Vesiliikenne jakautuu meriliikenteeseen ja sisävesiliikenteeseen. Vesiliikenne on pääosin tavaraliikenteen liikennemuoto. Meriliikenne on Suomen ulkomaankaupan tavaramäärällä mitaten tärkein liikennemuoto. Myös sisävesiä pitkin kuljetetaan teollisuuden raaka-aineita ja tuotteita. Meri- ja sisävesiliikenteen henkilöliikenne palvelee pääosin vapaa-ajan matkoja.

3.7 Liikennemuotojen kilpailukyky

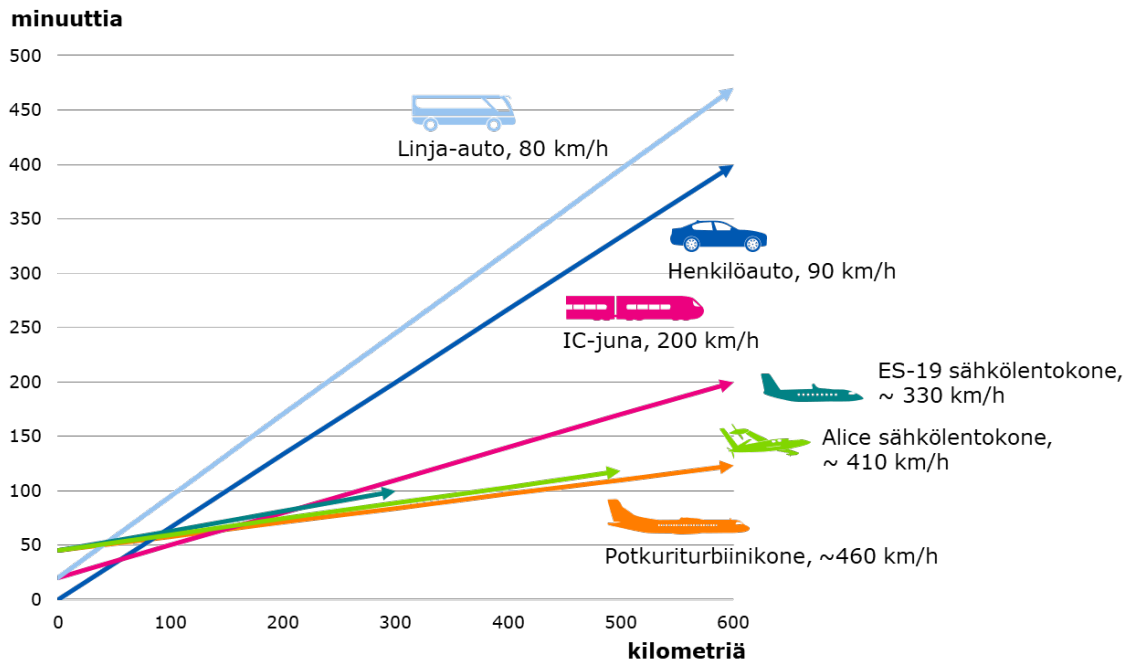
Liikenteessä käyttäjät valitsevat liikennemuodon tyypillisesti vaivattomuuden, matka-ajan ja hinnan mukaan, ja juuri tässä järjestyksessä. Maaliikenteessä autoliikenne on suosituin, koska se on vaivattomin kulkumuoto ja sillä pääsee ovelta ovelle, jolloin kohtuullisen pituisilla matkoilla matka-aikakin pysyy kilpailukykyisenä. Mitä pidempi matka on, sen kilpailukykyisemmäksi junaliikenne ja lentoliikenne muuttuvat. Linja-autoliikenne kilpailee ensisijaisesti juna- ja henkilöautoliikenteen kanssa. Maajoukkoliikenteen matkoihin kuuluu lähes aina liityntämatka molemmissa päissä matkaketjua. Vaikka runkolinja olisi nopea, voivat liityntämatkat heikentää joukkoliikenteen houkuttelevuutta.

Reittilentoliikenteessä liityntämatkojen lisäksi matkaketjuun kuuluvat lentoasema-ajat molemmissa päissä matkaketjua kuvan 27 mukaisesti. Siihen kuuluvat varo aika sekä matkatavaroiden luovutukseen, turvatarkastukseen ja koneen lastaukseen kuluva aika. Itse lentoon kuuluu lentoasemalla rullaus, lentoonlähtö, lento matkanopeudessa, laskeutuminen ja rullaus. Tämän jälkeen aikaa kuluu matkatavaroiden odotteluun. Helsinki-Vantaalta lennettäessä lentoasema-aika on tyypillisesti muita lentoasemia pidempi, jopa 1–2 tuntia, kun esimerkiksi Oulussa se voi olla 45 minuuttia. Kaikilla Suomen lentoasemilla matkatavaroiden odotteluun kuluva aika on lyhyt. Taksilennoilla lentoasema-aika lähdeettäessä voi olla lyhyempi, koska lentoasematoimintoihin kuluu vähemmän aikaa. Pienempi kalusto on reittiliikennekalustoa hieman hitaampaa, jolloin lennon osuus matkaketjun kokonaisajasta on suurempi.



Kuva 27. Teoreettinen kuvaus eri liikennemuotojen matkaketjuista.

Kun vertaillaan pääkulkumuodon matka-aikoja sekä otetaan huomioon linja-auto- ja junaliikenteessä 20 minuutin terminaaliaika ja lentoliikenteessä 45 minuutin lentoasema-aika, saadaan käsitys sähköisen lentoliikenteen ajallisesta kilpailutilasta. Kuvassa 28 on käytetty kulkumuotojen arvioituja keskinopeuksia. Lentokoneilla suurimmat mahdolliset nopeudet ovat esitettyä suuremmat, mutta keskimääräinen matkanopeus huomioi nousut ja laskut. Junaliikenteessä pysähdysten määrä ja rataosuus vaikuttavat todelliseen matkanopeuteen. Kuvasta huomataan sähköisen lentoliikenteen potkuriturbiinikalustoa (esim. Pilatus PC-12, ATR 72) hitaampi matkanopeus. Sähköisen kaluston kaupallinen kantama on ensi alkuun lyhyempi, mutta pitenee teknologian kehittyessä. Jos reitillä on käytettävissä junayhteys, on sähköisen lentokoneen ajallinen kilpailutila yli 200 km matkoilla. Tässä on kuitenkin huomioitava, että rautatieasemat sijaitsevat usein kaupungin keskustassa ja lentoasemat etäämmällä. Jos junayhteyttä ei ole käytössä, voi sähköinen lentokone olla jo alle 200 km matkoilla kilpailukykyinen. Todellinen ajallinen kilpailukyky määrittyy kuitenkin kokonaismatka-aikojen mukaisesti.

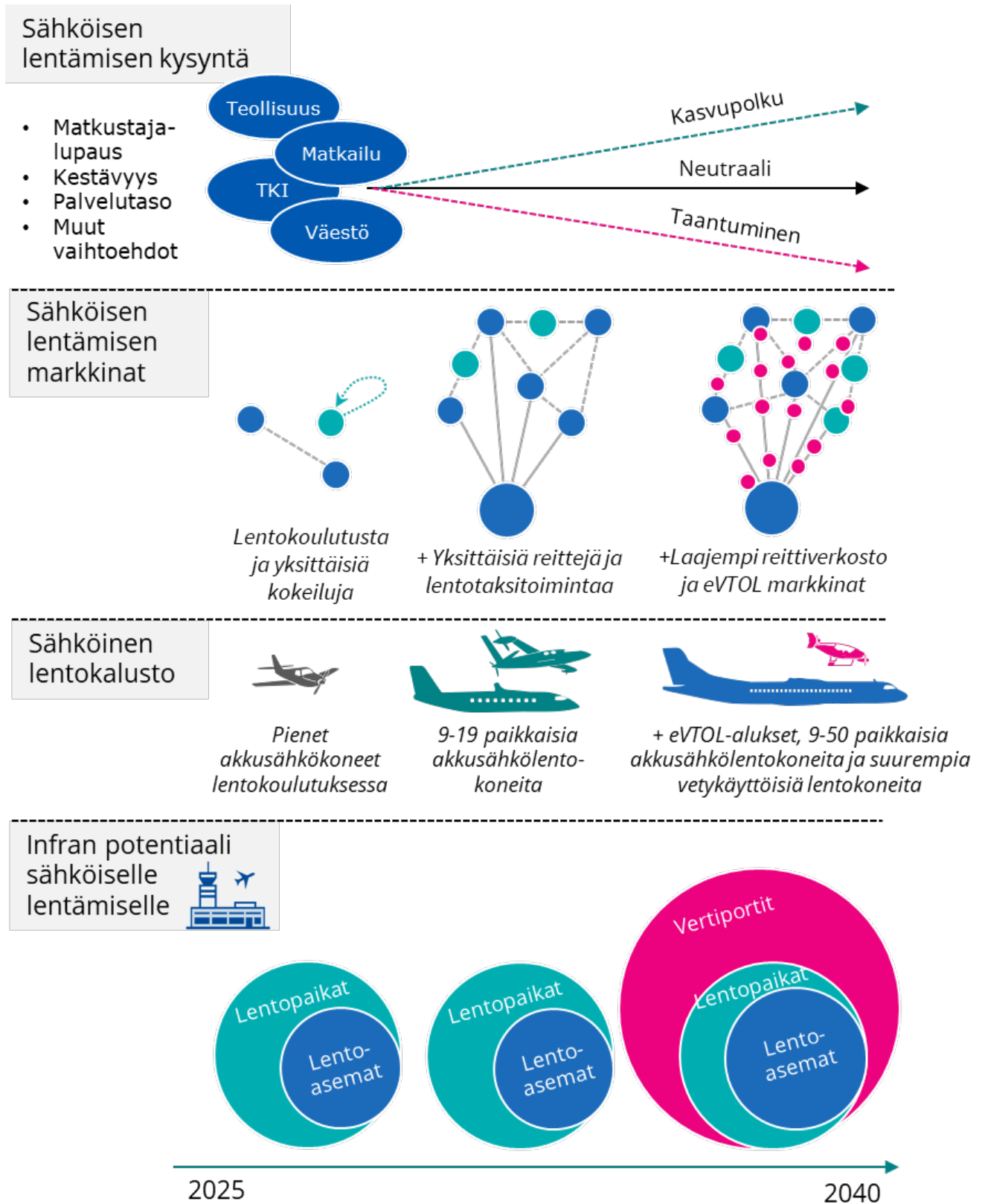


Kuva 28. Eri liikennemuotojen teoreettinen vertailu matka-ajan ja etäisyyden suhteen.

Sähköisellä lentoliikenteellä pieni matkustajakapasiteetti tarjoaa sekä haasteen että mahdollisuuden. Haasteena on se, että liiketaloudellisesti on tärkeää saada kaikilla lennoilla kapasiteetti mahdollisimman täyteen käyttöön. Yhdenkin matkustajan muutos täyttöasteessa on suhteellisesti paljon merkittävämpi kuin isompien lentokoneiden kohdalla. Toisaalta mahdollisuutena on, että pienellä kalustolla voidaan vastata paremmin kysyntään ja tarjota enemmän lentovuoroja pitkin päivää. Tällöin entistä parempi vuorotarjonta nostaisi lentoliikenteen palvelutasoa ja voisi lisätä kysyntää.

Pienillä lentokoneilla on vaikeampaa saavuttaa skaalaetua kuin suuremmilla. Kiinteät kustannukset nostavat pienen kapasiteetin koneilla yksikkökustannuksia. Niiden alentamiseksi lentokaluston on oltava ilmassa mahdollisimman paljon. (Finnair, 2022a) Konerotaation suunnittelu koko päivän kattavaksi on tärkeää. Yksi ja sama kone voi vuorokauden eri aikoina tuottaa erilaisia lentoliikenteen palveluja, kuten reittilentoja, taksilentoja ja rahdin kuljettamista.

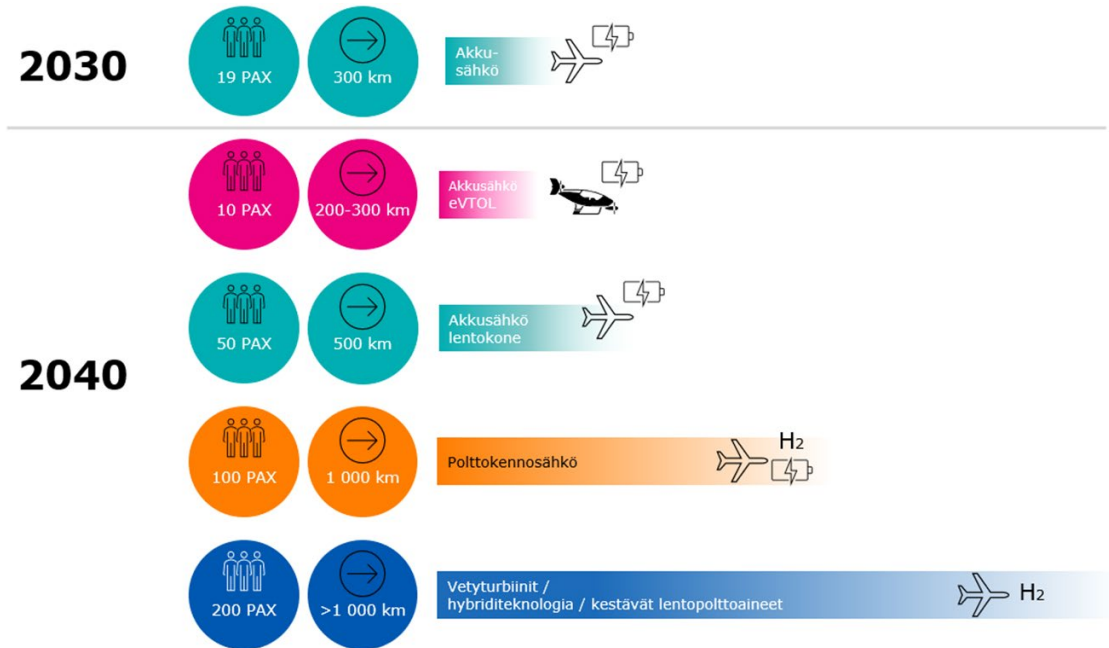
4 Sähköisen lentämisen kehitys Suomessa vuoteen 2040



Kuva 29. Sähköisen lentämisen kehityksen kokonaiskuva.

Sähköisen lentämisen markkinakehitys alkaa teknologiavetoisesti kehittyä pienehköistä ilma-aluksista ja niille soveltuvasta liikenteestä. Vähitellen teknologian kehittyessä järeämpikin lentokalusto sähköistyy, jolloin suurempi osa lentoreiteistä voidaan lentää sähköllä.

Suomessa on laaja lentopaikkojen verkosto, joille tyypillistä on harrasteilmailu ja lentokoulutus. Osa lentopaikoista voidaan tulevaisuudessa varustaa uuden ajan digitaalisiksi lentoasemiksi. Niillä koulutuslentoja voidaan suorittaa pienillä ilma-aluksilla kuten tähänkin asti. Laajennettua lentoasemien verkostoa voidaan käyttää esimerkiksi taksilentotoimintaan sähköisillä 9–19 hengen lentokoneilla ja pienemmillä eVTOL-koneilla. Sähkölentokoneet soveltuvat kapasiteettinsa ja kantamansa takia tällaiseen liikenteeseen hyvin. Lentotarjonta voi olla pieneköjen säännöllisten volyymien reittiliikennettä tai digitaaliseen kysynnän ja tarjonnan yhteensovittamiseen perustuvaa kysyntäohjautuvaa taksilentoliikennettä.



Kuva 30. Arvio sähköisen kaluston kaupallisesta kyvykkyydestä Suomessa vuoteen 2040 mennessä.

Vertiportit tarjoavat alustan ovelta-ovelle-tyyppisille pienten volyymien lennoille pystysuoraan nouseville ja laskeutuville koneille. Helikopterit ovat jo tunnettua ja käytössä olevaa teknologiaa, mutta eVTOL-koneiden tulo markkinoille tulee laajentamaan lentämisen mahdollisuuksia huomattavasti. Vertiport-alustojen verkosto laajentaa lentämisen lähtö- ja määräpaikkojen määrän uudelle tasolle. eVTOL-koneilla voidaan lentää suoraan määränpään tai syöttölentoja lähimmälle lentoasemalle. Lennot sopivat yhtä hyvin ruuhkaisten kaupunki-alueiden matkoihin kuin harvaan asuttujen alueiden saavutettavuuden parantamiseen, jossa henkilöauto on usein ainut kulkuväline.

Markkinoiden syntyminen ja kehitys ratkaisee, missä määrin näitä laajempia tarjontaverkostoja aletaan tulevaisuudessa käyttää. Teknologian kehitys ja laaja infrastruktuuri muodostavat pohjan tulevien palvelujen synnylle. Sähköinen lentäminen on voimakas ajuri lentokaluston uudistamiselle. Suomessa on lentoasemia ja lentopaikkoja yhteensä noin 100 ja ne ovat jakautuneet varsin tasaisesti eri puolille Suomea. Markkinoiden kehitys ja lentämisen intensiteetti riippuvat kysynnän ja tarjonnan kohtaamisesta. Kysyntään vaikuttaa, millaiseksi Suomi tulevaisuudessa kehittyy. Väestön määrä, sosiodemografia ja sijainti sekä elinkeinorakenne ja yritysten sijainti voivat muuttua. Matkailukohteita tulee aina olemaan eri puolilla Suomea. Työ- ja elinkeinoministeriön skenaarioissa on esitetty erilaisia tulevaisuuskuvia Suomelle vuoteen 2040. Ne tarjoavat yhden lähestymistavan arvioida sähköisen lentämisen käytön edellytyksiä tulevaisuudessa.

4.1 Sähköisen lentämisen kysynnän muodostuminen

4.1.1 Nykyinen lentämisen kysyntä

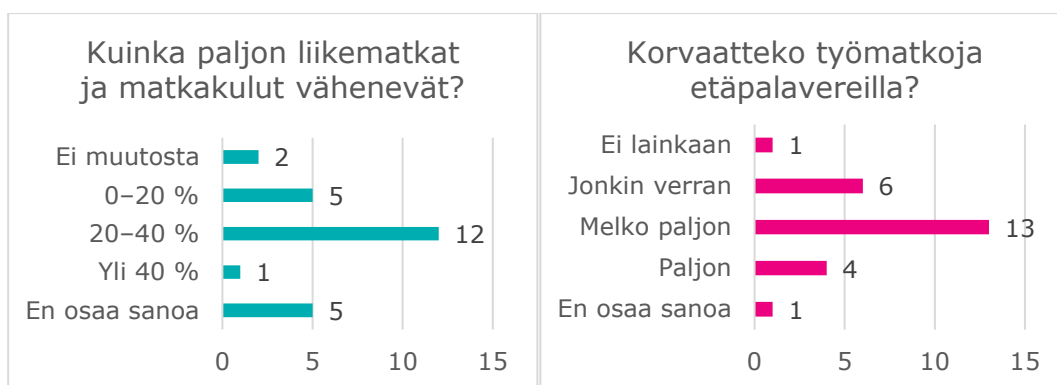
Elinkeinoelämä

Suomen menestykseen kansainvälisillä markkinoilla vaikuttaa, miten hyvin Suomen eri alueilta päästään ulkomaille. Vielä tärkeämpää on, miten ulkomaiset asiakkaat pääsevät käymään suomalaisyrityksissä. Hyvä saavutettavuus ja työvoiman saatavuus nousevat vuosittain tärkeimmiksi tekijöiksi kauppakamarien yrityskyselyissä. Suomi on Ruotsin tapaan elinkeinorakenteeltaan hajautunut ja merkittävää yritystoimintaa sijaitsee koko maassa.

Suomi on logistisesti haastava pitkien välimatkojen maa, ja siksi lentoyhteisillä on aina ollut merkittävä rooli kansainvälisen yritystoiminnan vetovoimatekijänä. Suomen talousalueilla on vientiteollisuutta, joka tuottaa Suomelle yhteensä noin 100 miljardin euron tulot tavaroiden ja palveluiden viennistä vuosittain. Esimerkiksi länsirannikolla Turusta Tornioon sijaitsee Suomen vientiteollisuuden tärkein vyöhyke, joka tuottaa n. 30 % Suomen tavaravientituloista.

Merkittävä osa elinkeinoelämän matkustustarpeista on ulkomaille, ja nykyisen lentoliikennejärjestelmän myötä matkat suuntautuvat pääosin Helsinki-Vantaan kautta, josta on hyvät kansainväliset lentoyhteydet. Perinteisesti Suomen elinkeinoelämän lentotarpeet ajoittuvat niin, että aamun liityntälennolla ehtii Helsinki-Vantaan jatkolennoille ja illansuussa viimeisellä lennolla takaisin kotiin.

Yle teki koronapandemian vaikutuksista liikematkustukseen vuoden 2021 lopulla kyselyn Suomen 30 suurimmalle pörssiyritykselle. Kyselyyn vastasi 25 yritystä, joiden vastaukset on esitetty kuvassa 31. Vastausten perusteella liikematkat tulevat vähenemään lähes jokaisessa yrityksessä. Tarpeettomia matkoja vältetään jatkossa ajan ja rahan säästämiseksi, henkilöstön hyvinvoinnin parantamiseksi sekä päästöjen vähentämiseksi. Palaverien lisäksi etänä voidaan tehdä myös huolto-, testaus- ja valvontatoimenpiteitä. Yrityksistä kuitenkin painotetaan, että kasvokkaisia kohtaamisia ovat yhä välttämättömiä mm. asiakastapaamisissa ja me-hengen ylläpitämisessä. (Yle, 2021) Suuret pörssiyritykset ovat kansainvälisiä toimijoita verkostoineen, ja siksi liikesuhteiden ylläpito ja uusien luominen edellyttää jatkossakin kansainvälisiä yhteyksiä.



Kuva 31. Yritysten arvioita liikematkailun muutoksista koronapandemian jälkeen.
Lähtötiedot: (Yle, 2021)

Satakunnan kauppakamarin tutkimuksen mukaan satakuntalaisten kansainvälisten projektiliiketoiminnan yhtiöiden arvioidaan tekevän vuodessa keskimäärin noin 3 850 matkaa Eurooppaan ja muualle maailmaan. Kansainvälisillä valmistuksen liiketoimintaa tekeville yhtiöille vastaava arvio vaihtelee 60–390 matkan välillä. 86 % alueen yrityksistä tarvitsee lentoyhteyttä asiakastapaamisiin ja myyntineuvotteluihin, 67 % laitevalmistajilla tai messuilla vierailuun sekä asiakkaan saapumiseen Satakuntaan ja 58 % yhtiön tai konsernin sisäisiin

lentomatkoihin. 89 % pitää Helsinki-Vantaan lentoasemaa merkityksellisenä matkan lähtöpisteenä, johon tarvitaan toimiva yhteys. (Satakunnan kauppakamari, 2022)

Matkailu

Matkailun kokonaiskysyntä Suomessa oli vuonna 2019 yli 16 miljardia euroa. Vuonna 2019 kansainvälisten matkailijoiden Suomeen jättämät tulot olivat noin 5,3 miljardia euroa (TEM). Koronapandemia on vaikuttanut merkittävästi Suomen matkailuun, mutta toipuminen on kuitenkin käynnissä. Visit Finlandin Oxford Economics -tutkimuslaitokselta tilaaman skenaarioraportin mukaan Suomeen suuntautuva kansainvälinen matkailu elpyy pandemiaa edeltäneelle tasolle vuonna 2024 (McDermott, 2021). Euroopan muuttunut turvallisuustilanne on vaikuttanut eurooppalaiseen toimintaympäristöön monin tavoin. Yhtenä ilmentymänä on matkailijoiden lisääntynyt epävarmuus matkustaa Suomeen. Tämä tulee hidastamaan kansainvälisen matkailun palautumisnopeutta siitä, mitä koronapandemiasta palautumisesta on arvioitu.

Koronan aikana kotimaan matkailu on nostanut suosiotaan. Tilastokeskuksen mukaan yöpymisen sisältäneiden vapaa-ajanmatkojen määrä kotimaassa lisääntyi kesä-elokuussa 2021 lähes neljänneksen edellisvuodesta, ja noin 19 % vuosien 2012–2019 keskimääräiseen kotimaan matkailumäärään nähden. Yöpymisen sisältäneitä kotimaan matkoja tehtiin vuoden 2021 kesäkuukausien aikana yhteensä lähes 11 miljoonaa. (Tilastokeskus, 2022)

Kansainvälisen ja kotimaisen matkailun trendejä ovat mm. kestävyys, uudet elämykset ja aikabudjettien kiristyminen. Suomen vetovoimaiset matkailukohteet sijaitsevat eri puolilla laajaa maata, mikä tarkoittaa parhainta saavutettavuutta lentäen. Yksi kestävä matkailun keskeisimmistä haasteista on tarjota myös kestävä saavutettavuutta. Sähköinen lentäminen voisi olla yksi ratkaisu tähän. Sillä voitaisiin tarjota nollapäästöinen vaihtoehto yhä suuremmalle ympäristötietoisten matkailijoiden kohderyhmälle.

Lentämisen nopeus on tärkeä peruste, miksi moni matkailija valitsee sen kulkumuodokseen. Tämän päivän matkailussa aika ratkaisee ja lyhyessä ajassa halutaan kokea mahdollisimman paljon. Kansainväliset matkailijat saapuvat Suomeen Helsinki-Vantaan kautta tai suoraan charterlennoilla painottuen erityisesti sesonkiaikoihin. Matkailun kysyntä on siis vaihtelevaa ja erityisesti matalamman kysynnän ajoille pienen kapasiteetin sähköinen lentoliikenne on mahdollisuus.

TKI-toiminta

Suomen korkeakoulu- ja tutkimusmaailma toimii kansainvälisissä verkostoissa. Toimipaikkoja sijaitsee erityisesti suurissa asutuskeskuksissa ja niiden lähetyillä. Korkeakouluille ja tutkimuslaitoksille kansainvälinen saavutettavuus on tärkeää, sillä konferenssit, tutkimusprojektit ja innovatiivinen yhteistyö vaativat kasvokkaisia tapaamisia. Suomesta pitää päästä maailmalle ja päinvastoin. Sähköinen lentäminen voisi mm. edistää Suomen ja Ruotsin välistä yhteistyötä Pohjanlahden ylitse vihreän siirtymän kehitysprojekteissa.

Väestön vapaa-ajan matkat

Lentämisen tarpeet koostuvat Suomessa pääosin elinkeinoelämän, matkailun ja TKI-toiminnan tarpeista, mutta myös vapaa-ajan matkoissa on lentämisellä oma roolinsa. Matkan syy voi olla esimerkiksi vierailu sukulaisten tai ystävien luona. Taulukkoon 9 on koottu lentämisen tarpeita niin henkilöiden kuin tavarantoiminnan osalta.

Taulukko 9. Lentämisen tarpeita Suomessa. Muokattu lähteestä (Traficom, 2020)

Elinkeino	Matkustustarve	Kuljetustarve
Matkailu ja tapahtumatuotannot	<ul style="list-style-type: none"> • Matkailijat ja tapahtumavieraat • Matkanjärjestäjät tutustumiskäynneillä 	<ul style="list-style-type: none"> • Suurtapahtumien kausittaiset kuljetukset, esim. urheilutapahtumat, leirit
Energiahuolto ja prosessiteollisuus (Metsä-, metalli-, kaivos-, kemian-, muovi-, kumi- ja elintarviketeollisuus)	<ul style="list-style-type: none"> • Huolto- ja asennushenkilöstö (myös jälkiasennukset) • Muu kriittisen asiantuntemuksen henkilöstö • Myyntitehtävissä olevat • Asiakkaiden vierailukäynnit 	<ul style="list-style-type: none"> • Koneet ja laitteet • Kriittiset varaosat • Posti (1. luokka)
Tietoyhteiskunta, suunnittelualue, teknologiateollisuus ja rahoitushuolto	<ul style="list-style-type: none"> • Johto- ja myyntihenkilöstö • Asiantuntijat ja suunnittelijat • Huolto- ja asennushenkilöstö 	<ul style="list-style-type: none"> • Tietojärjestelmien varaosat • Posti (1. luokka) • Raha, arvometallit
Logistiikka (alueen sisäinen ja kansainvälinen)	<ul style="list-style-type: none"> • Johto- ja operatiiviset vastuuhenkilöt 	<ul style="list-style-type: none"> • Varaosat • Huoltovarmuus
Sosiaali- ja terveystarvikkeet	<ul style="list-style-type: none"> • Lääkärit (keikkatyö) • Erikoissairaanhoidon potilaat 	<ul style="list-style-type: none"> • Lääkkeet, hoitotarvikkeet ja -laitteet • Siirrettävät elimet, kiireelliset lääkinnälliset kuljetukset (veripalvelu)
Julkinen hallinto	<ul style="list-style-type: none"> • Henkilökunta (vuorovaikutus keskushallinnon kanssa) • Kansainvälinen yhteistyö (EU, naapurimaat) 	
Yliopistot ja muut tutkimuslaitokset	<ul style="list-style-type: none"> • Tutkimus- ja opetushenkilökunta (yhteistyöverkostot) • Kansainväliset opiskelijat 	<ul style="list-style-type: none"> • Tapahtumiin liittyvät kuljetukset (kansainväliset kokoukset, konferenssit)
Väestö	<ul style="list-style-type: none"> • Vapaa-ajan matkat • Työmatkat 	

4.1.2 Lisääkö sähköinen lentäminen lentämisen kysyntää Suomessa?



Kuva 32. Sähköisen lentämisen kysyntään vaikuttavia tekijöitä.

Teollisuus ja matkailu avainasemassa

Teollisuus ja matkailu ovat kaksi suurta sektoria, jotka hyödyntävät lentoliikennettä. Teollisuudessa merkittävin kehityssuuntaus on kohti hiilineutraalia tuotantoa sekä logistiikkaa. Tämä on imagotekijä mutta yhä suuremmissa määrin myös keskeinen kilpailutekijä. Monet yritykset ovat vähentäneet lentämistä ympäristösyistä. Sähköisen lentämisen myötä yrityksille tärkeää saavutettavuutta voitaisiin parantaa kestävämmällä tavalla. Tämä voisi lisätä liikematkustusta kotimaassa ja lähimaihinkin. Myös tavaraliikenteessä nopeat varaosatoimitukset sähköisillä droneilla tai piensähkölentokoneilla voisivat parantaa teollisuuden kilpailukykyä ja houkuttaa näin uutta tavaraliikennemarkkinaa.

Matkailussa kestävä matkailu on kilpailuvaltti. Ympäristötietoiset matkailijat erityisesti Euroopassa voivat suosia kohteita, joissa kestävyys on otettu huomioon kaikessa tekemisessä. Suomen monet etäiset kohteet ovat parhaiten lentämällä saavutettavissa, jolloin sähköinen lentäminen voitaisiin paketoita osaksi kestävä matkailukonseptia. Sekä matkailussa että teollisuudessa nopeasta – ja hiilineutraalista – yhteydestä ollaan todennäköisesti valmiita maksamaan.

Matkailu ja teollisuus ovat sähköisen lentämisen kysynnän tukipilareita, mutta myös TKI-sektori hyötyisi parantuneesta saavutettavuudesta. Tämä olisi laajemmin hyödyllistä Suomen tietopääoman kehittymiselle.

Ajuri lentämisen kulttuurin kehittymiselle

Sähköinen lentäminen ei itseisarvona edistä lentämistä Suomessa, mutta se voi olla ajuri lentämisen kulttuurin kehittymiselle. Verrattuna esimerkiksi Norjaan, Ruotsiin, Kanadaan tai Yhdysvaltoihin, Suomessa ei ole samanlaista tapaa lentämiselle. Siksi sähköinen lentäminen ei nopealla aikavälillä tule muuttamaan lentämisen kysyntää, mutta ajan saatossa vihreät arvot yhdessä lentämisen nopeuden kanssa voivat luoda kysyntäpainetta.

Jos samaan aikaan sähköisen lentämisen teknologia kehittyy suotuisasti ja lentoyhtiöt saavat kalustolla kustannuskilpailukykyä, voidaan myös tarjontaa kehittää kohtuuhintaisella lipputarjonnalla. Tällöin voidaan saavuttaa positiivinen kierre, jossa tarjonta generoi kysyntää. Kasvu tapahtuisi kuitenkin hiilineutraalisti. Koska kyse on uudesta teknologiasta, valtion tukipolitiikalla on todennäköisesti rooli ensi vaiheessa, kun markkinaa kehitetään.

Asiakaskokemus sähköisessä lentämisessä

Sähköisen lentämisen tulee olla asiakaskokemukseltaan laadukas. Se ei saa poiketa miltään osin heikompaan suuntaan kuin mihin matkustajat ovat tottuneet tavanomaisessa lentoliikenteessä. Lentoyhtiön palvelulupauksen täytyy olla toteutettavissa. Lennoilla on totuttu tarjoiluun, mutta sähkölentokoneiden lyhyillä kantamilla lennot eivät kestä kauan. Pienemmissä sähkölentokoneissa ei välttämättä tarvita matkustamohenkilökuntaa, mikä tekee tarjoilusta itsepalvelu-tyyppistä. WC on lyhyilläkin matkoilla välttämätön varuste, mutta lentokoneen tila ja paino asettavat rajoitteita. Samoin käsimatkatavaralle tulisi olla tilaa varsinkin, jos kyse on yhteydestä jatkolennot. Suurille matkatavaroille tilaa ei välttämättä ole riittävästi. Esimerkiksi Aasiasta Helsinki-Vantaalle saapuvilla matkustajilla on paljon matkatavaraa, jolloin Suomen sisäiset jatkolennot sähköisellä koneella eivät ehkä sovellu tähän tarkoitukseen.

Sähköinen lentokone on tuotteena melko erilainen kuin nykyisin käytössä olevat suuremmat lentokoneet. Pieni kalusto on esimerkiksi säälle herkempi (Finnair, 2022a). Alkuvaiheessa sähköinen lentäminen tarjoaa varsin lyhyen kantaman matkoja, jolloin muut liikennemuodot voivat olla kilpailukykyisempiä. Esimerkiksi nopeat junayhteydet lentokentältä vähentävät noin 200 kilometrin matkoilla sähkölentämisen kilpailuetua. Tilanne kuitenkin muuttuu sitä mukaa kuin markkinoille tulee suurempia sähkölentokoneita.

4.2 Sähköisen lentämisen kehityksen arviointi

Sähköisen lentämisen potentiaaliin vaikuttavat keskeisesti teknologian kyvykkyys, lentoliikenteen ja muiden liikennemuotojen palvelutaso sekä liikennemuotojen hinnat, mitkä määrittävät pitkälti kysynnän muodostumista. Teknologisesti kaluston tulee olla kypsää ja tyyppihyväksyttyä, jotta ilma-alukset saadaan kaupalliseen käyttöön. Regulaatio asettaa alusten todellisen kantaman, sillä kaupallinen lentoliikenne edellyttää riittävästi varusteltuja varalaskupaikkoja sekä kaluston energiareservejä.

Sähköiset lentokoneet voivat tutkimusten mukaan alentaa operatiivisia kustannuksia jonkin verran, mutta kannattavuuden ehto on silti riittävä kysyntä. Kysyntää voidaan arvioida olemassa olevan tiedon perusteella sekä lento-liikennettä generoivia toimintoja analysoimalla. Tarjonnan osalta reitillä tulee olla kaupalliselle lentoliikenteelle soveltuvat lentoasemat sekä varalentopaikat. Reitin tulee olla yksikkökustannuksiltaan järkevä. Muiden kulkumuotojen kilpailukyky pitää olla riittävässä määrin heikompi, jotta lentoliikenne voi olla kilpailukykyinen vaihtoehto. Seuraavissa luvuissa tarkastellaan sähköisen lentoliikenteen potentiaalia oheisen taulukon 10 mukaisesti.

Taulukko 10. Sähköisen lentämisen potentiaalın kriteereitä.

	Kriteeri	Kysymys	Tulkinta
TEKNOLOGIA & REGULAATIO	Reitin pituus	Onko reitti mahdollista liikennöidä tarkastellulla kalustolla teknologian ja regulaation puolesta.	Reittiä pitää pystyä liikennöimään sekä teknologian että regulaation asettamissa rajoissa.
KYSYNTÄ	Reitin nykyinen lentoliikenteen kysyntä (jos reitti olemassa)	Millainen on kysyntä per lentovuoro nykyisellä reitillä?	Kertoo olemassa olevasta kysynnästä, mutta tarjonnan rajoitteet eivät kerro todellisesta kysynnästä kaikkea.
	Uuden kysynnän potentiaali	Millaisia lentoliikennettä tarvitsevia toimintoja reitille on?	Elinkeinoelämä, matkailukohteet, TKI
TARJONTA	Reitin kustannukset ja operatiivinen toimivuus	Onko reitillä kannattavaa liikennöidä?	Käyttövoima, kalusto ja täyttöaste määrittävät
	Muiden kulkumuotojen kilpailukyky reitillä	Millaisia ovat muun joukkoliikenteen ja auton palvelutaso verrattuna sähköiseen lentämiseen?	Jos liian lyhyt reitti tai muiden kulkumuotojen palvelutaso korkea, ei mielekästä kehittää.
	Reitin lentoasemien ominaisuudet ja investointien mielekkyys	Millaisia investointeja tarvitaan sähköisen lentoliikenteen mahdollistamiseksi?	Kiitotien pituus, latausinfra, kentän palvelut

4.3 Sähköinen lentäminen vuoteen 2030

4.3.1 Kaupallisesti saatavilla oleva kalusto 2030

Teknologisesti on mahdollista saavuttaa 50 hengen kapasiteetin kalusto yli 300 kilometrin kantamalla, jos akkujen kapasiteetti vuonna 2030 on 600 Wh/kg. Ottaen huomioon lentokaluston sertifiointiin ja kehitykseen liittyvät reunaehdot, on kuitenkin epätodennäköistä, että näin suurta kalustoa olisi kaupallisessa käytössä vielä vuoteen 2030 mennessä. Oletus on, että Suomessa olisi tällöin pienissä määrin käytössä 9–19-paikkaista akkusähkökalustoa. Polttokenno-kalustoa ei ole vielä laajasti saatavilla, vaan sen markkinoille tulo tapahtuu seuraavan vuosikymmenen aikana. Vety vaatii merkittäviä investointeja sen tuotantoon ja logistiikkaan, joten sen kehityksessä kestää todennäköisesti akkusähköä kauemmin. Ei ole kuitenkaan poissuljettua, että esimerkiksi niin sanottua retrofit-kalustoa hybridi- tai polttokennoratkaisuilla voisi tulla markkinoille jo 2030 mennessä.

Sähkölentokoneita koskeva regulaatio tulee todennäköisesti muuttumaan vielä useaan otteeseen, mutta nykytiedon valossa sähköiseen lentoliikenteeseen sovelletaan pitkälti olemassa olevaa regulaatiota. Tällöin kaluston todellisessa kantamassa on otettava huomioon erilaiset varaenergiavaatimukset ja varalaskupaikat.

Lentotoimintaan liittyvä regulaatio edellyttää, että lennettävällä reitillä tulee olla ominaisuuksiltaan riittävä varalaskupaikka. Jos kyse on kaupallisesta ja aikataulutetusta liikenteestä, reitillä tulee olla lähettyillä varalaskupaikka, jonka ominaisuudet vastaavat lähtöaseman ominaisuuksia. Sähkölentokoneet voivat laskeutua lyhyille kiitoteille, mikä teoriassa tarjoaa enemmän vaihtoehtoja varalaskupaikoiksi. Nestemäisen polttoaineen tapauksessa tankkaus varalaskupaikalla voidaan toteuttaa säiliöajoneuvolla, mutta akkusähkön tapauksessa tarvitaan joko fyysistä latausinfraa tai liikuteltavaa akkuvarastoa.

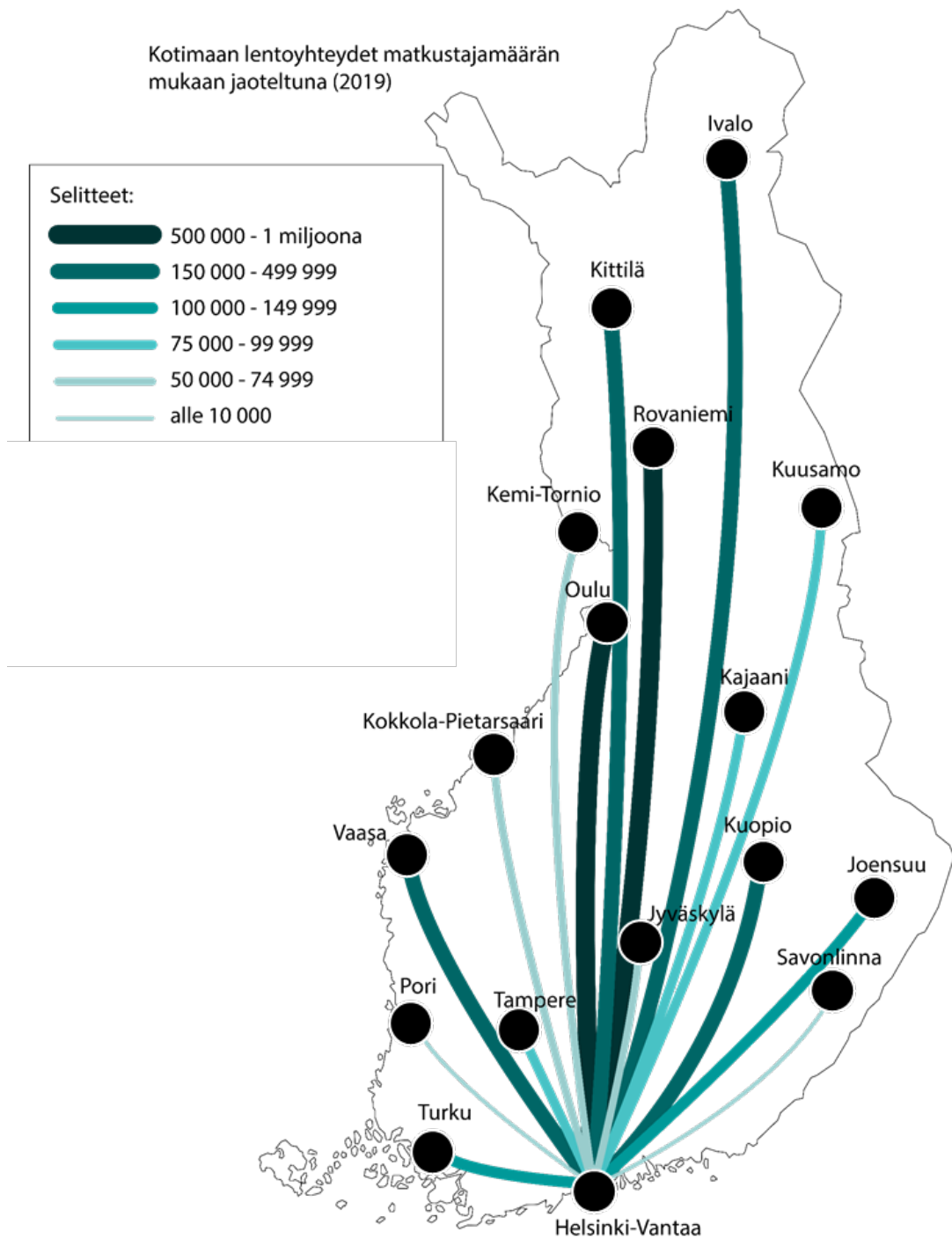
ES-19:n tapauksessa ilmoitettu maksimikantama on 400 km. Tämä kantama pitää sisällään 30 min loppuvaraenergian, mutta siinä ei huomioida energiavarausta lentää vaihtoehtoiselle lentoasemalle. Lyhyen kantaman operaatioille on olemassa menetelmiä, joilla reservivaatimuksia voidaan pienentää riippuen lentoreitistä. Heart Aerospace käy keskusteluja lentoyhtiöiden kanssa ja arvioi vaihtoehtoja kompensoida varaenergian vaatimuksia. (Heart Aerospace, 2022)
 Varaenergiavaatimuksista ja valmistajan esittämien ensimmäisten potentiaalisten lentoreittien pituuksista voidaan päätellä, että kone on tarkoitettu ensi vaiheessa juuri lyhyille, **n. 200–250 km:n reiteille**.

Israelilainen Eviation toteaa, että sen Alice-sähkölentokoneen tavoiteltu kantama on maksimissaan 820 km, mutta tämä luku sisältää tynnet olosuhteet, IFR-reservin sekä 0 kg:n hyötykuorman. Näin ollen aluksen kaupallinen kantama tulee olemaan huomattavasti vähemmän. Tässä luvussa arvioidaan **kaupallisen kantaman olevan noin 500 km**.

Kiinteäsiipisen sähkökaluston lisäksi markkinoille on tulossa eVTOL-kalustostoa, joka soveltuu muutaman hengen liikennöintiin melko lyhyillä matkoilla. Vuoteen 2030 mennessä Suomessa on todennäköisesti yksittäisiä teknologiakokeiluja sekä käyttökohteita. Kehityksen tahtiin vaikuttaa teknologian talvikyvykkyyden lisäksi eVTOL-kalustoa koskevan regulaation kehitys niin ilmatilan kuin lentopaikkojen osalta. Liikennöinti tapahtunee ensi alkuun lentoasemilta ja -paikoilta, kun vertiporttien kehitykseen liittyviä reunaehtoja määritetään.

4.3.2 Kysyntäarvio 2030

Suomen lentoliikennejärjestelmä on perustunut pääosin hub and spoke -malliin. Siinä pienemmät matkustajavolyymit kootaan Suomen eri alueilta Helsinki-Vantaan lentoasemalle, josta on kattavat yhteydet eri puolille maailmaa. Koronapandemia romahdutti kotimaan liikenteen kysynnän, mutta elpyminen on käynnistynyt osalla yhteyksistä nopeasti. Airbusin markkinakartoituksen mukaan globaali lentoliikenteen arvioidaan palautuvan ennalleen vuosien 2023 ja 2025 välillä (Airbus, 2021). Finavian tilastojen mukaan sen verkostolentoasemilta lensi vuoden 2021 heinä-syyskuun aikana puolet enemmän matkustajia kuin edellisvuotena samaan aikaan. Suuri osa Suomen sisäisistä lennoista on jatkolentoja, eli kansainvälisen lentämisen elpyessä on mahdollista, että kotimaan lentoliikenne palautuisi vuoden 2019 lukuihin jo vuoteen 2025 mennessä. Tällä oletuksella Suomen lentoliikennevolyymit kiinteillä reiteillä näyttävät vuonna 2025 kuvan 33 mukaisilta.



Kuva 33. Suomen kotimaan lentoyhteyksien matkustajamäärät 2019 ja oletuksena myös vuonna 2025. Pandemia on voinut vähentää pysyvästi liikematkojen määrää, joten volyymit voivat hieman jäädä esitetyistä. Muokattu lähteestä (Traficom, 2020, s. 15)

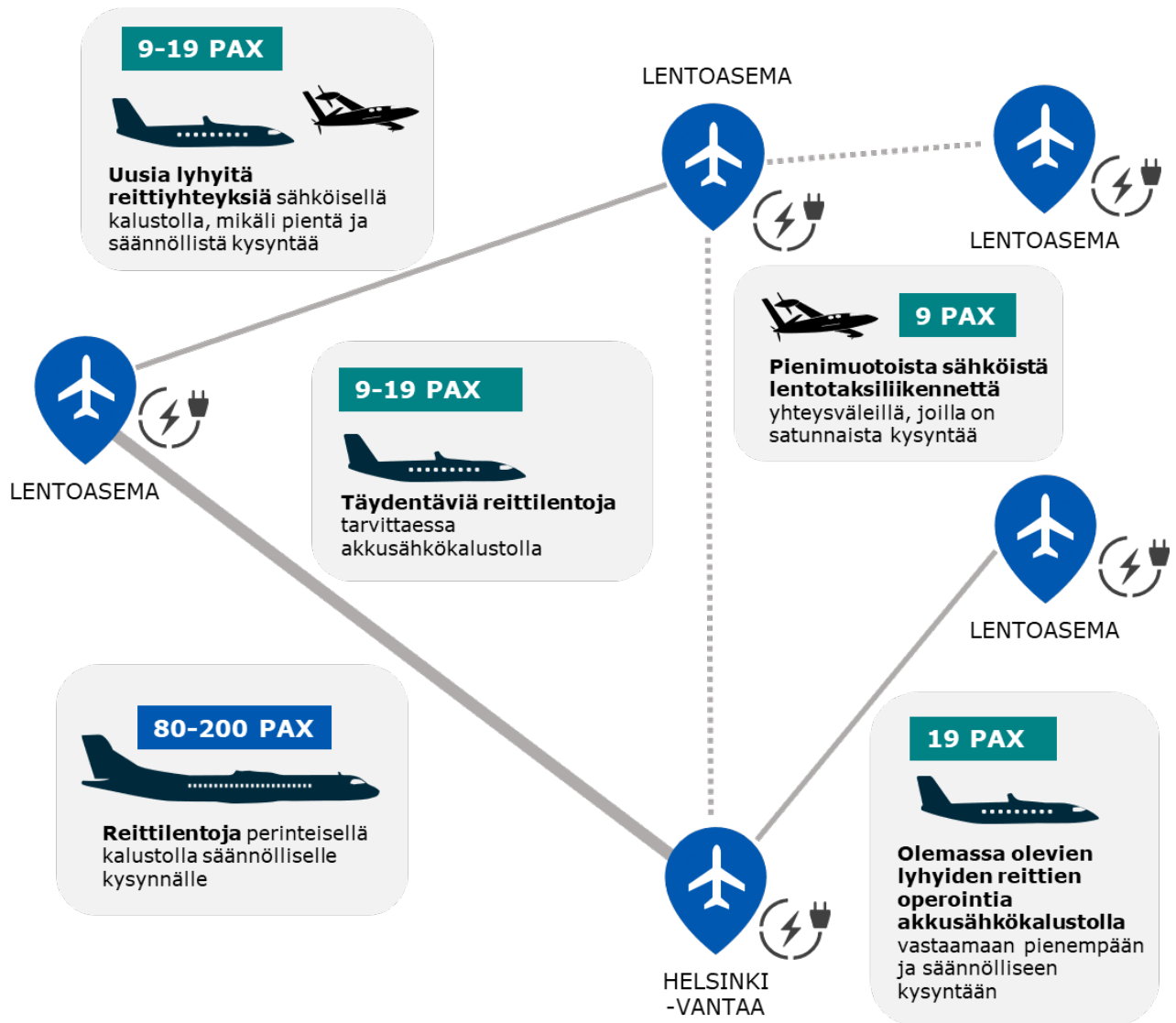
Suomen lentoasemien keskimääräiset matkustajamäärät per lentovuoro vuonna 2019 on esitetty taulukossa 11. Taulukko sisältää kaikki kyseiseltä lentoasemalta lennetyt lennot, eli kotimaan sisäisten lentojen lisäksi myös niin säännölliset kansainväliset lennot kuin lomalennotkin. Useilla taulukon lentoasemista tämä matkustajamäärä kuvaa Helsinki-Vantaan ja kyseisen kentän välisten lentojen matkustajamäärää. Suomen sisäisessä lentoliikenteessä monesti matkan syy on liikematka. Kuten Ylen kyselystä käy ilmi, voivat liikematkustuksen määrät pudota useita kymmeniä prosentteja. Tällöin matkustajavirrat voivat olla jonkin verran pienempiä, mikä voi tarjota uusia mahdollisuuksia pienemmän sähköisen lentokaluston käyttöönololle.

Taulukko 11. Suomen lentoasemien matkustajamääriä per lentovuoro vuonna 2019. (Eurostat, 2022c; Eurostat, 2022d)

Matkustajia per lento, kaikki reitit	2019-01	2019-02	2019-03	2019-04	2019-05	2019-06	2019-07	2019-08	2019-09	2019-10	2019-11	2019-12	2019 keskim.
Enontekiö	118	109	140				8	8			154	179	163,0
Helsinki-Vantaa	103	108	110	116	116	128	132	124	116	116	108	112	116,0
Ivalo	102	115	117	72	48	78	85	93	97	89	76	130	104,3
Joensuu	36	37	40	47	48	46	42	41	47	54	41	35	43,0
Jyväskylä	25	31	31	41	44	41	23	29	39	33	22	19	31,6
Kemi-Tornio	31	36	36	36	33	36	35	32	35	34	30	36	34,1
Kajaani	37	39	42	38	40	39	40	37	43	40	34	35	38,7
Kokkola-Pietarsaari	22	22	24	29	28	25	25	23	27	38	25	23	26,0
Kuusamo	82	85	88	76	38	45	52	51	55	50	66	100	75,6
Kittilä	104	120	130	115	39	47	50	54	72	51	79	133	111,0
Kuopio	56	54	57	60	64	62	48	51	64	68	59	51	58,3
Lappeenranta													
Maarianhamina-Mariehamn	18	16	16	18	23	22	16	19	21	18	19	16	18,5
Mikkeli													
Oulu	100	107	109	113	127	131	129	116	124	124	125	110	117,2
Pori	7	27	90	100	133	3	13	7	18	31	15	11	20,3
Rovaniemi	119	133	123	115	109	111	107	113	123	128	132	151	126,3
Savonlinna	7	7	7	14	9	10	13	11	18	22	11	9	11,8
Seinäjoki													
Tampere-Pirkkala	43	47	46	43	45	48	47	42	47	46	47	44	45,5
Turku	44	48	48	47	49	55	61	62	50	51	49	57	51,7
Vaasa	48	50	52	55	57	56	57	54	55	59	51	49	53,7
Varkaus													
Värien selite		1–19				20–29				30–39			matk.

4.3.3 Sähköisen lentoliikenteen toimintamallit ja markkinat 2030

Sähköistä kalustoa voidaan alkaa hyödyntää tietyillä yhteysväleillä Suomen sisäisessä reittiliikenteessä. Tähän soveltuvimpia ovat 19-paikkaiset matkustajakoneet, joiden kaupallinen kantama on aluksi 200 km:n luokkaa, mutta se kasvaa akkuteknologian kehityksen myötä. Toisekseen on todennäköistä, että pienempi 9-paikkainen sähkökalusto houkuttelee pienempiä lentoyhtiöitä kehittämään sähköistä taksilentoliikennettä. Tämä voi alkaa liikennöintinä tietyillä yhteysväleillä, ja laajentua joustavammaksi kysynnän ja toimintamallien kehittyessä.



Kuva 34. Sähköinen lentoliikenne osana Suomen lentoliikennejärjestelmää vuonna 2030.

Huomio palvelukokonaisuuteen

Eniten huomiota sähköisen lentämisen tulevaisuuden arvioinnissa on saanut teknologinen kehitys. Lentoyhtiön kannalta on kuitenkin monia muitakin tärkeitä asioita. Lentoyhtiö tarvitsee simulaattoreita, koulutusta lentäjille ja matkustamohenkilökunnalle sekä sopimuksia linjahuollosta, perushuollosta ja moottori- huollosta. Lentoyhtiön ja konevalmistajan tulee olla sitoutuneita pitkäaikaiseen yhteistyöhön, jolloin konevalmistajan täytyy olla kaikin puolin uskottava kumppani lentoyhtiölle. (Finnair, 2022a) Sähkölentokoneiden valmistajissa on start-up-tyyppisiä yrityksiä, mutta myös niiden on pystyttävä sitoutumaan pitkäaikaiseen kumppanuuteen lentoyhtiöiden kanssa. Uuteen teknologiaan liittyy aina lastentauteja, jonka vuoksi konevalmistajan tuki on tärkeää. Toisaalta lentoyhtiöt voivat antaa merkittävää tietotaitoa uusien konetyyppien valmistajille koneiden suunnittelun, kehittämisen, valmistamisen ja testaamisen aikana. Tästä yhteistyöstä hyötyvät molemmat osapuolet myös pidemmällä aikavälillä.

Potentiaalisia käyttökohteita vuonna 2030

Sähköisestä lentämisestä saavutettavia hyötyjä voidaan tarkastella kolmella eri tavalla: lentokaluston kapasiteetin soveltuvuuden, alueiden saavutettavuuden sekä matka-aikojen näkökulmasta. Kapasiteetin soveltuvuuden näkökulmasta on luontevaa tarkastella nykyisiä kotimaan sisäisiä lentoreittejä ja valita niistä ne,

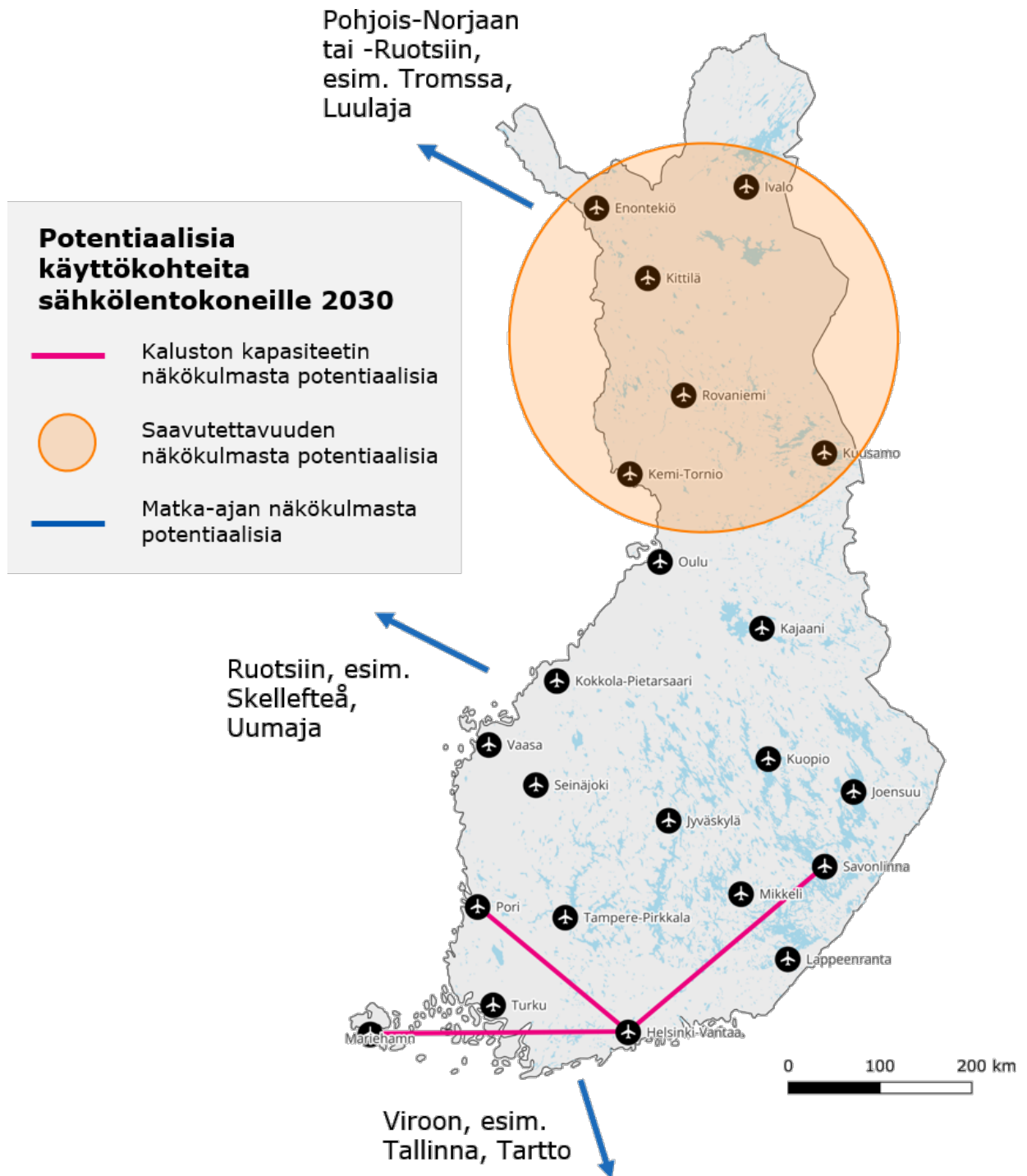
joita kysynnän puolesta olisi mahdollista operoida 19-paikkaisella lentokoneella. Nykyisten reittien tarkastelu on mielekästä myös ympäristövaikutusten näkökulmasta, sillä suurimmat ympäristöhyödyt saavutetaan, kun sähköisellä lentämisellä pystytään korvaamaan polttomoottorikäyttöisillä lentokoneilla operoitavia lentoja.

Saavutettavuuden näkökulmasta on perusteltua tarkastella Pohjois-Suomen lentoasemien välisiä reittejä, sillä Lapissa muiden julkisten liikennemuotojen verkosto on suppea. Matka-aikojen näkökulmasta on puolestaan järkevää tarkastella sellaisia tilanteita, joissa vaihtoehtoisilla liikennemuodoilla matkat kestävät huomattavasti pidempään kuin lentäen. Tällaisia tilanteita on erityisesti Suomesta meren yli suuntautuvilla reiteillä. Sähköisen lentämisen rajallisen kantaman takia tämä tarkoittaa Ruotsiin, Viroon ja Norjaan suuntautuvia reittejä. Näistä kolmesta vaihtoehdosta muodostuu sähköiselle lentämiselle potentiaalisten käyttökohteiden kokonaisuus, joka on esitetty tarkemmin taulukossa 12.

Taulukko 12. Potentiaalisia sähköisen lentämisen käyttökohteita vuoteen 2030 mennessä.

 <p>1. Lentokaluston kapasiteetin näkökulmasta potentiaalisia</p>	<p>Nykyisistä Helsingin reiteistä ne, joilla on keskimäärin alle 20 matkustajaa</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reittilennot Poriin, Savonlinnaan ja Maarianhaminaan
 <p>2. Saavutettavuuden näkökulmasta potentiaalisia</p>	<p>Pohjois-Suomen matkailua ja teollisuutta palvelevat uudet yhteydet</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reitti- tai taksilentotoimintaa pohjoisen lentoasemien välillä
 <p>3. Matka-aikojen näkökulmasta potentiaalisia</p>	<p>Uudet yhteydet Suomesta naapurimaihin</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ruotsiin: esim. Kokkola-Pietarsaari-Skellefteå, Vaasa-Uumaja • Pohjois-Norjaan tai -Ruotsiin: esim. Enontekiö-Tromssa • Viroon: esim. Turku-Tallinna, Helsinki-Vantaa-Tartto

Suomessa haasteena on, että monilla reiteillä kysyntä painottuu aamu- ja iltavuoroille eikä jakaudu tasaisemmin pitkin päivää. Tästä syystä useille reiteille tarvitaan joka tapauksessa ensi vaiheen sähkölentokoneita suurempaa kalustoa, jolloin voi olla perusteltua lentää hiljaisemmatkin vuorot ”ylisuurella” kalustolla sen sijaan, että hankittaisiin niille omaa, pienempää kalustoa. Kalustokiertojen ja infrastruktuurin niin salliessa voitaisiin sähkölentokoneita käyttää myös yksittäisillä vuoroilla sellaisilla reiteillä, joita muutoin lennetään suurempikokoisella kalustolla. Jos kysyntä jakautuisi tasaisemmin koko päivälle, pienempi kalusto voisi tarjota nykyistä parempaa palvelutasoa lentämällä useamman vuoron päivässä.



Kuva 35. Sähkölentokoneille potentiaalisia käyttökohteita vuoteen 2030 mennessä.

4.3.4 Kaluston kapasiteetin näkökulmasta potentiaalisia käyttökohteita

Aiemman taulukon 11 perusteella vuoden 2019 matkustajamäärältään lentoreitit Helsinki-Vantaalta Poriin, Savonlinnaan ja Maarianhaminaan soveltuisivat kehitteillä olevilla, pienehköillä sähkölentokoneilla lennettäviksi. Näillä yhteyksillä kysyntä vastaisi lentokoneen kapasiteettia hyvin. Koneen täyttöaste saataisiin korkeaksi, mikä parantaisi lennon kannattavuutta.

Myös ympäristöargumentit perustelevat edellä mainittujen lentoreittien sähköistämistä. Nykytilanteessa useimmilla Suomen sisäisistä lentoreiteistä on kuitenkin joko matkustajamäärä tai reitin pituus liian suuri siihen, että reittejä

voitaisiin operoida alkuvaiheen sähköisillä lentokoneilla. Tästä syystä sähköisessä lentämisessä täytyy alkuun pitäytyä pienen kysynnän lentoreiteissä, vaikka näin saavutettava ympäristöhyöty onkin rajallinen.

Edellä kuvattuja sähkölentämiselle potentiaalisesti soveltuvia reittejä on kuvattu tarkemmin taulukossa 13. Riskitekijänä voidaan näilläkin reiteillä pitää sitä, ovatko reittien pituudet yhdistettynä matkoihin varalaskupaikoille liian suuria suhteessa alkuvaiheen sähkölentokoneiden kantamiin. Lisäksi lentojen kaupallisen kannattavuuden näkökulmasta olennainen kysymys on, onko näiden reittien operaattoreilla lentolippujen myyntiä ja vaihtomatkustamista helpottava ns. interline-sopimus jonkin Euroopan- ja mannertenvälisiä lentoja tarjoavan lentoyhtiön kanssa.

Taulukko 13. Helsinki-Vantaan sekä Porin, Savonlinnan ja Maarianhaminan välisten reittien tietoja.

Reitti	Etäisyys	Varalaskupaikkoja sopivalla etäisyydellä	Kysyntäarvio per lentovuoro
Helsinki-Vantaa – Pori	210 km	Kyllä (Turku, Tampere-Pirkkala)	n. 20 matkustajaa
Helsinki-Vantaa – Maarianhamina	280 km	Epävarmaa (Turku)	n. 19 matkustajaa
Helsinki-Vantaa – Savonlinna	280 km	Kyllä (Mikkeli, varauksin Varkaus)	n. 12 matkustajaa

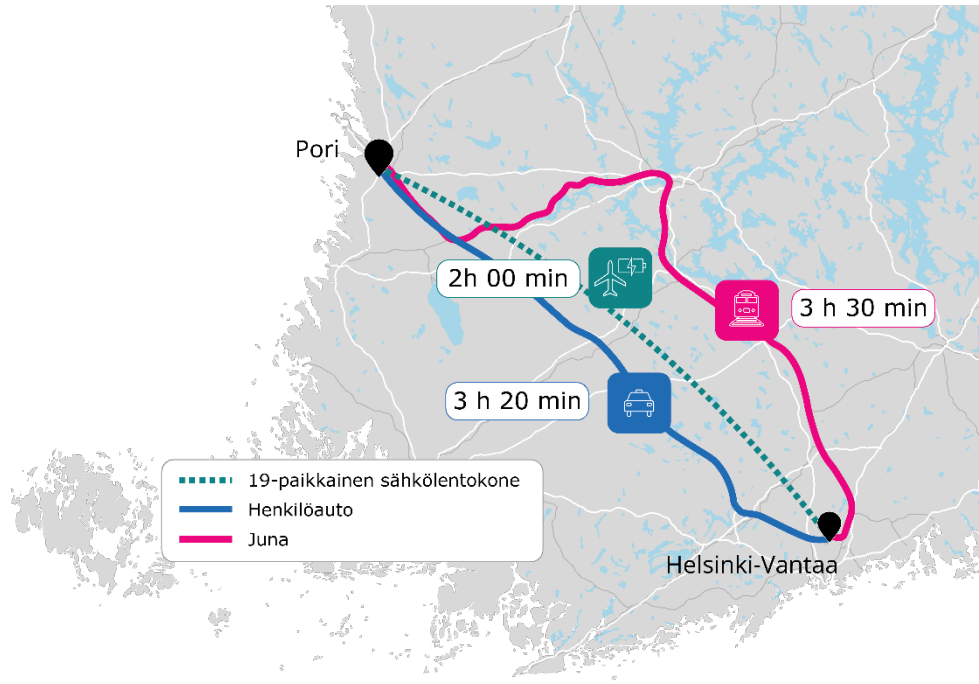
Esimerkkitarkastelu Porin lentoyhteydestä sähköisellä lentokoneella

Otetaan tarkempaan tarkasteluun esimerkki matkasta Porin keskustasta Helsinki-Vantaalle. Matka suuntautuu aamulennolla Porista Helsinki-Vantaan kautta Keski-Eurooppaan. Sähköinen lentokone on Suomen sisäisillä lennoilla yleisesti käytettävää ATR-kalustoa¹⁷ hitaampi, mutta nopeampi kuin muut liikennemuodot. Nykyistä lentoyhteyttä vartin pidempi matka-aika tuskin on kysyntää rajoittava tekijä. Reittiä liikennöitäisiin todennäköisesti ES-19-koneella, mutta vertailussa on myös hieman nopeampi Eviation Alice. Matka-ajat on esitetty taulukossa 14 ja kuvassa 37.

Taulukko 14. Matka-aikojen arvot Porin keskustan ja Helsinki-Vantaan välillä, joiden määrittämisessä on käytetty liikennemuotojen keskinopeuksia sekä Google Mapsin aika-arvioita.

Kulkumuoto	Porin keskustasta	Helsinki-Vantaan lentoasema-aika	Pääkulkutapa	Helsinki-Vantaa	Matka-aika yhteensä
<i>ajat minuutteina, jollei toisin mainittu</i>	<i>Liityntämatka</i>	<i>Varo aika, turvatarkastus, koneeseen nousu</i>	<i>Lento = rullaus, lentoonlähtö, matkalento, laskeutuminen, rullaus</i>	<i>Liityntämatka, pysäköinti</i>	<i>Kaikki vaiheet</i>
ATR72	10	45	45	5	105 = 1 h 45 min
ES-19	10	45	58	5	118 = 1 h 58 min
Eviation Alice	10	45	51	5	111 = 1 h 51 min
Auto			185	15	200 = 3 h 20 min
Juna	5		200	5	210 = 3 h 30 min

¹⁷ Helsinki–Pori-lennoilla käytettiin keväällä 2022 tyypillisesti noin 30 matkustajalle tarkoitettua Embraer EMB 120 -lentokonetta, jonka lentonopeus on samaa luokkaa tai hieman suurempi kuin ATR 72:n.



Kuva 36. Suuntaa antavat kokonaismatka-ajat ja reitit Porista Helsinki-Vantaalle.

Porin nykyinen lentoyhteys on ollut jo vuodesta 2010 alkaen epävarmuuden leimaama, ja välillä Porin ja Helsinki-Vantaan väliset lennot ovat olleet kokonaan tauolla (Yle, 2010; Lentoposti, 2019). Epävarmuus reitin pysyvyydestä on vaikuttanut reitin matkustajamääriin laskevasti. Porin seudulla on runsaasti kansainvälistä teollisuutta, joka tarvitsee säännöllisiä kansainvälisiä yhteyksiä. Kansainvälisiä matkustustarpeita on täytetty matkustamalla autolla Turun ja tai Helsinki-Vantaan lentoasemalle. Sähköisellä lentokoneella reitin operatiivisia kustannuksia voitaisiin madaltaa ja tehdä reitistä kannattavampi. Säännöllinen ja luotettava vuorotarjonta sekä yrityksille tärkeä hiilineutraali saavutettavuus voisivat lisätä kysyntää reitillä. Tällöin reitillä voitaisiin lisätä vuorotarjontaa ja parantaa palvelutasoa entisestään.

4.3.5 Saavutettavuuden näkökulmasta potentiaalisia käyttökohteita

Pohjois-Suomessa ja erityisesti Lapissa julkisia liikenneyhteyksiä on tarjolla rajallisesti, mutta lentoasema- ja lentopaikkaverkosto on varsin kattava. Esimerkiksi Kittilästä on matkaa lähimmälle rautatieasemalle Kolariin noin 70 kilometriä, ja maakuntakeskukseen Rovaniemelle liikennöidään yleensä kolme bussivuoroa päivässä (Matkahuolto, 2022). Ivalosta ja Enontekiöltä matkat ovat vielä huomattavasti pidemmät. Lapin sisällä tehdään vuosittain noin 3 miljoonaa yli 100 kilometrin mittaista matkaa (Liikennevirasto, 2018, s. 107), joten lento-matkustuksen potentiaalia voi pitää tämän valossa suurena.

Samanaikaisesti Lappi on Uudenmaan jälkeen Suomen toiseksi merkittävin matkailualue. Esimerkiksi vuonna 2018 Lapissa rekisteröitiin noin 3,5 miljoonaa matkailijoiden yöpymistä, ja näistä lähes puolet oli ulkomaisten matkailijoiden yöpymisiä (Visit Finland, 2019). Lappiin on järjestetty säännöllisesti suoria reitti- ja charterlentoja ulkomailta, mutta merkittävä osa matkustajista saapuu silti jatkolennolla Helsinki-Vantaalta. Sen sijaan Lapin sisällä liikkuminen voi olla erityisesti omatoimimatkailijoille hankalaa ilman vuokra-autoa. Sähköisillä lentokoneilla operoitavat paikallisen lennot voisivat siten helpottaa myös matkailijoiden liikkumista. Sähköinen lentäminen sopisi matkailijoiden näkökulmasta hyvin myös Lapin puhdasta luontoa korostavaan imagoon ja toimisi matkailupalvelujen myynnin tukena.

Pohjoisessa matkailua ja alueen sisäistä liikkumista voisivat tukea esimerkiksi lennot Rovaniemeltä Enontekiölle, Ivaloon ja Ouluun. Näiden yhteysvälien todellista kysyntää on vaikea arvioida, mutta alueiden lentoliikennettä tarvitsevat toiminnot, kuten matkailu ja elinkeinoelämä antavat käsityksen potentiaalista. Erityisesti Enontekiön lentoasema on myös ollut julkisuudessa kiinnostunut sähköisestä lentämisestä (Yle, 2022a).

Esimerkkitarkastelu jatkolennosta Rovaniemeltä Enontekiölle

Rovaniemi on yksi Pohjois-Suomen päälentoasemista, jonka matkustajamäärät ovat Lapin lentoasemista suurimmat. Enontekiölle ei ole nykytilanteessa lentoja Suomesta, vaan sen matkailua palvelevat ulkomailta suuntautuvat charterlennot. Sähköisellä pienellä lentokalustolla voitaisiin tarjota liityntäyhteyttä Rovaniemeltä Enontekiölle, tukien näin Enontekiön aluetaloutta ja matkailupotentiaalin lunastamista.

Yhteysvälellä ei ole tarjolla rautatieyhteyttä, joten maajoukkoliikenne tapahtuu linja-autoilla. Linja-autolla matka voi kestää yli viisi tuntia, kun auton vuokraamalla matka kestää neljä tuntia. Sähköisellä kalustolla kokonaismatka-aika olisi noin kaksi tuntia eli puolet auton matka-ajasta. Matka-ajat on esitetty taulukossa 15 ja kuvassa 37.

Taulukko 15. Matka-aikojen arvot Rovaniemen lentoaseman ja Enontekiön keskustaajaman välillä, joiden määrittämisessä on käytetty liikennemuotojen keskinopeuksia sekä Google Mapsin aika-arvioita.

Kulkumuoto	Rovaniemi lentoasema-aika	Pääkulkutapa	Enontekiö lentoasema-aika	Enontekiö keskusta	Matka-aika yhteensä
	<i>Vaihtoaika, koneeseen nousu, autovuokra</i>	<i>Lento = rullaus, lento-ohjaukseen, matkalento, laskeutuminen, rullaus</i>	<i>Matkatavaroiden odotus</i>	<i>Liityntämatka</i>	<i>Kaikki vaiheet</i>
ES-19	30	61	15	15	121 = 2 h 01 min
Evation Alice	30	53	15	15	113 = 1 h 53 min
Autovuokraus	20	220			240 = 4 h 00 min
Linja-auto	15	300			315 = 5 h 15 min



Kuva 37. Suuntaa antavat kokonaismatka-ajat ja reitit eri liikennemuodoilla Rovaniemen lentoasemalta Enontekiön keskustaajamaan Hettaan.

4.3.6 **Matka-aikojen näkökulmasta potentiaalisia käyttökohteita**

Lyhyehköillä matkoilla lentämisen hyöty on suurimmillaan silloin, kun reitti maata pitkin kiertää huomattavasti enemmän kuin reitti linnuntietä. Tällaisia reittejä on laajalti sekä länsirannikolta Ruotsin suuntaan että etelärannikolta Viron suuntaan. Vaihtoehtoisina kulkuyhteyksinä ovat tällöin lautat (mm. Turku–Tukholma, Vaasa–Uumaja sekä Helsinki–Tallinna) tai kierto maata pitkin Tornion-Haaparannan tai Pietarin kautta. Lentoyhteyden matka-aikaetu on useilla reiteillä huomattavan suuri.

Länsirannikolla ruotsalainen Jonair alkaa operoida 9-paikkaisella kalustolla Kokkola-Pietarsaari-Skellefteå-väliä kaksi kertaa viikossa (Yle, 2022b). Tällä yhteysväliällä on selkeä tarve matkustaa, sillä Pohjoismaiden akkuklusterissa yhteistyötarpeita on säännöllisesti. Tarkoitus on siirtyä vuonna 2026 operoimaan sähköisellä kalustolla. Tällaiseen verkostoon voitaisiin kysynnän kasvaessa lisätä lentokalustoa sekä operoitavia kenttiä, kuten Vaasa ja Uumaja. Näitä reittejä on tutkittu tarkemmin Merenkurkun alueen FAIR-hankkeessa (ks. alaluku 2.11). Myös Lapissa on ollut kiinnostusta esimerkiksi Enontekiön ja Tromssan välisiä lentoyhteyksiä kohtaan, ja alueella tavoitellaan yhteyden toteuttamista vielä vuoden 2022 aikana (Yle, 2022a).

Merenkurkun alue on etäisyyksien puolesta erityisen sopiva alkuvaiheen sähköiselle lentoliikenteelle, sillä ylitettävä merialue on suhteellisen kapea. Sen sijaan esimerkiksi Porin tai Turun leveysasteilla ylitettävä merialue on suurempi, jolloin regulaatio ei välttämättä mahdollista sähköisten lentokoneiden käyttöä ennen kuin niiden kantama on kasvanut riittävästi. Esimerkiksi Turun lentoasemalta Tukholman Arlandan lentoasemalle on jo 250 kilometrin lentomatka, joten uudet reitit Turusta Ruotsin sisämaahan olisivat vielä huomattavasti tätä pidempiä.

Viron suuntaan sähköisellä lentämisellä voisi olla potentiaalia matkailuliikenteessä. Lentomatka Tallinnaan voisi olla esimerkiksi Turusta (190 km) ja Tampereelta (240 km) vielä sähkölentokoneiden kantaman rajoissa. Vastaava tilanne on myös reiteillä Helsinki-Vantaalta Pärnuun (220 km) ja Tarttoon (250 km).

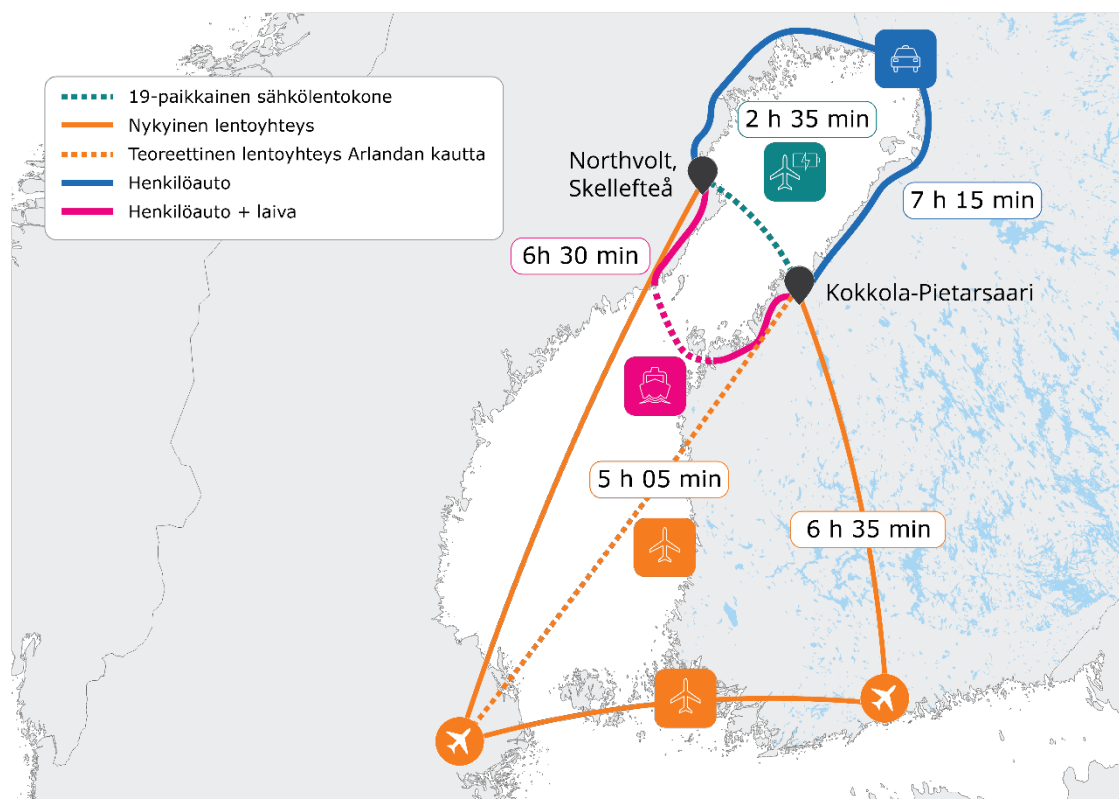
Esimerkkitarkastelu sähköisestä lentoyhteydestä Kokkolasta Northvoltin tehtaalle Skellefteåssa

Edellä mainittu Kokkola-Pietarsaari-Skellefteå on sähköisen lentämisen näkökulmasta potentiaalinen yhteys, sillä uudella vuorotarjonnalla voitaisiin saavuttaa merkittäviä aikasäästöjä, kuten kuvasta 38 nähdään. Yhteysväliällä on kasvavia liikkumistarpeita, kun akkuklusterin teollinen yhteistyö kehittyy. Suomalaisilla palvelu- ja tavaratoimittajilla on säännöllisiä liikkumistarpeita Northvoltin tehtaan rakentamisen ja kehittämisen aikana. Skellefteån lentoaseman ja Northvoltin tehtaan välillä on tarkoitus testata myös eVTOL-alusta, jonka matka-ajaksi arvioidaan n. 10 minuuttia. Tämä on otettu myös tarkasteluun.

Taulukko 16. Matka-aikojen arvot Kokkolan keskustan ja Northvoltin Skellefteån tehtaan välillä, joiden määrittämisessä on käytetty liikennemuotojen keskinopeuksia sekä Google Mapsin aika-arvioita. Vaihdoajan lentoasemilla on oletettu olevan 45 minuuttia, vaikka todellisuudessa aika voi olla pidempi.

Kulkumuoto	Kokkola keskusta	Kokkola-Pietarsaaren lentoasema-aika	Pääkulkutapa	Skellefteån lentoasema-aika	Liityntämatka Northvoltin tehtaalle	Matka-aika yhteensä
	Liityntämatka	Varo aika, turvatarkastus, koneeseen nousu	Lento = rullaus, lentoonlähtö, matkanopeus, laskeutuminen, rullaus / laiva Vaasa-Uumaja	Matkatavaroiden odotus	Liityntämatka	Kaikki vaiheet
ES-19	20	45	45	15	30	155 = 2 h 35 min
Eviation Alice	20	45	40	15	30	150 = 2 h 30 min
Nykyinen lentoyhteys Helsinki-Vantaan ja Arlandan kautta	20	45	285	15	30	395 = 6 h 35 min
Teoreettinen lentoyhteys Arlandan kautta	20	45	195	15	30	305 = 5 h 05 min
Auto			430			430 = 7 h 10 min
Auto+ Laiva	120		150		120	390 = 6 h 30 min
ES-19 + eVTOL	20	45	45	15	10	135 = 2 h 15 min

Nykyisellä lentoyhteydellä turhia lentokilometrejä kertyy runsaasti ja matka-aika on kohtuuton, sillä Kokkolasta tulee lentää ensin Helsinki-Vantaalle, sitten Tukholmaan ja sieltä Skellefteån lentoasemalle. Vaikka pohdinnassa on ollut myös suora yhteys Kokkola-Pietarsaaresta Tukholmaan, olisi tämänkin matka-aika kaksinkertainen suoraan yhteyteen verrattuna. Vaihtoehtoja ovat myös uudistettu laivayhteys Vaasasta Uumajaan sekä autolla ajaminen Tornio-Haaparannan kautta. Molemmissa tapauksissa matka-aika on huomattavasti suoraa sähkölentoa pidempi.



Kuva 38. Suuntaa antavat kokonaismatka-ajat ja reitit eri liikennemuodoilla Kokkolan keskustasta Northvoltin tehtaalle Skellefteåssa.

4.3.7 Investoinnit lentoasemainfrastruktuuriin 2030

Uusien sähköisen lentämisen reittien avaaminen vaatii aina sähkölatausinfrastruktuuriin investointia. Tämä voi rajoittaa operaattoreiden mahdollisuuksia hyödyntää sähköisiä lentokoneita, mikäli infrastruktuuriin ei haluta investoida etupainotteisesti tai ollenkaan. Uusia reittejä avattaessa tarvitaan myös lentoasemapalveluja, kuten turvatarkastusten järjestämistä ja maahuolintaa, samalla tavalla kuin perinteisillä lentokoneilla operoitaessa.

Esitetty kehityspolku sähköisellä kalustolla Suomessa vuoteen 2030 tarkoittaisi sähkölatausinvestointeja usealla Suomen lentoasemalla. Reittiliikenteessä investointitarpeet kohdistuisivat ensisijaisesti Helsinki-Vantaalle, jossa latauskentän rakentaminen voi tulla ajankohtaiseksi, jos useampi nykyisin liikennöitävä kotimaan reitti sähköistetään. Koska kotimaan lennot on pääosin aikataulutettu samoille jatkolennoille, on todennäköistä, että latauskysyntä painottuu samoihin aikaikkunoihin. Ensi vaiheessa sähköistettäviä reittejä olisi Helsinki-Vantaalla korkeintaan kolme. Myöhemmässä vaiheessa reittejä voisi tulla lisää.

Koska alkuvaiheessa sähköisen kaluston akkukapasiteetti on rajallinen, tarvittaneen latausta molemmissa päissä reittiä. Sen vuoksi sähköisten lentokoneiden käyttö on perusteltua keskittää tietyille reiteille sen sijaan, että niillä operoitaisiin täydentäviä vuoroja muillekin lentokentille.

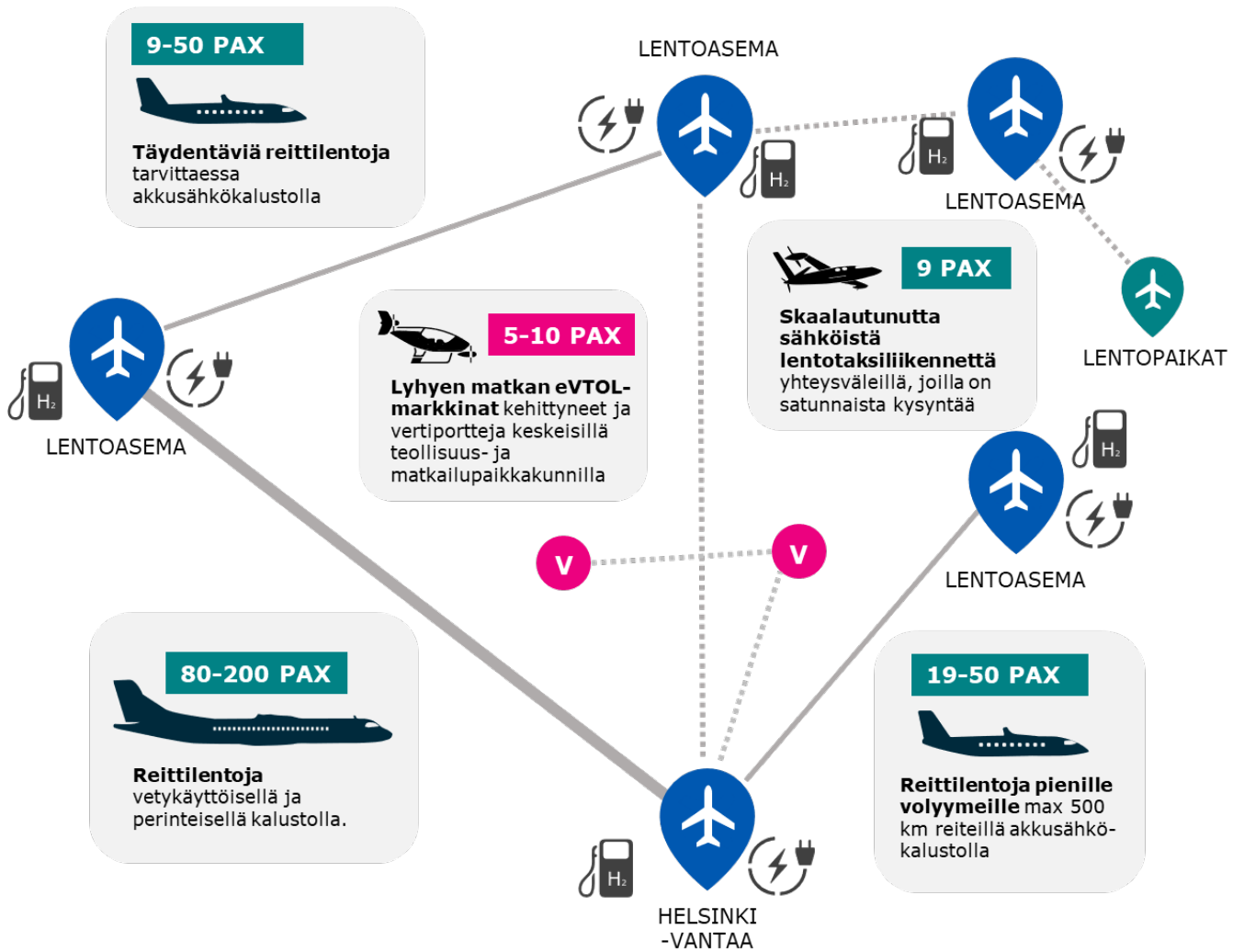
4.4 Sähköinen lentäminen vuoteen 2040

4.4.1 Kaupallisesti saatavilla oleva kalusto 2040

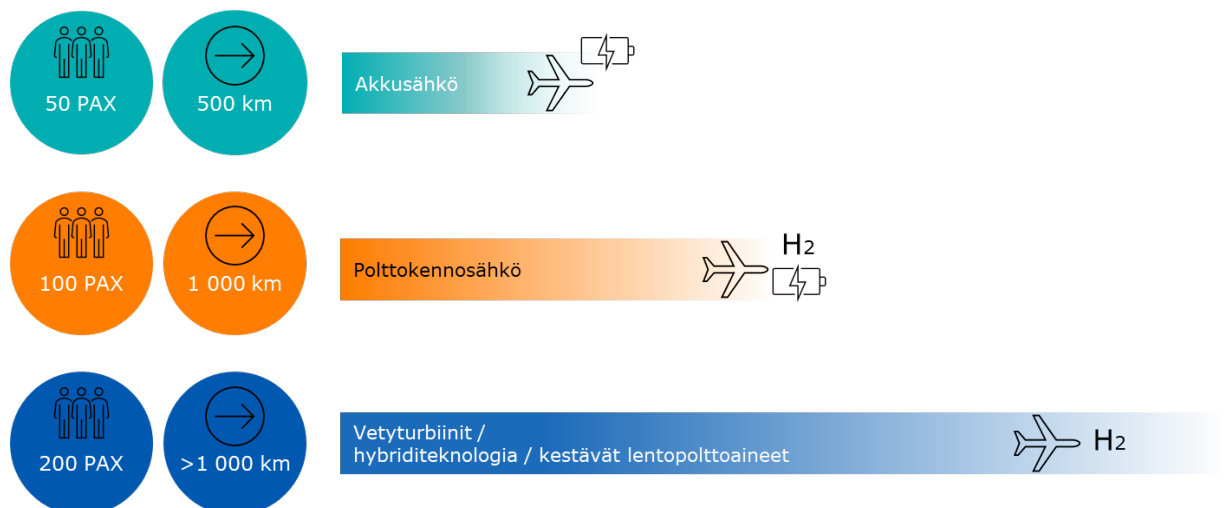
Vuosien 2030 ja 2040 välillä tapahtuu merkittävää sähköistymiskehitystä myös raskaammassa lentokalustossa. Akkusähkökalustossa akkujen kapasiteetin kasvu mahdollistaa kantaman ja kapasiteetin kasvun. Teknologian puolesta voi olla mahdollista sähköistää jo noin 50–100 hengen kalustoa, mutta tällöin kantama rajoittuu noin 500 kilometriin. Tämä edellyttäisi kuitenkin litium-ilma-akku-tekniikan kehittymistä kaupalliseksi.

Monien arvioiden mukaan vetykäyttöinen kalusto kokee merkittävimmän kasvun 2030-luvulla. Polttokennosähkö kehittyi erityisesti keskikokoisessa alueelliseen lentämiseen tarkoitettussa kalustossa. Raskaammassa kalustossa nähdään 2030-luvun loppuun mennessä hybridiratkaisuja, jotka voivat hyödyntää sekä vetyturbiineja että polttokennosähköä käyttövoimanaan. Merkittävistä lentokonevalmistajista Airbus arvioi, että sen ZEROe-konseptin vetylentokoneet tulevat markkinoille 2035. ZEROe-laivasto käyttäisi polttokennosähköä sekä vetyturbiineja käyttövoimanaan.

eVTOL-kalustossa kapasiteetti voi kasvaa n. 10 henkilöön ja kantamat pidentyä muutamaan sataan kilometriin. Käyttöalueet voivat siis laajentua ja tietyillä yhteysväleillä voidaan tarjota lentotaksipalveluja, jolloin lentojen aikataulut ja reitit määritetään matkustajakysynnän mukaan.



Kuva 39. Sähköisen lentämisen potentiaalisia käyttökohteita Suomessa vuoteen 2040.



Kuva 40. Kaluston arvioidut kaupalliset kantamat ja kapasiteetti vuonna 2040.

4.4.2 Sähköisen lentoliikenteen toimintamalleja 2040



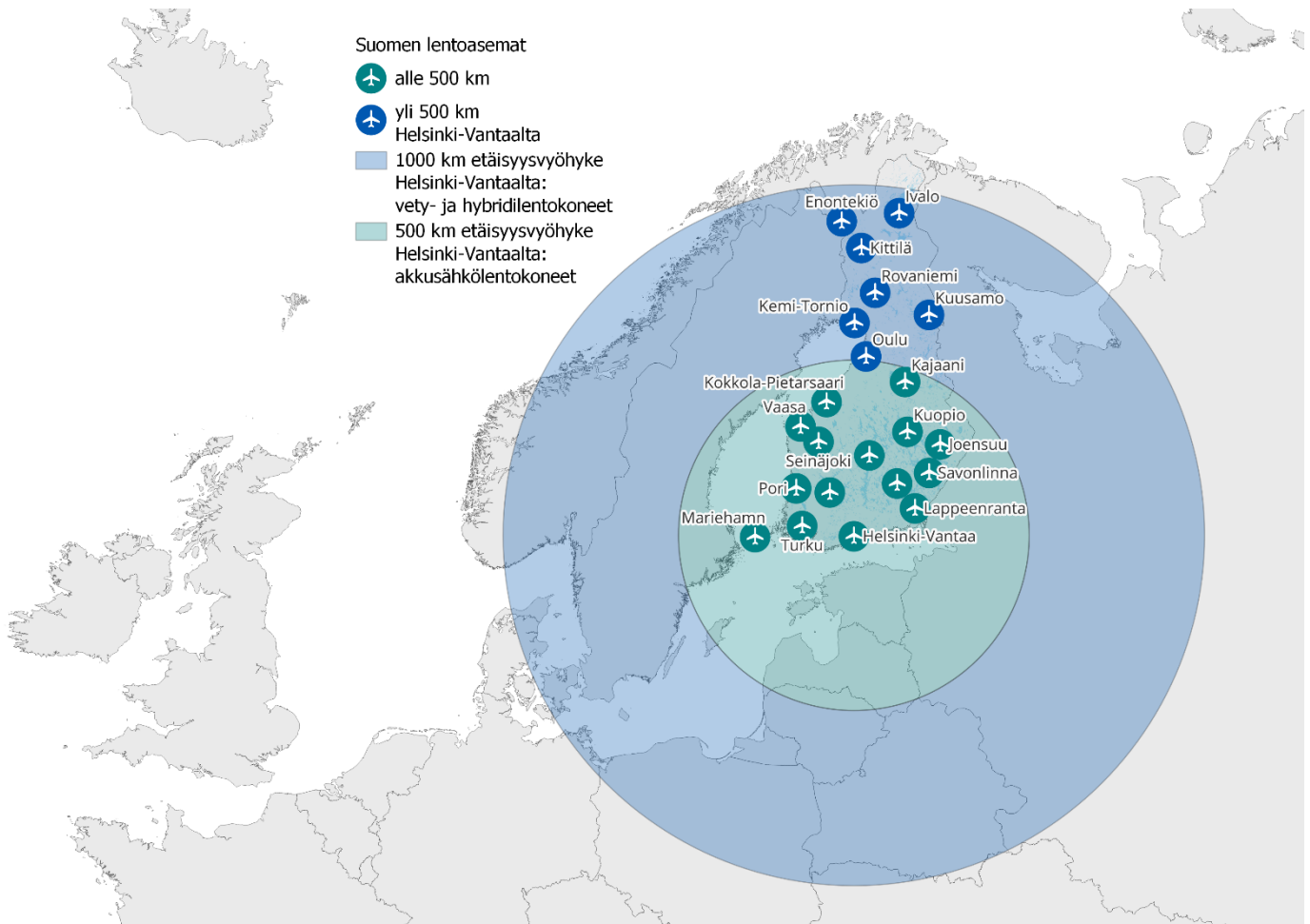
Kuva 41. Sähköisen lentoliikenteen mahdollisia toimintamalleja vuonna 2040.

Kotimaan reitit akkusähkökalustolla 500 km asti

Sähkölentokoneiden kapasiteetin ja kantaman kasvaessa useammat nykyiset lentoreitit muuttuisivat sähkölentämiseksi soveltuviksi. Selkeitä esimerkkejä tällaisista ovat muun muassa reitit Helsinki-Vantaalta Jyväskylän ja Kokkola-Pietarsaaren lentoasemille. Mikäli akkusähkölentokoneen kapasiteetti olisi vähintään 50 matkustajaa ja kaupallinen kantama samanaikaisesti 500 kilometriä, voitaisiin teoriassa kaikilla Helsinki-Vantaan ja Oulun eteläpuolisen Suomen välisillä lentoreiteillä operoida sähkölentokoneilla.

Kysynnän kellonaikavaihtelut voivat muodostaa tulevaisuudessakin haasteen sopivan kalustokoon valinnalle. Aamun ja illan ruuhkaisille vuoroille tarvitaan suurempaa kalustoa kuin keskipäivän hiljaisemmille vuoroille, mutta erillisen kaluston hankinta eri vuoroille ei välttämättä ole kannattavaa. Vuoteen 2040 mennessä on oletettavaa, että nykyisin kotimaan lennoilla käytettävä kalusto, kuten Finnairin vuosina 2007–2012 hankitut noin 70-paikkaiset ATR 72:t (Finnair, 2022b), on tullut käyttöikänsä päähän. Suomen sisäisille lennoille jouduttaneen siis joka tapauksessa hankkimaan uutta kalustoa. Sähkölentämisen yleistymiseen vaikuttaa, minkälaista kalustoa on tarjolla, kun nykyistä kalustoa aletaan korvata uudella.

Lentotarjonta voisi itsessään luoda säännöllistä kysyntää joidenkin pitkien, maakuntien välisten matkojen liikkumiseen. Tämä kysynnän muodostumiseen kuluva aika voi kuitenkin olla niin pitkä, että lentojen operointi olisi alkuun tappiollista, jolloin liikennöinti kaupalliselta pohjalta ei välttämättä ole mahdollista. Todennäköisimmin kokonaan uusille lentoreiteille olisi potentiaalia suurimpien maakuntakeskusten välillä silloin, kun matka on muita kulkutapoja käyttäen pitkä (3 tuntia tai enemmän), mutta kuitenkin riittävän lyhyt sähköiselle lentämiselle (alle 500 km). Tällainen reitti voisi olla esimerkiksi Tampere–Kuopio.



Kuva 42. Vuonna 2040 sähköiselle reittiliikenteelle soveltuvia etäisyyksiä.

Kotimaan reitit Helsinki-Vantaalta laajasti polttokennosähkökalustolla 1 000 km asti.

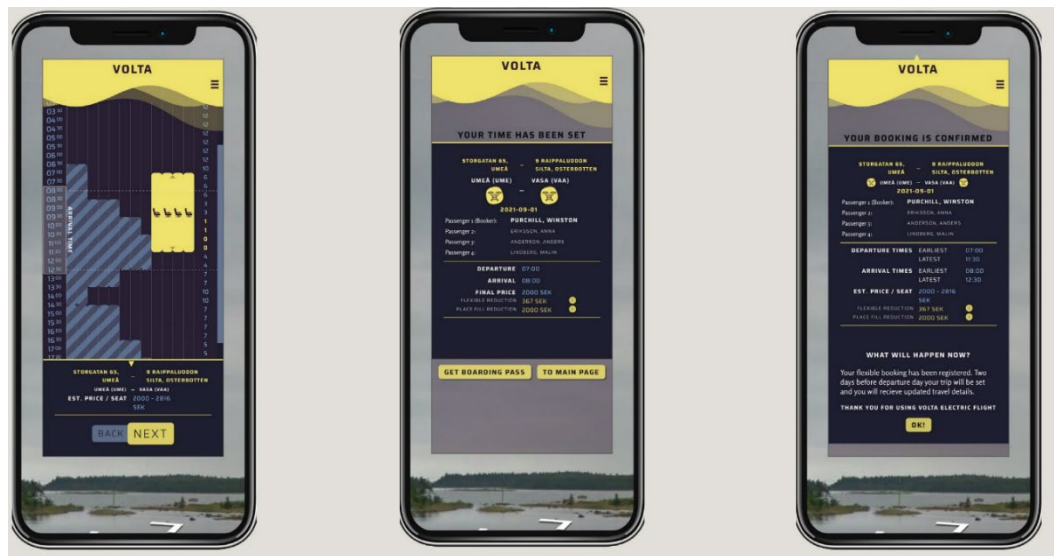
Akkusähköllä toimivien lentokoneiden kapasiteetti- ja kantamarajoitusten oletetaan olevan merkittäviä myös vuonna 2040. Tämän takia keskipitkillä ja pitkillä lentoreiteillä on tarpeen hyödyntää muunlaista ympäristöystävällistä kalustoa. Nykyisten arvioiden valossa tämä tarkoittaa käytännössä vetykäyttöistä lentokalustoa, ellei akkuteknologiassa tapahdu merkittäviä innovaatioita.

Polttokennosähkölentokoneilla voitaisiin operoida kantaman puolesta kaikilla Suomen sisäisillä lentoreiteillä. Myös monia lentoreittejä Skandinavian ja Baltian alueilla voitaisiin operoida tällä kalustolla. Infrainvestointien mielekkyyden näkökulmasta vetykäyttöinen kalusto voisi painottua 500–1 000 km:n reiteille ja akkusähkö tätä lyhyemmille reiteille. Kuvassa 42 on esitetty arvio sähköiselle lentoliikenteelle soveltuvista etäisyysvyöhykkeistä ja niiden sisällä olevista lentoasemista.

Taksilentoja laajemmin eri lentoasemien välillä

Sähkölentokoneilla voitaisiin palvella myös sellaisilla yhteysväleillä, joita ei nykyisin kustannus- tai muista syistä lennetä. Reittiliikenne perustuu suurehkoihin volyymeihin ja säännöllisiin aikatauluihin. Vastaavasti taksilentoliikenne on tilausohjautuvaa ja käytössä on korkeintaan 19-paikkaista kalustoa. Vuoteen 2040 mennessä akkusähkön kehitys mahdollistaa tämän kokoisella kalustolla jopa 1 000 km:n matkat. Käyttökohteet laajenevat siis huomattavasti.

Tämän toimintamallin yleistymistä edistäisivät digitaaliset sovellukset. FAIR-hankkeessa luotiin kuvan 43 mukainen konsepti kutsuohjautuvalle sähköisen lentoliikenteen sovellukselle, FAIR Volta. Konsepti perustuu ajatukseen, että Volta toimii varausalustana alueelliseen lentoliikenteeseen erikoistuneelle yritykselle. Yritys operoisi 10-paikkaisella sähköisellä kalustolla ja tarjoaisi palveluja Norjassa, Ruotsissa ja Suomessa.



Kuva 43. FAIR-hankkeessa konzeptoitu kutsuohjautuvan lentoliikenteen sovellus, joka perustuisi kysynnän ja tarjonnan parempaan kohtaamiseen. (FAIR, 2022)

Sovelluksella olisi kaksi keskeistä eroa perinteisiin lentolippujen varausjärjestelmiin: **matkan ovelta-ovelle varaukset sekä joustava hinnoittelu.** Sovelluksessa varattaisiin liput aina osoitteesta osoitteeseen eli myös liityntämatkat lentoasemille kuuluisivat tarjontaan. Tämä koko matkaketjun varaaminen ja maksaminen on tuttua maaliikenteessä. Toinen ero olisi aikataulu ja hinnoittelu: lentokoneet voisivat lähteä milloin vain perustuen matkustajakysyntään. Matkustajat voisivat varata joko lyhyen lähdön vaihteluvälin ja maksaa siitä enemmän tai sitten varautua pidempään vaihteluväliin ja maksaa vähemmän. Tämä dynaaminen hinnoittelu varmistaisi, että koneet saadaan aina mahdollisimman täyteen. (FAIR, 2022)

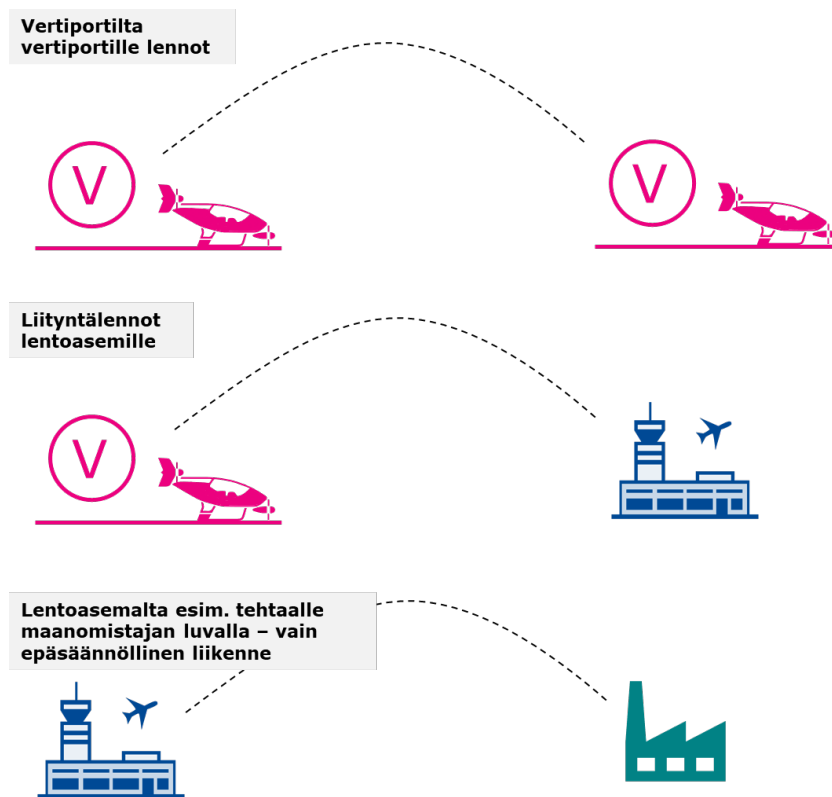
Kutsuohjautuva lentoliikenne saattaa toteutuakseen vaatia muutoksia regulaatioon, sillä nykyisten säännösten puitteissa ei ole yksikäsitteistä, tulkittaisiinko kutsuohjatut lennot taksilennoiksi vai kaikille avoimiksi matkustajalennnoiksi. Tämä tulkinta vaikuttaa muun muassa siihen, millä ehdoilla lennoilla voitaisiin hyödyntää valvomattomia lentopaikkoja.

Taksilentoliikenne tulisi ainakin aluksi soveltumaan tietyille yhteysväleille ja lentoasemaverkostoille. Taksilentoliikenteeseen soveltuisi mm. 9-paikkainen Eviation Alice, jonka kantama voi kehittyä huomattavasti vuoteen 2040 mennessä. Kaupallisena lentoliikenteenä taksilentoliikenteen alustana olisivat käytännössä Suomen ja lähimaiden lentoasemat sekä mahdollisuuksien mukaan

lentopaikat. Liikennejärjestelmän kokonaisuuden näkökulmasta taksilento-liikenteen merkitys on kuitenkin pieni. Lisäksi eVTOL-liikenne toteutuessaan todennäköisesti kilpailisi samoista asiakkaista taksilentojen kanssa.

eVTOL-tarjonta vertiporteilta

Pystysuoraan nousevien ja laskeutuvien alusten markkinat kasvavat jo vuoteen 2030 mennessä. Suurempi tarjonnan kehittyminen tapahtunee Suomessa vasta vuoteen 2040 mennessä, kun teknologia on kehittynyt myös pohjoismaisiin olosuhteisiin paremmin soveltuvaksi. eVTOL-alusten kehittämiseen sisältyy myös paljon regulaatiokehitystä, sillä ne liikennöisivät matalilla korkeuksilla, ns. U-spacessa miehittämättömän ilmaliikenteen kanssa. Toinen kehitystä määrittävä asia on vertiporttien kehittäminen ja niiden regulaatio. Vertiportit eivät vie paljon tilaa, mutta niihin kohdistuu kuitenkin lentopaikkoihin verrattavia vaatimuksia mm. melutasosta. Suomessa vertiportteja kehittynee aluksi etelän kaupunkiseutujen välille.



Kuva 44. eVTOL-alusten potentiaalisia käyttökohteita 2040.

eVTOL-aluksille voidaan tunnistaa ainakin kolme erilaista käyttökohdetta. Lentoja voi olla vertiportilta vertiportille, vertiportin ja lentoaseman välillä tai vertiportilta minne vain maanomistajan luvalla. Liityntäliikenne lentoasemille tai lentoasemilta olisi monilla paikkakunnilla hyödyllistä, sillä lentoasemat sijaitsevat usein etäällä kaupunkikeskustoista ja julkiset liityntäyhteydet puutteellisia. Oulu ja Jyväskylä ovat esimerkkejä lentoasemista, joille eVTOL-alukset voisivat tarjota nopean liityntäyhteyden. Ruotsissa aiotaan testata eVTOL-alusta Skellefteån lentoaseman ja Northvolt Ett -tehtaan välillä jo vuonna 2025. Kokeilun on tarkoitus tarjota lisätietoa infrastruktuuriin, ilmatilaan, lupiin ja lentämisen markkinoihin liittyviin kysymyksiin.

Epäsäännöllisen liikenteen tapauksessa eVTOL-aluksilla voisi liikennöidä minne vain maanomistajan luvalla. Tällainen käyttökohde voisi olla esimerkiksi yksittäinen tehdasvierailu lähimmältä lentoasemalta.

eVTOL-liikenne eroa kiinteäsiipisestä taksilentoliikenteestä erityisesti kantaman näkökulmasta, sillä eVTOL-liikenne palvelee korkeintaan muutaman sadan kilometrin matkoilla ja kiinteäsiipinen taksilentoliikenne tätä pidemmällä. Kaluston todellinen kustannustehokkuus kuitenkin määrittää kaupalliset sovellukset.

4.4.3 Kysyntäarvio 2040

Vuoteen 2040 on vielä runsaasti aikaa, joten kysynnän tarkempi arvioiminen on haastavaa. Kysynnän olemusta voidaan kuitenkin arvioida jo tehtyjen Suomen kehitystä kuvaavien skenaarioiden avulla. Tässä selvityksessä on käytetty pohjana Työ- ja elinkeinoministeriön tilaamaa raporttia ”Neljä skenaariota Suomen aluekehityksen suunnasta vuonna 2040”. Niiden avulla on arvioitu lentoliikenteen kysyntäpotentiaalia erilaisissa tulevaisuuden kehitysvaihtoehtoissa. Kysynnän maantieteelliset muutokset vaikuttavat edellisessä luvussa esitettyjen sähköisen lentoliikenteen toimintamallien yleistymiseen. Esimerkiksi pirstaloituvaa kysyntää voi olla vaikea palvella reittiliikenteellä, jolloin lentotaksiliikenteeseen voi kohdistua kasvavaa kysyntää.

Vuoteen 2040 asti ulottuvien skenaarioiden mukaan aluekehitys voi olla globaalisti valikoitunutta, raaka-aineisiin ja turismiin keskittynyttä, tilkkutäkkimäistä tai tasapainoista. Skenaarioita on tarkasteltu siitä näkökulmasta, miten Suomi kiinnittyy globaaliin talouteen. Huomio on kohdistettu erityisesti aluekehityksen ja -rakenteen kokonaiskuvaan. Lentoliikenteen kysyntäpotentiaali riippuu suuresti siitä, millaista toimintaa Suomen eri alueilla harjoitetaan. Eri skenaarioissa Suomi on toiminnoiltaan, kansainvälisyydeltään ja alueelliselta jakaumaltaan hyvin erilainen. Erilaiset skenaariot johtavat myös erilaisiin oletuksiin väestön määrästä ja sosiodemografiasta. Kaiken tämän perusteella voidaan hahmottaa erilaisten matkojen kysynnän potentiaalia. Tulevaisuuden aluekehityshaasteet kietoutuvat osaamisen kehittämisen sekä alueiden erikoistumisen ja sopeutumisen ympärille.

Raportissa todetaan, että tulevaisuuden keskeisimmäksi kysymykseksi nousee sen varmistaminen, että **Suomessa on maailmanluokan osaamiskeskittymiä, jotka ovat tiukasti kiinni jatkuvasti uudistuvan globaalien talouden virroissa ja verkostoissa**. Yhtä tärkeää on löytää kullekin alueelle parhaiten sopiva rooli osana tätä kokonaisuutta. Suomen eri talousalueiden hyvä saavutettavuus on välttämätöntä näiden tavoitteiden saavuttamiseksi. Lentoliikenteellä on tärkeä sija nopean yhteyden tarjoajana Suomesta ulkomaille ja Suomen sisällä. Eri skenaarioissa Suomen sisäisten yhteystarpeiden rooli on erilainen. Haasteena on varmistaa, että taloudellisen kärjen ulkopuolisessa Suomessa elinolosuhteet pysyvät hyvinä ja älykäs sopeutuminen on mahdollista.

Seuraavassa taulukossa on esitetty TEM-skenaariot ja arvioita niiden vaikutuksesta sähköisen lentämisen kysyntään ja tähän vastaamiseen:

Taulukko 17. TEM-skenaariot ja arvioita vaikutuksista lentämisen kysyntään ja siihen vastaamiseen.

Skenaario	Arvio vaikutuksista lentoliikenteen kysyntään ja siihen vastaamiseen
<p>Globaalisti valikoitunut Suomi <i>Talouden globalisaatio ei muutu merkittävästi seuraavan 20 vuoden aikana. Strategioiden ytimessä ovat innovatiivisuus, teknologia ja kansainväliset markkinat. Taloudellis-poliittis-tieteellinen eliitti kiinnittyy ensisijaisesti omiin globaaleihin verkostoihinsa. Valtaosa suomalaisista kiinnittyy pääosin paikallisiin ja alueellisiin verkostoihin. Suomen tuotannollinen kapasiteetti rapautuu kärkiä lukuun ottamatta. Pääkaupunkiseudun ja muutaman muun suuren kaupunkiseudun kuilu muuhun Suomeen kasvaa.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pääkaupunkiseudun saavutettavuus korostuu. Matkustajavolyymit painottuvat suurten keskusten ja PK-seudun välille. • Tarve nykyisenlaiselle lentämisen mallille, jossa Suomen aluekeskukset ovat viuhkamaisesti kytkettynä Helsinki-Vantaan lentoasemalle. Monilla näistä voidaan käyttää akkusähköä tai polttokennosähköä, riippuen etäisyyksistä. • Yksittäisiä reittejä voi syntyä myös toiminnaltaan vahvimpien aluekeskusten välillä ja niistä myös suoria lentoja lähimaihin.
<p>Suomi tilkkutäkinä <i>Talouden ydin ja kiinnittyminen globaaliin talouteen eriytyvät. Mikään toimiala tai alue ei nouse talouden veturiksi vaan kehitystä luonnehtii pistemäisyys. Suomen kapasiteetti kehittää ja hyödyntää digitaalisia ratkaisuja riippuu toimialasta ja se eriytyy muusta kehityksestä. Tilkkutäkki-Suomessa ei voi puhua alueiden välisestä kuilusta, vaan monista pienistä halkeamista. Kaupunkien sisäinen polarisaatio kasvaa.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Saavutettavuus eriytyy voimakkaasti pistemäisen kehityksen mukaisesti. • Ei merkittäviä kasvun mahdollisuuksia lentoliikenteelle, sillä riittäviä volyymejä ei synny keskusten välille. • Perinteisesti tärkeät yhteysvälit hoidetaan vahvimista aluekeskuksista Helsinki-Vantaalle. Monella reiteistä volyymit ovat pieniä, joten sähköinen kalusto tulee tarpeeseen.
<p>Raaka-aineiden ja turismin Suomi <i>Kansallinen itsekkyyks kasvaa EU:n sisäisten jännitteiden ja kansainvälisen politiikan kriisiytymisen myötä. Talouden ytimeen nousevat sellaiset alat, joiden on edes jollakin tavalla mahdollista kiinnittyä kansainväliseen talouteen ja siten tuoda maahan valuuttatuloja. Tällaisia aloja ovat esimerkiksi turismi, kaivosteollisuus, metsäraaka-aineet, datakeskukset ja tuulivoimalapuistot. Aluekehityksen "voittajiksi" nousevat ne pienet ja keski-suuret kaupungit ja maaseutualueet, jotka sijaitsevat resurssi- ja matkailualueiden ytimessä.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Matkailijoiden liikkumiseen liittyvät ratkaisut korostuvat. • Monet seutukaupungeista ovat merkittäviä teollisuuspaikkakuntia. Niillä on tarve sujuvalle matkaketjulle lähimmälle lentoasemalle, ja sieltä edelleen eteenpäin. Matkaketjujen kehittäminen Suomen lentoasemille korostuu. eVTOL-alusten käyttö yleistyy tässä skenaariossa nopeimmin. • Turistikohteita on kautta koko Suomen. Ulkomaisten matkailijoiden saapuessa Helsinki-Vantaalle jatkolentoja voidaan tarjota sähköisesti moneen kohteeseen. • Myös matkailukohteiden välisiä sähköisiä lentoja voidaan tarjota, jolloin niin kotimaiset kuin ulkomaisetkin matkailijat voivat ketjuttaa useita matkailukohteita nopeasti toisiinsa. • Skenaariossa lentoasemien käyttö kasvaa ja kysyntäpotentiaalia on perinteisen reittiliikenteen lisäksi kutsuohjautuvammassa sähköisessä lentoliikenteessä.
<p>Tasapainoinen Suomi <i>Suomi painottaa kansallista koheesiota eikä globaalin toimintaympäristön haluta ohjaavan maan kehitystä. Markkinoilta tuleviin paineisiin tai muutoksiin ei reagoida kovinkaan herkästi. Kehitystä luonnehtii tasapaksuus. Talous kehittyy tasaisesti, mutta selvästi verrokkimaita hitaammin. Alueiden välillä on suhteellisen hyvä tasapaino, joka perustuu nykyisiin asetelmiin. Aluekehittämisen suurimmaksi haasteeksi nousee taloudellisten kärkien kehittämisen ja koko Suomen tasapainoisen kehittämisen välinen tasapainoilu.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Erityisesti pääkaupunkiseudun ja maakuntakaupunkien saavutettavuuteen panostetaan. • Lentoliikenteen potentiaali jakaantuu melko tasaisesti Suomen eri talousalueille. • Yhteydet tarvitaan Helsinki-Vantaalle, mutta myös useiden alueiden välillä. • Kysyntää on, mutta volyymit ovat silti maltillisia. Sähköiselle lentämiselle tämä tarjoaa nopean kasvupolun.

4.4.4 **Investoinnit lentoasemainfrastruktuuriin 2040**

EU tulee arvioimaan vuoteen 2026 mennessä vaihtoehtoisten polttoaineiden jakeluinfrastruktuuria käsittelevän direktiivin (AFIR) mukaisia toimenpiteitä lentoasemille. On todennäköistä, että vaatimuksia tulee sekä sähkölataukselle että nestemäisen vedyn jakelulle. Jos direktiivi päivitetään vuonna 2026, täytäntöönpano tapahtunee vuoden 2030 jälkeen.

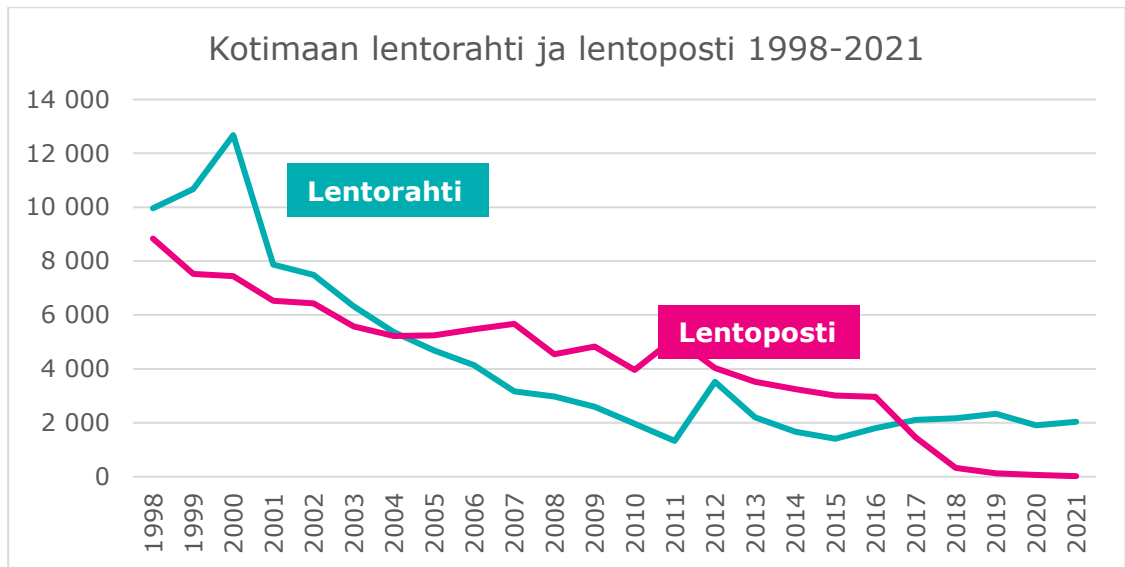
Edellä esitettyjen sähköisen lentämisen toimintamallien toteutuessa, sähkölatausinfrastruktuuriin lisäksi investointitarpeita kohdistuu myös vetyinfrastruktuuriin. Helsinki-Vantaalla tämä tarkoittaisi sähkölentokoneiden latauspuiston laajentamista ja nestemäisen vedyn jakeluinfrastruktuuriin rakentamista niin, että tankkaus on mahdollista siltaympäristössä. Noin 500 km säteellä Helsinki-Vantaasta sijaitsevilla lentoasemilla sähkölatauspisteitä tarvitaan lähtökohtaisesti reittiliikenteen tarpeisiin vain yksi, mutta sähköisen lentotaksiliikenteen sekä reittiliikenteen kehittyminen määrittää lisäinvestointitarpeet. Yli 500 km säteellä Helsinki-Vantaasta sijaitsevilla kentillä tarvitaan puolestaan todennäköisesti nestemäisen vedyn jakeluinfrastruktuuria, sillä pidemmillä matkoilla ei voi tehdä edestakaisia lentoja yhdellä tankkauksella.

Haasteena tulevaisuudessa on joka tapauksessa arvioida lentoasemakohtaisesti, riittääkö vain sähkölatauspisteiden tarjoaminen vai tarvitaanko myös nestemäisen vedyn jakeluinfrastruktuuria. Riskinä on turhien investointien tekeminen, joten kehitys vaatii tiivistä yhteistyötä lentoasemien, lentoyhtiöiden sekä lentokonevalmistajien välillä.

eVTOL-liikenteen mahdollistaminen edellyttää latausinfrastruktuuriin lisäksi riittävien fasiliteettien rakentamista. Kustannustehokkainta on rakentaa vertiportit sinne, missä muu sähköinfrastruktuuri on jo olemassa.

4.5 **Sähköisen lentämisen mahdollisuudet Suomen sisäisessä lentorahdissa**

Suomessa lentorahti on keskittynyt Helsinki-Vantaan lentoasemalle, jonka kautta kansainväliset rahtivirrat kulkevat. Tällä hetkellä Suomen sisäisen lentoliikenteen tavarakuljetukset perustuvat tiettyihin Finnairin runkoyhteyksiin, joissa käytetään ruumarahdille soveltuvaa kalustoa. Ostoliikenteen reiteillä pienempi kalusto on vain henkilökuljetuksille soveltuvaa, eikä niissä kuljeteta rahtia. Historian saatossa lentorahtia on kuvan 45 mukaisesti kuljetettu Suomessa enemmän, kun reittiverkosto oli kattavampi ja useammalle kentälle lennettiin ruumarahdille soveltuvalla kalustolla. Lentorahtia on lentotarjonnan vähenemisen myötä siirtynyt tiekuljetuksiin kotimaan tavarakuljetuksissa. Lentopostin toimittaminen ilmaitse on loppunut.



Kuva 45. Kotimaan lentorahti ja lentoposti 1998–2021. (Finavia, 2022c)

Lentämisen rooli Suomen sisäisissä tavarakuljetuksissa on siis pienentynyt ja samalla tärkeiden komponenttien ja varaosien toimituksien palvelutaso on osin heikentynyt eri puolilla Suomea. Joensuun seutu on esimerkki alueesta, jossa toimii runsaasti teknologiateollisuuden yrityksiä. Alueella toimii laitevalmistajia, jotka valmistavat tuotteita erilaisiin tuotantoprosesseihin ja viennin osuus on tyypillisesti 80–90 %. Laitteet edellyttävät kattavia huolto- ja varaosapalveluja ja ajoittain joudutaan turvautumaan kiiretoimituksiin tuotantolaitokselta. Nykyisellä määräaikaisella lentoliikenteen järjestelymallilla lentokoneet eivät ota rahtia kuljetettavaksi. Kyseiset tuotannolliset yritykset ovat joutuneet turvautumaan kiiretoimituksissa erilaisiin kuriiritoimituksiin, jotka operoidaan tiekuljetuksin. Aiemmin Finnairin liikennöidessä Joensuun lentoyhteyttä pienempiä komponentteja ja varaosia kuljetettiin reittikoneissa ruumarahdina. Vaikka lentorahdin volyymit eivät suuria olekaan, palvelumallin käytettävyys ja kuljetusketjun nopeus ovat joissakin tapauksissa kriittisiä tuotantontekijöitä. (Huoltovarmuuskeskus, 2022)

Sähköisen lentokaluston soveltuvuus lentorahtiin

Pienissä lentokoneissa haasteena on tarvittava tila matkustajille. Jatkolentoja käyttävillä matkustajilla on suuret matkatavarat ja käsimatkatavaraa, jolloin käytännössä ei jää tilaa rahdille. Lentoyhtiön liiketoiminta voisi myös kehittää sähköisten lentokoneiden monipuolisen käytön varaan. Monipuolinen palvelu voisi olla vaihtoehto pienemmälle toimijalle. Henkilö- ja rahtiliikennettä voisi harjoittaa yhdessä tai erikseen, koneen kapasiteetin rajoissa. Eri vuorokauden aikoina voitaisiin keskittyä erilaisiin palveluihin. Tämä edellyttää tietysti huolellista markkina-analyysiä liiketoimintakonseptin pohjaksi.

Sähköisessä lentoliikenteessä sekä henkilöiden että tavaroiden kuljettaminen samanaikaisesti on todennäköisesti vaikeaa. Sähköisellä kalustolla on tavoitteena minimoida koneen paino, jotta kantama saadaan pidetyksi kohtuullisena. Akkupaketit muodostavat suuren osan painosta, joten koneiden painonhallinta on entistäkin tärkeämpää. Näin ollen ruumarahdintarkaisut tuskin tulevat pieniin sähkölentokoneisiin vuoteen 2030 mennessä. Lähemmäksi vuotta 2040 mentäessä suurempi kalusto mahdollistuu ja voi avata myös ruumarahdille mahdollisuuksia, mutta tällöinkin vain reittiverkon piirissä olevilla yhteyksillä. Yksi mahdollinen kehityssuunta sähköisessä lentämisessä voisi olla Matkahuollon kaltainen ratkaisu, jossa pienempiä pakettikuljetuksia voidaan ottaa matkustajien ohella kyytiin. Sähköisillä lentokoneilla pakettikuljetukset voisivat tarjota yhden uuden ansaintalähteen lentoyhtiöille, jos lentoverkosto laajentuisi nykyisestä sähköisen lentokaluston myötä. Tähän liittyy kuitenkin paljon epävarmuuksia.

Potentiaalisia sähkölentokoneiden käyttökohteita Suomen sisäisessä lentorahdissa



HYVÄ SOVELTUVUUS

HEIKKO SOVELTUVUUS

Miehitetyt kiinteäsiipiset lentokoneet	Miehitetyt eVTOL-alukset	Miehittämättömät kiinteäsiipiset dronit	Ruumarahti
<ul style="list-style-type: none"> • Tyypillistä lentorahtia suurempiin lentorahtihubeihin • Lentorahdille konfiguroidut lentokoneet • n. 1 000 kg hyötykuorma 	<ul style="list-style-type: none"> • Joustava lentorahti eVTOL-aluksilla • Vaatii uusia operaattoreita ja liiketoiminta-konsepteja • Muutaman sadan kg hyötykuorma 	<ul style="list-style-type: none"> • Miehittämätön dronirahti lentoasemien välillä • Vaatii uusia operaattoreita ja liiketoiminta-konsepteja • Ensi alkuun pilotointia 	<ul style="list-style-type: none"> • Akkusähkökalusto ei todennäköisesti sovellu ruumarahdille: painon minimointi kalustossa • Energiavarastot vievät tilaa

Kuva 46. Potentiaalisia sähkölentokoneiden käyttökohteita Suomen sisäisessä lentorahdissa.

Sähkölentokonetta voisi käyttää myös pelkästään rahdin kuljetukseen. Sähköisen kaluston ennakoitujen pienemmät operatiiviset kustannukset voivat tarjota mahdollisuuden avata uusia pienen volyymin lentorahtireittejä myös Suomen sisäisessä liikenteessä. Esimerkiksi DHL on tilannut Eviationilta 12 kappaletta Alice-sähkölentokoneita rahtikonfiguraatiolla. Koneella voidaan kuljettaa 1 200 kg rahtia eli se voisi soveltua hyvin komponenttien ja verkkokauppatuotteiden kuljettamiseen. Tavoitteena on, että kalusto saataisiin käyttöön jo vuonna 2024. (DHL, 2021). Tällaisten ilma-alusten käyttäminen muutamilta Suomen keskeisiltä lentoasemilta käsin palvelisi alueiden teollisuuden ja verkkokaupan tarpeita. Ne voisivat lentää syöttölennoja Helsinki-Vantaalle ja runsaan tonnin painoisia tavaraeriä tärkeiden kysyntäpisteiden välillä Suomen sisällä. Mahdollisesti voisi syntyä jopa oma kevyiden rahtilentojen reittiverkosto, jolla voitaisiin lentää sekä kiinteän aikataulun että kysynnän mukaisesti. Tämä edellyttää markkinoiden kehittymistä nykyisestä huomattavasti.

Potentiaalinen käyttökohde lentorahdille ovat miehittämättömät kiinteäsiipiset sekä eVTOL-ilma-alukset. Esimerkiksi yhdysvaltalainen Elroy Air kehittää miehittämätöntä rahti-eVTOL-konetta, jonka kapasiteetti olisi 140–230 kg ja kantama lähes 500 km hybridisähköteknologialla (Elroy Air, 2022). On todennäköistä, että miehittämätön ilmailu yleistyy ensimmäisenä juuri lentorahdissa, sillä näin voidaan testata nopeasti teknologian toimivuutta vaarantamatta ihmishenkiä. Myös tällaiset koneet voisivat toimia syöttöliikenteenä Suomen sisäisissä kuljetuksissa suuremmille rahtihubeille Helsinki-Vantaalle ja kehittyvälle Tampere-Pirkkalalle. Teoriassa on mahdollista lentää myös suoraan kohteeseen, mutta tähän liittyy paljon tutkimus- ja kehitystyötä, jotta lentoliikennejärjestelmä kokonaisuutena pysyy sujuvana, tehokkaana ja turvallisena. Siksi on todennäköistä, että rahdissa hub-and-spoke -järjestelmä pysyy jatkossakin vahvana, mutta liityntäkuljetuksiin tulee tarjolle pienempiä sähköisiä ilma-aluksia.

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

5.1 Sähköisen lentämisen vaikutuksia

Taulukko 18. Koontitaulukko sähköisen lentämisen vaikutuksista.

Tekijä	Vaikutus 2030	Vaikutus 2040	Kuvaus
<i>Matka-ajat</i>	Nykyisillä lentoreiteillä matka-aika pidentyy	Vetykäyttöinen kalusto tarjoaa nykykaluston matka-nopeudet	Akkusähkölentokoneiden lentonopeus on nykyistä kalustoa matalampi, mutta vetykäyttöinen kalusto pystyy lähes nykyisen kaluston nopeuksiin.
	Uusilla reiteillä matka-ajat lyhenevät muihin vaihtoehtoihin nähden	Uusilla reiteillä matka-ajat lyhenevät muihin vaihtoehtoihin nähden	Uusilla reiteillä sähköinen lentoliikenne osoittautuu usein nopeimmaksi vaihtoehdoksi. Matka-aikaa voidaan entisestään lyhentää lentoasema-aikaa nopeuttamalla sekä kehittämällä sujuvia matkaketjuja.
<i>Ruuhkat ja viivästykset ilmatilassa ja lentoasemilla</i>	Neutraali ilmatilassa	Epävarma	Sähköisen lentoliikenteen määrät tulevat olemaan maltillisia eivätkä todennäköisesti aiheuta ruuhkaa tai viiveitä. eVTOL-koneiden sekä rahtidroonien voimakas yleistymisen voisi aiheuttaa haasteita ilmatilan hallinnalle.
	Neutraali lentoasemilla	Kielteinen lentoasemilla	Suuremmilla lentoasemilla voi syntyä ruuhkautumista, kun slotteille on suurta kysyntää. Sähkölatauksen nopeus määrittää slotin varausajan.
<i>Liikenne-turvallisuus ja onnettomuus-kustannukset</i>	Neutraali	Myönteinen	Sähkölentokoneet voivat parantaa tietyillä yhteysväleillä turvallisuutta, jos pitkämatkaista tieliikennettä siirtyy riskialttiilta yhteysväleiltä lentämiseen. Vaikutus on ensi alkuun liikennejärjestelmätasolla rajallinen johtuen suurista tieliikenteen volyymeistä, mutta jos Suomen lentoliikennejärjestelmässä voidaan lisätä merkittävästi lentämisen kysyntää, voi vaikutus olla myönteinen.
<i>Melu</i>	Neutraali	Kielteinen	Vaikka sähkölentokoneiden moottorit ovat hiljaisempia, pienet koneet lentävät matalalla ja potkuriäänät säilyvät. Monilla pienillä kentillä melu lisääntyy, jos sähköinen lentoliikenne aktivoi niiden käyttöä. Volyymien kasvaessa mm. eVTOL-alukset tuovat melua lähemmäs asutusta, vaikka potkuriäänien luvataan pienenevän helikoptereihin verrattuna.
<i>CO2-päästöt</i>	Neutraali	Myönteinen	Sähkömoottoreissa ei synny käytön aikaisia päästöjä. Mitä enemmän olemassa olevaa kalustoa korvataan sähköisellä kalustolla, sen suurempi on vaikutus lentämisen hiilijalanjälkeen.
<i>Ilmasto-vaikutus</i>	Myönteinen	Myönteinen	Akkusähkö ei aiheuta ilmasto-vaikutusta, mutta vetykäyttöiset koneet aiheuttavat vesihöyryä. Kokonaisuutena vaikutus on positiivinen, jos korvataan fossiilikäyttöistä lento- tai tieliikennettä.

Tekijä	Vaikutus 2030	Vaikutus 2040	Kuvaus
<i>Maankäyttö</i>	Myönteinen lentoasemien lähistöllä	Myönteinen lentoasemien lähistöllä	Sähköisen lentämisen avulla voidaan saada nykyisestä maankäytöstä mahdollisimman paljon irti. Sähköinen lentäminen ajurina voi aktivoida lentoasemia ja tarjota mahdollisuuksia kehittää niiden välittömässä läheisyydessä olevaa maankäyttöä elinkeinoelämän tarpeisiin. Laajemmin lentoliikenteen tuoma saavutettavuus voi luoda edellytyksiä kuntien maankäytön kehittämiseksi.
	Neutraali	Kielteinen	Latausinfrastruktuuri vaatii omat turvaetäisyytensä, mutta tuskin vie merkittävästi ylimääräistä tilaa lentoasemilla. Vety puolestaan vaatii ominaisuuksiensa vuoksi huomattavasti suurempia polttoainetankkeja lentoasemalla, mikä näkyy vuoteen 2040 mennessä kasvaneena tilatarpeena lentoasemilla.
<i>Valtion rahoitus</i>	Epävarma	Epävarma	Riippuu tavoitteista. Nykyisen palvelutason ylläpitäminen voi olla kustannustehokkaampaa osalla yhteysväleistä, mutta uusien yhteyksien avaamisessa sekä sähköisen lentämisen yleistymisessä valtion rahoituksella on käynnistysvaiheessa tärkeä rooli mm. infran mahdollistamisessa.

5.2 Sähköisen lentoliikenteen edistäminen suomalaisessa toimijakentässä

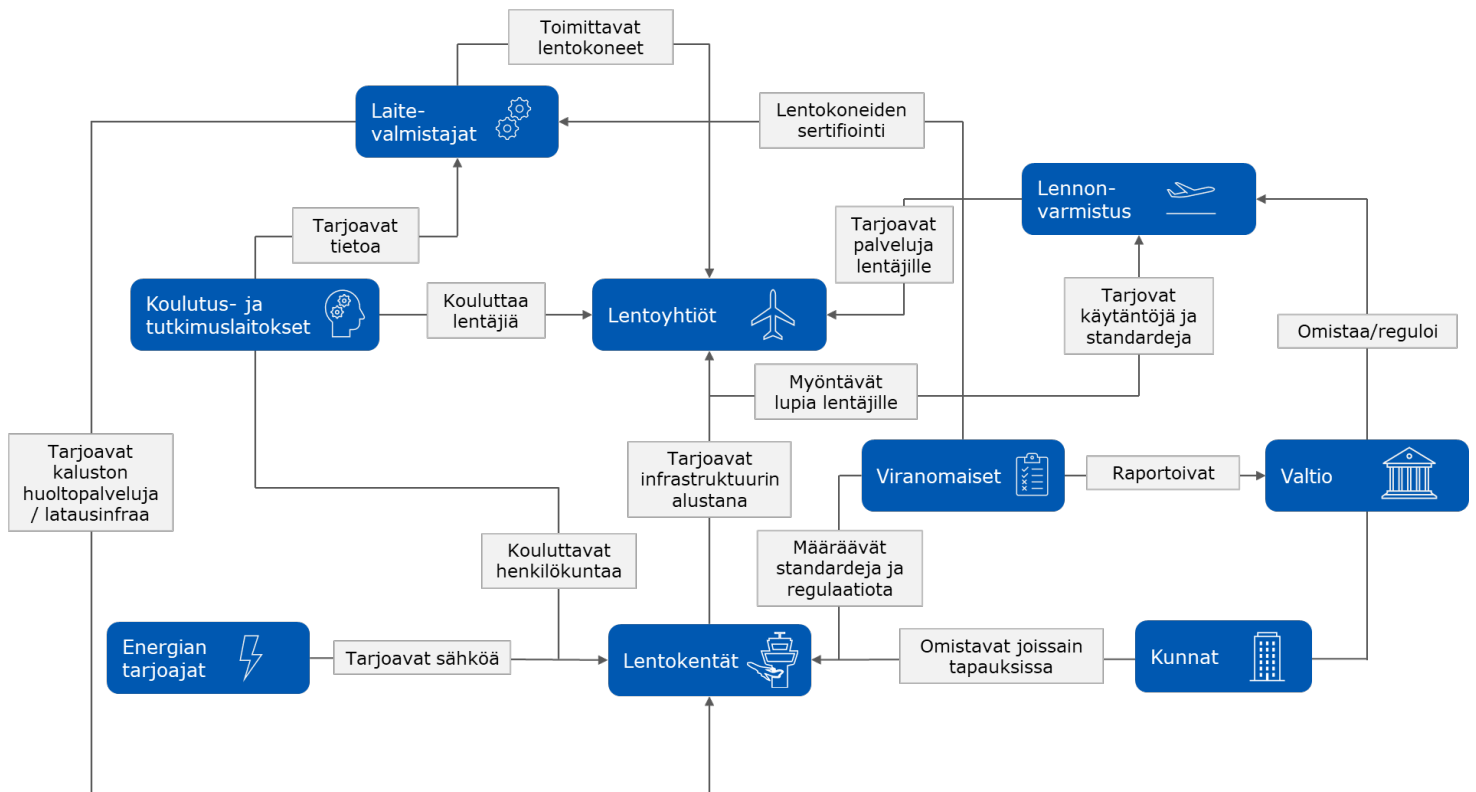
Sähköisen lentoliikenteen toimijakenttä on monitahoinen. Kehitys tapahtuu kotimaisissa ja kansainvälisissä verkostoissa, ja sähköisen lentoliikenteen jatkuvan kehityksen myötä säännöllinen tiedon vaihto ja TKI-toiminta ovat keskeisessä roolissa. Taulukkoon 19 on kuvattu kootusti keskeiset toimijat ja niiden roolit.

Taulukko 19. Sähköistä lentämistä edistävät toimijat ja niiden roolit. Muokattu lähteestä (Hak & Driessen, 2021)

Toimija	Rooli
Laitevalmistajat: Sähkölentokoneet, akut ja laturit	Lentokoneiden, akkujen ja laturien suunnittelu ja rakentaminen. Standardointityöhön osallistuminen ja käytännön kokemusten jakaminen viranomaisille regulaation pohjaksi.
Lentoasemat: infrastruktuuri, operatiivinen toiminta ja ylläpito, lentokoneiden korjaus ja huolto (MRO)	Sähkölatauksen tarjoaminen ja riittävän sähköinfran kapasiteetin varmistaminen (sähköliittymät, kaapelointi, energiavarastot). Sähköisen lentoliikenteen ominaisuuksiin ja akkutulipaloihin kouluttaminen ja varautuminen. Lentoasemien kokonaistoimivuuden varmistaminen.
Lentoyhtiöt: lentokalusto ja miehistö	Liiketoimintapotentiaalin arviointi, miehistön koulutus ja sähköisen lentämisen tarjonnan sovittaminen nykyiseen järjestelmään. Tiivis yhteistyö lentokonevalmistajien kanssa.
Viranomaiset: kansainväliset tahot kuten ICAO, EASA, CAA, IATA, ACI, CANSO sekä Suomessa Traficom	Yhteistyö valmistajien kanssa regulaation säätämiseksi sähköiselle lentämiselle soveltuvaksi. Lentoasemilla turvallisuusstandardien varmistaminen.

Lennonvarmistuspalvelut: Fintraffic Lennonvarmistus Oy, muut uudet toimijat	Varmistavat, että sähköisiä lentokoneita ohjataan turvallisesti ilmatilassa. Yhteistyö valtion kanssa ilmatilan hallinnan kehittämiseksi, kun ilmatilaan tulee todennäköisesti yhä enemmän pienempää kalustoa.
Koulutus- ja tutkimuslaitokset: Yliopistot ja korkeakoulut, ilmailualan koulutusorganisaatiot	Tutkimustoiminta yhdessä yritysmaailman ja julkisen sektorin kanssa. Koulutusorganisaatiot tarjoavat koulutuspalveluita sähköiseen lentämiseen: lentäjille, korjaukseen ja ylläpitoon.
Valtio: ylätasoon tavoitteet	Kehityksen nopeuttamiseksi voi asettaa kannustimia lentoyhtiöille ja lentoasemille. Verotuksen tarkastelu joko tasapuolisen pelikentän tarjoamiseksi tai sähköisen lentämiseen kannustamiseksi.
Kunnat ja niiden elinkeino-yhtiöt: Aluetalous	Voivat omistaa lentoasemia ja hyötyvät niiden aluetaloudellisista vaikutuksista. Voivat toimia alueellisen lentotoiminnan edistäjinä.
Energian toimittajat: paikalliset energiayritykset ja lentoasematoimijat	Sähkön tarjoaminen tarpeeseen.

Kuvassa 47 on esitetty keskeiset sähköistä lentämistä edistävät tahot ja niiden vuorovaikutussuhteet. Sähköisessä lentämisessä korostuvat yleisesti lentoliikenteeseen liittyvät tekijät, mutta uutena kokonaisuuteen tulevat sähköistä kalustoa, energiateknologiaa ja lataus- ja jakeluinfrastruktuuria kehittävä laitevalmistajat sekä energian tarjoajat.



Kuva 47. Toimijoiden keskinäisriippuvuus sähköisessä lentämisessä. Muokattu lähteestä (Hak & Driessen, 2021, s. 12)

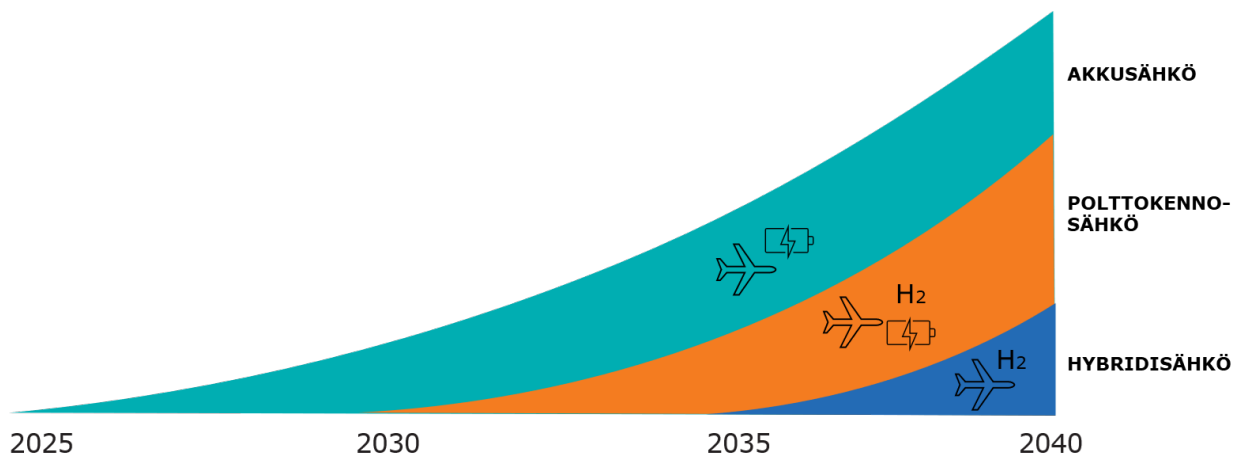
5.3 Arvio tulosten tuomisesta osaksi liikennejärjestelmäanalyysiä

5.3.1 Johtopäätökset sähköisestä lentämisestä ja liikennejärjestelmästä

Sähköisellä lentämisellä paikkansa liikennejärjestelmässä

Sähköinen lentäminen on osa lentoliikennettä ja se alkaa pienen volyymin lennoilla. On todennäköistä, että lentokonevalmistajien ilmoittamat sähköisen kaluston markkinoille tulon aikataulut ovat optimistisia, ja todellinen sähköisen lentämisen skaalautuminen alkaa 2030-luvun puolella. Ei ole kuitenkaan poissuljettua, etteikö jo ennen sitä nähtäisi sähköistä lentokalustoa yksittäisillä yhteysväleillä.

2030-luvulla koneiden kantaman ja kapasiteetin kasvaessa sähköisillä lennoilla voidaan korvata yhä suurempi osa polttomoottorilennoista. Ensin yleistyvät akkusähkökoneet, sitten polttokennosähkö ja näiden jälkeen hybridisähkökalusto, joka hyödyntää sekä polttokennoja että vetyturbiineja. On myös mahdollista, että markkinoille tulee nopeastikin erilaisia biopolttoaineita ja sähköä käyttäviä hybridejä, joilla voidaan vähentää lentämisen päästöjä nopeasti.



Kuva 48. Sähköisen lentokaluston arvioitu kehitys Suomessa.

Liikenneverkkojen kattavuus on keskeinen tekijä, joka määrittää eri liikennemuotojen käytettävyyttä. Tieverkon laajuus on ylivoimainen ja rataverkko kattaa melko hyvin Suomen väestöpohjan. Sen sijaan Suomen suuresta pinta-alasta saavutetaan vain vähän rautateillä. Esimerkiksi Lapissa on vähän rautateitä, mutta lentokenttien peittävyys on varsin hyvä.

Pitkämatkaisen tieliikenteen osittaisena korvaajana tulee kyseeseen sähköinen lentäminen. Näin saavutetaan merkittäviä matka-ajan lyhenemisiä ja parempi liikenneturvallisuus lentäen. Suomen aluekeskusten välillä on liikennetarvetta, mutta nykyinen palvelutarjonta voi johtaa pitkiin matka-aikoihin. Usein matka henkilöautolla on ainut vaihtoehto. Liikennejärjestelmän kannalta on syytä huolella pohtia, miten sähköinen lentäminen vastaa useisiin liikennejärjestelmälle asetettuihin tavoitteisiin. Niitä ovat mm. saavutettavuus, liikenneturvallisuus ja päästöjen vähentäminen. Taloudellisuus infranpidossa ja liikennöinnissä on tärkeä tavoite eri osapuolille, jotka osallistuvat liikennejärjestelmän rakentamiseen, ylläpitoon ja operatiiviseen toimintaan. Kyseessä on public-private-kokonaisuus.

Reittiliikenteen pysyvyys tärkeää

Sähköisen lentoliikenteen vaikutus järjestelmätasolla ilmenee niin, että sähköinen kalusto vähitellen korvaa nykyistä kalustoa reittiliikenteessä. Liikennejärjestelmän näkökulmasta vaikutukset näkyvät ensin lentoliikenteen alentuneissa päästöissä.

Reittien pysyvyys on tärkeää lentoliikenteen käyttäjille, erityisesti elinkeinoelämälle. Mikäli reittiliikenne jollakin yhteysväliällä loppuu, kuten Suomessa usein on käynyt, reitin uudelleen aloittamisen jälkeen vie aikansa saavuttaa riittävä kysynnän taso. Sähköisen lentämisen kohtuullisen pieni matkustajakapasiteetti sopii ohuiden matkustajavirtojen reiteille ja näin voidaan taata reitin säännöllisyys ja pysyvyys. Liikenteessä kiinteä tarjonta generoi kysyntää. Kansainvälisille yritysille saavutettavuus eli liikennetarjonnan määrä ja laatu ovat tärkeitä sijoittumiskriteereitä.

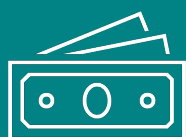
Lentotarjontaa uusille yhteysväleille

Sähköistä lentoliikennettä voi syntyä myös uusille reiteille, joilla on riittävä kysyntäpotentiaali, vaikka tällä hetkellä lentotarjontaa ei olisikaan. Taksilento-liikenne joko kiinteäsiipisillä tai eVTOL-aluksilla toisi käytännössä uuden liikkumistavan liikennejärjestelmään. Sähköinen taksilento-liikenne voi hyödyntää Suomen laajaa lentoasemaverkostoa, kunhan sähköisen liikenteen infrastruktuuri lentoasemilla on olemassa. Sekä uudet lentoreitit että taksilento-yhteydet vaikuttavat muiden liikennemuotojen osuuteen ja näin muodostuu myös uudenlaisia matkaketjuja. Lentoliikenne tarvitsee aina tuekseen maaliikennemuotoja, tie- tai rautatieliikennettä. Vaikutukset ilmenevät sekä lentoliikennejärjestelmässä että muiden liikennemuotojen käytössä.

Kestävän liikennejärjestelmän edistäminen

Sähköinen lentäminen uudistaa lentoliikennejärjestelmää kestäväan suuntaan. Tämä seikka lisää sähköiselle lentämiselle asetettua odotusarvoa. Lentoliikenteen päästöt vähenevät, ja samalla syntyy nopeampia matkaketjuja, erityisesti uusilla reiteillä. Pienehkö kapasiteetti edistää koneiden täyttöastetta, millä on vaikutusta istuinkilometriä kohti syntyvään energiankulutukseen ja lennon taloudellisuuteen.

5.3.2 Ehdotetut toimenpiteet



Sähköisen lentämisen taloudellisten kannustimien tarkastelut

Jos sähköisen lentoliikenteen yleistymistä halutaan yhteiskunnan tasolla vauhdittaa, vaatii tämä alkuvaiheessa hyvin todennäköisesti taloudellisia kannustimia ennen kaupallista kannattavuutta. Vaihtoehtoja kaupallisen toiminnan kiihdyttämiseen ovat mm.:

1. Lentoasemakustannusten alentaminen





- Subventiot lentoasemamaksuihin – sähköinen kalusto painaa enemmän ja lentoasemamaksujen osuus operatiivisista kustannuksista melko suuri erityisesti pienellä kalustolla.
- Etälennonjohdon ja digitaalisten lentoasemien edistäminen – alentaa pitkällä aikavälillä lentoasemaverkoston operatiivisia kustannuksia ja mahdollistaa kenttien jatkuvan aukiolon


2. Sähkölatausinfrastruktuuri-investointien tuet

- Kuten tieliikenteessä, latausinfra tukea voidaan osoittaa sähkölatausinfraa rakentaville toimijoille lentoasemilla. Erityisen merkittävää, jos EU:n jakeluinfradirektiivissä tehdään lentoasemia koskevia linjauksia.

3. Kilpailutussäätelyyn vaikuttaminen

- Kilpailutuksissa akkusähkö- ja polttokennosähkökaluston huomioon ottaminen esim. lisäpistein (vrt. Trafikanalys 2020, s. 81)

	<ul style="list-style-type: none"> o Tulevaisuudessa voidaan tarkastella, voitaisiinko lentoliikenteen kilpailutuksissa edellyttää tiettyjä käyttövoimia, ja pyrkiä vaikuttamaan EU-sääntelyyn tämän mahdollistamiseksi <p>4. Kaluston hankinta kilpailutettuun liikenteeseen</p> <ul style="list-style-type: none"> o Valtion olisi mahdollista hankkia sähköistä lentokalustoa käytettäväksi kilpailutetussa liikenteessä (vrt. Avinor & Luftfahrtstilsynet 2020, s. 36)
 <p>Lentämisen yhteiskunnallisten hyötyjen tarkastelu- menetelmän kehittäminen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Otetaan Suomessa käyttöön näkyvämmiin Ruotsin malli, jossa tarkastellaan kuntakohtaista saavutettavuutta ja voidaan sillä perustella lentoliikenteen ostoliikennettä (vrt. Trafikverket 2016) • Otetaan huomioon lentämisen tuomat hyödyt saavutettavuudelle, elinkeinolämälle ja aluetaloudelle • Sähköinen lentäminen ei aiheuta päästöhaittoja • Vaikutus liikenneturvallisuuteen – korvataan pitkiä automatkoja lentoliikenteellä, esim. pitkiä liityntämatkoja lentoasemille • Tarkasteluun, olisiko mahdollista luoda kannustimia alueellisten lentojen sähköistykseen, kun sillä saavutetaan aluetaloudellisia sekä yhteiskunnallisia hyötyjä nykyistä selvästi vähäisemmin päästön
 <p>Matkaketjujen kehittäminen sähköistä lentoliikennettä tukemaan</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Lentoasemajärjestelmän kilpailukyvyyn kehittäminen matkaketjuja sujuvoittamalla ja nopeuttamalla • Maaliikenteen kytkentä lentojen aikatauluihin • Käyttöön mahdollisimman nopeasti eVTOL-kalustoa • Digitalisaation edistämisen jatkaminen lentoliikenteessä – käyttäjälähtöisten matkavarauksjärjestelmien kehittäminen • Lentäminen kiinteämmin osaksi liikkumista palveluna • Matkailupalvelujen ja sähköisen lentoliikenteen kytkentä – matkailukonseptien kehitys
 <p>TKI – Ekosysteemyö ja kokeilu- kulttuurin edistäminen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sähköisen lentoliikenteen kehitystyö kansallisesti ja kansainvälisissä verkostoissa • EU-tason merkittäviä ohjelmia, joissa Suomi on mukana ovat SESAR3 (digitaalisen ilmatilan kehitys) ja Clean Sky 2 (uudet käyttövoimat) • Nordic Network for Electric Aviation (NEA) on tärkeä verkosto pohjoismaisessa kontekstissa, jossa mm. Finavia on mukana • Suomessa vahvaa lentoliikenneosaamista monilla sektoreilla, ks. kuva 49 • Sähköisessä lentämisessä fokus energiaratkaisujen, lentoasemainfran, lentokaluston, ilmatilan toimivuuden ja huoltopalvelujen kehittämisessä.

	<ul style="list-style-type: none"> • Suomen sähköisen lentämisen testialustojen hyödyntäminen, mm. Helsinki-East Aerodrome, Tampere-Pirkkala ja Kokkola-Pietarsaari. • Kehittyvän energiaklusterin (akkusähkö ja vety) kytkeminen sähköisen lentämisen kehitykseen. • Vertailukohteena Ruotsin ELISE-projekti, jossa tavoitteena on muodostaa Euroopan ensimmäisiä kaupallisia sähköisen lentämisen reittejä. Projektiin osallistuu lentoasematoimijoita, lentokonevalmistajia, tutkimusorganisaatioita ja muita keskeisiä toimijoita.
---	---

Sähköinen lentäminen on maailmalla vasta alkutekijöissään. Kehitykseen liittyy lukuisia tässä työssäkin esitettyjä haasteita, mutta tärkeintä on, että teknologiaa testataan rohkeasti ja pyrkimys on nopeaan kaupallistamiseen. Tällöin tunnistettuja hyötyjä päästään realisoimaan. Suomi on alustana erinomainen sähköisen lentämisen kaupalliseen toimintaan tähtäävälle pilotoinnille, sillä maassa on laajaa osaamista niin digitalisaation, uusien käyttövoimien kuin lentokoneteknologian alueilla, kuten kuvasta 49 huomataan.



Kuva 49. Suomen lentoliikenteen osaamisympäristö. (Business Finland, 2021)

Suomen akkuklusteri kehittyy akkustrategian mukaisesti erityisesti Suomen etelä- ja länsirannikolla kiihtyvällä tahdilla. Vedyn tuotantoon ja hyödyntämiseen liittyviä kehitysprojekteja on myös meneillään mm. Pohjanmaalla. Seuraava askel on kytkeä suomalaiset osaamisalueet yhä vahvemmin toisiinsa ja päästä kohti konkreettista toteutusta.

Tehokkainta on, jos sähköisen kaluston testaus pystytään toteuttamaan reitillä, jolla on aito kaupallinen potentiaali. Tässä työssä esitetyt potentiaaliset reitit ovat mahdollisia vaihtoehtoja. Sähköisessä lentämisessä tarkemmin selvitettäviä asioita ovat mm. toimivuus talviolosuhteissa, lataus- ja jakeluinfrastruktuurin vaatimukset, ilmatilan hallinta, kaluston huolto, kaupallisuus ja monet muut tutkimuskohteet, joihin voidaan saada varmoja vastauksia vain käytännön kokeiluilla.

Aikaikkuna sähköisen lentämisen kehittämiseksi on auki. Nyt on erinomainen hetki edistää digitaalista ja vähäpäästöistä lentoliikennejärjestelmää Suomessa.

Lähteet

Airbus, 2021. Airbus Global Market Forecast 2021 - 2040.

Avinor & Luftfartstilsynet, 2020. Forslag til program for introduksjon av elektrifiserte fly i kommersiell luftfart. Saatavilla: https://www.regjeringen.no/contentassets/048b277dfe9d4e76a059b0796bbe8b52/200305_rapport-elektrifiserte-fly-i-kommersiell-luftfart_final.pdf (luettu 27.5.2022)

BloombergNEF, 2021. About. Saatavilla: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/> (luettu 6.4.2022)

Business Finland, 2021. Finnish Aviation Landscape.

CharIN, 2022. MCS. Saatavilla: <https://www.charin.global/technology/mcs/> (luettu 22.3.2022).

Cirium, 2021. Ascend by Cirium Weekly Team Perspective: Disruption means opportunity, for airline start-ups. Saatavilla: <https://www.cirium.com/thoughtcloud/ascend-by-cirium-weekly-disruption-opportunity-airline-start-ups/> (luettu 27.5.2022)

Clean Sky, 2020. Hydrogen-powered aviation A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050.

Deloitte, 2020. Fueling the Future of Mobility - Hydrogen and fuel cell solutions for transportation.

DHL, 2021. DHL Express shapes future for sustainable aviation with the order of first-ever all-electric cargo planes from Eviation. Saatavilla: <https://www.dhl.com/global-en/home/press/press-archive/2021/dhl-express-shapes-future-for-sustainable-aviation-with-the-order-of-first-ever-all-electric-cargo-planes-from-eviation.html> (luettu 14.4.2022).

EASA, 2018. The new CS-23 – smart and flexible rules that support innovation. Saatavilla: <https://www.easa.europa.eu/domains/general-aviation/general-aviation-road-map/new-cs-23-%E2%80%93-smart-and-flexible-rules-support-innovation> (luettu 23.3.2022)

EASA, 2019. Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Annex IV Commercial air transport operations [Part-CAT] of Commission Regulation (EU) 965/2012 on air operations. Consolidated version including Issue 2, Amendment 16. Saatavilla: <https://www.easa.europa.eu/downloads/94187/en> (luettu 23.5.2022)

EASA, 2021a. Notice of Proposed Amendment 2021-15. Saatavilla: <https://www.easa.europa.eu/downloads/134361/en> (luettu 17.3.2022)

EASA, 2021b. Special Condition E-19 - Electric / Hybrid Propulsion System. Saatavilla: <https://www.easa.europa.eu/downloads/126470/en> (luettu 23.3.2022)

EASA, 2022. Aircraft certification. Saatavilla: <https://www.easa.europa.eu/domains/aircraft-products/aircraft-certification> (luettu 27.4.2022)

eCFR, 2022. § 91.167 Fuel requirements for flight in IFR conditions. Saatavilla: <https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-F/part-91/subpart-B/subject-group-ECFRef6e8c57f580cfd/section-91.167> (luettu 27.4.2022)

Elroy Air, 2022. Elroy Air. Saatavilla: <https://elroyair.com/>
(luettu 22.4.2022)

Elsäkerhetsverket, 2020. Säkerhetsrisker med batterilager. Saatavilla: www.elsakerhetsverket.se/privatpersoner/din-elanlaggning/bygga-och-renovera/installation-
(luettu 21.3.2022)

Energiateollisuus, 2022. Energiavuosi 2021 Sähkö.

EU:n rakennerahastojen hallintajärjestelmä, 2022. Hankekuvaus, TMP Zero. Saatavilla: <https://www.eura2014.fi/rrtiepa/projekti.php?projektkoodi=A78652>
(luettu 4.4.2022)

Eurocontrol, 2021. New integrated ATM/ U-space services and capabilities will meet the airspace integration challenges of Urban Air Mobility. Saatavilla: <https://www.eurocontrol.int/article/new-integrated-atm-u-space-services-and-capabilities-will-meet-airspace-integration> (luettu 27.4.2022)

Euronews, 2020. Flight-shaming a factor as Swedish air passengers tumble, says expert. Saatavilla: <https://www.euronews.com/2020/01/11/flight-shaming-a-factor-as-swedish-air-passengers-tumble-says-expert> (luettu 13.4.2022)

Euroopan Komissio, 2010. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EY) N:o 300/2008, annettu 11 päivänä maaliskuuta 2008, yhteisistä siviili-ilmailun turvaamista koskevista säännöistä ja asetuksen (EY) N:o 2320/2002 kumoamisesta (ETA:n kannalta merkityksellinen teksti). Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:02008R0300-20100201> (luettu 27.4.2022)

Euroopan Komissio, 2016. Komission asetus (EU) N:o 1254/2009, annettu 18 päivänä joulukuuta 2009, perusteista, joilla jäsenvaltiot saavat poiketa siviili-ilmailun turvaamista koskevista yhteisistä perusvaatimuksista ja ottaa käyttöön vaihtoehtoisia turvatoimenpiteitä. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:02009R1254-20161221> (luettu 22.4.2022)

Euroopan Komissio, 2021a. European Green Deal. Saatavilla: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_3541
(luettu 18.3.2022)

Euroopan Komissio, 2021b. Komission asetus (EU) N:o 965/2012, annettu 5 päivänä lokakuuta 2012, lentotoimintaan liittyvistä teknisistä vaatimuksista ja hallinnollisista menettelyistä Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen (EY) N:o 216/2008 mukaisesti. Ajantasainen versio. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:02012R0965-20210812&from=EN> (luettu 16.3.2022).

Euroopan Komissio, 2021c. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2018/1139, annettu 4 päivänä heinäkuuta 2018, yhteisistä siviili-ilmailua koskevista säännöistä ja Euroopan unionin lentoturvallisuusviraston perustamisesta, Euroopan parlamentin ja neuvoston asetusten (EY) N:o. -- Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX%3A02018R1139-20210725> (luettu 21.4.2022)

Euroopan Komissio, 2021d. Komission täytäntöönpanoasetus (EU) 2021/1296, annettu 4 päivänä elokuuta 2021, asetuksen (EU) N:o 965/2012 muuttamisesta ja oikaisemisesta polttoaine-/energiasuunnittelua ja polttoaineen/energian kulutuksen hallintaa koskevien vaatimusten sekä --. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:32021R1296> (luettu 9.5.2022)

Euroopan Komissio, 2021e. Ehdotus, Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus, vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuurin käyttöönotosta ja Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2014/94/EU kumoamisesta. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:52021PC0559> (luettu 27.5.2022)

Euroopan Komissio, 2022. Mobility Strategia, s.l.: Euroopan Komissio.

Eurostat, 2022a. National air passenger transport by reporting country.

Saatavilla:

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/AVIA_PANC_custom_2304350/default/table?lang=en (luettu 17.3.2022)

Eurostat, 2022b. Population on 1 January. Saatavilla:

<https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tps00001/default/table?lang=en> (luettu 17.3.2022)

Eurostat, 2022c. Airport traffic data by reporting airport and airlines. Saatavilla:

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/AVIA_TF_APAL_custom_2387844/default/table?lang=en (luettu 29.3.2022)

Eurostat, 2022d. Commercial flights by reporting airport – monthly data.

Saatavilla:

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/AVIA_TF_AIRPM_custom_2386134/default/table?lang=en (luettu 29.3.2022)

Eviation, 2022. Newsroom. Saatavilla: <https://www.eviation.co/media/> (luettu 17.3.2022)

FAIR, 2022. Flexible and on-demand, can electric air travel change how we fly?

Finavia, 2022a. Haastattelu, Henri Hansson, 30.03.2022.

Finavia, 2022b. Lentoliikennemaksut ja yleiset palveluehdot 1.1.2022 alkaen.

Finavia, 2022c. Lentoliikenteen tilastot. Saatavilla:

<https://www.finavia.fi/fi/tietoa-finaviasta/tietoa-lentoliikenteesta/liikennetilastot/liikennetilastot-vuosittain> (luettu 14.4.2022)

Fingrid, 2022. Sähköntuotannon CO₂-päästöarvio. Saatavilla:

<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinainformaatio/co2/> (luettu 23.3.2022)

Finlex, 2022. Ilmailulaki 864/2014. Saatavilla:

<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140864> (luettu 27.5.2022)

Finnair, 2021. Finnair vahvistaa yhteistyötä sähkölentämisen pioneerin Heart

Aerospacen kanssa. Saatavilla: [https://www.finnair.com/fi-](https://www.finnair.com/fi-fi/bluewings/vastuullisuus/finnair-vahvistaa-yhteisty%C3%B6t%C3%A4-s%C3%A4hk%C3%B6lent%C3%A4misen-pioneerin-heart-aerospacen-kanssa-2253660)

[fi/bluewings/vastuullisuus/finnair-vahvistaa-yhteisty%C3%B6t%C3%A4-s%C3%A4hk%C3%B6lent%C3%A4misen-pioneerin-heart-aerospacen-kanssa-2253660](https://www.finnair.com/fi-fi/bluewings/vastuullisuus/finnair-vahvistaa-yhteisty%C3%B6t%C3%A4-s%C3%A4hk%C3%B6lent%C3%A4misen-pioneerin-heart-aerospacen-kanssa-2253660) (luettu 6.4.2022)

Finnair, 2022a. Haastattelu, Ann-Sofie Snåre ja Riku Aho, 5.5.2022.

Finnair, 2022b. Finnairin laivasto. Saatavilla: <https://www.finnair.com/fi-fi/tietoa-lennoista/finnairin-laivasto> (luettu 17.3.2022)

Fintraffic, 2021a. AD 1.3 Luettelo lentopaikoista ja helikopterilentopaikoista.

Saatavilla: https://www.ais.fi/ais/aip/ad/EF_AD_1_3_EN.pdf (luettu 24.4.2022)

Fintraffic, 2021b. AD 3.1 Helikopterilentopaikkoja koskevat tiedot. Saatavilla:

https://www.ais.fi/ais/aip/ad/EF_AD_3_1_EN.pdf (luettu 6.5.2022)

Fintraffic, 2022. Lennonvarmistuspalveluita koskevat yleiset palveluehdot 2022.

Forslund, A., 2020. FAIR Webinar Heart Aerospace on the Technical Development of Electric Aviation. Saatavilla:

<https://www.youtube.com/watch?v=IJLN7ZAv4As&t=1853s> (katsottu 18.3.2022)

Hak, M. & Driessen, C., 2021. Roadmap – Electric flight in the Kingdom of the Netherlands. Saatavilla:

<https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/luchtvaart/documenten/rapporten/2022/02/18/bijlage-2-roadmap-electric-flight-naco-nlr-report> (luettu 27.5.2022)

Heart Aerospace, 2022. Heart Aerospace - FAQ ja sähköpostihaastattelu 31.5.2022. FAQ saatavilla: <https://heartaerospace.com/faq/> (luettu 22.3.2022)

Helsingin sähkölentokoneyhdistys, 2022. Helsingin sähkölentokoneyhdistys. Saatavilla: <https://sahkolentokone.fi/> (luettu 23.3.2022)

Huoltovarmuuskeskus, 2022. Lentokuljetusten merkitys Suomen huoltovarmuudelle.

Hussain, A., 2021. The eVTOL Air Taxi Startup Handbook.

ICAO, 2017. Airline Operating Costs and Productivity.

IEEE Spectrum, 2022. These Superabsorbent Batteries Charge Faster the Larger They Get. Saatavilla: <https://spectrum.ieee.org/quantum-battery> (luettu 31.3.2022)

Ilmatieteen laitos, 2021. Ilmakehän kerrokset. Saatavilla:

<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-ja-saailmiot> (luettu 6.5.2022)

Joby Aviation, 2022. Jobyaviation. Saatavilla: <https://www.jobyaviation.com/> (luettu 1.4.2022)

Kakriainen, E., 2021. Sähköpoltoaineet verrattuna sähkön suoraan liikennekäyttöön. Kandidaatintyö, Tampereen yliopisto, Teknis-luonnontieteellinen tiedekunta.

Kriittiset materiaalit, 2022. Koboltti. Saatavilla:

<https://www.kriittisetmateriaalit.fi/koboltti%E2%80%8B/> (luettu 21.3.2022)

Lentoposti, 2019. Porin kaupunki tukee lentoja Helsinki-Vantaalle vuosittain 3,4 miljoonalla eurolla. Saatavilla:

https://www.lentoposti.fi/uutiset/porin_kaupunki_tukee_lentoja_helsinki_vantaalle_vuosittain_34_miljoonalla_eurolla (luettu 6.5.2022)

Liikennevirasto, 2018. Henkilöliikennetutkimus 2016: Suomalaisten liikkuminen.

Liikenneviraston tilastoja 1/2018. Saatavilla:

https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lti_2018-01_henkiloliikennetutkimus_2016_web.pdf (luettu 27.5.2022)

LIPASTO & Tilastokeskus, 2021. LIPASTO-laskentajärjestelmä ja Tilastokeskuksen kasvihuonekaasujen inventaario.

LME, 2022. LME Nickel. Saatavilla: <https://www.lme.com/Metals/Non-ferrous/LME-Nickel#Price+graphs> (luettu 21.3.2022)

Loganair, 2022a. GreenSkies. Saatavilla: <https://www.loganair.co.uk/people-planet/greenskies/> (luettu 17.3.2022)

Loganair, 2022b. Orkney Inter-Island Service. Saatavilla:

<https://www.loganair.co.uk/fares/orkney-inter-island/> (luettu 17.3.2022)

LVM, 2022. Liikenneturvallisuusstrategia 2022-2026, Helsinki: Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2022:3. (luettu 20.4.2022)

Matkahuolto, 2022. Nettilippu, Kittilä - Rovaniemi. Muuttuva sivusto. Saatavilla: <https://liput.matkahuolto.fi/connectionlist?lang=fi&departurePlaceId=s4145&arrivalPlaceId=p472#breadcrumb> (luettu 6.5.2022)

McDermott, H., 2021. The Impact Of The Pandemic On Travel To Finland. Tourism Economics.

Merenkurkun neuvosto, 2022. The 9th FAIR competence webinar on the topic of Electric Aviation as a booster in the Kvarken Region. Saatavilla: <https://www.youtube.com/watch?v=MUFwbfKopkI&t> (katsottu 25.3.2022)

Neste, 2021. Neste Press Release. Saatavilla: <https://www.neste.com/releases-and-news/aviation/aviation-leaders-launch-first-flight-100-sustainable-aviation-fuel-emissions-study-commercial> (luettu 29.4.2022)

Niemistö, J., Soimakallio, S., Nissinen, A. & Salo, M., 2019. Lentomatkustuksen päästöt - Mistä lentoliikenteen päästöt syntyvät ja miten niitä voidaan vähentää? Suomen ympäristökeskuksen raportteja 2 | 2019. Saatavilla: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/292417/SYKEra_2_2019.pdf (luettu 17.3.2022)

Northvolt, 2022. Northvolt Revolt. Saatavilla: <https://northvolt.com/products/revolt/> (luettu 21.3.2022)

OpenStreetMap, 2022. OpenStreetMap, karttanäkymä Aruban, Bonairen ja Curaçaon alueelle. Saatavilla: <https://www.openstreetmap.org/#map=9/11.7894/-69.3347> (katsottu 6.4.2022)

Orkney.com, 2021. Electricity in the air above Orkney. Saatavilla: <https://www.orkney.com/news/ampaire> (luettu 17.3.2022)

Pajarre, M., Huhta, R., Mäntynen, J. & Rantala, J., 2021. Väestö tieverkon varassa -tarkastelu. Saatavilla: https://www.tieyhdistys.fi/site/assets/files/1727/vaesto_tieverkon_varassa_2021-09_006.pdf (luettu 31.3.2022)

Quach, J. ym., 2022. Superabsorption in an organic microcavity: Toward a quantum battery. Science Advances, 8(2). (luettu 31.3.2022)

Rantala, J., Huhta, R., Somerkero, S. & Klemetilä, E. S. E., 2021. BRTL Case studies, s.l.: Kainuun liitto. (luettu 22.4.2022)

Redstone AERO, 2022. Digital Airport Concept. Pyhtää. (luettu 2.5.2022)

ReFuelEU Aviation, 2021. Proposal of Regulation of the European Parliament and the Council on ensuring a level playing field for sustainable air transport. European Commission.

Reimers, J. O., 2018. Introduction of electric aviation in Norway. Green Future AS.

Reimers, J. O., 2020. Electric aviation in Norway. Start Norge AS.

Rolls-Royce, 2021. Rolls-Royce and Tecnam join forces with Widerøe to deliver an all-electric passenger aircraft ready for service in 2026. Saatavilla: <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2021/11-03-2021-rr-and-tecnam-join-forces.aspx> (luettu 21.3.2022)

- SAE, 2022. AIR7357 - MegaWatt and Extreme Fast Charging for Aircraft. Saatavilla: <https://www.sae.org/works/documentHome.do?docID=AIR7357&inputPage=wIpSdOcDeTaIS&comtID=TEAAE7D> (luettu 22.3.2022)
- Sanchdeva, N. & Lammen, W., 2021. Electric aircraft offer many advantages, but can they ever compete on cost?. Saatavilla: <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Investigating-the-commercial-potential-of-battery-electric-aviation.html> (luettu 25.3.2022)
- Shahwan, K., 2021. Operating Costs Analysis of Electric Aircraft on Regional Routes. Linköpings universitet, Department of Science and Technology.
- Smedberg, A., Norberg, I. & Oja, S., 2021a. FAIR Electric Aviation 2021 - Technology Overview. BioFuel Region.
- Smedberg, A., Nordberg, I. & Oja, S., 2021b. Electric Aircraft - Battery, Hybrid and Fuel Cell. FAIR.
- Stadlbauer, H., 2018. An aeromodelling pioneer paved the way - Manned aeroplanes with electric propulsion are taking off. CIAMFlyer 2/2018. Saatavilla: https://www.fai.org/sites/default/files/documents/ciam_flyer_02-2018_print.pdf (luettu 1.4.2022)
- Tekniikka & Talous, 2022. Sähköinen ilmailu lähestyy vauhdilla. Julkaisu 18.3.2022, s. 5.
- The Engineer, 2021. 2ZERO project to show feasibility of regional electric aviation. Saatavilla: <https://www.theengineer.co.uk/2zero-ampaire-south-west/> (luettu 17.3.2022)
- Tilastokeskus, 2022. Yöpymisen sisältäneet kotimaanmatkat kuukausittain. Saatavilla: https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_lii_smat/statfin_smat_pxxt_133j.px/table/tableViewLayout1/ (luettu 12.4.2022)
- Traficom Droneinfo, 2021. Missä ei saa lennättää? Saatavilla: <https://www.droneinfo.fi/fi/missa-ei-saa-lennattaa> (luettu 27.4.2022)
- Traficom Liikennefakta, 2022. Onnettomuudet ja vakavat vaaratilanteet Suomessa tai suomalaisessa ilmailussa vuodesta 2005 alkaen. Saatavilla: <https://liikennefakta.fi/fi/turvallisuus/ilmailu/onnettomuudet-ja-vakavat-vaaratilanteet-suomessa-tai-suomalaisessa-ilmailussa> (luettu 27.4.2022)
- Traficom, 2019. OPS M1-6: Mittarilentotoiminta ilman lennonjohto- tai AFIS-palvelua. Saatavilla: <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/uusi-maarays-ops-m1-6-mittarilentotoiminta-ilman-lennonjohto-tai-afis-palvelua> (luettu 4.5.2022)
- Traficom, 2020. Lentoliikenteen julkisen palveluvelvoitteen oikeatasoisuuden arviointi.
- Traficom, 2021a. Ilmailumääräyskokoelma. Saatavilla: <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/ilmailu/ilmailumaarayskokoelma> (luettu 17.3.2022)
- Traficom, 2021b. Lentokenttäverkosto. Selvitys olemassa olevan lentokenttäverkoston palvelutarjonnasta (Yleis- ja harrasteilmailu).
- Traficom, 2021c. EASAn lausuntopyyntö: "New air mobility - Continuing airworthiness (CAW) rules for electric and hybrid propulsion aircraft and other non-conventional aircraft". Saatavilla:

<https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/easan-lausuntopyynto-new-air-mobility-continuing-airworthiness-caw-rules-electric-and> (luettu 6.4.2022)

Traficom, 2022a. CORSIA - kansainvälisen lentoliikenteen päästöjärjestelmä. Saatavilla: <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/ilmailu/corsia> (luettu 20.5.2022)

Traficom, 2022b. Määräys AGA M1-1. Lentokoneille tarkoitettujen maa-alueilla sijaitsevien valvomattomien lentopaikkojen rakentaminen, pitäminen, palvelut ja varustus. Saatavilla: https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/regulation/Maarays%20AGA%20M1-1%202022_final.pdf (luettu 4.5.2022)

Traficom, 2022c. Haastattelu, 26.4.2022.

Trafikanalys, 2020. Elflyg - början på en spännande resa - redovisning av ett regeringsuppdrag. Rapport 2020:12. Saatavilla: https://www.trafa.se/globalassets/rapporter/2020/rapport-2020_12-elflyg_borjan-pa-en-spannande-resa.pdf (luettu 15.3.2022)

Trafikverket, 2020a. Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 7.0. Saatavilla: https://bransch.trafikverket.se/contentassets/4b1c1005597d47bda386d81dd3444b24/asek-2021/asek-7_0-hela-rapporten-210601.pdf (luettu 7.4.2022)

Trafikverket, 2020b. Upphandling av fossilfritt flyg – En förstudie om möjligheten att avtala. Saatavilla: <https://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1509692/FULLTEXT01.pdf> (luettu 18.3.2022)

Trainelli, L., Salucci, F., Riboldi, C. E. D., Rolando, A., Bigoni, F., 2021. Optimal Sizing and Operation of Airport Infrastructures in Support of Electric-Powered Aviation. Aerospace, vuosikerta 8, s. 29.

Transportstyrelsen, 2021. Transportstyrelsens föreskrifter om luftfartsskydd. Saatavilla: https://transportstyrelsen.se/TSFS/TSFS%202020_80k.pdf (luettu 22.4.2022)

Ulkoministerön Eurooppatiedotus, 2020. Mikä EU:n Green Deal? Saatavilla: <https://eurooppatiedotus.fi/2020/03/04/mika-eun-green-deal/> (luettu 27.5.2022)

Valtioneuvosto, 2021a. Valtakunnallinen liikennejärjestelmäsuunnitelma vuosille 2021-2032. Valtioneuvoston julkaisuja 2021:75.

Valtioneuvosto, 2021b. Fossiilittoman liikenteen tiekartta : Valtioneuvoston periaatepäätös kotimaan liikenteen kasvihuonepäästöjen vähentämisestä. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2021:15.

Valtioneuvosto, 2021c. Valtioneuvoston periaatepäätös lentoliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisestä. LVM/2021/64.

Visit Finland, 2019. Matkailun suuralueet - Lappi 2018. Saatavilla: <https://www.businessfinland.fi/4a5da5/contentassets/90af5fe5760a48db9ece6438ae8bed70/matkailun-suuralueet---lappi-2018.pdf> (luettu 11.5.2022)

Widerøe, 2021. Embraer's Eve and Widerøe Zero collaborate to develop innovative Air Mobility solutions in Scandinavia. Saatavilla: <https://www.wideroe.no/en/about-wideroe/media> (luettu 21.3.2022)

Widerøe, 2022. Route map. Saatavilla: <https://www.wideroe.no/en/destinations/route-map> (luettu 21.3.2022)

Ydersbond, I., Kristensen, N. & Thune-Larsen, H., 2020. Nordic Sustainable Aviation. Saatavilla: <https://pub.norden.org/temanord2020-536/temanord2020-536.pdf> (luettu 6.4.2022)

Yle, 2010. Finncomm lopettaa lennot Poriin. Saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-6162808> (luettu 12.5.2022)

Yle, 2021. Bisnesmatkustaminen ei koskaan palaa ennalleen, sanovat suuryritykset – etänä hoidetaan nyt jopa huoltoja, laitetestejä ja asennuksia. Saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-12118303> (luettu 14.3.2022)

Yle, 2022a. Tässä ovat ensimmäiset sähkölentokoneilla lennettävät reitit Suomessa – Lapissa lääkärimatka voi kutistua neljästä tunnista puoleen tuntiin. Saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-12299523> (luettu 12.5.2022)

Yle, 2022b. Yhteys Ruotsiin vahvistuu – Kokkola-Pietarsaaren kentältä lennetään pian Skellefteån kentälle. Saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-12375412> (luettu 12.5.2022)

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom

PL 320, 00059 TRAFICOM
p. 029 534 5000

traficom.fi

ISBN 978-952-311-804-1
ISSN 2669-8757 (verkkajulkaisu)

TRAFICOM
Liikenne- ja viestintävirasto