

Vetylentämisen selvitys

Vedyn käyttömahdollisuudet energialähteenä ilmailussa ja vetylentämisen rooli liikennejärjestelmässä

Riku Huhta
Antti Heininen
Jorma Mäntynen
Markus Pajarre

Julkaisun nimi Vetylentämisen selvitys Vedyn käyttömahdollisuudet energialähteenä ilmailussa ja vetylentämisen rooli liikennejärjestelmässä			
Tekijät Riku Huhta, Antti Heininen, Jorma Mäntynen, Markus Pajarre			
Toimeksiantaja ja asettamispäivämäärä Liikenne- ja viestintävirasto Traficom			
Julkaisusarjan nimi ja numero Traficomın tutkimuksia ja selvityksiä 2/2023		ISSN(verkkajulkaisu) 2669-8781 ISBN(verkkajulkaisu) 978-952-311-839-3	
Asiasanat Vetylentäminen, vety, vetylentokoneet, polttokenno, elektrolyysi, lentoliikenne, liikennejärjestelmä			
Tiivistelmä <p>Selvityksen tavoitteena on kartoittaa vedyn käyttömahdollisuudet energialähteenä ilmailussa ja vetylentämisen rooli liikennejärjestelmässä. Vetyä tarkastellaan käyttövoiman, kaluston, regulaation ja infrastruktuurin näkökulmista. Globaaliin lentoliikenteeseen kohdistuu merkittäviä päästövähennystavoitteita. Keskeisiä alan ilmastotoimia ovat globaalisti CORSIA-järjestelmän käyttö ja EU:ssa EU:n päästökauppa sekä ReFuelEU Aviation-aloite. Lentoala on haasteen edessä, mikä vaatii aktiivista toimintaa. Vety ja siitä jalostetut synteettiset polttoaineet nähdään potentiaalisimpana keinona vähentää lentämisen ilmastovaikutusta.</p> <p>Vetyä voidaan käyttää polttokennoissa tai modifioituissa polttomoottoreissa. Kehitteillä on myös hybriditeknologiaa, joka hyödyntäisi sekä polttokennoja että vetypolttomoottoreita. Vedystä voidaan jalostaa synteettistä polttoainetta, jota voidaan polttaa nykyisenkaltaisissa polttomoottoreissa ja sekoittaa fossiilisen lentopolttoaineen joukkoon. Vety vaatii uudenlaiset polttoainesäiliöt, kun taas synteettisille polttoaineille sopivat nykyisen kaltaiset polttoainesäiliöt. Vetyssä suurempi koko ja paino rajoittavat vetykäyttöisen lentokoneiden toimintamatkaa. Synteettiset polttoaineet voidaan ottaa kaupallisen lentoliikenteen käyttöön vetyä nopeammin.</p> <p>Vetylentäminen vaatii toteutuakseen merkittävää kehitystä monissa vetytalouden rakenteissa: uusiutuvan sähkön ja vedyn tuotannossa, vedyn varastoinnissa, kuljetuksessa sekä tankkausteknologioissa. Myös vetykaluston kehitys vaatii huomattavia tuotekehityspanoksia. Kehittelyssä oleva lentämisen vetykalusto painottuu tällä hetkellä polttokennoihin, polttomoottoreihin ja nestemäiseen vetyyn. Vetykaluston kehitystyötä tekevät erityisesti startup-yritykset, mutta mukana on myös tunnettuja toimijoita, kuten Airbus ja NASA. Polttokennokalusto soveltuu lyhyemmille lentomatkaille, sillä kantamaa rajoittavat polttokennojen ja niiden jäähdytysjärjestelmien paino. Hybridi- ja polttomoottorilentokoneilla voidaan lentää merkittävästi pidempiä matkoja. Vetylentokoneille spesifi regulaatio on vasta kehitteillä.</p> <p>Vetylentokoneet kehittyvät asteittain kapasiteetin ja kantaman kasvaessa. Suurin harppaus vetylentämisessä tapahtuu 2030-luvun loppupuolella ja 2040-luvulla. Sitä ennen tarvitaan paljon tuotekehitystä. Alkuvaiheessa vedyn korkeat tuotantokustannukset sekä vetyinfran investointikustannukset hidastavat kaluston yleistymistä. Hiilidioksidipäästöjen hinnoittelu taas on tekijä, mikä voi nopeuttaa vetykaluston markkinoille tuloa.</p> <p>Suomella on hyvät edellytykset luoda pitkällä tähtäimellä osin vetyyn perustuva lentoliikennejärjestelmä. Merkittävät panostukset tuulivoimaan, vetytalouteen sekä sähköä avulla tuotettaviin polttoaineisiin luovat tärkeää pohjaa vetytutkimukselle. Vedyn ja sähköistymisen yleistymisen myötä Suomessa voi syntyä uudentyyppistä ilmaliikennettä. Lentoasemilla kehitys vaatii investointeja vetyinfrastruktuuriin. Silti, vedyn sekä synteettisten polttoaineiden hinta tulee olemaan vielä pitkään nykyisiä vaihtoehtoja korkeampi, mikä on haaste teknologian nopealle skaalautumiselle.</p>			
Yhteyshenkilö Jari Pöntinen	Raportin kieli Suomi	Luottamuksellisuus Julkinen	Kokonaissivumäärä 51
Jakaja		Kustantaja Liikenne- ja viestintävirasto Traficom	

Publikation Utredning om väteflyg Möjligheterna att använda väte i luftfart och väteflygets roll i transportsystemet			
Författare Riku Huhta, Antti Heininen, Jorma Mäntynen, Markus Pajarre			
Tillsatt av och datum Transport- och kommunikationsverket Traficom			
Publikationsseriens namn och nummer Traficoms forskningsrapporter och utredningar 4/2023		ISSN (webbpublikation) 2669-8781 ISBN (webbpublikation) 978-952-311-841-6	
Ämnesord Väteflyg, väte, väteflygplan, bränslecell, elektrolys, lufttrafik, transportsystem			
Sammandrag <p>Utredningens mål är att kartlägga möjligheterna att använda väte i luftfart och väteflygets roll i transportsystemet. Väte granskas ur drivkraftens, materielens, regleringens och infrastrukturens perspektiv. Den globala flygtrafiken är föremål för betydande utsläppsminskning. Till de centrala klimatåtgärderna inom branschen på global nivå hör användning av CORSIA-systemet, och inom EU används EU:s utsläppshandel och initiativet ReFuelEU Aviation. Flygbranschen står inför en utmaning som kräver aktiva åtgärder. Väte och syntetiska bränslen som förädlats från det ses som den metod för att minska flygandets klimateffekter som har störst potential.</p> <p>Väte kan användas i bränsleceller eller modifierade förbränningsmotorer. En hybridteknik som använder både bränsleceller och väteförbränningsmotorer är också under utveckling. Av väte kan man förädla fram syntetiska bränslen, som kan förbrännas i de förbränningsmotorer som redan finns och blandas med fossila flygbränslen. Väte kräver nya typer av bränsletankar, medan de bränsletankar som redan finns lämpar sig för syntetiska bränslen. Vätetankarnas större storlek och vikt begränsar de vätedrivna flygplanens räckvidd. Syntetiska bränslen kan tas i bruk inom den kommersiella flygtrafiken snabbare än väte.</p> <p>För att kunna förverkligas kräver väteflyget omfattande utveckling i många strukturer inom väteekonomin: produktionen av förnybar elektricitet och förnybart väte, förvaringen och transporten av väte samt tekniken för tankning. Även utvecklingen av vätemateriel kräver betydande satsningar på produktutveckling. Den väteflygmateriel som är under utveckling fokuserar för närvarande på bränsleceller, förbränningsmotorer och flytande väte. Utvecklingsarbete kring vätemateriel bedrivs i synnerhet av startupföretag, men även kända aktörer såsom Airbus och NASA deltar. Materiel med bränsleceller lämpar sig för kortare flygresor, eftersom bränslecellernas och deras kylsystems vikt begränsar räckvidden. Flygplan med hybrid- och förbränningsmotorer kan flyga betydligt längre sträckor. Specifik reglering för väteflyg är ännu under utveckling.</p> <p>Väteflygplanen utvecklas undan för undan då deras kapacitet och räckvidd ökar. Det största språnget inom väteflyget torde ske i slutet av 2030-talet och på 2040-talet. Före det krävs mycket produktutveckling. I början bromsas möjligheterna för materielen att vinna terräng av de höga produktionskostnaderna för väte och kostnaderna för investeringar i väteinfrastrukturen. Prissättningen av koldioxidutsläpp är för sin del en faktor som kan påskynda lanseringen av vätemateriel på marknaden.</p> <p>Finland har goda förutsättningar att på lång sikt skapa ett lufttrafiksystem som delvis baserar sig på väte. Betydande satsningar på vindkraft, väteekonomi och bränslen som produceras med hjälp av elektricitet skapar en viktig grund för ett vätebaserat energisystem. När väte och elektrifiering blir vanligare kan en ny typ av flygtrafik uppstå även i Finland. På flygplatserna kräver utvecklingen investeringar i väteinfrastrukturen. Priset för väte och syntetiska bränslen kommer under en lång tid framöver ändå att vara högre än för de befintliga alternativen, vilket utgör en utmaning för en snabb uppskalning av tekniken.</p>			
Kontaktperson Jari Pöntinen	Språk finska	Sekretessgrad Offentlig	Sidoantal 51
Distribution		Förlag Transport- och kommunikationsverket Traficom	

Title of publication Report on hydrogen-powered aviation - Potential uses of hydrogen as an energy source in aviation and the role of hydrogen-powered aviation in the transport system			
Author(s) Riku Huhta, Antti Heininen, Jorma Mäntynen, Markus Pajarre			
Commissioned by, date Finnish Transport and Communications Agency Traficom			
Publication series and number Traficom Research Reports 3/2023		ISSN (online) 2669-8781 ISBN (online) 978-952-311-840-9	
Keywords Hydrogen-powered aviation, hydrogen, hydrogen-powered aircraft, fuel cell, electrolysis, air transport, transport system			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this study was to map the potential uses of hydrogen as an energy source in aviation and the role of hydrogen-powered aviation in the transport system. To this end, the report examines hydrogen from the perspectives of propulsion, aircraft, regulation and infrastructure. Global air transport services are subject to significant emissions reduction targets. The sector's key climate actions include, at the global level, the use of the CORSIA system and, at the EU level, the EU's emissions trading and the ReFuelEU Aviation initiative. As a result, the aviation sector faces a challenge that requires active measures. Hydrogen and synthetic fuels refined from hydrogen are seen as the most potential way of reducing the climate impact of aviation.</p> <p>Hydrogen can be used in fuel cells or modified combustion engines. There are also hybrid technologies being developed that utilise both fuel cells and hydrogen combustion engines. Hydrogen can also be refined into synthetic fuels that can be used in contemporary combustion engines and mixed in with fossil aviation fuels. Hydrogen requires new types of fuel tanks, whereas synthetic fuels can be stored in contemporary fuel tanks. Hydrogen fuel tanks are larger and heavier than contemporary fuel tanks, limiting the range of hydrogen-powered aircraft. Synthetic fuels can be adopted in commercial aviation faster than hydrogen.</p> <p>The realisation of hydrogen-powered aviation requires advancements in many areas of the hydrogen economy: the production of renewable electricity and hydrogen, the storage and transport of hydrogen, and hydrogen refueling technologies. The development of hydrogen-powered aircraft also requires significant R&D investments. The hydrogen-powered aircraft currently under development focus on fuel cells, combustion engines and liquid hydrogen. The development of hydrogen-powered aircraft is being carried out especially by startups, but there are also well-known operators involved, such as Airbus and NASA. Fuel cell aircraft are suitable for shorter flights, as their range is limited by the weight of fuel cells and their cooling systems. Hybrid and combustion engine aircraft can fly significantly longer distances. Regulation specific to hydrogen-powered aircraft is still being developed.</p> <p>Hydrogen-powered aircraft are developing gradually as their capacity and range continue to grow. The greatest leap in hydrogen-powered aviation is expected to take place in the late 2030s and in the 2040s. However, a great deal of product development is required before this leap can occur. In the early stage, the proliferation of hydrogen-powered aircraft will be slowed down by high production costs and hydrogen infrastructure investment costs. On the other hand, the pricing of carbon dioxide emissions is a factor that may speed up the market uptake of hydrogen-powered aircraft.</p> <p>Finland is well-equipped to create a partly hydrogen-based air transport system over the long term. Significant investments in wind power, the hydrogen economy and fuels produced with the help of electricity are creating the necessary foundation for a hydrogen-powered energy system. Hydrogen and increasing electrification may result in the creation of new types of air traffic in Finland. At airports, this development will require investments in hydrogen infrastructure. Still, the prices of hydrogen and synthetic fuels will remain higher than those of contemporary alternatives for a long time yet, posing a challenge for the rapid scaling of hydrogen technologies.</p>			
Contact person Jari Pöntinen	Language finnish	Confidence status Public	Pages, total 51
Distributed by		Published by Finnish Transport and Communications Agency Traficom	

ALKUSANAT

Tämän selvityksen tavoitteena oli kartoittaa vedyn käyttömahdollisuudet energialähteenä ilmailussa ja vetylentämisen rooli liikennejärjestelmässä. Tarkastelua tehtiin käyttövoiman, kaluston, regulaation ja infrastruktuurin näkökulmista.

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

Helsinki, 6. helmikuuta 2023

Jarno Ilme
Verkostojohtaja
Liikenne- ja viestintävirasto Traficom

Sisällysluettelo

1	Selvityksen taustat ja sisältö	6
1.1	Tutkimuksen tavoite.....	6
1.2	Tutkimuksen rajaus ja menetelmät	6
2	Vety ja lentoliikenne.....	7
2.1	Vety käyttövoimana lentoliikenteessä	7
2.1.1	Vedyn ilmailukäytön toimintaperiaatteen kuvaus.....	7
2.1.2	Vedyn ominaisuuksia käyttövoimana	9
2.1.3	Vedyn ja synteettisten polttoaineiden päästöt.....	9
2.1.4	Vaihtoehtojen hyötysuhteet.....	11
2.2	Lentoala murroksen edessä.....	13
2.2.1	Taustaa vetylentämislle.....	13
2.2.2	Lentoliikenteen päästövähennystavoitteet	14
3	Vetylentämisen infrastruktuuri, kalusto ja regulaatio	16
3.1	Vetyinfrastruktuuri.....	16
3.1.1	Vetytalouden kehityksen tila Suomessa	16
3.1.2	Vetylogistiikka ja lentoasemat	18
3.1.3	Vedyn tankkaus ja turvallisuus	20
3.1.4	Vetyinfrastruktuurin kustannukset.....	21
3.2	Kalusto.....	22
3.2.1	Vetykaluston tilannekuva	22
3.2.2	Polttokennokalusto.....	24
3.2.3	Vetypolttomoottorikalusto	24
3.2.4	Hybridikalusto	25
3.2.5	Vetytankit	28
3.2.6	Kaluston tankkaus.....	29
3.2.7	Vedyn ja synteettisten polttoaineiden kustannukset	30
3.3	Regulaatio	31
3.4	Koontitaulukko tarkasteltavista käyttövoimista	34
4	Vetylentämisen rooli ja käyttöönotto Suomessa.....	35
4.1	Vetylentämisen rooli Suomen liikennejärjestelmässä	35
4.1.1	Johdanto.....	35
4.1.2	Arvio vetylentämisen kehityksen aikajänteestä	37
4.1.3	2025–2030	37
4.1.4	2030–2035	38
4.1.5	2035–2040	38
4.1.6	2040–2045	38
4.1.7	2045–2050	40
4.2	Vety Suomen lentoasemilla	42
4.3	Vetylentämisen kehittäminen Suomessa	45
4.4	Vetylentämisen SWOT Suomessa.....	46
4.5	Johtopäätökset ja epävarmuudet	47
4.5.1	Kaluston teknologian kehitys	47
4.5.2	Kaluston sertifiointi	47
4.5.3	Kaluston ilmastovaikutukset.....	48
4.5.4	Vetylentämisen infrastruktuuri	48
4.5.5	Muita epävarmuuksia ja yllättäviä kehityskulkuja	48
5	Lähdeluettelo.....	50

1 Selvityksen taustat ja sisältö

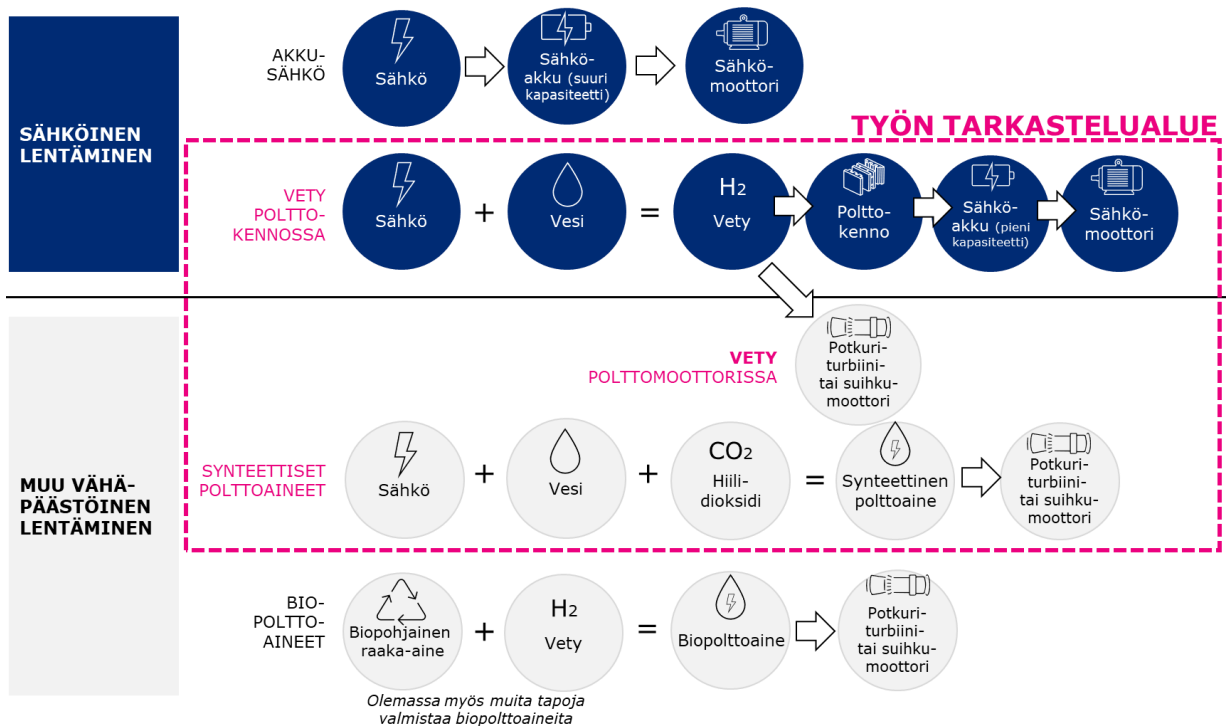
1.1 Tutkimuksen tavoite

Selvityksen tavoitteena on kartoittaa vedyn käyttömahdollisuudet energialähteenä ilmailussa ja vetylentämisen rooli liikennejärjestelmässä. Työssä tarkastellaan vedyn mahdollisuuksia ja haasteita sekä arvioidaan, millä aikataululla ja millä edellytyksin vety voidaan saada Suomessa lentoliikenteen käyttöön. Työn aikajänne ulottuu vuoteen 2050 asti.

1.2 Tutkimuksen rajaus ja menetelmät

Työssä tarkastellaan erityisesti vihreää vetyä tulevaisuuden lentoliikenteen käyttövoimana. Vihreä vety on ns. uusiutuvaa vetyä, joka valmistetaan sähkön avulla vedestä elektrolyysissä. Valmistusprosessissa syntyy vetyä, happea ja ylijäämälämpöä.

Tarkastelua tehdään laajasti, mutta sovelluskohteissa painotutaan Suomeen ja Suomen mahdollisuuksiin. Vetyä käsitellään energialähteenä ilmailussa käyttövoiman, kaluston, regulaation ja infrastruktuurin näkökulmista. Tarkastelussa ovat vedyn käyttö polttomoottorissa ja polttokennossa sekä vedystä jatkojalostettavat synteettiset polttoaineet. Käyttövoimien rajaus on esitetty kuvassa 1. Työ on toteutettu asiantuntijatyönä.



Kuva 1. Työn tarkastelualue.

2 Vety ja lentoliikenne

2.1 Vety käyttövoimana lentoliikenteessä

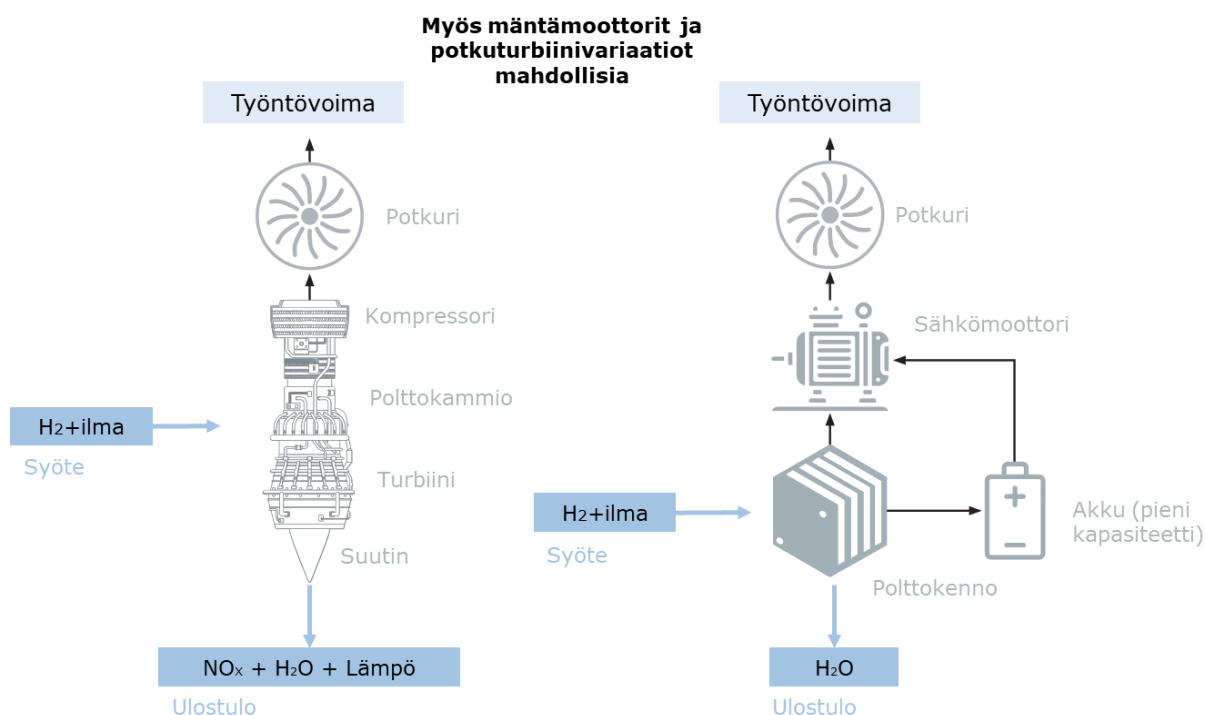
LUVUN 2.1 KESKEINEN SISÄLTÖ

- ▶ Vety soveltuu lentoliikenteen käyttövoimaksi neljällä eri tekniikalla.
- ▶ Vetyä voidaan käyttää polttoaineena joko kaasuna tai nesteinä, mutta vetyä on aina prosessoitava, sillä sitä ei esiinny sellaisenaan missään olosuhteissa.
- ▶ Vedyn ilmastovaikutuksen vähentämispotentiaali on merkittävä. Vedyn avulla ei voida kuitenkaan operoida täysin päästöttömästi, sillä vedystä muodostuu muun muassa typen oksideja sekä vesihöyryä.
- ▶ Vedyn kokonaishyötysuhteet primäärienergiasta työntövoimaksi vaihtelevat erilaisissa tekniikoissa 10–29 % välillä.

2.1.1 Vedyn ilmailukäytön toimintaperiaatteen kuvaus

Nykytilanteessa on tunnistettu, että vetyä voidaan käyttää käyttövoimana lentoliikenteessä neljällä eri tavalla. Erilaiset käyttötavat ovat:

- vedyn käyttö polttokennossa ja edelleen sähköenergiana sähkömoottorissa
- vedyn poltto polttomoottorissa
- hybridiratkaisu, jossa hyödynnetään vetyä sekä polttokennossa että polttomoottorissa
- vedyn jalostaminen synteettiseksi lentopolttoaineeksi ja käyttö polttomoottorissa



Kuva 2. Vetykäyttöiset voimalinjat. Myös polttomoottorin, polttokennon ja sähkömoottorin hybridikäyttö on mahdollista. Suomennettu lähteestä (Roland Berger, 2020)

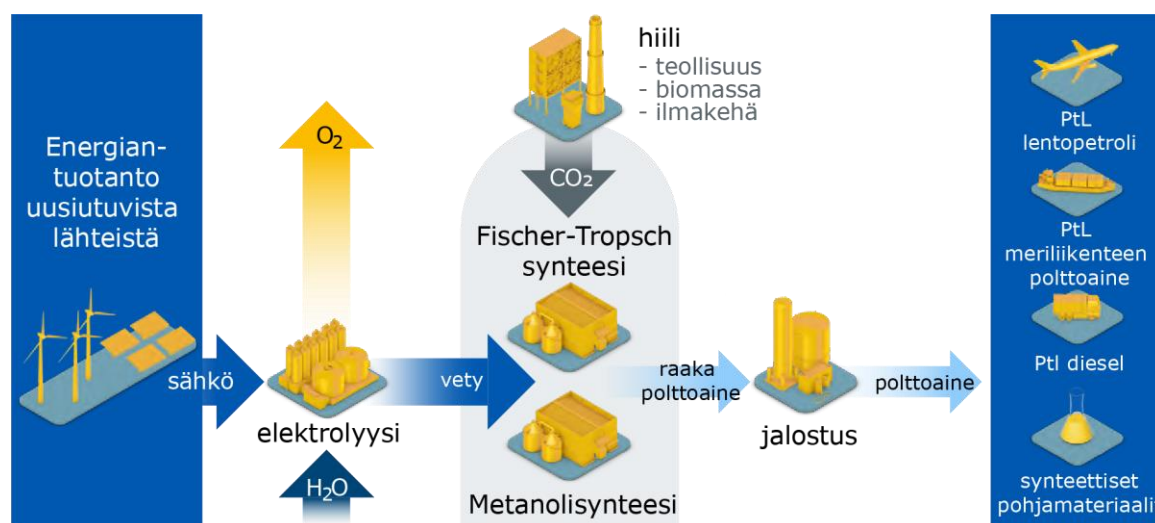
Vedyn käytössä polttokennossa polttokenno muuttaa vedyn ja hapen ilmasta sähköksi, jota käytetään edelleen potkureita pyörittävässä sähkömoottorissa. Airbus on 30.11.2022 julkaissut polttokennoperusteisen moottorin, jota se kaavailee osaksi vuoden 2035 vetylaivastonsa moottorivalikoimaa. Lentotestit moottorilla alkavat tämän vuosikymmenen puolivälissä (Airbus, 2022).

Toinen kehitteillä oleva tapa on **polttaa vetyä polttomoottorissa**. Tällöin suuremmissa kalustoissa hyödynnetään modifioitua suihkuturbiinia, joka muuttaa vedyn ja ilman vedeksi, lämmöksi ja typen oksideiksi. Rolls-Royce on marraskuussa 2022 testannut vetykäyttöiseksi muunnettua lentokoneen moottoria, oman arviionsa mukaan ensimmäisenä moottorivalmistajana maailmassa (Rolls-Royce, 2022). Koekäytetty moottori on muunnettu alueelliseen lentoliikenteeseen tarkoitettua potkuriturbiinimoottorista (tyyppi Rolls-Royce AE 2100-A).

Kehitteillä on myös **hybridijärjestelmiä**, jossa hyödynnettäisiin vetyä sekä polttomoottorissa että polttokennossa. Tällöin polttomoottoria hyödynnettäisiin esim. nousujen aikana ja polttokennoa sekä siihen kytkettyä sähkömoottoria muulloin.

Vety voidaan jalostaa **synteettiseksi lentopolttoaineiksi**, jotka ovat yksi muoto kestävästä lentopolttoaineesta (engl. Sustainable Aviation Fuels, SAF). Kestäviksi lentopolttoaineiksi luokitellaan myös biopohjaiset toisen sukupolven lentopolttoaineet. Tässä työssä käsitellään vain ei-biopohjaisia, synteettisiä polttoaineita. Niiden valmistusprosessissa vedestä ja sähköstä tehdään elektrolyysissä vetyä, mikä syntetisoidaan hiilidioksidin kanssa nestemäiseksi synteettiseksi ”raakaöljyksi” Fischer-Tropsch-reaktorissa tai metanolisynteetillä. Prosessin vaatima hiilidioksidi voidaan hankkia teollisuuden jätkekaasuista, biomassasta tai ottaa talteen suoraan ilmakehästä.

Prosessissa syntyvä synteettinen ”raakaöljy” voidaan jalostaa mm. synteettiseksi lentopolttoaineeksi. Nämä polttoaineet toimivat nykyisenkaltaisissa lentokone moottoreissa. Prosessissa syntyy myös muille liikennemuodoille soveltuvia polttoainelajeja. Synteettisille polttoaineille englanninkielisiä synonyymejä ovat mm. ”Renewable liquid transport Fuels of Non-Biological Origin (RFNBO), Electrofuels, e-Fuels ja Power-to-Liquid (PtL)”. (EASA, 2022a) **Synteettisten polttoaineiden CO₂-päästövähennyksen tulee olla vähintään 70 %.** (Euroopan unioni, 2018)



Kuva 3. Synteettisten polttoaineiden valmistusmenetelmä. Kuva suomennettu lähteestä (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2021)

Sertifioituihin kestäviin lentopolttoaineisiin sovelletaan nykytilassa 50 %:n maksimisekoitussuhdetta fossiiliseen lentopolttoaineeseen. Teollisuus- ja polttoainestandardikomiteat tarkastelevat kuitenkin 100 % kestäväen lentopolttoaineen käyttöä vuoteen 2030 mennessä. Jo nyt on tehty useita testilentoja 100 % kestäväällä lentopolttoaineella. Tällä hetkellä vain 0,05 % EU:n ilmailun lentopolttoaineista on kestäviä lentopolttoaineita. (EASA, 2022a)

2.1.2 Vedyn ominaisuuksia käyttövoimana

Vety on luonteeltaan erilainen polttoaine moniin muihin polttoaineisiin nähden, sillä sitä voidaan käyttää joko kaasuna tai nesteinä. Vety on aina prosessoitava, sillä vetyä ei tavata ympäristössä sellaisenaan missään olosuhteissa. Vihreää vetyä valmistetaan elektrolyysissä uusiutuvalla sähköllä, joka on tuotettu esimerkiksi tuulivoimalla. Teollisuus on hyödyntänyt jo vuosikymmenet harmaata vetyä.

Vedyn olomuoto on normaalioloissa ilmaa kevyempi. Kaasumaisella vedyllä on tyypillistä, että sen energiatiheys painoa kohden on merkittävän suuri. Vastavasti energiatiheys tilavuutta kohden on poikkeuksellisen heikko suhteessa muihin polttoaineisiin. Tätä voidaan kuitenkin parantaa paineistamalla tai nesteyttämällä vety, jolloin sen säilöminen, kuljettaminen ja hyödyntäminen helpottuu.

Vedyn energiaominaisuudet ovat parhaimmat nestemäisessä muodossa, johon vaaditaan $-252,9$ °C lämpötila. Nestemäisen vedyn suuri energiatiheys (33 kWh/kg) on noin kolminkertainen fossiiliseen lentopetroliin verrattuna. Vedyn vaatimat painavat ja suurikokoiset polttoainesäiliöt heikentävät kuitenkin tätä hyötyä. Tällä hetkellä alalla tutkitaan säiliöitä, jotka veisivät 30–65 % vedyn massan osuudesta. Tällöin tulevaisuuden varastoidun nestemäisen vedyn tiheys olisi 10–21 kWh/kg. **Nestemäinen vety on siis myös varastointi huomioon ottaen kilpailukykyinen perinteiselle lentopetrolille.** (Roland Berger, 2020)

Lentoliikenteessä painolla on poikkeuksellisen suuri merkitys. Vety voisikin saada ominaisuuksiensa vuoksi etua muihin polttoaineisiin nähden suurimmassa sallitussa lentoonlähtöpainossa, jonka mukaan mm. lentoasemamaksut määräytyvät.

Taulukko 1. Lentoliikenteen käyttövoimien energiatiheyksien vertailu. Sisältö osin lähteestä (Roland Berger, 2020)

	Energiatiheys painoon nähden (kWh/kg)	Energiatiheys tilavuuteen nähden (kWh/l)
Lentopetroli	12,0	10,4
Lentopetroli + polttoainesäiliöt	~8,9	~9,5
Nykyiset akut	~0,3	~0,8
Potentiaaliset tulevaisuuden akut	~1,0	?
Nestemäinen vety	~33	~2,4
Kaasumainen vety (700 bar)	~33	~1,3
Potentiaalinen tulevaisuuden nestemäinen vety + polttoainesäiliöt	~10–21	~1,6

2.1.3 Vedyn ja synteettisten polttoaineiden päästöt

Valtaosa lentoliikenteen päästöistä aiheutuu polttoaineen palamisprosessista lentämisen aikana. Palamisessa muodostuu hiilidioksidia (noin 70 % kokonaispääs-

töistä), vesihöyryä (noin 30 %) ja alle prosentin verran muita päästöjä, kuten typen oksideja, rikin oksideja, hiilivetyjä, häkää ja pienhiukkasia. Vesihöyry ja muut kuin CO₂-päästöt aiheuttavat korkealla ilmakehässä lennettäessä myös merkittävää ilmastovaikutusta. EASA:n tutkimusten mukaan näiden muiden lentämisen ilmastovaikutusten rooli on vähintäänkin yhtä suuri kuin CO₂-päästöillä. (Euroopan komissio, 2022)

EU-alueella lentäminen vastaa 3,8 %:sta kaikista CO₂-päästöistä. Lentämisen osuus liikenteen CO₂-päästöistä on 13,9 %, mikä tarkoittaa, että lentoliikenne on tieliikenteen jälkeen suurin kasvihuonekaasupäästöjen lähde EU-alueella. EU:n vihreän siirtymän ohjelman mukaisesti liikenteen päästöjä tulee vähentää 90 % vuoteen 2050 mennessä. Kun otetaan huomioon vielä lentämisen muut ilmastovaikutukset, sen osuus kaikesta ilmastovaikutuksesta kasvaa merkittävästi. Vedystä etsitään ratkaisua ilmastovaikutusten pienentämiseen.

Taulukko 2. Vertailu eri käyttövoimien ilmastovaikutuksista. (Clean Sky, 2020)

	Suorat CO ₂	NO _x	Vesihöyry	Tiivistymisvanat	Ilmastovaikutuksen vähentämispotentiaali
Synteettinen polttoaine polttomoottorissa	-0% -100% (netto)	-0%	-0%	-10-40%	-30-60%
Vety polttomoottorissa	-100%	-50-80%	+150%	-30-50%	-50-75%
Vety polttokennossa	-100%	-100 %	+150%	-60-80%	-75-90%
Sähköenergia sähkömoottorissa	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%

Vedyn polttamisen ilmastovaikutukset

Vedyn palaessa polttomoottorissa ei synny CO₂-, CO- ja SO_x-päästöjä. Myös noki-päästöjen määrä vähentyy merkittävästi. Vedyn palaessa syntyy kuitenkin NO_x- ja vesihöyrypäästöjä. NO_x-päästöihin liittyen on kehitteillä kaksi erilaista polttomoottoria, joilla sen tuotantoa hallittaisiin: Lean Direct Injection (LDI)-moottori tuottaisi saman verran NO_x-päästöjä kuin nykyiset lentokonemoottorit. Micro-Mix Combustor (MMC)-moottorit pystyisivät jopa vähentämään NO_x-päästöjä. (Roland Berger, 2020)

Vedyn käytössä suuri merkitys on vesihöyrypäästöjen vaikutuksilla. Vetyä poltettaessa syntyy vesihöyryä, joka edelleen muodostaa tiivistymisvanoja. Alalla on kiiivas keskustelu käynnissä, ovatko vaikutukset positiivisia vai negatiivisia lentopetrolin verrattuna. Yleinen käsitys on, että lentopetrolin palaessa syntyy nokea, joka toimii tiivistymisytimenä vesihöyrylle. Tämä johtaa pidempään kestäviin tiivistymisvanoihin ja cirruspilvien muodostumisen mahdollisuuteen. (Roland Berger, 2020)

Jos vetyä poltettaessa saadaan eliminoitua kaikki palamisen epäpuhtaudet, tätä tiivistymisvanojen muodostumisen mekanismeista saataisiin merkittävästi pienennettyä. Tällöin muodostuvat tiivistymisvanat olisivat läpinäkyvämpiä. Mutta koska vesihöyryä muodostuu vetyä poltettaessa tavallista enemmän, voivat ne kestää pidempään. Näiden kahden tekijän suhteellinen vaikutus on vielä epäselvää ja siksi debatti asian ympärillä tulee jatkumaan. (Roland Berger, 2020)

Vedyn käyttäminen polttokennossa – ilmastovaikutukset

Vedyn käyttämisessä polttokennossa on vedyn käytön vaihtoehdoista pienimmät ilmastovaikutukset. Polttokennoa käytettäessä vedystä syntyy vain vesihöyryä – eli kaikki CO₂-, NO_x-, SO_x-, CO-, HC- ja nokipäästöt voidaan nollata. Vesihöyryä syntyy kuitenkin merkittäviä määriä, n. 9 kg yhtä käytettyä vetykiloa kohti. On tutkittu, että polttokennossa tapahtuvien reaktioiden puhtauden myötä epäpuhtauksia syntyy hyvin vähän, mikä vähentäisi tiivistymisytimiä ja täten vesihöyryvanojen tiiveyttä. (Roland Berger, 2020)

Toisaalta polttokennokalustolla voitaisiin lentää matalammilla lentokorkeuksilla troposfäärissä, alle 8–12 km korkeuksissa, mikä vähentäisi vesihöyryn ilmastoa lämmittävää vaikutusta. Alalla tutkitaan myös vaihtoehtoa, jossa polttokennokalusto voisi varastoida osan lennon aikana syntyvästä vesihöyrystä, ja vapauttaa sen olosuhteissa, joissa ilmastovaikutukset ovat pienemmät. Näitä vaikutusmekanismeja vasta selvitetään ja asia vaatii tarkempaa tutkimusta. Kun polttokennomoottoreita päästään testaamaan oikeissa olosuhteissa ja lentokorkeuksissa, saadaan tärkeää tietoa moottorin todellisista ilmastovaikutuksista. (Roland Berger, 2020)






Vetyvuotojen ilmastovaikutus

Vedyn käytön ilmastovaikutuksia aiheuttavat myös mahdolliset vetyvuodot. Isossa-Britanniassa on laskettu, että vedyn käytöstä ja vetyvuodoista aiheutuu jonkin verran kasvua metaanin ja otsonin määrään ilmakehässä. Näiden ilmastovaikutukset (GWP, eng. *Global Warming Potential*) suhteessa hiilidioksidiin ovat laskennallisesti 11-kertaiset, mutta koska vetypäästöjen ja -vuotojen määrä on kuitenkin vähäinen, **vedyn käyttöön siirtyminen vähentää CO₂-ekvivalenttipäästöjä yli 95 % huonoimmassakin tarkastellussa skenaariossa**. Skenarioissa tarkasteltiin vedyn käyttöä yhteiskunnassa laajemmin, mutta nimenomaisesti lentoliikennettä ei tarkasteltu. (Warwick, ym., 2022).

2.1.4 Vaihtoehtojen hyötysuhteet

Kun tarkastellaan tulevaisuuden liikenteen käyttövoimia, on tärkeää arvioida niiden koko tuotantoketjun hyötysuhdetta. Vihreän siirtymän myötä uusiutuvan energian kysyntä kasvaa huomattavalla nopeudella kaikilla toimialoilla. Investointeja tarvitaan merkittävä määrä ja siltikin fossiilisesta energiasta luopuminen tulee olemaan haastavaa. Uusiutuvan energian investoinneista, kuten aurinko- ja tuulivoimasta, on pakko ulosmitata mahdollisimman paljon, jotta tehokas vihreä siirtymä on mahdollista. Tällöin suurilla energiankuluttajilla, kuten lentoliikenteellä, on tavoiteltava mahdollisimman korkean hyötysuhteen käyttövoimia.

Tarkasteltavien käyttövoimien **kokonaishyötysuhteiden** karkeat arviot primäärienergiasta työntövoimaksi on esitetty kuvassa 4.

	 Akkusähkö	 H ₂ polttokennossa	 H ₂ polttomoottorissa	 Synteettinen polttoaine polttomoottorissa	 Fossiilinen polttoaine polttomoottorissa	
Tuotannosta	100 % Uusiutuvaa sähköä	100 % Uusiutuvaa sähköä	100 % Uusiutuvaa sähköä	100 % Uusiutuvaa sähköä	100 % fossiilista nestemäistä polttoainetta	
Tankkiin	94 % Energiansiirto	65~70 % Elektrolyysi: vihreän vedyn tuottaminen. <i>Huom! Suomessa hukkalämpö voidaan käyttää kaukolämpönä.</i>	65~70 % Elektrolyysi: vihreän vedyn tuottaminen. <i>Huom! Suomessa hukkalämpö voidaan käyttää kaukolämpönä.</i>	65~70 % Elektrolyysi: vihreän vedyn tuottaminen. <i>Huom! Suomessa hukkalämpö voidaan käyttää kaukolämpönä.</i>	99 % Pieniä energiahäviötä kuljetusprosessin ja tankkauksen aikana mm. haihtumisesta johtuen	
		75~83 % Vedyn nesteytys sekä kuljetus ja tankin täyttö	75~83 % Vedyn nesteytys sekä kuljetus ja tankin täyttö	50~55 % Hiilidioksidin talteenotto ja synteettisen nestemäisen hiilivedyn valmistaminen FT-menetelmällä		99 % Kuljetus ja tankin täyttö
Tuotannosta tankkiin hyötysuhde	90 % Sähkön lataaminen akkuun	85 %	46~58 %	46~58 %	32~38 %	99 %
Tankista	65~82 % Suurikapasiteettisen akun sähkön käyttö sähkömoottorissa	45~50 % Polttokennossa vedystä sähköenergian tuotto ja käyttö sähkömoottorissa	30~40 % Nestemäisen vedyn polttaminen potkuriturbiinimoottorissa	30~40 % Nestemäisen hiilivedyn polttaminen potkuriturbiinimoottorissa	30~40 % Nestemäisen hiilivedyn polttaminen potkuriturbiinimoottorissa	
Moottoriin						
Kokonaishyötysuhde	55~70 %	20~29 %	15~23 %	10~15 %	30~39 %	

Kuva 4. Eri käyttövoimien kokonaishyötysuhteet primäärienergiasta työntövoimaksi. Luvut ovat karkeita arvioita eri lähteistä.

Tämä tarkastelu ei ota huomioon tehokkuutta kuljetussuoritteeseen asti eli ilma-aluksen itsensä kuljettamiseen kuluva energiaa. Lentoliikenteessä tämä voi vaihdella suurestikin riippuen siitä, kuinka suuren ilma-aluksen mikäkin käyttövoima vaatii halutun kuljetussuoritteen toteuttamiseksi.

Energiajärjestelmän kokonaistehokkuuden näkökulmasta akkusähkö on paras vaihtoehtoista – tällöin yli puolet uusiutuvasta energiasta saadaan hyötykäyttöön. Kaikilla muilla vaihtoehtoilla käyttöön jää vain neljäsosa tai viidesosa energiasta. Hyötysuhteen näkökulmasta on perusteltua edistää akkusähköratkaisujen kehittymistä mahdollisimman paljon. Akkusähköllä on kuitenkin selvät rajoitteensa, joita on käsitelty tarkemmin [Sähköisen lentämisen selvityksessä](#) (Traficom, 2022a).

Vedyn voimalinjoissa hyötysuhteissa on vaihtelua. Kun oletetaan, että käytettävissä on 100 % uusiutuvaa sähköä, asettuvat vedyn eri energiapolkujen kokonaishyötysuhteet 10 % ja 29 % välille. Vedyn valmistuksessa elektrolyysi, vedyn nesteytys sekä kuljetus ja tankkaaminen aiheuttavat hukkaa. **Suomen olosuhteissa elektrolyysissä syntyvä hukkalämpö voidaan hyödyntää kaukolämmön tuotannossa**, mikä tarkoittaa, että esitetty elektrolyysin hyötysuhde olisi huomattavasti korkeampi pohjoisissa olosuhteissa. Tällöin kokonaishyötysuhteet voisivat nousta useita prosenttiyksiköitä.

Vedyn käytössä polttokennossa ja polttomoottorissa ainoa ero tulee vedyn käytön aikaisesta hyötysuhteesta. Polttokennoon ja sähkömoottoriin perustuvan järjestelmän tehokkuus on suurempi kuin polttomoottorilla. Toisekseen sähkömoottori voi mahdollistaa hajautetut työntövoimaratkaisut (eng. *distributed propulsion*), jotka tarjoaisivat entistäkin paremman polttoainetalouden, jopa 20–30 % polttoaineen säästön (Roland Berger, 2020). Arvioiden mukaan nämä kaksi

asiaa mahdollistaisivat sen, että polttokennolentokoneilla voisi kuljettaa 20–40 % enemmän polttoainetta verrattuna vetykäyttöiseen polttomoottorikalustoon.

Synteettisillä polttoaineilla vety tuotetaan samaan tapaan elektrolyysillä. Tämän jälkeen vedystä ja hiilidioksidista syntetisoidaan synteettistä ”raakaöljyä”, joka edelleen jatkojalostetaan polttoainejakeiksi, joista osa soveltuu lentopolttoaineksi. Sekä hiilidioksidin talteenotossa että synteettisten polttoaineiden valmistusprosessissa syntyy häviöitä. Nämä häviöt riippuvat olosuhteista ja käytettävistä menetelmistä. Esimerkiksi hiilidioksidin talteenotto ilmasta on tehottomampaa kuin sen kaappaaminen suoraan tehtaan prosessista. Valmista tuotetta poltetaan polttomoottorissa.

Hyötysuhteiden suuruusluokkiin liittyy tiettyjä epävarmuuksia. Tulevaisuudessa mm. polttokennojen tehokkuutta voidaan parantaa entisestään sekä prosessin aikana syntyvää hukkalämpöä hyödyntää energiateollisuudessa. Tällöin vetypohjaisten voimalinjojen hyötysuhteet paranevat. Suurin haaste vedyn hyötysuhteelle on vedyn nesteytys, kuljetus ja varastointi, joissa syntyy merkittäviä häviöitä.

Myös vetysäiliöiden suurempi koko kasvattaa ilma-aluksen ilmanvastusta, mikä pitkällä matkoilla kääntää energiataloudellisuuden synteettisen polttoaineen eduksi, kun vetysäiliöiden vaatima tila moninkertaistaisi kuljetussuoritteeseen vaadittavan ilma-aluksen koon. Vetysäiliöistä on kerrottu tarkemmin luvussa 3.2.5.

2.2 Lentoala murroksen edessä

LUVUN 2.2 KESKEINEN SISÄLTÖ

- ▶ Vetykäyttöisiä lentokoneita on pilotoitu jo 1980-luvun loppupuolella ja vetyä on käytetty avaruusrakettien polttoaineena pitkään.
- ▶ Lentoliikenteeseen kohdistuu merkittäviä päästövähennystavoitteita muun liikennesektorin ohella.
- ▶ Globaalilla tasolla CORSIA-järjestelmä tavoittelee hiilineutraalia lentoliikenteen kasvua.

2.2.1 Taustaa vetylentämiselle

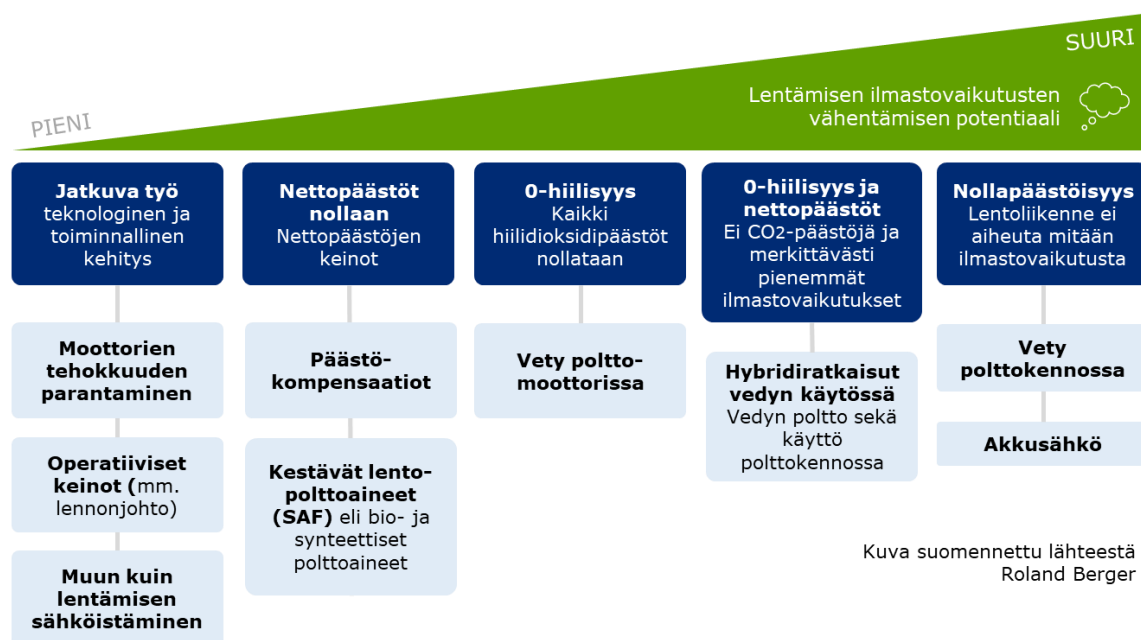
Vety ei ole lentoalalla uusi asia, sillä kokeiluluontoisina vetykäyttöisiä lentokoneita on ollut olemassa jo kauan. Esimerkiksi Neuvostoliitossa rakennettiin 1980-luvun lopulla vedyllä toiminut Tupolev Tu-155 -lentokoneen prototyyppi matkustajakonemalli Tu-154:n pohjalta. Laajamittaiseen kaupalliseen käyttöön vetylentokoneet eivät kuitenkaan toistaiseksi ole päässeet.

Yhdysvaltain liittohallituksen alainen ilmailu- ja avaruushallintovirasto NASA on käyttänyt vetyä avaruusrakettien polttoaineena 1950-luvun lopusta alkaen. **NASA on kehittänyt samalla myös toimintatapaa vedyn tehokkaalle ja turvalliseen käytölle sekä tutkinut muun muassa polttokennojen käyttöä osana vaihtoehtoisia voimanlähteitä** (NASA, 2022).

Lentoala on historiansa suurimman päätöksen ja murroksen edessä. Suuret teollisuusalat kuten energia- ja autoteollisuus etenevät kohti hiilineutraaliutta, mutta lentoalalla päästöt ovat jatkaneet kasvuaan. Ala kehittää jatkuvasti lentokoneiden

tehokkuutta, mutta konekokojen ja erityisesti lentoliikenteen määrän kasvu kasvattaa alan päästöjä. Konsulttiyhtiö Roland Berger on arvioinut, että jos alalla ei tehdä merkittäviä toimia, sen päästöt ovat vuonna 2050 n. 24 % koko maailman CO₂-päästöistä. Nykyisin ne ovat n. 3 %. Vaikka lentoliikenteen tehokkuus paransi nykyistä yli kaksinkertaisella tahdilla, siltikin alan osuus maailman CO₂-päästöistä olisi 19 % vuonna 2050, koska muilla aloilla päästövähennyksien ennustetaan tapahtuvan nopeammin. Lentämiseen liittyvien CO₂-päästöjen osuuden arvioitu kasvu johtuisi siis lentoliikenteen määrän globaalien kasvun ja muiden alojen päästövähennysten yhteisvaikutuksesta.

Päästötavoitteiden saavuttamiseksi alan on tehtävä kaikkensa löytääkseen uusia käyttövoimia kiihtyvällä tahdilla. Toimenpiteiden kirjo on laaja ja jokaista keinoa tarvitaan. Kuvassa 5 on esitetty lentoalan päästövähennyskeinoja sekä niiden potentiaalia pienentää lentoliikenteen ilmastovaikutusta. Yleinen nyrkkisääntö on, että mitä suurempi ilmastovaikutusten vähentämisen potentiaali, sen kompleksisempia ovat keinot. Vety nähdään alalla yhtenä keskeisistä päästövähennyskeinoista.



Kuva suomennettu lähteestä Roland Berger

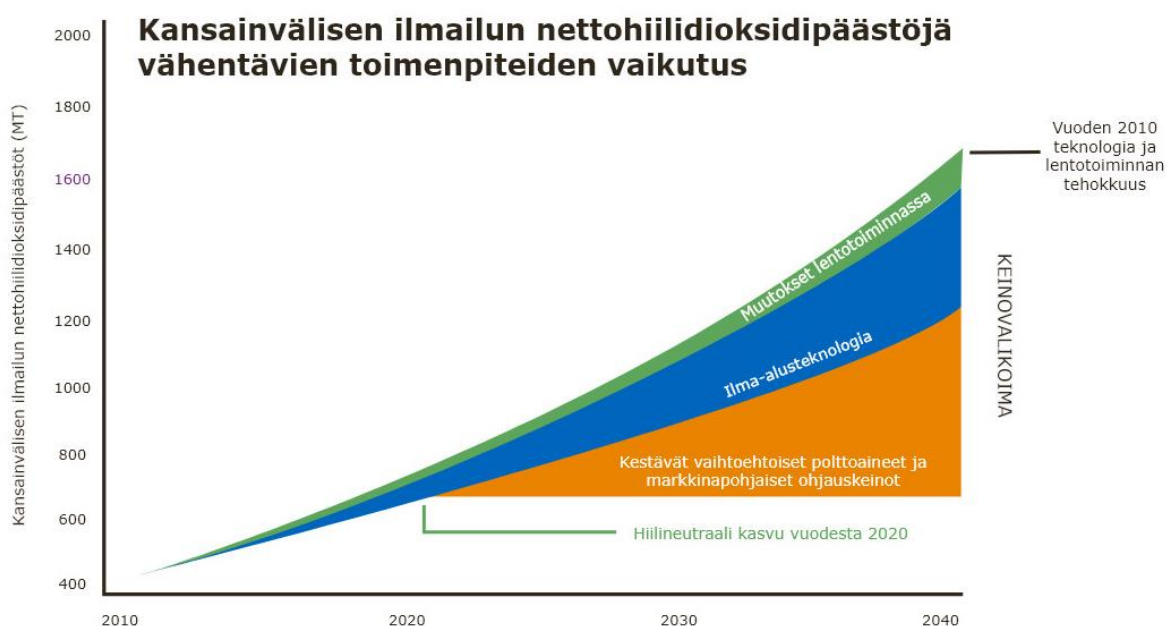
Kuva 5. Lentoalan päästövähennyskeinoja sekä niiden vaikuttavuus.

2.2.2 Lentoliikenteen päästövähennystavoitteet

Lentoliikenteen päästötavoitteet jakautuvat globaaleihin, EU-tason ja Suomen tavoitteisiin. **Globaalilla tasolla** kehitystä ohjaa kansainvälisen siviili-ilmailujärjestön ICAO:n jäsenvaltioiden kansainvälisen lentoliikenteen hiilidioksidipäästöjen kasvun hyvittämiseen velvoittava järjestelmä, CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation). Järjestelmän myötä ilmailu on ensimmäinen ala, jolle on asetettu maailmanlaajuinen markkinaehtoinen päästöjärjestelmä.

CORSIA:n avulla pyritään kansainvälisen lentoliikenteen hiilineutraaliin kasvuun. Koska tulevaisuuden käyttövoimien, kuten vedyn yleistymisessä kestää vielä pitkään, on nähty tarpeelliseksi kehittää markkinaehtoinen hyvitysjärjestelmä uusia

teknologioita odoteltaessa. **ICAO päätti 41. kokouksessaan Montrealissa, että vertailuvuotena päästöjen lähtötasolle pidetään vuotta 2019 pilottivaiheessa vuosina 2021–2023 ja 85 % vuoden 2021 CO₂-päästöistä vuosina 2024–2035.** Näin ollen päästötaso kiristyy sen ollessa ennen päätöstä vuoden 2020, jolloin koronapandemia laski merkittävästi lentoliikenteen päästöjä. Tämän päätöksen voidaan osaltaan odottaa kirittävän lentoyhtiöiden päästövähennyspyrkimyksiä.



Kuva 6. Kansainvälisen ilmailun päästövähennyskeinojen vaikutus. (Traficom, Corsia, 2022b)

EU-tasolla pääasiallinen päästövähennyskeino on EU:n päästäkauppajärjestelmä, johon kuuluvat EU-alueen sisäiset lennot. 55-valmiuspaketin myötä päästöoikeuksien määrää vähennetään ja lentoliikenteen ilmaiset päästöoikeudet ajetaan alas. Lisäksi Euroopan komissio on esitellyt osana ReFuelEU Aviation -aloitetta ehdotuksen, jonka mukaisesti veloitettaisiin kaikki eurooppalaisilta lentoasemilta lähtevät lennot tiettyyn kestäväan lentopolttoaineen osuuteen. Ehdotuksen aikataulu on esitetty taulukossa 3. Osana ehdotusta ovat ns. synteettiset polttoaineet, jotka tuotetaan jatkojalosteena vedystä. Näiden rooli kasvaisi myös tulevaisuuden vaatimuksissa.

Taulukko 3. Euroopan komission ehdotus kestävien lentopolttoaineiden osuudesta eurooppalaisilta lentoasemilta lähtiessä. (EASA, 2022b)

Vaatus	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Kestäväan lentopolttoaineen %-osuus lentoliikenteessä	2 %	5 %	20 %	32 %	38 %	63 %
josta %-osuus synteettistä polttoainetta	-	0,7 %	5 %	8 %	11 %	28 %

Suomi on sitoutunut ICAO:n ja EU:n tavoitteisiin lentoliikenteen päästöjen vähentämiseksi. Suomella ei ole ollut näistä tavoitteista erillisiä numeerisia kansallisia tavoitteita, mutta fossiilittoman liikenteen tiekarttatyössä arvioitiin mahdollisuudet vähentää kotimaan ja Suomesta lähtevän kansainvälisen lentoliikenteen päästöjä. Valtioneuvoston periaatepäätöksen lentoliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisestä (Valtioneuvosto, 2021) toimenpiteiden toteuttamisen kautta valtioneuvoston tavoitteena on vähentää kotimaan ja Suomesta lähtevän kansainvälisen lentoliikenteen päästöjä vuoden 2018 tasosta laskettuna 15 prosenttia vuoteen 2030 mennessä ja 50 prosenttia vuoteen 2045 mennessä. Kotimaan lentoliikenteen tulisi olla päästötöntä vuonna 2045.

3 Vetylentämisen infrastruktuuri, kalusto ja regulaatio

3.1 Vetyinfrastruktuuri

LUVUN 3.1 KESKEINEN SISÄLTÖ

- ▶ Vetytalouden kehitys on lähtenyt Suomessa hyvin käyntiin ja uusia kotimaisia vedyntuotannon hankkeita on tunnistettu useita.
- ▶ Suunnitellut vetykäytävähankkeet kytkevät toteutuessaan Suomen sekä Ruotsin että Baltian maiden ja Puolan kautta myös Saksaan.
- ▶ Vetylogistiikka voidaan jakaa ulkopuoliseen ja paikalliseen tuotantoon. Ulkopuoliossa tuotannossa vetyä voidaan kuljettaa eri kuljetusvälinein tai putkiston avulla.
- ▶ Vety on sekä kaasuna että nesteinä palamis- ja räjähdysherkkä ilmaan yhdistyessään, mikä saattaa aiheuttaa merkittävää tankkauksen turvatoimien kiristymistä.

3.1.1 Vetytalouden kehityksen tila Suomessa

Vedyn yleistyminen lentoliikenteessä edellyttää vetytalouden laajamittaista kehittymistä useilla eri teollisuussektoreilla. Vetyä käytetään jo nyt monissa teollisuusprosesseissa, ja useat teollisuuslaitokset ovat siirtymässä yhä laajemmin vihreän vedyn käyttäjiksi. Vetytalous kehittyy siis ensisijaisesti teollisuusasiakaslähtöisesti, mutta tämän rinnalla kehittyvät myös energia- ja liikennesektorin sovelluskohteet, mukaan lukien lentoliikenne.

Vetytalouden kehitys Suomessa ollut jopa oletettua nopeampaa. Kehitystä on vauhdittanut mm. regulaatio ja viimeisimmillään Venäjän hyökkäyssota, mikä on kiihdyttänyt Euro-alueen fossiilisesta energiasta luopumisen aikatauluja. Lähivuosina Suomessa käynnistetään jopa parin miljardin euron investoinnit puhtaan vedyn tuotantoon ja jatkojalostukseen. Valmisteilla on kymmeniä vähähiilisen tai puhtaan vedyn investointeja ympäri Suomea, jotka on esitetty kuvassa 7 (Valtioneuvosto, 2022).

Lentoliikenteen kannalta on mielenkiintoista seurata, kehittykö vetytalous keskittyy vai hajautetumpaan malliin. Keskitetyssä mallissa vedyn tuotanto keskittyy suurtuotantoon yksittäisillä teollisuuspaikkakunnilla, ja täältä järjestetään vedyn jakelu. Vaihtoehtoisesti vetyä voidaan tuottaa hyvin paikallisesti pienemässä mittakaavassa, mm. lentoasemilla.



* Tukipäättös 88 milj. EUR EU Innovation Fundilta 2021 ** Energiainvestointituki myönnetty 2021

Kuva 7. Esimerkkejä kotimaisista vedyntuotannon hankkeista vuonna 2021. Lähde: (Valtioneuvosto, 2022)

Valtioneuvoston tuoreen tutkimuksen mukaan vedyn ja sähköpolttoaineiden tuotantolaitokset kannattaa Suomessa integroida läheisesti teollisuuslaitoksiin ja yhdyskuntien energiantuotantoon. (Valtioneuvosto, 2022, s. 210). Tällöin suurasiakkaat sijaitsevat lähellä tuotantoa ja tuotannossa syntyvä hukkalämpö voidaan hyödyntää. Tämä suositus perustelisi sitä, että lentoasemille ei tulisi Suomessa ainakaan kehityksen alkupuolella vedyn tuotantoa. Suomessa on myös optimoitu sähkönsiirtoverkkojen vahvistaminen ja vedynsiirtoverkkojen rakentaminen. Jos tuulivoimalat ja vedyntuotantolaitokset sijaitsevat fyysisesti kaukana toisistaan, tämä voi edellyttää merkittäviä investointeja sähköverkkoon.

Vetytalouden nopea kehityskulku sekä sähköistyvä liikenne luovat edellytyksiä vetylentämiselle Suomessa. Vetyteknologia, uudet sähköiset voimalinjat ja niiden ympärille kehittyvä teollisuus luovat tärkeän pohjan lentoliikenteen vihreälle siirtymälle: teknologian toimintavarmuus ja turvallisuus kehittyvät, toimintaperiaatteet ja prosessit tulevat tutuiksi ja tuotanto skaalautuu. Tällöin aikanaan vetykaluston tullessa markkinoille vetylentämisen yleistymiselle on paremmat mahdollisuudet.

3.1.2 Vetylogistiikka ja lentoasemat

Vihreän vedyn tuottaminen perustuu uusiutuviin energianlähteisiin sekä elektrolyysiin. Vedyn toimitusketjun voi rakentaa usealla eri tavalla, tarpeista ja mitta-kaavasta riippuen. Paras tapa kuljettaa suuria määriä vetyä, kuten myös maakaasua, on kaasuputki. Suuren vetymäärän korkeapaineiseen siirtoon tarvittava kaasuputki on erilainen kuin maakaasun kuljetukseen käytettävä putki, mutta olemassa on jo tuhansia kilometrejä vedyn kuljetukseen soveltuvaa putkistoa eri puolilla maailmaa. Tulevaisuudessa vetyputket tehdään todennäköisesti komposiittimuoveista. (Fortum, 2022)

Vety on paineistetussa putkikuljetuksessa olomuodoltaan kaasumainen. Alustavasti on tunnistettu, että Suomen olemassa olevaa maakaasuputkistoa voidaan hyödyntää myös vedylle, mutta se vaatisi hyvin merkittäviä investointeja (Laurikko, ym., 2020). Vetyputkistoa on nykytilassa lähinnä teollisuusalueiden sisällä. Suunnitteilla on myös pohjoismaiden ja Itämeren alueen vetyinfrastruktuurin kehittäminen, jota Suomen osalta edistää Gasgrid. (Gasgrid, 2022)



Kuva 8. Suunniteltuja vetykäytävähankkeita Pohjois-Euroopassa. Lähde: (Gasgrid, 2022)









Putkistojen lisäksi vetyä voidaan kuljettaa myös rekka-, juna- ja laivaliikenteessä. Kuljetusmuodot eivät rajoita vedyn olomuotoa, vaan vety voi esiintyä joko nesteenä tai kaasuna. Suomessa vedyn kuljettaminen kumipyörillä on muuta Eurooppaa kustannustehokkaampaa, johtuen Suomen sallivasta sääntelystä rekkojen suurille kokonaismassoille (Laurikko, ym., 2020).

Vedyn käytön yleistymisen lentoliikenteessä edellyttää laajaa kehitystä vedyn infrastruktuurissa aina tuotannosta lentoasemaympäristöön. Lentoasemien vetyinfrastruktuuri voidaan toteuttaa käytännössä kolmella eri tavalla:

1. nestemäisen vedyn kuljettaminen lentoasemille rekoilla
2. kaasumaisen vedyn kuljetus putkistossa ja nesteytys lentoasemalla
3. elektrolyysi lentoasemalla (nk. paikallinen tuotanto)

Yllä esitellyt kolme tapaa vetyinfrastruktuurin rakentamiseen sisältävät useita samoja vaiheita, jotka voivat tapahtua eri kohdissa kokonaisprosessia. Vähiten väli-vaiheita sisältää paikallinen tuotanto, jossa toimitusketju voidaan rakentaa viidellä selkeällä kokonaisuudella. Vedyn toimitusketjun rakentuminen erilaisille toimintatavoille on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Vedyn ja synteettisten polttoaineiden toimitusketjut. Synteettisten polttoaineiden tuotanto vaatii noin 3-kertaisesti energiaa (CO₂ ilmasta) ja lähes 2-kertaisesti vetyä samaa energiasisältöä kohden. Suomennettu lähteestä (Clean Sky, 2020)

Kuvaus toimitusketjusta	 Energia	 Vedyn tuotanto	 Hiilidioksidin talteenotto + polttoaine-prosessi	 Vedyn nesteytys	 Kuljetus	 Vedyn nesteytys	 Varastointi	 Tankkaus
Nestemäinen vety Ulkopuolinen tuotanto + rekka	X	X		X	X		X	X
Ulkopuolinen tuotanto + putkisto	X	X			X	X	X	X
Tuotanto lentoasemalla	X	X				X	X	X
Synteettiset polttoaineet Ulkopuolinen tuotanto	3X	2X	X		X		X	X
Paikallinen tuotanto	3X	2X	X				X	X

Vetyinfrastruktuurissa on otettava huomioon myös sille varattava pinta-ala, sillä tarvittavat elektrolyysilaitteet ja varastointikapasiteetti vievät paljon tilaa. Mikäli vetyä käytetään tulevaisuudessa lentämisen polttoaineena laaja-alaisesti, tässä skenaariossa 22 miljoonaa litraa päivässä, on arvioitu, että lentoasematuotannossa tilantarve laitteistolle ja varastoinnille saattaa olla jopa noin 32 hehtaaria. Mikäli nestemäisen vedyn päivittäinen tarve säilyy samana, mutta vety tuodaan lentokentälle rekka-autoilla varastoitavaksi, tilantarpeeksi on arvioitu noin kolmasosa (11 ha). Nestemäisen vedyn päivittäisen tarpeen pienentyessä vähenee myös tarvittavan tilan tarve. (Aerospace Technology Institute, 2022)

Ranskassa, Toulousen lentoasemalla, on tehty ensimmäisiä toimenpiteitä vedyn käyttämiseksi osana lentokenttätöintoja. Lentoaseman läheisyyteen on asennettu elektrolyysilaitte noin 300 kilon päivittäisellä tuotantokapasiteetilla sekä varastointimahdollisuudet 1000 kilolle vetyä. Lentoasematoimintojen osalta vetyä

hyödynnetään ensimmäisessä vaiheessa muun muassa terminaalien väliseen bus-siliikenteeseen. (HYPORT, 2020) Toulousessa toteutunut vetytuotanto on yksi esimerkki siitä, miten vedyn logistiikka voidaan hoitaa paikallisesti lentoasemalla.

Alalla on arvioitu, että koska vety yleistyy ensin pienemmässä kalustossa, kohdistuvat vaikutukset ensin alueellisiin lentoasemiin. Näiden polttoainehuolto toteutetaan nykyään säiliörekoilla, joten luontevaa olisi kuljettaa myös nestemäinen vety rekoilla. Tällöin lentoasemilla tarvittaisiin investointeja vain vedyn säilyttämiseen ja tankkaukseen. Nestemäinen vety vaatisi noin kaksinkertaisen rekkamäärän kuin fossiilinen lentopetroli tai synteettiset polttoaineet. Polttoaineen jakeluliikenne siis tuplaantuisi.

3.1.3 Vedyn tankkaus ja turvallisuus

Vedyn tiedetään olevan palamis- ja räjähdysherkkä sekä kaasuna että nesteenä, kun se yhdistyy ilmaan (happeen). Edellä mainittu vedyn ja ilman sekoitus saattaa räjähtää jopa staattisesta sähköstä ja siitä johtuvasta näkymättömästä kipinästä. Vedyn syttyessä palamaan, liekin suunta on suoraan ylöspäin johtuen vedyn keveydestä suhteessa ilmaan. Vety palaa näkymättömällä liekillä, ja tämä tekee palamisesta vaikeammin havaittavaa ja näin ollen hankalammin käsiteltävää myös pelastustoimelle. Vaikka vety haihtuu ja hajoaa ulkoilmassa nopeasti, vedyn palamis- ja räjähdysherkkyyden kannalta on tärkeää, ettei vetyvuotoja pääse syntymään. Historiallisesti tunnetun ilmalaiva Hindenburgin räjähdysten takana on arvioitu olleen juuri vetyvuoto, joka sai lopullisen kipinänsä staattisesta sähköstä (National Air And Space Museum, 2022).

Vedyn palamis- ja räjähdysherkkyys aiheuttaa varotoimenpiteitä, jotka puolestaan voivat pidentää lentokoneiden kääntöaikaa lentoasemilla. Erittäin aikakriittisellä lentoalalla esimerkiksi kääntöajan pidentyminen 10 minuutilla neljä kertaa päivässä voi vaikuttaa merkittävästi lentoyhtiöiden tuloksentelekykyyn, erityisesti lyhyiden matkojen osalta (Clean Sky, 2020). Saatavilla olevan tiedon perusteella esimerkiksi maaoperaatiot, kuten matkustajien koneeseen nouseminen sekä yleiset huoltotoimenpiteet, ja vedyn tankkaaminen samanaikaisesti ei välttämättä ole mahdollista. Vedyn tankkaamisessa on tunnistettu myös tarve erikseen määritellylle varoetäisyydelle. Alustavien tutkimusten mukaan vetyletkun kiinnitys- ja irrotustilanteissa varoetäisyyden tulisi olla 20 metriä. Varoetäisyyttä voitaisiin mahdollisesti pienentää 8–10 metriin, kun vetyletkun kytkentä on varmistettu. Erityisesti 20 metrin turvaetäisyys aiheuttaa merkittäviä muutoksia samanaikaisiin maaoperaatioihin. (Aerospace Technology Institute, 2022)

Turvallisuusriskiyritys Gexcon on todennut tuoreissa selvityksissään vedyn olevan ennakoajatuksia turvallisempi polttoaine, jota on käytetty muun muassa teollisuudessa jo pitkään. Vedyn osalta riskialteimmat prosessivaiheet liittyvät tankkaukseen, jossa esimerkiksi vetyvuodot ovat mahdollisia. Gexcon on nostanut esille lentoalan vahvan turvallisuuskulttuuriin, joka auttaa turvallisuusasioiden ymmärtämisessä mutta korostaa samalla vedyn erilaisia uhkia aiempaan verrattuna. (Gexcon, 2022) NASA:n 1980-luvulla tehdyissä tutkimuksissa nestemäisen vedyn on todettu olevan vaarallisuudeltaan varsin samassa kategoriassa tavanomaisen lentopolttoaineen kanssa, kunhan vuotojen mahdollisuus minimoidaan (Arthur D. Little INC., 1982).

3.1.4 Vetyinfrastruktuurin kustannukset

Investointikustannukset

Lentoasemien vetyinfrastruktuurin investointikustannukset ovat tällä hetkellä varsin abstraktilla tasolla, sillä tarvittavasta vedyn määrästä lentoasemilla tiedetään vielä varsin vähän. Ensimmäiset suuntaa antavat hinta-arviot osoittavat, että investoinnit vetyinfrastruktuuriin tulevat toteutuessaan olemaan suuria. Aerospace Technology Institutin julkaisun perusteella (2022) infran investointikustannuksiin linkittyy vahvasti kaksi päätöstä: millä tavalla lentokentän vetyinfrastruktuuri halutaan rakentaa, ja miten lentokoneita halutaan tulevaisuudessa tankata.

Investointikustannusten näkökulmasta halvin tapa vetyinfrastruktuurin rakentamiseen on vedyn autokuljetuksiin perustuva ratkaisu, jossa tankkaus suoritetaan säiliöautoista. Tämä on yksinkertaisin vaihtoehto, jonka investointikustannukseksi noin 10 miljoonan vuosittaisen matkustajan kentälle on arvioitu mediaanina noin 23 miljoonaa euroa. Mikäli tankkaus halutaan toteuttaa lentokentän sisäisen vetyputkiston avulla, investointikustannuksen on arvioitu kasvavan noin 46 miljoonaan euroon. (Aerospace Technology Institute, 2022)

Vedyn paikallinen tuotanto lentokentällä on ratkaisuisista hintavampi, sillä lentokentän koosta ja matkustajamäärästä riippuen investointikustannus on 5–8 kertaa kalliimpi kuljettamiseen verrattuna. Samankaltaisella, noin 10 miljoonan vuosimatkustajan kentällä investoinnin mediaaniarvoksi on arvioitu 115 miljoonaa euroa. Mikäli tähän lisätään vielä lentokentän sisäinen vetyputkisto tankkausta varten, investoinnin mediaanikustannukseksi on arvioitu noin 130 miljoonaa euroa. (Aerospace Technology Institute, 2022)

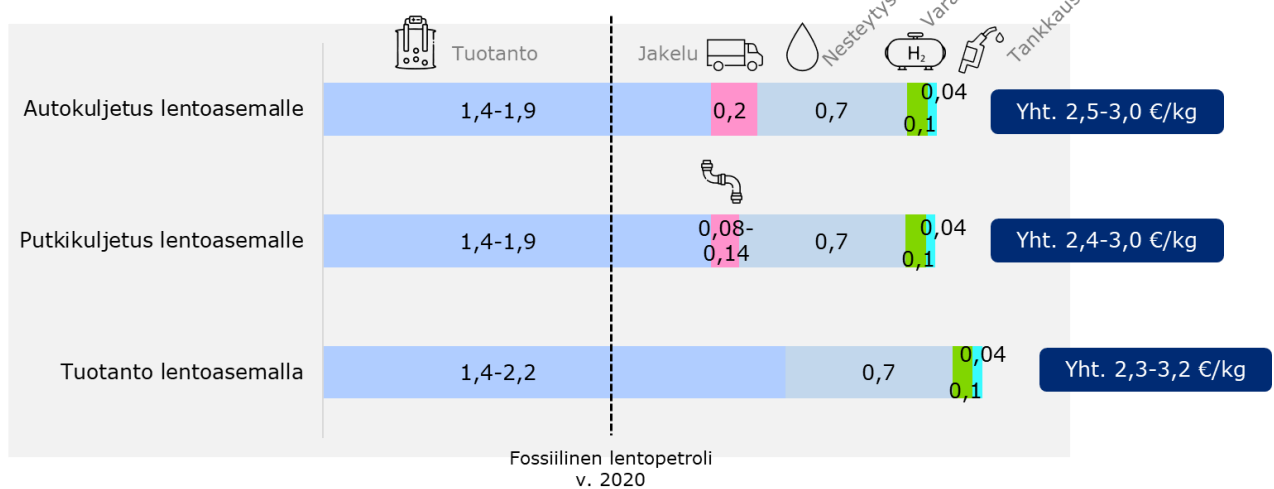
Kaasuputkistoon perustuva ratkaisu asettuu investointikustannusten osalta kahden edellä esitetyn vaihtoehdon väliin. Tämä vaihtoehto on kuitenkin huomattavasti lähempänä kuljetuksiin perustuvaa ratkaisua, sillä säiliöautoilla tankattaessa investoinnin mediaanikustannukseksi on arvioitu 28 miljoonaa euroa ja vetyputkiston kanssa 56 miljoonaa euroa. (Aerospace Technology Institute, 2022)

Vedyn tuotantopolkujen kustannukset

Kuvassa 9 on esitetty kolmen tuotantopolun arvioidut kustannukset vuonna 2040. Paikallinen tuotanto voi osoittautua vaihtoehtoista halvimmaksi silloin, jos uusiutuvaa energiaa on runsaasti saatavilla ja lentoasema sijaitsee lähellä vettä. Tässä vaihtoehdossa kuljetuskustannus saataisiin poistetuksi. Suuremman mittakaavan tuotannossa putkikuljetus voi osoittautua halvimmaksi vaihtoehdoksi. Kaikissa vaihtoehdoissa vedyn tuotannon kustannukset tulevat olemaan nykyistä lentopetrolin hintaa suuremmat. Fossiilisten polttoaineiden hinnan voidaan kuitenkin olettaa nousevan tulevaisuudessa, kun niiden sääntely kiristyy. Tällöin hintaero voi kaventua.

Vedyn kolmen eri jakelupolun kustannusarviot

€ per kg vuonna 2040



Kuva 9. Vedyn kolmen eri jakelupolun kustannusarviot, euroa per kilogramma vetyä. Käytetty vaihtokurssia vuodelta 2020, 1 USD = 0,9 €. Kuva suomennettu lähteestä (Clean Sky, 2020)

3.2 Kalusto

LUVUN 3.2 KESKEINEN SISÄLTÖ

- ▶ Kehitteillä oleva vetykalusto tukeutuu tällä hetkellä polttokennoihin, polttomoottoreihin ja nestemäiseen vetyyn.
- ▶ Vetykaluston kehitystyötä tekevät suuret yritykset, kuten Airbus ja NASA, sekä startup-yritykset, joiden taustalla on usein tunnettuja toimijoita.
- ▶ Polttokennokalusto soveltuu lyhyehköillä matkoilla lentoliikenteen ratkaisuksi, kun taas hybridi- ja polttomoottoriratkaisuilla voidaan lentää merkittävästi pidempiä matkoja.
- ▶ Vetylentokoneiden suunnittelun kehityspolku jakautuu kahteen haaraan; evoluutioon ja kehitysharppaukseen. Evoluutio mahdollistaisi nopeamman käyttöönoton, kun kehitysharppauksessa lentokoneet soveltuisivat aerodynamiikaltaan paremmin vedyn käyttöön.
- ▶ Nestemäinen vety vie 4-kertaisesti ja kaasumainen vety 6-kertaisesti tilaa fossiiliseen lentopetroltiin tai synteettiseen lentopetroltiin verrattuna.
- ▶ Vedyn polttoainekustannukset ovat vielä pitkään merkittävästi nykyistä lentopetrolia suuremmat. Hiilen hinnoittelu tulee nopeuttamaan nestemäisen vedyn ja fossiilisen lentopetrolin hintapariteettia.

3.2.1 Vetykaluston tilannekuva

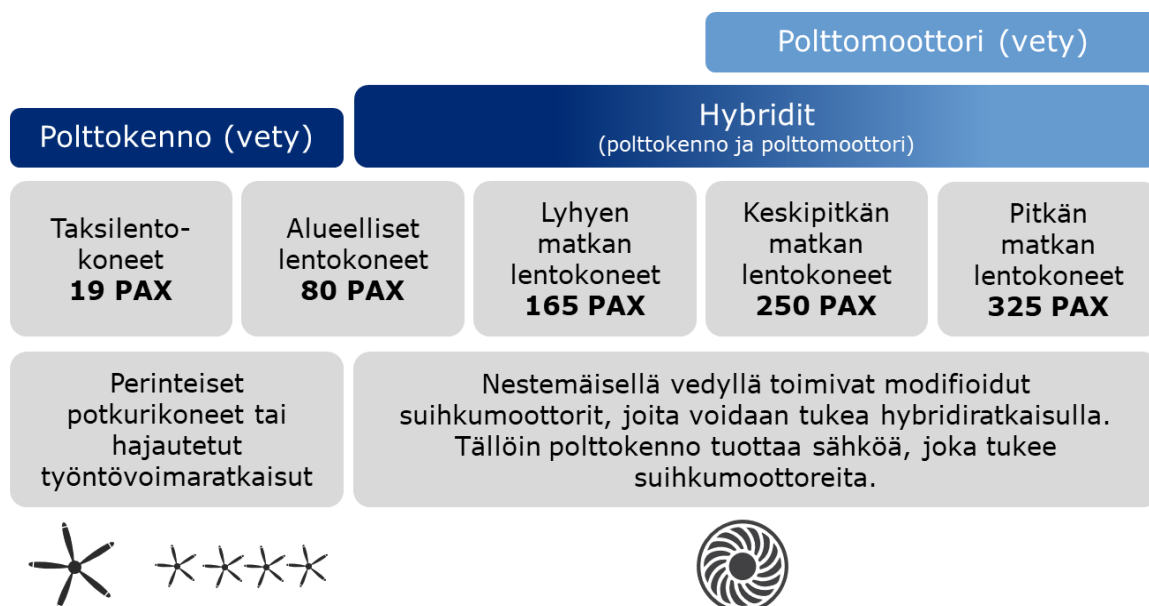
Vety ei ole ilmailualalla täysin uusi polttoaine vaan sen käyttöä on pilotoitu jo 1980-luvun Neuvostoliitossa. Tämän pohjalta ei saavutettu kuitenkaan varsinaista läpimurtoa, eikä vetylentokoneiden kehityksen kannalta ole havaittavissa suuria edistysaskelia 1990-luvulla tai 2000-luvun alkuvuosina. Tekniikan kehittyessä ja ilmastotietouden kasvaessa 2010-luvun aikana, erityisesti startup-yritykset ovat pilotoineet vetyä lentokoneen polttoaineena erilaisissa projekteissa. Tällä hetkellä ajankohtaisia vetylentokoneprojekteja sekä yleistietoa niistä on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Tiedossa olevien vetylentokoneprojektien status.

Valmistaja / projekti	Kotimaa	Kalustotyyppi	Vedyn olomuoto	Kantama	Status	Arvioitu käyttöönotto	Kuvaus
H2FLY / HY4	Saksa	Poltto-kenno	Kaasu / Neste	750–1500 km	Ensilento suoritettu vuonna 2016	2020-luku	Nelipaikkainen lyhyenkantaman kone, jossa kaksiosainen runko ja ”propelli” runkojen välissä. H2FLY:lla käynnissä myös muita vetylentokoneprojekteja.
HES / Element One	Ranska Singapore	Poltto-kenno	Kaasu / Neste	500–5000 km	Kehitte-lyssä	-	Nelipaikkainen kone, jossa kantama riippuu vedyn olomuodosta.
Alaka’i / Skai	Yhdysvallat	Poltto-kenno	Neste	n. 600 km	Kehitte-lyssä	-	Viisipaikkainen, muo-toiltaan uudenlainen kone, jossa kuusi roottoria.
Apus Group / i-2	Saksa	Poltto-kenno	Kaasu	n. 800 km	Kehitte-lyssä	2020-luku	Nelipaikkainen, muo-toiltaan perinteinen kone, jossa propellit molemmissa siivissä.
Pipistrel Miniliner	Slovenia	Poltto-kenno	Neste	n. 1000 km	Kehitte-lyssä	2028–2030 (esittely)	20-paikkainen kone perinteisellä muotoilulla ja kahdella propellilla.
Airbus	Ranska	Poltto-kenno ja polttomoottori	Neste	1800–3700 km tai yli	Kehitte-lyssä	2035	Kolme erilaista kone-tyyppiä kattavan ZEROe-laivaston kehitysprosessi meneil-lään.
ZeroAvia	Iso-Britannia Yhdysvallat	Poltto-kenno	-	-	Kehitte-lyssä	Ensilento tulossa vuonna 2023	Yritys kehittää yhteis-työssä ilmailualan toi-mijoiden kanssa polt-to-kennoihin perustu-va voimalinjaa ja moottoreita.
Universal Hydrogen	Yhdysvallat	Poltto-kenno	Neste	-	Kehitte-lyssä	2025	Yritys kehittää yhteis-työssä ilmailualan toi-mijoiden kanssa muunnospaketteja jo olemassa oleviin len-tokoneisiin, jotta ne voivat hyödyntää ve-tyä.
NASA / CHEETA	Yhdysvallat	Poltto-kenno	Neste	-	Tutkimus	-	Tutkimusvaiheessa oleva, isomman mat-kustajamäärän lento-kone.

Taulukon 5 perusteella voidaan havaita, että valtaosa projekteista on startup-tyyppisiä, mutta samalla myös maailman suurin lentokonevalmistaja Airbus on kehittelemässä omaa vetylaivastoaan. Myös NASA:lla on käynnissä oma tutkimusprojektinsa vetylentokoneista. Esiteltujen yritysten painotus on vahvasti Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa, eikä esimerkiksi aasialaisia vetylentämiseen keskittyneitä yrityksiä ole juurikaan tunnistettu.

Vetykalusto voidaan jakaa polttokenno-, polttomoottori- ja hybridikalustoon. Tyyppilliset käyttökohteet on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Vetykaluston erilaiset variaatiot.

3.2.2 Polttokennokalusto

Polttokennokalusto käyttää polttokennojen tuottamaa sähköä sähkömoottoreissa pyörittääkseen potkureita. Voimalinja mahdollistaa myös hajautetun potkuriratkaisun, jossa sähkömoottori voi pyörittää useita potkureita. Tämä ratkaisu voi tuoda polttoainesäästöjä ja tuottaa vähemmän melua. Ratkaisu soveltuu pienehköön kalustoon, sillä polttokennojen ja niiden vaatiman jäähdytysjärjestelmän paino rajoittaa kantamaa.

Polttokennoja hyödyntävät lentokoneet edellyttävät lentokoneiden voimalinjan kokonaisvaltaista uudelleensuunnittelua. Yksinkertaistettuna polttokennolentokoneen voimalinja muodostuu polttokennosta, sähkömoottorista, suurjännite-/suurtehokaapeloinnista ja tehoelektroniikasta. Voimalinja hyötyy siis nopeasti kehittyvästä sähköisen voimalinjan toimitusketjusta mm. autoteollisuuden puolella.

Suurin haaste polttokennokalustossa on polttokennojen tehokkuuden kasvattaminen kolminkertaiseksi nykyisestä (0,75 kW/kg → 1,7–2 kW/kg). Ilman tätä kehitystä polttokennokalusto ei ole mahdollista. Haasteena on, että tehon kasvattaminen kasvattaa syntyvän lämmön määrää, mikä edellyttää suuria ja painavia jäähdytysratkaisuja.

Polttokennokaluston melutasot ovat hyvin todennäköisesti polttomoottorikalustoon verrattuna alhaisemmat, erityisesti nousujen aikana. Sähkömoottorit ovat hiljaisemmat ja potkuriääniä voidaan pienentää mm. hajautetulla ratkaisulla, jossa kone käyttää useita potkureita.

Polttokennokalusto soveltuisi ensisijaisesti alueelliseen lentoliikenteeseen. Seuraavan 5–10 vuoden aikana kalustoa kehittyä juuri tähän segmenttiin, mutta 2035 alkaen polttokennoja aletaan käyttää hybridiratkaisuna vetypolttomoottorien kanssa.

3.2.3 Vetypolttomoottorikalusto

Polttomoottorikalustoa kehitetään pitkämatkaiseen lentoliikenteeseen. Vetyä käyttäviin polttomoottoreihin siirtyminen edellyttää muutoksia itse moottoriin,



polttoainesäiliöihin sekä polttoaineen siirtämisjärjestelmiin kalustossa. Tämä edellyttää kaluston uudelleensuunnittelua sekä pitkiä sertifiointiprosesseja. Muutos olisi kuitenkin huomattavasti helpommin toteuttavissa kuin polttokenno- tai akkusähkökalustolla. Siksi on arvioitu, että tämä ratkaisu olisi vähiten ilmailuteollisuutta disruptoiva. Vetypolttomoottoreita kehittävät parhaillaan mm. Rolls-Royce ja EasyJet (Rolls-Royce, 2022).

3.2.4 Hybridikalusto

Hybridikalusto hyödyntää sekä polttokennoja että polttomoottoria. Mm. Airbus on kehittämässä tätä teknologiaa. Tällöin polttokennon tuottamaa sähköä käytettäisiin sähkömoottorissa, jota hyödynnettäisiin polttomoottorin ohella pyörittämään potkuria.

Hybriditeknologia nähdään todennäköisesti potentiaalisena vaihtoehtona siksi, että pelkästään polttokennoilla varustetun lentokoneen kantama on rajoittunut, ja vastaavasti polttomoottorissa poltetu vety aiheuttaa polttokennoon verrattuna suuremman ilmastovaikutuksen. Hybridiratkaisulla voidaan siis mahdollistaa pitkämatkainen lentoliikenne pienemmällä ilmastovaikutuksella.

Vetylentokoneiden kehityksessä on nähtävissä kaksi mahdollista polkua (Roland Berger, 2020):

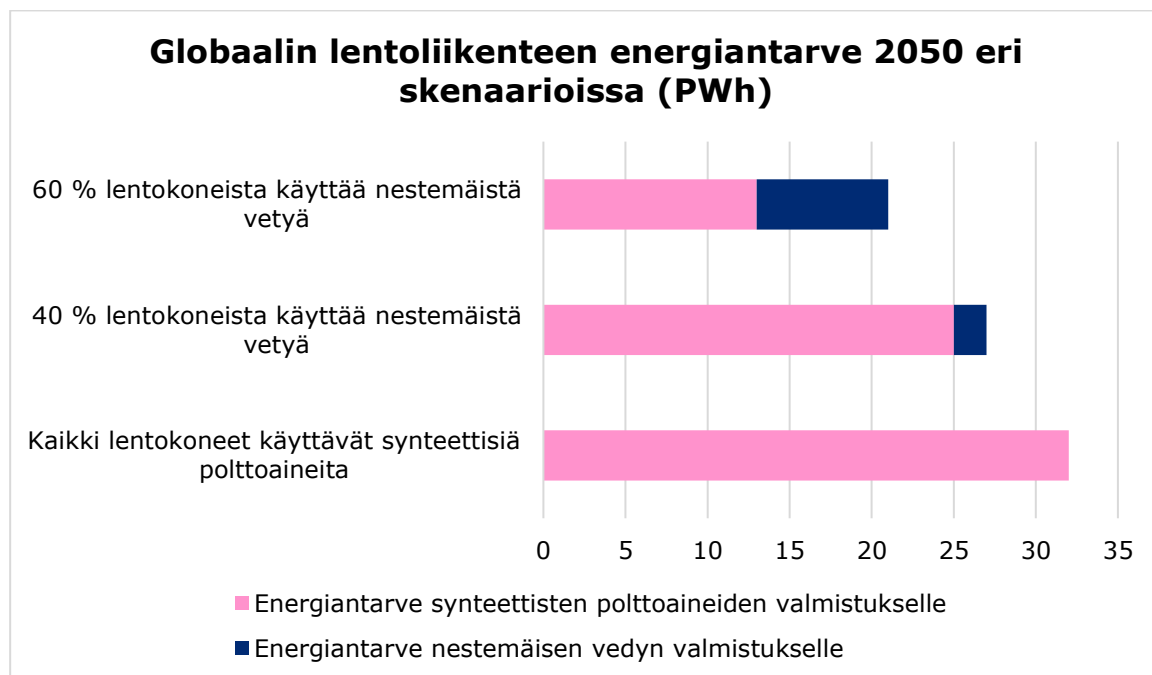
	Lentokonesuunnittelun evoluutio	Lentokonesuunnittelun kehitysharpaus
<p>Havainnekuvia kalustosta</p> <p>Kuvat: ZeroAvia, Airbus ja Apus</p>		
<p>Kaluston kuvaus</p>	<p>Vetylentokoneiden ulkomuoto mukaillee nykyistä lentokonekantaa, jossa runko on putkimainen ja siivet molemmilla sivuilla. Tämä lähestymistapa mahdollistaisi nopeamman vedyn käyttöönoton ja mahdollistaisi nykyisten tuotanto- ja sertifiointitapojen käytön. Ratkaisu ei ole täysin optimaalinen vedylle, mutta olisi pragmaattinen lähestymistapa vähentää päästöjä keskipitkällä aikavälillä.</p>	<p>Vetylentokoneiden täysin uusi ulkomuoto, joka tarjoaisi parhaimman mahdollisen aerodynamiikan ja paremman nestemäisten vetytankkien integroinnin konerunkoon. Etenemistapa mahdollistaisi myös hajautetut potkuriratkaisut, jotka tarjoaisivat pienemmällä kalustolla optimaalisen siipien aerodynamiikan.</p> <p>Suuremmassa kalustossa pidemmän rungon myötä moottorit voitaisiin asentaa koneen takaosaan, mikä tarjoaisi enemmän työntövoimaa. Riskinä täysin uusissa lentokoneen rungon muodoissa on luonnollisesti niiden ennalta-arvaamattomuus, kun täysin uusi malli tulee suunnitella toimimaan kaikissa mahdollisissa olosuhteissa turvallisesti, ottaen huomioon koneen stabiilius, matkustamotila, tuotanto ja operatiivinen toiminta.</p>

Vetylentokoneet ja nykyinen laivasto

Vetylentokoneiden integroituminen lentoyhtiöiden laivastoihin ottaa aikansa. Siksi vetylentämisen markkinoille tulo tulee optimoida. Lentokoneiden kehityssyklit taaphtuvat 15–20 vuoden välein, jolloin uusi kalusto esitellään. On arvioitu, että seuraava tilaisuus lyhyen matkan lentokoneille ajoittuu vuosille 2030–2035. (Clean Sky, 2020). Airbus on julkaisemassa ensimmäiset vetylentokoneensa vuonna 2035.

Kaupallisessa matkustajaliikenteessä liikennöitävän lentokoneen tyypillinen käyttöikä on noin 25 vuotta, joten vetykaluston kehitys lähtenee liikkeelle niistä lentoyhtiöistä, jotka ovat hankkineet kalustoa vuoden 2010 tienoilla. Vastaavasti 2020 hankittu kalusto on teknisen käyttöikänsä päässä vasta vuonna 2045. Toisaalta lentoyhtiöillä on todennäköisesti päästövähennystavoitteidensa, imagonsa ja myös kustannusten puolesta intressi ottaa uutta kalustoa kiihtyvällä tahdilla käyttöönsä. Tällöin uuden kaluston markkinapenetraatio voi olla odotettua nopeampaa. Joka tapauksessa vety ei yksinään riitä päästötavoitteiden saavuttamiseen, vaan synteettisillä polttoaineilla on merkittävä rooli lentoliikenteen tulevaisuudessa.

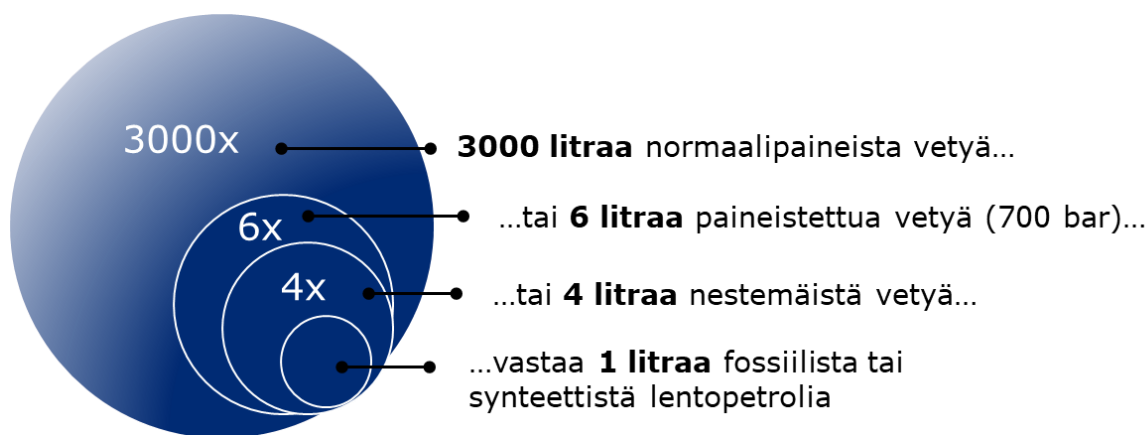
Globaalin lentolaivaston käyttövoimilla on hyvin merkittävä rooli lentoliikenteen kokonaisenergiankulutukselle. Arvion mukaan sillä, millainen lentokaluston jakauma synteettisten polttoaineita ja vetyä käyttävän kaluston välillä on vuonna 2050, on merkittävä vaikutus energiankulutukseen. Mikäli 60 % lentokoneista käyttäisi nestemäistä vetyä vuonna 2050, ja 40 % synteettisiä polttoaineita, olisi energiankulutus n. 34 % pienempi kuin jos kaikki lentokoneet käyttäisivät synteettisiä polttoaineita (vrt. kuva 11). Näin ollen on perusteltua pyrkiä nostamaan vetykäyttöisen kaluston määrää markkinoilla.



Kuva 11. Globaalin lentoliikenteen energiantarve 2050 eri skenaarioissa (PWh). Lähde: (Clean Sky, 2020)

3.2.5 Vetytankit

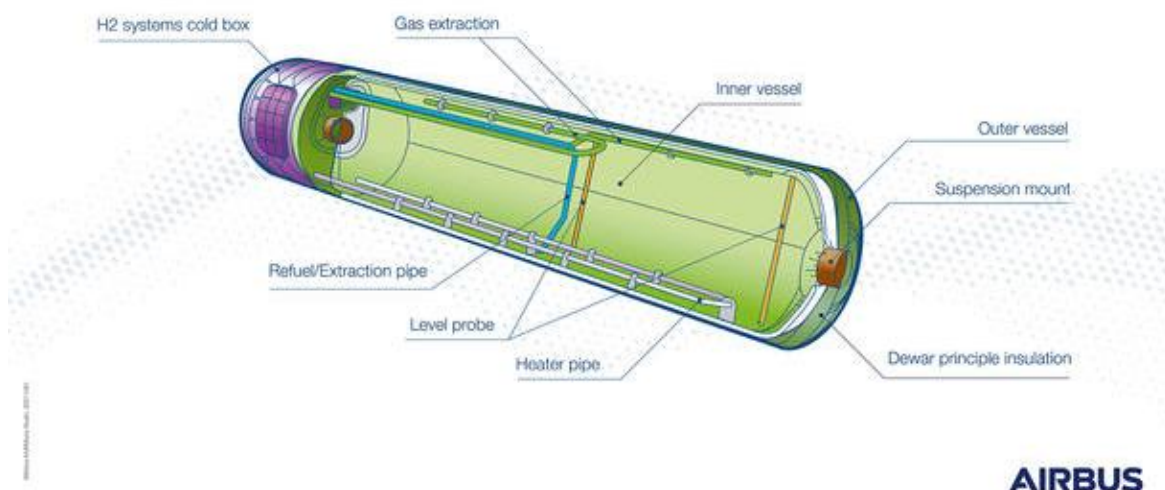
Vetykaluston tärkeimpiä tekijöitä ovat vedyn olomuoto, vetytankit, tankkaus ja vedyn käytön tapa. Vetyä voidaan käyttää paineistettuna kaasuna tai nestemäisenä. Nestemäinen vety vaatii ominaisuuksiensa myötä huomattavasti kevyemmät ja vähemmän tilaa vievät polttoainetankit kuin paineistettu vety. Tämä on erityisen merkityksellistä lentoliikenteessä, jossa ilma-alukset kantavat useita tonneja vetyä per lento. Nestemäisen vedyn (LH₂) polttoainetankit vievät silti 4 kertaa enemmän tilaa kuin lentopetrolin polttoainetankit. Siksi ne on tehokkainta integroida lentokonerungon peräosaan. Tämä vaatii rungon pidentämistä, mikä lisää lentokoneen tyhjääpainoa ja ilmanvastusta. (Roland Berger, 2020)



Kuva 12. Yhden lentopetrolilitran tilavuus suhteessa eri olomuotojen vetyyn. Tilavuustiheys on keskeinen syy sille, miksi pitkämatkainen lentoliikenne tarvitsee nestemäistä vetyä.

Nestemäinen vety tulee säilyttää hyvin kylmässä ja varastoinnissa tulee välttää lämmön siirtymistä. Siksi vetytankkien tulee olla pallomaisia tai sylinterimäisiä. Kryogeenisiä nestemäisen vedyn tankkeja on käytetty jo pitkään monilla teollisuusaloilla, mm. avaruusteollisuudessa, joten niiden haasteet ja mahdollisuudet tunnetaan hyvin.

Liquid H₂ tank



AIRBUS

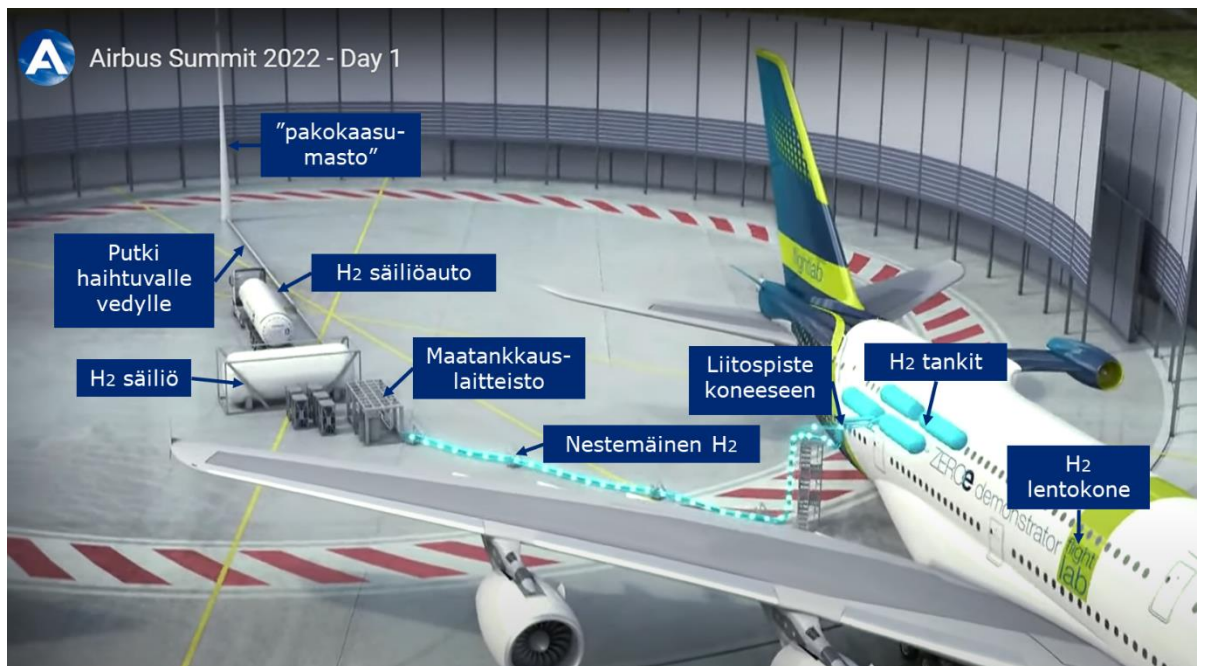
Kuva 13. Airbusin havainnollistus nestemäisen vedyn tankista.

On arvioitu, että nykyisten nestemäisten vetytankkien prototyyppien massaa tulisi pienentää noin 50 %, jotta operatiivinen toiminta olisi perusteltua. Tämä on mahdollista hyödyntämällä edistyksellisiä säiliömalleja, jotka integroidaan lentokoneen runkoon sekä hyödyntämällä kevyempiä eristysmateriaaleja. Nestemäisen vedyn hyvin alhainen lämpötila edellyttää myös merkittävää kehitystä kryogeenisissä jäähdytysjärjestelmissä. Nämä tekijät yhdessä tekevät nestemäisen vedyn polttoainesäiliöratkaisusta kompleksisia.

3.2.6 Kaluston tankkaus

Nestemäisen vedyn tankkaus tapahtuu hyvin samalla tavalla kuin lentopetrolin – eristetty tankkausletku kiinnitetään lentokoneeseen ja tankkaus aloitetaan. Tankkaus voidaan toteuttaa joko säiliöautosta tai maatankkauslaitteiston avulla. Nestemäisen vedyn tankkausletkulla virtausnopeus on yhtä nopea kuin lentopetrolilla tai synteettisillä polttoaineilla, n. 900 litraa minuutissa. Nestemäisen vedyn tankkausletku painaa kuitenkin enemmän ja on vaikeammin liikuteltava, joten lentotankkaus vaaditaan investointeja mahdollistamaan tehokas vedyn tankkaus.

Nestemäisen vedyn heikompi tilavuustiheys tarkoittaa, että tankkaus kestää nelinkertaisen ajan lentopetroliin tai synteettisiin polttoaineisiin verrattuna. Tähän on esitetty ratkaisuksi kahden tankkausletkun ratkaisua, joka puolittaisi tankkausajan. Tällöin alueellisen lennon lentokoneen tankkaus kestää 20–30 minuuttia, mikä on käänörajojen puitteissa kohtuullinen aika.



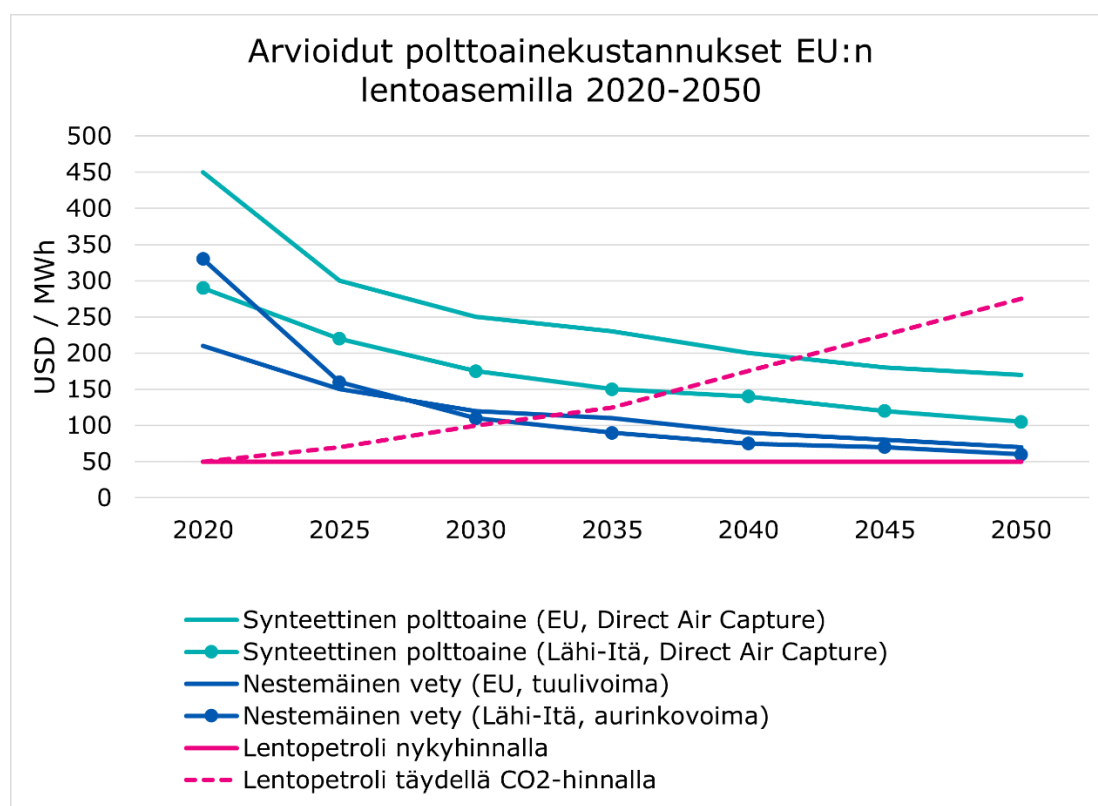
Kuva 14. Airbusin esittelemä periaate nestemäisen vedyn tankkaukselle. Kuvassa esitetyt vetytankit ovat todellisuudessa todennäköisesti suurempia.

3.2.7 Vedyn ja synteettisten polttoaineiden kustannukset

Kuten aiemmissa luvuissa on todettu, monet tekijät vaikuttavat vetyperusteisten polttoaineiden tuotantoon ja kustannuksiin. Vedyn kysynnän kasvaessa teollisuudessa, energiasektorilla ja muissa liikennemuodoissa, vedyn tuotantovolyymit tulevat kasvamaan. Tämä alentaa todennäköisesti kustannuksia. Hintojen laskeminen edellyttää myös teknologista kehitystä mm. elektrolyysereissä ja vedyn paineistustavoissa.

Tällä hetkellä nestemäisen vedyn hinta on lähes nelinkertainen fossiiliseen lentopetroltiin verrattuna, mutta tämän hintaeron ennustetaan tasoittuvan nykyisen lentopetrolin hintatasolle vuoteen 2050 mennessä. Nestemäisen vedyn yksinkertaisemman prosessin vuoksi sen hintataso tulee olemaan synteettisiä polttoaineita alhaisempi.

Tulevaa kehitystä ennakoitaessa on kuitenkin syytä tunnistaa, että hiilen hinnoittelu on kiristymässä globaalisti ja erityisesti Euroopassa. Jos ja kun erilaiset päästöjä vähentämismekanismit nostavat lentopolttoaineiden hintaa, voivat vetykalustoon investoimisen liiketoiminnalliset edellytykset parantua. Clean Sky 2 -hankkeessa on arvioitu, että jos lentoliikenteelle ja lentopolttoaineille kaavailut hiilen hinnoittelun keinot toteutuvat, voisi nestemäinen vety olla jo vuodesta 2030 edullisempaa kuin fossiilinen lentopetroli. Kuvassa 15 on esitetty arvioita synteettisten ja nestemäisen vedyn tuotantokustannuksista energiayksikköä kohti.



Kuva 15. Arvioidut polttoainekustannukset vuoteen 2050 mennessä. Lähde CleanSky2.

Kuvasta nähdään, että hiilidioksidin nappaaminen ilmasta on kallista, mikä johtaa korkeampiin synteettisten polttoaineiden hintoihin. Suomessa tilanne voi olla toinen, kun hiilidioksidi voidaan ottaa suoraan lähteestä. Tämä prosessi on todennä-

köisesti edullisempi. Silti nestemäisen vedyn tuottaminen on kustannustehokkaampaa, koska prosessi on yksinkertaisempi. Myös sillä on merkitystä, missä vety tehdään. Lähi-idän merkittävä aurinkovoiman potentiaali tekee siitä hyvin kustannustehokkaan paikan tuottaa vetyä. Myös Euroopassa tuulivoimalla voidaan tuottaa lähes yhtä edullista vetyä, ja erityisesti Suomella on tässä suurien tuuli-investointien myötä hyvät edellytykset.

3.3 Regulaatio

LUVUN 3.3 KESKEINEN SISÄLTÖ

- ▶ Kehittelyssä oleva vetykalusto tukeutuu tällä hetkellä vahvasti polttokennoihin.
- ▶ Vetykäyttöistä lentoliikennettä koskeva regulaatio on vasta kehitysvaiheessa, joten vetylentämiseen sovelletaan perinteisen lentoliikenteen regulaatiota.
- ▶ Euroopan lentoturvallisuusvirasto EASA on kehittämässä vetylentokoneita ja -moottoreita koskevia tyyppihyväksynnän periaatteita.
- ▶ Lentokoneen tyyppihyväksyntäprosessi on monimuotoinen ja kestää useita vuosia.

Vetylentokoneiden täytyy täyttää samat sääntelyn ehdot kuin kaikkien muidenkin lentokoneiden. Sääntelyn luonne ja määrä riippuu muun muassa lentokoneen koosta ja käyttötarkoituksesta. Tämän työn näkökulmasta olennaista on kuitenkin kaupalliseen matkustajalentoliikenteeseen käytettävien (vety)lentokoneiden regulaatio. [Sähköinen lentäminen Suomessa](#) -selvityksen luvussa 2.6 on kuvattu tarkemmin lentämisen yleistä sääntelyä ja ehtoja, jotka kaupallisessa matkustajalentoliikenteessä tulee täyttää. Tässä raportissa keskitytään siksi nimenomaisesti vetykäyttöisyyteen liittyviin sääntelyn erityispiirteisiin.

Mitä uutta vety tuo regulaatioon?

Toistaiseksi nimenomaisesti vetykäyttöisiä lentokoneita koskevaa sääntelyä ei käytännössä ole olemassa, vaan vetylentokoneisiin sovelletaan kaikkia muitakin lentokoneita koskevaa sääntelyä. Esimerkiksi Euroopan lentoturvallisuusvirasto EASA:n dokumentissa (EASA, 2022c), jossa määritettiin sähkö- ja hybridilentokoneita koskevaa regulaatiota, nimenomaisesti todettiin, että vety käyttövoimana jätetään kyseisen dokumentin rajauksen ulkopuolelle¹. Ennen kuin lentotoiminnan harjoittaja voi lähteä hakemaan lentotoiminnallisia hyväksyntöjä, pitää ilma-aluksen tyyppihyväksynnän haltijan olla sertifioinut vetykäyttöinen ilma-alus, jota lentotoiminnan harjoittaja aikoo käyttää. Ilma-aluksen sertifiointiin kuuluu myös sen käyttöönsoveltuvuustietojen, kuten lentokäsikirjan, huoltokäsikirjan ja miehistön tyyppikoulutusvaatimusten viranomaishyväksyntä (Lentokelpoisuusasetuksen Part 21 ja ao. sertifiointieritelvät). Lentotoiminnan harjoittaja on velvollinen noudattamaan näitä hyväksyntäjä käsikirjoja.

Vetykäyttöisten moottoreiden tai lentokoneiden tyyppihyväksyntään ei toistaiseksi ole erillisiä prosesseja, vaan mahdolliset hyväksynät tapahtuvat perinteisille lentokoneille tarkoitettujen tyyppihyväksyntäperiaatteiden mukaisesti. Oletuksena on, että vetylentokone tai -moottori on mahdollista tyyppihyväksyä jo nyt. EASA

¹ "Any design that includes the use of hydrogen, whether used to feed fuel cells or combustion engines is considered, at this stage, to be outside the scope of this Special Condition. These designs require further work and research before defining the associated certification requirements."

on kuitenkin kehittämässä nimenomaisesti vetylentokoneita ja -moottoreita koskevia tyyppihyväksynnän periaatteita.

EU-komission [asetuksen 965/2012](#) puitteissa vety on sinänsä sallittu käyttövoima, mutta vedyn käyttäminen käyttövoimana edellyttää viranomaisen ennakkohyväksyntää. Lentotoiminnallista hyväksyntää varten lentotoiminnan harjoittajan on asetuksen kohdan CAT.OP.MPA.180 mukaisesti:

- 1) *määritettävä käytössä olevan polttoaine-/energiajärjestelmän turvallisuuden perustaso;*
- 2) *osoitettava valmiutensa tukea ehdotetun yksittäisen polttoaine-/energiajärjestelmän käyttöönottoa, mukaan lukien valmius harjoittaa riittävää lentotoiminnan valvontaa ja varmistaa asiaankuuluvien turvallisuustietojen vaihto lentotoiminnan valvonnasta vastaavan henkilöstön ja ohjaamomiehien välillä; ja*
- 3) *tehtävä turvallisuusriskien arviointi, jolla osoitetaan, miten käytössä olevan polttoaine-/energiajärjestelmän tasoa vastaava turvallisuustaso saavutetaan.*

Vastaavasti energiajärjestelmien viranomaishyväksyntää on 30.10.2022 alkaen koskenut em. asetuksesta EU-komission täytäntöönpanoasetuksen 2021/1296 mukaisesti muutettu kohta ARO.OPS.225 ("Polttoaine-/energiajärjestelmien hyväksyminen"):

- a) *Toimivaltaisen viranomaisen on hyväksyttävä kaupallisen ilmakuljetustoiminnan harjoittajan ehdottama polttoaine-/energiajärjestelmä, jos lentotoiminnan harjoittaja osoittaa noudattavansa kaikkia tässä asetuksessa säädetyt sovellettavia vaatimuksia, jotka koskevat kaupallisessa ilmakuljetustoiminnassa käytettävien lentokoneiden tai helikoptereiden polttoainetta/energiaa.*
- b) *Toimivaltaisen viranomaisen on arvioitava ja valvottava polttoaine-/energiasuunnittelua ja lennonaikaista uudelleensuunnittelua, lentopaikan valintaa sekä polttoaineen/energian kulutuksen hallintaa lennon aikana koskevia toimintaperiaatteita, jotka liittyvät polttoaine-/energiajärjestelmiin, sekä näiden polttoaine-/energiajärjestelmien käyttöönottoa tukevia prosesseja.*
- c) *Toimivaltaisen viranomaisen on yksittäisiä polttoaine-/energiajärjestelmiä hyväksyessään a ja b alakohdan lisäksi*
 - 1) *varmistettava, että lentotoiminnan harjoittaja on osoittanut nykyisen polttoaine-/energiajärjestelmän turvallisuuden perustason;*
 - 2) *arvioitava lentotoiminnan harjoittajan valmiudet tukea ehdotetun yksittäisen polttoaine-/energiajärjestelmän käyttöönottoa; arvioinnin on kohdistuttava vähintään seuraaviin:*
 - i. *lentotoiminnan harjoittajan hallintojärjestelmä,*
 - ii. *lentotoiminnan harjoittajan operatiiviset valmiudet;*
 - 3) *varmistettava, että ehdotettua yksittäistä polttoaine-/energiajärjestelmää tukevalla lentotoiminnan harjoittajan turvallisuusriskien arvioinnilla saavutetaan käytössä olevaa polttoaine-/energiajärjestelmää vastaava turvallisuustaso; ja*

- 4) *laadittava valvontasuunnitelma hyväksytyin yksittäisen polttoaine-/energiajärjestelmän arvioimiseksi määräajoin, jotta voidaan todentaa järjestelmän vaatimustenmukaisuus tai päättää, olisiko järjestelmää muutettava tai olisiko se kumottava.*
- d) *CAT.OP.MPA.182 kohdan d alakohdan 2 alakohdassa tarkoitettuun hyväksyntään on sisällyttävä luettelo syrjäisistä lentopaikoista, jotka lentotoiminnan harjoittaja on määrittänyt kullekin ilma-alustyypille, johon hyväksyntää sovelletaan.*
- e) *Toimivaltaisen viranomaisen on ilmoitettava virastolle polttoaine-/energiajärjestelmiin liittyvien vaihtoehtoisten vaatimusten täyttämisen menetelmien arvioinnin aloittamisesta, sanotun kuitenkaan rajoittamatta ARO.GEN.120 kohdan d ja e alakohdan soveltamista.*

Mikäli vetylentokone ei täytä jommankumman edellä kuvatun asetuksen kohdan ehtoja, ei sillä voida lentää kaupallisia lentoja, vaikka lentokone olisikin tyyppihyväksytty.

Kaupallisessa lentoliikenteessä kaikkien lentokoneiden on täytettävä EU-asetuksen 965/2012 kohdissa CAT.OP.MPA.181, CAT.OP.MPA.182 ja CAT.OP.MPA.185 esitetyt vaatimukset polttoaineen tai energian riittävydestä. Siten myös vetylentokoneilla lennettäessä tulee lentokoneessa olla lennon alkaessa²

1. rullauspolttoainetta,
2. reittipolttoainetta,
3. reittivarapolttoainetta,
4. määrävaralentopaikalle lentämiseen tarvittava polttoaine,
5. loppuvarapolttoainetta,
6. lisävarapolttoainetta,
7. ylimääräistä polttoainetta, sekä
8. tarvittaessa harkinnanvaraista polttoainetta

Käytännössä kohta 2 tarkoittaa sitä polttoaineen tai energian määrää, joka vaaditaan lennon suorittamiseen suunnitellusti, ja kohdassa 3 varaudutaan mahdollisiin yllättäviin tekijöihin lennon aikana. Erityisen merkittäviä ovat kohdat 4 ja 5. Minimissään kohta 4 edellyttää lennolle otettavan polttoainetta 15 minuutin lentoaikaa vastaavan määrän, mikäli määrävaralentopaikkaa ei ole. Kohdassa 5 edellytetään puolestaan lentokoneen moottorityypistä riippuen ylimääräistä polttoainetta 30 tai 45 minuutin lentoaikaa varten³, jotta lentokone voi tarvittaessa esim. odottaa laskeutumislupaa määränpäässään. Näiden vaatimusten puitteissa lentokoneen tulee kyetä lentämään useita satoja kilometrejä pidempi matka kuin mitä varsinainen lentoreitti on pituudeltaan. Vetylentokoneilla oletetut kantamat eivät ole niin lyhyitä kuin sähkölentokoneilla, mutta varapolttoaineita koskevilla vaatimuksilla on todennäköisesti silti suhteellisesti suurempi vaikutus vetylentokoneisiin kuin perinteisiin lentokoneisiin.

² Asetustekstissä puhutaan aina "polttoaine/energia":sta, vaikka listassa onkin lukemisen helpottamiseksi käytetty vain termiä "polttoaine".

³ Mäntämoottorikäyttöisillä lentokoneilla 45 minuutin lentoon tarvittava polttoaine/energia ja turbini-moottorilentokoneilla 30 minuutin lentoon tarvittava polttoaine/energia.

3.4 Koontitaulukko tarkasteltavista käyttövoimista

Taulukko 6. Koonti tarkasteltavista käyttövoimista.

	Merkittävä etu
	Merkittävä haaste

	Vety polttokennossa	Vety polttomoottorissa	Synteettiset polttoaineet polttomoottorissa
Kuvaus	Polttokenno muuttaa vedyn ja hapen ilmasta sähköksi. Sähköä käytetään sähkömoottorissa, joka pyörittää potkureita.	Polttomoottori polttaa vetyä ja happea ilmasta pyörittääkseen turbiinia. Sovelluksena vedylle kehitetyt suihkumoottorit tai potkuriturbiinit.	Polttomoottori polttaa synteettistä hiilivetyä polttomoottorissa pyörittääkseen turbiinia. Sovelluksena nykyiset suihkumoottorit tai potkuriturbiinit.
Tehokkuus primäärienergiasta työntövoimaksi	20~29 %	15~23 %	10~15 %
Ilmastovaikutus verrattuna lentopetroltiin	75–90 % pienempi ilmastovaikutus	50–75 % pienempi ilmastovaikutus	30–60 % pienempi ilmastovaikutus
Käyttökohteet	Alueellinen lentoliikenne	Alueellinen ja mannertenvälinen lentoliikenne, mutta <u>ei</u> yli 10 000 km	Ei rajoitteita
Operatiivinen toiminta	1–2x pidempi tankkaus aika alueellisessa liikenteessä	2–3x pidempi tankkaus aika keskipitkillä ja pitkillä matkoilla	Nykyisenkaltaiset kääntöajat
Lentoasema- ja infrastruktuuri	Vaatii nestemäisen vedyn (LH ₂) tankkaus- ja säilytysinfrastruktuuria	Vaatii nestemäisen vedyn (LH ₂) tankkaus- ja säilytysinfrastruktuuria	Voidaan hyödyntää olemassa olevaa infrastruktuuria
Polttoaineen kustannus 2050	Lähes sama kuin nykyisin lentopetrolilla	Lähes sama kuin nykyisin lentopetrolilla	Huomattavasti kalliimpaa kuin nykyisin lentopetroli
Kaluston kehitys	Vaatii todennäköisesti koko voimalinjan ja lentokoneiden uudelleensuunnittelun, jotta polttokennot, sähköjärjestelmät ja vetytankit saadaan toimimaan.	Vaatii nykykaluston uudelleensuunnittelua, jotta vetytankit saadaan mahdutettua lentokoneiden peräosaan.	Toimii nykyisellä kalustolla eikä vaadi merkittäviä muutoksia kalustoon
Regulaatio	Vetykalustolle on vasta kehitteillä oma regulaationsa. Edistykselliset lentokonemallit vaativat hyvin pitkät tuotekehitys- ja sertifiointiprosessit		Nykyinen regulaatio sallii vain 50 % kestävästä lentopolttoaineen sekoitussuhteen. Vuoteen 2030 mennessä sekoitussuhde nousee 100 %:iin

4 Vetylentämisen rooli ja käyttöönotto Suomessa

4.1 Vetylentämisen rooli Suomen liikennejärjestelmässä

4.1.1 Johdanto

Miten vetylentäminen vaikuttaa liikennejärjestelmän kehitykseen?

Kansainvälisessä liikenteessä käyttövoiman muutos vetyyn ei periaatteessa muuta lentoliikennettä isossa kuvassa, sillä lentäminen säilyy edelleen nopeimpana ja turvallisimpana liikennemuotona pitkillä matkoilla. Imagolisesti tarkasteltuna lentämisessä voi tapahtua muutos parempaan, sillä vedyn ilmastovaikutukset ovat merkittävästi pienemmät kuin lentopetrolilla.

Kotimaan lentoliikenteessä käyttövoiman muutoksen vaikutukset ovat samankaltaisia. Ympäristöystävällisempi vety voi vaikuttaa suotuisasti lentämisen yleiseen imagoon ja lisätä samalla sen houkuttelevuutta. Sähköön ja vetyyn perustuvat käyttövoimat voivat synnyttää myös pienimuotoisempaa lentotoimintaa – varsinkin jos ne tarjoavat kustannustehokkuutta pienempien matkustajavolyymien opeointiin. Mikäli näin tapahtuisi, voisivat lyhyen kantaman lennot yleistyä myös Suomen sisäisessä liikenteessä. Tämän seurauksena Suomeen voisi muodostua uusia lentoliikenteen yhteyksiä, millä olisi vaikutuksia olemassa olevaan liikennejärjestelmään. Lentämisen kulttuurin kehitystä on kuitenkin erittäin vaikea ennakoita, sillä kulttuurinmuutos perustuu aina myös ihmisten käyttäytymiseen sekä valintoihin.

Vaikka vetylentäminen voi lisätä lentoliikenteen tarjontaa pienemmillä ilmastovaiikutuksilla, haasteena saattaa kuitenkin olla lentämisen hinta. Mahdollinen käyttövoimamuutos ei välttämättä pienennä lentämisen kustannuksia lyhyellä aikavälillä, sillä muutos kustannustasossa vaatii aikaa. Arvioiden mukaan nestemäinen vety olisi vasta vuonna 2050 yhtä edullista kuin nykyisin lentopetroli.

Muutos liikennejärjestelmän tarkastelutavassa

Vetytalouden kehitys sekä sähköistyminen näkyvät tulevaisuudessa kaikissa liikennemuodoissa. Kaikkien liikennejärjestelmien eli tie-, rautatie-, lentoliikenne-, meri- ja sisävesiliikennejärjestelmien ilmastovaikutus pienenee merkittävästi. Tällöin on todennäköistä, että tarkastelu siirtyy yhä suuremmissa määrin muihin liikennejärjestelmän tekijöihin, kuten nopeuteen, liikenneturvallisuuteen, tehokkuuteen ja tilantarpeeseen. Myös kokonaisenergiatehokkuus on entistä tärkeämpää.

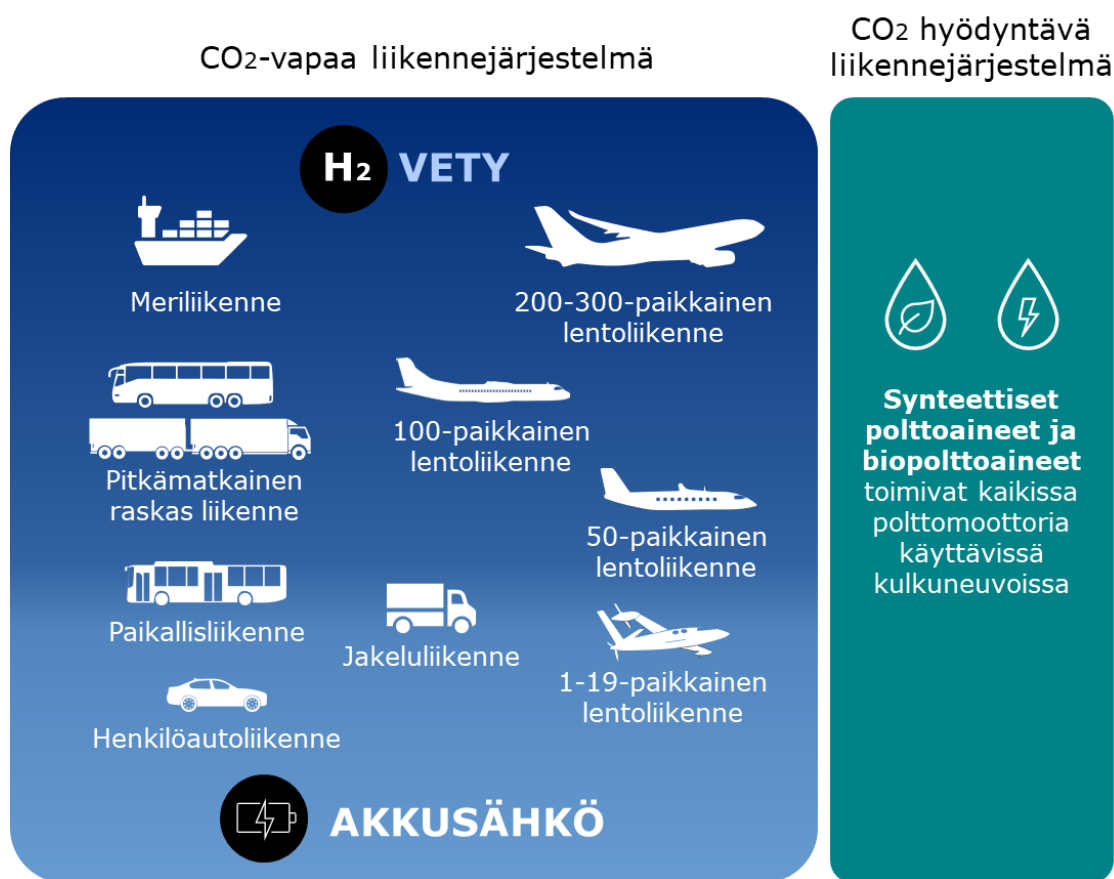
Lentoliikenteen etuna on, että se on liikenneturvallisin ja nopein liikennemuoto. Ilmateitse liikennöinti on maankäytön kannalta hyvin tehokasta, ja ilmaliikenneinfrastruktuuri on Suomessa melko kattava. Ilmastovaikutusten pienentyessä nämä edut korostuvat. Toisaalta edelleen on tunnistettava, että rautatieliikenne on hyvin energiatehokasta suurten ihmismäärien liikuttelussa – näin ollen lentoliikenteen ei kannata kilpailla lyhyehköillä matkoilla suurista matkustajavolyymeista. Vetylentäminen asettuneekin pidempimatkaiseen ja keskisuurten volyyymien liikenteeseen.

Suomelle vety- ja sähkölentämisen kehityksestä olisi etua, sillä hyödyntämällä rautatieliikenteen ja lentoliikenteen ominaisia etuja, voitaisiin koko Suomen säävutettavuutta parantaa kestäväällä tavalla. Suurille volyymeille ja lyhyehköille mat-

koille rautatieliikenne on ylivoimaisesti paras vaihtoehto. Matkan pidentyessä lentoliikenne saa kilpailuetua. Myös matkustajavolyymit on tärkeää ottaa huomioon – pieniä volyyymejä ei ole tarkoituksenmukaista kuljettaa rautateitse, vaan tulevaisuudessa vety- ja sähkölentäminen voisivat soveltua tälle segmentille.

Uudet käyttövoimat liikennejärjestelmässä

Akkukäyttöinen voimalinja toimii parhaiten melko kevyessä kalustossa, jolloin akkujen paino ei rajoita kantamaa liiaksi. Jo nyt henkilöautoliikenne sähköistyy nopeasti ja myös jakeluliikenteessä sähköisen kaluston määrä kasvaa. Näissä segmenteissä täyssähköinen voimalinja on parhaimmillaan. Akkuteknologialla on kuitenkin kapasiteettirajoitteensa, minkä myötä vety tai siitä jalostetut synteettiset polttoaineet voivat olla parempi vaihtoehto raskaammassa ja pitkämatkaisessa kalustossa, riippumatta liikennemuodosta. Synteettisiä ja biopolttoaineita voidaan käyttää missä tahansa liikennemuodossa, ja ne soveltuvat nykyisenkaltaisiin polttomoottoreihin.



Kuva 16. Tulevaisuuden liikennejärjestelmän käyttövoimat ja käyttökohteet.

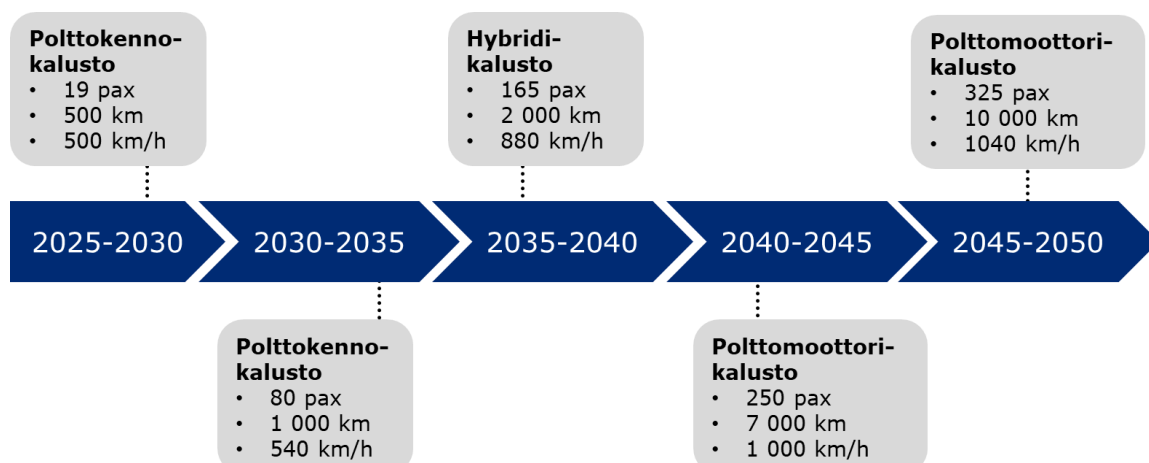
Vetyä vai synteettisiä polttoaineita?

Vastaus keskipitkällä aikavälillä on, että molempia. Vetytalouden- ja teknologian kehitys ottaa aikansa, jolloin päästövähennystavoitteet voidaan saavuttaa vain sähköistämällä liikennettä sekä ottamalla nopeasti käyttöön synteettisiä polttoaineita ja biopolttoaineita. Biopolttoaineissa kestävästi tuotettujen raaka-aineiden rajallisuus johtaa väistämättä tilanteeseen, jossa synteettisiä polttoaineita tarvitaan merkittäviä määriä.

Kestävät lentopolttoaineet eivät vähennä ilmakehässä olevan hiilidioksidin määrää, vaan CO₂ kiertää ”suljetussa järjestelmässä”. Vety- tai akkupohjaisessa järjestelmässä ei käytetä hiilidioksidia lainkaan. Ne ovat siis vaihtoehtoja täysin hiilittömälle liikennejärjestelmälle. On pohdinnan arvoista, mikä on hyvin pitkän aikavälin tavoite globaalissa energia- ja liikennejärjestelmässä. Mikä on hiilidioksidin rooli esim. vuonna 2100? Vastaus tähän määrittää osaltaan myös liikennejärjestelmän kehitystä hyvin pitkällä aikavälillä.

4.1.2 Arvio vetylentämisen kehityksen aikajänteestä

Lentoliikennejärjestelmässä vetylentokoneiden kehitys tapahtuu teknologian näkökulmasta todennäköisesti asteittain kuvan 17 mukaisesti, lähtien liikkeelle pienestä kalustosta. On huomioitava, että monet tekijät, kuten pitkät sertifiointiprosessit uudelle vetykalustolle sekä nykyisen kaluston käyttöikä ja kierto, vaikuttavat merkittävästi vetykaluston kaupalliseen yleistymiseen. Seuraavien lukujen arviot vetykaluston kehittymisestä perustuvat arvioihin **kaupallisen lentotoiminnan mahdollistumisesta vetykalustolla**.



Kuva 17. Vetykäyttöisen lentokaluston teknologinen kehityspolku. Arviot lähteistä (Clean Sky, 2020), (Airbus, 2022) Kaupallinen lentotoiminta mahdollistuu esitettyä teknologista aikataulua myöhemmin.

4.1.3 2025–2030

Vetykaluston kehitys lähtee liikkeelle pienemmästä, korkeintaan 19-paikkaisesta kalustosta yksittäisissä pilottikohteissa. Tällä aikavälillä vetykalusto ei todennäköisesti yllä kaupalliseen käyttöön. Pienempi kalusto soveltuu taksimaiseen liikennöintiin, jossa matkustamohenkilökuntaa ei tarvita. Tässä kokoluokassa täyssähköiset lentokoneet ovat kilpailukykyisiä, joten polttokennokalustolla voi olla vaikeampi saada pysyvää etua. Pienen kaluston kehittäminen myös vedylle on kuitenkin tärkeä askel vetylentämisen kehitykselle, josta toimijat saavat tärkeää oppia operatiivisesta toiminnasta ja teknologiasta.

Ennen vuotta 2030 lentoyhtiöt voivat hyödyntää synteettisiä polttoaineita sekoitettuna lentopetroltiin sopivalla suhteella. Synteettisten polttoaineiden hinta tulee olemaan kuitenkin hyvin korkea, mikä rajoittanee niiden käyttöä merkittävästi.

Tällä aikajänteellä vetylentämisellä ei ole vielä liikennejärjestelmätason vaikutuksia, sillä kalustoa ei saada kaupalliseen käyttöön, ja Suomessa taksilentoliikenne-markkina on hyvin pieni.

4.1.4 2030–2035

Aikavälillä nykyinen lentokalusto voi alkaa hyödyntää 100 % synteettistä polttoainetta, mutta edelleen synteettisen polttoaineen korkea hinta rajoittaa sen käyttöä. Jos Euroopan komission ehdotus osana ReFuelEU Aviationia menee läpi, olisi synteettisten lentopolttoaineiden vaadittu osuus eurooppalaisilta lentoasemilta lähtiessä noin prosentin vuonna 2035.

On epävarmaa, pystyvätkö valmistajat saamaan tälläkään aikavälillä vetykalustoa kaupallisen lentoliikenteen käyttöön. Uuden kaluston sertifiointiprosessit voivat kestää 10 vuottakin. Mikäli sertifiointi onnistuisi, voisi polttokennokalustoa tulla tarjolle pienemmiltä lentokonevalmistajilta alueelliseen reittilentoliikenteeseen. Tällöin teknologiaa voitaisiin pilotoida myös Suomessa tiettyjen lentoasemaparien välillä. Liikennejärjestelmätasolla vaikutukset olisivat edelleen marginaalisia.

4.1.5 2035–2040

Airbus arvioi julkaisevansa vuonna 2035 oman ZEROe-laivastonsa, johon kuuluvat hybriditeknologialla toimivat turboprop- ja turbofan-alukset sekä uudenlainen blended wing-alus. On epävarmaa, tarkoittaako tämä aikataulu myös kaupallisen lentotoiminnan kyvykkyyttä. Lentokonesuunnittelun evoluution myötä Airbusin mainitut turboprop- ja turbofan -alukset voisivat saada kaupalliset luvat vuosikymmenen loppuun mennessä, mutta blended wing-alus vaatinee vielä pidemmät tuotekehitys- ja sertifiointiaikataulut.

Suuren lentokonevalmistajan ilma-alukset vakuuttanevat valtaosan lentoyhtiöistä, jolloin vetykaluston markkinoille tulo voi kiihtyä vuosikymmenen lopulla. On oletettavaa, että nykyisin kotimaan lennoilla käytettävä kalusto, kuten Finnairin vuosina 2007–2012 hankitut noin 70-paikkaiset ATR 72:t alkavat tulla käyttöikänsä päähän. Suomen sisäisille lennoille jouduttaneen siis joka tapauksessa hankimaan uutta kalustoa. Vetykäyttöistä kalustoa voitaisiin operoida suosituilla kotimaan reiteillä, kuten Vaasa–Helsinki ja Kuopio–Helsinki, mutta samalla poltto- tai hybridikalustolla voitaisiin toteuttaa lentoja myös lähimaihinkin, esimerkiksi länsirannikon lentoasemilta Tukholmaan.

Kotimaan sisäisten lentojen päästöt kääntyisivät laskuun, kun olemassa olevalla kalustolla voitaisiin siirtyä käyttämään synteettisiä polttoaineita ja osalle reiteistä hankittaisiin polttokennokalustoa. Tämä edellyttäisi merkittävää kehitystä vetynfrastruktuurissa. Jos Euroopan komission ehdotus osana ReFuelEU Aviationia menee läpi, synteettisten polttoaineiden vaadittu osuus eurooppalaisilla lentoasemilla olisi n. 2,5 % vuonna 2040.

4.1.6 2040–2045

Vetykaluston kantamien ja kapasiteetin yleistymisen mannertenväliseen liikenteeseen edellyttäneen täysin uudenlaista blended-wing-body-kalustoa, mikä parantaisi merkittävästi lentokaluston energiatehokkuutta. Tällaisten alusten on spekuloitu olevan markkinoilla aikaisintaan tällä aikavälillä. Nämä alukset hyödyntäisivät vetypolttomootoreita mahdollistaakseen jopa 7 000 km kantamat. Ensimmäisiä tämän tyyppin aluksia saatettaisiin nähdä siis tällä aikavälillä. Myös perinteiset lentokonemallit ovat mahdollisia, mutta edellyttävät merkittävää kehitystä nestemäi-

sen vedyn tankeissa. Niiden operointi olisi myös huomattavasti nykyistä kalliimpaa. Tämän lentokonetyypin koneissa vetykaluston markkinoille tuloa voitaisiin hieman nopeuttaa.

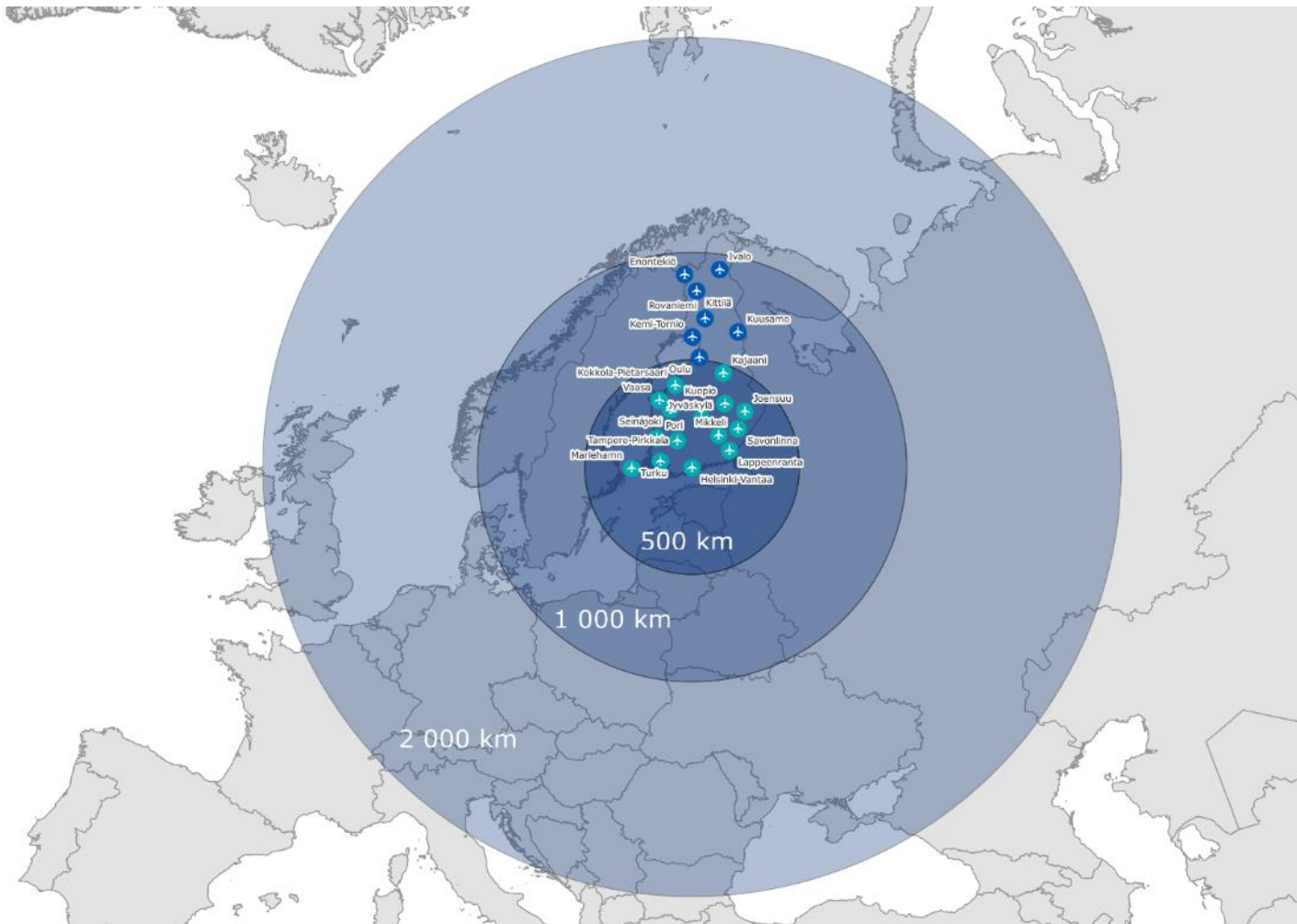
Hieman lyhyemmän kantaman markkinassa vetykaluston markkinaosuus kasvaa tällä aikavälillä ja yhä useampi lentoyhtiö voi hankkia vetykalustoa laivastoonsa. Nestemäisen vedyn infrastruktuuri on todennäköisesti laajentunut ja vedyn hinta lähenee jo nykyistä lentopetrolin hintaa. Synteettisten polttoaineiden vaadittu osuus lentoasemilla voisi olla n. 5 % luokkaa vuonna 2045.

Kuten aiemmin arvioitiin, voi fossiilisen lentopetrolin hinta nousta sellaiselle tasolle, että nestemäinen vety olisi hintakilpailukyistä tällä aikavälillä. Toteutessaan tämä edelleen kiihdyttäisi siirtymää uuteen kalustoon. Toisaalta lentämisen hinta voisi tällöin nousta, mikä todennäköisesti vaikuttaisi myös yleisellä tasolla lentämisen kysyntään.

Suomessa tämä voisi tarkoittaa sitä, että osa Suomen sisäisestä ja useisiin Euroopan maihin suuntautuvasta lentoliikenteestä voitaisiin operoida vetykalustolla. Käytännössä kaluston vaihtamisessa kestää aikansa eikä Suomesta operoivien lentoyhtiöiden koko kalustoa ehditä tällä aikavälillä vaihtaa.

Yksinkertaistaen, lentoliikenne voisi näyttää Suomessa seuraavalta (kuva 18):

- **Täyssähköistä taksilentoliikennettä** ja reittilentoliikennettä pienellä kalustolla ja volyyminä alle 500 km matkoilla
- **Polttokennokalustolla alle 1 000 km reittilentoliikennettä** keskisuurille volyymeille Pohjoismaiden sisäisessä liikenteessä
- **Hybridikalustolla (vetypolttomoottori ja polttokenno) Euroopan sisäistä liikennettä** 2 000 km asti. Suomesta mm. suorina lentoja Saksaan.
- **Valtaosa lennoista edelleen fossiilisilla tai kestävillä nestemäisillä lentopolttoaineilla**



Kuva 18. Sähköisen ja vetykaluston kantamat 2040–2045. Akkusähköllä voidaan operoida kaupallisesti 500 km asti keskikokoisella kalustolla. Polttokenno- tai hybridikalusto voi soveltua 500–2000 km matkoille ja tätä ylittävällä osuudella on käytettävä vetypoltto- tai nestemäisiä hiilivetyjä.

4.1.7 2045–2050

Hyvin pitkän matkan, n. 10 000 km vetylentokoneet ovat teoriassa mahdollisia tällä aikavälillä. Nämäkin alukset voisivat hyödyntää perinteistä lentokonerunkoa tai blended-wing-runkoa. Jälleen, ensiksi mainitun markkinoille tulo olisi nopeampaa, mutta blended-wing-runko tarjoaisi huomattavia etuja energiatehokkuudessa (jopa 15–20 %). Tämän kaluston kehitys vaatii kuitenkin hyvin pitkät tuotekehitys- ja sertifiointiprosessit.

2050-lukua kohti mentäessä vetykaluston rooli on voinut kasvaa merkittävästi ja tällä aikavälillä 2020-luvun vaihteessa käyttöönotetun kaluston uusiminen kiihtyy. Myös hyvin pitkämatkaisessa lentoliikenteessä voitaisiin nähdä vetypoltto- moottorikalustoa. Asiantuntija-arvioiden mukaan tällä aikavälillä 100 % alueellisen lentoliikenteen kalustosta ja 50 % keskipitkän kantaman kalustosta korvautuisi vetykalustolla. **Tyypillisellä uusiutumistahdilla tämä tarkoittaisi, että vuonna 2050 n. 40 % kaikista maailman lentokoneista olisi vetykäyttöisiä** – loput käyttäisivät bio- tai synteettisiä polttoaineita. Samassa lähteessä esitetään myös arvio maksimiskenaariolle, jossa 60 % kalustosta voisi olla vetykäyttöistä. (Clean Sky, 2020)

Suomessa vaikutukset näkyisivät edelleen laskevin kotimaan lentoliikenteen päästöinä, kun valtaosa lennoista voitaisiin operoida vetykalustolla.

Teoreettinen laskelma Suomen kotimaan liikenteen ja suomalaisten matkustajien ulkomaanliikenteen ilmastovaikutuksen vähennyspotentiaalista vuonna 2050.

Lähtötiedot:

- Suomen kotimaan lentoliikenteen ilmastovaikutus on 0,21 Mt CO₂-ekv vuodessa (Traficom, 2022c)
- Suomalaisten matkustajien ulkomaanlentojen ilmastovaikutus on yhteensä 8,0 Mt CO₂-ekv vuodessa (Yle, 2019).

Oletukset:

- Lentoliikennemäärät ovat vuonna 2050 samat kuin 2019. Todennäköisesti lentomäärät kasvavat, mutta vertailun helpottamiseksi käytetty samoja lentomääriä.
- Kaikki kalusto on joko sähköistä tai vetyä ja synteettisiä polttoaineita hyödyntävää. Todellisuudessa kalusto ei kerkeä täysin uusiutua vaan keskipitkillä matkoilla osa kalustosta toimisi nestemäisillä hiilivedyillä.
- Kotimaan liikenteestä 20 % voidaan operoida akkusähkölentokoneilla ja 80 % polttokennosähkökalustolla. Kyseessä optimistinen arvio, joka perustuu teknologian arvioituun kyvykkyyteen.
- Suomen kansainvälisestä lentoliikenteestä 77 % suuntautui Eurooppaan vuonna 2019. Oletetaan, että 2050 vain Euroopan liikennettä operoidaan vetykalustolla. Tällöin ilmastovaikutuskuorma, johon vedyllä voidaan vaikuttaa, olisi karkeasti arvioituna n. 50 % suomalaisten kansainvälisten lentojen ilmastovaikutuksesta eli 4 Mt CO₂-ekv. Tästä osuudesta 25 % voidaan operoida polttokennosähkökalustolla ja loput 75 % hybridivetykalustolla. Euroopan ulkopuolelle suuntautuvien lentojen ilmastovaikutuksiin (4 Mt CO₂-ekv) voidaan vaikuttaa synteettisillä polttoaineilla.

Näillä oletuksilla päädytään seuraavaan taulukkoon, johon on sisällytetty sekä Suomen kotimaan lentojen että suomalaisten ulkomaan lentojen ilmastovaikutukset.

Kalusto	Kaluston ilmastovaikutuksen vähennys	Osuus ilmastovaikutuksesta, johon voidaan vaikuttaa	Ilmastovaikutuksen vähentyminen
Akkusähkö	-100 %	0,04 Mt CO ₂ -ekv	-0,04 Mt CO ₂ -ekv
Polttokennosähkö	-85 %	1,17 Mt CO ₂ -ekv	-0,99 Mt CO ₂ -ekv
Hybridi	-70 %	3,00 Mt CO ₂ -ekv	-2,1 Mt CO ₂ -ekv
Synteettiset polttoaineet	-50 %	4,00 Mt CO ₂ -ekv	-2,0 Mt CO ₂ -ekv

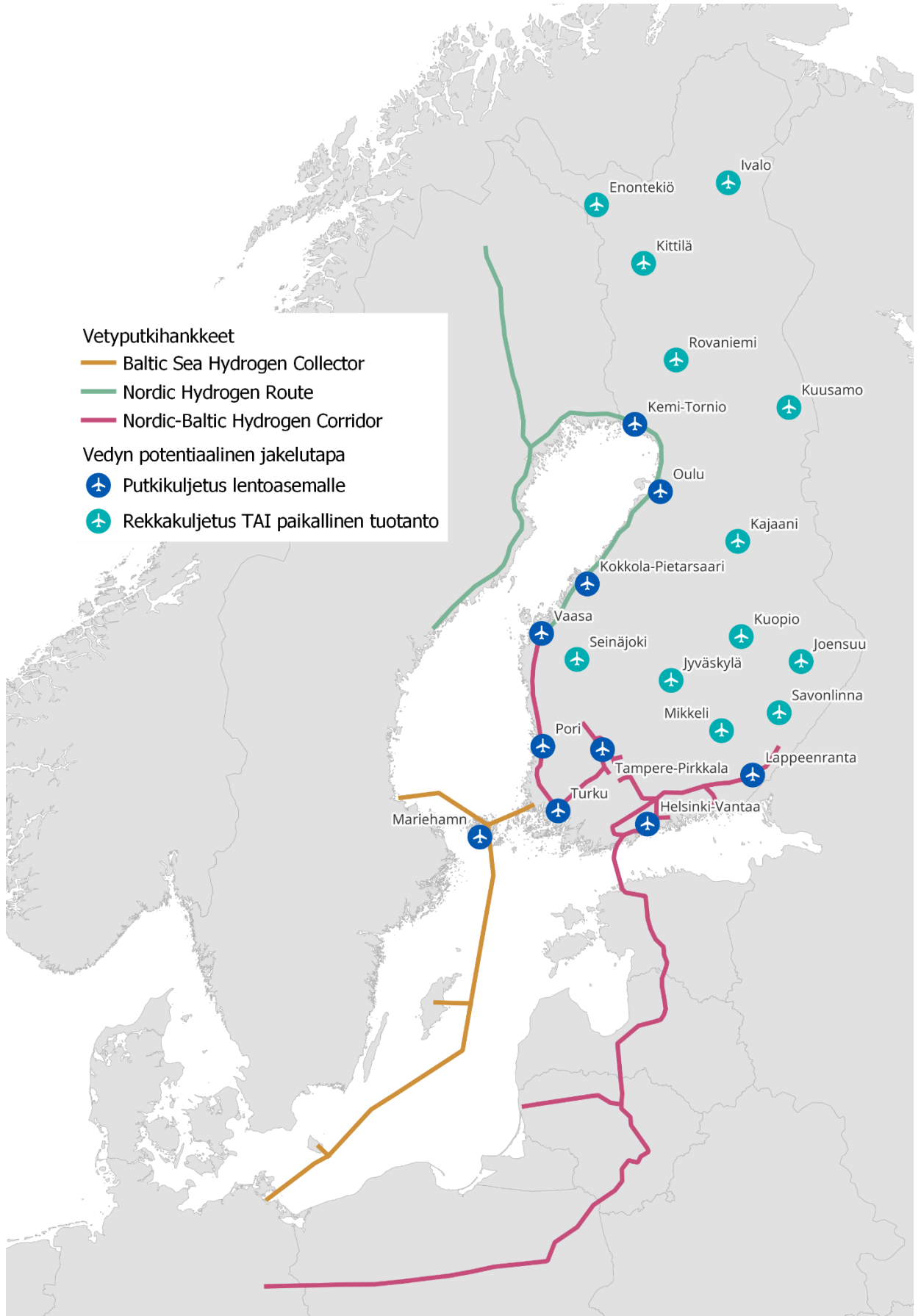
Vuonna **2050** vaihtoehtoiset vetyyn ja sähköön pohjautuvat käyttövoimat voivat vähentää Suomen sisäisen lentoliikenteen ja suomalaisten ulkomaan lentojen ilmastovaikutusta **5,13 Mt CO₂-ekv eli jopa 63 % vuoden 2019 päästöihin ja lentomääriin verrattuna.**

4.2 Vety Suomen lentoasemilla

Vedyn käyttöönotto lentoasemaympäristössä tulee vaatimaan suuria investointeja uudentyypiseen infrastruktuuriin sekä myös tärkeän päätöksen siitä, miten vetyinfrastruktuuri halutaan toteuttaa vai halutaanko sitä ylipäätään toteuttaa. Kuten luvussa 3.1.2 on mainittu, vetyinfra voidaan rakentaa käytännössä kolmella tavalla:

1. nestemäisen vedyn rekkakuljetus ja varastointi lentoasemalla
2. kaasumaisen vedyn kuljetus putkistossa ja nesteytys lentoasemalla tai
3. paikallinen tuotanto lentoasemilla.

Nykytiedon perusteella vaihtoehdot 1 ja 3 ovat mahdollisia jokaiselle Suomen lentoasemalle ottaen kuitenkin huomioon, että vaihtoehdon 1 investointikustannus on merkittävästi pienempi. Vaihtoehtoon 3 liittyy lisätekijänä sähköverkon kattavuus ja kapasiteetti, sillä paikallinen vetytuotanto vaatii runsaasti sähköä. Vaihtoehtoon 2 voivat tukeutua vain vetyputkiston lähetyvillä sijaitsevat lentoasemat. Kuvassa 19 on esitetty Suomen lentoasemat sekä näille pohjatietojen perusteella soveltuvat vetyinfraratkaisut. Kuva on teoreettinen ja todellisuuden ratkaisut voivat olla esitetystä poikkeavia.



Kuva 19. Suunnitellut vetyputkihankkeet ja Suomen lentoasemien mahdolliset vedyn jakelutavat. Vetyputkien lähde: (Both2nia, 2023)

Vetyinfran tilavaatimukset

Vetyinfra tarvitsee myös pinta-alaa, jotta sen sijoittaminen lentoasemalle on ylipäättään mahdollista. Pinta-alan tarve suurenee myös sitä mukaa kun eri vaiheita toteutetaan lentoasemalla. Tämä selittyy yksinkertaisesti tarvittavalla varustuksella, sillä mikäli vedyn tuotanto toteutetaan paikallisesti lentoasemalla, tulee siellä olla myös tarvittavat välineet elektrolyysiin, nesteyttämiseen sekä varastointiin. Suhteutettuna Suomen lentoasemien matkustaja- ja lentomääriin, tilantarve vetyinfralle on joka tapauksessa varsin pieni, pois luettuna Helsinki-Vantaan lentoasema.

Mikäli Helsinki-Vantaan lentoasemalla käytettäisiin päivässä noin miljoonaa litraa paikallisesti tuotettua nestemäistä vetyä (vastaa noin 250 000 litraa fossiilista polttoainetta), arvioitu tilantarve laitteistolle ja varastoinnille on noin 2 hehtaaria. Paikalliseen tuotantoon verrattuna putkistoon tukeutuva vetyinfra vaatisi noin 30 % ja rekkakuljetuksiin perustava noin 40 % vähemmän tilaa. Nämä suhdelluvut riippuvat kuitenkin vedyn käytön volyyymista. (Aerospace Technology Institute, 2022)

Päätökset valittavasta vetyinfrastruktuurin toteuttamistavasta, tai sen toteuttamatta jättämisestä, tulevat olemaan suurella todennäköisyydellä lentoasemakohdaisia. Kuvassa 19 esitetty vedylle suunniteltu putkisto tarjoaa toteutuessaan nykysuunnitelman mukaisesti osalla lentokentistä erilaiset investointimahdollisuudet toteuttaa putkikuljetukseen perustuva vetyinfrastruktuuri. Brändäysmielessä paikallisesti lentoasemalla tuotettu nestemäinen vety voisi tarjota kaupunkikohtaisia mahdollisuuksia kasvattaa lentämisen houkuttelevuutta ja lisätä samalla tietoisuutta ympäristötehokkaasta lentämisestä. Toisaalta mikäli kaikki lentämiseen tarvittava nestemäinen vety on mahdollista tuottaa Suomessa kotimaisin voimin, paikallisen tuotannon merkitys lentoasemilla pienentynee.

Vety- ja sähkölatausinfra

Mainitut käyttövoimat eivät ole toisiaan poissulkevia, vaan valinta riippuu lopulta käytettävästä lentokalustosta. Nykytiedon valossa akkusähkökalusto voisi painotua pienemmille volyymeille ja lyhyemmille lennoille. Tässä markkinasegmentissä vedyn olisi vaikeampi kilpailla, sillä vedyn valmistuskustannukset tekevät täyssähköisestä voimalinjasta todennäköisesti kilpailukykyisemmän. Keskipitkillä matkoilla vetykaluston edut korostuisivat, jolloin ensisijaisesti hieman pidempiä lentoja palvelevat lentoasemat voisivat panostaa vetyinfrastruktuuriin. Mikäli lentoliikennetoiminta Suomessa monipuolistuu, voi lentoasemille tulla molempia infran muotoja.

4.3 Vetylentämisen kehittäminen Suomessa

Taulukko 7. Työn aikana tunnistettuja kehitysmahdollisuuksia.

Kehitysalue	Motivaatio	Suosittelut toimenpiteet
H₂ Kansallinen vetytalous	<p>Jotta vetylentäminen voi aikanaan kehittyä, on vetytalouden rakenteiden – uusiutuvan sähkön, vedyn tuotannon, varastoinnin ja jakeluverkoston – oltava kunnossa.</p>	<p>Edistetään kansallista vetystrategiaa ja otetaan lentoliikenne osaksi strategiaa.</p> <p>Kaikilla toimialoilla vedyn tuotannon ja prosessien kehitys.</p> <p>Vetyputkiverkoston edistäminen Pohjoismaissa.</p> <p>Varmistetaan, että vetytalouden kehittäminen nähdään mahdollistajana ja että se näkyy talouden, tekniikan ja regulaation prosessien sujuvuutena.</p>
 Kansainvälinen yhteistyö	<p>Suomessa on laaja ymmärrys ja tilannekuva vetyteknologian ja vetylentämisen kehityksestä sekä mahdollisuuksista.</p>	<p>Osallistuminen lentoliikenteen regulaation, kaluston ja markkinoiden kehitykseen oikeilla foorumeilla.</p>
 Vedyn tunnetuksi tekeminen liikenteessä	<p>Luodaan pohja vetylentämistä varten ja varmistetaan, että vetyvoimalinjat ovat teknologiana tuttuja keskeisille sidosryhmille.</p>	<p>Edistetään vedyn ja synteettisten polttoainoiden käyttöä raskaassa tieliikenteessä, jotta sysäys teknologian käyttöönotossa saadaan aikaan. Vrt. sähköbussiliikenne vuodesta 2018, jolloin kehityksen kulku oli epävarmaa, vuoteen 2022, jolloin useat operaattorit tarjoavat pyytämättä sähköistä kalustoa.</p>
 Lentoasemien vetyinfrastrukturi	<p>Vedyn infrastrukturi tarvitaan ennen lentotoimintaa. Näin myös Suomeen voidaan lentää Euroopasta vetykoneilla.</p>	<p>Kartoitetaan potentiaalisia pilottikenttäpareja Pohjoismaista vetylentämiseksi. Mm. Vaasan lentoasema on potentiaalinen: se sijaitsee tulevan vetyputken yhteydessä, alueella toimii Pohjoismaiden laajimpiin kuuluva energiaklusteri ja Vaasasta on vetykalustolle soveltuvia yhteyksiä Helsinkiin ja Tukholmaan.</p> <p>Tarkastellaan julkisen tuen tarvetta lentoasemien vetyinfran kehittämiseksi. Vrt. sähkölaatusinfran tuet.</p>
 Vetylentämisen markkinoiden kehitys	<p>Kysynnän kehittyminen ei tapahdu ilman tarjontaa. Murrosvaiheessa kaupallista toimintaa on todennäköisesti tuettava.</p>	<p>Tarkastellaan, onko julkisen sektorin tuelle tarvetta vetylentämisen käyttöönotossa. Vaihtoehtoina mm. subventiot lentoasemamaksuihin tai kilpailutuksissa vähäpäästöisyyden suosiminen.</p>

4.4 Vetylentämisen SWOT Suomessa

VAHVUUDET

- + Vetytalouden kehittäminen Suomessa on lähtenyt käyntiin suurteollisuusvetoisesti
- + Valtiolla intressi edistää vetytaloutta Suomessa
- + Sisäisessä lentoliikenteessä polttokennokalustolle soveltuvia melko pitkiä lentomatkoja (500–1 000 km), joilla myös suurehkot matkustajavolyymit
- + Laaja lentoasemaverkosto
- + Vahva intressi hiilineutraaliin liikenteeseen
- + Korkean teknologian osaamista
- + Tarjolla runsaasti vesivaroja vedyntuotantoon
- + Energiajärjestelmä suosii uusituvia energialähteitä
- + Tuulivoimainvestoinnit vahvassa kasvussa

MAHDOLLISUUDET

- ▲ Vetyputkiston kehitys lähtenyt liikkeelle, mikä tarjoaa rungon vedyn kuljettamiselle myös tietyille lentoasemille
- ▲ Vetylentämisellä vahvat synergiat vetytalouden ja sähköistymisen kehittymisen kanssa
- ▲ Puhtaan teknologian kehitys voi edistää monipuolisemman lentomarkkinan kehittymistä
- ▲ Vähäpäästöisen lentotarjonnan parantuminen voi generoida lentomat kustusta
- ▲ Vedyn tuottamisessa tarvittavaa raaka-ainetta tarjolla runsaasti
- ▲ Lentäminen muuttuu ympäristöllisesti hyväksyttävämmäksi
- ▲ Vetylentämisen kehitys vauhdittuu jonkin yksittäisen tai useamman teknologisen läpimurron ansiosta

HEIKKOUEDET

- Pienehkö markkina-alue
- Kehittymättömät sisäiset lentomarkkinat
- Lentämisen kulttuuri on kehittymätön – monille ihmisille lentäminen kotimaassa ei ole totuttu kulkutapa
- Vetylentokoneiden kehitys on vasta käynnissä: tarvitaan pienempiä polttokennoja, kehitystä vetytankeissa, uusia ja testattuja moottorityyppejä ja paljon muuta teknistä kehitystä
- Vihreän vedyn ja synteettisten polttoainoiden korkea hinta
- Lentoasemien vetyinfran kehitys on sidoksissa vetytalouden kehittymiseen

UHAT

- ▼ Vedyn tuottamisessa tarvitaan runsaasti sähköä ja siihen liittyviä sähköverkkoinvestointeja
- ▼ Uusittava kalusto ja kallistuva käyttövoima voi nostaa lentämisen hintaa keskipitkällä aikavälillä
- ▼ Vetyinfraan ja uuden kaluston sertifiointiin liittyvät kustannukset ovat suuret
- ▼ Teknologian kehitys voi kestää odotettua kauemmin
- ▼ Uudenlaisen konekaluston pitkä ja kompleksinen regulaatioprosessi voi kestää kauemmin kuin lentokonevalmistajien optimistisimmat odotusarvot ovat
- ▼ Vetylentämisen kehitys hidastuu kohdattessaan jonkin yksittäisen tai useampia odottamattomia teknologisia ongelmia

4.5 Johtopäätökset ja epävarmuudet

Tämän selvityksen tavoitteena oli kartoittaa vedyn käyttömahdollisuudet energialähteenä ilmailussa ja vetylentämisen rooli liikennejärjestelmässä. Vetyä on tarkasteltu käyttövoiman, kaluston, regulaation ja infrastruktuurin näkökulmista perustuen kirjallisuuslähteisiin, lentoalan seminaareihin sekä tekijäryhmän arvioihin. Koska kyse on pitkän aikavälin kehityksestä, joka vaatii teknologista kehitystä, regulaatiota ja markkinoiden kehittymistä, on esitetyissä arvioissa epävarmuuksia. Näitä epävarmuuksia sekä työn johtopäätöksiä on kuvattu seuraavissa luvuissa.

4.5.1 Kaluston teknologian kehitys

Nopeuttavat tekijät:

Vetylentokoneiden kehitys on lähtenyt nopeasti käyntiin ja erityisesti eurooppalaiset valmistajat panostavat merkittävästi teknologian kehittämiseen. Lentokone-teollisuusklusteri hyötyy muiden alojen kehityksestä ja osaamisesta, kuten avaruusteknologiasektorista, joka on käyttänyt nestemäistä vetyä vuosikymmenet. Myös autoteollisuudessa akkuteknologian, sähköisen voimalinjan ja polttokennojen kehitys edesauttaa vetylentokoneiden kehitystä.

Hidastavat tekijät:

Teknologia on kuitenkin vasta kehityksensä alussa, ja vedyn voimalinja vaatii pitkäjänteistä kehitystä. Lentokonevalmistajat ovat painottaneet kiireellistä tarvetta kehittää mahdollistavia teknologioita, kuten hyvin kevyitä polttokennojärjestelmiä (>1,5 MW), kryogeenisiä (materiaalin käyttäytyminen matalissa lämpötiloissa) ja kevyitä nestemäisen vedyn tankkeja, vedyn jakelujärjestelmiä, lämmönhallinta- ja jäähdytysjärjestelmiä, tasavirtajärjestelmiä, akkujen ja voimanhallinnanjärjestelmiä sekä vetypolttomootoreita (Clean Aviation Joint Undertaking, 2021). Jos jossakin osa-alueessa kehitys ei etene toivotulla tavalla, voi vetylentokoneiden markkinoille tulo hidastua.

4.5.2 Kaluston sertifiointi

Nopeuttavat tekijät:

Jos lentoala fokusoituu enemmän lentokonesuunnittelun evoluutioon ja teknologinen kehitys etenee toivotusti, on mahdollista, että vetylentokoneita saataisiin markkinoille 2030-luvulla. Lentokonevalmistajat ovat korostaneet tehokkaiden sertifiointi- ja vaatimustenmukaisuusmenetelmien tarvetta turvallisten vetyteknologioiden tuomiseksi markkinoille (Clean Aviation Joint Undertaking, 2021).

Hidastavat tekijät:

Teknologisen kehityksen lisäksi täysin uudenlaisen kaluston sertifiointiprosessit voivat olla hyvin pitkiä. Lentoala on hyvin tarkasti säännelty ala, jotta korkeat turvallisuusstandardit voidaan saavuttaa. Siksi uuden vetykaluston kehittäminen voi osoittautua ennakoitua haastavammaksi. Erityisesti täysin uudenlaisten, kehitysharppauksen ottavien lentokonemallien kehitys voi kestää hyvinkin pitkään. On siis täysin mahdollista, että ennustetut aikataulut pitkittyvät.

4.5.3 Kaluston ilmastovaikutukset

Nopeuttavat tekijät:

EU:ssa nähdään, että vetykäyttöiset lentokoneet ovat lupaava vaihtoehto ilmastoneutraalin Euroopan turvaamiseksi (Clean Aviation Joint Undertaking, 2021). Vety voikin alustavien tutkimusten mukaan vähentää merkittävästi lentämisen ilmastovaikutusta. CO₂-päästöt voidaan vedyn avulla poistaa, **mutta tällä hetkellä ei ole olemassa kustannustehokasta teknologiaa, mikä mahdollistaisi täysin ilmastoneutraalin globaalin lentoliikenteen.** Parhaimmassakin tapauksessa vuonna 2050 vain n. 60 % globaalista laivastosta voitaisiin korvata vetykäyttöisellä kalustolla. Loppuosa laivastosta käyttäisi kestäviä lentopolttoaineita.

Hidastavat tekijät:

Ennusteiden mukaan vety tulee olemaan kalliimpaa kuin nykyinen fossiilinen lentopetroli vuoteen 2050 asti. Toisaalta hiilidioksidin hinnoittelu voi nostaa fossiilisen lentopetrolin hintaa niin, että hintapariteetti saavutettaisiin parhaimmillaan jo 2030-luvulla nestemäisen vedyn kanssa. Tällöin kuitenkin lentämisen hinta todennäköisesti nousisi, mikä voisi vähentää lentämisen kysyntää ja vaikeuttaisi esim. kotimarkkinoilla uusien lentopalvelujen kehitystä. Onkin arvioitu, että skenaariorissa, jossa 40 % globaalista lentolaivastosta on vetykäyttöistä vuonna 2050, kasvaisivat laivaston operatiiviset kulut jopa 27 prosentilla (Clean Sky, 2020).

4.5.4 Vetylentämisen infrastruktuuri

Nopeuttavat tekijät:

Suomessa ja globaalisti vetytalous on kehittymässä kiihtyvällä tahdilla, mikä tarkoittaa, että tuotanto skaalautuu sekä teknologiat ja osaaminen kehittyvät. Tämä johtaa aleneviin kustannuksiin ja vedyn toimitusketjujen rakentumiseen. Vetylaivaston käyttöönoton kynnyks saattaa madaltua, kun taustainfra on kunnossa.

Hidastavat tekijät:

Lentoasemien vetyinfrastruktuuri vaatii joka tapauksessa merkittäviä, useiden kymmenien miljoonien eurojen investointeja. Erityisesti niissä kohteissa, joissa lentotoiminnan volyymit ovat melko pieniä, voi olla haastava löytää investoinneille kannattavuutta siirtymävaiheessa. Tällöin vetylentämisen kehitys voi hidastua, mikäli itse tankkausinfra ei saada laajamittaisesti käyttöön.

4.5.5 Muita epävarmuuksia ja yllättäviä kehityskulkuja

Selvitys osoittaa, että vetylentämisen yleistymisen vaatii vielä paljon toimia eri tasoilla. Vetylentämisen kehityksen aikajänne on vuosikymmeniä, ei vuosia. Uutta käyttövoimaa tarkasteltaessa on kuitenkin syytä tunnistaa paikoin yllättävän nopea teknologinen kehitys. Esimerkiksi Suomen paikallisjoukkoliikenteessä kaluston sähköistys on ollut huomattavan nopeaa. Pelkästään HSL-alueella sähköbussien osuus on noussut 5 vuodessa 1 %:sta 34 %:iin eli määrällisesti kymmenestä bussista 436 bussiin (HSL, 2023). Tämä osoittaa, että liikennejärjestelmä voi kehittyä nopeastikin, mikäli regulaatio, kaupalliset toimijat ja teknologinen kehitys löytävät sopivan balanssin.

Lentoliikennettä ei voida kuitenkaan suoraan verrata esim. linja-autoliikenteeseen, sillä alana lentoliikenne on muun muassa huomattavasti säädellympi. Tällöin vaikutusmekanismit voivat olla osin erilaisia ja kehityksen ennakoitavuus toisenlaista. **Joka tapauksessa, myös lentoliikenteeseen kohdistuu merkittäviä päästövähennystavoitteita, teknologia on lupaavalla kehityspolulla ja alalla on vahva tahtotila kehittää ilmastoystävällistä lentoliikennettä. Nämä tekijät yhdessä voivat luoda suotuisat kehittymisedellytykset vetylentämiselle.**

5 Lähdeluettelo

- Aerospace Technology Institute. (2022). *HYDROGEN INFRASTRUCTURE AND OPERATIONS*. Noudettu osoitteesta <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/03/FZO-CST-POS-0035-Airports-Airlines-Airspace-Operations-and-Hydrogen-Infrastructure.pdf>
- Airbus. (2022). *Airbus reveals hydrogen-powered zero-emission engine*. Noudettu osoitteesta <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-11-airbus-reveals-hydrogen-powered-zero-emission-engine>
- Arthur D. Little INC. (1982). *An Assessment Of The Crash Fire Hazard Of Liquid Hydrogen Fueled Aircraft*. Noudettu osoitteesta <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19820011322/downloads/19820011322.pdf?attachment=true>
- Both2nia. (9. January 2023). *Hydrogen pipelines connect Finland and Sweden to new German hydrogen pipelines*. Noudettu osoitteesta Both2nia: <https://www.both2nia.com/en/news/hydrogen-pipelines-connect-finland-and-sweden-new-german-hydrogen-pipelines>
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr. (2021). *PtL roadmap*. Saksan valtio.
- Clean Aviation Joint Undertaking. (6. May 2021). *Clean Aviation*. Noudettu osoitteesta Clean Aviation: <https://www.clean-aviation.eu/sites/default/files/2021-07/CA-CH%20workshop%20-%20key%20messages.pdf>
- Clean Sky. (2020). *Hydrogen-powered aviation*. Clean Sky.
- EASA. (12. December 2022a). *Sustainable Aviation Fuels*. Noudettu osoitteesta Sustainable Aviation Fuels: <https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/what-are-sustainable-aviation-fuels#drop-in-saf-production-pathways>
- EASA. (27. December 2022b). *Fit for 55 and ReFuelEU Aviation*. Noudettu osoitteesta <https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/fit-55-and-refueleu-aviation>
- EASA. (2022c). *Electric / Hybrid Propulsion System*. Noudettu osoitteesta <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/126470/en>
- Euroopan komissio. (2022). *Reducing emissions from aviation*. Noudettu osoitteesta https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-emissions/reducing-emissions-aviation_en
- Euroopan unioni. (2018). *DIRECTIVE (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the promotion of the use of energy from renewable sources*. Official Journal of the European Union.
- Fortum. (27. December 2022). *Vetytalous tulee – ennemmin tai myöhemmin*. Noudettu osoitteesta <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin>
- Gasgrid. (27. December 2022). *Visiosta toimenpiteisiin – Kuusi osapuolta allekirjoitti yhteistyösopimuksen pohjoismaiden ja Itämeren alueen vetyinfrastruktuurin kehittämisestä*. Noudettu osoitteesta . <https://gasgrid.fi/2022/12/16/visiosta-toimenpiteisiin-kuusi-osapuolta-allekirjoitti-yhteistyosopimuksen-pohjoismaiden-ja-itameren-alueen-vetyinfrastruktuurin-kehittamisesta/>
- Gexcon. (2022). *Can we fly safely on liquid hydrogen? Using advanced modelling tools to understand the hazards*. Noudettu osoitteesta https://www.youtube.com/watch?v=1yJAZU8yb_Y
- HSL. (17. January 2023). *Sähköbussi pelaa päästötavoitteittemme ykkösketjussa*. Noudettu osoitteesta HSL: <https://www.hsl.fi/hsl/sahkobussit>
- HYPOR. (2020). *Construction begins on the first green hydrogen station*. Noudettu osoitteesta <https://www.engie-solutions.com/sites/default/files/assets/2020-10/20200610HYPORSignatureConvention%20EN.pdf>
- Laurikko, J.;Ihonen, J.;Kiviaho, J.;Himanen, O.;Weiss, R.;Saarinen, V.;& Kärki, J. &. (2020). *National Hydrogen Roadmap for Finland*.
- NASA. (2022). *Space Applications of Hydrogen and Fuel Cells*. Noudettu osoitteesta <https://www.nasa.gov/content/space-applications-of-hydrogen-and-fuel-cells>
- National Air And Space Museum. (2022). Noudettu osoitteesta <https://airandspace.si.edu/stories/editorial/aftermath-hindenburger#:~:text=Both%20reports%20concluded%20that%20a,fire%20that%20consumed%20the%20Hindenburger.>
- Roland Berger. (2020). *Hydrogen / A future fuel for aviation?* . Roland Berger.

- Rolls-Royce. (2022). *Rolls-Royce and easyJet set new world first*. Noudettu osoitteesta <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2022/28-11-2022-rr-and-easyjet-set-new-aviation-world-first-with-successful-hydrogen-engine-run.aspx>
- Traficom. (2022a). *Sähköinen lentäminen Suomessa*.
- Traficom. (28. December 2022b). *Corsia*. Noudettu osoitteesta <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/ilmailu/corsia>
- Traficom. (2022c). *Liikenteen CO2-päästöt liikennemuodoittain sekä maakunnittain*. Noudettu osoitteesta <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/liikenteen-co2-paastot-liikennemuodoittain-seka-maakunnittain>
- Valtioneuvosto. (2021). *Valtioneuvoston periaatepäätös lentoliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisestä*. LVM/2021/64.
- Valtioneuvosto. (2022). *Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet*. VALTIONEUVOSTON SELVITYS-JA TUTKIMUSTOIMINNAN JULKAISUSARJA 2022:21 .
- Warwick, N.;Griffiths, P.;Keeble, J.;Archibald, A.;Pyle, J.;& Shine, K. (2022). *Atmospheric implications of increased Hydrogen use*.
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1067144/atmospheric-implications-of-increased-hydrogen-use.pdf.
Noudettu osoitteesta
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1067144/atmospheric-implications-of-increased-hydrogen-use.pdf

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom

PL 320, 00059 TRAFICOM

p. 029 534 5000

traficom.fi

ISBN 978-952-311-839-3

ISSN 2669-8781 (verkkójulkaisu)

TRAFICOM
Liikenne- ja viestintävirasto