



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Roope Ketoja

Uiton käyttövoimaratkaisut

Tutkimus eri käyttövoimien soveltuvuudesta uitossa käytettäville
apualuksille

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö
Diplomityö
Energiatekniikka

Vaasa 2024

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

Tekijä:	Roope Ketoja		
Tutkielman nimi:	Uiton käyttövoimaratkaisut: Tutkimus eri käyttövoimien soveltuvuudesta uitossa käytettäville apualuksille		
Tutkinto:	Diplomi-insinööri		
Oppiaine:	Energiatekniikka		
Työn valvoja:	Seppo Niemi		
Työn ohjaaja:	Katriina Sirviö		
Valmistumisvuosi:	2024	Sivumäärä:	97

TIIVISTELMÄ:

Työn tavoitteena oli selvittää suositeltavin käyttövoimaratkaisu uitossa käytettäviin apualuksiin. Uitto on energiatehokas kuljetusmuoto, jolla kuljetetaan suuria puumääriä Kaakkois-Suomen metsäteollisuuden tarpeisiin. Uittolauttojen kuljettaminen edellyttää apualusten käyttöä, jotka ohjaavat puukuormaa reittien haastavissa kohdissa ja hinaavat pienempiin osiin puretun uittolautan kapeiden kanavien läpi. Jotta uittokuljetusten volyyymiä voidaan kasvattaa ja päästöjä pienentää, apualuksia täytyy lisätä ja uusia sekä ottaa käyttöön nykyistä puhtaampia käyttövoimaratkaisuja.

Työssä perehdyttiin polttomoottori-, akku- ja polttokennoteknologiaan sekä hybridiratkaisuihin, joissa näitä teknologioita hyödynnetään yhdessä. Työssä tutkittiin uusiutuvan polttoöljyn, rinnakkais- ja sarjahybridin sekä polttokennohybridin hiilidioksidipäästöjen vähennyspotentiaalia sekä käyttövoima- ja hankintakustannuksia. Hankintakustannuksia lukuun ottamatta tulokset ovat vuosittaisia keskiarvoja 10 vuoden ajanjaksolle. Uusiutuvalla polttoöljyllä voidaan vähentää apualuksen elinkaaren aikaisia päästöjä 82 % ja käyttövoimakustannukset kasvavat 6600 € vuodessa. Polttoaine ei edellytä muutoksia moottoriin, joten hankintakustannukset pysyvät ennallaan 72000 €:ssa. Rinnakkaishybridi vähentää aluksen päästöjä 28 % ja vuosittaisia käyttövoimakustannuksia 1300 €. Rinnakkaishybridin voimansiirtojärjestelmän hankintakustannukset ovat 350000 €. Sarjahybridi pienentää päästöjä 23 % ja käyttövoimakustannuksia 750 € vuodessa. Sarjahybridin hankintakustannukset ovat 380000 €. Polttokennohybridi vähentää päästöjä 96 % ja nostaa vuosittaisia käyttövoimakustannuksia 9700 €. Polttokennohybridin hankintakustannukset ovat 510000 €.

Uusiutuvan polttoöljyn käyttö on sekä päästöjen että kustannusten näkökulmasta suositeltavin vaihtoehto apualusten käyttövoimaksi. Apualuksen pienen vuosittaisen kulutuksen, kevyen polttoöljyn edullisuuden sekä hybriditeknologioiden hankintakustannusten takia muut tarkastellut vaihtoehdot eivät ole tällä hetkellä suositeltavia käyttövoimaratkaisuja apualuksille. Hybridiratkaisujen uudelleen arviointi tulevaisuudessa edellyttää hybriditeknologioiden hankintakustannusten laskua, uittokuljetusten volyymin kasvua ja polttoöljyjen hintojen nousua.

AVAINSANAT: uitto, käyttövoima, uusiutuva polttoöljy, rinnakkaishybridi, sarjahybridi, polttokennohybridi

University of Vaasa**School of Technology and Innovations****Author:** Roope Ketoja**Thesis title:** Powertrain solutions for inland waterway vessels: case study of various powertrains for auxiliary vessels in timber rafting**Degree:** Masters of Science in Technology**Programme:** Energy Technology**Supervisor:** Seppo Niemi**Instructor:** Katriina Sirviö**Year of graduation:** 2024 **Pages:** 97

ABSTRACT:

The objective of the study was to determine the most recommended propulsion solution for auxiliary vessels used in timber rafting. Timber rafting is an energy efficient transportation method used to transport large amounts of timber for the needs of the forest industry. Auxiliary vessels are needed in timber rafting to steer rafts through challenging parts of the routes and tow dismantled timber rafts through narrow channels. In order to reduce emissions and increase transport volumes, vessel fleets need to be increased and modernized and cleaner propulsion solutions need to be adopted.

The study examined internal combustion engine, battery, and fuel cell technologies, as well as hybrid solutions where these technologies are utilized together. Investigated solutions were renewable fuel oil, parallel hybrid, series hybrid and fuel cell hybrid. These alternatives were evaluated against the potential to reduce carbon dioxide emissions and operational and acquisition costs. Operational costs consist of only fuel and electricity costs. Excluding acquisition costs, the results are annual averages for a 10-year period. The use of renewable fuel oil reduces emissions by 82 % and operational costs increase by 6600 €. The fuel does not require changes to the engine, so the acquisition costs remain unchanged at 72000 €. The parallel hybrid reduces emissions by 28 % and lowers operational costs by 1300 €. The acquisition costs of the parallel hybrid are 350000 €. The series hybrid reduces emissions by 23 % and lowers operational costs by 750 €. The acquisition costs of the series hybrid are 380000 €. The fuel cell hybrid reduces emissions by 96 % and increases operational costs by 9700 €. The acquisition costs of the fuel cell hybrid are 510000 €.

The use of renewable fuel oil is the recommended option for auxiliary vessels from both emission and cost perspectives. Due to the low annual fuel consumption of the auxiliary vessel, low cost of fossil fuel oil, and the high acquisition costs of hybrid technologies, the other examined alternatives are not currently recommended. If the cost of hybrid technologies decreases, the volume of rafting transports increases and the price of fuel oils rises, hybrid solutions could be re-evaluated as an appropriate powertrain solution for auxiliary vessels.

KEYWORDS: timber rafting, powertrain, renewable fuel oil, parallel hybrid, series hybrid, fuel cell hybrid

Alkusanat

Tämä diplomityö on osa energiatekniikan opintojani, joita lähdin suorittamaan työelämän rinnalla syksyllä 2021. Vuodet ovat olleet työntäyteisiä, mutta myös erittäin opettavaisia ja mielenkiintoisia. Matkan varrella useat henkilöt ovat myötävaikuttaneet opintojeni edistymisessä ja kannustaneet kiireisimpinä aikoina. Ensiksi kiitän Metsäteho Oy:n Pirjo Venäläistä, Järvi-Suomen Uittoyhdistyksen Esa Korhosta ja Uittopojat Oy:n Reino Nurmea mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta ja asiantuntevasta opastuksesta tutkimuksen aikana. Kiitän myös esihenkilöäni Juha Vuorista opintojen ja työn sujuvasta yhteensovittamisesta. Kiitän Vaasan yliopiston Seppo Niemeä ja Katriina Sirviötä sekä tutkimuksen ohjaamisesta että laadukkaasta opetuksesta vuosien varrella. Lopuksi kiitän perhettäni ja ystäviäni tuestanne, neuvoistanne ja kannustuksestanne näiden vuosien aikana.

Vaasassa 2024-04-11

Roope Ketoja

Sisällys

1	Johdanto	11
2	Tutkimuksen sidosryhmät	12
3	Uitto	13
4	Käyttövoimiin vaikuttava sääntely	15
4.1	IMO:n tavoitteet	15
4.2	Euroopan vihreän kehityksen ohjelma	16
4.2.1	Vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuuria koskeva asetus (AFIR)	16
4.2.2	NAIADES III -toimintasuunnitelma	18
4.3	Hallitusohjelma 2023 ja Suomen energiapolitiikka	18
4.4	Käyttövoimien tekniset vaatimukset	19
4.4.1	Työkonemoottoreiden päästörajoitukset	20
4.4.2	Sisävesiliikenteen alusten tekniset vaatimukset	21
5	Dieselmoottorit ja generaattorit	23
6	Akkuteknologia	25
6.1	Akkujen rakenne ja toimintaperiaate	25
6.2	Akkujen suorituskykyyn vaikuttavat tekijät	26
6.3	Akkumateriaalit	28
6.4	Akunhallintajärjestelmä	30
6.5	Akkuteknologian tulevaisuuden näkymät	31
6.5.1	Akkujen hintakehitys	32
7	Vety käyttövoimana	34
7.1	Vedyn valmistus ja varastointi	34
7.2	Polttokennot	35
7.2.1	Protoninvaihtopolttokenno	37
7.2.2	Korkean lämpötilan protoninvaihtopolttokenno	38
7.2.3	Kiinteäoksidipolttokenno	38
7.3	Vety polttomoottorin polttoaineena	39
7.3.1	Vetymoottorin vahvuudet ja haasteet	40

8	Hybridialukset	43
8.1	Rinnakkaishybridi	44
8.2	Sarjahybridi	45
8.3	Hybridivoimansiirron mekaaniset ja sähköiset häviöt	46
8.4	Hybridikäyttövoimia hyödyntäviä aluksia	47
9	Tapaustutkimus: uiton apualukset	51
9.1	Uittoreitti ja kuljetettava puumäärä	51
9.2	Apualuksen kuormitusprofiilit	51
9.3	Lähtötaso	52
9.4	Uusiutuva polttoöljy	54
9.5	Rinnakkaishybridi	56
9.6	Sarjahybridi	59
9.7	Polttokennohybridi	61
9.8	Päästöjen vähennyspotentiaali	63
9.9	Hankintakustannukset	67
9.10	Käyttövoimakustannukset	69
10	Pohdinta ja jatkotutkimustarpeet	77
11	Johtopäätökset	81
12	Yhteenveto	82
	Lähteet	83
	Liitteet	94
	Liite 1. Rinnakkaishybridin käyttövoimakustannussäästöt 10 vuoden aikana eri kuljetusvolyymeilla ja polttoöljyn hinnoilla	94
	Liite 2. Skenaario 1 rinnakkaishybridin takaisinmaksuajasta	95
	Liite 3. Skenaario 2 rinnakkaishybridin takaisinmaksuajasta	96
	Liite 4. Skenaario 3 rinnakkaishybridin takaisinmaksuajasta	97

Kuvat

Kuva 1. Linjahinaaja ja apualukset kuljettamassa uittolauttaa (R. Nurmi, henkilökohtainen keskustelu, 1.4.2024).	14
Kuva 2. Suomen ydin- ja kattava TEN-T-verkosto (Väylävirasto, 2023).	17
Kuva 3. Stage I:n ja Stage V:n päästörajat hiilimonoksidille, typenoksideille ja pienhiukkasille (mukaillen Dieselnets, 2024)	20
Kuva 4. CESNI:n (2024) aikataulu koskien polttokennojen, metanolin ja vedyn teknisiä vaatimuksia.	22
Kuva 5. Dieselmoottorin ominaiskulutusikäyrä (DNV, 2015).	24
Kuva 6. Litiumioniakun toimintaperiaate (DNV, 2016)	26
Kuva 7. Yleisimpien litiumioniakkujen ominaispiirteitä (Miao ja muut, 2019)	30
Kuva 8. Akkumateriaalien arvioitu hintakehitys (GoldmanSachs, 2023)	33
Kuva 9. Polttokennon toimintaperiaate (Nissilä ja Sarsama, 2013)	36
Kuva 10. Hybridikäyttövoimilla voidaan pienentää päästöjä sekä käyttövoima- ja ylläpitokustannuksia (mukaillen Inal ja muut, 2022)	44
Kuva 11. Rinnakkaishybridi (mukaillen DNV, 2015)	44
Kuva 12. Sarjahybridin AC- ja DC-kytkennät (mukaillen DNV, 2015)	46
Kuva 13. Hybridihinaaja Vilja (Corvus Energy, n.d.-b)	48
Kuva 14. Hynova 40 hybridialus (EODev, n.d.)	49
Kuva 15. Hydrotug on maailman ensimmäinen vetyä ja dieselöljyä käyttävä hinaaja.	50
Kuva 16. Apualuksen kuormitusprofiili Konnuksesta Taipaleeseen	52
Kuva 17. Apualuksen kuormitusprofiili Taipaleen kanavassa	52
Kuva 18. Lähtötason voimansiirto moottorista potkuriin	53
Kuva 19. Rinnakkaishybridin voimansiirtojärjestelmä	56
Kuva 20. Tapaustutkimuksen sarjahybridi	59
Kuva 21. Polttokennohybridin voimansiirtojärjestelmä	61
Kuva 22. Hiilidioksidipäästöjen vähennyspotentiaali	65
Kuva 23. Sähköntuotannon päästökertoimen vaikutus käyttövoimaratkaisuihin	66
Kuva 24. Käyttövoimakustannusten muutos prosentuaalisesti	69
Kuva 25. Käyttövoimakustannusten muutos euromääräisesti	70
Kuva 26. Sähkön hinnan vaikutus käyttövoimakustannuksiin prosentuaalisesti	71
Kuva 27. Sähkön hinnan vaikutus käyttövoimakustannuksiin euromääräisesti	71
Kuva 28. Uusiutuvan polttoöljyn hinnan vaikutus käyttövoimakustannuksiin prosentuaalisesti	72
Kuva 29. Uusiutuvan polttoöljyn hinnan vaikutus käyttövoimakustannuksiin euromääräisesti	73
Kuva 30. Vedyn hinnan vaikutus käyttövoimakustannuksiin prosentuaalisesti	74
Kuva 31. Vedyn hinnan vaikutus käyttövoimakustannuksiin euromääräisesti	74
Kuva 32. Kevyen polttoöljyn hinnan prosentuaalinen vaikutus käyttövoimakustannuksiin	75
Kuva 33. Kevyen polttoöljyn hinnan euromääräinen vaikutus käyttövoimakustannuksiin	76

Taulukot

Taulukko 1. Fossiilisen polttoöljyn kulutus ja tuotettu potkurienergia	54
Taulukko 2. Uusiutuvan polttoöljyn kulutus	55
Taulukko 3. Rinnakkaishybridin polttoaineen ja sähkön kulutus	57
Taulukko 4. Sarjahybridin polttoaineen ja sähkönkulutus	59
Taulukko 5. Polttokennohybridin sähkön ja vedyn kulutus	62
Taulukko 6. Keskimääräiset vuosittaiset polttoaineiden ja sähkön kulutukset	63
Taulukko 7. Käyttövoimaratkaisuiden hiilidioksidipäästöt	65
Taulukko 8. Komponenttien yksikköhinnat	68
Taulukko 9. Käyttövoimaratkaisuiden hankintahinnat	68

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

E_t	tuotettu energia
E_s	akun sähköenergian kulutus
E_p	potkurin työntövoimaksi saatu energia
ΔE	sähkönkulutuksen ja akun kapasiteetin välinen erotus
η_{akku}	akun hyötysuhde
$\eta_{\text{kokoojakisko}}$	kokoojakiskon hyötysuhde
$\eta_{\text{vaihteisto}}$	vaihteiston hyötysuhde
$\eta_{\text{generaattori}}$	generaattorin hyötysuhde
$\eta_{\text{m.ohjain}}$	moottorinohjaimen hyötysuhde
$\eta_{\text{s.moottori}}$	sähkömoottorin hyötysuhde
$\eta_{\text{DC/AC}}$	vaihtosuuntaajan hyötysuhde
$\eta_{\text{DC/DC}}$	DC/DC-muuntimen hyötysuhde
ρ	polttoöljyn tiheys

Lyhenteet

AC	vaihtovirta
AEM	Anion exchange membrane
b	ominaiskulutus
DC	tasavirta
HT-PEMFC	High temperature proton exchange membrane fuel cell
LCO	litiumkobolttioksidi (litiumakun katodimateriaali)
LFP	litiumrautafosfaatti (litiumakun katodimateriaali)
LMO	litiummangaanioksidi (litiumakun katodimateriaali)
LTO	litiumtitanaatti (litiumakun anodimateriaali)
NCA	litiumnikkelikobolttialumiinioksidi (litiumakun katodimateriaali)
NMC	litiumnikkelimangaanikobolttioksidi (litiumakun katodimateriaali)
PEM	Proton exchange membrane
PEMFC	Proton exchange membrane fuel cell

PK	päästökerroin
Q	tehollinen lämpöarvo
SOFC	Solid oxide fuel cell
SOH	State of Health
SOC	State of Charge

1 Johdanto

Liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen pienentäminen on avainasemassa Euroopan unionin (EU) ja Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. Ilmastomuutoksen hillitsemiseksi kestäviä kuljetusmuotoja ja puhtaiden teknologioiden käyttöönottoa on edistettävä. Sisävesiliikenne on yksi vähäpäästöisimmistä kuljetusmuodoista, minkä johdosta EU:n tavoitteena on siirtää rahdinkuljetusta enemmän sisävesille ja tehdä toimenpiteitä, jotka edesauttavat alaa siirtymään kohti päästöttömyyttä (Euroopan komissio, 2021a). Ukrainan sodan seurauksena uittokuljetusten merkitys on kasvanut Suomessa, sillä puun tuonti Venäjältä ja alusliikenne Saimaan kanavan kautta loppuivat kokonaan. Uittamalla mahdollistetaan suurten puumäärien kuljettaminen ympäristöystävällisesti ja tehokkaasti Vuoksen vesistön pohjoisosista Kaakkois-Suomen metsäteollisuuskeskittymään. Kuljetusvolyymien kasvattamiseksi ja päästöjen pienentämiseksi uitoskäyttöön käytettäviä aluksia on uusittava ja puhtaiden käyttövoimien käyttöönottoa edistettävä.

Tutkimuksen tavoitteena oli arvioida vähäpäästöisten käyttövoimaratkaisuiden suositeltavuutta uiton apualuksiin. Tavoitteen toteuttamiseksi tutkimuksessa kartoitettiin potentiaalisimmat vaihtoehtoiset ratkaisut, joita verrattiin hiilidioksidipäästöjen sekä hankinta- ja käyttövoimakustannusten näkökulmasta. Käyttövoimakustannukset käsittivät vain polttoaineiden ja sähkön käytöstä aiheutuvat kustannukset. Tutkimuksesta rajattiin pois hiilineutraalit polttoaineet vetyä ja uusiutuvaa polttoöljyä lukuun ottamatta. Käyttövoimien jakeluinfrastruktuurin kehittymistä käsitellään yleisesti, mutta sitä ei huomioida tapaustutkimuksessa tehtävissä laskelmissa. Tutkimusstrategiana oli kerätä tietoa vaihtoehtoisista käyttövoimaratkaisuista konsultoimalla alalla toimivia yrityksiä ja syventymällä aihetta koskevaan tieteelliseen kirjallisuuteen. Selvittämällä lupaavimmat vaihtoehdot ja niiden ominaispiirteet, vaihtoehtoja arvioitiin tapaustutkimuksessa vertailulaskelmien avulla. Käyttövoimaratkaisuihin liittyvien edellytysten ja mahdollisuuksien tiedostaminen yhdessä vertailulaskelmista saatujen tulosten kanssa antoivat perustan muodostaa arvio eri käyttövoimien suositeltavuudesta uiton apualuksille.

2 Tutkimuksen sidosryhmät

Tutkimuksen toimeksiantaja on Metsäteho Oy, joka on metsäteollisuuden yritysten omistama puunhankinnan kehittämissyhtiö (Metsäteho Oy, 2024). Yrityksen osakkaita ovat mm. Metsä Group, Stora Enso Oyj ja UPM-Kymmene Oyj. Yritys panostaa tutkimus- ja kehitysprojekteihin, joiden avulla pyritään kehittämään metsäteollisuuden yritysten toimintaa kokonaisvaltaisesti mm. prosessien tehostamisen, puun saatavuuden ja logistiikan näkökulmasta. Metsätehon vuoden 2030 visiona on kehittää metsätaloutta yhä vastuullisemmaksi ja kestävämmäksi alaksi niin ympäristön ja kilpailukyvyn kuin sosiaalisen vastuun näkökulmasta (Metsäteho Oy, 2022). Vision painopisteenä on mm. puhtaiden ja kustannustehokkaiden teknologioiden tutkimustyö, mikä auttaa metsäsektoria siirtymään pois fossiilisista polttoaineista ja kohti kestävää tulevaisuutta.

Tutkimuksessa mukana ovat myös Järvi-Suomen Uittoyhdistys (JSUY) ja Uittopojat Oy. JSUY harjoittaa uittoa Vuoksen vesistöissä Varkaus-Joensuu-akselin pohjoispuolella ja on ainoa vesilain mukaan uittoa harjoittava yhdistys (Järvi-Suomen Uittoyhdistys, 2023a). Uittoa harjoitetaan myös Perkaus Oy:n toimesta Varkaus-Joensuu-akselin eteläpuolisella alueella, joka on yksityisuitoaluetta (Metsätehon uitto-opas, 2019). Virallisesti JSUY ja Perkaus Oy ovat eri organisaatioita, mutta käytännön uittotoiminta tapahtuu tiiviissä yhteistyössä. Organisaatioilla on myös yhteinen johto. JSUY:n jäseninä ovat UPM-Kymmene Oyj, Metsäliitto Osuuskunta, Metsähallitus ja Stora Enso Oyj (Järvi-Suomen Uittoyhdistys, 2023a). JSUY vastaa yritysten puutavaran kuljetuksista ja toimii samalla jäsentensä uiton edunvalvojana. Uittotoimintaan sisältyy puun varastointi ennen uittokautta, puutavaran nosto veteen uittopaikalla sekä uittolauttojen kokoaminen ja kuljettaminen tehtaille (Järvi-Suomen Uittoyhdistys, 2023b). Uittopojat Oy on eräs urakoitsijayrityksistä, jotka hoitavat varsinaisen uittotyön. JSUY:ltä ja Uittopojat Oy:ltä saatiin tähän tutkimukseen käytännön tietoa sekä uittotoiminnasta että alusten käytöstä.

3 Uitto

Uitto on kuljetusmuoto, jossa kelluvaa puutavaraa kuljetetaan joko hinaamalla tai virtaavan veden voimin (Järvi-Suomen Uittoyhdistys, 2023c). Suomessa uittoa harjoitetaan vain hinaamalla. Uitto soveltuu hyvin suurien puumäärien kuljettamiseen, sillä uittamalla voidaan kuljettaa puuta jopa 400:n kuorma-autollisen verran kerralla. Uitto on kuljetusmuotona energiatehokas, sillä energiaa kuluu vain kolmannes maantiekuljetuksiin ja puolet rautatiekuljetuksiin verrattuna. Lisäksi suurten puumäärien siirtäminen vesitse säästää maanteitä kulumiselta ja vähentää liikenteen ruuhkautumista. JSUY:n (2023c) mukaan puuta kuljetetaan uittamalla vuosittain yli puoli miljoonaa kuutiota metsäteollisuuden tarpeisiin.

Uitossa käytetään linjahinausyksikköä, joka koostuu linjahinaajasta sekä yhdestä tai kahdesta apualuksesta (Purhonen, 2010a). Linjahinaajien pituudet ovat noin 20–30 metriä ja niiden teho on noin 300–500 kW. Apualukset ovat tavallisesti 10–15 metriä pitkiä ja teholtaan 100–200 kW. Uittoon tarvittava voima saadaan pääasiassa linjahinaajasta, mutta apualuksia tarvitaan mm. ohjaamaan ja valvomaan kuormaa reittien vaativissa kohdissa kuten mutkissa, kapeikoissa ja virtauspaikoissa. Lisäksi apualusten tehtäviin kuuluu puiden uitto kapeiden sulkukanavien läpi (Purhonen, 2010b). Sulutusajossa hinauslautta puretaan ennen kanavaa pieniin yksiköihin, minkä jälkeen ne hinataan kanavan läpi. Kanavan jälkeen niput kootaan taas yhtenäiseksi hinauslautaksi päähinaajan vedettäväksi. Kuvassa 1 nähdään linjahinaaja ja kaksi apualusta kuljettamassa uittolauttaa.



Kuva 1. Linjahinaaja ja apualukset kuljettamassa uittolauttaa (R. Nurmi, henkilökohtainen keskustelu, 1.4.2024).

4 Käyttövoimiin vaikuttava sääntely

Vaihtoehtoisia käyttövoimia käsiteltäessä on luotava katsaus siihen, minkälaiset niiden tulevaisuuden näkymät ovat. Taistelussa ilmastonmuutosta vastaan eri instituutiot ottavat käyttöön sekä kansainvälisiä että kansallisia keinoja, joilla edistetään nykyistä puhtaampien käyttövoimaratkaisuiden käyttöönottoa. Päästöjen pienentämisen lisäksi nämä keinot laskevat vaihtoehtoisten käyttövoimateknologioiden hankintakustannuksia, sillä kysynnän kasvaessa alalla toimivat yritykset pystyvät panostamaan eri teknologioiden tuotekehitykseen ja tuotantokapasiteettien kasvattamiseen. Kattavan kokonaiskuvan muodostamiseksi tässä luvussa käsitellään kansainvälisen merenkulkujärjestön IMO:n (International Maritime Organization), EU:n ja Suomen ilmastotoimia ja -tavoitteita. Lisäksi tarkastellaan eri käyttövoimien teknisiä vaatimuksia sisävesiliikenteen aluksissa.

4.1 IMO:n tavoitteet

IMO on Yhdistyneiden kansakuntien (YK) alainen järjestö, joka asettaa maailmanlaajuisia päästövähennystavoitteita merenkulkualalle (IMO, 2019). EU toimii tiiviissä yhteistyössä IMO:n kanssa ja unionin säätämät merenkulkualan direktiivit pohjautuvat usein IMO:n tavoitteisiin ja suosituksiin. IMO koostuu 175 jäsenmaasta ja sen tavoitteena on tehdä meriliikenteestä täysin hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä (IMO, 2019 & Euroopan komissio, 2023a). Välitavoitteina on laskea laivojen päästöjä vähintään 20 %:lla vuosikymmenen loppuun mennessä ja 2040 tultaessa vähintään 70 %:lla verrattuna vuoden 2008 tasoon. Euroopan komissio ja jäsenmaat ovat sitoutuneet näihin tavoitteisiin. Uusi tavoite sisältää myös aiempaa puhtaampien käyttövoimien lisääntyvän käyttöönoton, sillä vuoteen 2030 mennessä hiilineutraalien (tai lähes hiilineutraalien) käyttövoimien osuuden tulee olla vähintään 5 %.

4.2 Euroopan vihreän kehityksen ohjelma

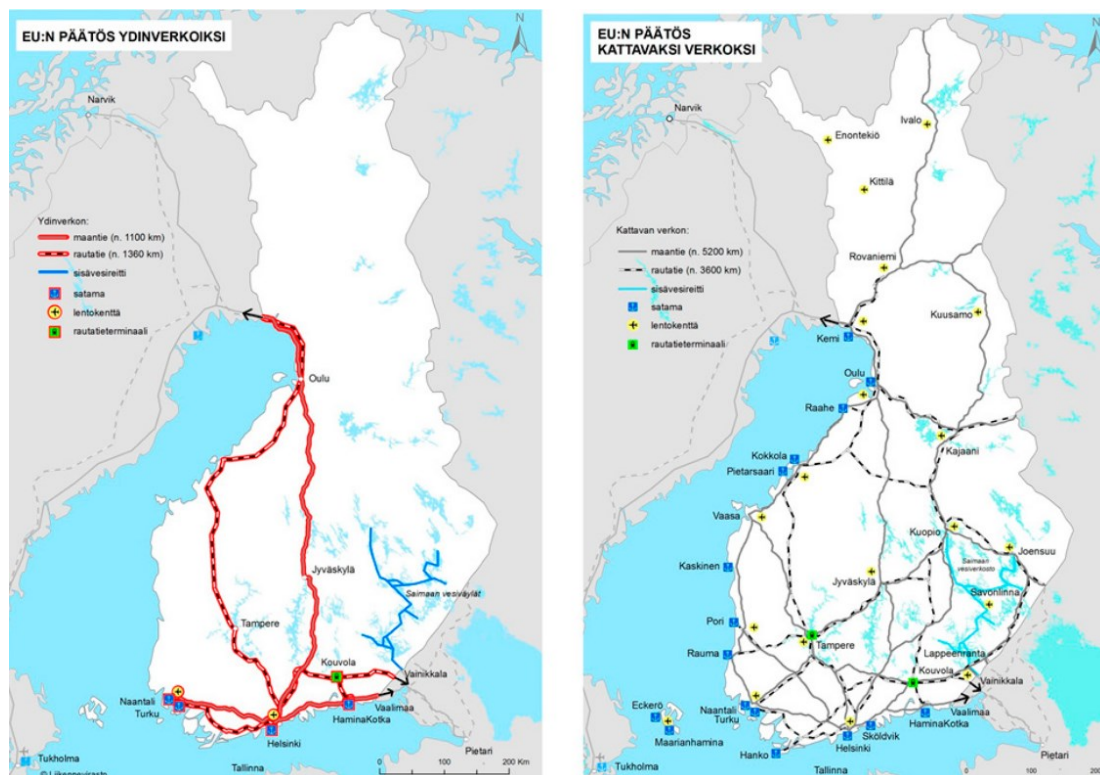
Vuonna 2019 julkistetun Euroopan vihreän kehityksen ohjelman yhtenä päätavoitteena on tehdä Euroopasta ensimmäinen ilmastoneutraali maanosa vuoteen 2050 mennessä (Euroopan komissio, 2021b). Kehitystoimenpiteitä kohdistetaan laajasti eri aloille, kuten energiantuotantoon, teollisuuteen, liikenteeseen sekä tutkimukseen ja innovointiin. Ohjelman välitavoitteena on vuoteen 2030 mennessä vähentää kasvihuonepäästöjä 55 %:lla vuoden 1990 tasoon verrattuna. Tähän tavoitteeseen yltämiseksi EU on luonut kattavan ja lainsäädännöllisen 55-valmiuspaketin, joka asettaa lukuisia ja usein porrastaen tiukentuvia vaatimuksia energiaa tuottaville ja käyttäville aloille (Euroopan komissio, n.d.). Vaatimukset ja toimenpiteet liittyvät mm. uusiutuvan energian lisäämiseen ja liikenteen päästöjen pienentämiseen.

55-valmiuspaketti sisältää mm. laivaliikennealaa koskevan FuelEu Maritime -asetuksen (Eurooppa-neuvosto, 2023a). Asetus edellyttää nykyistä puhtaampien polttoaineiden käytön asteittaista lisäämistä alalla siten, että käytettyjen polttoaineiden kasvihuonepäästöt vähenevät 80 %:lla vuosisadan puoliväliin mennessä. Kuten IMO:n tavoitteilla, tällä asetuksella tuetaan ja nopeutetaan alan toimijoiden investointipäätöksiä puhtaisiin käyttövoimiin, mikä edesauttaa merenkulkualaa yltämään EU:n ilmastotavoitteisiin.

4.2.1 Vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuuria koskeva asetusta (AFIR)

55-valmiuspaketti sisältää myös vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuuria koskevan AFIR-asetuksen (Alternative Fuels Infrastructure Regulation), jolla tullaan edistämään ja helpottamaan vaihtoehtoisten käyttövoimien, pääasiassa sähkön ja vedyn käyttöä niin maantie-, rautatie-, vesi-, kuin lentoliikenteessäkin (Euroopan komissio, 2023b). Asetus vaatii jäsenmaita tarjoamaan riittävän määrän sähkölataus- ja vedyn tankkausasemia kehitteillä olevaan TEN-T-verkostoon (Trans-European Transport Network). TEN-T-verkko tulee olemaan koko EU:n kattava liikennejärjestelmä, jonka on tarkoitus edistää tavaroiden ja ihmisten kestävästä liikkumisesta EU:n alueella (Väylävirasto, 2023). Verkkoon kuuluvat jokaisessa jäsenvaltiossa määritellyt maa- ja rautatieverkostot, lentokentät,

satamat ja sisävesiliikenteen väylät. TEN-T-verkko koostuu ydinverkosta, jonka tulee valmistua vuoteen 2030 mennessä ja kattavasta verkostosta, jonka määräaika on vuonna 2050. Kuvassa 2 on esitettyä Suomen ydin- ja kattava verkosto.



Kuva 2. Suomen ydin- ja kattava TEN-T-verkosto (Väylävirasto, 2023).

AFIR-asetuksen mukaan TEN-T-ydintieverkossa täytyy olla sähköautojen latauspisteitä 60 km:n ja vedyn tankkausasemia 200 km:n välein (Euroopan komissio, 2023b). Lisäksi vedyn tankkausasemia täytyy olla kaikissa kaupunkien solmukohtissa ja yksittäisen tankkauspuolelman päivittäisen kapasiteetin täytyy olla vähintään tuhat kiloa 700 baariin paineistettua vetyä (Eurooppa-neuvosto, 2023b). TEN-T-verkon vilkkaimmissa satamissa laivoilla täytyy olla mahdollisuus maasähkön käyttöön ja useimmissa verkkoon kuuluvissa sisävesiliikenteen satamissa täytyy myös olla maasähkön latauspiste. AFIR-asetus tulee näin ollen nopeuttamaan vielä tällä hetkellä puuttuvaa vedyn jakeluinfrastruktuuria ja vedyn tuotantoa, mikä tulee myös avaamaan ovia vetyä käyttäville käyttövoimaratkaisuille. Suomessa tullaan keväällä 2024 käsittelemään hallituksen esitystä AFIR-asetuksen kansallisesta toimeenpanosta (Valtioneuvosto, 2023a). Esityksessä määritetään mm. toimivaltaiset viranomaiset ja niiden tehtävät, millä luodaan edellytykset AFIR-asetuksen tehokkaaseen toimeenpanoon.

4.2.2 NAIADES III -toimintasuunnitelma

EU:n vihreän kehityksen ohjelman mukaan sisävesiliikenteen käyttämätöntä potentiaalia on hyödynnettävä, jotta liikennesektori ylittää unionin asettamiin päästötavoitteisiin (Euroopan komissio, 2021). EU:n kestävän ja älykkään liikkuvuuden strategian mukaan sisävesiliikenteen ja lähimerenkulun osuutta on kasvatettava 25 %:lla vuosikymmenen loppuun mennessä ja 50 %:lla vuoteen 2050 mennessä. Näitä tavoitteita varten EU on luonut vuosia 2021–2027 koskevan sisävesiliikenteen toimintasuunnitelman, nk. NAIADES III:n, jolla on kaksi tavoitetta: siirtää enemmän tavaraliikennettä sisävesille ja tehdä toimenpiteitä, joilla sisävesiliikennealasta voidaan tehdä päästötön. Sisävesiliikenteen vähäpäästöisyydestä huolimatta alalle on tehtävä kehitystoimenpiteitä kasvihuonekaasujen pienentämiseksi, jotta ala pysyy kilpailukykyisenä muihin liikennemuotoihin verrattuna. Keskeisenä tavoitteena on vähentää alusten päästöjä, mikä edellyttää investointeja. Investointien tekemistä hidastavat mm. pienyritysten merkittävä osuus ja ympäristöystävällisten käyttövoimien puute. Toimintasuunnitelma pyrkii luomaan taloudellisia ja lainsäädännöllisiä kannustimia, joiden avulla mahdollistetaan ja edistetään päästöttömien alusten ja käyttövoimien käyttöönottoa. Pieniä toimijoita voidaan tukea alusten uudistamisessa esimerkiksi hyödyntämällä EU:n InvestEU-rahoitusvälinettä.

4.3 Hallitusohjelma 2023 ja Suomen energiapolitiikka

Petteri Orpon hallituksen ohjelma (Valtioneuvosto, 2023b) on asettanut kunnianhimoisia tavoitteita energiasektorille, sillä ohjelma pyrkii tekemään Suomesta hiilinegatiivisen ja puhtaan energian edelläkävijän, jonka toimet vähentävät sekä Suomen että muun maailman päästöjä. Merkittävä energiaan liittyvä tavoite on tehdä Suomesta vetytalouden keskeinen toimija, sillä päämääränä on, että Suomen osuus EU:n vedyn tuotannosta sekä vedyn jatkojalostuksesta on 10 %. Keinoja tämän tavoitteen saavuttamiseen ovat mm. ulkomaisten uusiutuvan teollisuuden yritysten houkuttelemisen ja puhtaan sähkön tuotannon kaksinkertaistaminen. Suomesta pyritään tekemään erinomainen investointipaikka varmistamalla puhtaan ja edullisen sähkön saatavuus, mikä mahdollistaa mm. vihreän vedyn ja siitä jatkojalostettujen tuotteiden valmistamisen liikenteen ja teollisuuden

tarpeisiin. Lisäksi investointihankkeiden luvitusprosessista aiotaan tehdä sujuva, ennakoitava ja luotettava.

Hallituksen tavoite on kunnianhimoinen, sillä Ukrainan sodan seurauksena ja energia-markkinoiden epävarmuuksien lisääntyttyä EU on luonut vetytalouteen liittyvän REPowerEU-suunnitelman (Euroopan komissio, 2022). Suunnitelman tarkoituksena on lisätä EU:n energiaomavaraisuutta ja nopeuttaa vihreää siirtymää irtautumalla venäläisestä fossiilisesta energiasta. Hanke on asettanut EU:n vihreän vedyn vuosituotantotavoitteeksi 10 miljoonaa tonnia vuosikymmenen loppuun mennessä. Hallituksen tavoitteen mukaan Suomessa siis tuotettaisiin noin miljoona tonnia vihreää vetyä vuoteen 2030 mennessä.

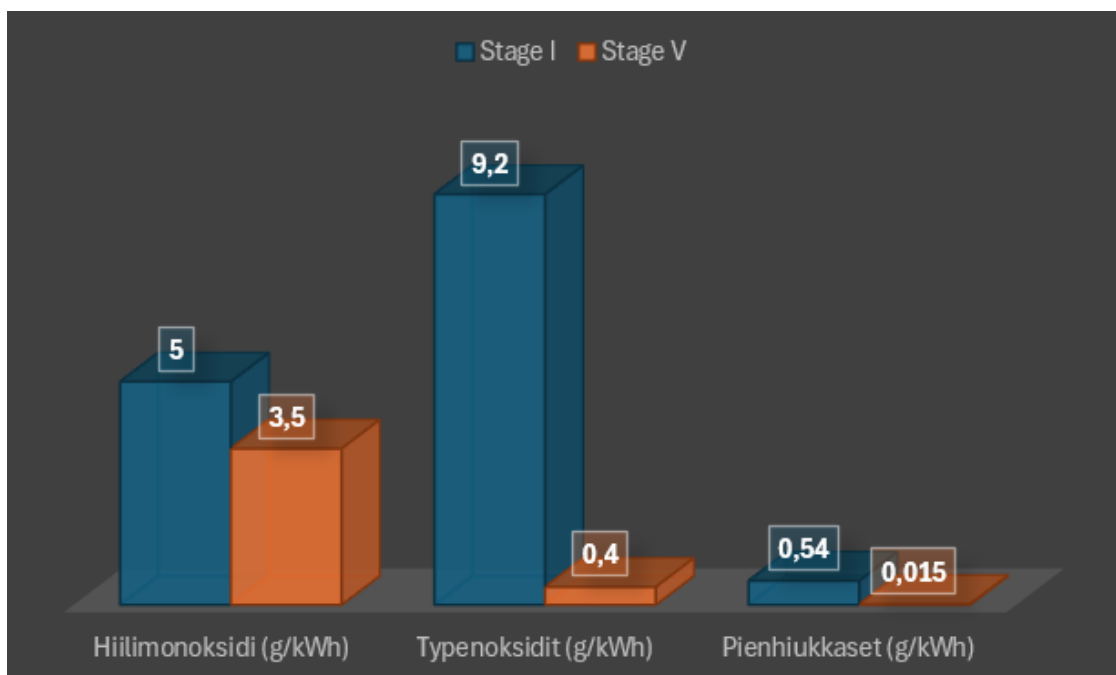
Nykyisen hallitusohjelman lisäksi mm. Elinkeinoelämän keskusliitto (2023) ja Hydrogen Cluster Finland (2021) ovat nostaneet esille Suomen erinomaiset mahdollisuudet puhtaan energian murroksessa. Suomen eräs merkittävimmistä kilpailueduista on mahdollisuus puhtaan sähköntuotannon laajamittaiseen kasvattamiseen. Suomen vahva sähkönsiirtoverkko, maantieteellinen koko ja harva asutus antavat edellytykset lisätä merkittävästi mm. maa- ja merituulivoiman tuotantoa. Suomen kunnianhimoiset ilmastotavoitteet, ennakoitava ja vakaa liiketoimintaympäristö, korkeasti koulutettu väestö, teknologiateollisuuden tietotaito sekä digitaalinen yhteiskunta luovat myös erinomaiset edellytykset vastata investointeja harkitsevien yritysten tarpeisiin.

4.4 Käyttövoimien tekniset vaatimukset

Sisävesiliikenteen potentiaalisimpia tulevaisuuden voimantuottoteknologioita ovat näillä näkymin polttomoottorit, generaattorit, akut ja polttokennot, sekä näiden yhdistelmät. Polttomoottoreissa hyödynnetään sekä perinteisiä että vaihtoehtoisia polttoaineita, mutta henkilöautoliikenteen tapaan myös sähköiset ratkaisut ovat lisääntymässä. EU:n ja Suomen ilmastotavoitteet tulevat avaamaan ovia myös vetyä käyttävien polttokennojen käytölle aluksissa. Käyttövoimien soveltuvuutta arvioitaessa on syytä katsoa näiden teknologioiden teknisiä vaatimuksia sisävesialuksissa.

4.4.1 Työkonemoottoreiden päästörajoitukset

Työkonemoottorien päästöjä koskeva nk. Stage V on EU:n viimeisin voimaan tullut päästörajoitusluokka (EU:n asetus 2016/1628). Stage V astui voimaan vuonna 2019, ja vuodesta 2020 lähtien se koskee työkonemoottorien kaikkia teholuokkia. Stage V ei sisällä rajoituksia hiilidioksidipäästöille, mutta asetuksen seurauksena uusien moottoreiden hiilimonoksidi-, typenoksidi-, hiilivety- ja pienhiukkaspäästörajat ovat entistä tiukemmat ja näihin yltäminen edellyttänee entistä tehokkaampia pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistoja tai vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöä. Kuva 3 havainnollistaa vuonna 1999 voimaan tulleen ensimmäisen päästöluokan, Stage I:n, ja Stage V:n välisiä eroja (mukaillen DieselNet, 2021). Stage I:n päästörajat koskivat kaikkia 130–560 kW:n työkonemoottoreita, mutta kuvassa olevat Stage V:n arvot koskevat sisävesialusten 130–300 kW:n moottoreita. Stage V:n jälkeisiä vielä tiukempia päästörajoituksia ei ole tällä hetkellä näköpiirissä EU:n alueella toimiville työkonemoottoreille (Vermeulen ja muut, 2023).



Kuva 3. Stage I:n ja Stage V:n päästörajat hiilimonoksidille, typenoksideille ja pienhiukkasille (mukaillen Dieselnet, 2024)

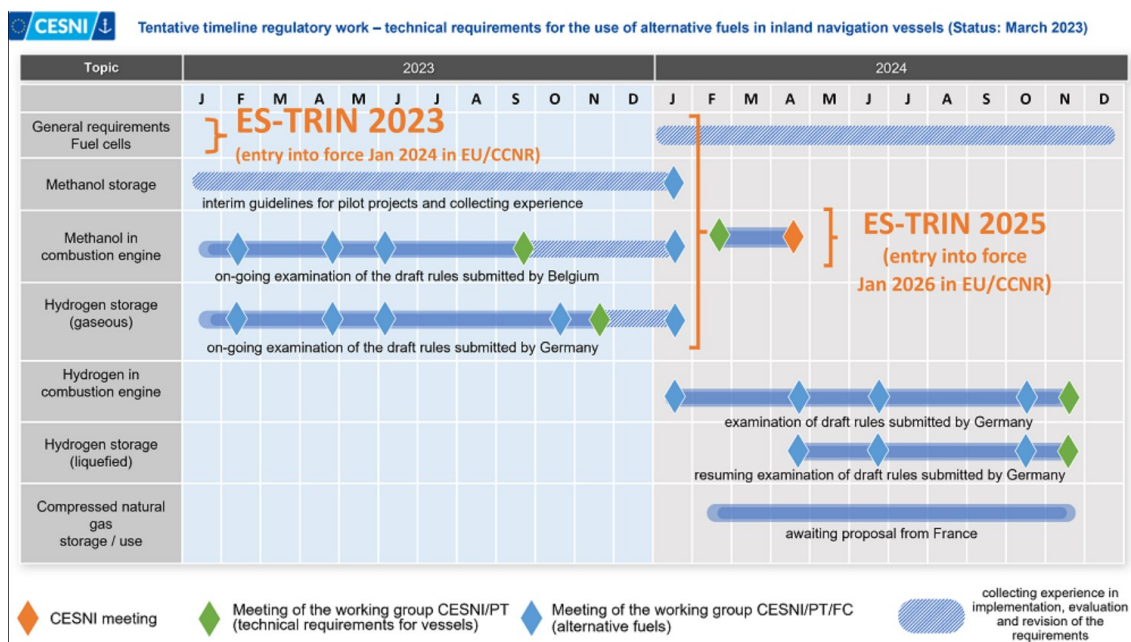
4.4.2 Sisävesiliikenteen alusten tekniset vaatimukset

Sisävesiliikenteen alusten on noudatettava EU:n asettamia teknisiä vaatimuksia (EU:n direktiivi 2016/1629). Tällä direktiivillä pyritään yhdenmukaistamaan EU:ssa toimivia aluksia ja tukemaan turvallisten ja vähäpäästöisten alusten innovointia, valmistusta ja käyttöönottoa. Suomessa ei kuitenkaan ole erillistä sisävesilainsäädäntöä, vaan sisävesillä käytetään merenkulkualan unionilainsäädäntöön ja IMO:n määräyksiin perustuvia kansallisia lakeja (Pasanen, 2015). Direktiivin vaatimusten tiedostaminen antaa kuitenkin hyvät edellytykset vaihtoehtoisia käyttövoimia hyödyntävän aluksen turvalliselle käytölle.

Vuonna 2016 voimaan tullut direktiivi pohjautuu sisävesialusten teknisiä vaatimuksia laativan CESNI:n ES-TRIN-standardiin, jonka tuorein versio astui voimaan tammikuussa 2024 (CESNI, 2024). Standardi sisältää mm. polttomoottorien, akkujen ja polttokennojen sisävesialuskäytölle asetettuja vaatimuksia (CESNI, 2023). Polttomoottoreista mainittakoon, että niiden tulee noudattaa Stage V:n mukaisia päästörajoituksia ja niiden pyörimisnopeuden tulee olla aluksen toimintaan soveltuva ja riittävä.

Sähköä käyttövoimanaan hyödyntävissä aluksissa täytyy olla vähintään kaksi voimanlähdettä siten, että jos yksi voimanlähde vikaantuu, jäljelle jäävän lähteen on pystyttävä toimittamaan sähköä vähintään 30 minuutin ajan turvallisen toiminnan kannalta tarvittaviin käyttökohteisiin (CESNI, 2023). Mikäli akun kapasiteetti on yli 20 kWh, se on sijoitettava paloturvalliseen tilaan ja latauslaitteiden on pystyttävä lataamaan akku 15 tunnissa 80 %:iin akun nimelliskapasiteetista ylittämättä suurinta sallittua latausnopeutta. Akun riittävä jäähdytys on myös varmistettava. Litiumioniakut vaativat rinnalleen akunhallintajärjestelmän, joka takaa akkujen suojauksen mm. oikosuluilta, ylivirroilta ja syväpurkauksilta. Hallintajärjestelmän on huolehdittava myös latausvirran kontrolloinnista, kuormituksen hallinnasta, akkukennojen lataustason tasauksesta ja lämmön hallinnasta. Mahdollisuuksien mukaan hallintajärjestelmän pitää lisäksi pystyä määrittämään akun ikääntyminen, jäljellä oleva kapasiteetti ja sisäisen vastuksen suuruus.

Viimeisimpään ES-TRIN-standardiin (2023) lisättiin yleisiä vaatimuksia myös polttokennojen turvallisen käytön varmistamiseksi. Polttokennon komponentit on sijoitettava omaan suojattuun tilaan. Tila on suunniteltava siten, että sen geometrinen muoto takaa hyvän ilmankierron tai inertin kaasun hyvän jakautumisen, jolloin mahdollisen räjähdysaineseoksen kertyminen on mahdollisimman pieni. Lisäksi tilassa on oltava kiinteästi asennettu ja jatkuvasti mittaava kaasunvalvontajärjestelmä ja polttokennojärjestelmä tulee rakentaa ja testata IEC 62282 -standardin tai sitä vastaavan standardin mukaisesti. Polttokennojen käyttöön otosta kerätään tietoa vuoden 2024 aikana, minkä pohjalta teknisiä vaatimuksia uudelleen arvioidaan ja niihin tehdään tarvittaessa muutoksia. Vuosien 2023 ja 2024 aikana CESNI määrittelee teknisiä vaatimuksia mm. paineistetun vedyn varastoinnille sekä metanolin varastoinnille ja käytölle polttomoottoreissa (CESNI, 2024). Nämä vaatimukset tulevat voimaan tammikuussa 2026. Vuoden 2024 aikana määritellään vaatimuksia myös vedyn nestemäiselle varastoinnille ja vedyn käytölle polttomoottoreissa. Kuvassa 4 nähdään CESNI:n aikataulu koskien mainittuja käyttövoimia.



Kuva 4. CESNI:n (2024) aikataulu koskien polttokennojen, metanolin ja vedyn teknisiä vaatimuksia.

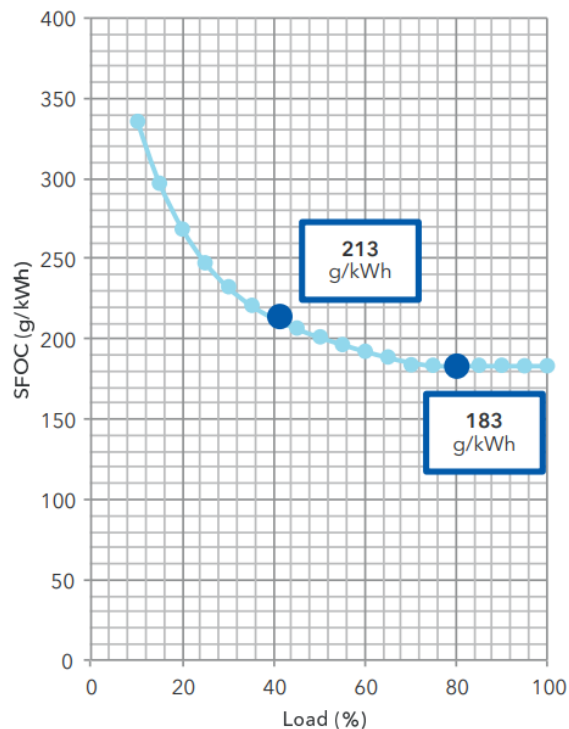
5 Dieselmoottorit ja generaattorit

Suurta tai pitkäaikaista tehoa vaativissa vesiliikenteen aluksissa tämänhetkisinä voimantuottajina käytetään pääasiassa dieselmoottoreita ja -generaattoreita. Dieselmoottorit ovat puristusytytteisiä polttomoottoreita, joiden käyttö raskaassa liikenteessä perustuu niiden suorituskykyyn ja kipinäsytytteisiä moottoreita parempaan hyötysuhteeseen (Heywood, 1988). Korkeampi hyötysuhde johtuu siitä, että puristusytytteisessä moottorissa puristetaan vain ilmaa, minkä ansiosta voidaan käyttää suurta puristussuhdetta, mikä parantaa hyötysuhdetta. Lisäksi dieselmoottorit eivät kärsi imuilman säätelystä johtuvista kuristushäviöistä kipinäsytytteisten tapaan. Dieselmoottorit pystyvät tuottamaan suurta tehoa pitkäaikaisesti polttoaineidensa suuren energiatiheden ja laajan saatavuuden ansiosta. Esimerkiksi työkoneissa käytetyn kevyen polttoöljyn lämpöarvo on noin 43 MJ/kg, kun sähköautoissa laajasti käytössä olevien parhaiden litiumioniakkujen energiatiheys on vain noin 0,94 MJ/kg (Tilastokeskus, 2024 & IEA, 2023a). Kun dieselmoottoriin yhdistetään generaattori, puhutaan dieselgeneraattorista (Johannesen & Heine, 2021). Generaattori muuttaa moottorin mekaanisen energian sähköenergiaksi, mikä mahdollistaa sähkön käytön sellaisissa käyttökohteissa, joissa ei ole pääsyä verkkovirtaan. Dieselgeneraattoreita käytetään yleisesti isoissa merenkulun aluksissa tuottamaan sähköä sekä potkureita pyörittäville sähkömoottoreille että muille sähköä tarvitseville laitteistoille, kuten ilmastoinnille ja valaistukselle.

Polttomoottoreiden varjopuoli ovat fossiilisista polttoaineista aiheutuvat kasvihuonepäästöt sekä lähipäästöinä vaikuttavat hiilimonoksidi, hiilivedyt, typenoksidit ja pienhiukkaset (Reşitoğlu ja muut, 2014). Näillä päästöillä on negatiivisia vaikutuksia ihmisten terveyteen, ympäristöön ja ilmakehään. Fossiilisia polttoaineita käytettäessä päästöjä voidaan pienentää mm. ajamalla polttomoottoria mahdollisimman suurella hyötysuhteella, joka on puristusytytteisessä työkone moottorissa parhaimmillaan noin 40 % (Motiva, 2023) ja isoissa merimoottoreissa jopa yli 50 % (Wikipedia, 2022).

Aluksen polttoaineen kulutus riippuu moottorin kuormituksesta (DNV, 2015). Moottorin ominaiskulutus (eng. Specific Fuel Oil Consumption, SFOC) kertoo, kuinka paljon poltto-

ainetta kuluu tuotettua energiamäärää kohti ja se ilmoitetaan usein yksikössä g/kWh. Kuvassa 5 on esitetty tavanomaisen nelitahtisen dieselmoottorin ominaiskulutus kuormituksen funktiona.



Kuva 5. Dieselmoottorin ominaiskulutuskäyrä (DNV, 2015).

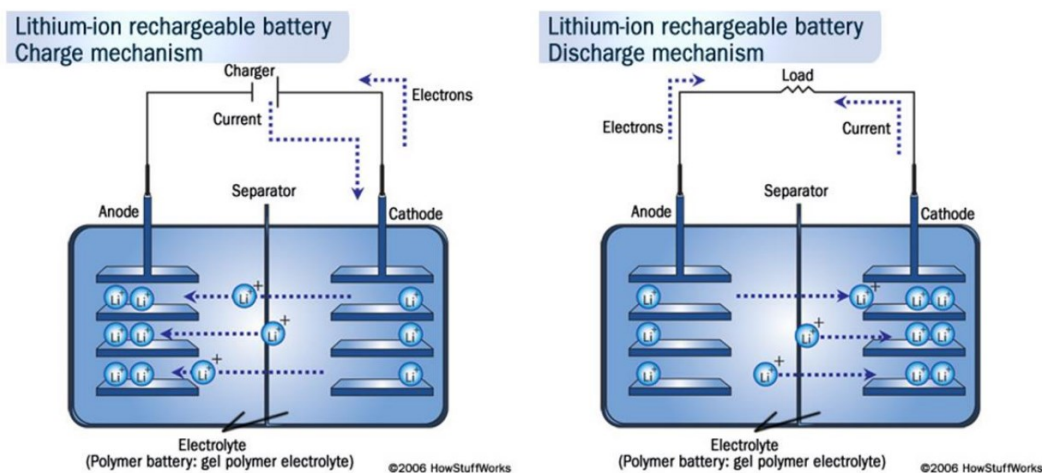
Kuvasta 5 nähdään, että moottorin ominaiskulutus on matalimmillaan (ja hyötysuhde korkeimmillaan) noin 70–100 %:n kuormitusalueella ja polttoaineen suhteellinen kulutus kasvaa merkittävästi alle 40 %:n kuormituksilla. Hyötysuhteen optimoimiseksi moottorin tulisi käydä siis mahdollisimman suuri osa ajasta suurella kuormalla. Tämä ei kuitenkaan aina toteudu varsinkaan yhden moottorin aluksissa, sillä aluksen suorittamat tehtävät voivat olla vaihtelevia ja suurta tehoa saatetaan tarvita vain harvoin. Aluksen moottori joudutaan kuitenkin mitoittamaan siten, että se pystyy vastaamaan aluksen suurimpaan mahdolliseen tehon tarpeeseen. Polttoainetehokkuuden parantamiseksi on kehitetty erilaisia hybridiratkaisuja, joita käsitellään luvussa 8.

6 Akkuteknologia

Alusten täysi sähköistäminen on vaativaa, mutta akkuteknologian avulla alusten polttoaineen kulutusta ja päästöjä voidaan kuitenkin pienentää. Näillä näkymin akkujen käyttö merenkulussa tulee yleistymään kiihtyvään tahtiin, sillä mm. Research and Markets (2023) arvioi meriakkujen markkinan kasvavan 18,6 %:n vuosivauhtia ja nelinkertaistuvan yli 2 miljardiin dollariin vuosien 2022–2030 aikana. Tässä luvussa käydään läpi akkujen rakennetta, toimintaa ja suorituskykyyn vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi tarkastellaan akunhallintajärjestelmää sekä akkuteknologian tulevaisuuden näkymiä ja hintakehitystä.

6.1 Akkujen rakenne ja toimintaperiaate

Akku on yksittäisistä akkukennoista koostuva sähkökemiallinen laite, joka kemiallisten reaktioiden avulla mahdollistaa sähköenergian varastoinnin ja myöhemmän käytön (DNV, 2016). Akkukennon pääkomponentteja ovat negatiivinen elektrodi (anodi), positiivinen elektrodi (katodi), elektrolyytti ja separaattori. Kemialliset reaktiot tapahtuvat elektrodeilla, jotka on upotettu elektrolyyttiin. Elektrolyytti on yleensä nestemäinen aine, jolta vaaditaan hyvää ioninjohtavuutta. Separattorin tehtävänä on eristää elektrodit toisistaan sekä päästää positiivisesti varautuneet ionit kulkeutumaan lävitseen. Elektronit eivät pääse kulkemaan elektrolyytin ja separattorin läpi, vaan ne pakotetaan kulkemaan ulkoisen piirin kautta elektrodilta toiselle. Kuvassa 6 näytetään tämän hetken suosituimman akkutyyppin, litiumioniakun, toimintaperiaate. Litiumioniakuissa käytetään useita erilaisia materiaaleja, joilla akun ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa merkittävästi. Näitä materiaaleja tarkastellaan kappaleessa 6.3.



Kuva 6. Litiumioniakun toimintaperiaate (DNV, 2016)

Litiumioniakkua ladattaessa litium hajoaa katodilla litiumioneiksi ja elektroneiksi. Elektronit virtaavat latauslaitteen läpi ja litiumionit elektrolyytin ja separaattorin läpi katodilta anodille, kunnes akku on täynnä tai lataus lopetetaan. Akkua purettaessa ulkoinen virtapiiri ja kuorma yhdistetään elektrodien väliin, jolloin potentiaalieron vaikutuksesta elektronit virtaavat kuorman läpi synnyttäen sähkövirtaa. Litiumionit kulkevat taas elektrolyytin ja separaattorin läpi katodille yhdistyen lopulta elektronien kanssa takaisin litiumiksi.

Akkujärjestelmän teho ja kapasiteetti riippuvat siitä, miten akut on kytketty toisiinsa (MAN Energy Solutions, 2019). Kytkemällä akkuja sarjaan akkujärjestelmän jännitettä ja siten tehoa saadaan nostettua. Kytkemällä akkuja rinnan saadaan akkujärjestelmän kapasiteettia nostettua. Yleensä akkuja kytketään sekä sarjaan että rinnan, jotta tarvittava kapasiteetti ja teho saadaan aikaiseksi.

6.2 Akkujen suorituskykyyn vaikuttavat tekijät

Akkujen suorituskyky ja käyttöikä heikkenevät sekä käytön että ajan myötä, mistä seuraa niiden verrattain lyhyt käyttöikä, noin 5–15 vuotta (DNV, 2016). Akun lataaminen ja purkamisen huonontaa kennon kykyä varastoida ioneja anodille ja siten akun energiakapasiteetti laskee lataus- ja purkusyklien myötä. Käytön myötä myös akun sisäinen vastus kasvaa, mikä johtaa heikkenevään hyötysuhteeseen, sillä suurempi osa energiasta muuttuu lämmöksi akkua ladattaessa tai purettaessa. Tätä suorituskyvyn laskua kuvataan

termillä State of Health (SOH), joka vertaa akun kuntoisuutta uuteen akkuun verrattuna. Usein SOH-tasolla viitataan akun kapasiteetin heikkenemiseen, mutta sitä voidaan käyttää myös esimerkiksi kuvaamaan akun kykyä tuottaa tehoa. Liikennekäytössä akun arvioidaan olevan käyttöikänsä päässä, kun sen kapasiteetti on laskenut 80 %:iin alkuperäisestä tasostaan.

Akun varaustilaa (State of Charge; SOC) ei pidä päästää liian matalaksi, sillä lataaminen tyhjästä täyteen huonontaa suorituskykyä enemmän kuin maltillisemmat varaustason muutokset (DNV, 2016). Jotta akun käyttöikä olisi mahdollisimman pitkä, akkua ei yleensä ladata täyteen, eikä sitä koskaan päästetä täysin tyhjäksi. Tämän takia akun energiakapasiteetin ja käyttöiän välillä on tehtävä kompromisseja. Maltillisemmat SOC-tason muutokset pidentävät käyttöikää, mutta tällöin tarvitaan enemmän akkuja saman suorituskyvyn saavuttamiseksi, mikä lisää kustannuksia.

Lämpötilalla on suuri vaikutus akun käyttöikään, sillä mitä korkeampi on lämpötila, sitä nopeampaa on akun heikkeneminen (DNV, 2016 & Miao ja muut, 2019). Akun optimaalinen lämpötila-alue riippuu mm. sen kemiallisesta rakenteesta, mutta yleisesti lämpötila on pidettävä noin 20–30 asteessa. Tätä varten akku tarvitsee ilma- tai nestepohjaisen jäähdytysjärjestelmän sekä akunhallintajärjestelmän, joka rajoittaa akun käyttöä tarvittaessa. Akunhallintajärjestelmää käsitellään lisää kappaleessa 6.4. Lämpötila voi nousta liian korkeaksi mm. suurteholataamisen yhteydessä, jolloin esimerkiksi litiumioniakuissa vaarana on litiumpinnoitteen muodostuminen anodille, mikä laskee akun kapasiteettiä.

Akun kykyä vastaanottaa ja purkaa virtaa turvallisesti kuvataan C-arvolla (MAN Energy Solutions, 2019). C-arvo voidaan laskea kaavalla 1.

$$C - arvo = \frac{Latausteho}{Akun\ kapasiteetti} \quad (1)$$

Mikäli C-arvo on 1, akku latautuu tai purkautuu yhdessä tunnissa. C-arvon ollessa 2, samaan operaatioon menee puoli tuntia. Suuremmat C-arvot siis kuvaavat nopeampaa ja pienemmät arvot hitaampaa virran vastaanottamista tai purkamista. Akun

latausnopeuteen vaikuttaa myös akun sen hetkinen varaustila, sillä akun lataaminen esimerkiksi 20 %:sta 80 %:iin saattaa kestää yhtä kauan kuin akun lataaminen 80 %:sta 95 %:iin. Akun käyttöiän pidentämiseksi suositellut C-arvot ovat lataamiselle noin 0,7–1 ja purkamiselle 1 (SPEL, 2024). Tehokkaille merenkulun akuille MAN Energy Solutions (2019) suosittelee maksimissaan C-arvoa 3.

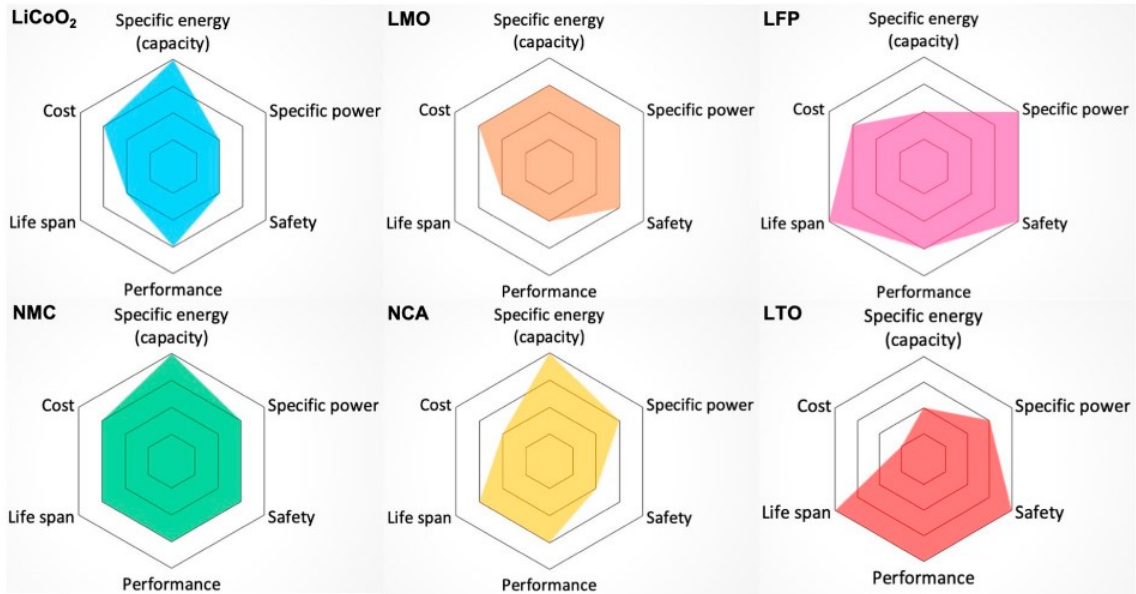
6.3 Akkumateriaalit

Käytetyillä materiaaleilla ja niiden seossuhteilla on merkittävä vaikutus siihen, kuinka paljon hyötyä akusta saadaan (Miao ja muut, 2019). Akkujen tyypit nimetään usein katodin mukaan, sillä akun suorituskyky riippuu pitkälti katodin kemiallisesta rakenteesta. Katodin materiaali määrittää suuresti muun muassa akun teho- ja energiakapasiteettia, käyttöikä ja hintaa. Erilaisia akkutyyppejä ovat mm. lyijy-, nikkelimetallihydridi- ja litiumioniakku, joista litiumioniakku on sähköisissä liikenteen sovelluksissa yleisin käytössä oleva akkutyyppeistä juuri sen mahdollistaman suhteellisen suuren tehon sekä energianvarastointikyvyn ansiosta. Yleisimpiä litiumioniakuissa käytettyjä katodimateriaaleja ovat mm. litiumkobolttioksidi (LCO), litiummangaanioksidi (LMO), litiumrautafosfaatti (LFP), litiumnikkelimangaanikobolttioksidi (NMC) ja litiumnikkelikobolttialumiinioksidi (NCA). Yhteistä näille on, että kaikissa tyypeissä litiumionit siirtyvät elektrodilta toiselle.

LCO-akut omaavat suuren energiatiheyden ja niiden valmistaminen on helppoa, minkä ansiosta niitä käytetään esimerkiksi kodin kannettavissa tietokoneissa ja muissa kodin elektroniikan laitteissa (Miao ja muut, 2019). LCO-akkujen käyttöä ajoneuvoissa on rajoittanut kobolttin korkean hinnan lisäksi sen herkkyys kuumenemiselle, mikä lisää riskiä akun syttymiselle. LMO-akut eivät sisällä arvokasta kobolttia ja niiden lämpötasapaino on LCO-akkuja parempi. LMO-akut omaavat hyvän virrankäsittelykyvyn, mikä mahdollistaa akkujen nopean lataamisen ja purkamisen. Toisaalta LCO-akkuihin verrattuna niiden käyttöikä on lyhyempi ja energiakapasiteetti pienempi. LFP-akut ovat pitkäikäisiä ja omaavat suuren tehon. Katodissa oleva fosfaatti auttaa akkua kestämään suuremmat lämpötilavaihtelut, minkä ansiosta nämä akut ovat turvallinen vaihtoehto ajoneuvoissa. Toisaalta LFP-akku kärsii suuremmasta itsepurkautuvuudesta muihin litiumioniakkuihin

verrattuna. Akun tyhjenemistä voidaan rajoittaa ohjauselektronikalla, mikä tosin lisää akkujärjestelmän hintaa. NMC-akut ovat suosittu vaihtoehto mm. sähköautoissa, sillä ne ovat tehokkaita ja niillä on suuri energiatiheys. Nämä ominaispiirteet saadaan aikaan hyödyntämällä nikkelin ja mangaanin ominaisuuksia. Nikkeli omaa korkean energiatiheyden, mutta on toisaalta epävakaa. Mangaani taas auttaa muodostamaan vakaan rakenteen, mutta se kärsii huonosta energiatiheydestä. NMC-akuista on useita eri versioita, joissa nikkelin, mangaanin ja kobolttin seossuhteet vaihtelevat. Esimerkiksi NMC111-akussa näitä metalleja on yhtä paljon, kun taas NMC811-akussa nikkelin osuus on kahdeksankertainen mangaaniin ja kobolttiin verrattuna. Sähköautovalmistaja Tesla käyttää autoissaan NCA-akkuja, joissa on yhtiön mukaan vielä vähemmän kobolttia kuin NMC811-akuissa. NCA-akut ovat NMC-akkujen tapaan tehokkaita ja suuren energiatiheyden akkuja, minkä lisäksi niiden käyttöikä on verrattain pitkä. Toisaalta NCA-akkujen valmistuskustannukset ovat korkeat ja turvallisen käytön varmistamiseksi nämä akut tarvitsevat rinnalleen edistyneen akunhallintajärjestelmän.

Näiden akkumateriaalien lisäksi eräs suosittu vaihtoehto on litiumtitanaattiakku (LTO), jossa katodin materiaalina voidaan käyttää litiummangaanioksidia tai litiumnikkelimangaanikobolttioksidia, mutta anodin materiaalina käytetään litiumtitanaattia (Miao ja muut, 2019). Litiumtitanaatti vakauttaa anodin rakennetta, minkä ansiosta LTO-akut ovat turvallinen ja pitkäikäinen vaihtoehto. Toisaalta LTO-akut kärsivät pienemmästä energiatiheydestä ja tehontuottokyvystä muihin litiumioniakkuihin verrattuna. Kuvassa 7 on esitettyinä eri litiumioniakkujen ominaispiirteitä.



Kuva 7. Yleisimpien litiumioniakkujen ominaispiirteitä (Miao ja muut, 2019)

Näistä materiaaleista NMC on ollut yleinen meriakkujen materiaali, sillä se pystyy parhaiten vastaamaan alusten teho vaatimukseen (Sachitanand, 2021). Muun muassa energianvarastointijärjestelmiä valmistava Corvus Energy käyttää akuissaan materiaalina NMC:tä (Corvus Energy, 2024). Yhtiön mukaan Corvus Orca ESS -järjestelmä on asennettu jo yli 400 alukseen, tehden siitä maailman suosituimman merenkulussa käytössä olevan energianhallintajärjestelmän.

Sekä sähköautoissa että merenkulun aluksissa sattuneet akkujen syttymiset ovat kuitenkin nostaneet turvallisempien LFP- ja LTO-akkujen suosiota meriakkujen materiaalina (Sachitanand, 2021). Esimerkiksi Damenin valmistamassa maailman ensimmäisessä täys-sähköhinaajassa, Sparkyssa, käytetään Echandian valmistamia LTO-akkuja (Echandia, 2022). Echandian mukaan aluksen turvallisen käytön lisäksi LTO-akkujen käyttöikä on jopa yli 20 vuotta.

6.4 Akunhallintajärjestelmä

Turvallisen ja optimaalisen käytön varmistamiseksi akkujen kanssa käytetään akunhallintajärjestelmää (DNV, 2016). Hallintajärjestelmä on monimutkainen sähköinen ohjausjärjestelmä, joka valvoo ja laskee toisistaan riippuvien jännitteen, virran ja lämpötilan raja-

arvoja ja määrittää milloin akun toimintaa on rajoitettava. Järjestelmä seuraa myös kennojen SOC- ja SOH-tasoja, joiden avulla saadaan tietoa akun yleisestä kuntoisuudesta ja siitä, kuinka paljon alus pystyy hyödyntämään akkua tietyn ajon aikana. Yksittäisten akkukennojen tilan määrittäminen ja tasapainottaminen on eräs hallintajärjestelmän tärkeimpiä tehtäviä. Mikäli yksittäisen kennon jännite eroaa merkittävästi muista kennoista, vaarana on, että tuota kennoa ladataan tai puretaan liikaa, mikä johtaa sekä suorituskyvyn laskuun että paloturvallisuusriskeihin. Akunhallintajärjestelmä on aina kalibroitava käytettyyn akkumateriaaliin sopivaksi turvallisen ja energiatehokkaan käytön varmistamiseksi.

6.5 Akkuteknologian tulevaisuuden näkymät

Liikenteen sähköistyminen ja energian varastoinnin kasvava tarve antavat vahvat kannustimet akkuteknologian kehitykselle. Akkuteknologian uskotaan kehittyvän nopeasti kaikilla teknologian keskeisillä alueilla: energia- ja tehotehdydessä, käyttöiässä, kustannuksissa ja turvallisuudessa (S&P Global, 2024). Tämä vaatii kuitenkin tutkimusta sekä materiaalikehityksessä että akkujen valmistustekniikassa. Tämän hetken suosituimman akkutyyppin, litiumioniakun, kehityksessä on paloturvallisuuteen liittyviä ongelmia, sillä energiatehyyden kasvattaminen nostaa akun lämpötilaa ja lisää siten akun syttymisen riskiä. Toinen vaatimus liittyy anodin materiaalikehitykseen. Anodin kyvyn varastoida ioneja täytyy olla yhtä hyvä kuin katodin. Nykyisin anodin materiaalina käytettävä grafiitti alkaa muodostumaan pullonkaulaksi katodimateriaalien kehittyessä. Tämän korjatakseen, valmistajat ovat alkaneet lisäämään anodiin piioksideja tai puhdasta piitä. Akkujen painoa pyritään pienentämään kasvattamalla akkukennojen kokoa, jolloin kotelomateriaalin suhteellinen osuus akussa laskee. Seuraavan vuosikymmenen painopisteinä nähdään akkujen nykyistä nopeamman latauksen mahdollistaminen, energiatehyyden kasvattaminen sekä turvallisen käytön edistäminen syttymisriskiä pienentämällä.

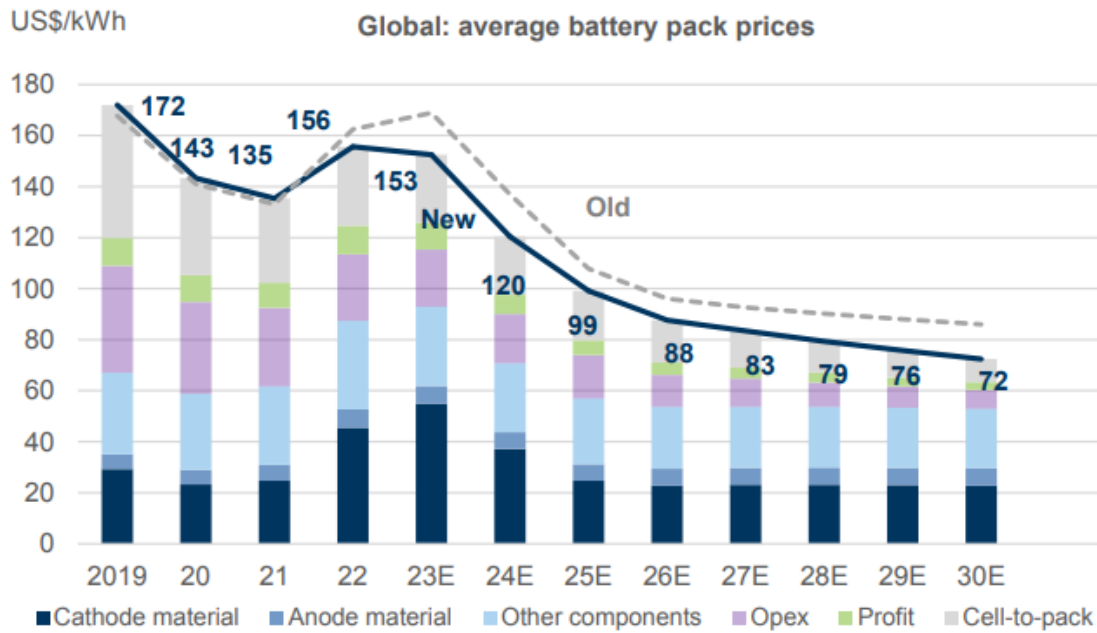
Tulevaisuuden suosituin akkutyyppi saattaa olla kiinteän olomuodon (eng. solid state) litiumakku, jossa nestemäinen elektrolyytti on korvattu kiinteällä materiaalilla ja anodin grafiitti tai pii on korvattu litiummetallilla (Crownhart, 2023 & Quantumscape, 2024).

Näillä muutoksilla on merkittäviä positiivisia vaikutuksia mm. akun energiatiheuteen, latausnopeuteen, turvallisuuteen, hintaan ja käyttöikään. Litiummetalli on erinomainen anodimateriaali, sillä perinteisiin materiaaleihin verrattuna se pystyy varastoimaan enemmän energiaa tiettyyn tilavuuteen ja mahdollistaa niitä nopeamman latauksen. Litiummetalli tarvitsee rinnalleen kiinteän olomuodon elektrolyytin, joka ei reagoi litiumin kanssa. Kiinteällä elektrolyytillä on positiivisia vaikutuksia akun käyttöikään ja turvallisuuteen, sillä toisin kuin nestemäinen elektrolyytti, se ei aiheuta korroosiota elektrodeissa eikä ole yhtä syttymis- ja räjähdysaltis.

Vaikka kiinteän olomuodon akuilla on merkittäviä vahvuuksia tämän päivän akkuihin verrattuna, niiden laajamittainen valmistus on vielä vaativaa, sillä akut reagoivat herkästi kosteuteen, happeen ja dendriittien muodostumiseen anodilla (Tekniikan maailma, 2023). Dendriitit ovat piikkikäitä rakenteita, jotka estävät akun homogeenisen latautumisen ja purkautumisen ja pahimmassa tapauksessa voivat aiheuttaa akun syttymisen. Artikkelin mukaan Toyota kuitenkin kertoi vuonna 2023 tekemästään läpimurrosta kiinteän olomuodon akkujen valmistamisessa ja arvioi toimittavansa markkinoille uuden sukupolven akkuja vuodesta 2027 lähtien.

6.5.1 Akkujen hintakehitys

BloombergNEF:n (2023) ja GoldmanSachsin (2023) tekemien tutkimusten mukaan akkujen hinnat tulevat laskemaan. Syynä tähän ovat kasvavan kysynnän myötä suuremmat panostukset akkuteknologian tuotekehitykseen, valmistuskapasiteetin kasvu ja tuotantoprosessien kehittyminen. Akkujen laskevaa hintakehitystä tukee myös se, että keskeisimpien raaka-aineiden, kuten litiumin, nikkelin ja koboltin hintojen odotetaan laskevan. Kuvassa 8 on esitetty GoldmanSachsin (2023) arvio hintojen kehityksestä, minkä mukaan akkujen kilowattituntikohtaisen hinnan odotetaan laskevan nykyisestä noin 150 \$:sta alle 80 \$:iin vuosikymmenen loppuun mennessä. Yhtiö arvioi mm. katodin valmistuskustannusten laskulla olevan suuri merkitys hintakehityksessä.



Kuva 8. Akkumateriaalien arvioitu hintakehitys (GoldmanSachs, 2023)

Merenkulun akkujärjestelmät ovat kuitenkin kalliimpia kuin sähköautojen akut (MAN Energy Solutions, 2019 & East Coast Marine Battery, 2024 & DNV, 2016). Tämä johtuu siitä, että olosuhteet merenkulussa ovat vaativammat kuin maantiekäytössä. Akkujen on kestettävä mm. aallokkoa ja kosteutta, minkä takia niiden mekaanisesta rakenteesta on tehtävä maakäyttöä vahvempi. Lisäksi hintaa nostavat meriakkujen tiukemmat eristysvaatimukset sekä se, että aluksiin asennettavat akkujärjestelmät on usein räätälöitävä kullekin alukselle sopivaksi. Hintaan vaikuttaa myös se, kuinka suurta tehoa akun täytyy tuottaa, sillä suurempi teho vaatii myös tehokkaamman jäähdytysjärjestelmän. Akkujärjestelmä, jonka tehtävänä on vastata tehuippuihin tai tasoittamaan generaattorin kuormitusta, on kalliimpi kuin järjestelmä, johon ei kohdistu suuria teho vaatimuksia. Sustainable Ships:n (2024a) ylläpitämän datan mukaan meriakkujärjestelmän hinta on noin 650–750 €/kWh ja Interreg-Danube:n (2020a) mukaan sisävesialusten akkupaketin hinta on noin 500 €/kWh. Meriakkujärjestelmän kilowattituntikohtaisen hinnan odotetaan putoavan 300 euroon vuosien 2027–2028 aikana (S. Hoedemaker, henkilökohtainen keskustelu, 29.2.2024).

7 Vety käyttövoimana

Luvussa 4 tarkasteltujen EU:n ja Suomen tavoitteista voidaan päätellä, että puhtaasti tuotettu vety nähdään lupaavana ratkaisuna fossiilisten energialähteiden korvaajana sellaisissa teollisuuden ja liikenteen käyttökohteissa, joissa suora sähköistäminen on vaikeaa. Vedyn käyttökohteet ovat monipuoliset, sillä sitä voidaan käyttää polttoaineena polttokennoissa ja -moottoreissa, siitä voidaan jatkojalostaa muita hiilineutraaleja polttoaineita, ja se voi toimia ylimääräisen sähkön energiavarastona uusiutuvien energialähteiden, kuten tuuli- ja aurinkovoiman lisääntyessä.

7.1 Vedyn valmistus ja varastointi

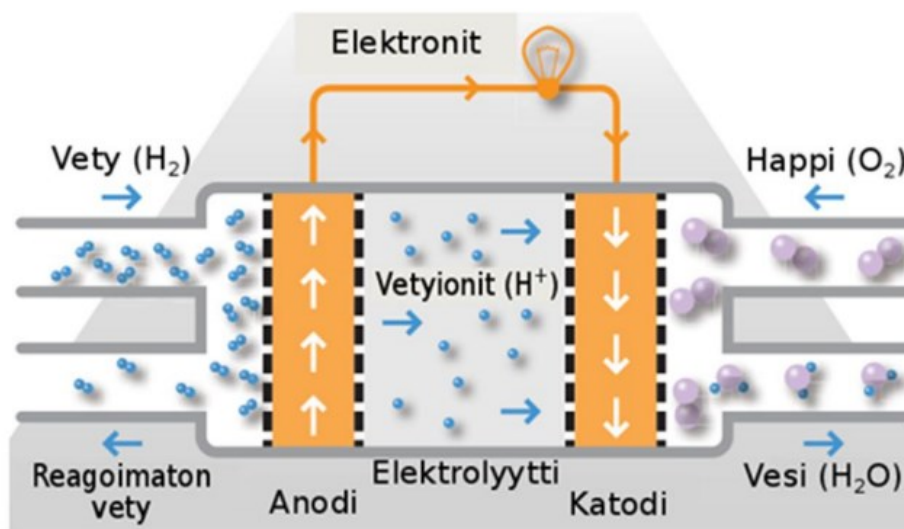
Maapallolla vety on sidoksissa muihin molekyyleihin, joista se on irrotettava ennen käyttöä. Tällä hetkellä vetyä valmistetaan pääasiassa fossiilisista lähteistä, kuten maakaasun höyryreformoinnilla (62%) ja hiilestä kaasuttamalla (21%) (IEA 2023b). Öljynjalostamoiden ja petrokemiateollisuuden prosessien sivutuotteina vetyä tuotetaan 16 % sen kokonaistuotannosta. Vetyä on mahdollista valmistaa myös elektrolyysin tai hiilen talteenototeknologioiden avulla. Elektrolyysissä vesimolekyylit hajotetaan hapeksi ja vedyksi sähkövirran avulla. Jos sähkö on tuotettu uusiutuvalla energialla, ei vedyn valmistuksesta koidu kasvihuonepäästöjä. Elektrolyysillä tuotettua vetyä kutsutaan vihreäksi vedyksi. Hiilen talteenototeknologioissa vety tuotetaan fossiilisista lähteistä, mutta prosessissa vapautunut hiili otetaan talteen ja varastoidaan, jolloin prosessista ei aiheudu päästöjä ilmakehään. Vuonna 2022 puhdasta vetyä tuotettiin noin 6,65 Mt, mikä on vain 0,7 % vedyn kokonaistuotannosta. Päästötavoitteiden seurauksena voidaan olettaa puhtaan vedyn tuotantomäärän kasvavan merkittävästi tulevaisuudessa. IEA:n vuoden 2023 katsauksessa arvioidaan puhtaan vedyn tuotantomääräksi 20 Mt vuonna 2030, mikä on noin kolminkertainen vuoteen 2022 verrattuna.

Vedyn energiatiheys massaansa suhteutettuna on suuri, 120 MJ/kg, eli noin kolminkertainen dieselöljyyn nähden (Jansson, 2022). Toisaalta vedyn tiheys on hyvin pieni, mikä tarkoittaa, että se pitää varastoida joko noin 200–700 baarin paineeseen tai jäähdyttää alle

-253 °C:een nesteeksi. Nesteyttämällä vety saadaan varastoitua pienempään tilaan, mutta nesteyttäminen vie paljon enemmän energiaa kuin paineistaminen. Vedyn paineistamiseen kuluva energia vastaa noin 11–13 % ja nesteyttäminen noin 30 % varastoidun vedyn energiasisällöstä (Tarhan & Çil, 2021).

7.2 Polttokennot

Polttokenno on energiantuotantolaitte, joka muuttaa siihen syötetyn polttoaineen kemiallisen energian sähköksi ja lämmöksi (O'hayre ja muut, 2016). Polttokennon rakenteessa on yhtäläisyyksiä akkuihin, sillä sen pääkomponentit ovat anodi- ja katodi-elektrodit, niiden välissä oleva elektrolyytti, sekä anodin ja katodin yhdistävä ulkoinen virtapiiri. Toiminta eroaa silti merkittävästi akuista, sillä polttoainetta syötetään laitteeseen ulkopuolelta. Vetypolttokennossa vetyä syötetään anodille, jossa hapetusreaktion seurauksena vety pilkotaan vetyioneiksi (protoneiksi) ja elektroneiksi. Positiivisesti varautuneet vetyionit pääsevät kulkemaan elektrolyytin läpi. Elektrolyytti, jonka materiaali vaihtelee polttokennotyypistä riippuen, pakottaa elektronit kulkemaan katodille ulkoisen virtapiirin kautta, mikä synnyttää sähkövirran. Virtapiiriin yhdistetyn kuorman jälkeen elektronit siirtyvät katodille. Katodille syötetään ulkopuolelta happea ja elektronien, vetyionien ja hapen pelkistysreaktion seurauksena polttokennosta poistuu pelkästään vettä ja lämpöä. Sähkövirran määrä on verrannollinen sekä pinta-alaan, jossa reaktiot tapahtuvat, että hapetusreaktioiden nopeuteen. Pinta-alan maksimoiminen takia ja toisaalta kennon koon minimoimiseksi polttokennon komponentit ovat muodoltaan ohuita ja tasomaisia rakenteita. Hapetusreaktioiden nopeuttamiseksi anodilla käytetään katalyyttejä, kuten platinää. Kuva 9 havainnollistaa polttokennon toimintaperiaatetta.



Kuva 9. Polttokennon toimintaperiaate (Nissilä ja Sarsama, 2013)

Polttokennoissa voidaan käyttää vedyn lisäksi myös useita muita polttoaineita, kuten metanolia ja maakaasua (Tronstad ja muut, 2017). Polttoaineesta täytyy erottaa vety ennen kuin se syötetään anodille. Tähän erottamiseen käytetään ulkoisia erottelu- ja puhdistuslaitteistoja, jotka tosin laskevat polttokennon kokonaishyötysuhdetta, lisäävät kustannuksia ja vievät tilaa aluksessa. Puhdistuslaitteistosta huolimatta fossiilisista lähteistä erotettu vety ei myöskään ole yhtä puhdasta kuin vihreä vety, mikä voi laskea kennon hyötysuhdetta ajan mittaan. Jos polttokennon käyttölämpötila on tarpeeksi korkea, vedyn erottelu voidaan tehdä sisäisesti eikä erillistä vedyn puhdistuslaitteistoa tarvita. Polttokenno on ympäristöystävällinen energiantuotantolaite, sillä se mahdollistaa päästöttömän energiantuotannon vihreää vetyä käytettäessä, ja fossiilisiakin polttoaineita käytettäessä kennon typenoksidi- ja pienhiukkaspäästöt ovat vähäiset (O'hayre ja muut, 2016). Liikkuvien osien puuttuessa, polttokennot ovat myös luotettavia, kestäviä ja hiljaisia. Liikennekäytössä polttokennon rinnalla käytetään tavallisesti myös akkua, sillä akku pystyy kennoa nopeammin reagoimaan nopeisiin kuormituspiikkeihin. Esimerkiksi EODev:n (2024) hybridiratkaisussa polttokenno tuottaa tehoa aluksen ajaessa tasaisella nopeudella, ja akku toimittaa virtaa aluksen kiihdyttäessä.

Polttokennoilla on eräitä merkittäviä vahvuuksia polttomoottoreihin ja akkuihin verrattuna (O'hayre ja muut, 2016). Polttomoottorissa polttoaineen kemiallinen energia

muutetaan ensin lämmöksi ja sitten mekaaniseksi energiaksi ja mahdollisesti vielä mekaanisesta energiasta sähköenergiaksi generaattorin avulla. Polttokennoissa polttoaineen kemiallinen energia muutetaan suoraan sähköenergiaksi, mikä johtaa polttokennojen parempaan hyötysuhteeseen polttomoottoreihin verrattuna. Akkuihin verrattuna polttokennoilla voidaan tuottaa sähköä pitempiaikaisesti, sillä niiden kapasiteetti riippuu ulkoisesta polttoainetankista eikä laitteen sisälle varastoidusta rajallisesta kapasiteetista. Polttoainetankin täyttäminen on myös akkujen lataamista nopeampaa ja polttokennoratkaisujen skaalaaminen suuren teholuokan laitteistoiksi käy akkuja paremmin. On olemassa useita erilaisia polttokennoratkaisuja, jotka eroavat toisistaan mm. hinnan, materiaalien, teknologisen valmiustason ja käyttölämpötilan suhteen (Tronstad ja muut 2017). Merenkulun aluksille asiantuntijat näkevät sopivimpina teknologioina protoninvaihtopolttokennot (eng. Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC), korkean lämpötilan protoninvaihtopolttokennon (eng. High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell, HT-PEMFC) sekä kiinteäoksidipolttokennon (eng. Solid Oxide Fuel Cell, SOFC).

7.2.1 Protoninvaihtopolttokenno

Protoninvaihtopolttokenno käyttää katalyyttinä platinaa ja elektrolyyttinä kostutettua polymeerikalvoa (Tronstad ja muut 2017). Kennon käyttölämpötila on matala, noin 50–100 °C, sillä elektrolyytin on pysyttävä kosteana. PEMFC-kennon käynnistysaika on lyhyt, minkä ansiosta se sopii etenkin pienille, hyvää ohjattavuutta vaativille aluksille. Matalan käyttölämpötilansa ansiosta PEMFC:n materiaalivaatimukseen ei kohdistu tiukkoja vaatimuksia, mutta toisaalta prosessissa syntyvää lämpöä on hankala hyödyntää. PEMFC on jo yleistä teknologiaa ja sen hyötysuhde, 50–60 %, on polttokennojen kategoriassa kohtuullinen.

PEMFC:ssä käytetyn vedyn puhtauden tulee olla yli 99,97 %, sillä epäpuhtaudet, kuten hiilimonoksidi tai rikki, vaikuttavat herkästi laitteen suorituskykyyn ja käyttöikänsä (EASEE-gas, 2022). Käytännössä tämä tarkoittaa, että vety on valmistettava polymeerielektrolyysillä (eng. Proton Exchange Membrane, PEM), jolla on mahdollista valmistaa

99,9-99,9999 % puhdasta vetyä. Esimerkiksi anioninvaihtokalvoelektrolyysillä (eng. Anion Exchange Membrane Electrolyser, AEM) tuotetun vedyn puhtaus on vain noin 99,4 %. PEMFC:n vedenhallintajärjestelmä on monimutkaisempi kuin muiden kennotyyppien, sillä sen on poistettava prosessissa syntyvää vettä oikea-aikaisesti (Tronstad ja muut 2017). Jos vettä poistetaan liian hitaasti, kennoon ei voida syöttää tarpeeksi happea. Jos vettä taas haihdutetaan liian nopeasti, vaarana on, että elektrolyytti kuivuu.

7.2.2 Korkean lämpötilan protoninvaihtopolttokenno

HT-PEMFC:n käyttölämpötila on korkeimmillaan 200 °C, minkä mahdollistaa elektrolyytinä käytetty mineraalihappo (Tronstad ja muut 2017). Kennon sähköinen hyötysuhde on samaa luokkaa PEMFC-kennon kanssa, mutta lämmöntalteenotolla sen kokonaishyötysuhdetta pystytään nostamaan. Tätä lämpöä on mahdollista hyödyntää mm. aluksen lämmityksessä. HT-PEMFC-kennoa voidaan käyttää mm. maakaasulla tai metanolilla sekä fossiilisista lähteistä valmistetulla vedyllä, sillä korkean lämpötilan ansiosta se ei ole niin herkkä epäpuhtauksille kuin tavallinen PEMFC. Fossiilisia polttoaineita käytettäessä polttoaineesta erotetaan vety erottelulaitteen avulla, ennen kuin se syötetään kennoon. Korkean lämpötilan ansiosta HT-PEMFC:n vedenhallintajärjestelmä on myös yksinkertaisempi. Toisaalta HT-PEMFC:llä on tavalliseen PEMFC:hen verrattuna pienempi tehotiheys. Lisäksi käynnistysaika on tavallista PEMFC:tä pidempi, sillä kennon ja erottelulaitteiston lämpötila on nostettava käyttölämpötilaan ennen aluksen käyttöä. Aluskäytössä lämmitysenergia otetaan akusta, mikä voi edellyttää suuremman akun käyttöä tavalliseen PEMFC:hen verrattuna.

7.2.3 Kiinteäoksidipolttokenno

Kiinteäoksidipolttokennossa käyttölämpötila on 500–1000 °C, ja lämmöntalteenotolla kokonaishyötysuhde voi ylittää 85 %:iin (Tronstad ja muut 2017). Elektrolyytti on huokoisen keraamipohjainen materiaali, esimerkiksi yttrium-stabiloitu zirkoniumoksidi. Anodin materiaalina käytetään nikkelseoksia ja katodissa strontiumilla seostettua lantaninimagnaattia. SOFC-kennot sopivat suurta, jopa 10 MW tehoa vaativiin käyttökohteisiin.

Toisaalta korkea lämpötila asettaa lisävaatimuksia SOFC:n turvalliselle käytölle, ja hiili-pohjaisia polttoaineita käytettäessä hiilidioksidi- ja typenoksidipäästöt kasvavat. Teknologia vaatii vielä kehittämistä, mutta käynnissä olevat demonstraatioprojektit tulevat antamaan lisää tietoa SOFC-kennojen soveltuvuudesta aluksiin. Esimerkiksi vuosien 2022–2027 aikana SOFC:n käytettävyydestä kerätään tietoa EU:n rahoittamassa Helenus-hankkeessa, jossa 500 kW:n SOFC-järjestelmä asennetaan MSC World Europa -risteilyalukseen (Helenus, 2023). Projektin tavoitteena on laajentaa SOFC-tekniikan käyttöä niin merenkulussa kuin sisävesiliikenteessä.

7.3 Vety polttomoottorin polttoaineena

Vetyä voidaan käyttää polttoaineena myös polttomoottorissa, jolla on omat hyvät ja huonot puolensa akkuteknologiaan ja polttokennoihin verrattuna (Onorati ja muut, 2022). Vetymoottorin käyttöönotossa ja kehityksessä voidaan hyödyntää edistyksellistä polttomoottoritekniikkaa, olemassa olevia toimitusketjuja, valmistajia ja kierrätysinfrastruktuuria, mitkä mahdollistavat sen käyttöönoton siirryttäessä kohti nykyistä puhtaampia käyttövoimaratkaisuja. Vetymoottoreissa syntyy pääasiassa vain typenoksidipäästöjä ja mahdollisesti pieniä määriä hiukkas- ja hiilivetyypäästöjä käytetystä voiteluöljystä riippuen. Nämä päästöt voidaan kuitenkin pienentää lähes nolnaan optimaalisella vetyilma-seossuhteella, voiteluöljyn valinnalla, männänrenkas- ja palotilarakenteella sekä pakokaasujen jälkipuhdistusmenetelmillä, kuten SCR-katalysaattorilla ja pienhiukkassuodattimilla.

Kuten polttokenno, myös vetymoottori mahdollistaa suuremman toimintasäteen akkuihin verrattuna (Onorati ja muut, 2022). Tämä on merkittävää varsinkin raskaan liikenteen kulkuneuvoissa, joissa tehovaatimukset ja pitkät ajomatkat vaativat suuria ja painavia akkuja niiden pienen energiatihedden takia. Lisäksi akut tarvitsevat harvinaisia maametalleja, joiden määrä on rajallinen ja joiden kaivostoiminnasta aiheutuu myös päästöjä. Etenkin raskaassa liikenteessä akkujen kustannukset ja koko tekevät vetyä käyttävästä polttomoottorista kustannuskilpailukykyisen.

Onorati ja muut (2022) luettelevat vetymoottorin etuja polttokennoihin verrattuna. Polttokennojen heikkoutena ovat niiden kustannukset sekä polttomoottoria korkeammat vaatimukset vedyn puhtaudelle. Liikennekäytössä polttokennot tarvitsevat vierelleen akun ajoneuvojen vaihtelevien tehovaatimusten täyttämiseksi ja kompressorin toimittamaan paineistettua ilmaa katodille. Nämä laskevat polttokennojärjestelmän kokonaisyötysuhdetta, ja sen todetaan olevan samaa luokkaa perinteisten polttomoottoreiden kanssa. Lisäksi PEMFC-kennojen lämpötila on pidettävä huomattavasti matalampana kuin polttomoottorin, mikä tarkoittaa suurempia jäähdytysjärjestelmiä.

7.3.1 Vetymoottorin vahvuudet ja haasteet

Vedyllä on useita kemiallisia ominaisuuksia, jotka tekevät siitä paremman kuin perinteiset polttoaineet, mutta vedyn palamistapahtuman hallinta on käytännön sovelluksissa vaativaa (Onorati ja muut, 2022). Vety on herkästi syttyvää, mikä mahdollistaa erittäin laihojen polttoaineseosten käytön, mikä vuorostaan johtaa mataliin typenoksidipäästöihin ja pieneen polttoaineen kulutukseen. Esisytyminen ja sitä seuraava hyvin voimakas paineen nousu muodostaa erään vaikeimmista haasteista vetymoottoreissa, sillä matalan syttymisenergiansa takia vety voi syttyä ennen aikaisesti sylinterin paikallisissa kuumissa kohdissa. Palaminen kuluttaa moottorin mekaanista rakennetta ja huonontaa hyötysuhdetta. Lisäksi vedyn kyky palaa vielä 0,64 mm päässä seinämästä johtaa kohonneisiin lämpöhäviöihin. Imukanavaruisikutusta käytettäessä tämä ominaisuus voi aiheuttaa palon imukanavassa, mikäli vetyä pääsee kanavaan ennen kuin imuventtiili kokonaan sulkeutuu. Nakutus ohjatun sytytyksen jälkeen on kolmas mahdollinen haitta: vielä palamaton seos syttyy palorintaman edetessä ja seosta kuumentaessaan.

Pienen syttymisenergian vastapainoksi vedyn puristuskestävyys on suuri, mikä mahdollistaa korkean puristussuhteen käytön, mikä taas johtaa hyvään kokonaisyötysuhteeseen (Onorati ja muut, 2022). Vety palaa nopeasti, mikä nostaa moottorin tehoa, parantaa hyötysuhdetta ja mahdollistaa suuret pyörintänopeudet. Toisaalta nopea palamisnopeus nostaa sylinterin lämpötilaa ja lisää näin typenoksidipäästöjä. Mitä laihempia seoksia käytetään, sitä kauemmin palamistapahtumassa kestää. Vety sekoittuu palamis-

ilmaan helposti, mikä johtaa täydellisempään palamiseen ja parantaa hyötysuhdetta. Puristussuhteen ja vety-ilma-seossuhteen optimointi ovat kriittisiä epänormaalin palamisen estämiseksi.

Epäsuoran ruiskutuksen ongelmia on pyritty ratkaisemaan ruiskuttamalla vetyä suoraan sylinteriin samaan tapaan kuin dieselmootoreissa, koska suoraruiskutuksella voidaan paremmin estää vedyn pääsemistä takaisin imukanavaan (Onorati ja muut, 2022). Vety-ilma-seoksen muodostumiseen tarvitaan suurpainesuuttimia, joiden kaupallinen saataavuus on vielä pullonkaulana vedyn suoraruiskutusmenetelmän laajemmalle käyttöönotolle. Valmistajat kehittävät tällä hetkellä suoraruiskutusjärjestelmiä suuriin merenkulun aluksiin.

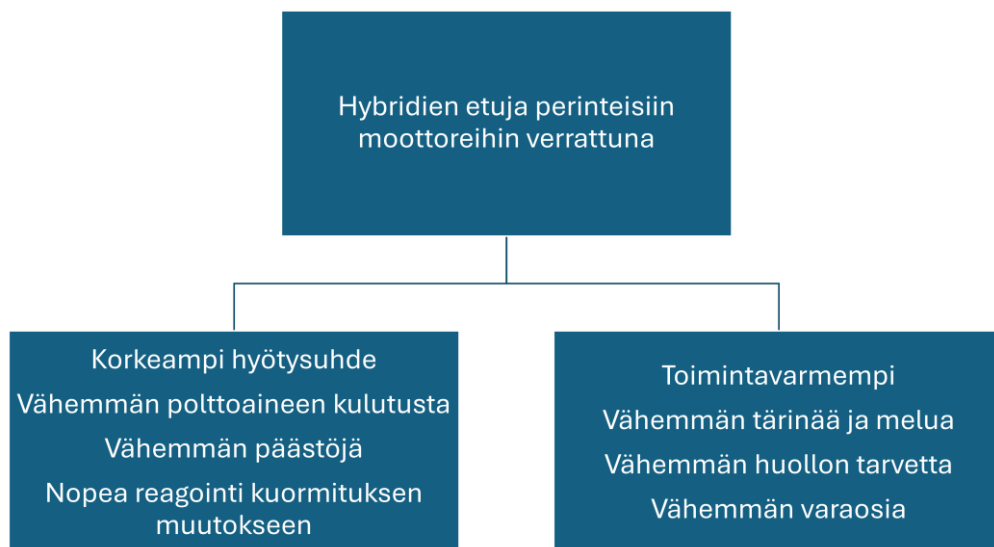
Kaj Portin (2022) avaa Wärtsilän kehityskulkua vetyä hyödyntävien moottoreiden kehityksessä. Vuoteen 2015 asti yrityksen kaasukäyttöiset moottorit sallivat polttoaineen sisältävän korkeintaan 3 % vetyä. Tämän jälkeen yritys on kehittänyt DF-moottorin (dual fuel), joka sallii polttoaineen vetypitoisuuden olevan jo 25 %. Mikäli polttoaine sisältää yli neljäsosan vetyä, moottorin täytyy täyttää IEC 60079 -standardin IIC-luokan syttyvän kaasun vaatimukset. Tämä vaikeuttaa moottorin suunnittelua, sillä komponenttien sallitut jännitetasot ovat pienempiä, ja polttoainepumppujen on oltava vetykäyttöön suunniteltuja

DF-vetymoottoreissa vedyn sytyttämiseen käytetään pilottipolttoainetta, kuten dieselöljyä tai metaania (Niemi, 2024). Vety ruiskutetaan sylinteriin pilottipolttoaineen jälkeen lähellä yläkuolokohtaa, mikä saa vedyn syttymään helposti ja palamaan vakaasti. Ruiskutusmenetelmän ansiosta DF-moottorit eivät kärsi nakutuksesta, mikä mahdollistaa suuren tehontuoton ja hyvän kokonaisyötysuhteen. Toisaalta epähomogeenisen polttoaineseoksen takia palaminen tapahtuu lähes stökiometrisissä olosuhteissa, mikä nostaa palamislämpötilaa ja siten typenoksidipäästöjä. Sylinteristä ulos tulevat typenoksidipäästöt voidaan pienentää pakokaasujen jälkikäsitteilyjärjestelmän vaatimalle tasolle mm. pakokaasujen takaisinkierrätyksellä ja optimoimalla polttoaineen ruiskutuspainetta

ja ruiskutuksen ajoitusta. Uusiutuvaa dieseliä käytettäessä DF-moottorin päästöt voidaan pienentää lähes nollaan. Vedyn laajamittainen käyttö moottoreiden polttoaineena vaatii vielä puhtaan vedyn tuotannon merkittävää kasvua, suurpainesuuttimien kaupallista yleistymistä ja tutkimusta sekä investointeja teknologiaan. Teknologian kehittyessä vety omaa yksin tai yhdistettäessä muihin polttoaineisiin puhtaan käyttövoimaratkaisun.

8 Hybridialukset

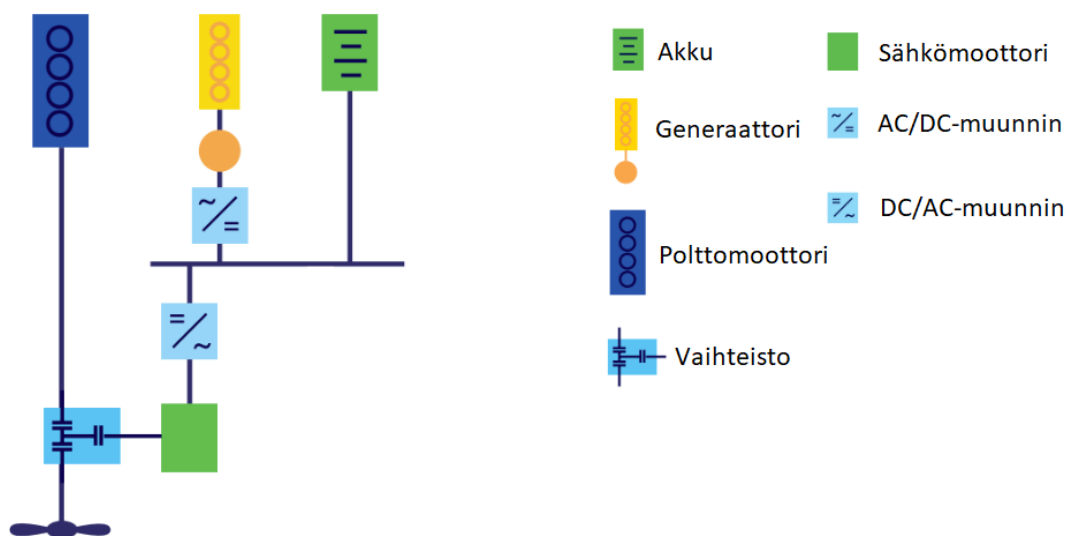
Hybridialus hyödyntää kahta tai useampaa käyttövoimaa, esimerkiksi dieseliä ja sähköä, ja käyttövoimista saatu energia voidaan valjastaa potkurin työntö- eli propulsiovoimaksi mm. sarja- tai rinnakkaishybridimenetelmällä (Geertsma ja muut, 2017 & Inal ja muut, 2022). Sarjahybridiä kutsutaan myös sähköiseksi propulsioksi ja rinnakkaishybridiä hybridipropulsioksi. Näitä menetelmiä käsitellään seuraavissa luvuissa, mutta menetelmästä riippuen hybridiratkaisun komponentteja voivat olla polttomoottori, generaattori, sähkömoottori, akku ja polttokenno. Tarkoituksena on optimoida polttomoottorin tai generaattorin käyttöä energiavaraston avulla ja siten pienentää polttoaineen kulutusta ja moottorin mekaanista rasitusta. Pienen kuormituksen aikana polttomoottori tai generaattori pystytään pysäyttämään ja tarvittava energia ottamaan energiavarastosta, kuten akusta tai polttokennon polttoainetankista. Päästöjen pienentämisen lisäksi tällä on positiivisia vaikutuksia aluksen ylläpitokustannuksiin, sillä pienellä kuormituksella ajettaessa riski epätäydelliseen palamiseen kasvaa, mikä lisää moottorin huollon tarvetta ja mahdollisesti hiilivety- ja hiukkaspäästöjä. Akkua voidaan hyödyntää myös kuorman tasajana, sillä polttomoottorin äkillisesti vaihteleva kuormitus lisää polttoaineen kulutusta ja päästöjä. Akusta saadaan nopeasti syötettyä virtaa sähkömoottoriin, joka reagoi vaihtelevaan kuormitukseen, ja näin polttomoottoria pystytään ajamaan tasaisemmalla kuormituksella. Tällä on positiivisia vaikutuksia moottorin käyttöikänsä, sillä suuret ja hetkelliset tehopiikit kuluttavat moottorin mekaanista rakennetta. Kuvassa 10 on esitettyä myös muita hybriditeknologioista saatavia etuja.



Kuva 10. Hybridikäyttövoimilla voidaan pienentää päästöjä sekä käyttövoima- ja ylläpitokustannuksia (mukaillen Inal ja muut, 2022)

8.1 Rinnakkaishybridi

Rinnakkaishybridissä aluksen potkurin tarvitsema teho saadaan poltto- ja sähkömoottorilta, jotka on yhdistetty vaihteiston kautta potkuriin (DNV, 2015). Sähkömoottoriin syötettävän virran tuottamiseen voidaan käyttää akkua, generaattoria, polttokennoa tai näiden yhdistelmiä. Nämä sähköntuottajat on yhdistetty samaan kokoojakiskoon, josta syötetään virtaa sähkömoottoriin. Kuvassa 11 nähdään eräs rinnakkaishybridikokoonpano.



Kuva 11. Rinnakkaishybridi (mukaillen DNV, 2015)

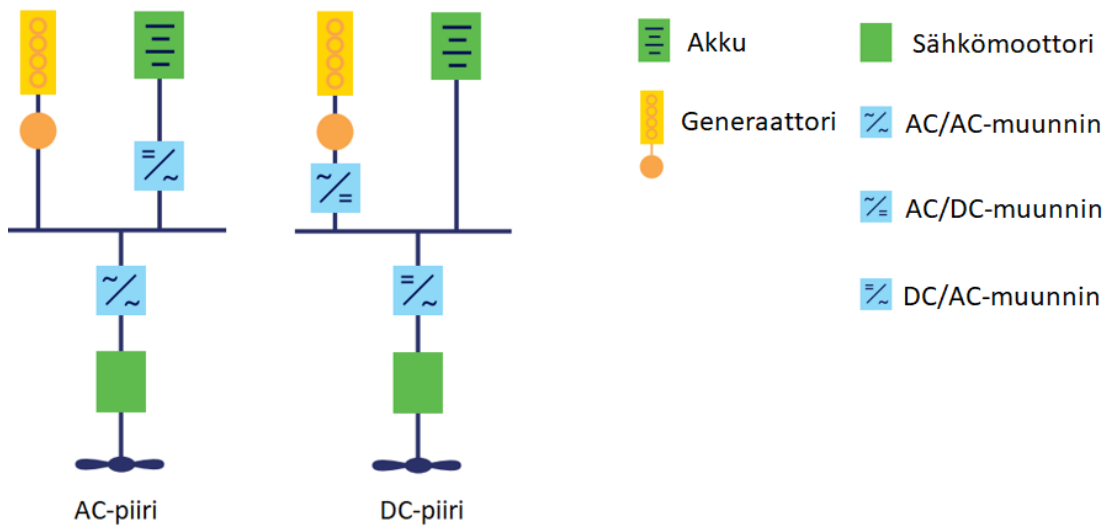
Mikäli sähkön kehittämiseen käytetään vaihtovirtaa tuottavaa generaattoria sekä tasavirtaa tuottavaa akkua ja/tai polttokennoa, näiden voimanlähteiden yhdistäminen edellyttää muuntimien käyttöä. Generaattorin vaihtovirta voidaan muuttaa tasavirraksi AC/DC-muuntimen eli tasasuuntaajan avulla ja energiavarastosta saatava tasavirta vaihtovirraksi DC/AC-muuntimen eli vaihtosuuntaajan (invertterin) avulla. Invertteristä käytetään myös nimitystä moottorinhjain, sillä hybridialuksissa invertteri syöttää sähkömoottoriin oikeataajuista vaihtovirtaa ja säätelee näin sähkömoottorin pyörimisnopeutta. Tasavirtalähteiden jännitteen nostamiseksi ja laskemiseksi käytetään DC/DC-muuntimia, jolloin pystytään esimerkiksi yhdenmukaistamaan akun ja polttokennon jännitetasot, mikä estää sähköä käyttävien laitteiden toimintahäiriöitä. Jokainen muunnin aiheuttaa (sähköisiä) häviöitä, minkä takia laadukkaiden muuntimien käyttö on suositeltavaa (DNV, 2015). Näitä häviöitä tarkastellaan lisää kappaleessa 8.3.

Rinnakkaishybridissä polttomoottorista saadaan voima suurilla kuormilla, kun taas sähkömoottori tuottaa voimaa pienillä nopeuksilla (Geertsma ja muut, 2017). Sähkömoottorin tehon ei tarvitse siis olla yhtä suuri kuin polttomoottorin, mikä pienentää rinnakkaishybridin hankintakustannuksia. Sähkömoottori voi myös avustaa aluksen kiihdytyksessä, mikä hillitsee polttomoottorin lämpökuormitusta ja pienentää typenoksidipäästöjä. Akkua on mahdollista ladata maasähköllä aluksen ollessa satamassa tai polttomoottorin avulla ajon aikana, jolloin sähkömoottori toimii generaattorina. Rinnakkaishybridin on todettu vähentävän merkittävästi ympäristöpäästöjä, mikäli akkua on mahdollista ladata puhtaasti tuotetulla maasähköllä.

8.2 Sarjahybridi

Sarjahybridissä alus saa käyttövoimansa pelkästään sähköä tuottavista laitteista, kuten generaattorista, akusta ja polttokennosta, ja potkuria pyörittää sähkömoottori (Geertsma ja muut, 2017). Sarjahybrididiä käyttävät alukset ovat käyttäjäystävällisiä, sillä mekaanisen vaihteiston puuttuessa aluksen melu- ja värinätasot ovat matalat. Lisäksi generaattoreilla voidaan tuottaa sähköä myös aluksen muihin käyttötarpeisiin.

Sarjahybridin käyttö on perusteltua, mikäli sähköisestä propulsiojärjestelmästä saatavat hyödyt ovat suuremmat kuin järjestelmän sähköiset häviöt (Geertsma ja muut, 2017). Sarjahybridiratkaisut voidaan jakaa vaihtovirtaa käyttävään AC-piiriin ja tasavirtaa hyödyntävään DC-piiriin. Näillä ratkaisuilla on omat ominaispiirteensä ja sarjahybridia suunniteltaessa on arvioitava, kumpi näistä paremmin sopii tarkasteltavaan alukseen. Kuvassa 12 on esitetty sähköisen propulsiojärjestelmän AC- ja DC-kytkennät.



Kuva 12. Sarjahybridin AC- ja DC-kytkennät (mukaillen DNV, 2015)

Mietittäessä valintaa AC- ja DC-piirin välillä on otettava huomioon aluksen käyttövoimakokonaisuus (Johannesen, P. & Heine, U. 2022). AC-piirissä säästytään ylimääräisiltä häviöiltä, mikäli aluksen pääasiallinen tehonlähde on vaihtovirtaa tuottava generaattori, sillä vaihtovirtaa ei tarvitse muuttaa välissä tasavirraksi. DC-piirin käyttö taas on suositeltavaa, jos aluksen pääasiallinen tehonlähde on akku tai polttokenno. Toisaalta DC-piirin käyttö voi olla perusteltua aluksissa, jotka käyttävät useaa generaattoria. Toisin kuin AC-piirissä, yksittäisten generaattoreiden pyörimisnopeutta voidaan säädellä kuormituksen mukaan, mikä voi johtaa aluksen pienempään polttoaineen kulutukseen.

8.3 Hybridivoimansiirron mekaaniset ja sähköiset häviöt

Matkalla voimanlähteestä potkuriin syntyy useita erilaisia mekaanisia tai sähköisiä häviöitä, sillä energiaa muuttuu lämmöksi esimerkiksi akun sisäisen vastuksen tai vaihteiston

kitkahäviöiden takia. Hybridijärjestelmästä saatavat edut riippuvat suuresti eri komponenttien hyötysuhteista, ja siksi seuraavaksi tarkastellaan, kuinka paljon energiaa tyypillisesti menetetään voimansiirron eri vaiheissa. Johannesen ja Heinen (2021) mukaan nykyaikaisessa sähköisessä voimansiirrosta generaattorin hyötysuhde on noin 95–97,5 % ja sähkömoottori yltää 95–98 % hyötysuhteeseen. Kokoojakiskossa päästään 99,2–99,9 %:n hyötysuhteeseen ja tehonmuuntimien hyötysuhteet ovat luokkaa 97–99 %. DNV (2015) arvioi muuntimien ja litiumioniakkujen hyötysuhteen olevan noin 98 %. Muelaner'in (2022) mukaan litiumioniakkujen voidaan olettaa yltävän keskimäärin noin 95 %:n hyötysuhteeseen, sillä olosuhteitten mukaan akun hyötysuhde voi vaihdella 90–99 %:n välillä. Vaihteiston hyötysuhteet taas vaihtelevat 94–98 %:n välillä [Happonen, M (2021) & Konic-Gearbox (2024) & HybridMarine (2024)]. Esimerkkinä hyötysuhteiden vaikutuksesta kaavassa 2 on laskettu kuvassa 8 esitetyn rinnakkaishybridin kokonaishyötysuhde akusta potkurin työntövoimaksi.

$$\begin{aligned}\eta_{akku-potkuri} &= \eta_{akku} \times \eta_{kisko} \times \eta_{m.ohjain} \times \eta_{s.moottori} \times \eta_{vaihteisto} & (2) \\ &= 0,95 \times 0,995 \times 0,98 \times 0,95 \times 0,95 = 0,84\end{aligned}$$

Kaavasta nähdään, että kokonaishyötysuhde oletetuilla arvoilla on 84 %. Akun energiasta menetetään siis 16 % voimansiirron aikana. Liikenteen sähköistyminen ja kilpailukyvyen edistäminen luovat yrityksille vahvat kannustimet kehittää voimansiirtojärjestelmiään yhä energiatehokkaammiksi. Esimerkiksi sähköautoyhtiö Lucid Motorsin Eric Bach (2023) sanoo yhtiön kehittäneen jopa 99,5 %:n hyötysuhteeseen yltävän moottorinohjaimen.

8.4 Hybridikäyttövoimia hyödyntäviä aluksia

Maantieliikenteeseen verrattuna vaihtoehtoiset käyttövoimaratkaisut eivät ole vielä yhtä yleisiä vesiliikenteessä. Kasvava tarve ja halu pienentää alusten päästöjä kasvattaa kuitenkin vaihtoehtoisten käyttövoimien kysyntää, minkä ansiosta useat yritykset kehittävät nykyistä puhtaampia käyttövoimajärjestelmiä myös vesiliikenteen aluksiin. Seuraavaksi luodaan katsaus maailmalla jo toimiviin pienen kokoluokan hybridialuksiin.

Vilja on Luulajan satamassa toimiva, Wärtsilän ja Corvus Energy:n teknologioita hyödyntävä hybridihinaaja (Wärtsilä, 2019 & Corvus Energy, n.d.-a). Vuonna 2019 toimintansa aloittaneessa aluksessa on dieselmoottorit, sähkömoottorit ja kappaleessa 6.3. mainittu Corvus Orca ESS -akkujärjestelmä. Perinteiseen polttomoottoriratkaisuun verrattuna aluksen polttoaineen kulutuksen ja päästöjen on arvioitu olevan 20 % ja huoltokulujen 50 % pienemmät. Tämä 36 metriä pitkä, uuden sukupolven hybridihinaaja, on esitetty kuvassa 13.



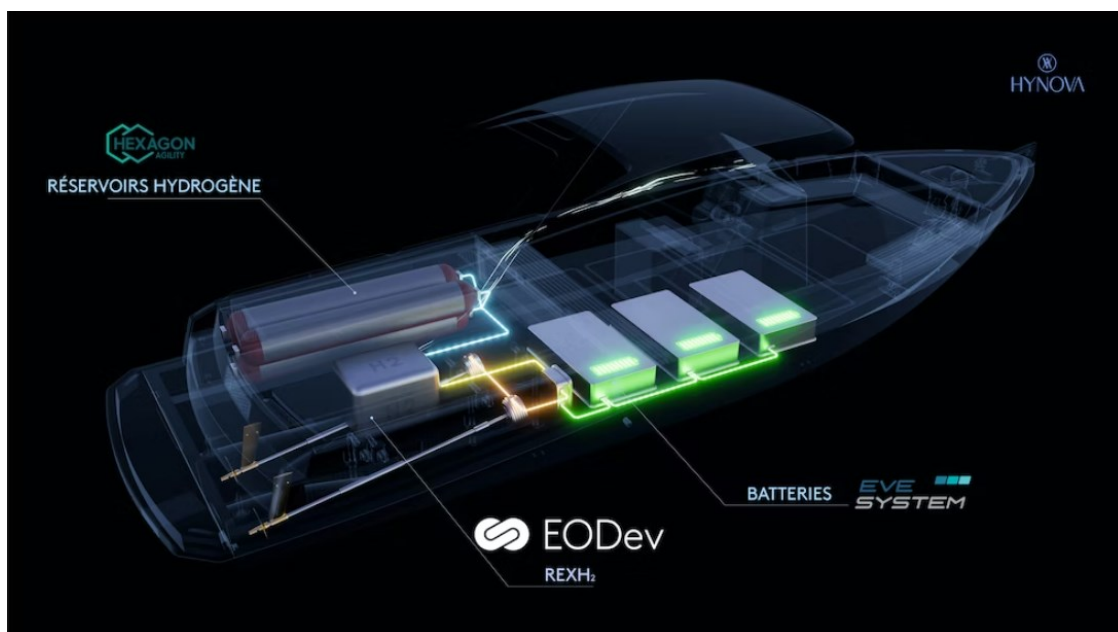
Kuva 13. Hybridihinaaja Vilja (Corvus Energy, n.d.-a)

Viljan lisäksi Corvus Energy on ollut mukana useissa alusten hybridisointiprojekteissa, joista esimerkkinä mainittakoon 15 metriä pitkä kalastaja-alus Frøy Fenris (Corvus Energy, n.d.-b). Aluksen hybriditeknologian arvioidaan säästävän vuosittain 97000 litraa polttoainetta, mikä tarkoittaa 261 tonnia pienempiä hiilidioksidipäästöjä.

Eräs hybridialuksia valmistava yritys on hollantilainen Damen. Yhtiön ASD 2810 -hybridihinaaja hyödyntää sähköistä propulsiota, jonka voimantuottajina toimivat dieselgeneraattorit ja akkujärjestelmä (Damen, 2014). Damenin mukaan hybridihinaajan

hiilidioksidipäästöt ovat 30 % ja pienhiukkaspäästöt 71 % pienemmät perinteiseen ratkaisuun verrattuna. Maailmanlaajuisesti ASD 2810 -hinaajaa on myyty 170 kappaletta.

Hynova 40 on polttokennosta ja akusta energiansa saava 12 metriä pitkä vapaa-ajan alus (EODev, n.d.). EODev:n kehittämä alus hyödyntää Toyotan 80 kW:n T-module-polttokenoa sekä kolmea 44 kW:n tehoista LFP-akkua, jotka syöttävät kahta 184 kW:n sähkömoottoria. Polttokenoa varten aluksessa on 22,5 kilogrammaa 350 baariin paineistettua vetyä. Kuvassa 14 esitellään Hynova 40:n teknistä kokonaisuutta.



Kuva 14. Hynova 40 hybridialus (EODev, n.d.)

Antwerpen-Brugge-sataman tilaama ja CMB.TECH:n valmistama Hydrotug on maailman ensimmäinen vetyä ja dieselöljyä polttomoottoreissaan käyttävän hinaaja (Port of Antwerp Bruges, n.d.). Aluksen kannelle on mahdollista varastoida 415 kg paineistettua vetyä ja nykyaikaisten hiukkassuodattimien ja katalysaattoreiden avulla sen päästöt ovat todella pienet, alittaen Stage V -standardin päästörajoitukset. Kuvassa 15 oikealla nähdään alkuvuodesta 2023 toimintansa aloittanut Hydrotug.



Kuva 15. Hydrotug on maailman ensimmäinen vetyä ja dieselöljyä käyttävä hinaaja.

Edellä mainittujen yritysten lisäksi muun muassa AGCO Power (n.d.) kertoo tutkivansa hybridi- ja vetyratkaisuja, jotka sopivat kaikkiin yrityksen nykyään toimittamiin kohteisiin. Lisäksi Suomessakin toimiva Scania on mukana vaihtoehtoisten käyttövoimaratkaisujen kehityksessä, joista esimerkkinä yritys on yhteistyönä ruotsalaisen varustamo Blidösundsbolagetin kanssa kunnostanut Tukholmassa operoivan matkustajalautta M/S Rexin käyttämään Scanian sähköhybridijärjestelmää (Scania, 2020).

9 Tapaustutkimus: uiton apualukset

Tapaustutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten vaihtoehtoiset käyttövoimat sopivat uitoissa käytettäviin apualuksiin niin päästöjen pienentämisen kuin käyttövoima- ja hankintakustannustenkin näkökulmasta. Referenssialukseksi valittiin Uittopojat Oy:n apualus Eero, jonka moottoriteho on 190 kW. Käyttövoimaratkaisut mitoitettiin niin, että ne tarjoavat saman suorituskyvyn kuin referenssialus. Tarkasteltaviksi ratkaisuuksi valittiin sarja- ja rinnakkaishybridi sekä polttokennohybridi, joista viimeinen edustaa pitkän aikavälin vaihtoehtoa. Lisäksi laskelmiin otettiin mukaan uusiutuva polttoöljy, jotta voitiin kattavasti arvioida eri käyttövoimista saatavien hyötyjen ja kustannusten suhdetta. Laskelmia varten määritettiin uittoreitti, vuosittain kuljetettava puumäärä ja apualuksen kuormitusprofiili, jotta voitiin laskea eri käyttövoimien polttoaineen- ja sähkönkulutus.

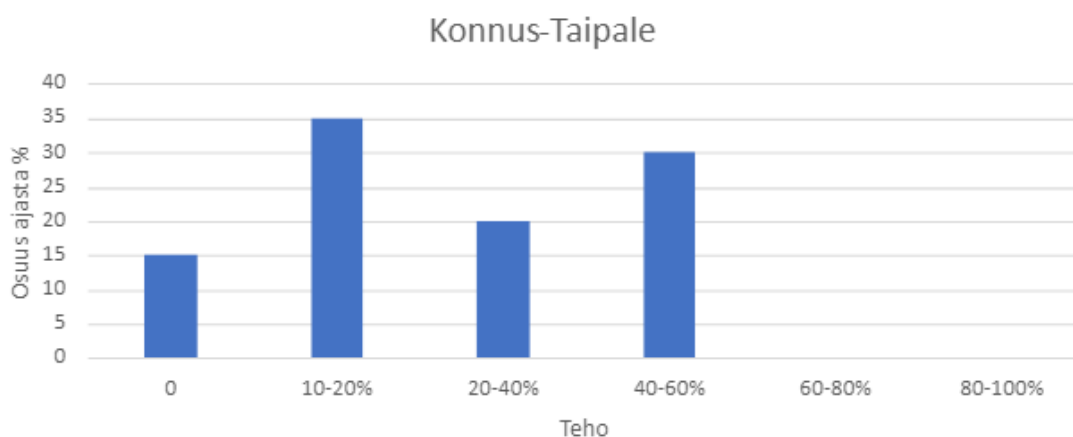
9.1 Uittoreitti ja kuljetettava puumäärä

JSUY:n kuljetusvolyymien perusteella laskelmissa käytetyksi uittoreitiksi valittiin matka Konnuksesta Taipaleeseen sekä sulutusajo Taipaleen kanavan läpi. Tämä reitti kattaa yli kolmanneksen JSUY:n vastaamasta vuosittain uitetusta puumäärästä, ja valittu reitti sisältää apualuksen pääasialliset tehtävät: kuormanohjauksen sisävesillä ja kuorman sulutuksen kanavan läpi. Keskimääräisen oletetun puukuorman perusteella apualus kulkee Konnus–Taipale-välin 18 kertaa vuodessa. Laskelmat eivät huomioi takaisintulomatkaa, sillä tällöin apualus ei ole käytössä, vaan päähinaajan hinauksessa. Matkan pituus on 33 km, ja keskimääräinen nopeus reitillä on 2,3 km/h. Täten yhden puukuorman kuljettamiseen Konnuksesta Taipaleeseen kuluu 14,3 tuntia. Taipaleen kanavaan mahtuvien puunippujen ja yhden puunipun keskimääräisen tilavuuden perusteella kanavan läpi sulutetaan vuosittain 118 kertaa. Yhden sulutuskerran kestoksi on arvioitu 2,5 tuntia.

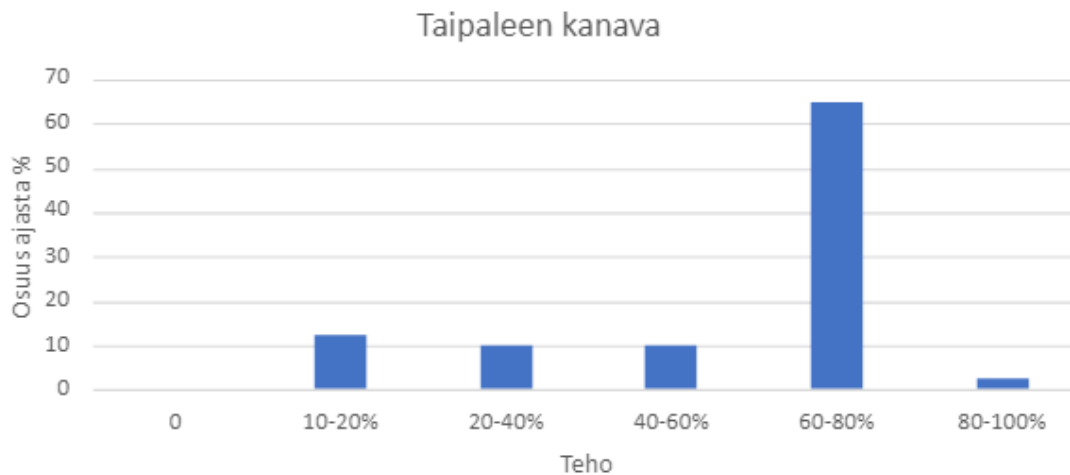
9.2 Apualuksen kuormitusprofiilit

Luvussa 5 esitettiin, kuinka polttoaineen kulutus riippuu moottorin kuormituksesta. Kulutuksen laskemiseksi on luotu apualuksen kuormitusprofiilit kuorman ohjaustehtäviin

Konnuksesta Taipaleeseen ja sulutusajoon Taipaleen kanavalla. Kuormitusprofiilit kertovat kuinka suuren osan ajasta alus käy tietyllä teholla. Tehoalueet on jaettu seuraavasti: 0 %, 10–20 %, 20–40 %, 40–60 %, 60–80 % ja 80–100 %. Näiden profiilien laatimisessa on konsultoitu Uittopojat Oy:tä. Kuvassa 16 nähdään kuormitusprofiili Konnus-Taipalevälillä ja kuvassa 17 Taipaleen kanavalla.



Kuva 16. Apualuksen kuormitusprofiili Konnuksesta Taipaleeseen



Kuva 17. Apualuksen kuormitusprofiili Taipaleen kanavassa

9.3 Lähtötaso

Jotta vaihtoehtoisten käyttövoimaratkaisuiden suositeltavuutta voidaan arvioida, on ensin määritettävä nykyinen tilanne eli lähtötaso, johon eri vaihtoehtoja vertaillaan.

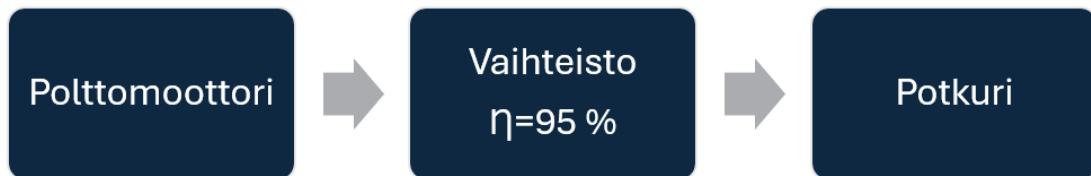
Polttoaineen kulutuksen laskemiseen tarvitaan luotuja kuormitusprofiileja, vuosittaisia suoritteita, niihin kuluva aika ja luvussa 5 esitettyä ominaiskulutuskäyrää. Litrakohtainen polttoaineen kulutus saadaan laskettua kaavalla 2, jossa fossiilisen polttoöljyn tiheys on 831 g/l (Tilastokeskus, 2024).

$$Kulutus(l) = P(kW) \times t(h) \times b\left(\frac{g}{kWh}\right) \div \rho\left(\frac{g}{l}\right) \quad (2)$$

missä

P	teho
t	aika
b	moottorin ominaiskulutus
ρ	polttoaineen tiheys

Koska voimansiirrosta aiheutuvat häviöt eroavat eri vaihtoehtojen välillä, on myös laskettava, kuinka paljon energiaa saadaan hyödynnettyä potkurin työntövoimaksi. Vaihtoehtoisten käyttövoimien on pystyttävä tuottamaan sama lopullinen energiamäärä mekaanisista tai sähköisistä häviöistä huolimatta jokaisella tehoalueella. Kuvassa 18 on esitetty lähtötason voimansiirron häviöt, jotka aiheutuvat vain vaihteistosta. Vaihteiston hyötysuhteeksi on asetettu 95 %.



Kuva 18. Lähtötason voimansiirto moottorista potkuriin

Kaavalla 3 saadaan laskettua potkurin työntövoimaksi saatu energia, E_p , kertomalla tuotettu energia, E_t , vaihteiston hyötysuhteella $\eta_{vaihteisto}$.

$$E_p = P(kW) \times t(h) \times \eta_{vaihteisto} = E_t \times \eta_{vaihteisto} \quad (3)$$

Taulukkoon 1 on koottu kaavoilla 2 ja 3 saadut lähtötason tulokset. Fossiilisen polttoöljyn vuosittainen kulutus on 10956 litraa.

Taulukko 1. Fossiilisen polttoöljyn kulutus ja tuotettu potkurienergia

Sulutus							
Tehoalue %	Teho (kW)	Osuus ajasta	aika (h)	b (g/kWh)	Kulutus (l)	E_t (kWh)	E_p (kWh)
0 %	0	0	0	0	0	0,0	0,0
10–20 %	28,5	0,13	0,31	285	3,05	8,9	8,5
20–40 %	57	0,10	0,25	230	3,94	14,3	13,5
40–60 %	95	0,10	0,25	200	5,72	23,8	22,6
60–80 %	133	0,65	1,63	186	48,37	216,1	205,3
80–100 %	171	0,03	0,06	183	2,35	10,7	10,2
Yhteensä		1	2,5		63,44	273,7	260,0
Konnus-Taipale							
Tehoalue %	Teho (kW)	Osuus ajasta	aika (h)	b (g/kWh)	Kulutus (l)	E_t (kWh)	E_p (kWh)
0 %	0	0,15	2,15	0	0	0,0	0,0
10–20 %	28,5	0,35	5,02	285	49,08	143,1	136,0
20–40 %	57	0,2	2,87	230	45,27	163,6	155,4
40–60 %	95	0,3	4,30	200	98,41	408,9	388,5
60–80 %	133	0	0	186	0	0,0	0,0
80–100 %	171	0	0	183	0	0,0	0,0
Yhteensä		1	14,35		192,77	715,6	679,8
	Konnus-Taipale	Sulutus	Yhteensä				
Suoritteita vuodessa (kpl)	18	118					
Kulutus per suorite (l)	192,8	63,4					
Kulutus vuodessa (l)	3469,9	7486,2	10956,1				

9.4 Uusiutuva polttoöljy

Uusiutuvan polttoöljyn käyttö työkoneissa ei edellytä muutoksia moottoriin tai voimansiirtojärjestelmään. Polttoaineen kulutuksen laskemiseksi käytetään siis kaavaa 2.

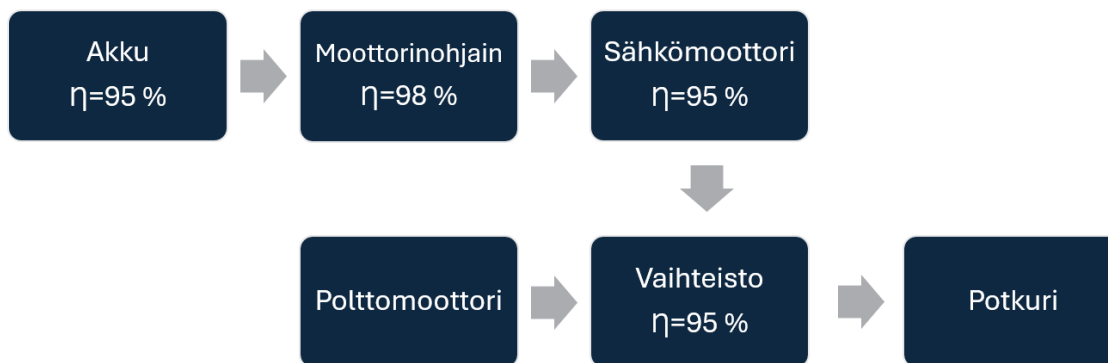
Tilastokeskus (2024) ilmoittaa uusiutuvalle polttoöljylle tiheydeksi 780 g/l, mikä tarkoittaa polttoöljyn lisääntyvää kulutusta lähtötasoon verrattuna. Taulukosta 2 nähdään, että uusiutuvan polttoöljyn vuosittainen kulutus on 11672 litraa.

Taulukko 2. Uusiutuvan polttoöljyn kulutus

Sulutus							
Teho alue %	Teho (kW)	Osuus ajasta	aika (h)	b (g/kWh)	Kulutus (l)	E_t (kWh)	E_p (kWh)
0	0	0	0	0	0	0,0	0,0
10–20 %	28,5	0,13	0,31	285	3,25	8,9	8,5
20–40 %	57	0,10	0,25	230	4,20	14,3	13,5
40–60 %	95	0,10	0,25	200	6,09	23,8	22,6
60–80 %	133	0,65	1,63	186	51,54	216,1	205,3
80–100 %	171	0,03	0,06	183	2,51	10,7	10,2
Yhteensä		1	2,5		67,59	273,7	260,0
Konnus-Taipale							
Teho alue %	Teho (kW)	Osuus ajasta	aika (h)	b (g/kWh)	Kulutus (l)	E_t (kWh)	E_p (kWh)
0		0,15	2,15	0	0	0,0	0,0
10–20 %	28,5	0,35	5,02	285	52,29	143,1	136,0
20–40 %	57	0,2	2,87	230	48,23	163,6	155,4
40–60 %	95	0,3	4,30	200	104,85	408,9	388,5
60–80 %	133	0	0	186	0	0,0	0,0
80–100 %	171	0	0	183	0	0,0	0,0
Yhteensä		1	14,35		205,37	715,6	679,8
	Konnus-Taipale	Sulutus	Yhteensä				
Suoritteita (kpl)	18	118					
Kulutus per suorite (l)	205,4	67,6					
Kulutus vuodessa (l)	3696,7	7975,7	11672,4				

9.5 Rinnakkaishybridi

Tapaustutkimukseen valittu rinnakkaishybridi ja voimansiirtokomponenttien hyötysuhteet on esitetty kuvassa 19. Hyötysuhteet on arvioitu kappaleessa 8.3. esitettyjen tietojen perusteella. Apualuksen koosta johtuen sähköntuottajana toimii pelkästään akku.



Kuva 19. Rinnakkaishybridin voimansiirtojärjestelmä

Akun kapasiteetilla on merkittävä vaikutus siihen, kuinka paljon aluksen hiilidioksidipäästöjä pystytään pienentämään. Teknisen toteutettavuuden kannalta on tarkasteltu maailmalla olevia sähköä käyttövoimanaan hyödyntäviä aluksia, joiden koko on samaa luokkaa referenssialus Eeron kanssa. Eeroa pienemmässä Marine Development Holland BV:n (n.d.) aluksessa on käytössä 378 kWh:n akkujärjestelmä, kun taas hieman Eeroa suuremmassa, Zeetugin (n.d.) NV712 -sähköhinaajassa on käytössä 995 kWh:n akku. Esimerkialukset ja akkujärjestelmän hankintakustannukset huomioiden on akun kapasiteetiksi laskelmissa asetettu 500 kWh. Akun käyttöikäksi oletetaan 10 vuotta ja vuotuisen kapasiteetin heikkenemisen arvioidaan olevan 2 prosenttiyksikköä. Täten keskimääräinen kapasiteetti käyttöiän aikana on 90 %. Käyttöiän varmistamiseksi akun SOC-taso pidetään 20–95 %:n välillä, mikä tarkoittaa, että akun keskimääräisestä kapasiteetista voidaan hyödyntää 75 %. Käytössä oleva keskimääräinen akun kapasiteetti saadaan laskettua kaavalla 4.

$$\text{Kapasiteetti (kWh)} = (500 \text{ kWh}) \times 0,9 \times 0,75 = 337,5 \text{ kWh} \quad (4)$$

Akun kapasiteetin ja apualuksen tehtävien perusteella laskelmat on toteutettu niin, että alus käy sähköllä Konnus-Taipale-reitillä alle 40 %:n kuormituksilla ja sulutusajossa alle 60 %:n kuormituksilla. Rinnakkaishybridin potkurille toimittaman energian tulee olla yhtä suuri kuin lähtötason energia. Kuten lähtötasossa, polttomoottorin kulutus laskeetaan kaavalla 2. Akun sähkönkulutus ts. tuotettavan sähköenergian määrä, E_s , saadaan laskettua kaavalla 5.

$$E_s = \frac{E_p}{\eta_{akku} \times \eta_{m.ohjain} \times \eta_{s.moottori} \times \eta_{vaihteisto}} \quad (5)$$

missä

η_{akku}	akun hyötysuhde
$\eta_{m.ohjain}$	moottorinohjaimen hyötysuhde
$\eta_{s.moottori}$	sähkömoottorin hyötysuhde
$\eta_{vaihteisto}$	vaihteiston hyötysuhde

Taulukossa 3 on esitetty polttoöljyn ja sähkön keskimääräiset vuosittaiset kulutukset 10 vuoden ajalle. Rinnakkaishybridi kuluttaa polttoöljyä vuodessa 7809 litraa ja sähköä 12500 kWh.

Taulukko 3. Rinnakkaishybridin polttoaineen ja sähkön kulutus

Sulutus							
Tehoalue %	Teho (kW)	Osuus ajasta	aika (h)	b (g/kWh)	Kulutus (l)	E_p (kWh)	E_s (kWh)
0	0	0	0	0	0	0	
10–20 %	28,5	0,13	0,31	285	0,0	8,5	10,1
20–40 %	57	0,10	0,25	230	0,0	13,5	16,1
40–60 %	95	0,10	0,25	200	0,0	22,6	26,9
60–80 %	133	0,65	1,63	186	48,4	205,3	0,0
80–100 %	171	0,03	0,06	183	2,4	10,2	0,0
Yhteensä		1	2,5		50,7	260,0	53,0
Konnus-Taipale							
Teho alue %	Teho (kW)	Osuus ajasta	aika (h)	b (g/kWh)	Kulutus (l)	E_p (kWh)	E_s (kWh)
0	0	0,15	2,2	0	0	0	
10–20 %	28,5	0,35	5,0	285	0,0	136,0	161,8
20–40 %	57	0,2	2,9	230	0,0	155,4	184,9
40–60 %	95	0,3	4,3	200	98,4	388,5	0

60–80 %	133	0	0	186	0,0	0,0	0
80–100 %	171	0	0	183	0,0	0,0	0
Lataus (apualus ei käytössä)	171		0,1	183	2,9		
Yhteensä		1	14,3		101,3	679,8	346,8
	Konnus-Taipale	Sulutus	Yhteensä				
Suoritteita (kpl)	18	118					
Polttoaineen kulutus/suorite (l)	101,3	50,7					
Sähkön kulutus/suorite (kWh)	346,8	53,0					
Kulutus vuodessa (l)	1823,4	5985,9	7809,3				
Sähkön kulutus vuodessa (kWh)	6241,5	6258,1	12499,6				

Taulukosta 3 nähdään, että Konnus-Taipale-reitillä sähkönkulutus on 346,8 kWh, joka on 9,3 kWh enemmän kuin akun käytössä oleva kapasiteetti 337,5 kWh. Rinnakkaishybridissä akkua voidaan ladata polttomoottorilla joko ajon aikana tai aluksen ollessa kiinnitettynä päähinaajaan. Mikäli akkua ladataan polttomoottorilla ja taas puretaan, on ensin laskettava tuotettava energiamäärä E_t . Tämä saadaan laskettua kaavalla 6, jossa sähkönkulutuksen ja akun kapasiteetin välinen erotus, ΔE , jaetaan voimansiirrosta aiheutuville häviöillä sekä akkua ladattaessa että purettaessa.

$$E_t = \frac{\Delta E}{\eta_{vaiht.} \times \eta_{s.moot.} \times \eta_{m.ohj.} \times \eta_{akku} \times \eta_{akku} \times \eta_{m.ohj.} \times \eta_{s.moot.} \times \eta_{vaiht.}} \quad (6)$$

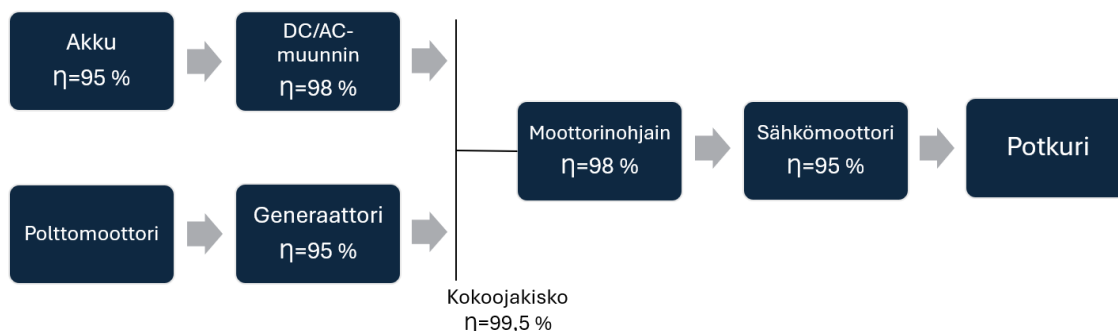
Syöttämällä kaavaan lukuarvot, saadaan E_t :n arvoksi 13,1 kWh. Polttoaineen kulutus saadaan tämän jälkeen laskettua kaavalla 7.

$$Kulutus (l) = E_t \times b \div \rho \left(\frac{g}{l} \right) = (13,1 \text{ kWh}) \times \left(183 \frac{g}{kWh} \right) \div \left(831 \frac{g}{l} \right) \approx 2,9 \text{ l} \quad (7)$$

Polttomoottorilla tuotetulla energialla akun lataaminen ja purkaminen kuluttaa polttoöljyä noin 0,22 litraa tuotettua kilowattituntia kohden.

9.6 Sarjahybridi

Tapaustutkimukseen valittu sarjahybridi ja voimansiirron komponenttien sähköiset hyötysuhteet on esitetty kuvassa 20. Sarjahybridtiin on valittu AC-piiri, sillä apualuksen pääasiallinen energia saadaan dieselgeneraattorista. Akku toimittaa energiaa sähkömoottorille samoilla kuormituksilla kuin rinnakkaishybridissä eli Konnus-Taipale-reitillä alle 40 %:n kuormituksilla ja sulutusajossa alle 60 %:n kuormituksilla.



Kuva 20. Tapaustutkimuksen sarjahybridi

Sähköenergian kulutus saadaan akkaa käytettäessä kaavalla 8.

$$E_s = \frac{E_p}{\eta_{akku} \times \eta_{DC/AC-muunnin} \times \eta_{kokoojakisko} \times \eta_{m.ohjain} \times \eta_{s.moottori}} \quad (8)$$

Dieselgeneraattorin polttoaineen kulutuksen laskemiseksi on ensin laskettava tuotettava energia, E_t , kaavalla 9.

$$E_t = \frac{E_p}{\eta_{generaattori} \times \eta_{kokoojakisko} \times \eta_{m.ohjain} \times \eta_{s.moottori}} \quad (9)$$

Tämän jälkeen kaavalla 7 saadaan laskettua polttoaineen kulutus. Taulukkoon 4 on koottu sarjahybridin polttoaineen ja sähkönkulutukset. Nähdään, että vuosittainen polttoaineen kulutus on 8376 litraa ja akun vuosittainen sähkönkulutus on 12178 kWh.

Taulukko 4. Sarjahybridin polttoaineen ja sähkönkulutus

Sulutus							
Tehoalue %	Teho (kW)	Osuus ajasta	aika (h)	b (g/kWh)	Kulutus (l)	E_p (kWh)	E_s (kWh)
0	0	0	0	0	0	0	0
10–20 %	28,5	0,125	0,3125	285	0,0	8,5	9,8

20–40 %	57,0	0,1	0,25	230	0,0	13,5	15,7
40–60 %	95,0	0,1	0,25	200	0,0	22,6	26,2
60–80 %	133,0	0,65	1,625	186	52,2	205,3	0,0
80–100 %	171,0	0,025	0,0625	183	2,5	10,2	0,0
Yhteensä		1	2,5		54,8	260,0	51,7
Konnus-Taipale							
Tehoalue %	Teho (kW)	Osuus ajasta	aika (h)	b g/kWh	Polttoaineen kulutus (l)	E_p (kWh)	E_s (kWh)
0	0	0,15	2,2	0	0	0	
10–20 %	28,5	0,35	5,0	285	0,0	136,0	157,7
20–40 %	57,0	0,2	2,9	230	0,0	155,4	180,2
40–60 %	95,0	0,3	4,3	200	106,2	388,5	0
60–80 %	133,0	0	0	186	0,0	0,0	0
80–100 %	171,0	0	0	183	0,0	0,0	0,0
Lataus (apualus ei käytössä)	171,0			183	0,1		
Yhteensä			14,3		106,3	679,8	337,8
	Konnus-Taipale	Sulutus	Yhteensä				
Suoritteita (kpl)	18	118					
Polttoaineen kulutus/suorite (l)	106,3	54,8					
Sähkön kulutus/suorite (kWh)	337,8	51,7					
Kulutus vuodessa (l)	1913,9	6461,9	8375,8				
Sähkön kulutus vuodessa (kWh)	6080,9	6097,0	12177,8				

Taulukosta 4 nähdään myös, että Konnus-Taipale-reitillä akun kapasiteetti on 0,3 kWh vähemmän kuin akusta tarvittava energia. Mikäli akkua ladataan dieselgeneraattorilla ja taas puretaan, on ensin laskettava tuotettava energiamäärä, E_t , kaavalla 10.

$$E_t = \frac{\Delta E}{\eta_{gen.} \times \eta_{k.kisko.} \times \eta_{AC-DC}^{muun.} \times \eta_{akku} \times \eta_{akku} \times \eta_{DC-AC}^{muun.} \times \eta_{k.kisko.} \times \eta_{m.ohjain.} \times \eta_{s.moot.}} \quad (10)$$

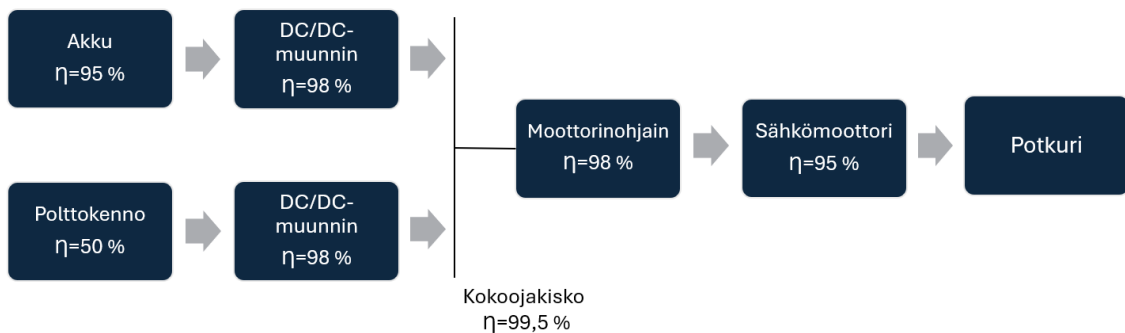
Syöttämällä kaavaan lukuarvot, saadaan E_t :n arvoksi 0,4 kWh. Dieselgeneraattorin polttoaineen kulutus saadaan tämän jälkeen laskettua kaavalla 11.

$$Kulutus (l) = E_t \times b \div \rho \left(\frac{g}{l} \right) = (0,4 \text{ kWh}) \times \left(183 \frac{g}{kWh} \right) \div \left(831 \frac{g}{l} \right) \approx 0,1 \text{ l} \quad (11)$$

Dieselgeneraattorilla tuotetulla energialla akun lataaminen ja purkaminen kuluttaa polttoöljyä noin 0,25 litraa tuotettua kilowattituntia kohden.

9.7 Polttokennohybridi

Polttokennohybridin voimansiirtojärjestelmä on esitettyä kuvassa 21. Tätä ratkaisua käytetään usein polttokennoa ja akkua käyttävissä sähköisissä ajoneuvoissa, sillä DC/DC-muuntimet mahdollistavat vakaan ja hyvin ohjattavan virran sähkömoottoriin (Sorlei ja muut, 2021). Polttokennon ajatellaan toimittavan alukselle sen keskimäärin tarvitseman tehon ja akku vastaa tehopiikkeihin esimerkiksi aluksen kiihdyttäessä. Tämän takia laskelmat on toteutettu niin, että polttokennosta saadaan tehoa 80 % ja akusta 20 % ajasta.



Kuva 21. Polttokennohybridin voimansiirtojärjestelmä

Vedyn kulutus voidaan laskea kaavalla 12 (mukaillen, Marine Service Noord, n.d.)

$$Vedyn\ kulutus(kg) = 0,8 \times \frac{P(kW) \times t(h) \times 3600s}{\eta(\%) \times Q\left(\frac{kJ}{kg}\right)} \quad (12)$$

missä

P	polttokennon teho
t	aika
η	polttokennon hyötysuhde
Q	vedyn lämpöarvo

Akun sähkön kulutus, E_s , saadaan laskettua kaavalla 13.

$$E_s = 0,2 \times \frac{E_p}{\eta_{akku} \times \eta_{DC/DC\text{-muunnin}} \times \eta_{kokoojakisko} \times \eta_{m.ohjain} \times \eta_{s.moottori}} \quad (13)$$

Taulukosta 5 nähdään, että polttokennon vuosittainen vedyn kulutus on 2389 kg ja sähkön kulutus 9953 kWh.

Taulukko 5. Polttokennohybridin sähkön ja vedyn kulutus

Sulutus						
Tehoalue %	Teho (kW)	Osuus ajasta	Aika (h) per sulutus	E_p (kWh)	E_s (kWh)	Vedyn kulutus (kg)
0	0	0	0	0	0	0
10–20 %	28,5	0,125	0,3125	8,5	2,0	0,5
20–40 %	57,0	0,1	0,25	13,5	3,1	0,8
40–60 %	95,0	0,1	0,25	22,6	5,2	1,3
60–80 %	133,0	0,65	1,625	205,3	47,6	11,4
80–100 %	171,0	0,025	0,0625	10,2	2,4	0,6
Yhteensä		1	2,5	273,7	60,3	14,5
Konnus-Taipale						
Tehoalue %	Teho (kW)	Osuus ajasta	Aika (h)	E_p (kWh)	E_s (kWh)	Vedyn kulutus (kg)
0	0	0,15	2,2	0	0	0
10–20 %	28,5	0,35	5,0	136,0	31,5	7,6
20–40 %	57,0	0,2	2,9	155,4	36,0	8,6
40–60 %	95,0	0,3	4,3	388,5	90,1	21,6
60–80 %	133,0	0	0	0,0	0,0	0,0
80–100 %	171,0	0	0	0,0	0,0	0,0
Yhteensä		1	14,3	679,8	157,7	37,8
	Konnus-Taipale	Sulutus	Yhteensä			
Suoritteita (kpl)	18	118				
Vedyn kulutus/suorite (kg)	37,8	14,5				
E_s /suorite (kWh)	157,7	60,3				
Vedyn kulutus vuodessa (kg)	681,1	1707,8	2388,8			
E_s (kWh)	2837,7	7115,7	9953,4			

9.8 Päästöjen vähennyspotentiaali

Taulukkoon 6 on koottuna kaikkien tarkasteltujen käyttövoimavaihtoehtojen vuosittaiset polttoaineen ja sähkön kulutukset, joita tarvitaan seuraavaksi laskettavien päästöjen vähennyspotentiaalin laskemiseksi.

Taulukko 6. Keskimääräiset vuosittaiset polttoaineiden ja sähkön kulutukset

	Fossiilisen polttoöljyn kulutus (l)	Uusiutuvan polttoöljyn kulutus (l)	Sähkön kulutus (kWh)	Vedyn kulutus (kg)
Lähtötaso	10956,1	0	0	0
Uusiutuvan polttoöljy	0	11672,4	0	0
Rinnakkais-hybridi	7809,3	0	12499,6	0
Sarjahybridi	8375,8	0	12177,8	0
Polttokenno-hybridi	0	0	9953,4	2388,8

Käyttövoimaratkaisuiden ilmastovaikutusten laskemiseksi tarvitaan käytettävien käyttövoimien päästökertoimet. Päästökertoimet voivat kuvata esimerkiksi pelkästään polttoaineen käytön aikaisia päästöjä tai ne voivat huomioida polttoaineen koko elinkaaren aikana, mm. myös valmistuksesta ja kuljetuksesta syntyneet päästöt. Päästökerroin voi kuvata tuotteen hiilidioksidipäästöjä tai kaikkia kasvihuonekaasupäästöjä hiilidioksidiekvivalentteina (OpenCO2NET, 2024). Tässä tutkimuksessa käsitellään eri ratkaisuiden sekä elinkaari- että käytön aikaisia hiilidioksidipäästöjä.

Suomi kuuluu Pohjoismaiden yhteiseen sähköjärjestelmään, joten Suomessa käytetään myös muualla tuotettua sähköä. Lisäksi sähköntuotannon päästökerroin vaihtelee vuodenajan mukaan, joten laskelmissa sähkön päästökertoimena käytetään uittokauden aikaista keskimääräistä Suomessa kulutetun sähkön päästökerrointa. Fingridin (2023)

tilaston mukaan vuoden 2023 toukokuun ja marraskuun välisenä aikana sähkönkulutuksen päästökerroin oli keskimäärin 25 g/kWh.

Uusiutuvasta polttoöljystä, sähköstä ja vedystä ei aiheudu käytönaikaisia päästöjä. Elektrolyysillä valmistetun vedyn elinkaaripäästökertoimeksi Prussi ja muut (2020) ilmoittavat 3,5 g/MJ. Päästöt aiheutuvat pääasiassa vedyn maantiekuljetuksesta, jonka keskimääräisenä matkana on käytetty 300 kilometriä. Tutkijat ovat määrittäneet elinkaarikertoimia myös Nesteen vetykäsittelyprosessilla valmistetulle uusiutuvalle dieselöljylle. Eläinrasvoja raaka-aineena käytettäessä CO₂-elinkaaripäästökerroin on 15,2 g/MJ ja jäteöljyjä käytettäessä 10,5 g/MJ. Laskelmissa uusiutuvan polttoöljyn elinkaarikertoimena käytetään 15,2 g/MJ.

Tilastokeskuksen (2024) mukaan kevyen polttoöljyn käytönaikainen päästökerroin on 68,9 g/MJ. Päästökerroin huomioi biopolttoöljyn jakeluelvoitteen, joka on 6 % vuonna 2024. Kevyen polttoöljyn elinkaaripäästökertoimen määrittämiseksi hyödynnetään Prussin ja muiden (2020) tekemää tutkimusta, jonka mukaan dieselöljyn elinkaaripäästökerroin on 91,4 g/MJ. Koska tämä kerroin ei huomioi jakeluelvoitetta, on laskelmissa käytetty elinkaarikerroin laskettu kaavalla 12, jossa PK tarkoittaa päästökerrointa.

$$PK = (0,94 \times 91,4 \text{ g/MJ}) + (0,06 \times 15,2 \text{ g/MJ}) = 86,8 \text{ g CO}_2/\text{MJ} \quad (12)$$

Polttoöljyjen CO₂-päästöt voidaan laskea kaavalla 13, jossa m(l) tarkoittaa polttoöljyn kulutusta litroina. Kevyen polttoöljyn tiheys on 0,831 kg/l ja tehollinen lämpöarvo 43,2 MJ/kg (Tilastokeskus, 2024). Uusiutuvalle polttoöljylle ilmoitetaan tiheydeksi 0,780 kg/l ja teholliseksi lämpöarvoksi 43,6 MJ/kg.

$$\text{Polttoöljyn päästöt (kg CO}_2) = m(l) \times \rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{l}} \right) \times Q \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) \times PK \left(\frac{\text{kg}}{\text{MJ}} \right) \quad (13)$$

Sähkönkäytön päästöt voidaan laskea kaavalla 14 ja vedyn päästöt kaavalla 15. Vedyn lämpöarvo on 120 MJ/kg.

$$\text{Sähkönkäytön päästöt (kg CO}_2\text{)} = \text{Kulutus (kWh)} \times PK \left(\frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \right) \quad (14)$$

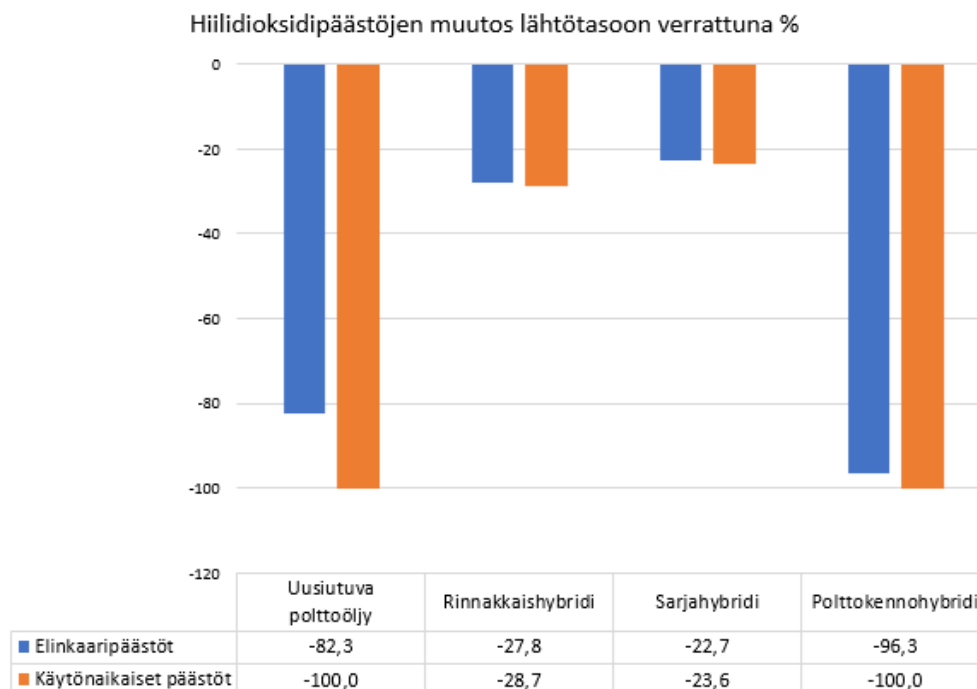
$$\text{Vedynkäytön päästöt (kg CO}_2\text{)} = m(\text{kg}) \times Q \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) \times PK \left(\frac{\text{kg}}{\text{MJ}} \right) \quad (15)$$

Taulukkoon 7 on koottuna kaikkien käyttövoimaratkaisuiden aiheuttamat hiilidioksidipäästöt.

Taulukko 7. Apualuksen vuosittaiset hiilidioksidipäästöt eri käyttövoimaratkaisuilla

Hiilidioksidipäästöt	Lähtötaso	Uusiutuva polttoöljy	Rinnakkais-hybridi	Sarja-hybridi	Polttokennohybridi
Elinkaaripäästöt (kg CO ₂)	34140	6034	24647	26404	1252
Käytönaikaiset päästöt (kg CO ₂)	27099	0	19316	20717	0

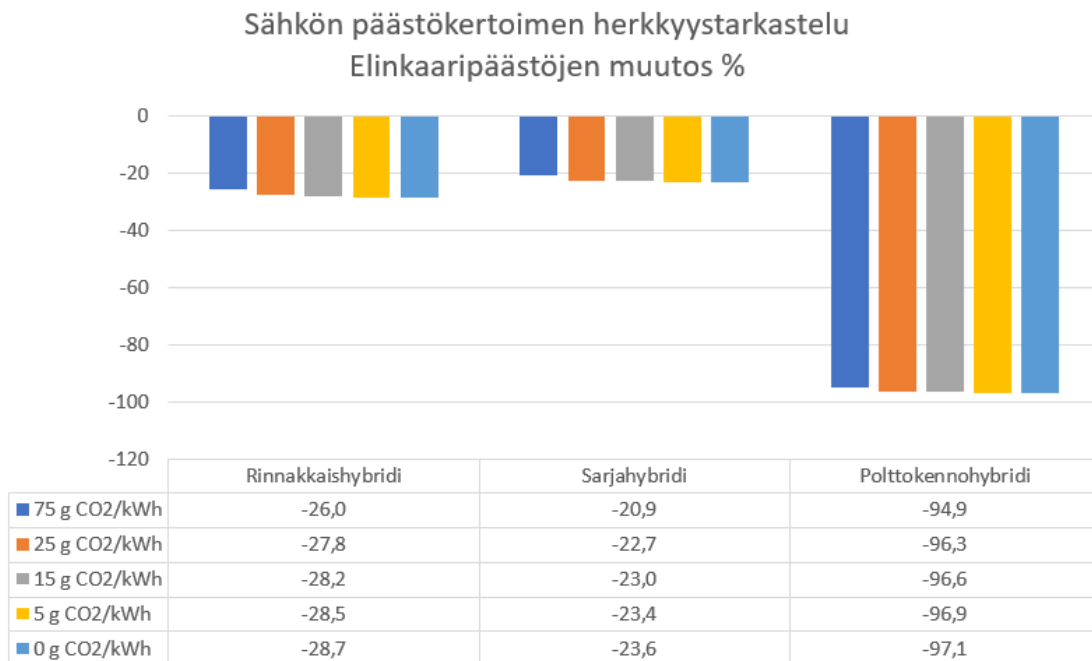
Hiilidioksidipäästöjen prosentuaalinen muutos lähtötasoon verrattuna on esitettyä kuvassa 22.



Kuva 22. Hiilidioksidipäästöjen vähennyspotentiaali

Kuvasta 22 nähdään, että uusiutuvan polttoöljyn käytön aikaiset päästöt ovat nolla ja elinkaaren aikaiset päästöt vähenevät 82 %. Kuvasta nähdään myös polttokennohybridin potentiaali päästöjen pienentämisessä. Vihreän vedyn saatavuuden lisääntyessä käyttövoiman elinkaaripäästöjä on mahdollista pienentää 96 %. Rinnakkaishybridillä on mahdollista vähentää hiilidioksidipäästöjä 28 %, mikä tekee siitä päästöjen pienentämisen suhteen sarjahybridin (23 %) paremman vaihtoehdon. Sarjahybridin sähkönkulutus on rinnakkaishybridin pienempi, mutta rinnakkaishybridin voimansiirtojärjestelmä johtaa merkittävästi pienempään polttoaineen kulutukseen ja siten pienempiin päästöihin.

Päästöttömät sähköntuotantomuodot oletettavasti lisääntyvät tulevaisuudessa, joten on tarkasteltava, miten sähkön päästökertoimen kehitys vaikuttaa sähköä hyödyntäviin käyttövoimaratkaisuihin. Herkkyystarkastelu sisältää nykyisen päästökertoimen (25 g/kWh) lisäksi kertoimet 0 g/kWh, 5 g/kWh, 15 g/kWh ja 75 g/kWh, joista viimeinen kuvaa tilannetta, jossa tuotantohäiriöiden seurauksena sähköä on tuotettava nykyistä selvästi enemmän fossiilisilla menetelmillä. Tulokset on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Sähköntuotannon päästökertoimen vaikutus käyttövoimaratkaisuihin

Kuvasta 23 nähdään, että sähkön päästökertoimella ei ole suurta vaikutusta käyttövoimaratkaisusta saataviin päästövähennyksiin, sillä ero suurimman ja pienimmän päästökertoimen välillä on alle kolme prosenttiyksikköä kaikissa vaihtoehdoissa. Kevyen polttoöljyn kulutus ja päästökerroin ovat selvästi merkittävämpiä kuin sähkön päästökerroin.

9.9 Hankintakustannukset

Hankintakustannuksilla on merkittävä vaikutus eri käyttövoimavaihtoehtojen suositelluuteen. Seuraavaksi tarkastellaan keskeisimpien komponenttien yksikkökustannuksia ja luodaan suuntaa antava arvio eri vaihtoehtojen voimansiirtojärjestelmien hankintakustannuksista. Korgberg ja muut (2021) arvioivat dieselmoottorin hinnan olevan noin 240–460 €/kW ja vaihteiston 85 €/kW, kun taas Abma ja muut (2018) arvioivat polttomoottorin ja vaihteiston yhteiskustannuksen olevan välillä 170–270 €/kW. Generaattorin hinnaksi arvioidaan 350 €/kW [Abma ja muut (2018) & Interreg-Danube, (2020b)]. Sähkämoottorin hinta taas on välillä 120–250 €/kW [Interreg-Danube (2020a) & Korberg ja muut (2021)]. Sustainable Shipsin (2024a) mukaan invertterin hinta on 90–120 €/kW. Luvussa 6.5.1 käsiteltiin meriakkujärjestelmän hankintahintaa, joka on tällä hetkellä noin 500–750 €/kWh.

Elkafasin ja muiden (2022) tekemän tutkimuksen mukaan merikäyttöön suunnitellun PEMFC-polttokennon hinta on noin 500–1200 \$/kW. Kun otetaan huomioon polttokennohybridin tarvitsemat lisälaitteet, akku ja sähkömoottori, polttokennohybridin kokonaiskustannus on noin 2400–3400 \$/kW. Aarskog ja muut (2020) taas arvioivat aluksen polttokennojärjestelmän hinnaksi noin 2100 €/kW. Tutkijoiden mukaan keskeisenä syynä korkeisiin hintoihin ovat vielä maltilliset tuotantomäärät. Merikäyttöön tarkoitetut polttokennoratkaisut tulevat hyötymään raskaaseen maantieliikenteeseen suunniteltavien polttokennojen kehityksestä ja hintojen uskotaan laskevan tulevaisuudessa. Ballard (2020) kertoo linja-autojen polttokennoratkaisuiden maksavan noin 1200 \$/kW ja yhtiö odottaa hinnan laskevan 60 % vuoteen 2030 mennessä. Vedyn varastointijärjestelmällä on merkittävä vaikutus hankintakustannuksiin. Wangin ja Wrightin (2021) arvioiden mukaan vedyn varastointi aluksella maksaa noin 576–868 \$/kg ja Kopaszin ja muiden (2022)

mukaan noin 313 \$/kg. Näiden tietojen pohjalta taulukkoon 8 on koottu hinta-arvioalueet sekä hankintakustannusten laskemiseen valitut arvot. Taulukkoon 9 on koottu komponenttien ja ratkaisuiden kokonaishankintakustannukset.

Taulukko 8. Komponenttien yksikköhinnat

	Hinta-arvio	Valittu arvio	Yksikkö
Polttomoottori ja vaihteisto	170–545	380	€/kW
Dieselgeneraattori	350	350	€/kW
Akkujärjestelmä	500–750	500	€/kWh
Sähkömoottori	120–250	185	€/kW
Invertteri	90–120	105	€/kW
Polttokennohybridi	2100–3100	2100	€/kW
Vedyn varastointi	288–800	550	€/kg

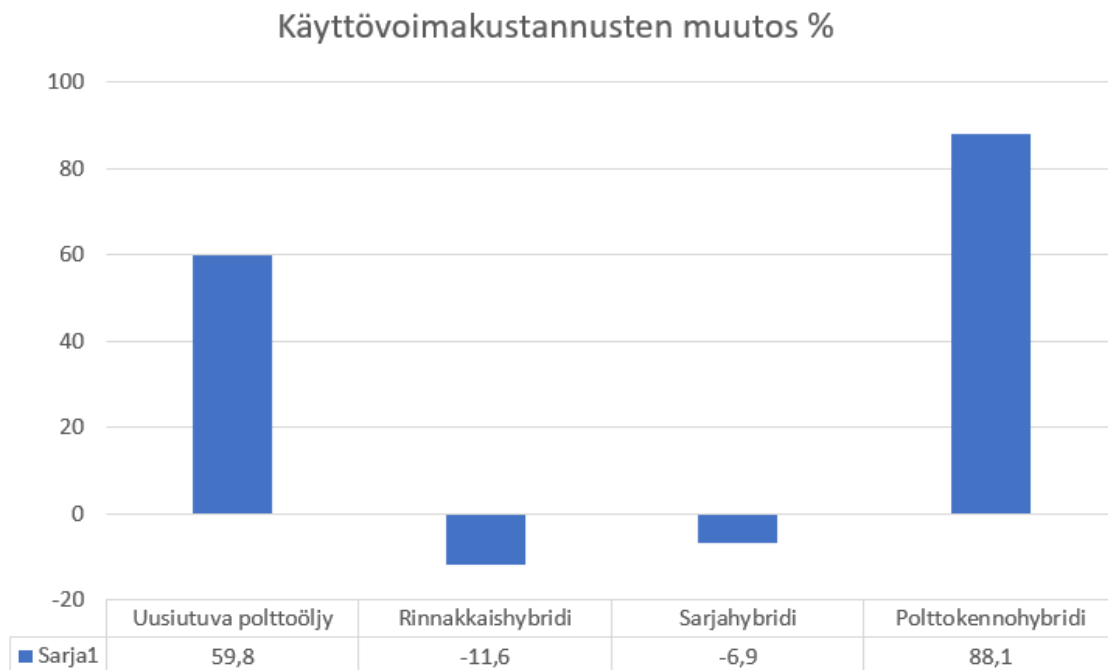
Taulukko 9. Käyttövoimaratkaisuiden hankintahinnat

	Uusiutuva polttoöljy	Rinnakkais-hybridi	Sarjahybridi	Polttokennohybridi
Polttomoottori ja vaihteisto	72200	72200	0	0
Generaattori	0	0	66500	0
Akkujärjestelmä	0	250000	250000	Sisältyy polttokennojärjestelmään
Sähkömoottori	0	17575	35150	Sisältyy polttokennojärjestelmään
Invertteri(t)	0	9975	29925	Sisältyy polttokennojärjestelmään
Polttokennojärjestelmä	0	0	0	399000
Vedyn varastointi	0	0	0	110000
Yhteensä	72000	350000	380000	510000

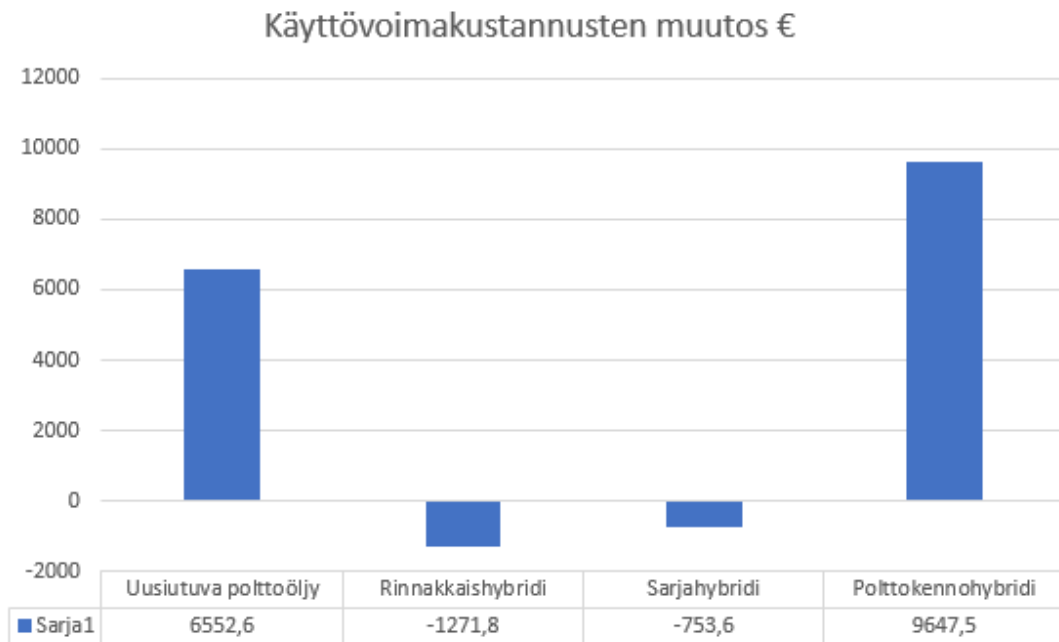
Taulukosta 9 nähdään, että hybridikäyttövoimajärjestelmien hankinta maksaa huomattavasti enemmän kuin uusiutuvan polttoöljyn käyttö. Rinnakkaishybridin käyttö nostaa hankintakustannukset lähes viisinkertaisiksi ja polttokennohybridi seitsenkertaisiksi nykyiseen järjestelmään verrattuna. Akkujärjestelmän ja polttokennojärjestelmän hankintakustannukset ovat merkittävimmät hintaa nostavat tekijät.

9.10 Käyttövoimakustannukset

Käyttövoimakustannuslaskelmat kertovat, minkälaisia taloudellisia vaikutuksia polttoainoiden ja sähkön hankintakustannuksista seuraa. Tulokset kertovat keskimääräisen vuosittaisen muutoksen sekä prosentuaalisesti että euromääräisesti. Koska käyttövoimien hinnat ovat herkkiä muutoksille, eikä tiedetä miten eri käyttövoimien hinnat tulevat kehittymään, jokaiselle käyttövoimalle on tehty myös herkkyystarkastelu. Ensimmäisessä tarkastelussa arvolisäverottoman sähkön hinnaksi (siirtohinta huomioiden) on asetettu 0,15 €/kWh. Kevyen polttoöljyn arvolisäverottomaksi hinnaksi on arvioitu 1,0 €/l ja uusiutuvan polttoöljyn 1,5 €/l. Polttoöljyjen hinta-arviot perustuvat Hankkijan julkisiin hintatietoihin. Kostiaisen (2023) mukaan vihreän vedyn valmistaminen maksaa 4–6 €/kg, ja Sustainable Ships (2024b) kertoo vedyn maksavan tällä hetkellä 5–20 €/kg. Näiden tietojen perusteella vedyn hinnaksi on asetettu 8,0 €/kg. Kuvassa 24 on esitetty käyttövoimakustannusten prosentuaalinen muutos edellä mainituilla hintaoletuksilla ja kuvassa 25 euromääräisesti.



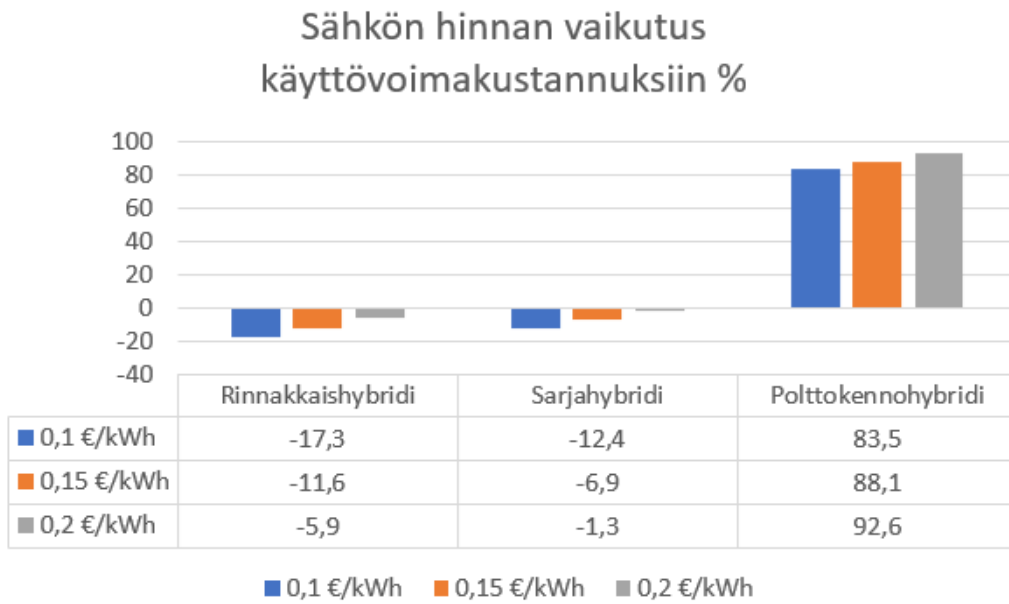
Kuva 24. Käyttövoimakustannusten muutos prosentuaalisesti



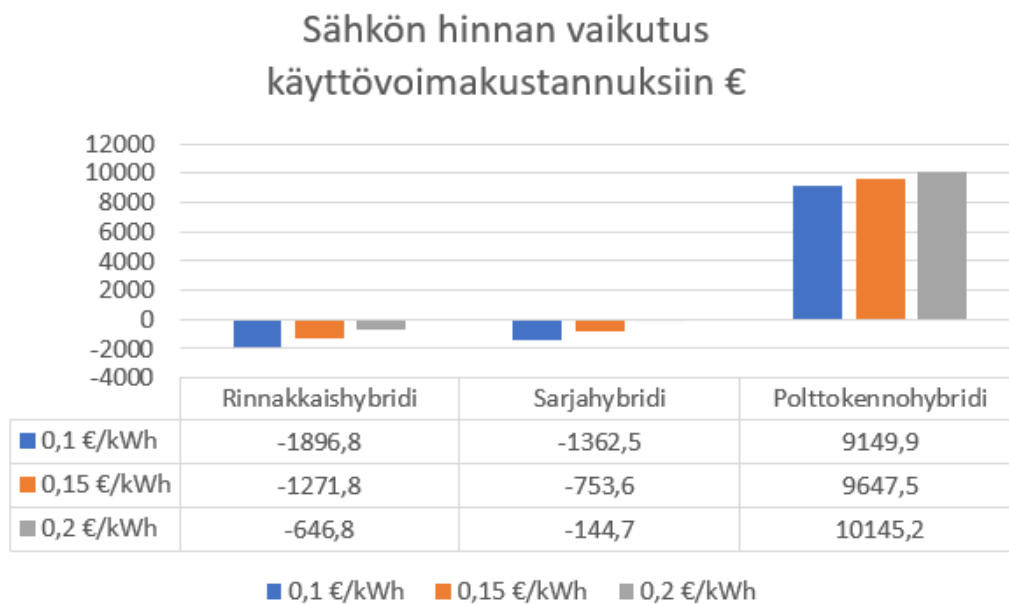
Kuva 25. Käyttövoimakustannusten muutos euromääräisesti

Tuloksista nähdään, että uusiutuvan polttoöljyn ja vedyn käyttö nostaa käyttövoimakustannuksia merkittävästi, kun taas rinnakkais- ja sarjahybridiratkaisuilla käyttövoimakustannuksia saadaan laskettua. Rinnakkais- ja sarjahybridin mahdollistamat käyttövoimakustannussäästöt eivät kuitenkaan ole merkittäviä niiden hankintakustannuksiin suhteutettuna. Uusiutuvan polttoöljyn käyttövoimakustannuksiin vaikuttaa korkeamman hinnan lisäksi kasvanut litramääräinen kulutus. Vedyn käyttö taas lähes kaksinkertaistaa käyttövoimakustannukset.

Herkkyystarkasteluissa muiden kuin tarkasteltavan kohteen hinnat pysyvät edellä mainittuina. Sähkön osalta herkkyystarkastelu sisältää hinnat: 0,1 €/kWh, 0,15 €/kWh ja 0,2 €/kWh. Kuvissa 26 ja 27 nähdään sähkön herkkyystarkastelun tulokset.



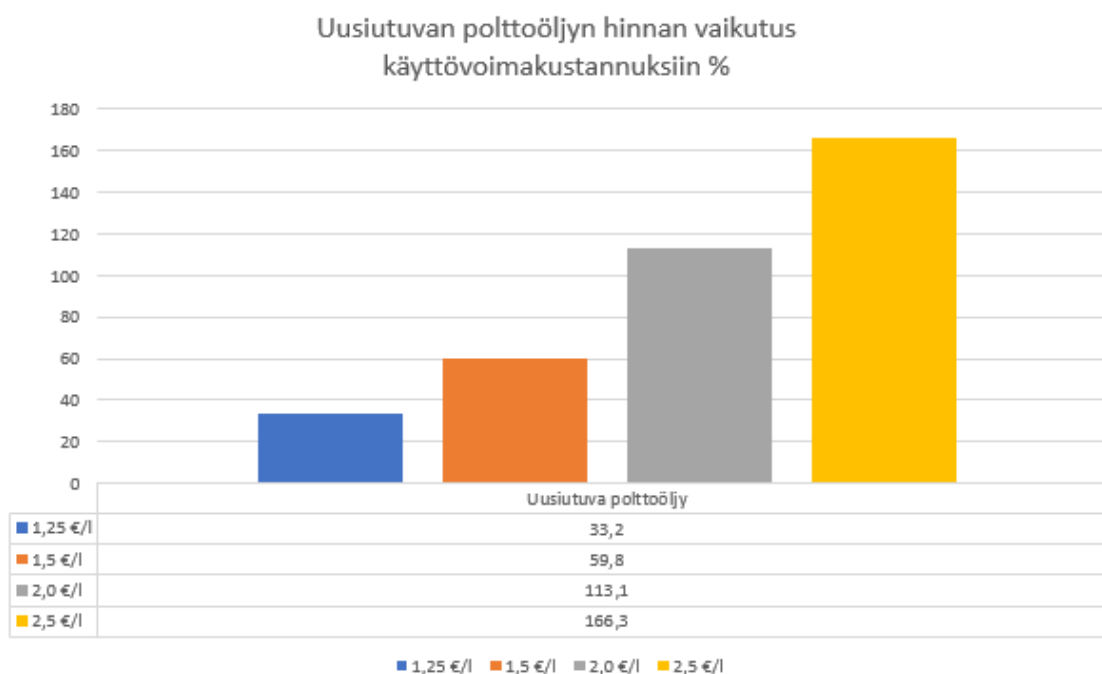
Kuva 26. Sähkön hinnan vaikutus käyttövoimakustannuksiin prosentuaalisesti



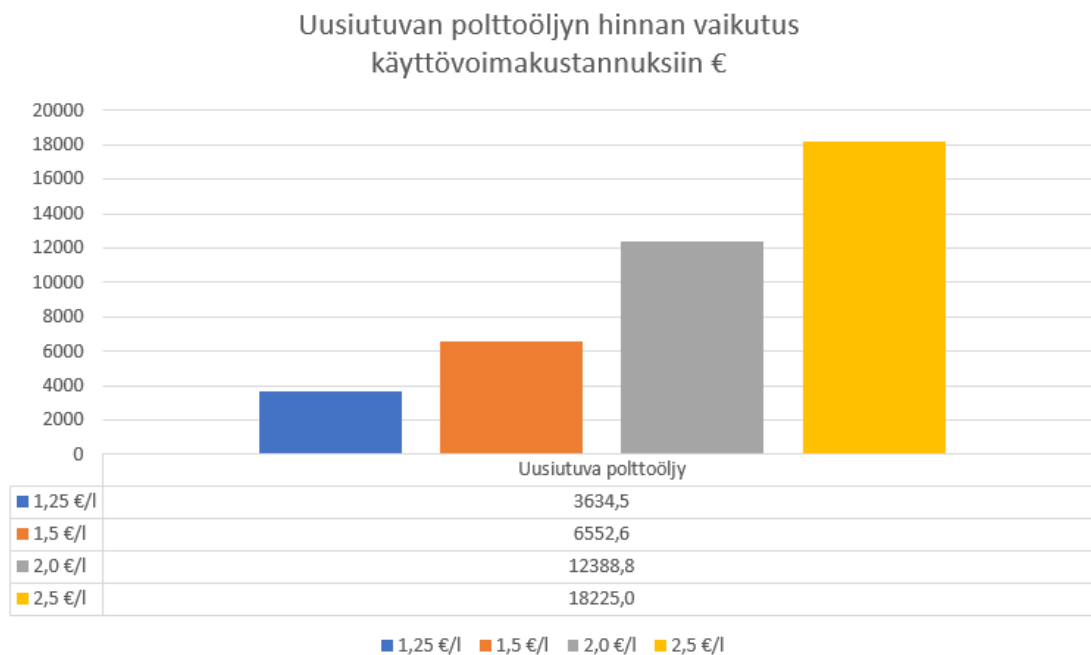
Kuva 27. Sähkön hinnan vaikutus käyttövoimakustannuksiin euromääräisesti

Tuloksista nähdään, että sähkön hinnalla on 9,1–11,4 prosenttiyksikön vaikutus sähköä hyödyntävien ratkaisuiden vuosittaisiin käyttövoimakustannuksiin, mikä euromääräisesti tarkoittaa 1000–1250 €:n vaikutusta. Sähkön hinnan ollessa alle 0,2 €/kWh rinnakkais- ja sarjahybridin käyttövoimakustannukset ovat yhä lähtötasoa pienemmät. Yleisesti ottaen sähkön hinnan vaihtelulla ei ole merkittävää vaikutusta käyttövoimakustannuksiin.

Uusiutuvan polttoöljyn hinnat vaihtelevat herkkyytarkastelussa 1,25–2,5 €/l välillä, jolloin saadaan käsitys sekä nousevan että laskevan hinnan vaikutuksesta nykytilanteeseen (1,5 €/l) verrattuna. Uusiutuvan polttoöljyn herkkyytarkastelun tulokset on esitetty kuvissa 28 ja 29.



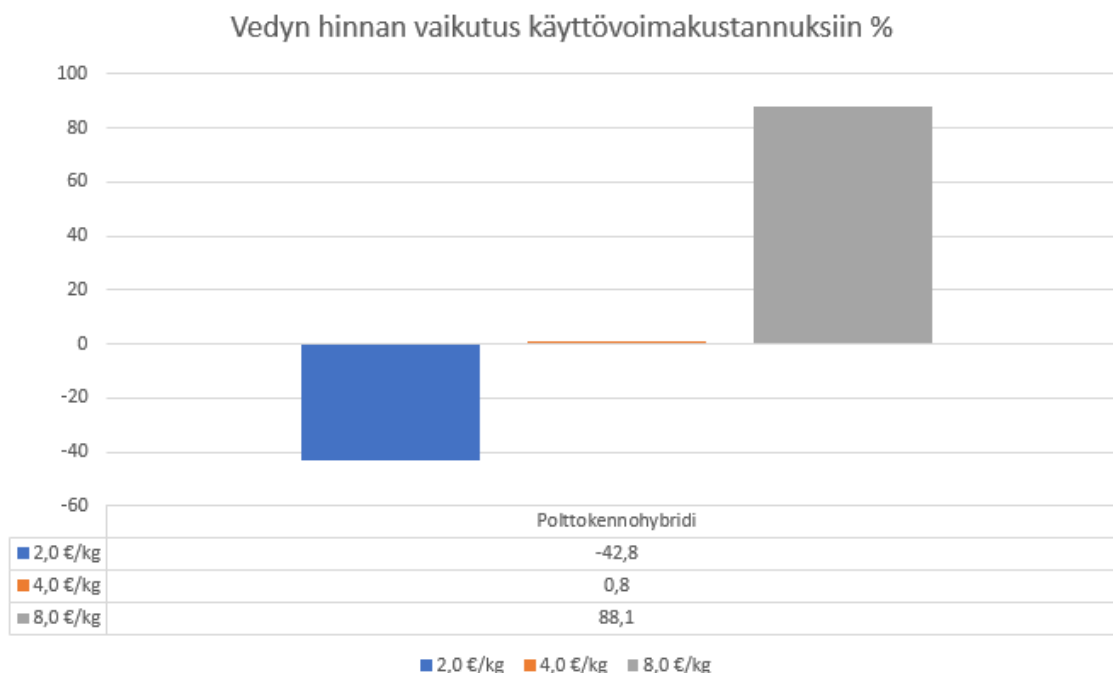
Kuva 28. Uusiutuvan polttoöljyn hinnan vaikutus käyttövoimakustannuksiin prosentuaalisesti



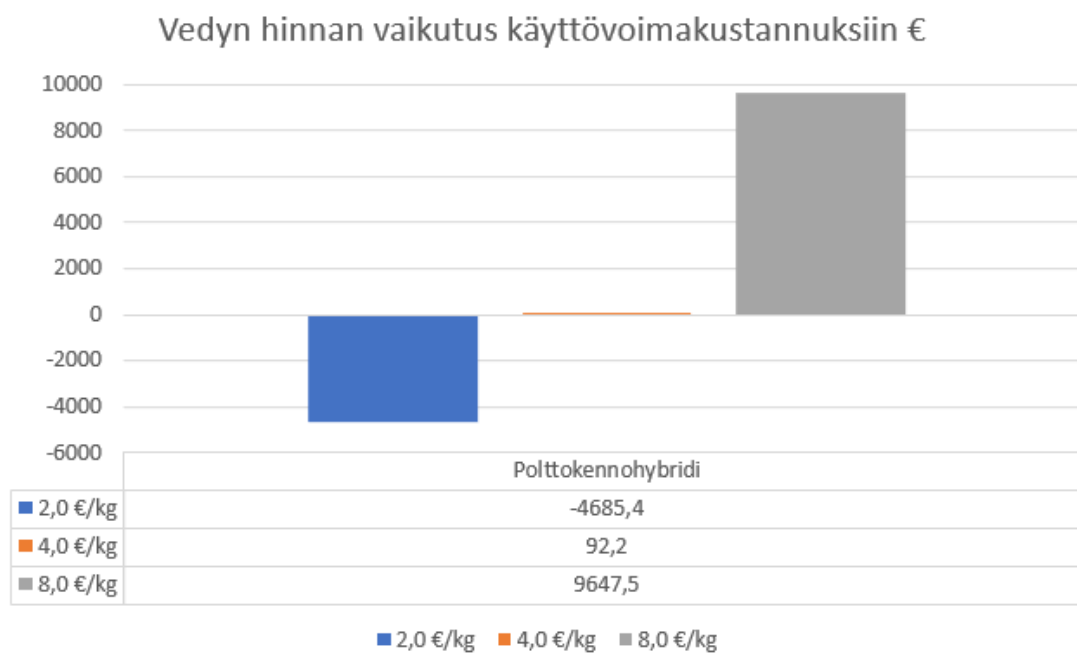
Kuva 29. Uusiutuvan polttoöljyn hinnan vaikutus käyttövoimakustannuksiin euromääräisesti

Tuloksista voidaan todeta, että uusiutuvan polttoöljyn hinnalla on huomattava vaikutus vuosittaisiin käyttövoimakustannuksiin. Aluksen käyttövoimakustannukset kasvavat uusiutuvan polttoöljyn hinnasta riippuen 33–170 %, mikä tarkoittaa euromääräisesti 3600–18000 €:a suurempia vuosikustannuksia lähtötasoon verrattuna.

Vedyn herkkyystarkastelussa oletetaan vedyn hinnan laskevan tulevaisuudessa. Herkkyystarkastelu on toteutettu hinnoilla 2,0 €/kg, 4,0 €/kg ja 8,0 €/kg. Tulokset on esitetty kuvissa 30 ja 31.



Kuva 30. Vedyn hinnan vaikutus käyttövoimakustannuksiin prosentuaalisesti

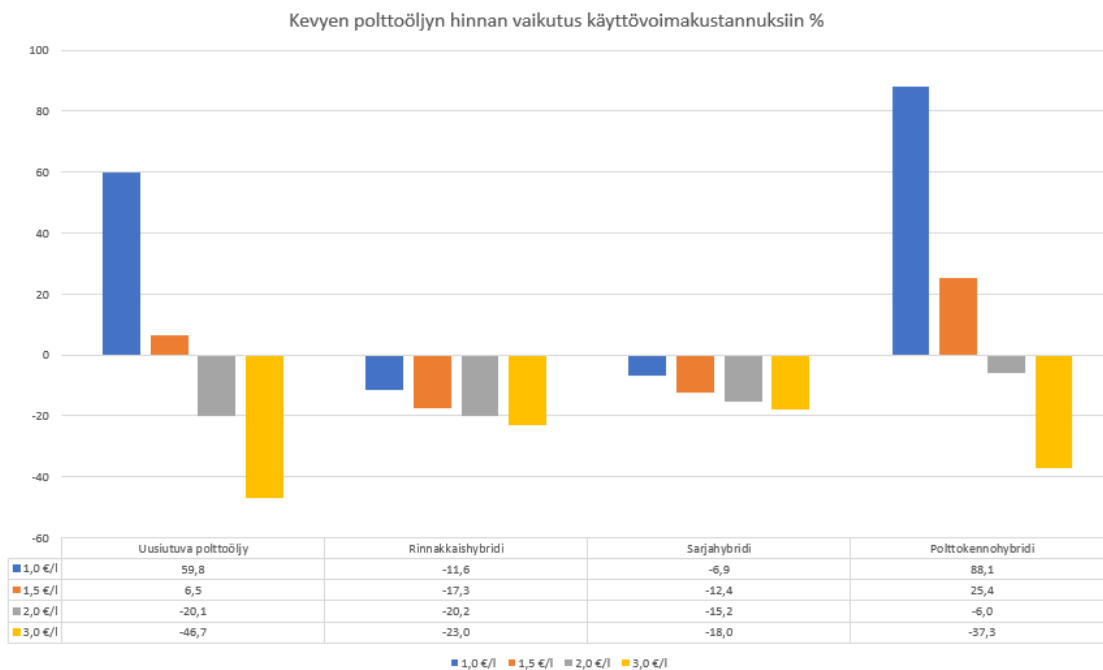


Kuva 31. Vedyn hinnan vaikutus käyttövoimakustannuksiin euromääräisesti

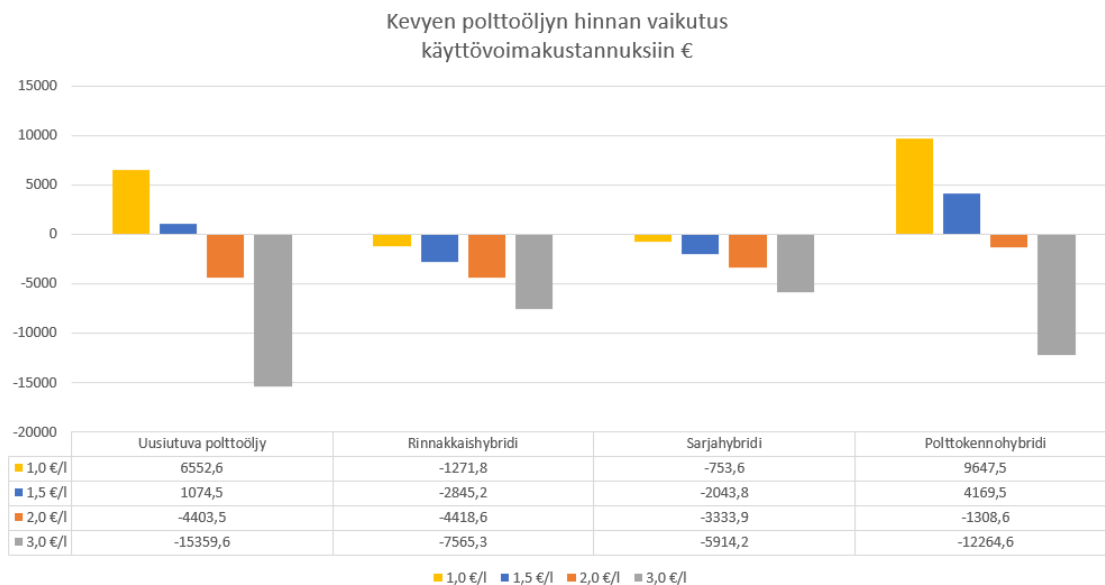
Vedyn hinnalla on merkittävä vaikutus polttokennohybridin käyttövoimakustannuksiin. Mikäli vihreän vedyn kilogrammakohtainen hinta laskee vetytalouden kehittyessä kahteen euroon, saadaan nykyisiä käyttövoimakustannuksia pienennettyä 43 % eli 4700 €.

Hinnalla 4,0 €/kg polttokennohybridin käyttövoimakustannukset vastaavat nykyistä tilannetta.

Kevyen polttoöljyn herkkyytarkastelussa nähdään minkälaiset tarkasteltavien vaihtoehtojen käytönaikaiset kustannukset ovat suhteessa nykyiseen ratkaisuun, mikäli kevyen polttoöljyn hinta tulevaisuudessa nousee. Polttoöljyn hinta voi nousta esimerkiksi poliittisten toimenpiteiden, kuten päästökaupan, seurauksena. Myös geopoliittiset konfliktit tai levottomuudet öljyntuottajamaissa voivat rajoittaa polttoöljyn saatavuutta ja siten nostaa polttoaineen hintaa. Täten herkkyytarkastelussa kevyen polttoöljyn hinnat ovat nykytilanteen (1,0 €/l) lisäksi 1,5 €/l, 2,0 €/l ja 3,0 €/l. Tulokset on esitettyä kuvissa 32 ja 33.



Kuva 32. Kevyen polttoöljyn hinnan prosentuaalinen vaikutus käyttövoimakustannuksiin



Kuva 33. Kevyen polttoöljyn hinnan euromääräinen vaikutus käyttövoimakustannuksiin

Tuloksista nähdään, että kohonnut kevyen polttoöljyn hinta lisää vaihtoehtoisten käyttövoimaratkaisuiden taloudellisesta houkuttelevuutta. Hinnan ollessa 1,5 €/l siirtyminen uusiutuvaan polttoöljyyn ei merkittävästi lisää käyttövoimakustannuksia. Rinnakkais-, sarja- ja polttokennohybridistä saatavat euromääräiset hyödyt kasvavat myös tarkastelluilla polttoöljyn hinnoilla.

10 Pohdinta ja jatkotutkimustarpeet

Tapaustutkimuksessa esitettyjen tulosten suhteen on huomioitava, että laskelmien toteuttaminen edellytti useita arvioita ja yksinkertaistuksia mm. apualusten kuormituksesta, voimansiirtojärjestelmän komponenttien hyötysuhteista ja hankintakustannuksista. Käytettyjä lukuja on pyritty arvioimaan huolellisesti, jotta tulokset vastaisivat mahdollisimman hyvin todellisuutta. Uusiutuvan polttoöljyn 82 % pienemmät hiilidioksidipäästöt ovat samassa kokoluokassa Spoof-Tuomen (2023) tutkimuksen kanssa, jossa uusiutuvalla dieselillä arvioitiin laivakäytössä olevan 86 %:n kasvihuonekaasupäästöjen pienentämispotentiaali. Lisäksi Neste (n.d.) kertoo uusiutuvan polttoöljyn mahdollistavan 90 % pienemmän hiilijalanjäljen fossiiliseen dieseliin verrattuna. Rinnakkais- ja sarjahybridin mahdollistamat 23–28 % pienemmät elinkaarenaikaiset hiilidioksidipäästöt taas ovat linjassa kappaleessa 8.4 käsiteltyjen Damenin ASD 2810 -hybridihinaajan (30 %) ja Vilja-hinaajan kanssa (20 %). Polttokennohybridin 96 % pienemmät elinkaaripäästöt arvioidaan myös todenmukaisiksi, sillä uusiutuvilla energialähteillä tuotetun vedyn päästöt aiheutuvat pääosin vedyn kuljetuksesta. Vaikka polttokennohybridi mahdollistaisi lähes päästöttömän apualuksen käytön, teknologian käyttöönotto edellyttää vielä vetytalouden kehittymistä ja merkittävää polttokennoteknologian hankintakustannusten ja vihreän vedyn hinnan laskua.

Rinnakkaishybridi on sarjahybridistä parempi vaihtoehto sekä kustannusten että päästöjen pienentämisen suhteen. Pienemmät hankintakustannukset johtuvat mm. siitä, että sähkömoottorin tehon ei tarvitse olla rinnakkaishybridissä yhtä suuri kuin sarjahybridissä. Rinnakkaishybridin voimansiirtojärjestelmän häviöt ovat myös pienemmät kuin sarjahybridin, mikä tarkoittaa pienempää polttoaineen kulutusta ja siten pienempiä päästöjä ja käyttövoimakustannuksia. Toisaalta sarjahybridissä ei ole tärinää ja melua aiheuttavaa mekaanista vaihteistoa, joten sarjahybridistä käyttävä alus olisi käyttäjäystävällisempi.

Hankinta- ja käyttövoimakustannuslaskelmat kuitenkin osoittivat, että sähköhybridit eivät ole taloudellisessa mielessä houkuttelevia vaihtoehtoja apualuksen käyttövoimarakaisuuksi. Suuret hankintakustannukset johtuvat mm. siitä, että vesiliikenteen sähköistä-

minen ei ole yhtä pitkällä kuin maantieliikenteessä sekä siitä, että olosuhteet vesillä ovat vaativammat kuin maanteillä. Suuria hankintakustannuksia pitäisi pystyä kompensoimaan pienemmästä kulutuksesta saatavilla säästöillä, jotta hybriditeknologiat olisivat taloudellisestikin varteenotettavia ratkaisuja. Käyttövoimakustannuslaskelmista nähtiin, että rinnakkais- ja sarjahybridin käytön aikaiset kustannussäästöt ovat kuitenkin hyvin maltillisia, mikä johtuu aluksen pienestä vuotuisesta käyttötuntimäärästä ja polttoaineen kulutuksesta sekä kevyen polttoöljyn edullisuudesta. Apualuksen pieni moottorin teho, uittokauden kausiluonteisuus ja kuljetettava puumäärä johtavat vain noin 11000 litran vuotuisen kulutukseen. Tämänhetkisten hankintakustannusten takia hybridisointi on suositeltavaa sellaisille aluksille, joiden polttoaineen kulutus on moninkertainen apualuksen kulutukseen verrattuna. Esimerkkinä tällaisesta aluksesta on luvussa 8.4 mainittu Frøy Fenris, jossa hybriditeknologia säästää polttoainetta 97000 litraa vuodessa. Jotta rinnakkais- tai sarjahybridin hankinta olisi nykyistä mielekkäämpää, meriakkujen hinnan tulisi laskea. Lisäksi kuljetusvolyymien tulisi kasvaa ja kevyen polttoöljyn hinnan nousta. Tutkimuksen liitteistä 1–4 löytyy lisätietoa siitä, miten muutokset näissä tekijöissä vaikuttavat rinnakkaishybridin takaisinmaksu-aikaan.

Siirtyminen uusiutuvan polttoöljyn käyttöön nostaa käytön aikaisia kustannuksia, mutta sen käytöllä apualuksen hiilidioksidipäästöt putoavat alle viidennekseen nykytilanteeseen verrattuna. Kasvaneiden käyttövoimakustannusten vastapainoksi ratkaisu ei lisää hankintakustannuksia nykytilanteeseen verrattuna. Tämä tarkoittaa sitä, että uusiutuvan polttoöljyn käyttö on edullisin vähäpäästöinen vaihtoehto, vaikka käyttövoimakustannukset kasvaisivat 2,5 €:n litrahinnalla 18000 € vuodessa. Kymmenen vuoden tarkasteluvälillä tämä alittaa vielä selkeästi meriakku- ja polttokennojärjestelmän hankintakustannukset. Toisaalta mikäli uusiutuva polttoöljy otetaan käyttöön kaikissa uiton aluksissa, käyttövoimakustannusten kasvu voi vaikuttaa merkittävästi yrityksen liiketoimintaan. Uusiutuvan polttoöljyn suhteen on myös huomioitava laki biopolttoöljyn käytön edistämistä 29.3.2019/418, 7 §. Lain mukaan: ”Jos jakelija on kalenterivuonna toimittanut kulutukseen enemmän biopolttoöljyä kuin 5 §:n 1 momentissa säädetään, jakelija saa ottaa ylimenevän osuuden huomioon seuraavan kalenterivuoden jakeluvuotta las-

kettaessa ja jakeluelvoitelain mukaista samaa kalenterivuotta koskevaa jakeluelvoitetta laskettaessa. Siirtyvä määrä voi kuitenkin olla enintään 30 prosenttia sen kalenterivuoden jakeluelvoitetta vastaavasta energiamäärästä, jolloin ylitys tapahtui, ja siirtyvällä määrällä voidaan täyttää enintään 30 prosenttia jakeluelvoitelain mukaisesta jakeluelvoitteesta.” Suomen maakohtaiset päästöt eivät siis välttämättä täysimääräisesti pienene, vaikka yritys siirtyy uusiutuvan polttoöljyn käyttöön.

Uittokuljetusten päästöjen pienentämiseksi käyttövoimakysymys on seuraavaksi kohdistettava päähinaajiin. Päähinaajat kuluttavat enemmän polttoainetta kuin apualukset, sillä niiden moottoriteho ja vuotuiset käyttötunnit ovat suuremmat. Mikäli kevyen polttoöljyn hinta nousee ja meriakkujen hinnat laskevat tulevaisuudessa, rinnakkais- tai sarjahybridi voi olla näissä aluksissa perusteltu käyttövoimaratkaisu. Jotta pystytään muodostamaan mahdollisimman tarkka arvio sähköhybriditeknologian soveltuvuudesta, on seuraavaksi tutkittava aluksen käyttöön ja rahoitukseen liittyvät seikat.

Jotta hybriditeknologioita tarjoavat yritykset pystyvät räätälöimään päähinaajalle optimaalisen ratkaisun, päähinaajan käytöstä tulisi tarjota mahdollisimman täsmällistä tietoa. Tarkan kuormitusprofiilin muodostamiseksi päähinaajan moottorin kuormitusta suositellaan mitattavan uittokauden aikana. Lisäksi on selvitettävä maasähkön saatavuuden ja kustannuksiin liittyvät seikat. Akku- ja energianhallintajärjestelmän suunnittelua varten yrityksen tulisi tietää, kuinka pitkään aluksen on pystyttävä toimimaan ennen latausta ja kuinka kauan alusta voidaan ladata.

Kuten apualusten kohdalla, päähinaajankin sähköhybridin hankintakustannukset saattavat olla liian suuret suhteutettuna arvioituun päästöjen vähennyspotentiaaliin. Tämän takia on selvitettävä alushankinnoille mahdollisesti saatavilla olevat taloudelliset kannustimet. Pokela ja muut (2022) ovat selvittäneet valtion mahdollisuuksia tukea vihreämpien teknologioiden käyttöönottoa alusliikenteessä. Selvityksen mukaan alalla on epävarmuutta siitä, mihin investoinnit tulisi kohdistaa, sillä käyttövoimateknologiat ovat osin kypsymättömiä. Tämän takia ala tarvitsee kannustimia investointien nopeuttamiseksi.

Kannustimena voisi tutkijoiden mukaan olla esimerkiksi valtion ympäristöinvestointituki sellaisille alushankinnoille, jotka vähentävät kasvihuonekaasupäästöjä. Koska vesiliikenteen sähköistäminen ei ole vielä yhtä pitkällä kuin maantieliikenteen, tutkijoiden ehdottama ympäristöinvestointituki voi olla edellytyksenä hybriditeknologiaa hyödyntävän päähinaajan hankkimista varten.

11 Johtopäätökset

Työn tavoitteena oli arvioida vähäpäästöisten käyttövoimaratkaisuiden suositeltavuutta uiton apualuksiin. Vaihtoehtoisina käyttövoimaratkaisuuina tutkittiin uusiutuva polttoöljy, rinnakkais- ja sarjahybridi sekä polttokennohybridi. Vaihtoehtoja arvioitiin päästöjen pienentämispotentiaalin sekä käyttö- ja hankintakustannusten näkökulmasta. Tutkimuksen johtopäätökset ovat:

1. Uusiutuva polttoöljy on suositeltavin vaihtoehto apualukselle sekä taloudellisesti että päästöjen pienentämisen suhteen.
2. Käyttövoimakustannukset voivat kasvaa merkittävästi, mikäli uusiutuva polttoöljy otetaan käyttöön kaikissa aluksissa.
3. Apualuksen pienten käyttövoimakustannusten takia hybriditeknologioiden hankintakustannuksia ei pystytä kattamaan, vaikka hybridi parantaa polttoainetehokkuutta.
4. Hybriditeknologioiden suuret hankintakustannukset alusliikenteessä johtuvat siitä, että olosuhteet vesillä ovat vaativat, sekä siitä että vesiliikenteen sähköistäminen ei ole yhtä pitkällä kuin maantieliikenteessä.
5. Hybriditeknologioiden uudelleenarviointi tulevaisuudessa edellyttää uittokuljetusten moninkertaistumista ja polttoöljyn hinnan nousua.
6. Rinnakkaishybridi soveltuisi sarjahybridiä paremmin apualuksen käyttövoimaratkaisuksi päästöjen ja kustannusten näkökulmasta.
7. Sarjahybridi olisi rinnakkaishybridiä käyttäjäystävällisempi vaihtoehto, sillä mekaanisen vaihteiston puuttuessa aluksen melu- ja värinätasot olisivat matalammat.
8. Polttokennohybridillä aluksen päästöt voidaan pienentää lähes nollaan, minkä lisäksi se mahdollistaa pitkät toimintasäteet. Ratkaisu edellyttää kuitenkin polttokennoteknologian ja vihreän vedyn kustannusten merkittävää laskua.

12 Yhteenveto

Liikenteen päästöjen pienentäminen on avainasemassa EU:n ilmastotavoitteiden saavuttamisessa, minkä seurauksena ilmastoystävällisiä kuljetusmuotoja ja puhtaiden käyttövoimien käyttöönottoa edistetään mm. AFIR-asetuksella ja NAIADES III -toimintasuunnitelmalla. Siirtyminen fossiilisista polttoaineista kohti puhtaampia käyttövoimia voidaan toteuttaa joko perinteisillä tai kehittyneillä teknologioilla sekä näiden yhdistelmillä. Vesiliikenteen aluksissa voidaan hyödyntää jatkuvasti kehittyvää akkuteknologiaa yhdessä polttomoottoreiden kanssa. Osittaisella sähköistämällä polttomoottoreita voidaan ajaa pääosin niiden optimaalisella kuormitusasteella, mikä nostaa aluksen kokonaishyötysuhdetta ja vähentää siten polttoaineen kulutusta. Polttokennoteknologian kehittyessä ja tuotantomäärien lisääntyessä alusliikenteelle avautuu myös uusia tapoja käyttää ilmastoystävällisiä käyttövoimia energiatehokkaasti.

Uiton apualusten vaihtoehtoisina käyttövoimaratkaisuuina tutkittiin uusiutuva polttoöljy, rinnakkais- ja sarjahybridi sekä polttokennohybridi. Vaihtoehtoja arvioitiin päästöjen pienentämispotentiaalin sekä käyttö- ja hankintakustannusten näkökulmasta. Uusiutuvan polttoöljyn käyttö on suositeltavin vaihtoehtoinen ratkaisu sekä päästöjen että kustannusten näkökulmasta. Uusiutuvan polttoöljyn käyttö pienentää elinkaaren aikaisia hiilidioksidipäästöjä yli 82 %, eikä polttoaineen käyttö edellytä lisääntyviä hankintakustannuksia. Vuotuiset käyttövoimakustannukset kasvavat tosin polttoaineen hinnasta riippuen 33–170 % eli 3600–18000 € vuodessa. Rinnakkais- ja sarjahybridit mahdollistavat 23–28 % pienemmät hiilidioksidipäästöt, mutta teknologioihin liittyvät suuret hankintakustannukset tekevät näistä vaihtoehtoista taloudellisesti kannattamattomia. Syynä tähän on aluksen lyhyt käyttöaika ja kevyen polttoöljyn edullisuus suhteutettuna meriakujen korkeaan hintaan. Vetytalouden kehittyessä polttokennohybridi mahdollistaisi aluksen lähes päästöttömän käytön, mutta suuret hankintakustannukset ja kallis vihreä vety ovat ainakin toistaiseksi esteenä tämän ratkaisun käyttöönotolle apualuksissa.

Lähteet

- Aarskog, F. Danebergs, J. Strømgren, T. & Ulleberg, Ø. (2020). *Energy and cost analysis of a hydrogen driven high speed passenger ferry*. IOS Press Content Library. DOI:10.3233/ISP-190273
- Abma, D. Verbeek, R., Kelderman, B. Hoogvelt, B. Quispel, M. (2018). *Sustainable, safe and economically feasible energy concepts and technologies for European Inland Shipping*. Noudettu 16.2.2024 osoitteesta <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5b93a9b9c&ap- plid=PPGMS>
- AGCO Power. (n.d.) *Research and development*. Noudettu 9.2.2024 osoitteesta <https://www.agcopower.com/future-solutions/research-and-development/>
- Ballard. (2020). *Fueling the Future of Mobility*. <https://info.ballard.com/deloitte-vol-1-fueling-the-future-of-mobility>
- Bach, E. (2023). *Inverter | Tech Talks | Lucid Motors*. Youtube. Kohta 1:52. https://www.youtube.com/watch?v=fKhxxKCPwzc&ab_channel=LucidMotors
- BloombergNEF. (2023). *BloombergNEF's annual battery price survey finds a 14% drop from 2022 to 2023*. Noudettu 17.1.2024 osoitteesta <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/>
- CESNI. (2023). *European Standard Laying Down Technical Requirements For Inland Navigation Vessels (ES-TRIN)*. https://www.cesni.eu/wp-content/uploads/2022/11/ES-TRIN23_signed_en.pdf
- CESNI. (2024). *TECHNICAL REQUIREMENTS (PT)*. Noudettu 20.1.2024 osoitteesta <https://www.cesni.eu/en/technical-requirements/#01>
- Corvus Energy. (2024). *Corvus Orca ESS*. Noudettu 8.2.2024 osoitteesta <https://corvusenergy.com/products/energy-storage-solutions/corvus-orca-energy/>
- Corvus Energy. (n.d.-a). *VILJA*. Noudettu 11.1.2024 osoitteesta <https://corvusenergy.com/projects/vilja/>
- Corvus Energy. (n.d.-b). *FRØY FENRIS*. Noudettu 28.2.2024 osoitteesta

- <https://corvusenergy.com/projects/froy-fenris/>
- Crownhart, C. (2023). *What's next for batteries*. MIT Technology review. Noudettu 9.1.2024 osoitteesta <https://www.technologyreview.com/2023/01/04/1066141/whats-next-for-batteries/>
- Damen. (2014). *DAMEN ASD TUG 2810*. Noudettu 25.2.2024 osoitteesta <https://joules-project.eu/Joules/resources/Damen%20ASD%20Tug%202810.pdf>
- Dieselnet. (2021). *Emissions standards*. Noudettu 22.1.2024 osoitteesta <https://dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>
- DNV. (2015). *The future is hybrid - A guide to use of batteries in shipping*. <https://www.dnv.com/maritime/publications/future-is-hybrid-download.html>
- DNV. (2016). *DNV GL Handbook for Maritime and Offshore Battery Systems*. https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/DNV-GL_2016-Handbook-maritime-offshore-battery-systems-report.pdf
- EASEE-gas. (2022). *Common Business Practice on Hydrogen*. Noudettu 19.2.2024 osoitteesta <https://easee-gas.eu/uploads/kcFinder/files/Common%20Business%20%E2%80%8EPractice%20on%20Hydrogen.pdf>
- Echandia. (2022). *What batteries are used in Sparky the tugboat?* Noudettu 8.2.2024 osoitteesta <https://echandia.se/insights/article/what-batteries-are-used-in-sparky-the-tugboat/>
- Elkafas, AG. Rivarolo, M. Gadducci, E. Magistri, L. & Massardo, AF. (2022). *Fuel Cell Systems for Maritime: A Review of Research Development, Commercial Products, Applications, and Perspectives*. Processes. 2023; 11(1):97. <https://doi.org/10.3390/pr11010097>
- East Coast Marine Battery. (2024). *Choosing a Battery*. Noudettu 22.1.2024 osoitteesta <https://eastcoastmarinebattery.com/choosing-a-battery/>
- Elinkeinoelämän keskusliitto. (2023). *Kansainväliset cleantech-markkinat*. https://ek.fi/wp-content/uploads/2023/11/Cleantech-markkina-analyysi-2023_final.pdf
- EODev. (n.d.). *Electro-hydrogen hybridization*. Noudettu 5.1.2024 osoitteesta <https://www.eo-dev.com/technologies/electro-hydrogen-hybridization>

- EODev. (n.d.). *Hynova 40: the first commercial application of the REXH2*. Noudettu 9.2.2024 osoitteesta <https://www.eo-dev.com/applications/hynova-40-first-rexh2-commercial-boat>
- Euroopan komissio. (2021a). *Sisävesiliikenne – NAIADES III -toimintasuunnitelma 2021–2027*. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12789-Sisavesiliikenne-NAIADES-III-toimintasuunnitelma-2021-2027_fi
- Euroopan komissio. (2021b) *Euroopan vihreän kehityksen ohjelman toteuttaminen*. Noudettu 17.11.2023 osoitteesta https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_fi
- Euroopan komissio. (n.d.) *55-valmiuspaketti: Ilmastotavoitteista totta*. Noudettu 17.11.2023 osoitteesta https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal/fit-55-delivering-proposals_fi
- Euroopan komissio. (2022). *REPowerEU-suunnitelma*. Noudettu 19.1.2024 osoitteesta <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230>
- Euroopan komissio. (2023a). *Maritime transport emissions: Commission welcomes new IMO climate ambition for 2030, 2040 and 2050 and calls to set transition in motion*. Noudettu 2.1.2024 osoitteesta https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_3745
- Euroopan komissio. (2023b). *Euroopan vihreän kehityksen ohjelma: uusi kunnianhimoinen laki, jonka tavoitteena on taata riittävä vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuuri*. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fi/ip_23_1867
- Eurooppa-neuvosto. (2023a). *FuelEU Maritime -aloite: neuvostolta uusi laki merenkulkualan vähähiilistymisestä*. <https://www.consilium.europa.eu/fi/press/press-releases/2023/07/25/fueleu-maritime-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-maritime-sector/>
- Eurooppa-neuvosto. (2023b). *Infografiikka – 55-valmiuspaketti: kohti kestävämpää*

- liikennettä*. Noudettu 12.12.2023 osoitteesta <https://www.consilium.europa.eu/fi/infographics/fit-for-55-afir-alternative-fuels-infrastructure-regulation/>
- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2016/1629. (2016). *Sisävesialusten teknisistä vaatimuksista, direktiivin 2009/100/EY muuttamisesta ja direktiivin 2006/87/EY kumoamisesta*. Noudettu 21.1.2024 osoitteesta <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016L1629>
- Euroopan parlamentti. (2022). *Inland waterway transport in the EU*. [https://www.europarl.europa.eu/Reg-Data/etudes/BRIE/2022/698918/EPRS_BRI\(2022\)698918_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/Reg-Data/etudes/BRIE/2022/698918/EPRS_BRI(2022)698918_EN.pdf)
- Fingrid. (n.d.). *Sähköntuotannon ja -kulutuksen CO₂-päästöt*. Noudettu 20.2.2024 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/co2/>
- Flexitallic. (n.d.). SOLID OXIDE FUEL CELL /ELECTROLYSER FAQs. Noudettu 18.1.2024 osoitteesta <https://flexitallic.com/sofc/faqs/>
- Geertsma, R.D. Negenborn, R.R. Visser, K. & Hopman, J.J. (2017). *Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments*, Applied Energy. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.060>
- GoldmanSachs. (2023). *Carbonomics*. Noudettu 17.1.2024 osoitteesta <https://www.goldmansachs.com/intelligence/pages/gs-research/carbonomics-updated-cost-curve-shows-diverging-trends/report.pdf>
- Hankkija. (n.d.). *Neste My Uusiutuva Polttoöljy/Lämmitysöljy -32*. Noudettu 21.2.2024 osoitteesta <https://www.hankkija.fi/tuotantopanokset/polttoaineet-ja-lammitysoljy/ia-neste-my-uusiutuva-polttoljylammitysoljy-10-2037015/>
- Happonen, M. (2021). *Gearboxes: gearing up for hybrid propulsion applications*. Marine Propulsion Webinar Week. https://dvzpv6x5302g1.cloudfront.net/AcuCustom/Sitename/DAM/095/1A_Gearboxes_webinar_presentations.pdf
- Helenus. (2023). *About the project*. Noudettu 26.2.2024 osoitteesta <https://www.helenus.eu/about-the-helenus-project/>
- Heywood, J. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. Second edition.

<https://www.accessengineeringlibrary.com/binary/mheaeworks/3e521f3d48568bd8/31775d7d39749700c81223cdfec9aac672f43a1a636910cf8ade18d9c7f04e1e/book-summary.pdf>

HybridMarine. (n.d). *What is a hybrid?* Noudettu 17.12.2023 osoitteesta

<https://www.hybrid-marine.co.uk/index.php/hybrid-info/what-is-a-hybrid>

Hydrogen cluster Finland. (2021). *A systemic view on the Finnish hydrogen economy today and in 2030 – Our common playbook for the way forward.*

<https://h2cluster.fi/wp-content/uploads/2021/09/H2Cluster-Whitepaper-09-2021.pdf>

IEA. (2023a, s. 59). *Global EV Outlook 2023.*

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/dacf14d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf>

IEA. (2023b). *Global Hydrogen Review 2023.*

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf>

Inal, O. Charpentier, J. & Deniz, C. (2022). *Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges.* Renewable and Sustainable Energy Reviews

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111965>

International Maritime Organization. (2019) Frequently Asked Questions. Noudettu

2.1.2024 osoitteesta <https://www.imo.org/en/About/Pages/FAQs.aspx>

Interreg-Danube. (2020a). *Battery electric propulsion.* Danube Transnational Programme.

https://www.interreg-danube.eu/uploads/media/approved_public_public/0001/39/93986a6d142c123cdccbb7e702b76dc7de6b0677.pdf

Interreg-Danube. (2020b). *DIESEL-ELECTRIC PROPULSION.* Danube Transnational

Programme. https://www.interreg-danube.eu/uploads/media/approved_public_public/0001/39/2a29d38d0b7efeaab00c5785a23489875baf855.pdf

Jansson, M. (2022). *Hydrogen – Fuel for thought in our Q&A.* Wärtsilä. Noudettu

28.12.2023 osoitteesta <https://www.wartsila.com/insights/article/hydrogen-fuel-for-thought-in-our-q-a>

Johannesen, P. & Heine, U. (2021). *Dispelling the myth of high losses in modern*

- electrically enhanced propulsion systems*. Wärtsilä. Noudettu 11.1.2024 osoitteesta <https://www.wartsila.com/insights/article/dispelling-the-myth-of-high-losses-in-modern-electrically-enhanced-propulsion-systems>
- Johannesen, P. & Heine, U. (2022). *DC or not DC, that is the question*. Wärtsilä. Noudettu 8.12.2023 osoitteesta <https://www.wartsila.com/insights/article/dc-or-not-dc-that-is-the-question>
- Järvi-Suomen Uittoyhdistys. (2023a). Noudettu 17.11.2023 osoitteesta <https://www.uittoyhdistys.fi/j%C3%A4rvisuomenuittoyhdistys>
- Järvi-Suomen Uittoyhdistys. (2023b). Noudettu 17.11.2023 osoitteesta <https://www.uittoyhdistys.fi/toiminta>
- Järvi-Suomen Uittoyhdistys. (2023c). Noudettu 17.11.2023 osoitteesta <https://www.uittoyhdistys.fi/>
- Konic Gearbox. (n.d). *High Efficiency Multi Stage Planetary Gearbox*. Noudettu 23.1.2024 osoitteesta <https://konic-gearbox.com/multi-stage-planetary-gearbox/>
- Kopasz, J. Krause, T. Ahluwalia, R. Papadias, D. & Wang, X. (2022). *Hydrogen for Maritime Applications*. Argonne National Laboratory
<https://publications.anl.gov/anlpubs/2022/12/177667.pdf>
- Korberg, AD. Brynolf, S. Grahn, M. & Skov, I.R. (2021). *Techno-economic assessment of advanced fuels and propulsion systems in future fossil-free ships*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110861>
- Kostiainen, J. (2023). *Vetytalous*. Nordea. Noudettu 19.1.2024 osoitteesta <https://corporate.nordea.com/article/80926/vetytalous>
- MAN Energy Solution. (2019). *Batteries on board ocean-going vessels*.
https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/batteries-on-board-ocean-going-vessels.pdf?sfvrsn=deaa76b8_14
- Marine Development Holland BV. (n.d.). Noudettu 6.2.2024 osoitteesta <https://mdhbv.nl/object/15725-mw12-zero-emissions-fully-electric/>
- Marine Service Noord. (n.d.). *HOW MUCH HYDROGEN DO I NEED FOR THE FUEL CELL ON*

- MY SHIP?. Noudettu 3.1.2024 osoitteesta <https://marine-service-noord.com/en/products/alternative-fuels-and-technologies/hydrogen/how-much-hydrogen-do-i-need/>
- Miao, Y. Hynan, P. von Jouanne, A. Yokochi, A. (2019). *Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements*. Energies. <https://doi.org/10.3390/en12061074>
- Metsätehon puuhuollon visio 2030. (2022). Noudettu 18.01.2024 osoitteesta <https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Puuhuolto-2030-esite.pdf>
- Metsätehon uitto-opas. (2019). *Toimijat ja sidosryhmät*. Noudettu 24.10.2023 osoitteesta <https://puuhuolto.fi/uitto-opas/johdatus-uitto-oppaaseen/toimijat-ja-sidosryhmat/>
- Metsätehon yritysesitys. (n.d.). Noudettu 18.01.2024 osoitteesta <https://www.metsateho.fi/yritysesitys/>
- Motiva. (2023). *Dieselmoottori*. Noudettu 11.12.2023 osoitteesta: <https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava-liikenne-ja-liikkuminen/vaalitse-auto-viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/dieselmoottori>
- Muelaner, J. (2022). *What to consider when evaluating battery performance*. Battery power tips. Noudettu 14.1.2024 osoitteesta <https://www.batterypowertips.com/what-to-consider-when-evaluating-battery-performance-faq/>
- Neste. (n.d.). *Neste MY Uusiutuva Polttoöljy*. Noudettu 28.2.2024 osoitteesta <https://www.neste.fi/yksityisasiakkaat/tuotteet/lammitysoljyt/neste-my-uusiutuva-polttooljy>
- Niemi, S. (2024). *Hydrogen as fuel in combustion engines*. [rajattu pääsy].
- Nissilä, M. & Sarsama, J. (2013). *Polttokennosovellusten ja vetytankkauksen turvallisuuden varmistaminen*. VTT. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2013/T112.pdf>
- O'hayre, R. Cha, S. W. Colella, W. & Prinz, F. B. (2016). *Fuel cell fundamentals*. John Wiley & Sons.
- Onorati, A. Payri, R. Vaglieco, B. ja muut. (2022). *The role of hydrogen for future internal combustion engines*. International Journal of Engine Research.

<https://doi.org/10.1177/14680874221081947>

OpenCO2Net. (2024). *CO2-termit tutuiksi*. Noudettu 21.2.2024 osoitteesta

<https://www.openco2.net/fi/co2-tietoa>

Pasanen, E. (2015). *EU:N SISÄVESIDIREKTIIVIEN SOVELTAMINEN SUOMESSA*

- *ARVIO VOIMAANSAATTAMISEN KANSALLISISTA VAIKUTUKSISTA*. Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi. <https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/JulkaisuMetatieto/Documents/EDK-2015-AK-6635.pdf>

Pokela, P. Beniard, M. Järvinen, K. & Vaahtera, A. (2022). *Selvitys valtion*

mahdollisuuksista tukea alusliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä.

Liikenne- ja viestintäministeriö. [https://julkaisut.valtioneu-](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164431/LVM_2022_14.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[vosto.fi/bitstream/handle/10024/164431/LVM_2022_14.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164431/LVM_2022_14.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Portin, K. (2022). *Hydrogen – Fuel for thought in our Q&A*. Wärtsilä. Noudettu 28.12.2023 osoitteesta

<https://www.wartsila.com/insights/article/hydrogen-fuel-for-thought-in-our-q-a>

Port of Antwerp-Bruges. (n.d.). *Port of Antwerp-Bruges & CMB.TECH prepare Hydrotug, the first hydrogen-powered tugboat*. Noudettu 9.2.2024 osoitteesta

<https://newsroom.portofantwerpbruges.com/port-of-antwerp-bruges--cmb-tech-prepare-hydrotug-the-first-hydrogen-powered-tugboat>

Prussi, M. Yugo, M. De Prada, L. Padella, M. Edwards, R. & Lonza, L. (2020). *JEC Well-to-Tank report v5*, EUR 30269 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-19926-7, URI: [https://publications.jrc.ec.eu-](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119036)

[ropa.eu/repository/handle/JRC119036](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119036)

Purhonen, I. (2010a). Päivitetty 2019. *Kalusto ja hinaus*. Uitto-opas. Noudettu 23.10.2023 osoitteesta

[https://puuhuolto.fi/uitto-opas/puutavaralautan-hi-](https://puuhuolto.fi/uitto-opas/puutavaralautan-hinaus/kalusto-ja-hinaus/)

[naus/kalusto-ja-hinaus/](https://puuhuolto.fi/uitto-opas/puutavaralautan-hinaus/kalusto-ja-hinaus/)

Purhonen, I. (2010b). Päivitetty 2019 *Sulutukset*. Uitto-opas. Noudettu 24.10.2023 osoitteesta

<https://puuhuolto.fi/uitto-opas/puutavaralautan-hinaus/sulutukset/>

Quantumscape. (n.d.) *Delivering on the promise of solid-state technology*. Noudettu

- 22.1.2024 osoitteesta <https://www.quantumscape.com/technology/>
- Reşitoğlu, İ.A., Altinişik, K. & Keskin, A. *The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems*. *Clean Techn Environ Policy* 17, 15–27 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0793-9>
- Research and Markets. (2023). *Global Marine Battery Market*.
<https://www.researchandmarkets.com/reports/5128989/global-marine-battery-market-by-ship-type#tag-pos-2>
- S&P Global. (n.d). *The Future of Battery Technology*. Noudettu 8.1.2024 osoitteesta <https://www.spglobal.com/esg/s1/topic/the-future-of-battery-technology.html>
- Sachitanand, R. (2021). *LFP or NMC batteries – which solution is better for maritime?*. Echandia. Noudettu 8.2.2024 osoitteesta <https://echandia.se/insights/article/lfp-nmc-batteries/>
- Scania. (2020). Hybrid electric commuter boat launched in Stockholm. Noudettu 9.2.2024 osoitteesta <https://www.scania.com/group/en/home/newsroom/press-releases/press-release-detail-page.html/3591235-hybrid-electric-commuter-boat-launched-in-stockholm>
- Sorlei, I. Bizon, N. Thounthong, P. Raceanu, M. Varlam, M. Carcadea, E. Culcer, M & Iliescu M. (2021). *Fuel Cell Electric Vehicles—A Brief Review of Current Topologies and Energy Management Strategies*. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en14010252>
- Spoof-Tuomi, K. (2023). *An evaluation of renewable fuels’ potential to reduce global and local emissions in non-road and heavy-duty on-road sectors*. Osuva. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-395-098-6>
- SPEL. (n.d). *Lithium-Ion Batteries Overview*. Noudettu 21.1.2024 osoitteesta <https://www.capacitorsite.com/lithium.html>
- Sustainable Ships. (2024a). *Cost Overview – Batteries*. Noudettu 23.1.2024 osoitteesta <https://www.sustainable-ships.org/key-insights/costs-batteries>
- Sustainable Ships. (2024b). *Cost Overview – Hydrogen*. Noudettu 23.1.2024 osoitteesta <https://www.sustainable-ships.org/key-insights/hydrogen-costs>
- Tarhan, C & Çil, M. (2021). *A study on hydrogen, the clean energy of the future: Hydrogen*

storage methods. Journal of Energy Storage.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102676>

Tekniikan maailma. (2023). *Toyota sanoo ratkaisseensa ”yhden kriittisimmistä” kiinteän elektrolyytin akkujen massatuotannon haasteista.* Noudettu 22.1.2024 osoitteesta <https://tekniikanmaailma.fi/toyota-sanoo-ratkaisseensa-yhden-kriittisimmista-kiinteän-elektrolyytin-akkujen-massatuotannon-haasteista/>

Tilastokeskus. (2024). *Polttaineluokitus / Bränsleklassificering / Fuel classification.* Noudettu 5.2.2024 osoitteesta https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttaineluokitus.html

Tronstad, T. Åstrand, H. Haugom, G. & Langfeldt, L. (2017). *STUDY ON THE USE OF FUEL CELLS IN SHIPPING.* European Maritime Safety Agency.
<https://www.dieselduck.info/machine/01%20prime%20movers/2016%20EMSA%20Study%20on%20the%20use%20of%20Fuel%20Cells%20in%20Shipping.pdf>

Valtioneuvosto. (2023a). *Hallituksen esitys EU:n vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuurin käyttöönotosta annetun asetuksen kansallisesta täydentämisestä.* Noudettu 8.2.2024 osoitteesta <https://valtioneuvosto.fi/hanke?tunnus=LVM034:00/2023>

Valtioneuvosto. (2023b). *Pääministeri Petteri Orpon hallituksen ohjelma 20.6.2023.* <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/165042/Paaministeri-Petteri-Orpon-hallituksen-ohjelma-20062023.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Vermeulen, R. Passchinger, P. Demuyne, J. Bosteels, D. (2023). *Real-world NOx emissions of Stage V NRMM.* 25th International Transport and Air Pollution Conference. Noudettu 21.1.2024 osoitteesta <https://www.aecc.eu/wp-content/uploads/2023/09/230925-AECC-TNO-presentation-TAP-Gothenburg-financial.pdf>

Väylävirasto. (2023). *Euroopan laajuinen liikenneverkko TEN-T.* Noudettu 11.12.2023 osoitteesta <https://vayla.fi/vaylista/liikennejarjestelma/tent>

Wang, Y. & Wright, LA. (2021). *A Comparative Review of Alternative Fuels for the*

Maritime Sector: Economic, Technology, and Policy Challenges for Clean Energy Implementation. World. <https://doi.org/10.3390/world2040029>

Wikipedia. (2022). *Wärtsilä-Sulzer RTA96-C*. Noudettu 8.4.2024 osoitteesta

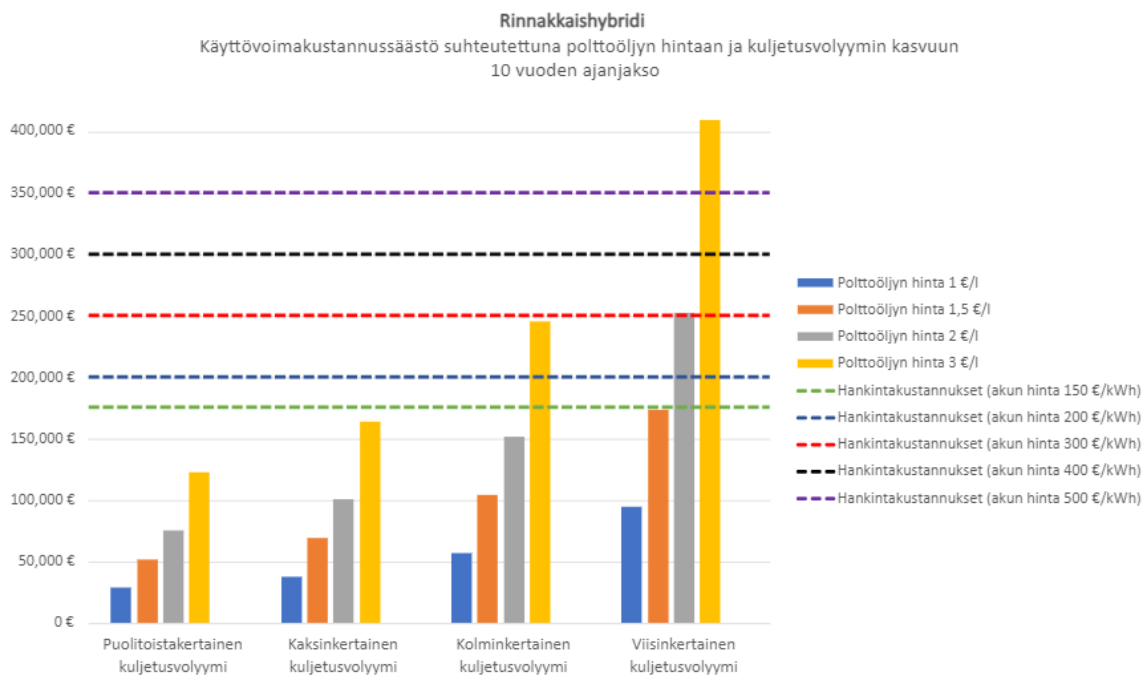
https://fi.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rtsil%C3%A4-Sulzer_RT96-C

Wärtsilä. (2019). *Delivery of first vessel with Wärtsilä HY hybrid technology marks new era in shipping*. Noudettu 11.1.2024 osoitteesta

<https://www.wartsila.com/media/news/05-07-2019-delivery-of-first-vessel-with-wartsila-hy-hybrid-technology-marks-new-era-in-shipping-2486188>

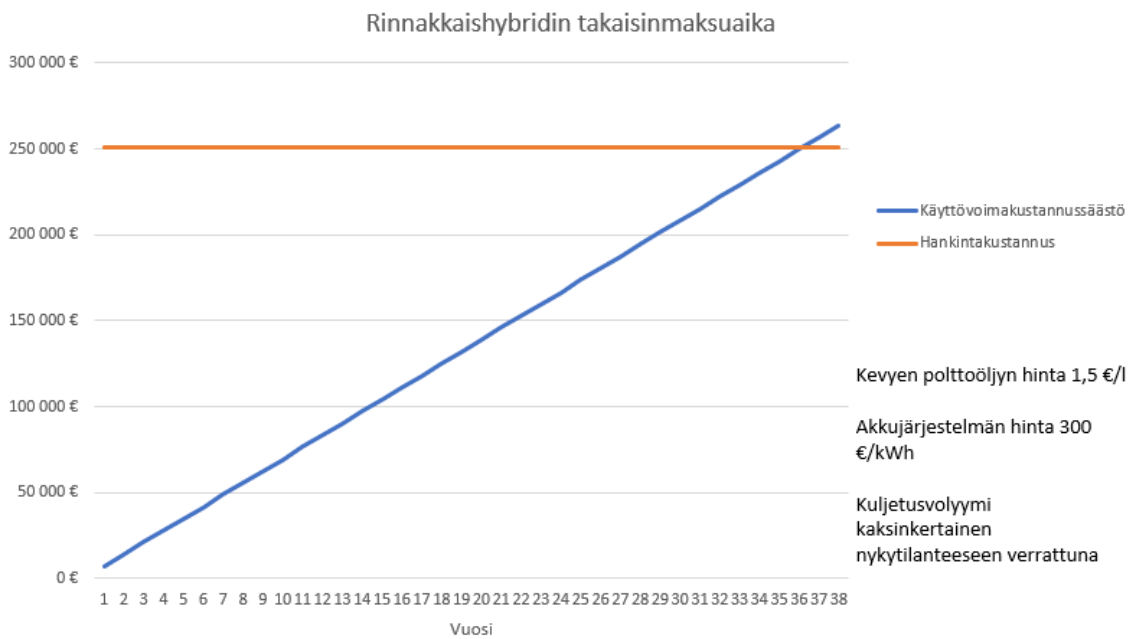
Liitteet

Liite 1. Rinnakkaishybridin käyttövoimakustannussäästöt 10 vuoden aikana eri kuljetusvolyymeilla ja polttoöljyn hinnoilla



Esimerkki liitteen 1 tulkinnasta: mikäli uiton kuljetusvolyymi viisinkertaistuu nykytilanteeseen verrattuna, polttoöljyn litra kohtainen hinta nousee 2 euroon ja akkujen kilowattituntikohtainen hinta putoaa 300 euroon, rinnakkaishybridin hankintakustannukset pysytään kattamaan käyttövoimakustannussäästöillä seuraavan 10 vuoden aikana.

Liite 2. Skenaario 1 rinnakkaishybridin takaisinmaksuajasta



Liite 3. Skenaario 2 rinnakkaishybridin takaisinmaksuajasta

Liite 4. Skenaario 3 rinnakkaishybridin takaisinmaksuajasta