LIITE 2

ETHA



HIILITASELASKELMA PYYKKIMÄEN TUULIVOIMAHANKKEELLE

Etha Oy | Vaasanpuistikko 14 B 11, 65100, Vaasa, Suomi | +358 2900 20440 | etunimi.sukunimi@etha-consultancy.com

SISÄLLYS

1 YHTEENVETO 3
2 TAUSTA 4
3 HANKKEEN TIEDOT 5
4 HIILIJALANJÄLKI 7
4.1 Tuulivoiman hiilijalanjälki 7
4.2 Voimalinja 9
4.3 Tulokset 10
4.4 Mahdollisen energiavaraston vaikutus päästöihin 11
5 HIILIKÄDENJÄLKILASKENNAT 15
5.1 Hiilikädenjäljen laskeminen 16
6 LAAJENNETTU HIILITASE 17
6.1 Maankäytön muutokset 17
6.2 Hiilinielu 17
6.2.1 Tuulivoimaloihin liittyvä puunkaato 17
6.2.2 Verkkoliityntään liittyvä puunkaato 18
6.3 Laajennetun hiilitaseen tulokset 19
7 YHTEENVETO 20
8 LÄHTEET 21

VERSIOHISTORIA

Versio	Tekijä, pvm.	Tarkastaja	Hyväksyjä	Lyhyt kuvaus
Ver 1	Ilona Rämä 2026-04-15	Christian Granlund 2026-04-15	Christian Granlund 2026-04-15	Hiilikädenjälki- ja hiilijalanjälkilaskennat Pyykkimäen tuulivoimahankkeelle.
Rev1	Ilona Rämä 2026-10-02	Christian Granlund 2026-10-02	Christian Granlund 2026-10-02	Puustotietojen päivitys.

Käsitteet

Elinkaariarviointi *(Life cycle assessment, LCA) Menetelmä, jolla voidaan analysoida ja arvioida tuotteen tai palvelun ympäristövaikutukset koko elinkaaren ajalta.*

Hiilidioksidiekvivalentti (Carbon dioxide equivalent, CO2-ekv.) *Hiilijalanjäljen yksikkö. Eri kasvihuonekaasujen ilmastoa lämmittävä vaikutus muunnettuna hiilidioksidin vastaavaksi vaikutukseksi ilmakehässä.*

Hiilijalanjälki *Tuotteen tai palvelun koko elinkaaren aikaiset ilmastovaikutukset hiilidioksidiekvivalentteina ilmoitettuna. Keskiössä välittömät negatiiviset päästövaikutukset.*

Hiilikädenjälki *Tuotteen tai palvelun ilmastohyödyt. Kertoo paljonko käyttäjä voi tuotteella tai palvelulla vähentää päästöjään. Keskiössä tulevat myönteiset päästövaikutukset.*

Hiilivarasto *Maaperään ja kasvillisuuteen yhteyttämisen ohessa sitoutunut hiili.*

Hiilinielu *Maaperän ja kasvillisuuden hiilivaraston vuosittainen kasvu.*

1 YHTEENVETO

Tehtävä:

Laskea Pyykkimäen hankkeen hiilitaselaskennat kahdelle eri sijoittelusuunnitelmalle. Pyykkimäen hankkeen hiilijalanjälki- ja hiilikädenjälkilaskennat ovat osa projektin ympäristövaikutusten arviointimenettelyä.

Työmenetelmät:

Hiilikädenjälki- ja hiilijalanjälkilaskennat perustuvat moniin eri lähteisiin hankkeen elinkaaren aikaisista päästöistä sekä muista energialähteistä aiheutuvista päästöistä. Arvioinnissa on ollut tavoitteena käyttää uusimpia ja luotettavimpia lähteitä.

Hiilijalanjälkilaskennat perustuvat ISO 14044 (Elinkaariarviointi) ja ISO 14067 (Hiilijalanjälki) standardeihin. Hiilikädenjälkilaskennat perustuvat hiilikädenjälkioppaaseen (VTT, 2021).

Tulokset:

Alla olevassa taulukossa on esitetty tuulivoimahankkeen hiilijalanjälki kahdella eri sijoittelusuunnitelmalla ja kolmella sähkönsiirtovaihtoehdolla. Hankkeen elinkaareksi oletetaan 35 vuotta.

Hankkeelle on 3 alustavaa sähköasemavaihtoehtoa, joihin sijoittuisi myös hankkeeseen suunniteltu 200 MWh energiavarasto.

Taulukko 1. Pyykkimäen hankkeen tulokset.

[g CO2-ekv/kWh]	VE1/VEA	VE2/VEA	VE1/VEB	VE2/VEB	VE1/VEC	VE2/VEC
Hiilijalanjälki	6	6	7	7	7	7
Hiilijalanjälki sis. Energiavarasto (uusiutuva/fossiilinen)	10/12	10/14	10/13	11/14	10/13	10/14
Hiilikädenjälki	140	140	139	139	139	139
Laajennettu hiilitase	7	7	9	9	8	8

Tuulivoimarakentaminen tukee vahvasti Suomen ja EU:n ilmastotavoitteita ja vastaa kasvavan kysynnän tarpeisiin suurille kulutuskohteille. Vaikka hankkeeseen liittyy elinkaaripäästöjä, ne ovat selvästi pienemmät kuin vältettävissä olevat päästöt, jolloin hankkeen nettovaikutus ilmastoon on positiivinen.

2 TAUSTA

Euroopan komissio on asettanut tavoitteekseen vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 55 % vuoteen 2030 mennessä, verrattuna vuoden 1990 tasoihin. Tavoitteena on saavuttaa ilmastoneutraalius EU:ssa vuoteen 2050 mennessä (Ympäristöministeriö, 2021). EU:n tavoitteiden lisäksi Suomi on asettanut omat kansalliset päämääränsä, joissa tavoitteena on saavuttaa hiilineutraalius vuoteen 2035 mennessä ja vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 80 %:lla vuoteen 2050 mennessä, verrattuna vuoden 1990 tasoihin (Ympäristöministeriö, 2021).

Uusiutuvalla energialla on kriittinen rooli näiden tavoitteiden saavuttamisessa. Tuulivoimalla tuotettu sähkö vähentää tehokkaasti Suomessa käytetyn energian hiilijalanjälkeä, sillä se on puhtaampi vaihtoehto Manner-Euroopasta ja muualta maailmasta tuotavalle energialle sekä Suomessa tuotettavalle suuripäästöiselle energialle. Suomen uusiutuva energia voi lisäksi tukea muita EU-maita ilmastotavoitteidensa saavuttamisessa, kuten raportissa myöhemmin kerrotaan.

Tuulivoimahankkeiden vaikutusta ilmastonmuutokseen on perinteisesti arvioitu tekemällä hankkeen hiilijalanjäljelle elinkaariarviointi (Life cycle assessment, LCA). Vaikka hiilijalanjälkimenetelmä on yleisesti ottaen perusta ilmastonmuutoksen vaikutuslaskelmissa, tämä menetelmä keskittyy hankkeen kielteisiin vaikutuksiin. Tuulivoimahankkeilla on hiilitaseeseen pieni negatiivinen vaikutus. Vaikutus johtuu pääasiassa voimaloiden valmistusprosessien aikaisista päästöistä, mutta myös kuljetuksista ja pienenevästä hiilinielusta, kun osa hankealueen metsästä kaadetaan.

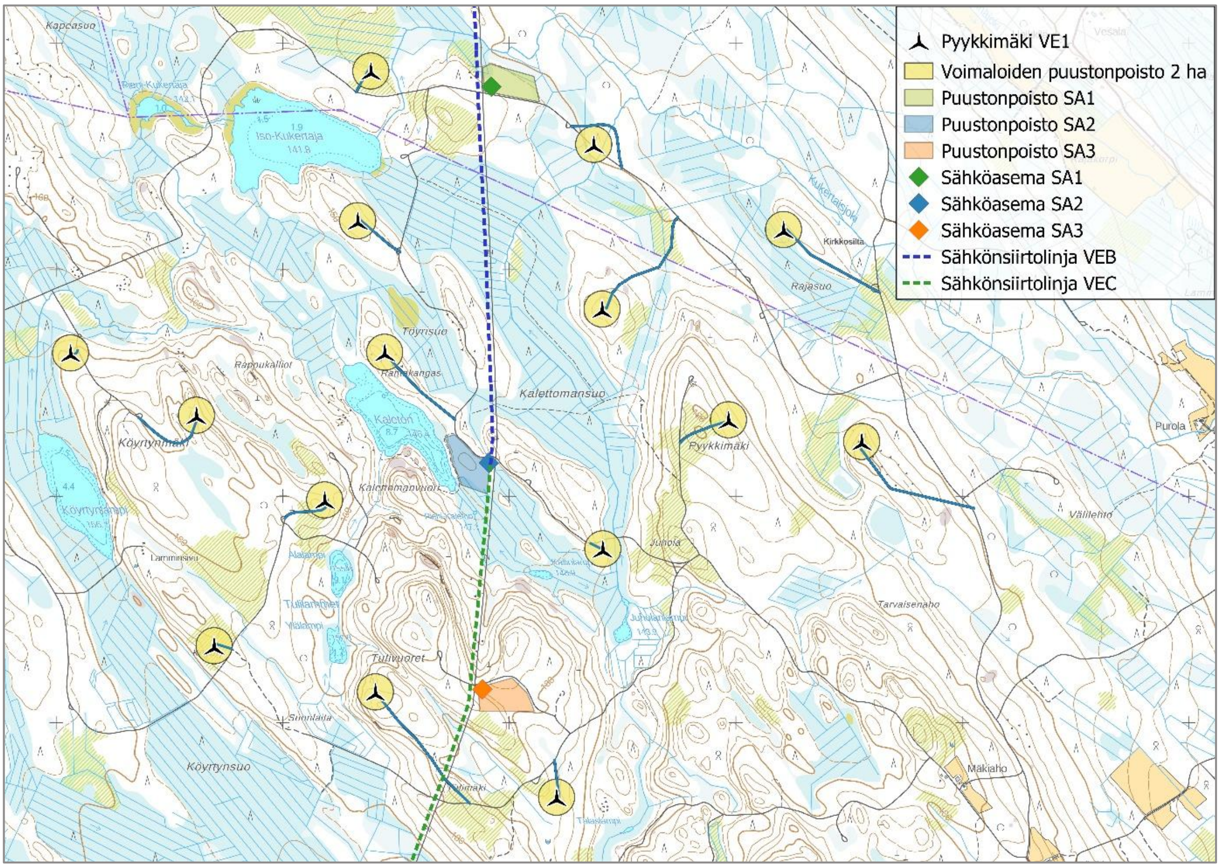
On kuitenkin suotavaa, että ilmastonmuutoksen vaikutusarvioinnissa keskitytään päästöihin, jotka on vältetty, kun on siirrytty uusiutuvaan energiaan. Tämä on tuulivoimahankkeiden hiilijalanjälkeen verrattuna selvästi merkittävämpi vaikutus, ja se voidaan tuoda esille hiilikädenjälkilaskelmien avulla. Fingridin ennusteen mukaan sähkön kulutuksen kehitysnäkymät ovat Suomessa 103–123 TWh vuoteen 2030 mennessä ja 104–159 TWh vuoteen 2035 mennessä. Sähköntuotannon kehitysnäkymät on ennustettu olevan 108–122 TWh vuoteen 2030 ja 120–169 TWh vuoteen 2035 mennessä. Suomen sähkönkulutuksen kasvaessa polttolaitosten sekä muiden suuripäästöisten tuotantomuotojen tilalle tarvitaan vähempipäästöisiä vaihtoehtoja. Maantieteellisten sekä sosiaalisten tekijöiden vuoksi on tärkeää, että aurinko-, vesi- sekä ydinvoiman rinnalla on muitakin puhtaita tuotantomuotoja.

3 Hankkeen tiedot

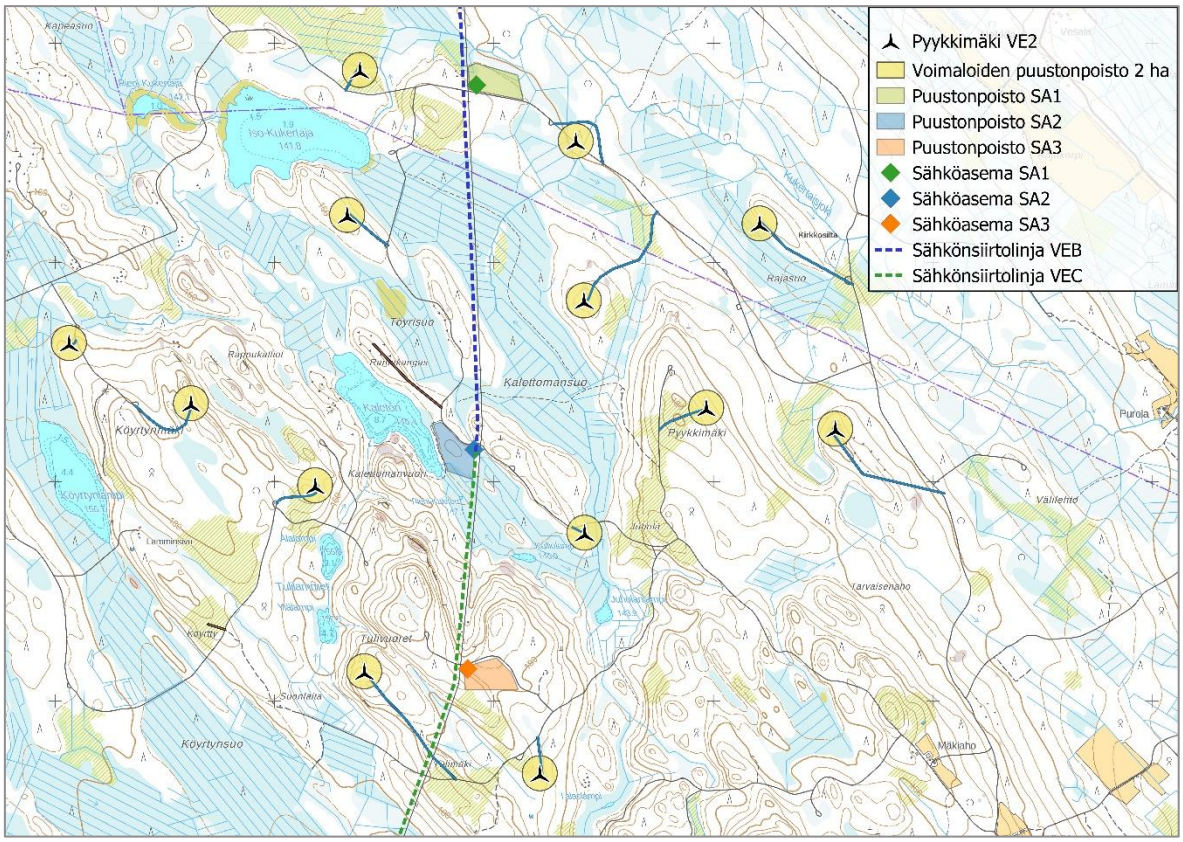
Pyykkimäen hankkeelle on olemassa kaksi eri sijoittelusuunnitelmaa:

- VE1: 16 tuulivoimalaa
- VE2: 13 tuulivoimalaa

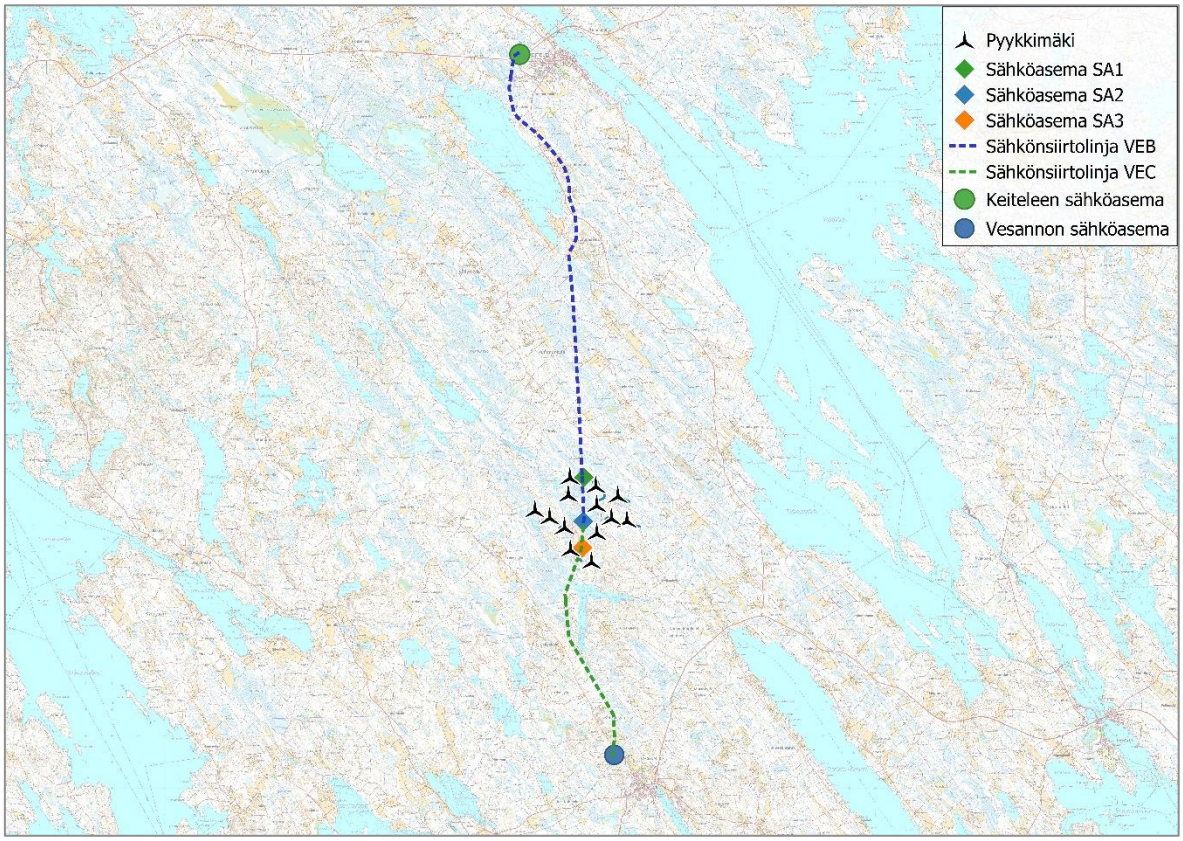
Lisäksi hankealueelle suunnitellaan sijoitettavaksi 200 MWh energiavarasto sähköaseman yhteyteen, jonka kolme eri vaihtoehtoa on esitetty alla olevissa kartoissa. Puisto on suunniteltu liitettävän joko Keiteleen sähköasemalle noin 19 kilometriä pohjoiseen (VEB) tai Vesannon sähköasemalle noin 9,5 kilometriä etelään (VEC) hankealueelta. Kolmas sähkönsiirtosuunnitelma (VEA) on suunniteltu liitettäväksi hankealueella, joten uutta voimajohtoa ei rakenneta tai puustoa kaadeta sen reitin osalta. Sijoittelusuunnitelmat, sähköasemavaihtoehdot ja verkkoliityntäsuunnitelmat on esitetty alla olevissa kuvissa.



Kuva 1. 16 voimalan sijoittelusuunnitelma VE1, uudet tiet, sähköasemavaihtoehdot sekä puustonpoistoalueet.



Kuva 2. 13 voimalan sijoittelusuunnitelma VE2, uudet tiet, sähköasemavaihtoehdot sekä puustonpoistoalueet.



Kuva 3. Sähkönsiirtovaihtoehdot VEB ja VEC.

4 HIILIJALANJÄLKI

Koska hiilikädenjälkilaskelmat perustuvat hiilijalanjälkilaskelmiin, arvioidaan ensin Pyykkimäen hiilijalanjälki.

4.1 TUULIVOIMAN HIILIJALANJÄLKI

Tuulivoimahankkeiden viimeaikaisissa elinkaariarvioinneissa on tyypillisesti arvioitu hiilijalanjäljen olevan noin 6–9 g CO2-ekv/kWh (UBA, 2021 ja Vestas, 2023). Käyttöiän pidentyessä tulevien hankkeiden hiilijalanjälki tulee olemaan hieman pienempi. Suurin osa päästöistä tulee voimaloiden (~70–75 %), perustusten (~15 %) ja kaapeleiden (~5 %) valmistamisesta. Asennuksen (~1 %), käytön (~5 %) ja käytöstä poiston (~1 %) aikaiset päästöt ovat melko pieniä kokonaispäästöihin verrattuna (Vestas, 2023).

Laskennan oletukset perustuvat useisiin eri lähteisiin. Suurin osa laskelmasta perustuu V162 6,2 MW voimalalle tehtyyn elinkaariarviointiin (Vestas, 2023) sekä osittain V150 4,2 MW voimalan elinkaariarviointiin (Vestas, 2022), koska näitä pidettiin luotettavimpina nykyaikaisille voimalatyypeille tehtyinä elinkaariarviointeina.

Voimaloiden elinikä

Raportissa esitetyn tuulivoimalan eliniäksi on oletettu 35 vuotta. Voimalateollisuuden nopean kehityksen vuoksi voimaloiden käyttöikä kasvaa jatkuvasti, ja uusimpien voimaloiden käyttöiäksi arvioidaan tällä hetkellä 35 vuotta, jonka pohjalta hankkeen päästöt on myös arvioitu.

Voimaloiden materiaalit

Tässä raportissa oletetaan, että kaikki tuotantojärjestelmään tulevat materiaalit ovat peräisin primäärimateriaaleista. Raudan, teräksen, alumiinin ja kuparin osalta kierrätetyn materiaalin osuudet on otettu huomioon laskennallisesti ja mukautettu siten, että niiden arvo edustaa tämänhetkistä realistista tilannetta voimaloiden tuotantoteollisuudessa (EMF, 2015). Kierrätetyn materiaalin osuudeksi saatiin noin 25 % turbiinin kokonaispainosta.

Voimaloiden kierrätys

Raportissa oletetaan, että eliniän päätyttyä koko voimala puretaan. Suuret metallikokonaisuudet oletetaan kierrätettävän 98 prosenttisesti. Muut pääkomponentit kuten generaattori, vaihdelaatikko, kaapelit ja säätöjärjestelmä kierrätetään 95 % oletuksella.

Kuljetukset

Voimaloiden tavarantoimittajille tuleviin raaka-aineisiin liittyvien kuljetusten oletetaan olevan 600 kilometriä kuorma-autolla, lukuun ottamatta betonimateriaaleja, joiden osalta oletetaan 50 kilometriä. Tämä kattaa

kuljetukset raaka-aineiden valmistajilta voimaloiden toimittajille sekä betonimateriaalien kuljetuksen rakennuspaikalle.

Voimaloiden tuotantolaitoksille tuleviin suuriin komponentteihin liittyvät kuljetukset oletetaan olevan 600 kilometriä kuorma-autolla. Tämä vastaa 90 prosenttia turbiinin massasta (lukuun ottamatta perustuksia) ja kattaa komponenttien kuljetuksen toimittajalta tuulivoimalatehtaille.

Kuljetukset, jotka liittyvät tuulivoimalan komponenttien siirtämiseen voimalavalmistajan tehtailta rakennuspaikalle on laskettu käyttäen seuraavia oletuksia:

Taulukko 2. Voimaloiden komponenttien kuljetusetäisyydet voimalavalmistajan tehtaalta rakennuspaikalle.

Komponentti	Kuorma-auto [km]	Laiva [km]
Naselli	600	9000
Napa	600	8600
Lavat	1450	5100
Torni	425	0
Perustus	50	0
Muut osat	600	0

Huom. Kuljetusetäisyydet perustuvat eurooppalaisen hankkeen sijaintiin ja toimitusketjun etäisyydet perustuvat Vestaksen keskimääräiseen myyntiin vuodelta 2021.

Voimalan kokonaispainona on käytetty 827 tonnia per voimala (Vestas, 2023). Yhden voimalan kuljettamiseen tarvitaan keskimäärin 7–10 kuorma-autoa lapojen, tornin osien sekä navan kuljettamiseen (Utility Dive, 2022). Voimalan oletetaan olevan nykyaikaisista voimaloista suurimpia, joten käyttämällä 10 kuorma-autoa per tuulivoimala 13 voimalan kuljettamiseen tarvitaan noin 130 kuorma-autoa.

Taulukko 3. Kuljetusten aiheuttamat päästöt tuulipuistolle.

Kuljetus	Matka [km]	Päästökerroin [kg CO2/tkm]	Kokonaispäästöt [t CO2-ekv]
Laiva	22 700	0,063[1]	15 375
Kuorma-auto	3 725 km * 130	0,117[2]	4 685
Yhteensä			20 060

[1] CO2data, 2024. Merikuljetus, konttilaiva.

[2] CO2data, 2024. Jakelukuorma-auto.

Taulukko 4. Laskennassa käytetyt oletukset

Oletus	VE1	VE2
Tuulivoimapuiston elinikä	35 vuotta	35 vuotta
Voimalamäärä	16	13
Voimalan kokonaiskorkeus	300 m	300 m
Roottorin halkaisija	200 m	200 m
Tornin korkeus	200 m	200 m
Tuotanto per voimala	30 500 MWh/vuosi	30 500 MWh/vuosi

Taulukko 5. Tuulivoimaloiden päästöt

	VE1		VE2	
Lähde	%-osuudet	t-CO2	%-osuudet	t-CO2
Turbiini*	53,4 %	58 779	53,2 %	47 758
Perustus*	11,7 %	12 883	11,7 %	10 467
Kaapelointi*	1,2 %	1 332	1,5 %	1 332
Sähköasema*	1,5 %	1 610	1,5 %	1 308
Kuljetus ja tiet	26,4 %	29 057	26,3 %	23 609
Toiminta	5,1 %	5 636	5,1 %	4 579
Käytöstä poisto	0,7 %	805	0,7 %	654
Yhteensä	**100 %**	110 102	**100 %**	89 708

**Mukaan luettuna asennuksen aikaiset päästöt*

4.2 VOIMALINJA

Pyykkimäen hankkeen liitynnälle on kolme eri vaihtoehtoa: liittyminen johdonvarteen hankealueella (VEA), pohjoiseen Keiteleen sähköasemalle 19 kilometrin päähän nykyisen 110 kV voimajohdon johtokäytävää pitkin (VEB) sekä etelään Vesannon sähköasemalle 9,5 kilometrin päähän nykyisen 110 kV voimajohdon johtokäytävää pitkin (VEC). Kaksi jälkimmäistä vaihtoehtoa toteutettaisiin ilmajohtona, ja tultaisiin rakentamaan 110 kV voimajohdon rinnalle, jolloin johtokäytävän leventämistarpeeksi oletetaan 30 metriä. Voimajohtorakentamiselle sopiva käytävä on paikoittain kapea, minkä vuoksi pieniä johto-osuuksia voidaan joutua rakentamaan maakaapelointina. Tässä raportissa oletuksena kuitenkin on, että koko liityntäjohto on rakennettu ilmajohtona. Arvio kuvastaa reitillä olemassa olevien johtokäytävien leventämistarvetta, kun Pyykkimäen sähkönsiirtolinja rakennetaan olemassa olevan johtokäytävän rinnalle.

Voimalinjavaihtoehdot on eritelty alla olevassa taulukossa. Vaihtoehdossa VEA ei ole tarpeen rakentaa uutta linjaa tai johtokäytävää, joten sen päästöt oletetaan sisältyvän sähköaseman päästöihin. Voimalinjojen käytöstä poistamisen päästöjä ei ole huomioitu, sillä voimalinjaa käytetään myös sen jälkeen, kun puisto on otettu pois käytöstä. 110 kV liityntäjohdon materiaaleihin liittyvät päästöt perustuvat 275 kV johtojen arvoihin, sillä oletuksella, että arvot 110 kV ja 275 kV tarvikkeiden välillä ovat samaa suuruusluokkaa

(Harrison, GP, Maclean, EJ, Karamanlis, S & Ochoa, LF 2010). Lisäksi 33 kV kaapeleiden päästöt on laskettu käyttäen 41,8 t CO_2-ekv/km/kaapeli.

Taulukko 6. Voimalinjavaihtoehtojen päästöt

	VEA	VEB	VEC
Voimalinjan pituus	0 km	19 km	9,5 km
Voimalinjan leveys	0 m	30 m	30 m
	Päästöt [t-CO2 ekv]	**Päästöt [t-CO2 ekv]**	**Päästöt [t-CO2 ekv]**
Materiaalit ja rakentaminen	0	9 937	4 968

4.3 TULOKSET

Hiilijalanjälkilaskennan tulokset on esitelty tässä luvussa. Eri osien vaikutus kokonaishiilijalanjälkeen sekä lopulliset tulokset on esitelty alla olevissa taulukoissa. Hankkeen arvioitu kokonaishiilijalanjälki eri sijoittelusuunnitelmille ja voimalinjavaihtoehtoille on 6–7 g CO2-ekv/kWh, kun kierrätyshyvitykset on huomioitu laskennassa. Hiilinielun menetys on laskettu hankealueen keskimmäisellä sähköasemavaihtoehdolla SA2.

Taulukko 7. Hiilidioksidipäästöjen yhteenveto VEA sähkönsiirtovaihtoehdolle Pyykkimäen elinkaaren aikana.

	VE1	VE2
Tuulipuiston päästöt [t-CO2 ekv]	110 102	89 708
Voimalinjan päästöt [t-CO2 ekv]	0	0
Päästöt yhteensä [t-CO2 ekv]	110 102	89 708
Tuotanto yhteensä [GWh]	17 080	13 878
Hiilijalanjälki yhteensä [g CO2-ekv/kWh]	**6**	**6**

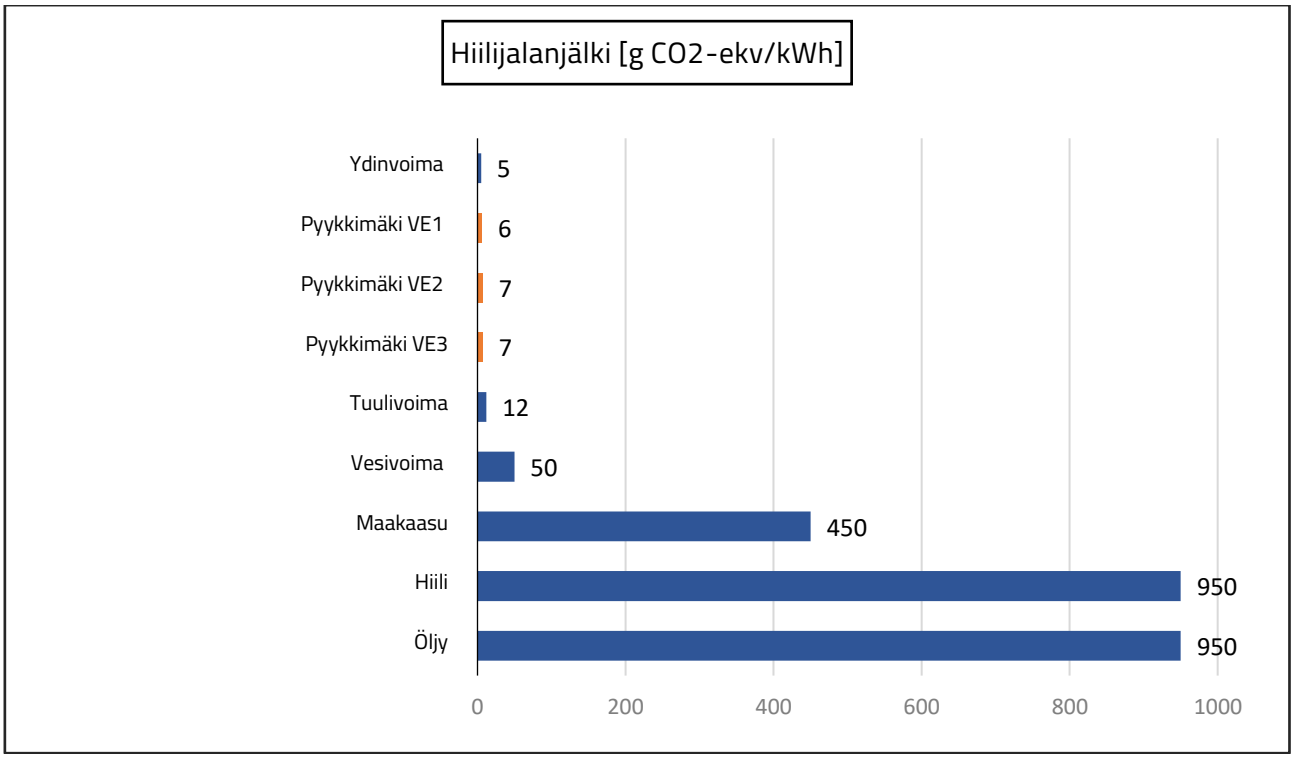
Taulukko 8. Hiilidioksidipäästöjen yhteenveto VEB sähkönsiirtovaihtoehdolle Pyykkimäen elinkaaren aikana.

	VE1	VE2
Tuulipuiston päästöt [t-CO2 ekv]	110 102	89 708
Voimalinjan päästöt [t-CO2 ekv]	9 937	9 937
Päästöt yhteensä [t-CO2 ekv]	120 038	99 644
Tuotanto yhteensä [GWh]	17 080	13 878
Hiilijalanjälki yhteensä [g CO2-ekv/kWh]	**7**	**7**

Taulukko 9. Hiilidioksidipäästöjen yhteenveto VEC sähkönsiirtovaihtoehdolle Pyykkimäen elinkaaren aikana.

	VE1	VE2
Tuulipuiston päästöt [t-CO2 ekv]	110 102	89 708
Voimalinjan päästöt [t-CO2 ekv]	4 968	4 968
Päästöt yhteensä [t-CO2 ekv]	115 070	94 676
Tuotanto yhteensä [GWh]	17 080	13 878
Hiilijalanjälki yhteensä [g CO2-ekv/kWh]	**7**	**7**

Alla olevassa kaaviossa on verrattu Pyykkimäen hankkeen päästöjä muiden energiantuotantomuotojen tyypillisiin päästöihin. Tietolähteet ovat UNECE (2021) ja Fingrid (2023). Vaihtoehdot on esitetty VEB ja SA2 suunnitelmille.



Kuva 4. Sähköntuotannon päästöjen vertailu

4.4 MAHDOLLISEN ENERGIAVARASTON VAIKUTUS PÄÄSTÖIHIN

Tuulipuiston yhteydessä arvioidaan mahdollisuutta sijoittaa alueelle energiavarasto. Energiavaraston hiilijalanjälki koostuu suurimmilta osin laitteistojen valmistukseen liittyvistä päästöistä, kuten akkumateriaalien louhinnasta ja jalostuksesta, laitteistojen kokoonpanosta sekä ikääntyneen akuston vaihdosta. Pienempi osa päästöistä koostuu käytön aikaisista päästöistä, jotka johtuvat energiavaraston lataussyklin häviöistä. Energiavarastolaitteistojen valmistus sisältää energiaintensiivisiä prosesseja, minkä takia valmistuksessa käytetyn sähkön päästöt vaikuttavat voimakkaasti energiavaraston hiilijalanjälkeen.

Ruotsalaisen selvityksen (Emilsson E., Dahllöf L. 2019) mukaan energiavaraston valmistuksen kokonaispäästöt ovat 59–119 kg CO2-ekv yhtä varaston kapasiteetin kilowattituntia kohden. Skaalan alalaita vastaa puhtaasti uusiutuvilla energianlähteillä valmistettua energiavarastoa ja ylälaita varastoa, joka on valmistettu runsaasti fossiilisia energianlähteitä sisältävällä sähköntuotannolla. Tällöin valmistuksesta aiheutuvat päästöt olisivat noin 23 600–47 600 t CO2-ekv.

Akusto vaihdetaan kerran projektin 35 vuoden elinkaaren aikana ja oletuksena on, että vaihdosta aiheutuvat päästöt ovat 80 % koko laitteiston valmistuksen päästöistä. Tällöin vaihdon aiheuttamat päästöt olisivat noin 18 880–38 080 t CO2-ekv.

Mikäli oletetaan, että 50 % lataussyklejä tehdään vuodessa 1 300 kappaletta, energiavaraston hyötysuhteeksi 95 % ja, että akustoa ladataan pääasiassa hankkeen omalla tuotannolla, olisi 200 MWh varaston käytön aiheuttamat päästöt yhteensä noin 10 579 t CO2-ekv.

Tällä hetkellä Kiina vastaa noin 80 % globaalista akkuvalmistuskapasiteetista, jonka vuoksi myös Pyykkimäen hankkeen energiavaraston oletetaan tulevan Kiinasta (S&P 2024). Energiavaraston kuljetuksen aiheuttamia päästöjä on arvioitu Kiinassa valmistetulla SunGrow energiavarastolla, jonka painoksi on ilmoitettu 9 455 kg per MWh. Reitin on oletettu kulkevan rahtilaivalla Shanghaista Helsinkiin. Lisäksi lähimmältä SunGrown paneelitehtaalta Hefeistä Shanghain satamaan on noin 475 kilometrin matka kuorma-autolla ja Helsingistä Kinnulaan on maanteitse noin 430 kilometriä. Matkat on huomioitu molempiin suuntiin ja kuorma-auton päästökertoimessa otetaan huomioon, että kuorma-autot kulkevat tyhjänä takaisin. Noin 16 metriä pitkään kuorma-autoon oletetaan mahtuvan 4 energiavaraston moduulia, kun niiden dimensiot ovat 1,2 x 1,1 x 2,2 metriä, jolloin kuorma-autoja arvioidaan tarvittavan 77 kappaletta per suunta. Kuljetuksen aiheuttamat kokonaispäästöt sekä etäisyydet on eritelty alla olevassa taulukossa.

Taulukko 10. Kuljetusten aiheuttamat päästöt energiavarastolle.

Kuljetus	Matka (km)	Päästökerroin [kg CO2/tkm]	Kokonaispäästöt [t CO2-ekv]
Laiva	24 700	0,045[1]	2 102
Kuorma-auto	1 810 km * 77	0,117[2]	374
Yhteensä			**2 475**

[1] CO2data, 2024. Merikuljetus, konttilaiva.

[2] CO2data, 2024. Jakelukuorma-auto, 15 t.

Tällöin Pyykkimäen hankkeen 200 MWh energiavaraston kokonaispäästöt olisivat seuraavat:

Taulukko 11. Energiavaraston hiilidioksidipäästöjen yhteenveto.

Päästölähde	Uusiutuvalla energialla valmistettu energiavarasto [t CO2-ekv]	Pääosin fossiilisella energialla valmistettu energiavarasto [t CO2-ekv]
Valmistus	23 600	47 600
Akuston vaihto	18 880	38 080
Käyttö	10 579	10 579
Kuljetus	2 475	2 475
Yhteensä	55 534	98 734

Taulukko 12. Hiilidioksidipäästöjen yhteenveto VEA sähkönsiirtovaihtoehdolle Pyykkimäen elinkaaren aikana.

	VE1	VE2
Tuulipuiston päästöt [t-CO2 ekv]	110 102	89 708
Voimalinjan päästöt [t-CO2 ekv]	0	0
Päästöt yhteensä [t-CO2 ekv]	110 102	89 708
Tuotanto yhteensä [GWh]	17 080	13 878
Hiilijalanjälki yhteensä [g CO2-ekv/kWh]	**6**	**6**
Energiavaraston päästöt (tuotettu fossiilisilla) [t-CO2 ekv]	98 734	98 734
Hiilijalanjälki yhteensä energiavaraston kanssa (tuotettu fossiilisilla) [g CO2-ekv/kWh]	**12**	**14**
Energiavaraston päästöt (tuotettu uusiutuvilla) [t-CO2 ekv]	55 534	55 534
Hiilijalanjälki yhteensä energiavaraston kanssa (tuotettu uusiutuvilla) [g CO2-ekv/kWh]	**10**	**10**

Taulukko 13. Hiilidioksidipäästöjen yhteenveto VEB sähkönsiirtovaihtoehdolle Pyykkimäen elinkaaren aikana.

	VE1	VE2
Tuulipuiston päästöt [t-CO2 ekv]	110 102	89 708
Voimalinjan päästöt [t-CO2 ekv]	9 937	9 937
Päästöt yhteensä [t-CO2 ekv]	120 038	99 644
Tuotanto yhteensä [GWh]	17 080	13 878
Hiilijalanjälki yhteensä [g CO2-ekv/kWh]	**7**	**7**
Energiavaraston päästöt (tuotettu fossiilisilla) [t-CO2 ekv]	98 734	98 734
Hiilijalanjälki yhteensä energiavaraston kanssa (tuotettu fossiilisilla) [g CO2-ekv/kWh]	**13**	**14**
Energiavaraston päästöt (tuotettu uusiutuvilla) [t-CO2 ekv]	55 534	55 534
Hiilijalanjälki yhteensä energiavaraston kanssa (tuotettu uusiutuvilla) [g CO2-ekv/kWh]	**10**	**11**

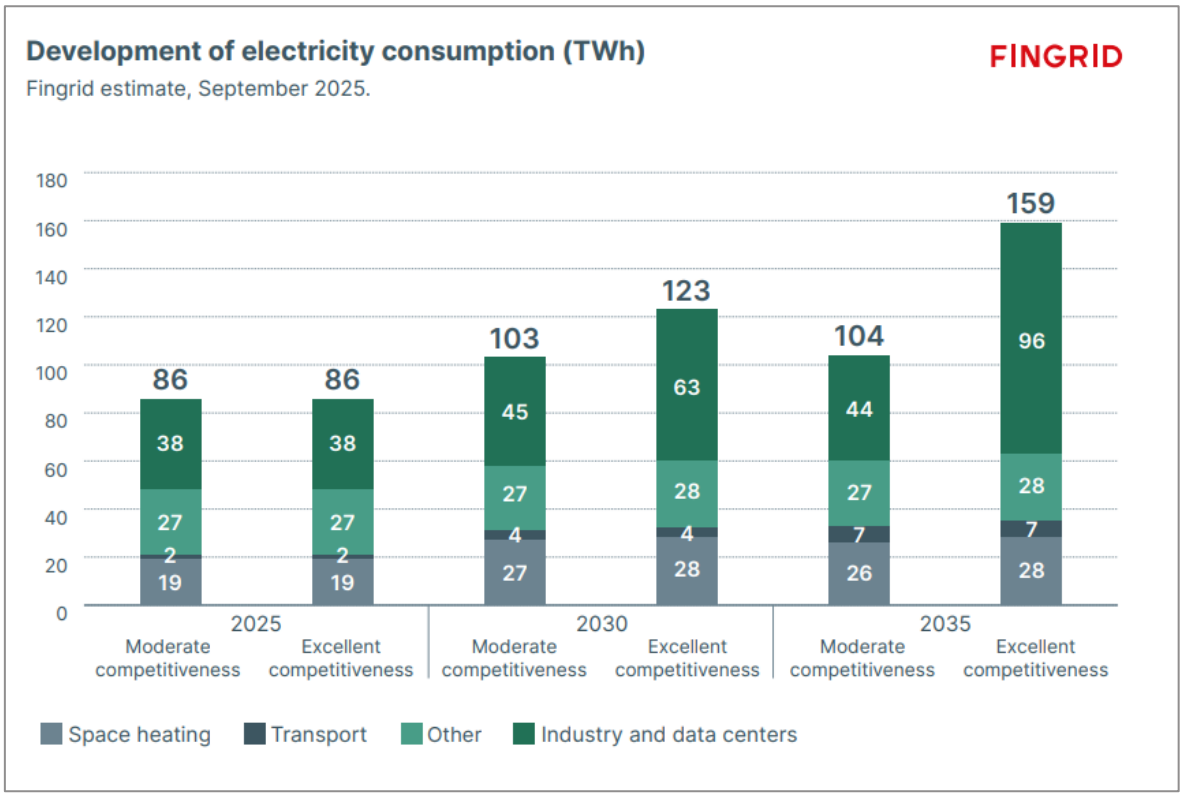
Taulukko 14. Hiilidioksidipäästöjen yhteenveto VEC sähkönsiirtovaihtoehdolle Pyykkimäen elinkaaren aikana.

	VE1	VE2
Tuulipuiston päästöt [t-CO2 ekv]	110 102	89 708
Voimalinjan päästöt [t-CO2 ekv]	4 968	4 968
Päästöt yhteensä [t-CO2 ekv]	115 070	94 676
Tuotanto yhteensä [GWh]	17 080	13 878
Hiilijalanjälki yhteensä [g CO2-ekv/kWh]	**7**	**7**
Energiavaraston päästöt (tuotettu fossiilisilla) [t-CO2 ekv]	98 734	98 734
Hiilijalanjälki yhteensä energiavaraston kanssa (tuotettu fossiilisilla) [g CO2-ekv/kWh]	**13**	**14**
Energiavaraston päästöt (tuotettu uusiutuvilla) [t-CO2 ekv]	55 534	55 534
Hiilijalanjälki yhteensä energiavaraston kanssa (tuotettu uusiutuvilla) [g CO2-ekv/kWh]	**10**	**10**

5 HIILIKÄDENJÄLKILASKENNAT

Tässä luvussa arvioidaan Pyykkimäen hankkeen hiilikädenjälki. Luku 5.1 noudattaa VTT:n hiilikädenjälkioppaassa (VTT, 2021) hahmoteltuja vaiheita. Hiilikädenjäljen periaatteena on arvioida, kuinka paljon asiakas voi tietyn tuotteen avulla pienentää hiilijalanjälkeään. Keskeinen kysymys on, mitä energiantuotantomuotoa tuulivoimahankkeilla sähkön tuottamiseksi korvataan ja mikä vaikutus tällä on hiilidioksidipäästöihin. Skenaariota on analysoitu luvussa 5.1.

Tuulivoimaloiden tuotanto Suomessa korvaa olemassa olevaa suomalaista tuotantoa sekä tuontisähköä ja lisää uusiutuvaa vientisähköä. Sähkönkulutuksen päästöjä vertaillessa on tärkeää huomioida nykyisen sähkönkulutuksen lisäksi myös kulutuksen kehittyminen tulevaisuudessa, jolloin energianlähteitä tarvitaan myös lisää kasvun suhteessa. Uusiutuvan energiatuotannon kapasiteetin lisääminen tuottaa välillisesti myös muita positiivisia hyötyjä lisäämällä Suomen houkuttelevuutta esimerkiksi datakeskusinvestointien näkökulmasta. Myös vihreän vedyn tuotantoteollisuus voi tulevaisuudessa olla yksi suuri vihreän energian käyttäjä. Erityisesti teollisuuden kulutuksen odotetaan lisääntyvän tulevaisuudessa (Fingrid, 2024). Lisäksi EIA arvioi, että OECD-maissa sähkö tulee kattamaan yli puolet kotitalouksien energian kulutuksesta vuoteen 2050 mennessä, kun vastaavasti vuonna 2020 osuus oli 33 prosenttia (EIA, 2023).



Kuva 5. Sähkön kulutuksen kehittyminen Suomessa 2025–2035, Fingrid ennuste Q3/2025 (Fingrid, 2025).

Suomen pienempi tuontitarve ja suurempi vienti on yksi tekijä, joka auttaa pienentämään Euroopan energialähteiden yhdistelmän hiilijalanjälkeä, sillä Suomi on osa Euroopan yhteisiä sähkömarkkinoita, joilla

sähköä kaupataan Pohjoismaiden välillä sekä myös Pohjoismaista muualle Eurooppaan. Yhteistä sähkömarkkinajärjestelmää ajatellen Euroopan mittakaavassa korvatut energialähteet ovat pääasiassa hiili, maakaasu, ydinvoima sekä uusiutuvat energianlähteet.

5.1 HIILIKÄDENJÄLJEN LASKEMINEN

Tuulipuiston tuotannolla korvattu sähköntuotanto koostuu uusiutuvan energian ja uusiutumattoman energian yhdistelmästä. Niiden osuudet ja päästöt Euroopassa vuonna 2025 olivat seuraavat (Ember, 2026):

Ydinvoima	24 % osuus	6 g CO2-ekv/kWh
Maakaasu	8 % osuus	450 g CO2-ekv/kWh
Hiili	9 % osuus	950 g CO2-ekv/kWh
Aurinkovoima	13 % osuus	50 g CO2-ekv/kWh
Vesivoima	12 % osuus	24 g CO2-ekv/kWh
Tuulivoima	17 % osuus	12 g CO2-ekv/kWh
Biovoima	5 % osuus	240 g CO2-ekv/kWh

Tuloksena on painotettu keskiarvo 146 g CO2-ekv/kWh.

Hiilikädenjäljen laskennassa käytetään hankkeen hiilijalanjälkeä sekä painotettua keskiarvoa sähkömarkkinan eri energiantuotantomuotojen päästöistä. Hiilijalanjälkeä arvioidaan 35 vuoden ajalta.

Hiilikädenjälki Pyykkimäen hankkeen sijoittelusuunnitelmalle VEB sähkönsiirrolla on:

- VE1: 146-7 = 139 g CO2-ekv/kWh
- VE2: 146-7 = 139 g CO2-ekv/kWh

Suomen sähköntuotannon päästökertoimen arvioidaan olevan 28 g CO2/kWh viimeisen vuoden ajalta. Mikäli Pyykkimäen hanketta verrataan Suomen sähköntuotannon päästökertoimeen, saadaan hiilikädenjäljeksi seuraavaa:

- VE1: 28-7 = 21 g CO2-ekv/kWh
- VE2: 28-7 = 21 g CO2-ekv/kWh

Kotimaisen sähköntuotannon päästökertoimina on käytetty tuotantomuotokohtaisia keskiarvopäästöjä, jossa vesi-, ydin-, tuuli- ja aurinkovoima on määritelty päästöttömiksi, joka selittää pienen hiilikädenjäljen. Toisin sanoen Fingridin julkaisema kotimainen sähköntuotannon päästökerroin ei huomioi projektista syntyviä päästöjä, infrastruktuurin elinkaaren aikaisia päästöjä tai muita ympäristövaikutuksia vaan ainoastaan tuotantoon liittyvän polttoaineen sisältämän hiilipäästön, joka on uusiutuville nolla.

6 LAAJENNETTU HIILITASE

Laajennettu hiilitase ottaa huomioon myös hankkeen puunpoiston aiheuttaman hiilijalanjäljen sekä hankkeen maankäytön muutosten aiheuttamat potentiaaliset päästöt.

6.1 MAANKÄYTÖN MUUTOKSET

Tuulivoimahankkeen voimalapaikkojen ja niihin liittyvien nostokenttien osalta maaperän oletetaan olevan kivennäismaata metsätalouskäytössä olevalla alueella. Muutos sorapintaisiksi alueiksi vaikuttaa maaperän suoriin kasvihuonekaasupäästöihin vain vähäisessä määrin, sillä kivennäismaiden hiilitase metsissä on tyypillisesti lähellä tasapainoa. Rakentamisen jälkeen maaperän biologinen aktiivisuus on käytännössä hyvin vähäistä, jolloin maaperän nettokasvihuonekaasupäästöt ovat lähellä nollaa.

Maankäytön muutoksesta aiheutuva keskeinen ilmastovaikutus ei siten liity maaperän päästöihin, vaan puustobiomassan poistumiseen sekä tulevan hiilinielun menetykseen. Laskelmassa oletetaan, että maankäytön muutos astuu voimaan heti rakentamisvaiheen päätyttyä.

6.2 HIILINIELU

Tuulipuiston rakentaminen edellyttää metsän kaatamista, millä on kielteinen vaikutus hiilitaseeseen ja se tulisi sisällyttää hiilijalanjälki- sekä hiilikädenjälkilaskelmiin. Metsää kaadetaan 110 kV:n sähkölinjan johtokäytävän leventämiseksi, uusien metsäteiden sekä voimaloiden luona tapahtuvan rakentamisen vuoksi. Myös sähköasemavaihtoehtojen sekä energiavarastovaihtoehtojen puunpoistoalueet on laskettu kaikille vaihtoehdoille erikseen.

Arvioinnissa oletetaan, että hiilidioksidia vapautuu takaisin ilmakehään sama määrä, kuin mitä metsää kaadetaan. Arvioinnissa ei täten oteta huomioon kaadettavan puuston mahdollista hyötykäyttöä. Tämä tarkoittaa, että laskentaan sisältyy metsäkaadon vuoksi menetetyn hiilivaraston vaikutus sekä menetetty hiilinielu, kun metsää ei kasva seuraavan 35 vuoden ajan. Niille alueille, joilla metsää on jo kaadettu, päästöt on laskettu perustuen menetettyyn metsänkasvuun. Alueella metsähakkuiden vuoksi menetetyn biomassan kokonaistilavuuden arvioimiseksi on käytetty Metsäkeskuksen Hila-aineistoa paikkatietoaineiston avulla (Metsäkeskus, 2026). Kuutiometri biomassaa sitoo arviolta 780 kg CO2-ekv (Nordiska ministerrådet, 2017; VTT, 2013).

6.2.1 TUULIVOIMALOIHIN LIITTYVÄ PUUNKAATO

Yhden voimalan tarvitsema puuton alue on arviolta 2 ha. Voimala-alueiden lisäksi myös voimaloille johtavat tiet on otettu laskelmissa mukaan. Uusien teiden sekä ojien on arvioitu olevan yhteensä 8 m leveät.

Taulukko 15. Tuulivoimaloihin liittyvä puunkaato

Oletus	VE1	VE2
Käyttöikä	35 vuotta	35 vuotta
Voimalat	16	13
Uudet tiet	4 891 m	4 177 m
Poistuva kuutiomäärä	5 920 m^3	5 240 m^3
Hiilivaraston menetys, poistuvan biomassan aiheuttama	4 620 t CO2-ekv	4 090 t CO2-ekv
Hiilinielun menetys, tulevan kasvun poistuman aiheuttama	6 550 t CO2-ekv	5 320 t CO2-ekv
Hiilivaraston ja -nielun menetys, 35 v	**11 170 t CO2-ekv**	**9 410 t CO2-ekv**

6.2.2 VERKKOLIITYNTÄÄN LIITTYVÄ PUUNKAATO

VEB vaihtoehdon 110 kV liityntäjohdon pituus Keiteleen sähköasemalle on 19 kilometriä ja VEC vaihtoehdon pituus Vesannon sähköasemalle on 9,5 kilometriä. Johtokäytävää levennetään 30 metriä nykyisen 110 kV linjan rinnalle, jolta puut poistetaan. VEA vaihtoehdossa ei rakenneta uutta voimajohtoa ja näin ollen kaadeta puustoa johtokäytävältä, joten VEA koostuu ainoastaan sähköaseman aiheuttamista puustonpoiston päästöistä. Hankealueelle on sisällytetty myös yhteensä 200 MWh energiavarasto, jonka puustonpoistoalueeksi on arvioitu alustavasti 2,7 hehtaaria sisältäen suojavyöhykkeen energiavaraston rakentamisalueeseen sekä tilan sähköasemalle. Energiavarasto sijoitetaan sähköaseman yhteyteen ja molemmille on alustavasti 3 eri vaihtoehtoa.

Taulukko 16. Verkkoliityntään liittyvä puunkaato

Oletus	VEA	VEB	VEC
Käyttöikä	35 vuotta	35 vuotta	35 vuotta
Liitynnän pituus	0 km	19 km	9,5 km
Johtokäytävän levennys	0 m	30 m	30 m
Kaadettava metsä	0 ha	48 ha	25 ha
Poistuva kuutiomäärä	0 m^3	4 130 m^3	1 880 m^3
Hiilivaraston menetys, poistuvan biomassan aiheuttama	0 t CO2-ekv	3 220 t CO2-ekv	1 460 t CO2-ekv
Hiilinielun menetys, tulevan kasvun poistuman aiheuttama	0 t CO2-ekv	10 110 t CO2-ekv	5 600 t CO2-ekv
Hiilivaraston ja -nielun menetys, 35 v	**0 t CO2-ekv**	**13 340 t CO2-ekv**	**7 070 t CO2-ekv**

Taulukko 17. Energiavarastoon ja sähköasemaan liittyvä puunkaato

Oletus	SA1	SA2	SA3
Käyttöikä	35 vuotta	35 vuotta	35 vuotta
Puustonpoiston pinta-ala	2,7 ha	2,7 ha	2,7 ha
Poistuva kuutiomäärä	380 m^3	570 m^3	350 m^3
Hiilivaraston menetys, poistuvan biomassan aiheuttama	300 t CO2-ekv	440 t CO2-ekv	270 t CO2-ekv

Hiilinielun menetys, tulevan kasvun poistuman aiheuttama	390 t CO2-ekv	390 t CO2-ekv	390 t CO2-ekv
Hiilivaraston ja -nielun menetys, 35 v	**690 t CO2-ekv**	**830 t CO2-ekv**	**660 t CO2-ekv**

6.3 LAAJENNETUN HIILITASEEN TULOKSET

Taulukko 18. Hiilidioksidipäästöjen yhteenveto VEA sähkönsiirtovaihtoehdolle Pyykkimäen elinkaaren aikana.

	VE1	VE2
Tuulipuiston päästöt [t-CO2 ekv]	110 102	89 708
Voimalinjan päästöt [t-CO2 ekv]	0	0
Hiilinielun menetys [t-CO2 ekv]	12 000	10 240
Päästöt yhteensä [t-CO2 ekv]	122 102	99 948
Tuotanto yhteensä [GWh]	17 080	13 878
Hiilijalanjälki yhteensä [g CO2-ekv/kWh]	**7**	**7**

Taulukko 19. Hiilidioksidipäästöjen yhteenveto VEB sähkönsiirtovaihtoehdolle Pyykkimäen elinkaaren aikana.

	VE1	VE2
Tuulipuiston päästöt [t-CO2 ekv]	110 102	89 708
Voimalinjan päästöt [t-CO2 ekv]	9 937	9 937
Hiilinielun menetys [t-CO2 ekv]	25 340	23 580
Päästöt yhteensä [t-CO2 ekv]	145 379	123 225
Tuotanto yhteensä [GWh]	17 080	13 878
Hiilijalanjälki yhteensä [g CO2-ekv/kWh]	**9**	**9**

Taulukko 20. Hiilidioksidipäästöjen yhteenveto VEC sähkönsiirtovaihtoehdolle Pyykkimäen elinkaaren aikana.

	VE1	VE2
Tuulipuiston päästöt [t-CO2 ekv]	110 102	89 708
Voimalinjan päästöt [t-CO2 ekv]	4 968	4 968
Hiilinielun menetys [t-CO2 ekv]	19 070	17 310
Päästöt yhteensä [t-CO2 ekv]	134 140	111 986
Tuotanto yhteensä [GWh]	17 080	13 878
Hiilijalanjälki yhteensä [g CO2-ekv/kWh]	**8**	**8**

7 YHTEENVETO

Hiilijalanjälkianalyysi osoittaa, että hankkeen hiilijalanjälki 35 vuoden tarkastelujaksolla on noin 6–7 g CO2-ekv/kWh. Vertailun vuoksi kivihiilen hiilijalanjälki on noin 1000 g CO2-ekv/kWh, maakaasun 400–500 g CO2-ekv/kWh ja ydinvoiman noin 5 g CO2-ekv/kWh (UNECE, 2021).

Energiavaraston kanssa hankkeen hiilijalanjälki on noin 10–14 g CO2-ekv/kWh. Laajennetun hiilitaseen mukainen hiilijalanjälki (sisältäen hiilinielun muutoksesta aiheutuvat päästöt sekä maankäytön muutoksen päästöt) on noin 7–9 g CO2-ekv/kWh.

Hiilikädenjälkianalyysi osoittaa lisäksi sen myönteisen vaikutuksen, joka syntyy, kun fossiiliset polttoaineet korvataan uusiutuvalla energialla. Hiilikädenjälkianalyysin mukaan hankkeen hiilikädenjälki verrattuna eurooppalaiseen sähköntuotantoon on noin 140 g CO2-ekv/kWh.

Kun ilmastoneutraalius on saavutettu EU:ssa, tulee suomalaisen tuulivoiman hiilikädenjälki olemaan paljon pienempi. Seuraavien 20–30 vuoden aikana valtaosa tuulivoimasta kuitenkin käytetään fossiilisten polttoaineiden korvaamiseen eri muodoissa Euroopan komission asettamien ilmastotavoitteiden mukaisesti.

Laskelmat perustuvat oletuksiin ja lähteisiin, jotka kaikki sisältävät jossain määrin epävarmuustekijöitä. Laskelmien tavoitteena on arvioida hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen suuruusluokkaa, koska tässä vaiheessa on vielä paljon määrittelemättömiä parametreja täysin tarkan laskelman tekemiseen.

Hiilikädenjäljen laskentaan liittyy jonkin verran epävarmuustekijöitä. On hyvin haastavaa määritellä tarkasti, mitä energiantuotantoa hankkeella korvataan, sillä hankkeella korvataan osittain nykyisiä fossiilisia energialähteitä, mutta osittain myös tuontisähköä, ja pääasiassa se rakennetaan kattamaan tulevaisuudessa lisääntyvää sähkön kysyntää. Siksi on vaikea määrittää, mihin päästöskenaarioon hanketta olisi verrattava. Tämän laskennallisen haasteen vuoksi hiilikädenjälkilaskelmaa olisi pidettävä pikemminkin suuntaa antavana.

8 LÄHTEET

Fingrid (2023). *Sähköntuotannon CO2-päästöarvio. https*

Harrison, GP, Maclean, EJ, Karamanlis, S & Ochoa, LF (2010). *Life cycle assessment of the transmission network in Great Britain*, Energy Policy, vol. 38, no. 7, pp. 3622-3631. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.02.039 https://www.pure.ed.ac.uk/ws/files/21980985/Grid_Carbon_Footprint_Paper.pdf

Emilsson E, Dahllöf L. (2019). *Lithium-Ion Vehicle Battery Production Status 2019 on Energy Use, CO 2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling.* https://www.researchgate.net/publication/339237011_Lithium-Ion_Vehicle_Battery_Production_Status_2019_on_Energy_Use_CO_2_Emissions_Use_of_Metals_Products_Environmental_Footprint_and_Recycling

Metsäkeskus (2026). Hila-aineisto. Ladattu 25.3.2026, Hila-aineisto päivittyy 2 viikon välein. Saatavilla: https://www.metsakeskus.fi/fi/avoin-metsa-ja-luontotieto/aineistot-paikkatieto-ohjelmille/paikkatietoaineistot

Ministry of the Environment Finland (2021). *EU climate policy.* https://ym.fi/en/eu-climate-policy

Ministry of the Environment Finland (2022). *Finland's national climate change policy*. https://ym.fi/en/finland-s-national-climate-change-policy

Nordiska ministerrådet (2017). *The climate benefits of the Nordic forests.* https://nordicforestresearch.org/wp-content/uploads/2019/08/nytryck-eng-A4-1.pdf

UBA (2021). *Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen.* https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06_cc_35-2021_oekobilanzen_windenergie_photovoltaik.pdf

UNECE (2021). *Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options* https://unece.org/sites/default/files/2021-10/LCA-2.pdf

Vestas (2022). *Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V150-4.2 MW Wind Plant.* https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/reports-and-ratings/lcas/LCA%20of%20Electricity%20Production%20from%20an%20onshore%20V150-4.2,%204.5MW%20Wind%20Plant_Final.Web.pdf.coredownload.inline.pdf

Vestas (2023). *Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore EnVentus V162-6.2 MW Wind Plant*.

https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/reports-and-ratings/lcas/LCA%20of%20Electricity%20Production%20from%20an%20onshore%20EnVentus%20V162-6.2.pdf.coredownload.inline.pdf

VTT Technical Research Centre of Finland Ltd (2013). *Carbon footprint for building products.* https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2013/T115.pdf

VTT Technical Research Centre of Finland Ltd (2021). *Carbon Handprint Guide, V2.* https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/2021/Carbon_handprint_guide_2021.pdf