

Liite 14

Ilmastovaikutusten arviointi, erillisliite



Laine Offshore Wind Oy

Laineen merituulivoimapuisto, Perämeri
Erillisliite: Ilmastovaikutusten arviointi



ILMASTO-ERILLISLIITTEEN SISÄLLYS

1	Johdanto	3
2	Ilmasto	5
2.1	Vaikutusmekanismit ja arviointimenetelmät	6
2.1.1	Laskennan lähtötiedot	7
2.2	Nykytila	27
2.2.1	Ilmasto	27
2.2.2	Kansainväliset, kansalliset ja alueelliset tavoitteet	28
2.2.3	Yleiset ennusteet ilmastonmuutoksen aiheuttamista vaikutuksista	28
2.3	Vaikutusten arviointi	29
2.3.1	Merituulivoimapuisto	29
2.3.2	Sähkönsiirto merellä ja merisähköasemat	30
2.3.3	Vedyn tuotanto	32
2.3.4	Vedynsiirto merellä	32
2.3.5	Vedyn varastointi	33
2.3.6	Mantereen sähköasema	34
2.3.7	Sähkönsiirto mantereella	34
2.3.8	Hiilinielujen- ja varastojen menetys	36
2.3.9	Hankkeen toteuttamatta jättäminen VE0	38
2.3.10	Lisävaikutus meriliikenteen päästöihin	39
2.4	Yhteisvaikutukset	39
2.5	Kokonaistulokset - Vaihtoehtojen vertailu ja vaikutusten merkittävyys	40
2.5.1	Sähkön tuotanto	40
2.5.2	Vedyn tuotanto	42
2.5.3	Vaikutusten merkittävyys	45
2.6	Ilmastonmuutoksen vaikutukset hankkeeseen ja niihin sopeutuminen merellä	49
2.6.1	Meriveteen liittyvät muutokset	50
2.6.2	Tuulisuus	51
2.6.3	Keskilämpötilan ja maksimilämpötilan nousu	51
2.7	Ilmastonmuutoksen vaikutukset hankkeeseen ja niihin sopeutuminen mantereella	52
2.7.1	Keskilämpötilan ja maksimilämpötilan nousu	53
2.7.2	Tuulisuus	54
2.7.3	Tulvariskit	54

2.8	Arvioinnin epävarmuudet	55
2.9	Haittojen ehkäiseminen ja lieventäminen	55
3	Lähdeluettelo.....	56

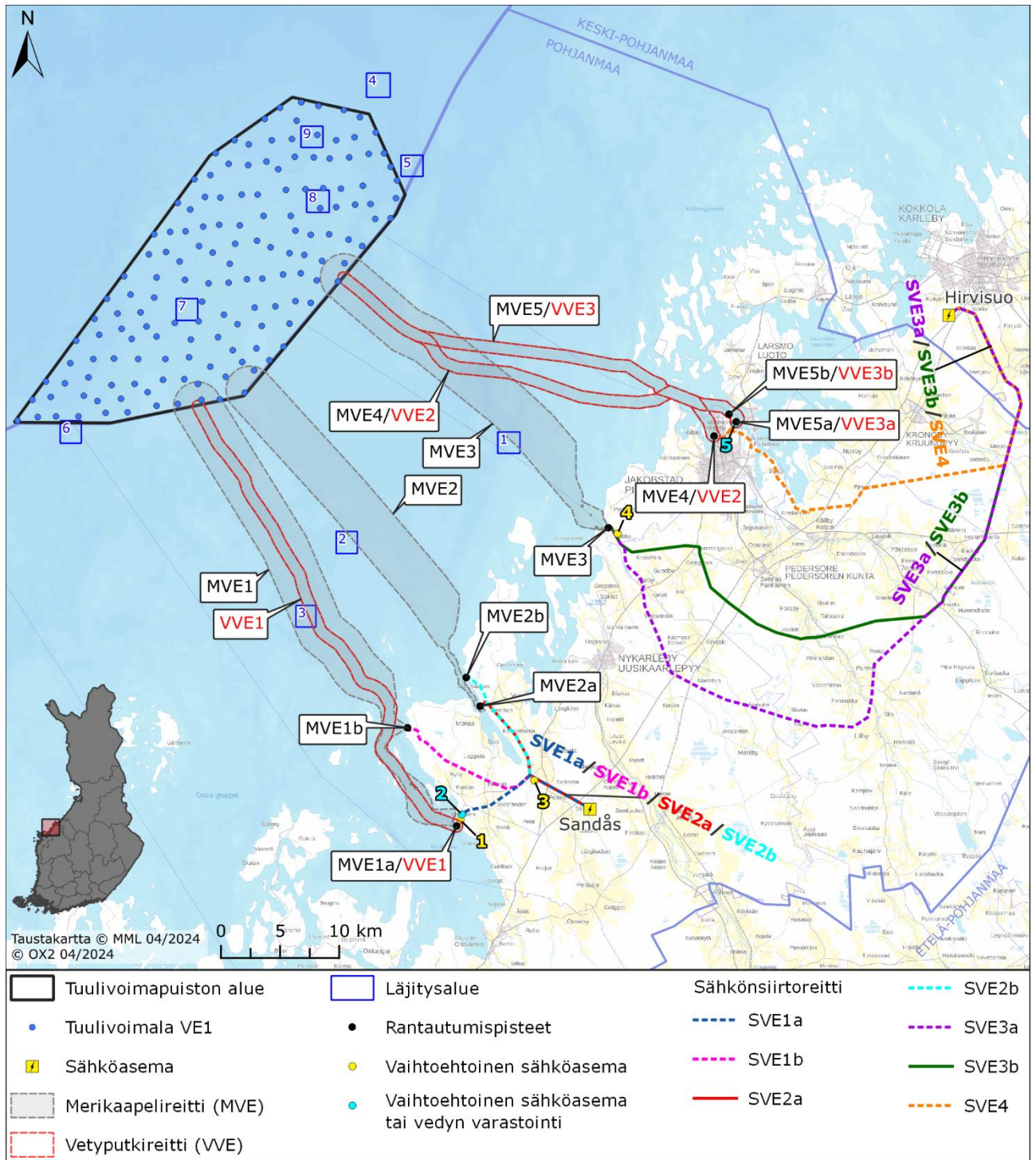
1 JOHDANTO

Laine Offshore Wind Oy:n (myöhemmin hankevastaava tai OX2) suunnittelema merituulivoimapuisto Laine sijoittuu Pohjanlahdelle Suomen talousvyöhykkeelle (Kuva 1-1) noin 35 kilometriä Pietarsaaresta länteen 29 kilometrin päässä rannikosta. Merituulivoimapuiston aluetta lähinnä sijaitseva paikkakunta mantereella on Pietarsaaren lisäksi Uusikaarlepyy. Merituulivoimapuiston pinta-ala on noin 450 km² ja syvyys vaihtelee 18–70 metrin välillä. Merituulivoimapuisto koostuu enintään 150 meriperustuksille asennettavasta tuulivoimalasta (VE1; VE2: 113 tuulivoimalaa) ja tuotettu sähkö tuodaan maihin merikaapeleilla. Merikaapeleiden osalta tarkastellaan viittä vaihtoehtoista pääreittiä, joilla osalla on vaihtoehtoiset rantautumisalueet (MVE1a, MVE1b, MVE2a, MVE2b, MVE3, MVE4, MVE5a, MVE5b).

Merituulivoimapuiston sähkönsiirto mantereella toteutetaan voimajohdoilla sekä rantautumisalueen lähellä maakaapeleilla. Sähkönsiirtoreitit (SVE1a, SVE1b, SVE2a, SVE2b, SVE3a, SVE3b, SVE4) pyritään sijoittamaan mahdollisuuksien mukaan jo olemassa olevien voimajohtojen rinnalle. Sähkönsiirron vaihtoehtoista enintään kaksi valitaan toteutettavaksi.

Hankkeessa suunnitellaan lisäksi vedyntuotantoa merellä. Vedyn osalta tarkastellaan vaihtoehtoisia vetyputkireittejä VVE1, VVE2, VVE3a ja VVE3b, joista yksi valitaan toteutettavaksi.

Hankkeen molemmissa vaihtoehdoissa (VE1 ja VE2) tuotetaan joko sähköä tai vetyä, tai mahdollisesti molempia esim. suhteessa 40 % vetyä ja 60 % sähköä. Ympäristövaikutusten arvioinnissa ja siten myös tässä ilmastovaikutusten arvioinnissa on arvioitu hankkeen rakentamisen ja toiminnan ajan maksimivaikutukset.



Kuva 1-1. Hankealueen sijainti: Merituulivoimapaiston hankealuearajaus (VE1, 150 voimaa), vaihtoehtoisten merikaapeleiden reitit, vetyputkireitit, läjitysalueet sekä sähköasemat, vedyn varastointialueet ja sähkönsiirtoreitit mantereella. Kartalla esitetyt merikaapeli- ja vetyputkireitit ovat 4 kilometrin levyisiä tutkimuskäytäviä, joiden sisälle

lopulliset suunnittelun myötä tarkentuneet merikaapelilinjaukset sijoittuvat. Rantautumiskohdissa käytävät ovat kapeampia.

2 ILMASTO

YHTEENVETO:

- Hankkeen kielteisiä ilmastovaikutuksia arvioitiin laskemalla hankkeen kaikkien sekä merelle että mantereelle sijoittuvien toimintojen hiilijalanjälki eli sen elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasupäästöt. Hankkeen haitallisia ilmastovaikutuksia tarkasteltiin laskemalla eri toteutusvaihtoehdoista aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt hankkeesta saatuun suunnittelutietoon perustuen.
- Lisäksi arvioinnissa tarkasteltiin hankkeen elinkaaren aikana muodostuvien kasvihuonekaasupäästöjen vaikutuksia päästöjen vähentämistavoitteisiin alueellisella ja kansallisella tasolla.
- Merituulivoimapuiston hankekokonaisuus aiheuttaa sekä suoria ilmastopäästöjä että hiilinielujen ja -varastojen pienenemistä elinkaarensa aikana. Suurimmat negatiiviset vaikutukset liittyvät voimaloiden rakentamiseen.
- Kaikkien hankevaihtokombinaatioiden päästöjen arvioidaan olevan pienemmät kuin hankkeen toteuttamatta jättämisen VE0:n päästöt. Hankkeen suuret myönteiset ilmastovaikutukset syntyvät siitä, että tuulivoimaloiden sähköntuotanto tulisi arviolta olemaan 11 000 GWh vuodessa.
- Jos hankkeessa tuotetaan 100 % sähköä, kokonaispäästöjen vaihteluväli on noin 10,9–11,1 tCO₂e/GWh:
 - Minimipäästöt ovat toteutusvaihtoehdossa MVE2b (5 merikaapelia) yhdistettynä SVE2b:en ja MVE5b (5 merikaapelia) yhdistettynä SVE4:een.
 - Maksimipäästöt ovat toteutusvaihtoehdossa MVE1a (5 merikaapelia) yhdistettynä SVE1a:een ja MVE3 (5 merikaapelia) yhdistettynä SVE3a:een.
- Jos hankkeessa tuotetaan 100 % vetyä, kokonaispäästöjen vaihteluväli on noin 9,8–9,9 tCO₂e/GWh.
 - Minimipäästöt ovat VVE1 toteutusvaihtoehdossa.
 - Maksimipäästöt ovat VVE2 ja VVE3 -toteutusvaihtoehdossa, jotka ovat lähes saman pituiset.
- VE0:ksi arvioidaan tilanne, jossa tuulipuistoa ei toteuteta eikä siten uutta uusiutuvaa sähköä tuoteta. VE0 on laskettu seuraavilla vaihtoehdoilla:
 - VE0, 100 % sähkö, jos sähkö on verkkosähköä (ennuste): noin 53 tCO₂e/GWh
 - VE0, 100 % vety, jos vety on tuotettu tavanomaisilla, pääosin fossiiliseen metaaniin perustuvilla tuotantomenetelmillä: noin 233 tCO₂e/GWh
 - VE0, 100 % vety, jos vety on tuotettu verkkosähköllä (ennuste): noin 53 tCO₂e/GWh
 - VE0, 100 % vety, jos vedyn sijasta käytetään polttoaineena LNG:tä: noin 150 tCO₂e/GWh
- Mikäli tuulisähköllä korvataan ennusteen mukaista verkkosähköä Suomessa, positiiviset vaikutukset ylittävät negatiiviset vaikutukset noin kolmannen tuotantovuoden jälkeen. Tarkasteltaessa vedyn käyttöä laivojen polttoaineena verrattuna LNG:hen, positiiviset vaikutukset ylittävät negatiiviset vaikutukset noin kahden tuotantovuoden jälkeen.

- Merituulivoimahankkeella arvioidaan olevan ilmaston kannalta positiivisesti hyvin merkittävä vaikutus – toiminnan aikana hankkeella arvioidaan olevan suuri myönteinen vaikutus, kun tuotetaan 100 % sähköä ja erittäin suuri vaikutus kun tuotetaan 100 % vetyä. Uusiutuvan energian tuotanto on erittäin suuresti ilmastotavoitteiden mukaista. Rakentamisen aikana vaikutusten arvioidaan olevan suuresti negatiiviset. Itse rakentaminen ei ole suoraan päästövähennystavoitteiden mukaista, mutta sen avulla saavutetaan tavoitteiden mukainen energiainfrastruktuuri.

2.1 Vaikutusmekanismit ja arviointimenetelmät

Laineen merituulivoimapuiston hankekokonaisuus käsittää merelle sijoittuvat merituulivoimalat vedyntuotannon, sisäisen merikaapeloinnin ja vetyputkistot, merisähköasemat, rakentamisen aikaisen meriläjityksen, energiansiirron mantereelle (merikaapelit/vetyputket) sekä energiansiirron mantereella (maakaapelit, voimajohdot sekä liittytasemat). Seuraavissa luvuissa ”hankkeella” viitataan em. hankekokonaisuuteen.

Hanke vaikuttaa positiivisesti ilmastonmuutokseen vähentämällä sähköntuotannossa syntyviä kasvihuone- ja savukaasupäästöjä. Vaikutusarvioinnissa laskettiin tuulivoimalla vältetyt päästöt verrattuna tulevaisuuden skenaarioon energian päästökehityksestä.

Hankkeen kielteisiä ilmastovaikutuksia arvioitiin laskemalla hankkeen hiilijalanjälki eli sen elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasupäästöt. Eri toteutusvaihtoehdoista aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt arvioitiin laskennallisesti perustuen suunnittelutietoihin. Päästöt laskettiin niille hanketoteutusvaihtoehdoille, joilla arvioitiin olevan pienimmät ja suurimmat päästöt. Näin saatiin selville hankkeen päästövaikutuksen vaihteluväli. Tarkasteltavia tilanteita oli kaksi, joista toisessa tuotetaan 100 % sähköä ja toisessa 100 % vetyä. Oheisessa taulukossa (Taulukko 2-1) on selvennetty lasketut vaihtoehdot. Kun tuotteena on 100 % sähköä, toteutetaan silloin todennäköisesti kaksi sähkönsiirtoreittiä. Puolestaan kun tuotetaan 100 % vetyä, toteutetaan todennäköisesti yksi vedynsiirtoreitti.

Taulukko 2-1. Laskennassa tarkastellut toteutusvaihtoehdot, jotka on tarkasteltu kokonaisuudessaan.

Vaihtoehdot	Rakentaminen	Käyttö	Käytöstä poisto
Tuotteena 100 % sähkö minimi- ja maksimitilanteessa. • Minimivaihtoehto: MVE2b + SVE2b ja MVE5b + SVE4 • Maksimivaihtoehto: MVE1a + SVE1a ja MVE3 + SVE3a	Tuulivoimalat 2x sähkönsiirtoreitit merellä ja maalla Meri- ja maasähköasemat Hiilinielu- ja hiilivarastomenetykset maalla	Sähkön tuotanto	Tuulivoimalat 2x sähkönsiirtoreitit merellä ja maalla Meri- ja maasähköasemat Hiilinielu- ja hiilivarastomenetykset maalla

Vaihtoehdot	Rakentaminen	Käyttö	Käytöstä poisto
Tuotteena 100 % vety mini- ja maksimitilanteessa. - Minimivaihtoehto: VVE2 / VVE3 - Maksimivaihtoehto: VVE1	Tuulivoimalat Vedyn tuotantoinfrastruktuuuri 1x vedyn siirtoreitti Vetysäiliöt maalla Hiilinielu- ja hiilivarastomenetykset maalla	Vedyn tuotanto	Tuulivoimalat Vedyn tuotantoinfrastruktuuuri 1x vedynsiirtoreitti Vetysäiliöt maalla Hiilinielu- ja hiilivarastomenetykset maalla

Laskelmien perusteella arvioitiin hankkeen merkitys ilmastonmuutoksen hillinnässä. Lisäksi tarkasteltiin toimenpiteitä, joilla hankkeen suoria tai epäsuoria päästöjä voidaan lieventää.

Lisäksi arvioinnissa tarkasteltiin hankkeen elinkaaren aikana muodostuvien kasvihuonekaasupäästöjen vaikutuksia päästöjen vähentämistavoitteisiin alueellisella ja kansallisella tasolla. Arvioinnissa huomioidaan myös ilmastonmuutokseen sopeutuminen erityisesti sään ääri-ilmiöiden vaikutuksen kannalta hankkeen elinkaaren aikana.

Hankkeen YVA-selostuksessa on esitetty laskentaan perustuva tiivis kuvaus ilmastovaiikutuksista sekä lisäksi on kuvattu vaikutusten arvioinnin lähtöoletukset, laskentamenetelmät ja epävarmuudet.

Arvioinnin suoritti ilmastovaikutuksiin perehtynyt asiantuntija.

2.1.1 Laskennan lähtötiedot

Ilmastovaikutuksia arvioitiin laskennallisesti määrittämällä hankkeen sekä merelle että mantereelle sijoittuvien toimintojen elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasupäästöt, eli hankkeen elinkaaren hiilijalanjälki, ja vertaamalla niitä VE0:n tilanteeseen, eli hankkeen toteuttamatta jättämiseen. Lisäksi arvioinnissa laskettiin hankkeen vaikutus hiilinieluihin ja -varastoihin sekä arvioitiin ilmastonmuutoksen vaikutusta hankkeeseen ja hankkeen sopeutumista ilmastonmuutokseen.

Hankkeen päästölaskennassa huomioitiin hiilidioksidin (CO₂) lisäksi muut kasvihuonekaasupäästöt, joita ovat metaani (CH₄), typpioksiduuli (N₂O) ja ns. F-kaasut. Laskennan tulokset ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalentteina (CO₂e), jossa kaikki laskentaan sisältyvät kaasut ovat yhteismitallistetussa muodossa.

Laskennan osakokonaisuudet jaettiin rakennusvaiheen, käytön ja käytöstä poiston päästöihin. Mahdollisuuksien mukaan laskennassa hyödynnettiin valmiita verifioituja LCA-tutkimuksia, mutta tilanteissa, joissa LCA:ita ei ollut käytettävissä, laskettiin päästöt materiaaaliperusteisesti. Päästölaskennassa hyödynnettiin Infrarakentamisen vähähiilisyyden arviointimenetelmää (*Väylävirasto 2023*). Laskentamenetelmän vertautuvuus rakentamisen standardien osa-alueisiin on esitetty taulukossa 2-2.

Taulukko 2-2. Laskentaan sisällytetyt päästölähteet ja niiden vertautuvuus standardiin.

Osio	Sisältää	Vertautuvuus rakentamisen standardeihin (esim. SFS-EN 15978:2011)
Rakentamisen aikaiset päästöt	Materiaalivirtojen päästöt (raaka-aineiden kaivaminen ja valmistaminen)	A1–A3
	Materiaalikuljetukset työmaalle	A4
	Rakentamisen ja puuston hakkuun polttoaineen kulutus	A5
Toiminnan aikaiset päästöt	Käyttö	B1
	Kunnossapito ja korjaaminen	B2–B3
Toiminnan päättymisen jälkeiset päästöt	Purkamisen polttoaineen kulutus	C1
	Purettujen materiaalivirtojen kuljetus ja käsittely	C2–C3

Hankkeen elinkaari yhdenmukaistettiin tuulivoimaloiden elinkaaren mukaisesti 35 vuoden ajalle, vaikka todellisuudessa sähkönsiirron elinkaari on 80 vuotta. Sähkönsiirron osalta oletus on järkevä, koska sähkönsiirron päästöjen suuruus riippuu enimmäkseen siitä, kuinka paljon sähköä tuotetaan. Hiilinielujen osalta menetykset jatkuvat niin pitkään, kun hiilinielu ei pääse kasvamaan. Jos elinkaarilaskenta venytettäisiin noin 80 vuoteen, syntyisi toiminnan aikaisia päästöjä arviolta yhtä paljon vuotta kohden kuin lyhyemmällä elinkaarella. Rakentamisen ja purkamisen osalta pidempi elinkaari lisäisi niiden päästöjä, koska oletetusti esimerkiksi tuulivoimaloiden rakentaminen, purkaminen tai korjaaminen tehtäisiin uudelleen puolella välissä elinkaarta.

Kokonaistuloksia tarkasteltiin skenaarioittain tuotettavien tuotteiden kautta ja lasketut kasvihuonekaasupäästöt on ilmoitettu tuotettavaa sähköenergian yksikköä kohden. Tuotevaihtoehdot ovat sähkö ja vety. Päästöt laskettiin tilanteille, joissa tuotetaan 100 % sähköä tai 100 % vetyä. Maksimi-minimilaskennalla laskettaessa saatiin selville hankkeen hiilijalanjäljen vaihteluväli.

2.1.1.1 Merituulivoimapuisto

Merituulivoimapuiston ilmastovaikutukset on jaettu rakentamisen aikaisiin, toiminnan aikaisiin ja toiminnan päättymisen jälkeisiin vaikutuksiin. Vaihtoehtojen VE1 ja VE2 ilmastovaikutuksien arvioinnissa käytettiin oheisessa taulukossa (Taulukko 2-3) esitetyjä oletuksia.

Taulukko 2-3. Tuulivoiman ilmastovaikutusten laskennassa käytetyt oletukset.

Oletus	VE1	VE2
Tuulivoimaloiden määrä [kpl]	150	113

Oletus	VE1	VE2
Tuulivoimaloiden yksikköteho [MW/voimala]	15	25
Vuosittainen sähköntuotanto [TWh/v]	11	11
Käyttöikä [v]	35	35

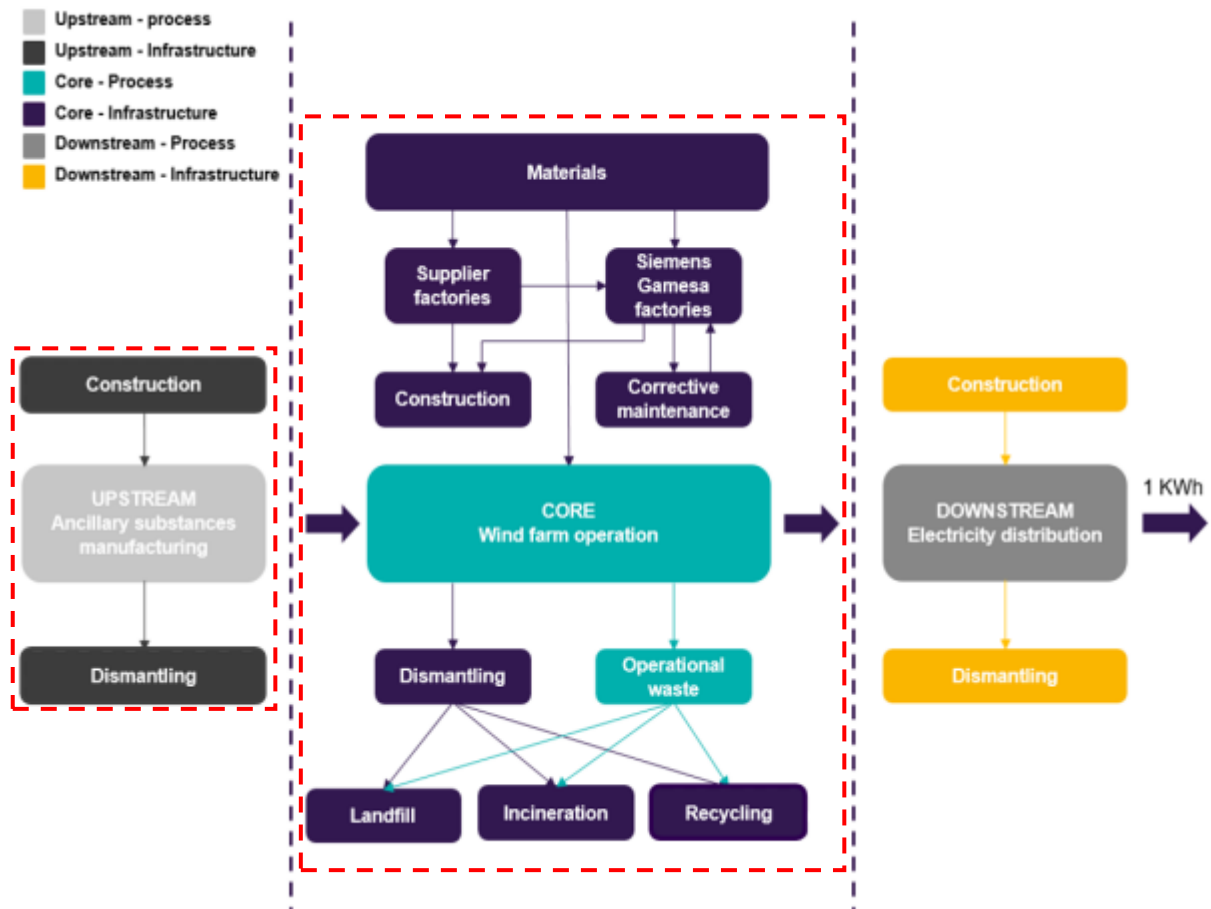
Laskennassa käytetyt lähteet on esitetty taulukossa 2-4.

Taulukko 2-4. Tuulivoiman ilmastovaikutusten arvioinnissa käytetyt lähteet.

Kohde	Tiedonlähde
Tuulivoimapuiston elinkaaripäästöt	Siemens Gamesa, 2023. Electricity from a European off-shore wind farm using SG 14-236 wind turbines. EPD. Saatavilla: https://api.environmentalproductdeclaration.com/api/v1/EPDLibrary/Files/ed639d2a-69c6-402e-da38-08dbb377d685/Data Rakentamisen, käytön ja käytöstä poiston osuudet päästöistä arvioitiin Ecoinventin merituulivoiman kertoimen mukaan: Ecoinvent, Electricity production, wind, 1–3 MW turbine, offshore – FI.

Rakentaminen, käyttöaika ja käytöstä poisto

Merituulivoimaloiden päästökertoimeksi valittiin Siemens Gamesan tekemä EPD (Environmental Product Declaration) SG 14-236 -merituulivoimalla tuotetulle sähköntuotannolle. EPD on verifioitu kolmannen osapuolen toimesta. Tämä valikoitui päästökertoimeksi, koska kyseessä on suurin merituulivoimalakoko, jolle on saatavilla päästökertoimen. Elinkaarilaskennan rajausta on esitetty kuvassa 2-1.



Kuva 2-1. Käytetyn tuulivoimapäästökertoimen systeemirajaus. Tuulivoiman päästöläskennassa hyödynnettiin osioita "Upstream - process", "Upstream - Infrastructure", "Core - Process" ja "Core - Infrastructure". (Siemens Gamesa 2023)

EPD:ssä merituulivoimalan elinkaareksi on määritetty 25 vuotta ja voimalatehoksi 14 MW. Tässä arvioinnissa laskettavien voimaloiden elinkaareksi arvioitiin 35 vuotta sekä voimalatehoksi 15 MW vaihtoehdossa VE1 ja 25 MW vaihtoehdossa VE2. Tämä eroavaisuus tuo voimaloiden tulokseen hieman yliarviota. Voimalakoon kasvun ei oleteta kasvattavan päästökerrointa, sillä yleensä koon kasvaessa myös tuotettu sähkönmäärä kasvaa. Lisäksi "Core - Infrastructure" päästökertoimen jakaminen rakentamiselle, käytölle ja käytöstä poistolle osoittautui haastavaksi, sillä päästökertoimia ei ollut lähtökohteisesti jaoteltu elinkaaren vaiheisiin, joten jaon arvioinnissa hyödynnettiin Ecoinventin tietoja.

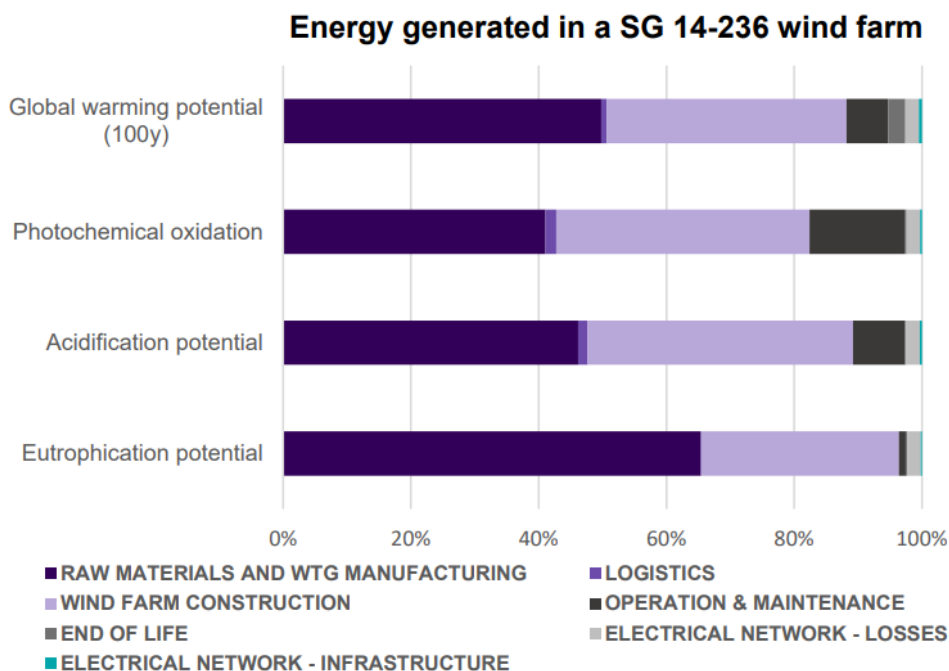
Käytetyt päästökertoimet ja niiden jakoon tehdyt oletukset on esitetty taulukossa 2-5.

Taulukko 2-5. Tuulivoimapuiston laskennan perustana käytetyt päästökertoimet (Siemens Gamesa 2023).

[gCO ₂ e/kWh]			
Tuotantoketjusta tulevat päästöt (Upstream) → Toiminnan aika	Ydinprosessi (Core) → Toiminnan aika	Voimalat ja infra (Core – Infrastructure) → Rakentaminen 96 %, käytön ajalta 3 % ja käytöstä poisto 1 %	Yhteensä
0,01	0,54	8,79	9,33

Upstream-päästöt koostuvat erilaisten toiminnan vaatimien apuaineiden kuten hydrauliikkaöljyn päästöistä. Core – Process -päästöt syntyvät toiminnan aikaisten huolto-toimenpiteiden vaatimista polttoaineista ja niiden yhteydessä syntyvien jätteiden käsittelystä sekä esimerkiksi voimalan energiahäviöistä. Core – Infrastructure käsittää kaikki tuulivoimaloiden materiaalien valmistukseen, rakentamiseen, purkamiseen ja jätteiden käsittelyyn liittyvät päästöt, jotka on jaettu erikseen rakentamisen, käyttöajan ja käytöstä poiston päästöihin.

Arvioinnissa käytetyn tuulivoimalan elinkaaren vaikutuksien ilmastopäästöjen ja muiden ympäristöpäästöjen jakautuminen on esitetty seuraavassa kuvassa (Kuva 2-2). Kuvasta nähdään, että suurin osa ilmastopäästöistä (Global warming potential -rivi) muodostuu raaka-aineiden ja turbiinien valmistuksessa. Toinen merkittävä päästölähde on tuulipuiston rakentamisen päästöt. (Siemens Gamesa 2023)



Kuva 2-2. Ympäristövaikutuksien jakautuminen tuulivoimalan elinkaaren aikana. (Siemens Gamesa 2023)

Päästöt laskettiin edellä esitetyin päästökertoimin kunkin hankevaihtoehdon sähköntuotantomäärien mukaisesti. VE1:ssä ja VE2:ssa tuotetun sähkön määrä on 11 000 GWh/vuosi.

2.1.1.2 Sähkön siirto merellä ja merisähköasemat

Sähkön siirron ja merisähköasemien päästöt arvioitiin materiaaliperusteisesti. Oheisessa taulukossa (Taulukko 2-6) on esitetty laskennassa käytetyt oletukset. Määrät on arvioitu pääosin hankekehittäjän toimesta, minkä lisäksi ilmasto-osion arvioija on tehnyt oletuksia kuljetuksien osalta. Käytön aikainen sähkö on oletettu olevan alueen voimaloissa tuotettua sähköä. Kuljetukset on arvioitu kahteen suuntaan. Tuulivoimapuiston alueella olevat sähkönsiirtokaapelit on oletettu kuuluvan tuulivoimaloiden päästökertoi-
meen. Tässä laskettavat kaapelit ovat siirtokaapeleita tuulivoimapuistosta mantereelle.

Merikaapelien osalta kasvihuonekaasupäästöt laskettiin vaihtoehdoille MVE1a, MVE2b, MVE3 ja MVE5b, jotka kaikki sisältyvät joko minimi- tai maksimivaihtoehtoon. Minimijä maksimivaihtoehtossa toteutetaan kummassakin kaksi sähkönsiirtoreittiä. Jokainen reitti sisältää 5 merikaapelia ja lopputoteutuksessa on mukana 10 merikaapelia. Siirretäessä sähköä syntyy aina myös sähkönsiirtohäviöitä. Sähkönsiirtohäviöiden päästöt jaetaan koko sähkönsiirtoinfran (merikaapeli + maakaapeli + voimajohto) kesken pituuden perusteella.

Taulukko 2-6. Merellä tapahtuvan sähkön siirron ilmastovaikutusten laskennassa käytetyt oletukset.

Oletus	MVE1a, max	MVE2b, min	MVE3, max	MVE5b, min
Merisähköasemien määrä [kpl]	8	8	8	8
Siirtoreitin pituus [km]	43	31	32	36
Käyttöikä [v] (arvioitu sähkönsiirron osalta samaksi kuin voimajohtoilla)	35	35	35	35
<i>Rakentaminen</i>				
Teräspärustrukset sähköasemiin [t]	8 000	8 000	8 000	8 000
Teräs sähköasemien vedenpinnan yläpuolisiin osiin [t]	14 000	14 000	14 000	14 000
Betonipärustrukset sähköasemiin [t]	56 000	56 000	56 000	56 000
Terästen kuljetukset [km/suunta]	1565	1565	1565	1565
- Kuljetus laivalla - Kuljetus rekalla	1265 300	1265 300	1265 300	1265 300
Betonin kuljetus satamasta merelle [km/suunta]	65	65	65	65

Oletus	MVE1a, max	MVE2b, min	MVE3, max	MVE5b, min
Sähköasemien rakentamisen polttoainekulutus [m ³]	1 360	1 360	1 360	1 360
Sähkönsiirtokaapelit tuulivoimapuistosta mantereelle [km] (ja siirtokaapeleiden massat [t])	yht. 216,5 km (433 t)	yht. 155 km (310 t)	yht. 157,5 km (315 t)	yht. 177,5 km (355 t)
Kiviainekset sähkönsiirtokaapeleille [m ³]	795 000	795 000	795 000	795 000
Kiviaineksien kuljetuksen polttoaine [m ³]	4 400	4 400	4 400	4 400
Sähkönsiirtokaapelien laskun polttoainekulutus [m ³]	2 900	2 100	2 100	2 400
<i>Käytön aika</i>				
Sähkön siirtohäviö	4 %	4 %	4 %	4 %
SF6-kaasu [kg/a]	5	5	5	5
Huollon polttoainekulutus, sähköasema, elinkaari [m ³]	1 400	1 400	1 400	1 400
Huollon polttoainekulutus, merikaapelit, elinkaari [m ³]	400	300	300	300
<i>Käytöstä poisto</i>				
Käytöstä poiston polttoainekulutus, sähköasema (20 % rakentamisen polttoaineen kulutuksesta) [m ³]	270	270	270	270
Käytöstä poiston polttoainekulutus, merikaapelit (20 % rakentamisen polttoaineen kulutuksesta) [m ³]	500	400	400	400
Materiaalien kuljetus kierrätykseen (kaikki materiaalit arvioidaan kierrätettävän/käsiteltävän) [km/suunta]	72	72	72	72
- Merellä - Mantereella	65 10	65 10	65 10	65 10

Käytetyt päästökertoimien lähteet on esitetty oheisessa taulukossa (Taulukko 2-7).

Taulukko 2-7. Merellä tapahtuvan sähkönsiirron ja merisähköasemien laskentaan sisällytettyjen päästölähteiden päästökertoimet, muut muuttujat ja niiden lähteet.

Päästölähde	Käytetty tietolähde
Teräs	CO2data, 2023. Teräslevy katteisiin ja seiniin, kuumasinkitty, maalattu tai maalaamaton tai COR-TEN pinnalle. Saatavilla: https://co2data.fi/rakentaminen/
Betoni	CO2data, 2023. Teräsbetoninen lyöntipaalu RTC-350-16. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/
Siirtokaapelit	Midal Cables, EPD 2020. Teräsvahvistetut alumiinijohtimet (AACSR). Sveid Conductor. Saatavilla: https://api.environmentaldec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/63766e80-7e1f-485f-a985-efa9816fa31f/Data
Siirtokaapelien massa	Fingrid, 2015. Peltopylväs – esite. Osoitteessa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/fingrid_peltopylvas_esite_2015_netti.pdf
Merituulivoiman päästö sähkönsiirtohäviöiden laskentaan (maksimi).	Schlömer S., T. Bruckner, L. Fulton, E. Hertwich, A. McKinnon, D. Perczyk, J. Roy, R. Schaeffer, R. Sims, P. Smith, and R. Wiser, 2014: Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. IPCC. Table A. III. 2. Wind offshore. Saatavilla: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf
SF6-kaasun määrä sähköasemien massa	Pusa, 2020. Jakeluverkkoyhtiön sähköasemahankinnan kojeistomäärityt. DI-työ. Saatavilla: https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161136/Diplomityo_Pusa_Erkki.pdf?sequence=1
SF6-kaasu	GHG Protocol. AR5 SF6 value. Saatavilla: https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Va-lues%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf
Konttialus	CO2data, 2023. Transport, container ship, 1 000 TEU. Saatavilla: https://co2data.fi/rakentaminen/
Irtolastialus	CO2data, 2023. Kuljetus, irtolastialus, bulk, keskikokoinen. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/

Päästölähde	Käytetty tietolähde
Kuljetus irtotavaraalle (puoliperävaunuyhdistelmä)	CO2data, 2023. Puoliperävaunuyhdistelmä 40 t, 80 %. Maantieajo. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/ CO2data, 2023. Puoliperävaunuyhdistelmä 40 t, 0 %. Maantieajo. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/
Kuljetus kierrätykseen (puoliperävaunuyhdistelmä)	CO2data, 2023. Puoliperävaunuyhdistelmä 40 t, 80 %. Katuajo. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/ CO2data, 2023. Puoliperävaunuyhdistelmä 40 t, 0 %. Katuajo. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/
Kiviaineksen kuljetus uusiokäyttöön (maansiirtoauto)	CO2data, 2023. Kuljetus, maansiirtoautot 32 t, 100 %, maantieajo. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/ CO2data, 2023. Infra. Siirto, maansiirtoautot 32 t, 0 %, maantieajo. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/
Polttoaine (diesel)	CO2data, 2023. Dieselin hankinnan ja polton päästö. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/
Metallin jätekäsittely	CO2data, 2023. Waste processing, metal materials. Saatavilla: https://co2data.fi/rakentaminen/
Betonin jätekäsittely	CO2data, 2023. Waste processing, concrete materials. Saatavilla: https://co2data.fi/rakentaminen/

2.1.1.3 Vedyn tuotanto

Vedyn tuotannon päästöt arvioitiin materiaaliperusteisesti. Vedyntuotanto toteutetaan keskitetyillä vedyntuotantoasemilla. Oheisessa taulukossa (Taulukko 2-8) on esitetty laskennassa käytetyt oletukset. Määrät on arvioitu pääosin hankekehittäjän toimesta, minkä lisäksi ilmasto-osion arvioija on tehnyt oletuksia kuljetuksien osalta. Käytön aikainen sähkö on alueen voimaloissa tuotettua sähköä. Kuljetukset on arvioitu kahteen suuntaan.

Taulukko 2-8. Vedyn tuotannon ilmastovaikutusten laskennassa käytetyt oletukset.

Oletus	Max & Min
Vetyvoimaloiden määrä [kpl]	8
Käyttöikä [v]	35
<i>Rakentaminen</i>	
Teräspärustrukset [t]	8 000
Teräsrakenteet veden yllä [t]	14 000

Oletus	Max & Min
Terästen kuljetukset [km/suunta] - Kuljetus laivalla - Kuljetus rekalla	1 565 1 265 300
Betoniperustukset [t]	56 000
Betonin kuljetus satamasta merelle [km/suunta]	65
Rakentamisen polttoainekulutus [m3]	1 360
<i>Käytön aika</i>	
Sähkön kulutus [GWh]	Itsetuotettua sähköä
Huollon polttoainekulutus [m3]	1 450
<i>Käytöstä poisto</i>	
Käytöstä poiston polttoainekulutus (20 % rakentamisen polttoaineen kulutuksesta) [m3]	270
Materiaalien kuljetus kierrätykseen (kaikki materiaalit arvioidaan kierrätettävän/käsiteltävän) [km/suunta] - Merellä - Mantereella	65 10

Käytetyt päästökertoimien lähteet on esitetty oheisessa taulukossa (Taulukko 2-9).

Taulukko 2-9. Vedyntuotannon laskentaan sisällytettyjen päästölähteiden päästökertoimet ja niiden lähteet.

Päästölähde	Käytetty tietolähde
Teräs	CO2data, 2023. Rakentaminen. Teräslevy katteisiin ja seiniin, kuumasinkitty, maalattu tai maalaamaton tai COR-TEN pinnalle.
Betoni	CO2data, 2023. Infra. Teräsbetoninen lyöntipaalu RTC-350-16.
Konttialus	CO2data, 2023. Rakentaminen. Transport, container ship, 1 000 TEU.
Irtolastialus	CO2data, 2023. Infra. Kuljetus, irtolastialus, bulk, keskikokoinen.
Kuljetus irtotavaralle (Puoliperävaunuyhdistelmä)	CO2data, 2023. Infra. Puoliperävaunuyhdistelmä 40 t, 80 %. Maantieajo.

Päästölähde	Käytetty tietolähde
	CO2data, 2023. Infra. Puoliperävaunuyhdistelmä 40 t, 0 %. Maantieajo.
Polttoaine (diesel)	CO2data, 2023. Infra. Dieselin hankinnan ja polton päästö.
Metallin jätekäsittely	CO2data, 2023. Rakentaminen. Waste processing, metal materials.
Betonin jätekäsittely	CO2data, 2023. Rakentaminen. Waste processing, concrete materials.

2.1.1.4 Vedynsiirto merellä ja vetyvarastot

Vedyn siirron ja maalla sijaitsevien vetyvarastojen päästöt arvioitiin materiaaaliperusteisesti. Oheisessa taulukossa (Taulukko 2-10) on esitetty laskennassa käytetyt oletukset. Määrät on arvioitu pääosin hankekehittäjän toimesta, minkä lisäksi ilmasto-osion arvioija on tehnyt oletuksia kuljetuksien osalta ja minimitalanteen putkia koskevien päästöjen osalta. Käytön aikainen sähkö on oletettu olevan alueen voimaloissa tuotettua sähköä. Kuljetukset on arvioitu kahteen suuntaan. Lisäksi vetyputken peittoon käytetään kiviainesta, jota ei ole laskettu päästöihin mukaan. Vetyputkien peittoon käytetään vähemmän kiviainesta kuin merikaapeleiden peittoon.

Taulukko 2-10. Vedyn siirron ja vedyn varastoinnin ilmastovaikutusten laskennassa käytetyt oletukset.

Oletus	VVE2/VVE3, Min	VVE1, Max
Vetyvaraston pinta-ala [ha]	1	1
Käyttöikä [v]	35	35
<i>Rakentaminen</i>		
Teräs vetysäiliöihin [t]	1 680	1 680
PE-muoviset vientiputket [t]	15 130	18 400
PE-muoviputket tuulivoimapuistossa [t]	17 510	21 300
Terästen ja PE-muoviputkien kuljetukset [km/suunta]	1 565	1 565
- Kuljetus laivalla - Kuljetus rekalla	1 265 300	1 265 300
Rakentamisen polttoainekulutus [m ³]	2 250	2740
<i>Käytön aika</i>		

Oletus	VVE2/VVE3, Min	VVE1, Max
Sähkönkulutus, elinkaari [GWh]	Itsetuotettua sähköä	Itsetuotettua sähköä
Huollon polttoainekulutus, elinkaari [m ³]	300	360
<i>Käytöstä poisto</i>		
Käytöstä poiston polttoainekulutus (20 % rakentamisen polttoaineen kulutuksesta) [m ³]	450	550
Materiaalien kuljetus kierrätykseen (kaikki materiaalit arvioidaan kierrätettävän/käsiteltävän) [km/suunta]	72	72
- Merellä - Mantereella	65 10	65 10

Käytetyt päästökertoimien lähteet on esitetty oheisessa taulukossa (Taulukko 2-11).

Taulukko 2-11. Vedyn siirron ja vetysäiliöiden laskentaan sisällytettyjen päästölähteiden päästökertoimet ja niiden lähteet.

Päästölähde	Käytetty tietolähde
Teräs	CO2data, 2023. Teräslevy katteisiin ja seiniin, kuumasinkitty, maalattu tai maalaamaton tai COR-TEN pinnalle. Saatavilla: https://co2data.fi/rakentaminen/
Muoviputki	CO2data, 2023. Putki, vesijohtoputki 500 mm, PE, PN10, sini-raita. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/
Konttialus	CO2data, 2023. Transport, container ship, 1 000 TEU. Saatavilla: https://co2data.fi/rakentaminen/
Irtolastialus	CO2data, 2023. Kuljetus, irtolastialus, bulk, keskikokoinen. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/
Kuljetus irtotavaralle (puoliperävaunuyhdistelmä)	CO2data, 2023. Puoliperävaunuyhdistelmä 40 t, 80 %. Maantieajo. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/ CO2data, 2023. Puoliperävaunuyhdistelmä 40 t, 0 %. Maantieajo. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/
Polttoaine (diesel)	CO2data, 2023. Dieselin hankinnan ja polttoaineen päästö. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/
Metallin jätekäsittely	CO2data, 2023. Waste processing, metal materials. Saatavilla: https://co2data.fi/rakentaminen/
Muovin jätekäsittely	CO2data, 2023. Waste processing, plastics (recycling). Saatavilla: https://co2data.fi/rakentaminen/

2.1.1.5 Sähkönsiirto maalla

Maalle sijoittuvista vaihtoehtoisista sähkönsiirtoreiteistä tarkasteltiin vaihtoehtoja SVE1a, SVE2b, SVE3a ja SVE4, jotka kaikki sisältävät sekä voimajohto- että maakaapeliosuuden. Kaikki laskettavat vaihtoehdot sisältyvät joko minimi- tai maksimivaihtoehtoon. Voimajohto-osuuden tietoja on esitelty taulukossa 2-12 ja maakaapeliosuuden tietoja taulukossa 2-13. Laskennassa voimajohdon elinkaari yhdenmukaistettiin tuuli-voimaloiden elinkaaren mittaiseksi, eli 35 vuodeksi.

Taulukko 2-12. Laskennassa käytetyt voimajohtoa koskevat oletukset. Laajennettava maastokäytävä tarkoittaa olemassa olevan voimalinjan viereen tulevaa uutta voimajohtoa.

Vaihtoehto	Voimajohdon kokonaispituus [km]	Uuden maastokäytävän pituus [km]	Uuden maastokäytävän leveys [m]	Laajennettavan maastokäytävän pituus [km]	Laajennettavan maastokäytävän leveys [m]	Pyl-väsväli [m]	Käyttöikä [v]
SVE1a, max	11,0	5,3	62	5,7	38	350	35
SVE2b, min	14,2	8,5	62	5,7	38		
SVE3a, max	71,3	57	62	14,3	34-41		
SVE4, min	35,4	24,7	62	10,7	34-45		

Taulukko 2-13. Laskennassa käytetyt maakaapelia koskevat oletukset.

Vaihtoehto	Maakaapelin kokonaispituus [km]	Maastokäytävän leveys [m]	Käyttöikä [v]
SVE1a, max	2,0	76 metriä, sisältäen kuuden rinnakkaisen maakaapeliojan poikkileikkauksesta tarvittavine työalueineen	35
SVE2b, min	2,0		
SVE3a, max	2,6		
SVE4, min	9,9		

Sähkönsiirron ilmastovaikutukset laskettiin julkisten lähteiden (EFLA 2018) ja AFRY Finlandin aiempiin vastaavatyypisiin hankkeisiin tekemien laskentojen pohjalta. Päästö-laskennassa käytettiin päästökertoimia useista eri lähteistä (Taulukko 2-14).

Taulukko 2-14. Laskentaan sisällytetyt päästölähteet ja niiden päästökerrointen lähteet.

Päästölähde	Käytetty tietolähde
Kaapeli	Midal Cables, EPD 2020. Teräsvahvistetut alumiinijohtimet (AACSR). Sveid Conductor. Saatavilla: https://api.environmentaldec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/63766e80-7e1f-485f-a985-efa9816fa31f/Data
Murske	CO2data, 2023. Murske (konservatiivinen arvo). Saatavilla: https://co2data.fi/rakentaminen/
Teräspylväs	CO2data, 2023. Teräsrakenne, kantava rakenne, pinnoitettu tai COR-TEN pinta (konservatiivinen arvo). Saatavilla: https://co2data.fi/rakentaminen/
Teräsbetoni	CO2data, 2023. Betonipaalu RTB-300 (konservatiivinen arvo). Saatavilla: https://co2data.fi/rakentaminen/
Harukset ja eristinketjut	CO2data, 2023. Teräsprofiili ja -verkko, kevytrakenteinen, sinkitty (konservatiivinen arvo). Saatavilla: https://co2data.fi/rakentaminen/
Maadoituskupari	CO2data, 2023. Kuparilanka (konservatiivinen arvo). Saatavilla: https://co2data.fi/rakentaminen/
Kuljetukset	CO2data, 2023. Maansiirtoautot 32 t, 50 % katuajo. Puolipe-rävaunuyhdistelmä 40 t, 40 % kuorma, maantieajo. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/
Nosturi	CO2-data, 2023. Nosturi. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/
Kaivinkone	CO2data, 2023. KKH 21, kaivinkone, tela-alustainen. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/
Hakkuukone	VTT Lipasto, 2021. Hakkuukoneet (Moto). Saatavilla: http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/
Moottorisaha ja raivaussaha	VTT Lipasto, 2021. Moottorisahat, ammattikäyttö. Saatavilla: http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/
Tarkastukset: Helikopteri	DEFRA, 2022. Aviation turbine fuel. Saatavilla: https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2022 EFLA, 2018. Helicopter fuel consumption. Saatavilla: https://www.statnett.no/contentassets/1aa0ae3324714e939efc762f029b0691/life-cycle-assessment-for-transmission-towers---a-comparative-study-of-three-tower-types.pdf

Päästölähde	Käytetty tietolähde
Tarkastukset: Mönkijä ja moottorikelkka	VTT Lipasto, 2017. Keskiarvo mönkijästä ja moottorikelkasta. Saatavilla: http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/
Puuston kaadon ja keräyksen nopeus	FAO 2022. Felling, Production rate, table 9./Extraction, productivity, table 10. Saatavilla: https://www.fao.org/3/y2698e/y2698e09.htm
Maatuulivoiman elinkaaren päästöt	Schlömer S., T. Bruckner, L. Fulton, E. Hertwich, A. McKinnon, D. Perczyk, J. Roy, R. Schaeffer, R. Sims, P. Smith, and R. Wiser, 2014: Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. IPCC. Table A. III. 2. Wind offshore

Laskentaan sisältyy paljon oletuksia, jotka esitellään seuraavaksi osa-alueittain.

Rakentaminen

Rakennusmateriaalien määrät ja työkoneiden (kaivinkone ja nosturi) käyttötunnit ovat etukäteisarvioita, jotka on kerätty aiemmissa laskennoissa sekä julkisista lähteistä. Laskennassa huomioitiin suurimmat materiaalivirrat, jotka koostuvat voimajohtojen osalta teräspylväistä, teräsbetonista, kaapeleista, murskeesta (60 % tiestä ja 40 % pylväisiin), haruksista, eristinketjuista ja maadoituskuparista. Maakaapelit koostuvat pääasiassa kaapelista, suojabetonilaatasta, suojamuoviputkesta ja murskeesta (60 %:a voimalinjaan käytettävästä murskeen määrästä per kilometri). Materiaalit voimajohdon rakentamista varten arvioitiin kuljetettavan 180 kilometrin säteeltä Infrarakentamisen Väyhäilisyys Arviointimenetelmän mukaisesti (*Väylävirasto 2023*). Murske arvioitiin hankittavan hankealueen läheisyydestä ja kuljetettavan keskimäärin 15 kilometrin säteeltä. Laskennassa huomioitiin menopaluumatkat.

Voimajohdon rakentamisessa kuluva työkoneiden käyttöaika arvioitiin norjalaisen voimajohtopylväiden LCA-raportin pohjalta (*EFLA 2018*). Koneiden käyttöajoiksi arvioitiin samat kuin lähteessä eli kaivinkoneen käyttöajaksi 40 h/pylväs ja nosturin käyttöajaksi 8 h/pylväs. Maakaapelille arvioitiin vain kaivinkonetyötunnit. Työkonetunteina käytettiin samaa määrää, mikä kuluisi saman pituisen voimalinjan rakentamiseen.

Voimajohtoalueen metsän hakkuun hiilijalanjälki laskettiin arvioidun hakattavan puuston kuutiomäärän ja FAO:n arvioiman hakkuunopeuden mukaisesti. Ilmajohtoalueen hakkuu oletettiin suoritettavan maata pitkin metsätyökoneella. Reunavyöhykkeiden puuston latvontaa ei huomioitu tässä työssä, mutta johtoauekan määrä laskettiin paikoin yliarvioin. Maakaapelialueen hakkuu oletettiin suoritettavan maata pitkin metsätyökoneella ilman reunavyöhykkeitä.

Käyttöaika

Sähkön siirron häviön kertoimena käytettiin samaa 4 %:n häviösähkön osuutta kuin merikaapeleilla. Häviösähkön määrän arvio vaihtelee lähteestä riippuen. Fingridin mukaan häviösähkön osuus kantaverkossa on 1,5 % (*Fingrid 2024*) ja IEA:n arvioima häviösähkön määrä kanta- ja jakeluverkossa on 4 % (*The World Bank 2018*). Päästökertoimena käytettiin IPCC:n elinkaaren aikaista päästökeroa merituulivoimaille tuotetulle sähkölle.

Voimajohdon korjaamisesta aiheutuva materiaalikulutus ja jätteen määrä arvioitiin niin, että terästä, kaapeleita, haruksia ja eristeketjuja täytyy vaihtaa yhteensä 1 % voimajohdon rakentamiseen kuluneista materiaaleista per käyttövuosi. Arvio perustuu aiemmissa laskennoissa saatuihin tietoihin ja sen suuruus perustuu teräspylväiden suureen massaan. Samalla periaatteella arvioitiin myös nosturia tarvittavan huoltoihin 1 % verrattuna rakentamisen tarpeeseen per käyttövuosi. Maakaapelin korjaamisessa vaihdettavien materiaalien määrän arvioitiin olevan 0,5 % vuodessa, pohjautuen ilmajohdon huollon arvioon. Määrä arvioitiin puolet pienemmäksi, sillä maakaapelin tapauksessa ei käytetä suuria teräspylviä. Materiaalien päästöistä arvioitiin A1–A3-moduulien tasoiset päästöt (Taulukko 2-2). Vaihdetut materiaalit arvioitiin kuljetettavan kierrätykseen Vaasaan noin 20 km päähän. Laskennassa huomioitiin menopaluumatka. Materiaalien valmistuksen osalta käytettiin samoja päästökertoimia kuin rakentamisen aikaisissa vaiatuksissa.

Voimajohdon tarkastusvälit ja tarkastuksista aiheutuvat päästöt arvioitiin norjalaisen voimajohtopylväiden LCA-raportin pohjalta (EFLA 2018). Työsuoritteista on vähennetty Suomen tasaisemmasta pinnanmuodosta johtuen 10 %. Tarkastukset arvioitiin tehtävän LCA-raportin mukaisesti monikijällä/moottorikelkalla tai helikopterilla. Maakaapelin tarkastuksista aiheutuvat päästöt arvioitiin kokonaisuuden kannalta merkityksettömiksi.

Johtoalueen aluskasvillisuuden raivaus oletettiin tehtävän noin 8,5 vuoden välein. Reunavyöhykkeiden puuston latvontaa ei huomioitu tässä työssä, mutta johtoaukean määrä laskettiin paikoin yliarvioin. Laskennassa raivaus arvioitiin tehtävän raivaussahalla.

Käytöstä poisto

Purkamiseen kuluvan polttoaineen kulutuksen arvioitiin olevan EFLA:n (2018) raportissa esitetyn Statnetin arvion mukainen. Raportissa purkamisen polttoaineen kulutuksen arvioitiin olevan 20 % rakentamiseen kuluvan polttoaineen kulutuksesta. Tässä työssä purkamisen oletetaan tapahtuvan samoilla työkaluilla kuin rakentamisen eli nosturilla (voimajohto) ja kaivinkoneella (voimajohto ja maakaapeli). Arvioitu polttoaineen kulutus sisältää myös mahdolliset pienimuotoiset maisemointityöt.

Syntyvän purkujätteen määräksi oletettiin pääasiassa yhtä paljon materiaalia kuin mitä käytettiin rakentamiseen, pois lukien kuitenkin käytetty teräsbetoni ja murske. Kyseinen rajausta tehtiin sillä oletuksella, ettei kaikkea teräsbetonia pystytäkään kaivamaan pois maasta, joten sen mahdolliseksi keräysasteeksi arvioitiin 10 % rakentamiseen käytetävästä määrästä. Murske oletettiin jätettävän maahan. Kerätyt materiaaliavirrat arvioitiin toimitettavan kierrätykseen keskimäärin noin 80 km päähän. Laskennassa huomioitiin menopaluumatka.

2.1.1.6 Maasähköasema

Maasähköasemien päästöt arvioitiin materiaaliperusteisesti. Oheisessa taulukossa (Taulukko 2-15) on esitetty laskennassa käytetyt oletukset. Määrät arvioitiin pääosin hankekehittäjän toimesta valistunein arvioin. Kuljetukset arvioitiin kahteen suuntaan.

Maasähköaseman päästöt ovat samat jokaisessa hankevaihtoehdossa, jossa tuotetaan sähköä.

Taulukko 2-15. Maasähköaseman ilmastovaikutusten laskennassa käytetyt oletukset.

Oletus	SVEt
Maasähköasemien määrä [kpl]	2
Käyttöikä [v] (hiilinielujen arviointia varten yhdenmukainen voimajohtojen kanssa)	35
<i>Rakentaminen</i>	
Teräsmäärä sähköasemiin [t]	3 160
Betonimäärä sähköasemiin [t]	44 600
Kuparimäärä sähköasemiin [t]	2 640
Muuntajaöljy sähköasemiin [t]	840
Muovi sähköasemiin [t]	160
Kuljetukset ulkomaille [km/suunta]	1500
- Kuljetus laivalla - Kuljetus rekalla	1200 300
Kuljetukset kotimaassa [km/suunta]	100
Sähköasemien rakentamisen polttoainekulutus [m3]	50
<i>Käytön aika</i>	
SF6-kaasu [kg/a]	2
<i>Käytöstä poisto</i>	
Käytöstä poiston polttoainekulutus [m3]	10
Materiaalien kuljetus kierrätykseen (kaikki materiaalit arvioidaan kierrätettävän/käsiteltävän) [km/suunta]	80

Käytetyt päästökertoimien lähteet on esitetty oheisessa taulukossa (Taulukko 2-16).

*Taulukko 2-16. Maasähköasemien laskentaan sisällytettyjen päästölähteiden päästöker-
toimet, muut muuttujat ja niiden lähteet.*

Päästölähde	Käytetty tietolähde
Teräs	CO2data, 2023. Teräslevy katteisiin ja seiniin, kuumasinkitty, maalattu tai maalaamaton tai COR-TEN pinnalle. Saatavilla: https://co2data.fi/rakentaminen/
Betoni	CO2data, 2023. Teräsbetoninen lyöntipaalu RTC-350-16. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/
Muuntajaöljy	DEFRA, 2023. Conversion factors 2023. Fuels. Fuel oil.
Kupari	CO2data, 2023. Infra. Kuparilanka. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/
Muovi	CO2data, 2023. Infra. Kaapelin suojaputki, TEL, PE tupla, 75/62 mm, A. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/
SF6-kaasun määrä sähköase- massa	Pusa, 2020. Jakeluverkkoyhtiön sähköasemahankinnan ko- jeistomäärittelyt. DI-työ. Saatavilla: https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161136/Diplomi-tyo_Pusa_Erkki.pdf?sequence=1
SF6-kaasu	GHG Protocol. AR5 SF6 value. Saatavilla: https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Va-lues%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf
Konttialus	CO2data, 2023. Transport, container ship, 1 000 TEU. Saata- villa: https://co2data.fi/rakentaminen/
Kuljetus irtotavaralle (puolipe- rävaunuyhdistelmä)	CO2data, 2023. Puoliperävaunuyhdistelmä 40 t, 80 %. Maan- tieajo. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/ CO2data, 2023. Puoliperävaunuyhdistelmä 40 t, 0 %. Maan- tieajo. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/
Kuljetus kierrätykseen (puoli- perävaunuyhdistelmä)	CO2data, 2023. Puoliperävaunuyhdistelmä 40 t, 80 %. Katu- ajo. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/ CO2data, 2023. Puoliperävaunuyhdistelmä 40 t, 0 %. Katuajo. Saatavilla: https://co2data.fi/infra/
Polttoaine (diesel)	CO2data, 2023. Dieselin hankinnan ja polton päästö. Saata- villa: https://co2data.fi/infra/
Metallin jätekäsittely	CO2data, 2023. Waste processing, metal materials. Saata- villa: https://co2data.fi/rakentaminen/

Päästölähde	Käytetty tietolähde
Betonin jätekäsittely	CO2data, 2023. Waste processing, concrete materials. Saatavilla: https://co2data.fi/rakentaminen/
Muovin jätekäsittely	CO2data, 2023. Rakentaminen. Waste processing, plastics (recycling). Saatavilla: https://co2data.fi/rakentaminen/

2.1.1.7 Hiilinielu ja -varastot ja niiden menetys

Sähkönsiirtoreittien rakentaminen edellyttää puuston poistoa ja raivausta. Reunavyöhykkeiden puuston latvontaa ei huomioitu tässä työssä, mutta johtoaukean määrä laskettiin sitä paikaten paikoin yliarvioiden. Johtoaukea pidetään avoimena raivaamalla sitä 7–10 vuoden välein voimajohdon elinkaaren ajan (tässä laskennassa 35 vuotta). Näiden toimien vaikutuksia alueiden hiilinieluihin ja -varastoihin on arvioitu taulukossa 2-17.

Taulukko 2-17. Hankekokonaisuuden vaikutus hiilitaseeseen.

Vaikutus	Syntytapa
Hiilinielun menetys	Puuston hakkuu poistaa puiden kasvusta muodostuvan nielun rakennuspaikoilta
	Hakkuut vaikuttavat maaperän hiilinielua pienentävästi
	Maanmuokkaukset muuttavat hiilitasetta
Hiilivaraston menetys	Puustoon sitoutunut hiili menetetään hakkuiden yhteydessä
	Maaperästä vapautuu hiiltä hakkuualueilla, erityisesti turvemaalla

Puuston hakkuusta johtuvat hiilivarastojen ja -nielujen menetykset on laskettu Luonnonvarakeskuksen metsävaratilastojen perusteella (Luke 2023). Puuston hehtaarimäärät on arvioitu suoraan maankäytön mukaan, mikä voi tuoda yliarviota. Käytettyinä Luken tilastoina olivat puuston keskitilavuus metsämaalla (m³/ha) sekä puuston vuotuinen kasvu metsämaalla (m³/ha/vuosi). Oletuksena on, että puusto on maakunnan keskiarvon kokoista ja ikäistä puustoa. Molemmat tilastot koskivat Pohjanmaan aluetta.

Muita puuston laskennassa käytettyjä lukuarvoja olivat:

- Puuston biomassan määrä runkopuutilavuutta kohden on noin 0,76 t/m³ havupuiden ja noin 0,75 t/m³ lehtipuiden osalta (useita lähteitä, mm. Lehtonen ym. 2004).
- Noin 50 % puun biomassasta on hiiltä
- Puustoon sitoutuvan hiilidioksidin suhde hiilidioksidin on 3,7 (IPCC 2007)
- Pohjanmaan puustosta havupuiden osuus on noin 79 % ja lehtipuiden osuus 21 % (Luke 2023)

Maaperän hiilinielun menetyksen laskennassa hyödynnettiin tutkimusta hiilivarastojen muutoksesta eri puolilla Suomea (Lindroos ym. 2022). Tutkimuksen mukaan maaperän hiilivaraston pienenemistä aiheuttavat luontaiset tuhot ja puuston poisto sekä suuri

metsän karikkeen määrä korreloi metsämaan hiilivaraston kanssa. Keskimääräinen tulos metsämaan (orgaaninen kerros ja kivennäismaa yli 40 cm syvyydelle) hiilivaraston vuotuiselle kasvulle oli 36 grammaa per m². Tätä tulosta on hyödynnetty tämän työn maaperän hiilinielun menetyksessä, vaikkakin sen käyttäminen tuo yliarviota sen vuoksi, ettei voida tietää millä tasolla maaperän hiilivuo muuttuu avohakkuun myötä. Kuten tutkimuksessa on huomioitu, tarvitaan edelleen lisätutkimusta, jotta saadaan selville tietoa avohakkuun jälkeisen maaperän hiilivaraston kehityksestä, kuten kuinka kauan maaperän hiilivarasto pienenee ja aiheuttaa päästöjä hakkuun jälkeen.

2.1.1.8 VE0 – sähkön ja vedyn tuotannon hyödyt

VE0 kuvastaa tilannetta, jossa tätä hanketta ei toteuteta ja tuotettava tuote tehdään tai tuotetaan jollain muulla tavalla. VE0:n päästöt riippuvat siitä, mitä tuotetta tuulivoimailoilla tullaan tuottamaan. Vaihtoehdot ovat sähkö ja vety ja niiden sekatuotanto on yksi todennäköinen vaihtoehto. Tässä laskennassa laskettiin ääripään (minimi-maksimi) vaihtoehdot, joissa tuotetaan 100 % sähköä tai 100 % vetyä.

100 %:n sähköntuotannon skenaariossa VE0:n päästöt laskettiin Suomen ympäristökeskuksen vuonna 2020 julkaisemilla sähkönkulutuksen hyödynjakomenetelmän mukaisilla ominaispäästöillä. Kyseinen ennuste on tehty vuosille 2020–2120 ja se on määritetty kotimaisessa energiantuotannossa syntyvien kasvihuonekaasupäästöjen ja kulutukseen siirretyn energian perusteella. Skenaariossa sähkön päästöjen oletetaan pienenevän vuosien saatossa ja kulutetun sähkön määrän oletetaan kasvavan. SYKE:n skenaario ottaa huomioon sähköntuotannon elinkaaren aikaiset päästöt ja tämän vuoksi sähkön ei oleteta muuttuvan täysin päästöttömäksi tällä ajanjaksolla. VE0:n ennuste kuvastaa päästöjä, jotka syntyisivät tuulivoiman elinkaaren aikana (35 vuotta), mikäli korvaava sähkö tuotettaisiin SYKE:n skenaarion mukaisella verkkosähköllä. (*Suomen ympäristökeskus 2020*)

100 % vedyntuotannon skenaariossa VE0 laskettiin kolmessa tilanteessa, joista kahdessa tuotetaan vetyä 35 vuoden ajan (nykytilassa tavanomaisilla tuotantotavoilla ja ennustetun verkkosähkön avulla, ottamatta huomioon vedyn käyttötapaa) ja kolmannessa skenaariossa käytetään LNG:tä meriliikenteen polttoaineena 35 vuoden ajan.

Vedyn tavanomaisten tuotantotapojen tilanteessa päästökertoimeksi valittiin IEA:n arvioima keskimääräinen nykyinen vedyntuotannon päästö, joka on 12,8 kgCO₂e/kg vetyä (*IEA 2023*), joka on puolestaan muunnettuna 233 tCO₂e/GWh kulutettua sähköä. Päästöä nostaa esimerkiksi se, että nykyisin vetyä vielä tuotetaan paljon maakaasun höyryreformoinnilla. Toisena vaihtoehtona vetyä oletetaan tuotettavan veden elektrolyysillä, jossa käytetään edellä esitettyjä ennustetun sähkön ominaispäästöjä. Tämä laskentatapa ottaa huomioon vain sähkön käytön päästöt, muttei vedyntuotannon muita päästöjä. Laskenta kuitenkin antaa suuntaa päästöistä, sillä veden elektrolyysin päästöt koostuvat valtaosin sähkön käytön päästöistä. Kappaleessa 2.5.2 kokonaistulosta on myös sanallisesti vertailtu tilanteeseen, jossa vetyä tuotetaan vähempipäästöistä sähköä hyödyntäen.

Kolmannessa vetyskenaariossa VE0:n lähtökohtana on tilanne, jossa vetyä käytettäisiin sellaisenaan laivojen polttoaineena. LNG valikoitui vertailukohteeksi, sillä sen arvioitiin antavan suhteellisen pitkäikäisen vertailukohteen vetypolttoaineen käytölle olematta liian suuri päästölähde verrattuna esimerkiksi polttoöljyyn ja olemalla potentiaalinen kilpailija meriliikennepolttoaineiden markkinoilla. LNG:n päästökertoimina käytettiin DEF-RAn LNG:n polton (0,184 tCO₂e/kWh) ja tuotannon (0,06512 tCO₂e/kWh) päästöjä (*DEFRA 2023*).

VE0:n tuloksia tulkittaessa on huomioitava, että ne perustuvat arvioihin ja oikeaan toteutumiseen vaikuttaa mm. se, kuinka paljon uusiutuvaa sähköä tuotetaan tulevaisuudessa, kuinka paljon valtakunnallinen sähkönkulutus kasvaa, minkälaista sähköä ulkomailta ostetaan, mihin käyttökohteeseen verrataan ja mikä on vedyn lopullinen käyttökohde.

2.2 Nykytila

2.2.1 Ilmasto

Laineen merituulivoimapuiston hankealue sijaitsee keskiboreaalisella ilmastovyöhykkeellä (Ilmatieteen laitos 2022). Vuoden 2022 keskilämpötila oli Pietarsaaressa noin 4,6 °C, joka on 0,5 °C vertailukauden 1991–2020 keskiarvoa korkeampi. Vuotuinen sademäärä oli samana vuonna 558 mm ja siten noin kolme prosenttia vertailukauden keskiarvoa alhaisempi. (Ilmatieteen laitos 2023)

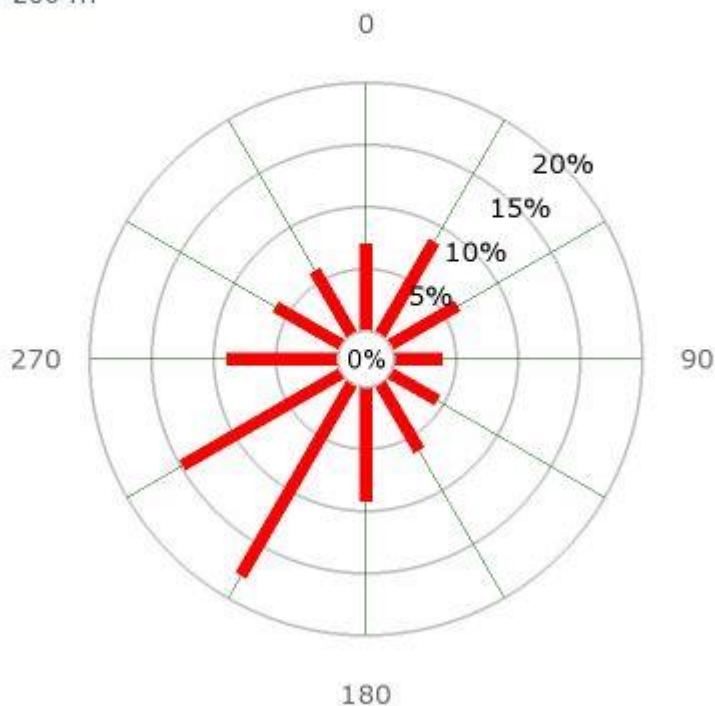
Vallitseva tuulensuunta hankealueella on lounaasta (Kuva 2-3). Keskimääräinen tuulen nopeus on 100 metrin korkeudella noin 9,1 m/s ja 200 metrin korkeudella noin 9,8 m/s. (Tuuliatlas 2023)

Tuuliruusu

Paikka (WGS84): 63.67832 p, 21.74650 i

Korkeus: 200 m

Vuosi



Kuva 2-3. Tuulen suhteelliset osuudet eri suunnista hankealueella 200 metrin korkeudella (Tuuliatlas 2023).

2.2.2 Kansainväliset, kansalliset ja alueelliset tavoitteet

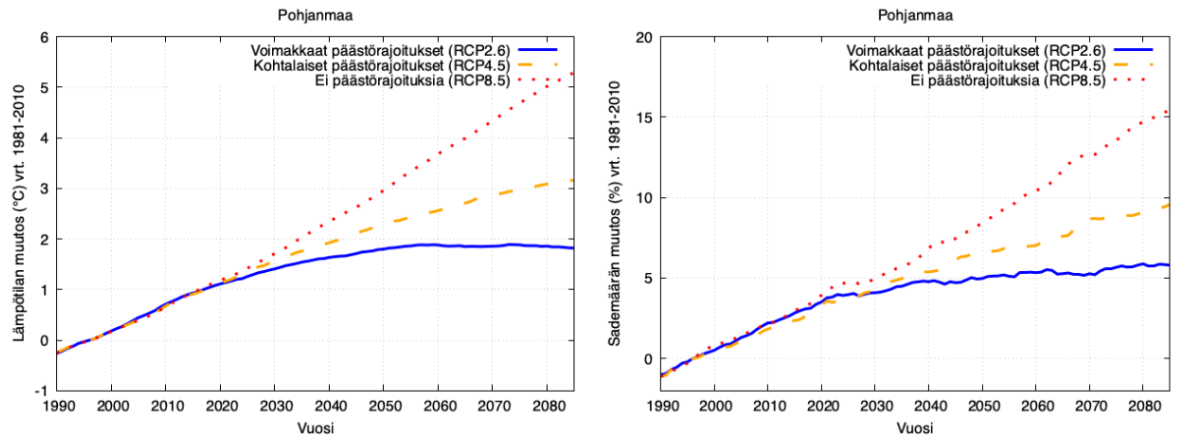
EU:n ilmastopolitiikalla ohjataan EU-alueen yhteisiä ja jäsenmaiden poliittisia toimia ilmastomuutoksen hillitsemiseksi ja siihen sopeutumiseksi. EU on sitoutunut vähentämään kasvihuonepäästöjä vähintään 55 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 ja EU:n tavoitteena on olla ilmastoneutraali vuoteen 2050 mennessä. Uusiutuvalle energialle EU tavoittelee 32 prosentin osuutta kulutetusta energiasta vuoteen 2030 mennessä. (*Ympäristöministeriö 2023a*)

Kansallinen uudistettu ilmastolaki (423/2022) astui voimaan 1.7.2022. Uuden ilmasto-lain mukaan vuoteen 2030 mennessä kasvihuonekaasupäästöjä on vähennettävä vähintään 60 prosenttia, vuoteen 2040 mennessä vähintään 80 prosenttia ja vuoteen 2050 mennessä vähintään 90 prosenttia verrattuna vuoteen 1990. Lisäksi Suomen tavoitteena on lain mukaan olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä ja hiilinegatiivinen pian sen jälkeen. Laki laajeni koskemaan myös maankäyttösektoria ja siihen on lisätty nielujen vahvistamista koskeva tavoite. (*Ympäristöministeriö 2023b*)

Pohjanmaan maakunnan vuoden 2016 ilmastostrategiaan sisältyvässä Energiarannikko 2040 -visiossa on asetettu tavoitteiksi kestävä energiajärjestelmä, optimoitu yhdyskuntarakenne, jätteenkäyttö, osaaminen, yhteistyö ja kunnioitus sekä ilmastoälykäs maaseutu. Toimenpiteinä kestävä energiajärjestelmän luomiseksi mainitaan lisääntyneet energiatehokkuus ja vähentynyt energiankulutus, älykkäät sähköverkot hajautetun sähköntuotannon mahdollistamiseksi sekä biopolttoainetasemien verkosto. Visioon sisältyy kokonaan uusiutuviin energianlähteisiin perustuva energiaomavaraisuus. (*Pohjanmaan liitto 2016*)

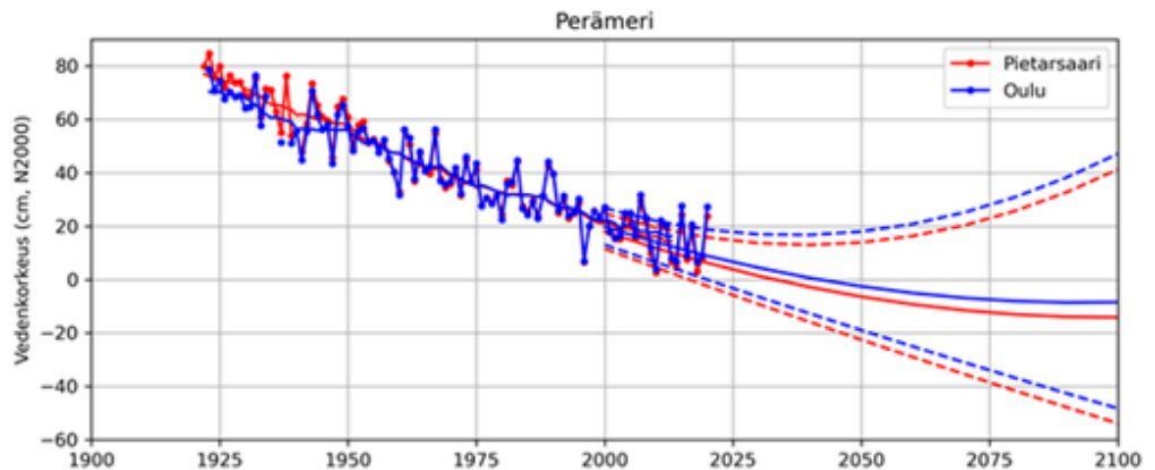
2.2.3 Yleiset ennusteet ilmastomuutoksen aiheuttamista vaikutuksista

Ennusteiden mukaan Pohjanmaan ilmasto lämpenee noin 1,9–5,2 °C ja sademäärä kasvaa 6–15 % kuluvaan vuosisatana verrattuna ajanjaksoon 1981–2010 (Kuva 2-4). Lämpeneminen riippuu maailmanlaajuisesta kasvihuonekaasupäästöjen kehityksestä, jota on ennustettu RCP-skenaarioiden avulla. RPC2.6-skenaariossa päästöt kääntyvät jyrkkään laskuun jo vuoden 2020 jälkeen ja ovat vuosisatamme lopulla lähellä nollassa. RCP4.5-skenaariossa päästöt kasvavat aluksi hieman mutta kääntyvät laskuun vuoden 2040 tienoilla. RCP8.5-skenaariossa kasvihuonekaasupäästöjen kasvu jatkuu nopeana tulevaisuudessakin. (*Ilmasto-opas 2022*) Merellä vaikutukset voivat olla erilaisia verrattuna mantereeseen.



Kuva 2-4. Vuotuisen keskimääräisen lämpötilan ja sademäärän arvioidut muutokset Pohjanmaan erilaisten kasvihuonekaasupäästöjen kehityskulkujen mukaan vuoteen 2085 asti. Muutos on verrattu ajanjaksoon 1981–2010. (Ilmasto-opas 2022)

Merenpinnan korkeus on laskenut Perämerellä maankohoamisen vuoksi noin 70 cm viime vuosisadalla, mutta lasku on hidastunut globaalin merenpinnan nousun vaikutuksesta (Kuva 2-5). Noin RPC2.6- ja RPC4.5-tasoisissa skenaarioissa lasku jatkuisi vuosisadan loppuun asti, jolloin korkeus olisi noin 20–60 cm nykyistä alempi. Korkeimmassa RPC8.5-skenaariossa merenpinta taas nousisi noin 30 cm nykyisestä. (Gregow ym. 2021)



Kuva 2-5. Perämeren merenpinnan korkeus ja arvio korkeuden muutoksesta eri ilmastoskenaarioilla. (Gregow ym. 2021)

2.3 Vaikutusten arviointi

2.3.1 Merituulivoimapuisto

Merituulivoimapuiston päästöihin kuuluvat vahvasti tuulivoimaloiden ja sen lähialueelle sijoittuvien toimintojen, kuten alueen kaapeleiden ja perustuksien päästöt (pl. sähkönsiirto rakenteet merituulivoimapuistolta mantereen voimajohtoreiteille). Molemmissa hankevaihtoehdoissa on tarkoituksena tuottaa sähköä 11 000 GWh vuodessa.

Päästölaskennan pohjautuessa tuotantomääräperusteiseen laskentaan voidaan todeta rakentamisen aikaisten ilmastovaikutusten olevan yhtä suuret hankevaihtoehtoissa VE1 ja VE2. Merituulivoimapuiston eri osa-alueiden päästöt on esitetty seuraavassa taulukossa (Taulukko 2-18).

Taulukko 2-18. Merituulivoimapuiston päästöt

Elinkaaren osio	Merituulivoimapuiston päästöt VE1/VE2 [tCO ₂ e]
Rakentamisen aikaiset päästöt	3 248 800
Toiminnan aikaiset päästöt	311 100
Käytöstä poiston aikaiset päästöt	33 800
Yhteensä	3 593 700

Rakentamisen aikaiset vaikutukset kattavat merituulivoimaloiden rakentamisesta (sis. materiaalien ja osien valmistamisesta) syntyvät päästöt. Rakentamisen aikaisten kasvi-huonekaasupäästöjen on arvioitu elinkaarilaskennan perusteella kattavan noin 96 % merituulivoimaloiden kokonaiselinkaaripäästöistä. Päästöjä arvioidaan syntyvän rakentamisvaiheessa noin 8,44 tCO₂e/GWh.

Toiminnan aikaiset vaikutukset kuvaavat tuulivoimapuiston huollosta ja ylläpidosta aiheutuvia päästöjä. Niitä syntyy esimerkiksi tarkastuskäynneistä sekä osien vaihtoihin liittyvistä materiaalien kulutuksesta, kuljetuksista ja jätehuollosta. Toiminta aiheuttaa tuulivoiman elinkaaren aikaisista päästöistä noin 3 %. Päästöjä arvioitiin syntyvän toiminnan aikana 0,81 tCO₂e/GWh.

Toiminnan päättyessä tuulivoimalat puretaan ja suurin osa komponenteista kuljetetaan pois ja kierrätetään. Toiminnan jälkeisiin vaikutuksiin laskettiin voimaloiden purkamisesta ja komponenttien kierrättämisestä syntyvät päästöt. Lasketut toiminnan päättymisen jälkeiset vaikutukset ovat noin 1 % elinkaaren aikaisista vaikutuksista. Päästöjä arvioitiin syntyvän toiminnan päättymisen jälkeen 0,09 tCO₂e/GWh.

2.3.2 Sähkönsiirto merellä ja merisähköasemat

Sähkönsiirto merellä kattaa merikaapelit ja merellä olevat merisähköasemat. Kokonaistuloksiin laskettiin minimi- ja maksimikombinaatioiden päästöt, kun toteutetaan 10 merikaapelin rakentaminen kahdella sähkönsiirtoreitillä. Minimi- ja maksimilaskennan tavoitteena on saada selville päästöjen vaihteluväli. Molemmissa kombinaatioissa on mukana sama määrä sähköasemia (6 kpl).

Eri reittivaihtoehtojen päästöerot syntyvät sähkönsiirron materiaalitarpeesta, johon vaikuttaa sähkönsiirtoreitin pituus. Mitä pidempi sähkönsiirron reitti on, sitä enemmän materiaalia sen rakentamiseen tarvitaan. Minimi- ja maksimipäästöjen eroavaisuuksiin vaikuttavat ennen kaikkea erot käytön aikaisissa sähkönsiirtohäviöistä syntyvissä päästöissä. Sähkönsiirtohäviöiden päästöt ovat teoreettisia ja ne jaetaan koko sähkönsiirtoinfran (merikaapeli + maakaapeli + voimajohto) kesken pituuden perusteella. Lisäksi kombinaatioiden vuoksi on otettu huomioon se, että sähköä siirretään kahta reittiä pitkin. Tällöin sähkönsiirtohäviö on jaettu tasan eri reittien kesken.

Merikaapelien päästöt on esitetty oheisessa taulukossa (Taulukko 2-19). Minimikombinaatioon sisältyvien vaihtoehtojen MVE2B ja MVE5B elinkaaren kasvihuonekaasupäästöt ovat noin 94 100 ja 75 500 tCO₂e. Yhteensä vaihtoehtojen päästöt ovat noin 169 600 tCO₂e. Maksimikombinaatioon sisältyvien vaihtoehtojen MVE1A ja MVE3 kokonaispäästöt ovat noin 108 600 ja 61 200 tCO₂e ja niiden yhteenlasketut päästöt ovat noin 169 800 tCO₂e.

Taulukko 2-19. Merikaapeleiden päästöt.

Hankevaihtoehto	MVE2B (sis. minimi- kombinaatioon)	MVE5B (sis. minimi- kombinaa- tioon)	MVE1A (sis. maksimi- kombinaa- tioon)	MVE3 (sis. maksimi- kombinaa- tioon)
Rakentamisen aikaiset päästöt	30 000	31 200	33 200	30 100
Toiminnan aikaiset päästöt	61 600	41 600	72 300	28 500
Käytöstä poiston aikaiset päästöt	2 600	2 800	3 100	2 600
Yhteensä	94 100	75 500	108 600	61 200
Kombinaatio yhteensä	169 600		169 800	

Rakentamisen päästöt, eli päästöt materiaalien valmistuksesta, kuljetuksesta ja rakentamisen polttoainekulutuksesta, ovat laskennallisesti 31–49 % merikaapeleiden kokonaispäästöistä eri reittivaihtoehdoissa. Toiminnan aikaiset päästöt, eli päästöt sähkönsiirtohäviöistä ja huollon polttoainekulutuksista, ovat laskennallisesti 47–67 % kokonaispäästöistä. Käytöstä poiston päästöt, eli päästöt purkamisen polttoainekulutuksista, kierrätyksestä ja kuljetuksista kierrätykseen, ovat laskennallisesti 3–4 % kokonaispäästöistä.

Merisähköasemien päästöt ovat jokaisessa hankevaihtoehdossa samat kombinaatiosta riippumatta (Taulukko 2-20).

Taulukko 2-20. Merisähköasemien päästöt.

Elinkaaren osio	Merisähköasemien päästöt [tCO ₂ e]
Rakentamisen aikaiset päästöt	64 200
Toiminnan aikaiset päästöt	8 800
Käytöstä poiston aikaiset päästöt	1 300

Elinkaaren osio	Merisähkösäemien päästöt [tCO ₂ e]
Yhteensä	74 300

Merisähkösäemien päästöt koostuvat enimmäkseen rakentamisesta. Rakentamisen päästöt ovat noin 86 % merisähkösäemien kokonaispäästöistä ja ne sisältävät materiaalien valmistamisen ja kuljetuksen päästöt. Toiminnan ajan päästöt ovat noin 12 % ja ne koostuvat rikkihäksäfluoridin (SF₆) suorista päästöistä. Käytöstä poiston aikaiset päästöt ovat noin 2 % kokonaispäästöistä ja ne koostuvat purkamisen, kierrätyksen ja kierrätykseen kuljettamisen päästöistä.

2.3.3 Vedyn tuotanto

Vedyn tuotannon päästöt ovat samat jokaisessa hankevaihtoehdossa, joten ne esitellään samassa taulukossa (Taulukko 2-21).

Taulukko 2-21. Vedyn tuotannon päästöt.

Elinkaaren osio	Vedyn tuotannon päästöt [tCO ₂ e]
Rakentamisen aikaiset päästöt	64 200
Toiminnan aikaiset päästöt	4 800
Käytöstä poiston aikaiset päästöt	1 300
Yhteensä	70 400

Rakentamisen aikaiset vaikutukset kattavat vetyvoimaloiden rakentamisesta syntyvät päästöt materiaalien valmistuksesta (teräkset ja betoni), materiaalien kuljetuksen sekä rakentamisen polttoainekulutuksen. Rakentamisen aikaiset kasvihuonekaasupäästöjen on arvioitu elinkaarilaskennan perusteella kattavan 91 % vetyvoimaloiden elinkaari-päästöistä.

Toiminnan aikaiset vaikutukset kuvaavat vedyntuotantoalueella olevien huoltoalusten polttoainekulutuksesta syntyviä päästöjä. Toiminta aiheuttaa vetyvoimaloiden elinkaaren aikaisista päästöistä 7 %.

Toiminnan päättyessä vetyvoimalat puretaan ja niissä käytetyt materiaalit kierrätetään. Toiminnan jälkeisiin vaikutuksiin laskettiin purkamisen polttoainekulutus ja purettujen materiaalien kierrätys ja kuljetukset lähimpään jätekeskukseen. Lasketut toiminnan päättymisen jälkeiset vaikutukset ovat 2 % vedyn tuotannon elinkaaren aikaisista vaikutuksista.

2.3.4 Vedynsiirto merellä

Vedynsiirron päästöt koostuvat vetyputken rakentamisen, huollon, purkamisen sekä kierrätyksen päästöistä, jotka on esitetty oheisessa taulukossa (Taulukko 2-22).

Taulukko 2-22. Vedynsiirron päästöt.

Elinkaaren osio	Vedynsiirron päästöt, VVE2/VVE3, minimi [tCO ₂ e]	Vedynsiirron päästöt, VVE1, maksimi [tCO ₂ e]
Rakentamisen aikaiset päästöt	88 800	108 000
Toiminnan aikaiset päästöt	1 000	1 200
Käytöstä poiston aikaiset päästöt	13 900	16 900
Yhteensä	103 700	126 100

Rakentamisen päästöt koostuvat materiaalien valmistamisesta ja kuljetuksesta sekä rakentamisen polttoaineiden päästöistä. Rakentamisen päästöt ovat laskennallisesti noin 86 % vedynsiirron kokonaispäästöistä. Vetyputkien peittoon käytetään lisäksi kiviainesta, jota ei ole otettu laskennoissa huomioon. Vetyputkiin käytettävä kiviainemäärä on pienempi kuin esimerkiksi merikaapeleiden peittoon käytettävän kiviaineksen määrä.

Toiminnan aikaiset päästöt kuvaavat huollon polttoainepäästöjä. Käytetty sähkö oletettiin olevan itse tuotettua sähköä. Toiminnan ajan päästöt ovat laskennallisesti noin 1 % vedynsiirron kokonaispäästöistä.

Käytöstä poiston päästöihin kuuluvat purkamisen polttoainepäästöt sekä kierrätyksen ja jätekuljetuksen päästöt merellä ja maalla. Käytöstä poiston päästöt ovat laskennallisesti noin 13 % vedynsiirron kokonaispäästöistä.

2.3.5 Vedyn varastointi

Vetysäiliöt ovat maalle sijoitettavia vedyn varastoja ja niiden päästöt on esitetty seuraavassa taulukossa (Taulukko 2-23).

Taulukko 2-23. Vetysäiliöiden päästöt.

Elinkaaren osio	Vetysäiliöiden päästöt [tCO ₂ e]
Rakentamisen aikaiset päästöt	5 300
Toiminnan aikaiset päästöt	-
Käytöstä poiston aikaiset päästöt	5
Yhteensä	noin 5 300

Rakentamisen päästöt koostuvat materiaalien valmistuksesta ja niiden kuljetuksista (lähes 100 % vetysäiliöiden kokonaispäästöistä). Toiminnan aikaisia päästöjä ei tässä laskennassa määritetty. Toiminnan aikaiset päästöt eivät todennäköisesti ole

kokonaispäästöissä määrällisesti kovin merkittäviä. Purkamisen päästöt koostuvat materiaalien kierrätyksen ja kierrätykseen kuljetuksen päästöistä (<1 % vetysäiliöiden kokonaispäästöistä).

2.3.6 Mantereen sähköasema

Suurin osa mantereen sähköaseman päästöistä syntyy rakentamisen aikana. Tässä hankkeessa oletettiin rakennettavan kaksi mantereen sähköasemaa, joiden elinkaaren aikaiset päästöt ovat yhteensä noin 34 900 tCO₂e. Maasähköaseman päästöt on jokaisessa hankevaihtoehdossa samat, joten ne esitellään yhdessä taulukossa (Taulukko 2-24)

Taulukko 2-24. Maasähköasemien päästöt.

Elinkaaren osio	Maasähköasemien päästöt [tCO ₂ e]
Rakentamisen aikaiset päästöt	32 600
Toiminnan aikaiset päästöt	1 300
Käytöstä poiston aikaiset päästöt	1 000
Yhteensä	34 900

Mantereen sähköaseman rakentamisen aikaiset päästöt koostuvat käytetyistä materiaaleista, (kuten teräksestä, betonista, kuparista, muuntajaöljystä ja muovista), niiden kuljetuksesta ja rakentamiseen käytetystä polttoaineesta. Rakentamisen päästöt ovat noin 95 % mantereen sähköasemien kokonaispäästöistä.

Toiminnan aikaisissa päästöissä on mukana arvioitu 35 vuoden aikana haihtuvan SF₆-kemikaalin määrä. Siitä aiheutuvat päästöt ovat 4 % maasähköaseman kokonaispäästöistä.

Käytöstä poiston päästöihin kuuluu purkamisen polttoainekulutus sekä purettujen materiaalien kierrätys ja kuljetus lähimpään jätekeskukseen. Käytöstä poiston päästöjen osuus on noin 2 % maasähköasemien kokonaispäästöistä.

2.3.7 Sähkönsiirto mantereella

Sähkönsiirto mantereella kattaa maakaapelit ja voimajohdot. Päästöarvioinnissa laskettiin eri sähkönsiirtokombinaatioiden minimi- ja maksimivaikutukset tilanteessa, jossa toteutetaan kaksi sähkönsiirtoreittiä. Minim- ja maksimilaskennan tavoitteena oli saada selville päästöjen vaihteluväli. Mantereen sähkönsiirtovaihtoehdoista SVE2b ja SVE4 kuuluvat minimikombinaatioon ja SVE1a ja SVE3a maksimikombinaatioon, joten tulokset esitettiin vain näiden vaihtoehtojen osalta.

Kuten meren sähkönsiirron osalta, myös mantereen sähkönsiirron päästöt riippuvat materiaalitärpeestä, johon vaikuttaa sähkönsiirtoreitin pituus. Lisäksi päästöjen määrään vaikuttavat sähkönsiirtohäviöiden päästöt, jotka on jaettu teoreettisesti sähkönsiirron osa-alueen (merikaapeli + maakaapeli + voimajohto) pituuden mukaisesti. Lisäksi

sähkönsiirtohäviöt on jaettu tasan siirtoreittien kesken, jos sähköä siirretään kahta reittiä pitkin.

Sähkönsiirron päästöt on esitetty oheisessa taulukossa (Taulukko 2-25). Minimikombinaatioon sisältyvien vaihtoehtojen SVE2B ja SVE4 kokonaispäästöt ovat noin 34 700 ja 60 900 tCO₂e sisältäen sekä maakaapelin että voimajohdon vaikutukset. Yhteensä minimivaihtoehtojen päästöt ovat noin 95 600 tCO₂e. Maksimikombinaatioon sisältyvien vaihtoehtojen SVE1A ja SVE3A kokonaispäästöt ovat noin 23 800 ja 77 300 tCO₂e ja niiden yhteenlasketut päästöt ovat noin 101 100 tCO₂e.

Taulukko 2-25. Mantereen sähkönsiirron päästöt.

Hankevaihtoehto	SVE2B (sis. minimikombinaatioon)	SVE4 (sis. minimikombinaatioon)	SVE1A (sis. maksimikombinaatioon)	SVE3A (sis. maksimikombinaatioon)
	Minimikombinaatio		Maksimikombinaatio	
Maakaapelin rakentamisen aikaiset päästöt	600	2 800	600	700
Maakaapelin toiminnan aikaiset päästöt	4 000	11 800	3 400	2 400
Maakaapelin käytöstä poiston aikaiset päästöt	10	50	10	10
Maakaapelit yhteensä	4 600	14 600	4 000	3 200
Voimajohdon rakentamisen aikaiset päästöt	1 700	4 400	1 300	8 800
Voimajohdon toiminnan aikaiset päästöt	28 300	41 800	18 500	65 200
Voimajohdon käytöstä poiston aikaiset päästöt	30	70	20	100
Voimajohdot yhteensä	30 100	46 300	19 800	74 100
Mantereen sähkönsiirto yhteensä	34 700	60 900	23 800	77 300

Hankevaihtoehto	SVE2B (sis. minimi-kombinaatioon)	SVE4 (sis. minimi-kombinaatioon)	SVE1A (sis. maksimikombinaatioon)	SVE3A (sis. maksimikombinaatioon)
Kombinaatio yhteensä	95 600		101 100	

Mantereen sähkönsiirron päästöistä rakentamisen päästöt, eli päästöt materiaalien valmistuksesta, kuljetuksesta ja rakentamisen polttoainekulutuksesta, ovat laskennallisesti noin 7–12 % mantereen sähkönsiirron kokonaispäästöistä. Toiminnan aikaiset päästöt, eli päästöt sähkönsiirtohäviöistä ja huollon polttoaine- ja materiaalikulutuksista, ovat laskennallisesti noin 87–93 % mantereen sähkönsiirron kokonaispäästöistä. Toiminnan päättymisen jälkeiset päästöt, eli päästöt purkamisen polttoainekulutuksista, kierrätyksestä ja kuljetuksista kierrätykseen, ovat laskennallisesti noin 0,1–0,2 % mantereen sähkönsiirron kokonaispäästöistä.

2.3.8 Hiilinielujen- ja varastojen menetys

Vaihtoehtoisten sähkönsiirtoreittien, vetysäiliön sekä maasähköasemien rakentaminen edellyttää puuston poistoa ja raivausta. Sähkönsiirron osalta maakaapeli- ja voimajohtaukean puusto raivataan. Voimajohtaukealla kasvillisuus pääsee kasvamaan, mutta se raivataan keskimäärin 8 vuoden välein, eli kasvava kasvillisuus on keskimäärin 4-vuotiaa. Kasvava aluskasvillisuus on otettu huomioon hiilinielun menetyksessä. Hattavan puuston hehtaari- ja kuutiomäärät on esitetty taulukossa 2-26.

Taulukko 2-26. Raivattavat metsäalat yhteensä.

Toteutusvaihtoehto	Metsäala	
SVE1A voimajohto (sis. maksimi-kombinaatioon)	50	ha
	7 800	m ³
SVE3A voimajohto (sis. maksimi-kombinaatioon)	400	ha
	58 100	m ³
SVE2B voimajohto (sis. minimi-kombinaatioon)	70	ha
	10 600	m ³
SVE4 voimajohto (sis. minimi-kombinaatioon)	200	ha
	28 800	m ³
SVE1A maakaapelit (sis. maksimi-kombinaatioon)	20	ha
	2 200	m ³

Toteutusvaihtoehto	Metsäala	
SVE3A maakaapelit (sis. maksimi-kombinaatioon)	20	ha
	2 800	m ³
SVE2B maakaapelit (sis. minimi-kombinaatioon)	20	ha
	2 200	m ³
SVE4 maakaapelit (sis. minimi-kombinaatioon)	80	ha
	10 800	m ³
Maasähköasema	30	ha
	4 300	m ³
Vetysäiliö	1	ha
	100	m ³

Hankkeen arvioitujen hiilinielujen ja -varastojen menetys on esitetty taulukossa 2-27.

Puuston hiilinielu kuvaa puuston hiilen määrää, joka ei pääse kasvamaan hankkeen elinkaaren aikana. Puuston hiilivaraston menetys riippuu puolestaan siitä, mihin käyttötarkoitukseen hakattavaa puustoa käytetään. Jos puu käytetään tuotteeseen, hiili on sitoutuneena niin pitkään kuin tuote on käytössä eikä sitä polteta. Kun tuote poltetaan, se vapauttaa hiilen ilmakehään eikä toimi enää hiilivarastona. Kansainvälisen ilmasto-paneelin raportin mukaan puutuotteiden puoliintumisajat ovat kaksi vuotta paperille, 25 vuotta puupaneeleille ja 35 vuotta sahatavarakkeille (Hiraishi ym. 2014). Puoliintumisaika kuvaa aikaa, jossa puolet materiaalista menetetään.

Metsän maaperän hiilinielun menetys on puolestaan laskettu kappaleessa 2.1.1.7 esitettyjen laskenta menetelmien mukaisesti ja se kuvaa tilannetta, jossa maaperän hiilensitomiskyky menetetään kokonaisuudessaan hankkeen elinkaaren aikana. Maaperän arvioidun menetetyn hiilinielumäärän todenmukaisuus riippuu hakatun alueen käytöstä, eikä hiilinielua todennäköisesti menetellä kokonaan. Maaperän arviona on käytetty kiennäismaan vuosittaista kasvua, joka on huomattavasti pienempi verrattuna esimerkiksi turvepohjaisen maan hiilinieluun.

Lisäksi voimajohtoaueiden alueella hiilitaseeseen vaikuttavat tekijät kuten puuston poisto, uudelleen kasvava aluskasvillisuus, karikkeen määrä ja vesitase. Nämä tekijät monimutkaistavat maaperän hiilitaseen arviointia.

Taulukko 2-27. Hankkeen aiheuttama hiilinielujen ja -varastojen menetys hankkeen elinkaaren aikana.

Hankevaihtoehto	Puuston hiilivaraston menetys, tCO ₂	Puuston hiilinielun menetys, tCO ₂	Metsän maaperän hiilinielun menetys, tCO ₂
SVE1A maakaapeli	3 000	4 800	700
SVE2B maakaapeli	3 000	4 800	700
SVE3A maakaapeli	3 900	6 300	900
SVE4 maakaapeli	14 900	24 100	3 500
SVE1A voimajohto	10 800	17 300	2 500
SVE3A voimajohto	80 800	132 300	18 800
SVE2B voimajohto	14 800	23 600	3 400
SVE4 voimajohto	39 900	65 400	9 300
Maasähköasema	6 000	9 800	1 400
Vetysäiliö	200	300	50

2.3.9 Hankkeen toteuttamatta jättäminen VE0

VE0:n merituulivoiman päästöt on määritetty skenaarioille, joissa tuotetaan sähköä tai vetyä. Vaihtoehdossa, jossa tuotetaan sähkö, VE0 laskettiin perustuen SYKE:n energiaskenaarioon (*Suomen ympäristökeskus 2020*) ja se on arvioitu vuosille 2030–2064. Vaihtoehdossa, jossa tuotetaan vetyä, VE0 verrataan tilanteisiin, joissa vedyllä korvataan tavanomaisesti tuotettua vetyä ja LNG:tä meriliikenteen polttoaineena 35 vuoden ajan. VE0:n päästöt on esitetty taulukossa 2-28.

Taulukko 2-28. VE0:n arvioidut päästöt hankkeen elinkaaren ajalle.

Hankevaihtoehto		
Sähkön tuotanto VE1 ja VE2	Tuotettu sähkömäärä	11 000 GWh/vuosi
	VE0, ennuste SYKE	20 246 000 tCO ₂ e
Vedyn tuotanto VE1 ja VE2	Tuotetun vedyn energiamäärä	6 600 GWh/vuosi
	VE0, jos vety on tuotettu tavanomaisilla tuotantomenetelmillä	89 600 000 tCO ₂ e
	VE0, jos vety on tuotettu verkkosähköllä (=VE0, ennuste SYKE)	20 246 000 tCO ₂ e
	VE0, jos laivoissa käytetään polttoaineena LNG:tä	57 637 000 tCO ₂ e

2.3.10 Lisävaikutus meriliikenteen päästöihin

Merituulivoimapuisto vaikuttaa meriliikenteeseen matkoja pidentävästi. Vuodessa merituulivoimapuiston kiertoon menevä matka on arviolta noin 3 000 kilometriä ja polttoaineen kulutuksen lisäys on noin 70 m³ vuodessa. Päästöjä tällä polttoainemäärältä muodostuu noin 230 tCO₂e vuodessa, eli noin 20 suomalaisen vuosipäästön verran. Vaikutus muuhun meriliikenteeseen on noin 0,2 % hankkeen aiheuttamista kokonaispäästöistä.

Vaikutusta meriliikenteeseen ei ole laskettu mukaan kokonaispäästöihin.

2.4 Yhteisvaikutukset

Laineen hanketta lähin merituulivoimahanke on Ruotsin talousvyöhykkeellä noin kilometrin etäisyydellä sijaitseva Bothnia Offshore Kappa -hanke (Njordr Offshore Wind AB 2022). Kappan hankkeen voimaloiden rakentaminen voi ajoittua osin samaan aikaan Laineen hankkeen rakentamisen kanssa. Toteutuessaan hankkeet ovat toiminnassa yhtä aikaa. Lisäksi Laineen läheisyydessä on myös muita suunnittelun alussa olevia hankkeita (ks. A-dokumentin luku 21). Jos merituulivoimapuistot aiheuttavat yhdessä laivaliikenteen reittien pidentymistä, ovat yhteisvaikutukset ilmaston osalta negatiiviset. Kasvihuonekaasupäästöjen vaikutukset ovat kuitenkin globaaleja ja niille on vaikea määrittää spesifiä yhteisvaikutusta. Myönteisiä yhteisvaikutuksia voidaan em. hankkeiden arvioida aiheuttavan, mikäli molemmilla korvataan kohdemaansa nykyisiä fossiilisia energiamuotoja.

Sähkönsiirtoreittien läheisyydessä on tuulivoimapuistoja. Uudenkaarlepyyn Kröpulnin toiminnassa oleva tuulivoimapuisto sijaitsee mantereen voimajohtoreitin SVE1b varrella ja sen lähin voimala on noin 260 metrin päässä reitistä, mutta sillä ei todennäköisesti ole vaikutusta voimajohtoreitin aiheuttamiin ilmastovaikutuksiin. Lisäksi Uudenkaarlepyyn Björkbackenin kaavavaiheessa oleva tuulivoimapuisto sijoittuu lähimmillään noin 600 metrin päähän reittivaihtoehtojen SVE1 ja SVE2 pohjoispuolelle. Alustavien aikataulujen perusteella Björkbackenin tuulivoimapuiston rakentaminen tapahtuu kuitenkin ennen kuin Laineen merituulivoimapuistoon liittyvien sähkönsiirtoyhteyksien rakentaminen aloitetaan. Mahdollisia rakentamisen aikaisia yhteisvaikutuksia ei siis todennäköisesti synny. Lisäksi mantereen sähkönsiirron lähelle on suunnitteilla myös muita tuulivoimapuistoja ja voimajohtohankkeita (ks. B-dokumentin luku 19). Puustoisten alueiden hiilinielu ja -varasto menetystä voidaan hillitä sijoittamalla eri hankkeiden voimalinjat vierekkäin niin, että johtokäytävät ovat kokonaisuudessaan kapeammat. Tässä asiassa on kuitenkin huomioitava myös muut asiat, kuten vaikutukset ekologisten yhteyksien säilymiseen. Tämän kokoluokan hankkeissa mantereelle sijoittuvien eri tuulivoima-alueiden sähkönsiirtoa ei voida todennäköisesti yhdistää.

Kasvihuonekaasupäästöt aiheuttavat ilmaston lämpenemistä ja sen aiheuttamien riskien vuoksi etsitään globaalilla tasolla päästövähennysratkaisuja. Esimerkiksi EU:n ilmastolaissa on asetettu kasvihuonekaasupäästöille vähennystavoitteet.

Päästövähennystoimena tässä tapauksessa samaan aikaan rakennettavien hankkeiden on teoriassa mahdollista pienentää logistiikan päästöjä yhteiskuljetuksien avulla.

Ilmastonmuutoksen aiheuttamissa riskeissä ei arvioitu olevan kovin todennäköisiä yhteisvaikutuksia, mutta pahimpana skenaariona laajat metsäpalot voivat vaikuttaa useaan hankealueeseen.

2.5 Kokonaistulokset - Vaihtoehtojen vertailu ja vaikutusten merkittävyys

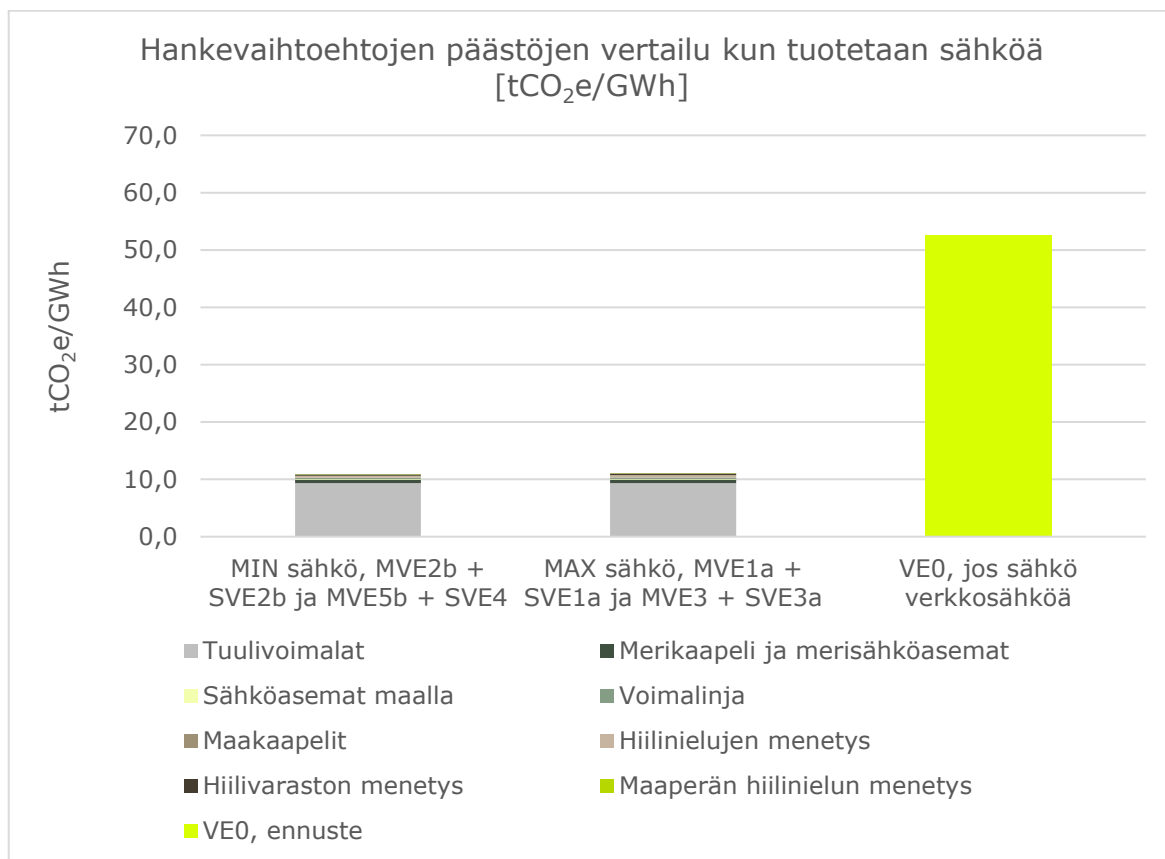
Hankkeen avulla voidaan tuottaa sähköä tai vetyä. Tuote vaikuttaa hankkeen kokonaispäästöihin rakennettavan infrastruktuurin kautta ja tuote vaikuttaa päästöjen vähentämismahdollisuuksien suuruuteen.

Päästölaskennassa havaittiin, että suurin päästövähennelmä saavutetaan todennäköisimmin vetyä tuotettaessa. Ehdottomasti suurimmat päästöt syntyvät tuulivoimaloiden elinkaaresta, joiden osuus kokonaispäästöistä on vaihtoehdosta riippuen noin 84–95 %.

2.5.1 Sähkön tuotanto

Sähkön tuotannon päästöt on laskettu maksimi- ja minimitalanteissa päästöjen vaihteluvälin määrittämiseksi. Laskenta perustuu oletukseen, että merellä sähköä siirretään yhteensä kymmenellä merikaapelilla kahta reittiä pitkin. Maksimitalanteessa sähköä siirretään kahta reittiä, MVE1a:ta ja MVE3:sta, pitkin ja maalla SVE1a:ta ja SVE3a:ta pitkin. Minimitalanteessa sähköä siirretään myös kahta reittiä, MVE2b:tä ja MVE5b:tä, pitkin ja maalla SVE2b:ta ja SVE4:ta pitkin. Kokonaisuudessaan minimireitin päästöt ovat pienemmät siksi, koska se on myös lyhyin mahdollinen reittikombinaatio ja tarvitsee siksi vähiten rakennusmateriaaleja, joista aiheutuu päästöjä. Vastaavasti maksimireitin päästöt ovat suurimmat, koska se on pisin reittikombinaatio ja sen materiantarve on suurin.

Oheisessa kuvaajassa (Kuva 2-6) ja taulukossa (Taulukko 2-29) on esitetty yhteenveto hankevaihtoehtojen päästöistä per tuotettua GWh kohden. Lasketut arvot ovat keskiarvoja elinkaaren ajalta. Päästöjä verrataan VE0:aan, joka kuvastaa tässä tilannetta, jossa tuotettu sähkö on yleisen ennustetun verkkosähkön mukaista.



Kuva 2-6. Hankevaihtoehtojen hiilijalanjäljen ja hiilinielujen ja -varastojen menetyksen vertailu yksikössä tCO₂e/GWh. Kun sähkönsiirtoinfran pituus on lyhimmillään, on päästöt pienimmillään ja vastaavasti kun sähkönsiirtoinfran pituus on pisimmillään, on päästöt suurimmillaan. Suurin päästölähde, tuulivoimalat, on jokaisessa hankevaihtoehdossa samansuuruinen.

Oheisessa taulukossa (Taulukko 2-29) on esitetty hankevaihtoehtojen päästöt numeerisesti per tuotettua GWh:ta kohden ja päästövähennemä prosentteina. Mitä lyhyempi voimajohto on, sitä enemmän päästövähennystä hankkeen sähkön tuotannosta saadaan. Päästövähennemän määrä ei ole kuitenkaan hankevaihtoehtojen välillä merkittävä, sillä lyhyimmän sähkönsiirron tapauksessa se on noin -79,3%:a ja pisimmän sähkönsiirron tapauksessa noin -78,9 %:a. Päästövähennys tulisi olemaan noin 16 000–16 100 ktCO₂e, joka on noin 1 600 000 – 1 610 000 suomalaisen vuosipäästön verran.

Taulukko 2-29. Hankevaihtoehtojen elinkaaren päästöt per tuotettua GWh:a kohden.

tCO ₂ e/GWh	MIN sähkö, MVE2b + SVE2b ja SVE4	MAX sähkö, max, MVE1a + SVE1a ja MVE3 + SVE3a
Tuulivoimalat	9,33	9,33
Merikaapelit ja merisähköasemat	0,63	0,63

tCO ₂ e/GWh	MIN sähkö, MVE2b + SVE2b ja SVE4	MAX sähkö, max, MVE1a + SVE1a ja MVE3 + SVE3a
Vety	-	-
Vetyputket	-	-
Vetyvarastot	-	-
Sähköasemat maalla	0,09	0,09
Maakaapelit	0,05	0,02
Voimalinja	0,20	0,24
Hiilinielujen menetys	0,33	0,44
Hiilivarastojen menetys	0,20	0,27
Maaperän hiilinielun menetys	0,05	0,06
Yhteensä	10,9	11,1
VE0, sähköverkon ennuste (2030-2064)	53	53
Päästövähennelmä	-79 %	-79 %

2.5.2 Vedyn tuotanto

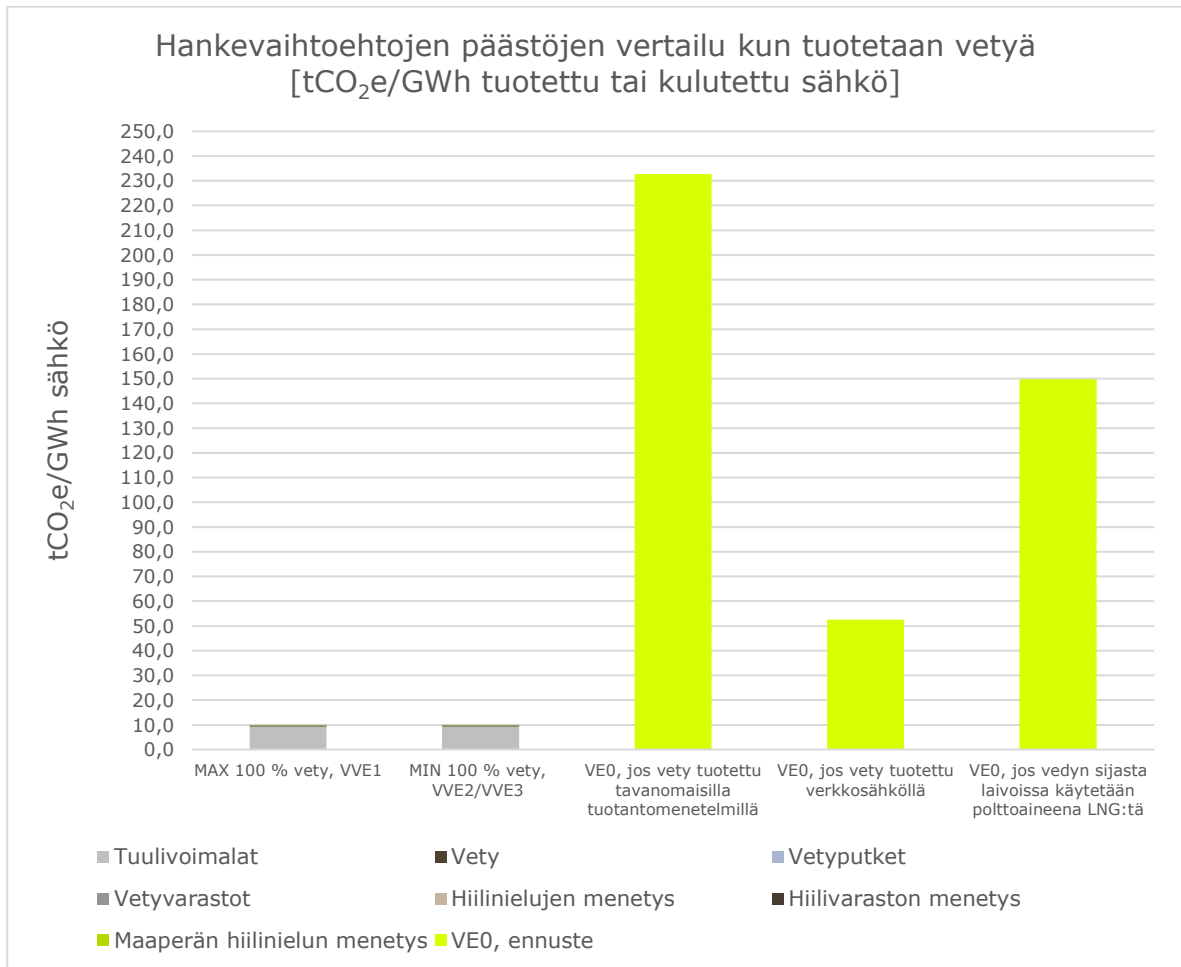
Kuten sähkön tapauksessa, myös 100 % vedyn tapauksessa päästöt on määritelty maksimi- ja minimitilanteille päästöjen vaihteluvälin selvittämiseksi. Laskenta perustuu oletukseen, että vetyä siirretään yhtä vetyputkea pitkin mantereelle. Maksimitilanteessa vetyä siirretään VVE1 pitkin, joka on pisin. Päästöt ovat siinä suurimmat, koska mitä pidempi siirtoputki on, sitä enemmän sen rakentamiseen tarvitaan materiaaleja, ja vastaavasti sitä enemmän syntyy päästöjä. Minimitilanteeksi on arvioitu VVE2/VVE3 vaihtoehdot, joista toinen toteutetaan. VVE2 ja VVE3 ovat lähes samanpituiset, joten niiden päästöt on arvioitu yhtä suuriksi. Minimitilanteen toteutuksessa vain toinen vaihtoehtoista toteutetaan.

Oheisessa kuvaajassa (Kuva 2-7) ja taulukossa (Taulukko 2-30) on esitetty yhteenveto hankevaihtoehtojen päästöistä per tuotantoon kulutettua GWh:ta kohden.

VE0:n tapauksessa vedyn tuotannon vähähiilistymistä ja laivojen polttoaineiden vähähiilistymistä ei voitu ottaa tarkasti huomioon. Vedyn tuotannon tapauksessa päästötaso tulevaisuudessa kuitenkin tulee olemaan sen mukainen, millä energiatyypillä vetyä tuotetaan. Jos vety tuotetaan uusiutuvilla energialähteillä, on sähkönkulutuksen

elinkaaren aikaiset päästöt tuulisähköä käytettäessä keskimäärin luokkaa 11 tCO₂e/GWh kulutettua sähköä ja aurinkosähköä käytettäessä noin 27–48 tCO₂e/GWh kulutettua sähköä (*Schlömer ym. 2014*). Tässä arvioinnissa oletettiin, että jos vety tuotettaisiin Suomen keskimääräisellä verkkosähköllä, olisivat päästöt lähellä samaa kuin VE0:n ennusteessa sähkölle, eli 53 tCO₂e/GWh. Lisäksi tehtiin arvio tilanteesta, jossa vety tuotetaan tavanomaisella tuotantomenetelmällä. Tavanomainen tuotantomenetelmä perustuu keskiarvoisesti maakaasun höyryreformointiin ja silloin päästöt ovat noin 230 tCO₂e/GWh kulutettua sähköä (*IEA 2023*).

Laivaliikenteen tapauksessa LNG luetellaan vaihtoehtoisin polttoaineisiin, joka on vähäpäästöisempi kuin esimerkiksi nykyään meriliikenteessä käytetyt polttoaineet. Muita mahdollisia polttoaineita ovat synteettiset vähähiiliset polttoaineet, biopolttoaineet, ammoniakki ja LPG. Vetyä voidaan käyttää laivoissa polttoaineena sellaisenaan tai jalostettuna synteettisiksi polttoaineiksi. LNG:n, LPG:n ja metanolin käyttö vähentää päästöjä verrattuna tavanomaisiin meriliikenteen polttoaineisiin, mutta on arvioitu, etteivät ne mahdollista liikenteen hiilineutraaliteettitavoitteiden saavuttamista. (*Takala ym. 2022*) LNG valittiin tähän tarkasteluun sen käytön potentiaalin vuoksi. Laskennassa on huomioitu sähkön energiasisällön häviöt, kun vetyä tuotetaan sähköstä. 11 000 GWh:sta sähköä on oletettu saavan noin 200 000 tonnia vetyä. Tämän vedyn energiasisältö on noin 6 600 GWh.



Kuva 2-7. Hankevaihtoehtojen hiilijalanjäljen ja hiilinielujen ja -varastojen menetyksen vertailu yksikössä tCO₂e/GWh sähköä. Toteutusvaihtoehdoissa kyseinen sähkömäärä tuotetaan ja muunnetaan vedyksi. Käytännössä se kuvaa vedyn päästöä per siihen kulutettua sähköä kohden. VE0:n tapauksissa verrannollinen vetymäärä käytettäisiin korvaamaan tavanomaisia tuotetta (keskimääräinen tuotantotapa, pääosin muuntaminen maakaasusta) ja jos vety tuotetaan suomalaisen sähköverkon sähköllä, sekä mahdollista fossiilista käyttökohdetta (LNG:tä). 11 000 GWh:stä sähköä oletetaan tuotettavan 200 000 tonnia vetyä.

Oheisessa taulukossa (Taulukko 2-30) on esitetty hankevaihtoehtojen päästöt numeerisesti per tuotettua GWh:ta kohden ja päästövähennys prosentteina. Tuotteen käyttökohde vaikuttaa merkittävästi saavutettavaan päästövähennykseen. Päästövähennys tulisi olemaan noin 16 000–86 000 ktCO₂e, riippuen vedyn käyttökohteesta. Päästövähennys on noin 1 600 000–8 600 000 suomalaisen vuosipäästön verran.

Taulukko 2-30. Hankevaihtoehtojen elinkaaren päästöt per kulutettua GWh:a kohden.

tCO ₂ e/GWh	MIN vety, VVE2/VVE3	MAX vety, VVE1
Tuulivoimalat	9,33	9,33

tCO ₂ e/GWh	MIN vety, VVE2/VVE3	MAX vety, VVE1
Merikaapelit ja merisähköasemat	-	-
Vety	0,18	0,18
Vetyputket	0,27	0,33
Vetyvarastot	0,01	0,01
Sähköasemat maalla	-	-
Maakaapelit	-	-
Voimalinja	-	-
Hiilinielujen menetys	<0,01	<0,01
Hiilivarastojen menetys	<0,01	<0,01
Maaperän hiilinielun menetys	<0,01	<0,01
Yhteensä	9,8	9,9
VE0, korvattaessa nykyistä vedyn tuotantoa	233	233
Päästövähennelmä	-96 %	-96 %
VE0, jos vedyn tuotanto on ennustetun sähköverkon päästöjen mukaista	53	53
Päästövähennelmä	-81 %	-81 %
VE0, korvattaessa laivojen LNG:tä	150	150
Päästövähennelmä	-93 %	-93 %

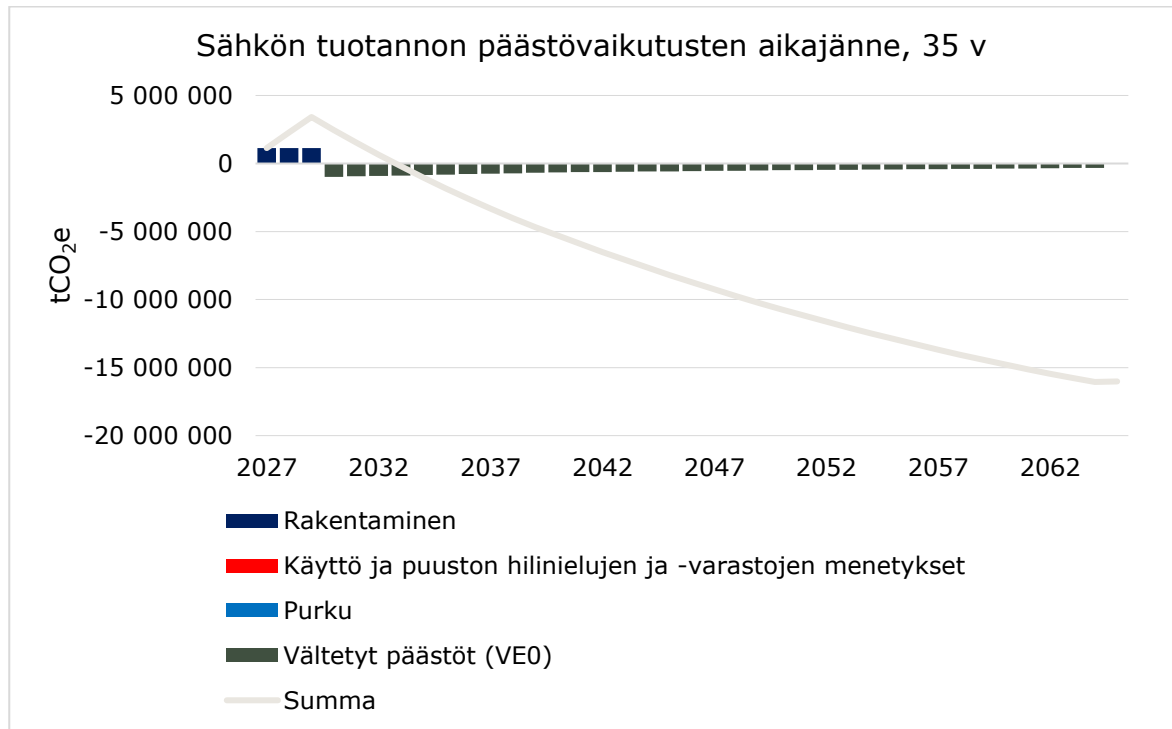
2.5.3 Vaikutusten merkittävyys

Kaikkien hankevaihtoehtokombinaatioiden päästöt tuotettua sähkön määrää kohden ovat huomattavasti pienemmät kuin hankkeen toteuttamatta jättämisen vaihtoehdon VE0 päästöt. Kokonaistulosten vaihteluväli on noin 9,8–11,1 tCO₂e/GWh (vertailtaessa hankkeen minimi-maksimi tuloksia).

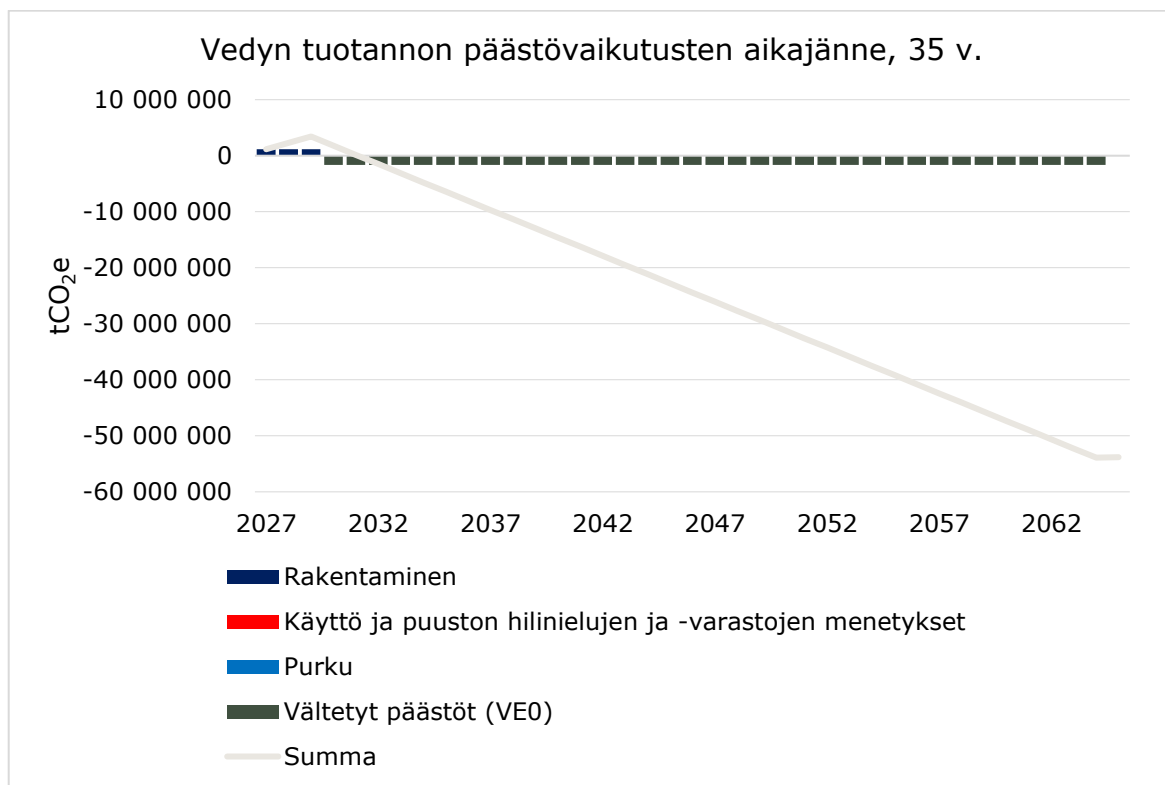
Laskenta toteutettiin laskemalla sähkön- ja vedyntuotantoskenaarioista minimi- ja maksimivaihtoehdot. Korkeimmat päästöt aiheutuvat hankevaihtoehdosta, jossa tuotetaan 100 % sähköä ja sähkönsiirtoinfrastruktuuri on kokonaisuudessaan pisin. Pienimmät päästöt aiheutuvat hankevaihtoehdosta, jossa tuotetaan 100 % vetyä ja vedynsiirto-putki on lyhyin. Merkittävin ero toteutusvaihtoehtojen välillä on energiasiirtoreittien

pituudessa ja niihin liittyvässä materiaalien käytössä. Voimajohtolinjan alueelta pitää myös kaataa metsää, joka lisää menetetyn hiilinielun ja -varaston määrää.

Mikäli tuulisähköllä verrataan ennusteen mukaiseen verkkosähköön Suomessa, positiiviset vaikutukset ylittävät negatiiviset vaikutukset noin kolmannen tuotantovuoden jälkeen (Kuva 2-8). Verrattaessa vedyn käyttöä LNG:hen laivojen polttoaineena, positiiviset vaikutukset ylittävät negatiiviset vaikutukset toisen tuotantovuoden jälkeen (Kuva 2-9). Hankkeen ensimmäisinä vuosina toiminnasta syntyy vain päästöjä. Kun tuulivoimalat tuottavat sähköä, kääntyy toiminta muutaman ensimmäisen toimintavuoden jälkeen päästöhyötyjä tuottavaksi toiminnaksi.



Kuva 2-8. Sähkön tuotannon päästövaikutuksien aikajänne 35 vuoden ajalle, kun sähköä verrataan tulevaisuuden ennustettuun verkkosähköön.



Kuva 2-9. Vedyn tuotannon päästövaikutuksien aikajänne 35 vuoden ajalle, kun vedyllä korvataan LNG:tä.

Vaikutusten merkittävyyden arvioinnissa muutoksen suuruutena arvioidaan päästöjen suuruutta VE0:aan verraten. Kohteen herkkyyttä arvioitiin sen perusteella, miten vahvasti hanke on ilmastotavoitteiden mukainen. Rakentamisen aikaiset merkittävyydet on arvioitu taulukossa 2-31 ja käytön aikaiset merkittävyydet taulukossa 2-32.

Merituulivoimaloiden rakentamisen aikaiset vaikutukset (VE1 ja VE2) arvioidaan olevan suuresti negatiiviset rakentamisen laajuudesta ja suuresta materiaalitytarpeesta johtuen. Energiansiirron (sähkö: MVE1a, MVE1b, MVE2a, MVE2b, MVE3, MVE4, MVE5a ja MVE5b sekä SVE1a, SVE1b, SVE2a, SVE2b, SVE3a, SVE3b ja SVE4; vedynsiirto: VVE1, VVE2, VVE3a ja VVE3b) ja vedyn tuotannon rakentamisen aikaiset vaikutukset arvioidaan olevan suuruudeltaan kohtalaiset. Itse rakentaminen ei ole suoraan ilmastotavoitteiden mukaista, mutta sen avulla saavutetaan tavoitteiden mukainen energiainfrastruktura. Siksi herkkyys arvioidaan kohtalaiseksi. Huomioitavaa on, että toiminnan ajan hyödyt ylittävät rakentamisen haitat hankkeen elinkaaren alkuvaiheessa.

Tämä hanke arvioidaan olevan ilmastotavoitteiden mukainen. Rakentamisen aikana merituulivoiman (VE1 ja VE2) herkkyys arvioidaan suureksi ja toiminnan aikana erittäin suureksi, koska valtakunnallisena tavoitteena on irtautua fossiilisista polttoaineista ja siirtyä uusiutuviin energianlähteisiin. Rakentaminen arvioidaan suurena, koska se auttaa välillisesti tavoitteiden saavuttamisessa, kun taas toiminnan aika on suoraan tavoitteiden toteuttamista. Valtakunnallisesti sähköntarve kasvaa ja ilmaston näkökannalta on positiivista, että sähköä tuotetaan uusiutuvilla energiamuodoilla. Tällöin vältetään enempien kasvihuonekaasupäästöjen synnyttä.

Taulukko 2-31. Vaikutusten merkittävyys eri hankevaihtoehtoissa rakentamisen aikana.

Vaikutuksen merkittävyys		Negatiivinen				Muutoksen suuruus				Positiivinen	
		Erittäin suuri	Suuri	Kohtalainen	Vähäinen	Ei muutosta	Vähäinen	Kohtalainen	Suuri	Erittäin suuri	
Kohteen herkkyys	Vähäinen										
	Kohtalainen			MVE1a /b MVE2a /b MVE3 MVE4 MVE5a /b SVE1a/ b- SVE3a/ b SVE4 VVE1 VVE2 VVE3a/ b							
	Suuri		VE1 - VE2			VE0					
	Erittäin suuri										

Merituulivoimaloiden (VEt) toiminnan aikaiset vaikutukset arvioidaan ilmastoon kannalta positiivisesti hyvin merkittäviksi – toiminnan aikana hankkeella arvioidaan olevan sähköä tuottaessa suuri myönteinen vaikutus, ja yhdessä vedyn tuotannon (Vety) kanssa erittäin suuri vaikutus. Energiansiirto (sähkö: MVE1a/b, MVE2a/b, MVE3, MVE4, MVE5a/b ja SVE1a/b-SVE3a/b, SVE4; vedynsiirto: VVE1, VVE2, VVE3a/b) arvioidaan välillisen vaikutuksensa vuoksi positiivisesti kohtalaisiksi. Uusiutuvan energian tuotanto on erittäin suuresti ilmastotavoitteiden mukaista, joten sen herkkyys arvioidaan toiminnan aikana merituulivoimaloissa erittäin suureksi ja energiansiirrossa suureksi.

Energiasiirron toteutus on keskeinen osa uusiutuvan energian hankkeita, sillä ne edistävät välillisesti uusiutuvan energian käyttöä. Toiminnan aikana merkittävyys arvioidaan olevan suuresti myönteinen. Jos uusiutuvaa energiaa ei tuoteta (VE0), arvioidaan sillä olevan haitalliset vaikutukset ilmastolle. Haitallinen vaikutus ei oikeasti suoraan kohdistu tähän hankkeeseen ilmastovaikutuksien ollessa globaaleja, mutta jos yleisesti energian tuotannossa ei siirrytä tehokkaisuuteen vihreisiin tuotantotapoihin, edistää se ilmastomuutosta.

Taulukko 2-32. Vaikutusten merkittävyys eri hankevaihtoehtoissa käytön aikana.

Vaikutuksen merkittävyys		Muutoksen suuruus								Positiivinen
		Erittäin suuri	Suuri	Kohtalainen	Vähäinen	Ei muutosta	Vähäinen	Kohtalainen	Suuri	
Kohteen herkkyys	Vähäinen									
	Kohtalainen									
	Suuri							MVE1a /b MVE2a /b MVE3 MVE4 MVE5a /b SVE1a /b- SVE3a /b SVE4 VVE1 VVE2 VVE3a /b		
	Erittäin suuri		VE0 vety	VE0 sähkö					VE1 - VE2 sähkö	VE1-VE2 vety

Ruoppausta ja sedimenttien läjitystä ei otettu erikseen huomioon ilmastovaikutusten arvioinnissa. Merituulivoimaloiden osalta sen päästöt luotetaan sisältyvän laskennassa hyödynnettyyn LCA:han. LCA-raportti sisältää koneiden käytön päästöt pohjatöistä tuulivoimala-alueella, mutta siinä ei erikseen sanallisesti eritellä esimerkiksi täsmällisesti ruoppauksen tai sedimenttien osuutta. Koska tuulivoimaloiden elinkaareen verrattuna ruoppauksen päästöt eivät todennäköisesti ole merkittävät, on ruoppauksen päästöt ja sedimenttien läjitys rajattu kaksoislaskennan välttämiseksi pois.

2.6 Ilmastonmuutoksen vaikutukset hankkeeseen ja niihin sopeutuminen merellä

Ilmastonmuutokseen sopeutumisella tarkoitetaan toimia, joilla voidaan vähentää, varautua ja sopeutua ilmastonmuutoksen aiheuttamiin vaikutuksiin ja riskeihin.

Ilmastonmuutos voi vaikuttaa hankkeeseen muun muassa seuraavasti:

- Meriveden muutoksen riskit
- Tulva- ja myrskyriskit: herkkyys mm. vesistö- ja rankkasadetulville.
 - o Merenpinnan nousu yhdessä voimakkaampien myrskyjen kanssa voi aiheuttaa aiempia korkeampia meritulvia

- Keskilämpötilan ja maksimilämpötilan nousu: Vaikutukset vedyntuotannon jäähdytystarpeeseen

Toiminta on toteutettavissa fyysisistä ilmastoriskeistä huolimatta, mutta muuttuvan ilmastoin aiheuttamat muutokset säähän ja fyysisiin riskeihin tulee tunnistaa jo tässä vaiheessa hanketta ja huomioida suunnittelussa ja toteutuksessa.

Arvio ilmastomuutokseen sopeutumisesta tehtiin pitkän aikavälin ilmastoskenaarioiden avulla noin vuosille 2041–2100. Tuulivoimaloiden käyttöikä on noin 35 vuotta, mutta niiden käyttöikä on mahdollista pidentää.

2.6.1 Meriveteen liittyvät muutokset

Kuten luvussa 2.2.3 on esitetty, ilmastomuutoksen keskiskenaariossa merenpinnan ennustetaan laskevan Perämerellä noin 10–20 cm 2050-lukuun mennessä ja noin 20–30 cm 2100-lukuun mennessä maankohoamisen vuoksi. Puolestaan ilmastomuutoksen korkeimman skenaarion mukaan Perämeren merivesi voi pysyä samalla tasolla 2050-lukuun asti, jonka jälkeen merivesi nousee noin 30 cm vuosisadan loppuun mennessä. (Pellikka ym. 2018)

Merivesitulvien riski korreloi meriveden pinnan muutosten kanssa. Merivesitulvien riskin arvioidaan pysyvän ennallaan tai pienenevän vuoteen 2050 asti. 2100-lukuun mennessä merivesitulvariski pysyy ennallaan tai kasvaa meriveden korkeuden nousun vaikutuksesta. (Gregow ym. 2021)

Itämeren ennustetaan happamoituvan 0,2 (positiivisempi ilmastomuutoksen skenaario, n. 550 ppm CO₂:sta ilmakehässä)–0,4 (pahin ilmastomuutoksen skenaario, n. 850 ppm CO₂:sta ilmakehässä) pH-yksikköä 2100-lukuun mennessä. (Schneider ym. 2015) Perämeren pH on keskimäärin noin 7,7 (HELCOM 2023).

Meren jään paksuuden arvioidaan pienenevän noin 6–7 cm vuosikymmenessä. Tyypillisesti maksimipaksuus on nykyisin 40–75 cm, joten 2050-luvulla maksimipaksuus saattaa olla noin 19–48 cm ja 2100-luvulla noin 0–19 cm. Jään vähenemisen arvioidaan voimistavan aalto-olosuhteita talvella ja alkukeväästä (Gregow ym. 2021). Lisäksi liikuvat jäälautat saattavat aiheuttaa eroosiota rakenteissa (EPA 2023).

Merivedenpinnan lämpötila tulee nousemaan ilmastomuutoksen seurauksena. Merivedenpinnan lämpötilannousu on esitetty alla taulukossa (Taulukko 2-33).

Taulukko 2-33. Merivedenpinnan lämpötilan muutokset eri ilmastoskenaarioissa CMIP6-mallissa (suluissa vuoden keskiarvot) (IPCC 2023)

Meripinnan lämpötilannousu	Keskipitkä aikaväli 2041–2060		Pitkä aikaväli 2081–2100	
Verrattuna vuosiin 1981–2010	RCP4.3	RCP8.5	RCP4.3	RCP8.5
Kesä-elokuu	+2 °C (=+7 °C)	+2,5 °C (=+7,5 °C)	+3 °C (=+8 °C)	+5 °C (=+10 °C)
Tammi-helmikuu	+1,8 °C (=+3 °C)	+1,8 °C (=+3 °C)	+2 °C (=+3 °C)	+3 °C (=+4 °C)

Sopeutuminen

Varautuminen meriveden pinnannousun riskiin on hyvä ottaa huomioon suunnittelu- ja rakennusvaiheessa tekemällä rakenteista riittävän korkeita.

Mikäli meriveden pH:n muutos vaikuttaa betonirakenteiden kestävyYTEEN, tulee aiempaa alempi pH-taso myös ottaa huomioon suunnittelussa ja käytössä.

Mahdollinen meren jään ohentuminen pidentää avovedellä liikkumisaikaa ja vähentää jäänmurtajan käyttöä, mikä voi tuoda polttoaineiden säästöä. Toisaalta jäätä pitkin kulkeminen vaikeutuu eikä kulkemista voi laskea sen varaan. Jäälauttojen tiheämpi muodostuminen (lämpötilan sahatessa jäätymispisteen molemmin puolin), kulkeutuminen ja kasautuminen voi aiheuttaa eroosioriskin, joka voi olla hyvä huomioida rakenteiden suunnittelussa.

Merivedenpinnan lämpötilan muutoksien riskiä on tarkasteltava käytettävien rakenteiden materiaalien kannalta, jotta ne voidaan suunnitella mahdollisimman kestäväksi.

2.6.2 Tuulisuus

Tuulisuus vaikuttaa voimaloiden tapauksessa energian tuotantoon, mutta myös maksimituulet haastavat isojen rakenteiden kestävyYTEä. Keskimääräistä tuulta ennustavien mallien tarkkuutta ei ole arvioitu kovin hyväksi ja muutoksiin liittyy suuria epävarmuuksia, mutta arvioiden mukaan Suomessa tuulisuus voivat lisääntyä hieman ilmastonmuutoksen vaikutuksesta. Keskimääräisissä myrskyjen määrässä ja voimakkuudessa ei todennäköisesti tule olemaan suuria muutoksia (*Gregow ym. 2021*).

Sopeutuminen

Myrskytuuliin sopeutumiseksi voimalat ja muut rakenteet on suunniteltava ja rakennettava myrskytuulien kestäväksi.

Erityisesti mereltä puhaltavien länsituulten on ennustettu yleistyvän ja voimistuvan ilmastonmuutoksen myötä, mikä voi hyödyttää Suomen läntisten rannikkoalueiden tuulivoimatuotantoa (*Ruosteenoja ym. 2019*).

2.6.3 Keskilämpötilan ja maksimilämpötilan nousu

Keskilämpötilat tulevat nousemaan hankealueella keskipitkällä aikavälillä RCP4.3-RCP8.5 skenaariossa 2,7–3,2 astetta ja pitkällä aikavälillä +3,8–6,5 astetta. Oheisessa taulukossa (Taulukko 2-34) on esitetty arvioidut keski- ja maksimilämpötilojen muutokset hankealueella.

Taulukko 2-34. Lämpötilojen muutokset (ja tulevat keskiarvot) eri ilmastoskenaarioissa CMIP6-mallissa (IPCC 2023)

Lämpötilannousun muutokset	Keskipitkä aikaväli 2041-2060		Pitkä aikaväli 2081-2100	
Verrattuna vuosiin 1981-2010	RCP4.3	RCP8.5	RCP4.3	RCP8.5

Keskilämpötila Koko vuosi	+2,7 °C (=+4,0 °C)	+3,2 °C (=+4,7 °C)	+3,8 °C (=+5,1 °C)	+6,5 °C (=+7,9 °C)
Keskilämpötila Kesä-elokuu	+2,5 °C (=+13,7 °C)	+3,2 °C (=+14,4 °C)	+3,6 °C (=+14,9 °C)	+6,1 °C (=+17,5 °C)
Keskilämpötila Tammi-helmikuu	+3,4 °C (=-4,7 °C)	+4,2 °C (=-3,9 °C)	+4,6 °C (=-3,6 °C)	+7,8 °C (=-0,3 °C)
Maksimilämpötila Kesä-elokuu	+2,5 °C (=+16,2 °C)	+3,1 °C (=+16,8 °C)	+3,5 °C (=+17,2 °C)	+6,1 °C (=+19,7 °C)
Maksimilämpötila Tammi-helmikuu	+3,0 °C (=-3,1 °C)	+3,7 °C (=-2,2 °C)	+3,9 °C (=-2,1 °C)	+6,9 °C (=+0,9 °C)

Sivuavana ilmaston lämpenemisen riskinä on jäätymis- ja sulamisjaksojen tiheys kylminä aikoina. Peräkkäiset jäätymis- ja sulamisjaksot voivat aiheuttaa rakenteiden kulumista aiempaa enemmän.

Sopeutuminen

Keski- ja maksimilämpötilojen nousu tulee ottaa huomioon vetyprosessissa jäähdytystarpeen lisääntymisen vuoksi. Teknisissä laitteistoissa on hyvä huomioida tulevaisuuden lämpimämmät olosuhteet, mikäli niiden hyötysuhde muuttuu lämpötilan vaikutuksesta ja laitteiden käytölle asetettu maksimilämpötiloja.

Toisaalta lämmön sahatessa talvella jäätymispisteen molemmiin puolin on otettava huomioon rakenteiden kestävydessä. Lapojen mahdollinen jäätyminen tullaan huomioidaan ja sille mietitään ehkäisemis- ja varautumiskeinot. Tähän on varauduttu OX2:n riskienhallinnassa.

Vedyn tuotantolaitteistoa monitoroidaan ja säädetään tarvittaessa mm. ulkoisten vaikutusten seurauksista.

2.7 Ilmastonmuutoksen vaikutukset hankkeeseen ja niihin sopeutuminen mantereella

Ilmastonmuutokseen sopeutumisella tarkoitetaan toimia, joilla voidaan vähentää, varautua ja sopeutua ilmastonmuutoksen aiheuttamiin vaikutuksiin ja riskeihin.

Ilmastonmuutos voi vaikuttaa hankkeeseen mantereella muun muassa seuraavasti:

- Keskilämpötilan ja maksimilämpötilan nousu
 - o Riski helteiden aiheuttamille paloriskeille
- Myrskyriskit: herkkyyys mm. voimakas tuulisille myrskyille.
- Tulvariskit

Edellä mainituista paloriski todettiin suurimmaksi mahdolliseksi ilmastovaaratekijöiksi tälle hankkeelle.

Toiminta on toteutettavissa fyysisistä ilmastoriskeistä huolimatta, mutta muuttuvan ilmaston aiheuttamat muutokset säähän ja fyysisiin riskeihin tulee tunnistaa jo tässä vaiheessa hanketta ja huomioida suunnittelussa ja toteutuksessa.

Arvio ilmastomuutokseen sopeutumisesta tehtiin pitkän aikavälin ilmastoskenaarioiden avulla noin vuosille 2050–2100. Voimalinjojen käyttöikä on noin 80 vuotta.

2.7.1 Keskilämpötilan ja maksimilämpötilan nousu

Keskilämpötilat tulevat nousemaan hankealueella keskipitkällä aikavälillä RCP4.3–RCP8.5 skenaariossa 2,5–3,2 astetta ja pitkällä aikavälillä +3,6–6,3 astetta. Oheisessa taulukossa (Taulukko 2-35) on esitetty arvioidut keski- ja maksimilämpötilojen muutokset hankealueella. Lämpötilat ovat keskimäärin hieman korkeammat kuin merellä.

Taulukko 2-35. Lämpötilojen muutokset (ja tulevat keskiarvot) eri ilmastoskenaarioissa CMIP6-mallissa (IPCC 2023)

Lämpötilannousun muutokset	Keskipitkä aikaväli 2041-2060		Pitkä aikaväli 2081-2100	
	RCP4.3	RCP8.5	RCP4.3	RCP8.5
Verrattuna vuosiin 1981–2010	RCP4.3	RCP8.5	RCP4.3	RCP8.5
Keskilämpötila Koko vuosi	+2,5 °C (=+4,5 °C)	+3,2 °C (=+5,1 °C)	+3,6 °C (=+5,4 °C)	+6,3 °C (=+8,2 °C)
Keskilämpötila Kesä-elokuu	+2,4 °C (=+15,5 °C)	+3,0 °C (=+16,3 °C)	+3,4 °C (=+15,8 °C)	+5,8 °C (=+18,3 °C)
Keskilämpötila Tammi-helmikuu	+3,3 °C (=-6,0 °C)	+4,0 °C (=-5,1 °C)	+4,3 °C (=-4,9 °C)	+7,6 °C (=-0,3 °C)
Maksimilämpötila Kesä-elokuu	+2,4 °C (=+17,5 °C)	+3,1 °C (=+18,3 °C)	+3,7 °C (=+18,6 °C)	+6,3 °C (=+21,4 °C)
Maksimilämpötila Tammi-helmikuu	+2,9 °C (=-3,2 °C)	+3,6 °C (=-1,7 °C)	+3,8 °C (=-1,6 °C)	+7,0 °C (=+0,8 °C)

Keski- ja maksimilämpötilan nousun myötä helle- ja paloriskit lisääntyvät. Lisäksi routa- ja lumipeitteinen aika vähenee.

Helleriski lisää esimerkiksi rakennusvaiheessa polttoainevarastojen paloriskiä, mikäli polttoainevarastoja ei suojata asianmukaisesti. Maastopalo puolestaan voi uhata myös sähkönsiirtoinfrastruktuuria ja voi sen osalta aiheuttaa esim. taloudellista vahinkoa.

Vuosisadan loppuun asti ulottuvat tarkastelut osoittavat, että metsäpaloriski tulee kasvamaan tulevina vuosikymmeninä. Metsäpaloriski kasvaa sekä Etelä- että Pohjois-Suomessa, kun metsäpohjan hienojakoinen paloaines kuivuu nopeammin. Muutos on selkein alkukesästä aikaisemmasta lumen sulamisesta johtuen, mutta kuivimmat jaksot ajoittuvat edelleen myöhemmin kesään. Ilmastomuutos lisäksi lisää palavan aineksen

määrää, kun lämpötila nousee ja kasvukausi pitenee. Vakavat metsäpalokaudet tulevat pysymään harvinaisina, elleivät kaikkein synkimmät ilmastonmuutosskenaariot toteudu. (*Ilmatieteen laitos 2021b*)

Ilmaston lämpeneminen lyhentää routa- ja lumipeitteistä aikaa, jolloin voimajohtorakentaminen pyritään yleensä toteuttamaan. Routa on suojannut kasvillisuutta ja maanpintaa.

Sopeutuminen

Polttoaineista ja koneista johtuvia paloja voidaan ennaltaehkäistä vastuullisella polttoaineiden, kemikaalien ja tulen käsittelyllä sekä varastoinnilla. Palon leviämistä voidaan ehkäistä esimerkiksi sähköasemien ja vetysäiliöiden tapauksessa palamattomilla suojavyöhykkeillä ja asianmukaisella palontorjuntakalustolla. Sähköasemien ja vetysäiliöiden jäähdytys on turvattava kuumempina aikoina. Lisäksi vetysäiliöiden tapauksessa vetysuovuotoja on vältettävä niiden ilmastoa lämmittävän vaikutuksen sekä räjähdys- ja paloherkkyyden vuoksi. Palon sattuessa kunnossa olevat huoltotiet auttavat palon sammutuksessa.

Rakentamisvaiheessa on kiinnitettävä huomiota, että rakentaminen toteutetaan kasvillisuutta ja maanpintaa säästäen.

2.7.2 Tuulisuus

Tuulisuuden muutoksiin liittyy suuria epävarmuuksia, mutta arvioiden mukaan Suomessa tuulisuudet voivat lisääntyä hieman ilmastonmuutoksen vaikutuksesta. Keskimääräisissä myrskyjen määrässä ja voimakkuudessa ei todennäköisesti tule olemaan suuria muutoksia, mutta niiden vaikutukset kasvavat roudan vähenemisen myötä (*Gregow ym. 2021*). Roudan vähentyminen voi esimerkiksi lisätä puiden kaatumista myrskytuulilla.

Sopeutuminen

Suurten rakenteiden, kuten voimajohtopylväiden, kaatumisen ennaltaehkäisyksi rakenteet suunnitellaan kestäväksi tulevia myrskyjä. Riittävät suojavyöhykkeet ja niiden asianmukaisella ylläpidolla voidaan ennaltaehkäistä puiden kaatumista voimalinjojen päälle.

2.7.3 Tulvariskit

Voimalinjareittien meren rannassa olevat alueet sijoittuvat meritulvariskialueille. Vaikutus kohdistuu enemmän maakaapeleihin, jotka sijaitsevat ranta-alueilla. Voimajohtoista SVE2a ja SVE2b sijoittuvat sellaiselle meritulvariskialueelle, jossa mahdollisuus tulvalle on kerran kahdessa vuodessa.

Sopeutuminen

Meritulvariskin ei arvioida kasvavan ilmastonmuutoksen vaikutuksesta kovin paljoa maan kohoamisen myötä. Meritulvariski kuitenkin on olemassa rannikkoalueilla. Vaikutusta on todennäköisesti enemmän maakaapeleihin kuin voimajohtoihin ja ne onkin suunniteltava kosteuden kestäviksi. SVE2a ja SVE2b ilmajohtojen perustuksien rakentamisessa on otettava huomioon meritulvariski niillä alueilla, joissa kyseinen riski on.

2.8 Arvioinnin epävarmuudet

Arviointi on pyritty toteuttamaan yliarviona ja kaksoislaskentaa on vältetty. Päästölaskennan tulokset ovat laskennallisia tuloksia, jotka on arvioitu saatavilla olleiden lähtötietojen ja soveltuviksi arvioitujen päästökertoimien perusteella eikä niitä pidä käsitellä absoluuttisina totuuksina.

Verifioituja LCA:ta on pyritty löytämään ja hyödyntämään niiden tarkkuuden vuoksi, mutta usein sellaisia ei ole ollut saatavilla. Muuten laskenta on tehty materiaaliperusteisesti perustuen suurimpiin materiaalmääriin, kuljetuksiin ja muihin merkittäviin päästölähteisiin. Tällöin laskenta on suppeampi ja siihen liittyy enemmän epävarmuutta.

Merikaapeleiden laskentaan liittyy epävarmuutta liittyen kaapelikokoon. Suureen kaapelikokoon sopivia verifioituja LCA-tutkimuksia tai muita vastaavia päästökertoimia ei löytynyt, joten merikaapelit on laskettu mantereella voimajohdoissa käytettyjen kaapeleiden päästökertoimella.

Ruoppausta ja sedimenttien läjitystä ei otettu erikseen huomioon ilmastovaikutusten arvioinnissa. Merituulivoimaloiden osalta sen päästöt luotetaan sisältyvän laskennassa hyödynnettyyn LCA:han. LCA-raportti sisältää koneiden käytön päästöt maatöistä tuulivoimala-alueella, mutta siinä ei erikseen sanallisesti eritellä esimerkiksi ruoppauksen tai sedimenttien osuutta. Koska tuulivoimaloiden elinkaareen verrattuna ruoppauksen päästöt eivät todennäköisesti ole merkittävät, on ruoppauksen päästöt ja sedimenttien läjitys rajattu kaksoislaskennan välttämiseksi pois. Lisäksi mahdollista ruoppauksen yhteydessä tapahtuvaa vedenalaisen hiilivaraston menetystä ei ole otettu huomioon. Laskelma ei siten vastaa täydellisesti tulevaa toteutusta.

Merkittävimmäksi epävarmuudeksi voidaan arvioida VE0:n laskenta, sillä arvioinnin loppupäätelmät perustuvat vahvasti sen pohjalle. VE0 on pyritty arvioimaan realistisilla vertailuarvoilla, mutta todellisuudessa hankkeen päästövähennysvaikutus riippuu siitä, mihin suuntaan sähkön tuotantorakenne ja kulutus kehittyvät tulevaisuudessa.

Ilmastonmuutoksen vaikutuksien arvioinnissa epävarmuutta liittyy ennustettujen ilmastoskenaarioiden toteutumiseen tulevana vuosikymmeninä. Erityisesti tuulisuuden muutosten mallinnustuloksissa on suuret vaihteluvälit, jolloin luotettavia ennusteita on vaikea tehdä. Arvioinnissa on käytetty parhaimpiin saatavilla oleviin tutkimuksiin perustuvia tietoja.

Epävarmuutta liittyy myös puuston hiilivaraston ja maaperän hiilinielun menetyksiin. Puuston hiilivarasto on laskennassa oletettu menetettäväksi välittömästi hakkuuhetkellä, mutta todellisuudessa menetyksen ajankohta on riippuvainen puun loppukäyttökohteesta. Maaperän hiilinielu taas on laskettu keskimääräisellä suomalaisen kivennäismaan metsän hiilinielun kertoimella, jolloin se ei huomioi erilaisten kasvupaikkatyyppien vaikutusta nielun suuruuteen. Lisäksi hakkuiden ja muun maanmuokkauksen vaikutusta nieluihin on vaikea arvioida laskennallisesti.

2.9 Haittojen ehkäiseminen ja lieventäminen

Vaikka tuulivoima itsessään auttaa kokonaisvaikutusten lieventämisessä, on tulevaisuudessa kiinnitettävä huomiota entistä enemmän myös rakentamisessa ja tuulivoimalan materiaalien tuottamisessa syntyviin päästöihin.

Kasvihuonekaasupäästöihin voidaan vaikuttaa hankkeen tapauksessa rakentamisessa, huollossa ja purkamisessa käytettävillä polttoaineilla ja esimerkiksi logistiikan huolellisella suunnittelulla. Esimerkiksi hankkeen aikana käytettävien ajoneuvojen ja

työkoneiden valinnassa yhtenä vaikuttavana tekijänä voisi olla vähäpäästöisyys kuten vähäpäästöisten polttoaineiden käyttö.

Materiaalien tehokkaalla käytöllä ehkäistään turhaa materiaalityöntekoa ja logistiikkaa. Mikäli mahdollista, merkittävimmät vaikutusten lieventäminen saadaan käyttämällä vähähiilisiä ja kierrätettyjä materiaaleja, mutta ennen käyttöä on varmistettava niiden soveltuvuudesta rakenteeseen, jotta rakenteista tulee turvalliset. Mahdollinen vähähiilinen materiaali voisi esimerkiksi olla vähäpäästöinen betoni. Hiilijalanjälkeä voidaan pienentää myös valitsemalla materiaalien valmistajia, jotka hyödyntävät toiminnassaan fossiilitonta energiaa. Lisäksi materiaalien kierrätyksellä ja uusiokäytöllä voidaan vähentää muualla neitseellisten materiaalien käyttöä sekä useimmiten kokonaiskuvassa myös päästöjä.

Hankkeen puustoon kohdistuvia ilmastovaikutuksia voidaan lieventää hakattavan puuston kestäväällä käytöllä ja maaperän rikkoutumista estävillä toimintatavoilla. Puusto voidaan hyödyntää kohteissa, joissa siitä saadaan parhain arvo ilmastollisesti ja taloudellisesti. Sillä voidaan esimerkiksi korvata fossiilisia kemikaaleja tai hyödyntää pitkäikäisissä puun hiiltä sitovissa käyttökohteissa.

Voimajohdon käytön aikaista hiilijalanjälkeä voidaan pienentää tekemällä vaadittavat tarkastukset esimerkiksi dronella mahdollisuuksien mukaan. Käytön jälkeistä hiilijalanjälkeä voidaan pienentää uusiokäyttämällä tai kierrättämällä purettavat materiaalit.

3 LÄHDELUETTELO

CO2data, 2023. Infrarakentaminen. (Useita päästökertoimia, jotka mainittu selostuksessa.)

CO2data, 2023. Rakentaminen. (Useita päästökertoimia, jotka mainittu selostuksessa.)

DEFRA, 2023. Conversion factors. Saatavilla: <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2022>

Ecoinvent 3.9.1. Electricity production, wind, 1–3 MW turbine, offshore – FI.

EFLA 2018. Life cycle assessment for transmission towers. A Comparative study of three tower types. 20.02.2018. [LIFE CYCLE ASSESSMENT FOR TRANSMISSION TOWERS · Transmission towers, life cycle assessment, carbon footprint, environmental impacts Statnett is developing prototypes for new types - \[PDF Document\] \(documents.pub\)](#)

EPA 2023. Climate Change Indicators: Snow and Ice [<https://www.epa.gov/climate-indicators/snow-ice>] 20.10.2023

FAO 2022. Felling, Production rate, table 9./Extraction, productivity, table 10. Saatavilla: <https://www.fao.org/3/y2698e/y2698e09.htm>

Fingrid, 2015. Peltopylväs – esite. Osoitteessa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/fingrid_peltopylvas_esite_2015_netti.pdf

Fingrid, 2024. Häviösähkö. [<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/sahkon-siirtovarmuus/haviosahko/>]

GHG Protocol. AR5 SF6 value. Saatavilla: https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Va-lues%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf

Gregow, H., Mäkelä, A., Tuomenvirta, H., Juhola, S., Käyhkö, J., Perrels, A., Kuntsi-Reunanen, E., Mettiäinen, I., Näkkäläjärvi, K., Sorvali, J., Lehtonen, H., Hildén, M., Veijalainen, N., Kuosa, H., Sihvonen, M., Johansson, M., Leijala, U., Ahonen, S., Haapala, J., Korhonen, H., Ollikainen, M., Lilja, S., Ruuhela, R., Särkkä, J. & Siiriä, S-M., 2021. Ilmastonmuutokseen sopeutumisen ohjauskeinot, kustannukset ja alueelliset ulottuvuudet. Suomen ilmastopaneelin raportti 2/2021.

HELCOM, 2023. Baltic Sea acidification. HELCOM element indicator report. Online. [<https://indicators.helcom.fi/indicator/acidification/>] 20.10.2023

Hiraishi ym. (toim.) 2014. 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol. Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change. [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/pdf/KP_Supplement_Entire_Report.pdf] (9.11.2023)

IEA 2023. Hydrogen [<https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>]

Ilmasto-opas 2022. Pohjanmaa – Pohjanlahden vaikutuksessa. [<https://www.il-masto-opas.fi/artikkelit/pohjanmaa-pohjanlahden-vaikutuksessa>]

Ilmatieteen laitos 2021b. Climate change and forest management affect forest fire risk in Fennoscandia. Reports 2021:3. ISBN 978-952-336-135-5. [<https://helda.helsinki.fi/items/962003d1-c603-4361-8e31-56dac0e09c1a>]

Ilmatieteen laitos 2022. Suomen ilmastovyöhykkeet. [<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/suomen-ilmastovyohykkeet>]

Ilmatieteen laitos 2023. Lämpötila- ja sadekarttoja vuodesta 1961. [<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/karttoja-vuodesta-1961>]

IPCC 2007. Climate Change 2007. AR4 Synthesis Report. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf]

IPCC 2023. IPCC WGI Interactive Atlas: Regional information (Advanced). Dataset: CMIP6. 20.10.2023

Lehtonen, A., Mäkipää, R., Heikkinen, J., Sievänen, R. & Liski, J. 2004. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. Forest Ecology and Management 188 (2004) 211–224.

Lindroos, A. J., Mäkipää, R. & Merilä, P. 2022. Soil carbon stock changes over 21 years in intensively monitored boreal forests stands in Finland. Ecological Indicators 144, November 2022, 109551. [<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109551>].

Luonnonvarakeskus (LUKE) 2023. Tilastotietokanta. Metsävarat. [https://statdb.luke.fi/PxWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__06%20Metsavara_t/?rxid=f8ed5f38-9607-4c55-91c9-791d660b234e]

Midal Cables, 2020. EPD. Teräsvahvistetut alumiinijohtimet (AACSR). Sveid Conductor. Saatavilla: <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/63766e80-7e1f-485f-a985-efa9816fa31f/Data>

Njordr Offshore Wind AB 2022. Ennen Ruotsin talousvyöhykelain ja mannerjalustalain mukaisen luvan hakemista. Kuulemisasiakirja. Bothnia Offshore Kappa. Tuulipuisto ja siihen liittyvä sisäinen kaapeliverkko Ruotsin talousvyöhykkeellä Itämerellä. 19.6.2022. 84 s.

Pellikka, H., Leijala, U., Johansson, M. M., Leinonen, K., Kahma, K. K., 2018. Future probabilities of coastal floods in Finland. Continental Shelf Research, 157, pp. 32-42. DOI: 10.1016/j.csr.2018.02.006

Pohjanmaan liitto 2016. Pohjanmaan ilmastostrategia 2040. [<https://www.obotnia.fi/assets/Sidor/1/60/Energiarannikko-Pohjanmaan-ilmastostrategia-2040-raportti-1.pdf>]

Pusa, 2020. Jakeluverkkoyhtiön sähköasemahankinnan kojeistomäärittelyt. DI-työ. Saatavilla: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161136/Diplomityo_Pusa_Erkki.pdf?sequence=1

Ruosteenoja K., Vihma T. & Venäläinen A. (2019). Projected changes in European and North Atlantic seasonal wind climate derived from CMIP5 simulations. Journal of Climate, 32(19), 6467-6490. [<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0023.1>]

Schlömer S., T. Bruckner, L. Fulton, E. Hertwich, A. McKin-non, D. Perczyk, J. Roy, R. Schaeffer, R. Sims, P. Smith, and R. Wiser, 2014: Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. IPCC. Table A. III. 2. Wind offshore. Saatavilla: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf

Siemens Gamesa 2023. Electricity from a European offshore wind farm using SG 14-236 wind turbines. EPD. Saatavilla: <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/ed639d2a-69c6-402e-da38-08dbb377d685/Data>

Schneider B., Eilola K., Lukkari K., Muller-Karulis B., Neumann T., 2015. Environmental Impacts - Marine Biogeochemistry. BACC II Author Team 2015. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. New York: Springer-Verlag

Suomen ympäristökeskus 2020. Specific emissions for district heat, district cooling and electricity used in buildings. Saatavilla: <https://co2data.fi/rakentaminen/reports/Energy%20service%20R01.00.pdf>

Takala J., Kivirinne J., Bäckström S., Leino V., 2022. Meriliikenteen vaihtoehtoiset käyttövoimat. Selvitys vaihtoehtoisten käyttövoimien ja polttoaineiden jakeluinfrastruktuurin kehittämistarpeista satamissa. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2022:12. [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164393/LVM_2022_12.pdf?sequence=1&isAllowed=y]

The World Bank, 2018. Electric power transmission and distribution losses (% of output) - Finland [<https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS?locations=FI>]

Tuuliatlas 2023. Suomen Tuuliatlas, Ilmatieteen laitos. [<http://tuuliatlas.fmi.fi/>]

VTT Lipasto, 2021. (Hakkuukoneen, moottorisahan, mönkijän ja moottorikelkan päästökerroimet).

Väylävirasto 2023. Infrarakentamisen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. Väyläviraston ohjeita 43/2023.

Ympäristöministeriö 2023a. Euroopan unionin ilmastopolitiikka. [<https://ym.fi/euroopan-unionin-ilmastopolitiikka>]

Ympäristöministeriö 2023b. Suomen kansallinen ilmastopolitiikka. [<https://ym.fi/suomen-kansallinen-ilmastopolitiikka>]

Internet-lähteet on tarkastettu 1.10.2023.-11.3.2024. välisenä aikana, ellei toisin ole mainittu.