



Tuulivoiman ulkoisvaikutusten arvioinnin lähestymistavat ja haasteet

Anni Niemi

Tuulivoiman ulkoisvaikutusten arvioinnin lähestymistavat ja haasteet

Anni Niemi

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy



**Euroopan unionin
rahoittama**

NextGenerationEU

Euroopan unionin rahoittama – NextGenerationEU. Esitetyt näkemykset ja mielipiteet ovat ainoastaan tämän tekstin laatijoiden näkemyksiä eivätkä välttämättä vastaa Euroopan unionin tai komission kantaa. Euroopan unioni ja komissio eivät ole vastuussa niistä.

ISBN 978-951-38-8810-7

VTT Technology 446

ISSN-L 2242-1211

ISSN 2242-122X (Verkköjulkaisu)

DOI: 10.32040/2242-122X.2026.T446

Copyright © VTT 2026

JULKAISIJA – PUBLISHER

VTT

PL 1000

02044 VTT

Puh. 020 722 111

<https://www.vtt.fi>

VTT

P.O. Box 1000

FI-02044 VTT, Finland

Tel. +358 20 722 111

<https://www.vttresearch.com>

Alkusanat

Tässä raportissa tarkastellaan energiantuotannon ulkoisvaikutusten arviointia neljästä eri lähteestä: kirjallisuudesta, ympäristövaikutusten arviointi (YVA)-menettelyistä, elinkaarianalyysistä (LCA) ja energiatehokkuus ensin -periaatteen mukaisista linjauksista, jotka on esitetty Euroopan komission energiatehokkuusdirektiivissä (EU 2023). Vertailu paljastaa, että samoja ulkoisvaikutuksia tarkastellaan eri lähteissä ja menetelmissä eri tavoin ja näiden harmonisointi ja yhtenäistäminen voisi lisätä muun muassa hankkeiden valmistelun sujuvoittavuutta.

Tutkimus on Euroopan unionin rahoittama – NextGenerationEU. Se toteutettiin osana REPower-CEST (Clean Energy System Transition) -hanketta, jonka tavoitteena on kehittää tietoperustaa luoda tiekartta puhtaan energian kestävän ja oikeudenmukaisen siirtymän toteuttamiseksi Suomessa.

Sisältö

Alkusanat	1
Sisältö	2
Lyhenteet	3
1 Tuulivoiman ulkoisvaikutukset	4
1.1 Mikä on ulkoisvaikutus?.....	4
1.2 Mitä erityispiirteitä ulkoisvaikutuksilla on tuulivoimassa?.....	5
1.3 Miksi ulkoisvaikutusten vertailu on tärkeää?.....	5
2 Eri tapoja kirjallisuudessa kvantifioida ulkoisvaikutuksia tuulivoimalle ..	7
3 Elinkaararviointi	11
4 Energiatehokkuus ensin -periaate	14
5 Ympäristövaikutusten arviointi	17
6 Eri menetelmien vertailu	19
7 Mittayksiköt ja laskennan haasteet	26
8 Yhteenveto ja johtopäätökset	29
Kiitokset	31
Viitteet	32

Lyhenteet

CE	Valintakoe (Choice Experiment)
EEF	Energiatehokkuus ensin -periaate (Energy Efficiency First)
EU	Euroopan unioni
LCA	Elinkaariarviointi (Life Cycle Assesment)
LCIA	Elinkaarivaikutusten arviointi (Life Cycle Impact Assessment)
LCOE	Sähkön tasoitettu tuotantokustannus (Levelised Cost of Electricity)
ReCiPe	Vaikutusarviointimenetelmä elinkaarivaikutusten arvioinniss
WTA	Halukkuus hyväksyä (Willingness to Accept)
WTP	Halukkuus maksaa (Willingness to Pay)
YVA	Ympäristövaikutusten arviointi

1 Tuulivoiman ulkoisvaikutukset

1.1 Mikä on ulkoisvaikutus?

Ulkoisvaikutuksilla tarkoitetaan kustannuksia tai hyötyjä, jotka syntyvät taloudellisen toimijan päätöksistä, mutta kohdistuvat muihin osapuoliin ilman, että ne näkyvät markkinahinnoissa. Taloustieteessä ulkoisvaikutukset nähdään markkinahäiriönä, joka johtaa tehottomaan lopputulokseen, kun tuotteen tai palvelun hinta ei heijasta sen koko yhteiskunnallista kustannusta tai hyötyä. Esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden poltosta syntyy hiilidioksidi- ja pienhiukkaspäästöjä, jotka vauhdittavat maapallon ilmaston lämpenemistä sekä heikentävät ihmisten terveyttä ja ekosysteemejä, ja nämä haitat jäävät usein markkinoiden ulkopuolelle, ellei niille aseteta hintaa. (Mandel ym. 2022) Myös uusiutuva energiantuotanto voi aiheuttaa negatiivisia ulkoisvaikutuksia mm. maankäytön, vedenkäytön, maisemavaikutusten ja melun muodossa (Sovacool ym. 2021).

Ulkoisvaikutuksia voi olla myös positiivisia: esimerkiksi uusiutuvalla energiantuotannolla ja energiatehokkuustoimilla voi olla terveyttä, hyvinvointia tai tuottavuutta parantavia vaikutuksia, joita ei huomioida investointien perinteisessä kannattavuuslaskennassa. Ulkoisvaikutusten sisällyttäminen hintamekanismiin voi tapahtua esimerkiksi haittaveron tai päästökaupan muodossa, jolloin syntyy kannustimia vähentää haittoja ja lisätä hyötyjä. (Mandel ym. 2022) Esimerkiksi päästökauppa on markkinaehtoinen ohjauskeino, jonka piirissä olevat yritykset päättävät vähentävätkö ne päästöjään omilla toimillaan vai ostavatko markkinoilta tuottamiaan päästöjä vastaavan määrän päästöoikeuksia. EU:ssa on ollut vuodesta 2005 toiminnassa yleinen päästökauppa, jonka piiriin kuuluvat muun muassa suuri osa energia- ja teollisuuslaitoksista. Lisäksi EU:n sisäiselle, meri- ja lentoliikenteelle on omat päästökauppamekanismit. Vuodesta 2028 lähtien EU:ssa otetaan asteittain käyttöön nykyisen päästökaupan ulkopuolisen, eli taakanjakosektorin polttoaineen kulutuksen luovutukseen kohdistuva päästökauppa. (International Carbon Action Partnership, 2026)

Ulkoisvaikutusten rahallistaminen (monetisointi) esimerkiksi elinkaarivaikutusten (LCIA, Lifecycle Impact Assessment) pohjalta helpottaa niiden vertailua muihin kustannuksiin ja voi tuoda paremmin esiin toimien todellisen yhteiskunnallisen arvon. Joissain tapauksissa negatiivisten ulkoisvaikutusten hinta voi muodostua suuremmaksi kuin itse tuotteen, mikä korostaa markkinamekanismin rajoja ja

tarvetta ohjaaville toimenpiteille (Sovacool ym. 2021). Ulkoiskustannuksia ja niiden mahdollisia hintavaikutuksia on kuitenkin hyvin haasteellista arvioida, mitä on tarkemmin esitelty luvuissa 2 ja 7.

1.2 Mitä erityispiirteitä ulkoisvaikutuksilla on tuulivoimassa?

Tuulivoimaloihin liittyvät kielteiset ulkoisvaikutukset riippuvat voimaloiden ja niiden voimajohtojen fyysisistä ominaisuuksista ja maantieteellisestä sijainnista. Lisäksi tuulivoimaloiden rakentamiseen ja ylläpitoon liittyy muuta infrastruktuuria, kuten investoinnit tiestöön. Tuulivoiman tuotannossa yksi keskeinen piirre on ulkoisvaikutusten paikallisuus: meluhaitat, maisemavaikutukset, virkistysalueiden heikentyminen ja kiinteistöarvojen mahdollinen lasku kohdistuvat ensisijaisesti lähialueen asukkaisiin ja ympäristöön. Tutkimukset osoittavat, että myös kaukana voimaloista asuvilla ihmisillä voi olla vahva halu suojella luontoarvoja tai maisemia, vaikka he eivät itse käyttäisi aluetta; tämä ilmiö tunnetaan usein eksistentiaalisena arvona (Greaker ym. 2024). Esimerkiksi Jørgensen ym. (2013) tapaustutkimuksessaan totesi, että joen kunnostamisesta olivat valmiita maksamaan myös ihmiset, jotka ilmoittavat, etteivät käytä jokea mihinkään tarkoitukseen. Ulkoisvaikutukset ovat siten vaikeasti mitattavia ja paikkasidonnaisia, mikä korostaa huolellisen vaikutusarvioinnin ja hyväksyttävyyden merkitystä. On tärkeää huolehtia siitä, että oikeudenmukaisen siirtymän tavoitteet toteutuvat käytännössä erityisesti niillä alueilla, jotka kokevat muutoksen vaikutukset kaikkein välittömimmin (Grimsrud ym. 2021).

Negatiiviset ulkoisvaikutukset eivät kuitenkaan tarkoita, että tuulivoimaloita ei pitäisi rakentaa, sillä tuulivoimaloilla on myös myönteisiä vaikutuksia. Niitä ovat muun muassa kasvihuonekaasupäästöjen ja paikallisten ilmansaasteiden väheneminen verrattuna esimerkiksi polttoon perustuvaan energiantuotantoon sekä mahdollisesti alhaisemmat järjestelmäkustannukset kuin vaihtoehtoisilla vähähiilisen sähköntuotannon tavoilla (Sovacool ym. 2021). Päätäjien ja hankekehittäjien olisi näin ollen punnittava näitä myönteisiä vaikutuksia tuulivoimaloihin liittyviä negatiivisia vaikutuksia vastaan. (Wehrle 2021)

1.3 Miksi ulkoisvaikutusten vertailu on tärkeää?

Tuulivoimahankkeiden suunnittelussa ja toteutuksessa ulkoisvaikutusten huomioiminen on keskeistä taloudellisen tehokkuuden, sosiaalisen hyväksyttävyyden ja luontovaikutusten näkökulmista. Ilman ulkoisvaikutusten sisällyttämistä päätöksentekoon tuulivoimaa sijoitetaan usein puhtaasti edullisimpien tuotantokustannusten perusteella, mikä ei tuota yhteiskunnallisesti optimaalista lopputulosta (Lehman ym. 2021). Useimmat energiajärjestelmämallit eivät huomioi ulkoisvaikutuksia, vaan keskittyvät suunnittelukustannusten minimointiin teknisten rajoitteiden puitteissa. Yksinkertaisimmissa malleissa maatuulivoimaa laajennetaan koko elinkaaren ajalta lasketun sähkön tasoitettun tuotantokustannuksen (LCOE, Levelised Cost of Electricity) perusteella, kunnes tekninen potentiaali täyttyy. Tarkemmissa malleissa käytetään kustannuspotentiaalikäyriä, jotka kuvaavat, kuinka paljon sähköä voidaan tuottaa

eri kustannustasoilla; alkaen tuulisimmista, edullisimmista paikoista ja siirtyen vähitellen kalliimpiin alueisiin. Kustannuspotentiaalikäyrät osoittavat, kuinka paljon sähköä voidaan tuottaa milläkin kustannuksilla: niissä esitetään vuotuinen tuotanto tai asennettu kapasiteetti x-akselilla ja LCOE y-akselilla. Käyrät ovat nousevia, koska tuuliset paikat otetaan käyttöön ensin, ja myöhemmin on otettava käyttöön epäedullisempia resursseja. (Ruhnau ym. 2024)

Useat tutkimukset osoittavat, että ulkoisvaikutusten sisällyttäminen mallinnukseen voi muuttaa merkittävästi voimaloiden optimaalista sijaintia, esimerkiksi Norjassa hankkeiden siirtäminen etelästä pohjoiseen vähensi paikallisia haittoja huomattavasti ilman merkittävää vaikutusta energijärjestelmän kokonaisyötyyn (Grimsrud ym. 2024).

Taloudelliset ohjauskeinot, kuten haittaverot tai kompensatiojärjestelmät, voivat auttaa sisäistämään nämä ulkoisvaikutukset ja ohjata investointeja kestävämpään suuntaan (Grimsrud 2021). Myös asukkaiden hyväksyntä kasvaa, kun haitat tunnistetaan ja niitä pyritään hyvittämään esimerkiksi suoran taloudellisen kompensatian tai alennettujen sähkönhintojen muodossa. Kuitenkaan pelkkä taloudellinen korvaus ei aina riitä, sillä hyväksyntään vaikuttavat myös mm. kokemukset oikeudenmukaisesta prosessista ja osallisuudesta hankkeissa (Lehman ym. 2021).

Lopulta ulkoisvaikutusten huomioiminen tukee paitsi yksittäisten hankkeiden onnistumista, myös laajempaa puhdasta energiasiirtymää, eli talouden ja energiantuotannon rakennemuutosta kohti hiilineutraalia ja kestävää yhteiskuntaa, jossa fossiilisista polttoaineista luovutaan ja siirrytään puhtaisiin energialähteisiin. Kun haitat ja hyödyt jaetaan oikeudenmukaisesti ja päätöksenteko on läpinäkyvää, voidaan samalla vahvistaa siirtymän hyväksyttävyyttä, parantaa hankkeiden toteutettavuutta ja tuottaa hyötyjä sekä yhteiskunnalle että ympäristölle.

2 Eri tapoja kirjallisuudessa kvantifioida ulkoisvaikutuksia tuulivoimalle

Kirjallisuudessa ja mallinnuksessa on käytetty erilaisia tapoja määritellä ja kvantifioida tuulivoiman ulkoisvaikutuksia. Tässä raportissa tarkasteltu aineisto painottuu eurooppalaisiin ja pohjoismaisiin tarkasteluihin, joissa on eri tavoin laskettu tuulivoiman ulkoisvaikutuksia. Näitä ovat ulkoisvaikutusten rahallistaminen eri tavoilla, ulkoisvaikutusten huomiointi sääntelyllä ja rajoitteilla ja ulkoisvaikutusten sisällyttäminen kokonaistaloudelliseen analyysiin.

Rahallistamalla ulkoisvaikutuksia pyritään asettamaan ulkoisvaikutuksille konkreettinen rahallinen arvo, jota voidaan käyttää taloudellisessa optimoinnissa tai kustannus-hyötyanalyseissä. Erilaisia rahallistamismenetelmiä ovat valintakokeet (Choice Experiments, CE), hedoninen hinnoittelu ja elämänlaatulähestymistapa.

Valintakokeissa koehenkilöitä pyydetään vertailemaan esimerkiksi useita tuulipuistoja, jotka voivat erota toisistaan niiden läheisyyden, korkeuden ja lukumäärän perusteella, ja ilmoittamaan maksuhalukkuutensa (willingness to pay, WTP) mieluisimman tuulipuiston toteuttamisesta tai halukkuutensa hyväksyä (willingness to accept, WTA) epämieluisan lopputuloksen. Vaihtoehtoisesti koehenkilöitä voidaan pyytää vertailemaan tuulienergiaa muihin sähköntuotantomuoihin (Tikkanen ym. 2026). Maksuhalukkuus kertoo, kuinka paljon ihmiset ovat valmiita maksamaan jonkin hyödykkeen tai palvelun saamiseksi tai parantamiseksi, kun taas hyväksymishalukkuus ilmaisee, kuinka suuren rahamäärän ihminen kokee riittäväksi korvaukseksi haitasta tai menetetyistä hyödykkeistä. Esimerkiksi Norjassa Garcia ym. (2016) arvioivat tuulivoimalan WTA:n vaihtelevan 5,24 ja 24,05 USD välillä kotitaloutta kohti vuodessa riippuen siitä, asuvatko ihmiset lähellä vai kaukana alueesta ja ovatko he alueiden käyttäjiä vai eivät. Navrud ym. (2008) mukaan kotitaloudet olivat valmiita maksamaan keskimäärin 15,42 USD vuodessa siitä, että heidän lähiympäristössään vältetään yksi kilometri jakeluverkon voimajohtoa ja 30,83 USD vuodessa siitä, että vältetään yksi kilometri suurjännitelinjan rakentamista. Kolmannessa norjalaisessa tutkimuksessa Grimsrud ym. (2024) käyttivät WTP:nä 23 € kotitaloutta kohti yhden tuulivoimalan välttämiseksi. Kirjallisuudessa merkittävin ja johdonmukaisin tulos on se, että ne negatiiviset ulkoisvaikutukset eli haittakustannukset pienenevät tuulivoimaloiden ja koehenkilöiden kotien välisen etäisyyden kasvaessa.

Hedonisessa hinnoittelussa asuntojen hinnat toimivat epäsuorina indikaattoreina tuulivoiman ulkoisvaikutuksista, etenkin maisemahaitoista. Perusajatuksena on,

että tuulivoiman aiheuttamat haitat voivat alentaa läheisten kiinteistöjen, erityisesti talojen, hintoja. Tämä voi johtua siitä, että omistajat saavat pienempää hyötyä asumisesta kyseisissä taloissa tai pienempää vuokraa vuokralaisilta, joiden maksuhalukkuus on vähentynyt. Näyttö on kuitenkin ristiriitaista: esim. Linnala (2024) selvitti, ettei tuulivoimaloiden voida osoittaa Suomessa vaikuttaneen kiinteistöjen hintoihin, mutta muissa tutkimuksissa on voitu laskea arvonalennuksia -1,4 %...-14 % (esim. Ruhnau ym. 2022; Dröes & Koster 2021; Dröes & Koster 2016).

Elämänlaatumittauksissa (Life Satisfaction Approach) arvioidaan, kuinka paljon tuloja pitäisi lisätä kompensoimaan tuulivoimalan läsnäolosta aiheutuva elämänlaadun laskua asukkaille. Krekel & Zerrahn (2017) saivat tulokseksi Saksassa noin 40 €/henkilö/voimala/vuosi, kun asutaan alle 4 km:n etäisyydellä voimalasta.

Ulkoisvaikutuksia voidaan myös huomioida mallinnuksessa tai päätöksenteossa erilaisten sääntöjen tai rajoitusten avulla ilman niiden rahallistamista. Tällöin voidaan malleille asettaa esim. puskurivyöhykkeitä tai poissulkusäntöjä.

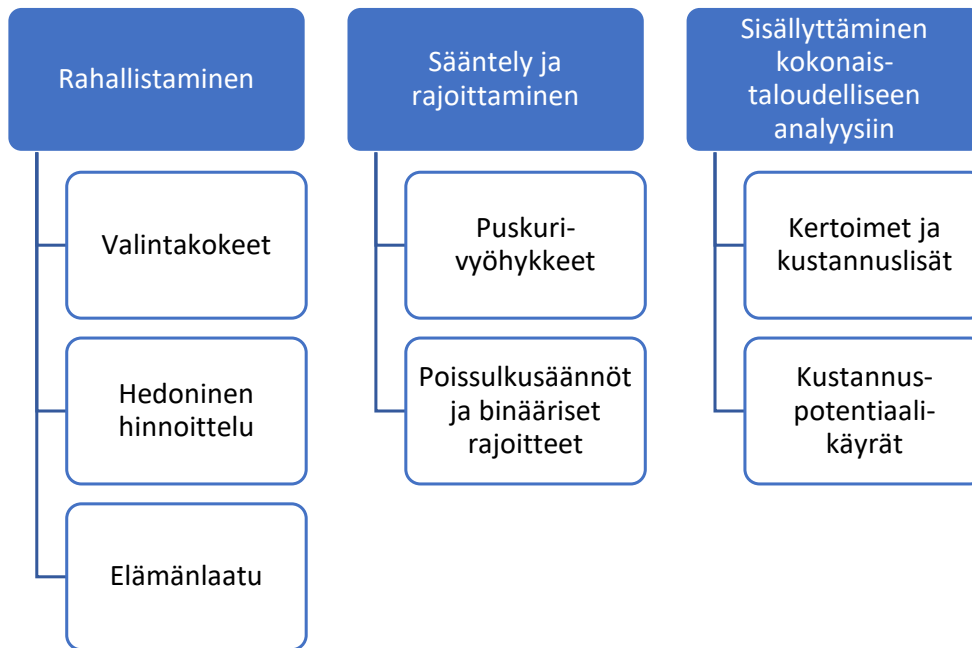
Tuulivoimaloille ei ole Suomessa valtakunnallista pakollista etäisyysmääräystä, vaan riittävä etäisyys määritellään tapauskohtaisesti. Yleisessä käytännössä tyyppillinen etäisyys asutukseen on ollut noin 800–1 000 metriä, mutta monet kunnat ovat itse alkaneet määrätä tiukempia, usein kahden kilometrin, vähimmäisetäisyyksiä haittavaikutusten minimoimiseksi. Hallituksen keväällä 2025 esitetty ehdotus uudeksi alueidenkäyttölainsäädännön ehdottaa tuulivoimaloiden minimietäisyydeksi asutuksesta 8 kertaa voimalan korkeuden, käytännössä nykyteknologian tuulivoimaloille tämä tarkoittaisi vähintään 2–3 kilometriä. Hallituksen esitys uudeksi alueidenkäyttölainsäädännön on tarkoitus antaa eduskunnalle keväätistuntokaudella 2026.

Etäisyysvaatimuksilla voidaan määrittää asutusalueiden ja esim. linnunpesien ympärille puskurivyöhykkeitä, joilla tuulivoiman käyttö on kielletty. Linnuista huolehtimiseksi haavoittuvien ja uhanalaisten lajien riskejä lievennetään usein kieltämällä tuulivoimalat pesimäpaikkojen ympärillä olevilla puskurivyöhykkeillä (mm. Vignali ym. 2021). Sliz-Szkliniarz ym. (2019) ovat havainneet, että Puolassa 2 km:n etäisyys asutusalueista vähentää maalla sijaitsevien tuulivoimaloiden teknistä potentiaalia jopa 63 % verrattuna 1 km:n etäisyyteen. Stede ym. (2021) mukaan etäisyysvaatimusten käyttöönotto Saksan Baijerin osavaltiossa vähensi tuulivoiman paikallista käyttöönottoa jopa 90 % ja nosti sähkön tuotantokustannuksia (LCOE) noin 0,2 c/kWh. Vastaavasti Meier ym. (2024) arvioivat koko Saksan kattavan aineiston perusteella, että asutusalueiden sijainnin rajoitusten lisääminen 100 metrillä on vähentänyt vuotuista tuulivoiman lisäystä 15,4 %. Toisaalta Reutter ym. (2023) osoittivat, että isohaarahaukkojen pesien puskurivyöhykkeiden (1500 m tai 1000 m) käyttöönotto alentaisi tuulivoiman tuotannon yhteiskunnallisia kustannuksia. Tutkimuksessa yhteiskunnalliset kustannukset määriteltiin yksityisten energiantuotantokustannusten ja tuulivoimaloista aiheutuvien ulkoiskustannusten summana. Ulkoiskustannuksina tarkasteltiin asukkaille aiheutuvia haittoja sekä isohaarahaukkoihin kohdistuvia törmäys- ja populaatiovaikutuksia. Tutkimuksen mukaan kaikissa

isohaarahaukkojen puskurivyöhykkeitä sisältävissä skenaarioissa mallinnetut yhteiskunnalliset kustannukset ovat alhaisemmat kuin ilman isohaarahaukkojen puskurivyöhykkeitä. Puskurivyöhykkeet voivat lisätä tai vähentää kokonaiskustannuksia riippuen siitä, kuinka optimaalisesti rajoitteet on asetettu ja mitä muita ulkoisvaikutuksia on otettu mukaan laskentaan. Mitä tiukemmat rajoitukset, sitä suuremmat ulkoisvaikutukset, mutta lajikohtaiset kohdennukset johtavat huomattavasti alhaisempiin kokonaiskustannuksiin kuin kaikille lajeille yhtenäiset rajoitukset.

Ulkoisvaikutukset voidaan huomioida myös poissulkusäännöillä. Esimerkiksi Grimsrud ym. (2024) otti ekologiset vaikutukset erikseen huomioon arvioimalla tuulivoimaloiden vaikutuksia erämaaluontoon ja biodiversiteettiin. Erämaa-alueet määriteltiin infrastruktuurivapaiksi vyöhykkeiksi, joissa eläimistö ja kasvillisuus voivat elää häiriöttömästi. Vaikutusten arviointiin käytettiin infrastruktuuri-indeksiä, joka mittaa infrastruktuurin intensiteettiä. Biodiversiteetin osalta arvioitiin mm. potentiaalisten tuulivoimala-alueiden päällekkäisyys uhanalaisten lajien elinalueiden, suojelualueiden, tärkeiden luontotyyppien sekä porojen elinpiirin kanssa. Tuulivoimaloiden sijainnin optimointimallissa merkittiin tai suljettiin pois potentiaaliset tuulivoimala-alueet, joiden pinta-alasta yli 1 % on biodiversiteettialuetta sekä alueet, jotka täyttävät erämaakriteerin (infrastruktuuri-indeksi <1,8).

Ulkoisvaikutukset voidaan myös sisällyttää optimointimalleihin, kustannus-hyötyanalyysiin tai kokonaistaloudelliseen analyysiin esimerkiksi erilaisina kertoina tai arvioina yksikkökustannuksista. Ruhnau ym. (2022) yhdistivät kirjallisuudessa esitettyjä haittakustannusten arvoja, joissa kustannukset määritellään tuulivoimalan ja asutuksen välisen etäisyyden perusteella, väestötiheyteen, tarkkaan paikkatietoaineistoon tuulennopeuksista sekä muihin maankäytön rajoitteisiin perustuen. Näin he pystyivät laskemaan tuulivoimalle kustannus-potentiaalikäyrät kaikissa Euroopan maissa. He arvioivat, että ulkoisvaikutukset nostivat maatuulivoiman elinkaaren ajalta lasketun sähkön tasoitettuja tuotantokustannuksia (LCOE, Levelised cost of Electricity) alueesta riippuen 0,2–25 €/MWh. Vaikutus on hyvin pieni verrattuna kustannuseroihin energiateknologioiden, kuten tuulivoiman ja ydinvoiman, välillä. (Ruhnau ym. 2022) Bolwig ym. (2020) mallinsivat energijärjestelmämallissaan hyväksynnän puutetta yksinkertaisilla kustannuslisillä maatuulivoimalle ja sähkönsiirtolinjoille. Eri skenaarioissa käytettiin eri kertoimia tuulivoiman ja sähkönsiirtolinjojen investointikustannuksille (1,25; 1,5 ja 2). Kustannuslisät siirsivät investointeja maatuulivoimasta kalliimpiin aurinkosähköön ja merituulivoimaan, ja suurimmat kustannuslisät nostivat kustannuksia kuluttajille 12 prosenttia.



Kuva 1. Eri tapoja kirjallisuudessa kvantifioida ulkoisvaikutuksia tuulivoimalle.

Monia kirjallisuudessa tunnistetuista ulkoisvaikutuksista on lisäksi vaihtelevalla tarkkuudella ja laajuudella käsitelty elinkaariarvioinnissa (LCA), Energiatehokkuus ensin -periaatteen kustannus-hyötyanalyseissa tai tuulivoimahankekohtaisissa ympäristövaikutusten arvioinneissa. Kuvassa 1 on esitelty yhteenveto kirjallisuudessa käytetyistä tavoista kvantifioida tuulivoiman ulkoisvaikutuksia.

3 Elinkaararviointi

Elinkaararviointi (LCA, Life Cycle Assessment) on kansainvälisesti vakiintunut menetelmä, jolla arvioidaan tuotteen, palvelun tai järjestelmän koko elinkaaren aikaisia potentiaalisia ympäristövaikutuksia raaka-aineiden hankinnasta valmistukseen, käyttöön ja loppusijoitukseen asti. LCA mahdollistaa eri ympäristövaikutusten yhtäaikaisen tarkastelun, ja se auttaa välttämään osaoptimointia, jossa yksi vaikutus vähenee toisen kustannuksella. Menetelmä pohjautuu ISO-standardeihin 14040 ja 14044. Menetelmä ei ole yhtä tarkka kuin mittauksiin perustuvat menetelmät, mutta se auttaa muodostamaan kokonaisvaltaisen kuvan vaikutuksista ja mahdollistaa tuulivoimaan sovellettaessa mm. kokonaisvaltaisen vertailun suhteessa muihin sähköntuotantotapoihin.

Tuulivoiman elinkaariin kasviuonekaasupäästöihin vaikuttavat toisaalta uusien voimaloiden rakentamisesta aiheutuvat päästöt ja toisaalta niiden käytön aikana vältetyt päästöt. Nykyaikaisen tuulivoimateknologian elinkaari- ja käyttö- ja loppusijoitus- ja loppusijoitukseen asti. LCA mahdollistaa eri ympäristövaikutusten yhtäaikaisen tarkastelun, ja se auttaa välttämään osaoptimointia, jossa yksi vaikutus vähenee toisen kustannuksella. Menetelmä pohjautuu ISO-standardeihin 14040 ja 14044. Menetelmä ei ole yhtä tarkka kuin mittauksiin perustuvat menetelmät, mutta se auttaa muodostamaan kokonaisvaltaisen kuvan vaikutuksista ja mahdollistaa tuulivoimaan sovellettaessa mm. kokonaisvaltaisen vertailun suhteessa muihin sähköntuotantotapoihin.

Tuulivoiman elinkaariin kasviuonekaasupäästöihin vaikuttavat toisaalta uusien voimaloiden rakentamisesta aiheutuvat päästöt ja toisaalta niiden käytön aikana vältetyt päästöt. Nykyaikaisen tuulivoimateknologian elinkaari- ja käyttö- ja loppusijoitus- ja loppusijoitukseen asti. LCA mahdollistaa eri ympäristövaikutusten yhtäaikaisen tarkastelun, ja se auttaa välttämään osaoptimointia, jossa yksi vaikutus vähenee toisen kustannuksella. Menetelmä pohjautuu ISO-standardeihin 14040 ja 14044. Menetelmä ei ole yhtä tarkka kuin mittauksiin perustuvat menetelmät, mutta se auttaa muodostamaan kokonaisvaltaisen kuvan vaikutuksista ja mahdollistaa tuulivoimaan sovellettaessa mm. kokonaisvaltaisen vertailun suhteessa muihin sähköntuotantotapoihin.

Elinkaarivaiheiden keskeinen osa on elinkaari- ja käyttö- ja loppusijoitus- ja loppusijoitukseen asti. LCA mahdollistaa eri ympäristövaikutusten yhtäaikaisen tarkastelun, ja se auttaa välttämään osaoptimointia, jossa yksi vaikutus vähenee toisen kustannuksella. Menetelmä pohjautuu ISO-standardeihin 14040 ja 14044. Menetelmä ei ole yhtä tarkka kuin mittauksiin perustuvat menetelmät, mutta se auttaa muodostamaan kokonaisvaltaisen kuvan vaikutuksista ja mahdollistaa tuulivoimaan sovellettaessa mm. kokonaisvaltaisen vertailun suhteessa muihin sähköntuotantotapoihin.

Elinkaarivaiheiden keskeinen osa on elinkaari- ja käyttö- ja loppusijoitus- ja loppusijoitukseen asti. LCA mahdollistaa eri ympäristövaikutusten yhtäaikaisen tarkastelun, ja se auttaa välttämään osaoptimointia, jossa yksi vaikutus vähenee toisen kustannuksella. Menetelmä pohjautuu ISO-standardeihin 14040 ja 14044. Menetelmä ei ole yhtä tarkka kuin mittauksiin perustuvat menetelmät, mutta se auttaa muodostamaan kokonaisvaltaisen kuvan vaikutuksista ja mahdollistaa tuulivoimaan sovellettaessa mm. kokonaisvaltaisen vertailun suhteessa muihin sähköntuotantotapoihin.

Elinkaarivaiheiden keskeinen osa on elinkaari- ja käyttö- ja loppusijoitus- ja loppusijoitukseen asti. LCA mahdollistaa eri ympäristövaikutusten yhtäaikaisen tarkastelun, ja se auttaa välttämään osaoptimointia, jossa yksi vaikutus vähenee toisen kustannuksella. Menetelmä pohjautuu ISO-standardeihin 14040 ja 14044. Menetelmä ei ole yhtä tarkka kuin mittauksiin perustuvat menetelmät, mutta se auttaa muodostamaan kokonaisvaltaisen kuvan vaikutuksista ja mahdollistaa tuulivoimaan sovellettaessa mm. kokonaisvaltaisen vertailun suhteessa muihin sähköntuotantotapoihin.

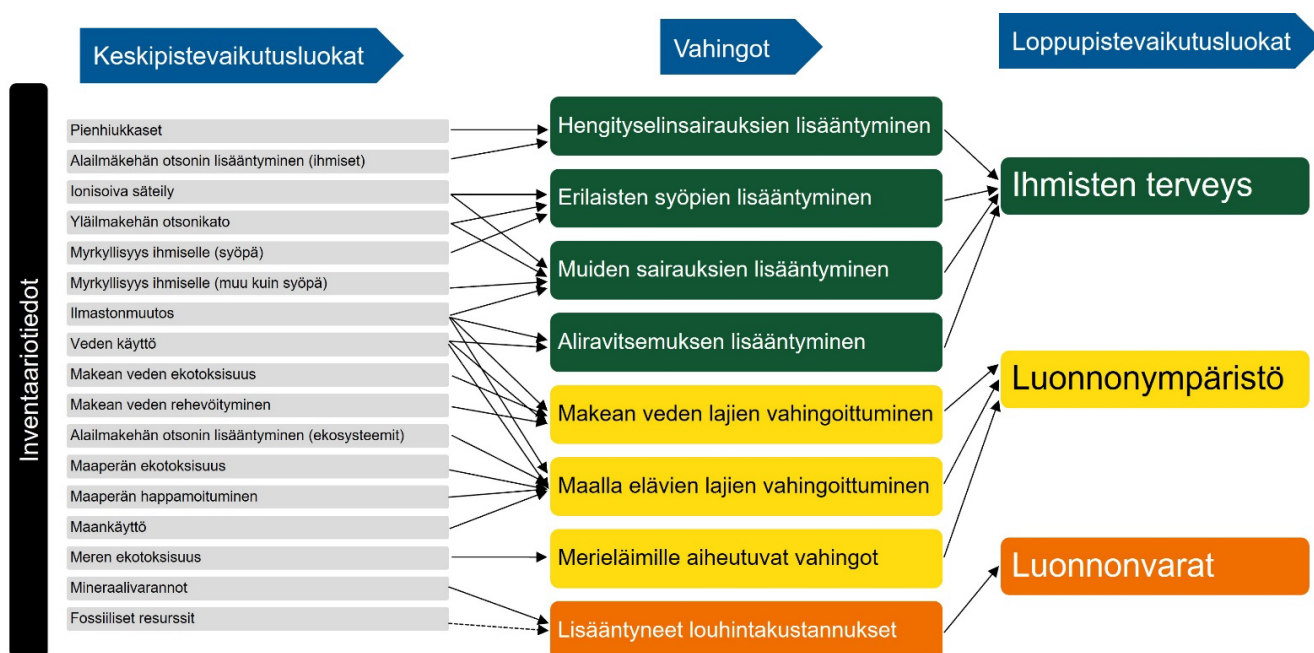
LCIA:ssa käytetään yleensä kahta erilaista lähestymistapaa: keskipiste (midpoint)- ja loppupiste (endpoint) -mallinnusta. Keskipistemallinnuksessa vaikutukset kuvataan ympäristövaikutusketjun keskivaiheilta valittujen indikaattorien avulla, esimerkiksi ilmastonmuutoksen kohdalla hiilidioksidiekvivalentteina (kg CO₂-ekv.). Tällä tasolla saadaan yksityiskohtaista

tietoa yksittäisten päästöjen ja resurssivirtojen vaikutuksista. Loppupistemallinnus puolestaan kohdistaa vaikutukset vahinkoina (damages) suoraan lopputuloksiin eli suojeltaviin kohteisiin. Tulokset esitetään tällöin esimerkiksi ihmisten terveyden heikkenemisenä (mitattuna vamma-ajaksi muunnettuna elinvuosina, DALY), ekosysteemien lajikadon määränä (species.year) tai luonnonvarojen niukkuutena (lisäkustannuksina). Loppupistetulokset ovat usein helpommin tulkittavia, mutta niihin liittyy myös suurempia epävarmuuksia, koska mallinnus perustuu monimutkaisiin syy-seuraussuhteisiin. (Antikainen 2017)

Yksi laajimmin käytetyistä LCIA-menetelmistä on ReCiPe 2016 (Huijbregts ym. 2017), jossa yhdistetään keskipiste- ja loppupistelähestymistavat yhdenmukaisella tavalla, ja vaikutusluokat on määritelty syy-seurausketjujen avulla. Menetelmässä keskipistevaikutusluokat (esim. ilmastonmuutos, happamoituminen, rehevöityminen ja resurssien ehtyminen) kohdistetaan vahinkoina loppupistekategorioihin: ihmisten terveyteen kohdistuvat vaikutukset, ekosysteemien vahingot ja luonnonvarojen niukkuus. Kuvassa 2 on esitetty yleiskatsaus ReCiPe 2016 -menetelmän vaikutusluokista ja niiden suhteesta suojelun kohteisiin..

Elinkaariarviointia ei kuitenkaan edellytetä tuulivoimahankkeissa viranomaisvaatimuksena samalla tavoin kuin ympäristövaikutusten arviointia (YVA) tai energiatehokkuusarviointia, joille on säädetty selkeät kriteerit ja soveltamisedellytykset. LCA voi toimia täydentävänä työkaluna ja tarjota lisäarvoa erityisesti silloin, kun halutaan tarkastella ympäristövaikutuksia laaja-alaisemmin koko elinkaaren ajalta ja vertailla vaihtoehtoja keskenään.

Tuulivoimaa koskevaa elinkaariarviointikirjallisuutta on runsaasti, mikä tekee tarvittavien lähtöarvojen valinnasta haasteellista vaikutusta koskevassa mallinnuksessa. Tämä voi myös johtaa tilanteeseen, jossa lähtöarvoja valitaan ja tuloksia esitetään tarkoitushakuisesti tukemaan ennalta muodostettua näkökantaa. Toisaalta etenkin yksiköityjä LCIA-vaikutusarvoja voidaan pitää eräänlaisina ulkoisvaikutuksina, ja niitä voitaisiin hyödyntää myös ulkoisvaikutusten rahalliseen arviointiin.



Kuva 2. Yleiskatsaus ReCiPe2016-menetelmässä käsiteltävistä vaikutusluokista ja niiden suhteesta suojealueisiin. Kuva mukailtu Huijbregts ym. (2017) mukaan.

4 Energiatehokkuus ensin -periaate

Energiatehokkuus ensin -periaate (EEF tai EE1st, Energy Efficiency First) tarkoittaa sitä, että energiatehokkuutta parantavat ratkaisut asetetaan etusijalle kaikessa energiaa koskevassa päätöksenteossa liittyen uusiin investointeihin. Periaate perustuu ajatukseen, että energiatehokkuuteen tehtävät investoinnit ovat kustannustehokas tapa vähentää energian kysyntää, jolloin tarve uusille energiantuotanto- ja jakeluinfrastruktuureille sekä niihin liittyville kustannuksille vähenee.

Syksyllä 2023 voimaan astuneessa energiatehokkuusdirektiivissään (EU 2023) EU painottaa energiatehokkuus ensin -periaatetta 3. artiklassa. Energiatehokkuusdirektiivin mukaan energiatehokkuus ensin on yleisperiaate, jota tulisi soveltaa kaikilla sektoreilla. Se tarkoittaa, että energiatehokkuusratkaisut tulisi aina arvioida ensisijaisena vaihtoehtona politiikkaa, suunnittelua ja investointeja koskevissa päätöksissä – ennen kuin päätetään energian tarjontaa lisäävistä toimista. Tämä koskee politiikkatoimia ja yli 100 M€ suuruisia energiainvestointihankkeita (liikenneinfrastruktuurihankkeissa kynnysarvo on 175 M€).

Energiatehokkuus ensin -periaatteen mukaisesti energiapäätöksenteon tavoitteet voidaan saavuttaa joko toimittamalla tai säästämällä energiaa. Esimerkiksi tuulivoimakapasiteetin laajentaminen voi kattaa uuden tai olemassa olevan energiapalvelujen kysynnän ja mahdollistaa kasvihuonekaasupäästöjen vähennykset. Sama voi kuitenkin koskea myös energiaa säästäviä toimenpiteitä, kuten energiatehokkaita rakennuksia, joissa investoinnit lämpöpumppuihin vähentävät sähköntarvetta verrattuna suorasähkölämmitykseen ja siten sähkön lisätuotannon tarvetta. Tuulivoimainvestointeja ei siis tarkastella vain suhteessa muihin sähköntuotantomuotoihin, vaan myös suhteessa energian säästöön ja energian kysynnän vähentämiseen eri sektoreilla.

Euroopan komission suosituksen (2021/179) mukaan energiatehokkuus ensin -periaatteen soveltamisessa hyödynnetään kustannus-hyötyanalyysijä, jotta taloudelliset, sosiaaliset ja ympäristövaikutukset voidaan arvioida kokonaisvaltaisesti. Arvioinnissa tulee huomioida koko elinkaari, pitkän aikavälin vaikutukset, toimitusvarmuus sekä kestävyuden ja kiertotalouden periaatteet. Kustannus-hyötyanalyysi voi olla itsenäinen arvio tai osa laajempaa

vaikutustenarviointia, ja sen toteutuksessa suositellaan elinkaariarviointiin (LCA) perustuvia menetelmiä sekä ajantasaisia hiilen hinnoittelun ennusteita.

Energiatehokkuusratkaisujen arvioinnissa kustannus-hyötyanalyysi voi sisältää teknisen, rahoituksellisen ja taloudellisen näkökulman. Teknisessä analyysissä arvioidaan ratkaisujen toteutettavuus, energiansäästö- tai kuormituksensiirtopotentiaali, yhteensopivuus nykyisten järjestelmien kanssa sekä mahdolliset tekniset rajoitteet tai riskit. Rahoitusanalyysissä tarkastellaan investointia päätöksentekijän, kuten yrityksen tai yhteisön näkökulmasta käyttäen markkinahintoja ja huomioiden suorat kustannukset, hyödyt sekä siirtosumat, kuten verot ja tuet. Lisäksi voidaan ottaa huomioon sisäisiä hyötyjä, kuten työn tuottavuuden paraneminen. Taloudellisessa analyysissä tarkastelu laajenee koko yhteiskuntaan, jossa otetaan huomioon kaikki kustannukset ja hyödyt, mukaan lukien ulkoiset, kuten ympäristö- ja terveysvaikutukset.

Laajempiin hyötyihin lukeutuu energiatehokkuusratkaisujen toteuttamisesta aiheutuvat sosiaaliset, taloudelliset ja ympäristövaikutukset, jotka eivät ole energialaskussa näkyviä välittömiä henkilökohtaisia taloudellisia hyötyjä tai tappioita. Esimerkkejä sosiaalisista vaikutuksista ovat sisätilojen mukavuuden parantuminen, energiaköyhyyden lieventäminen, kiinteistöjen arvon nousu ja melun vähentäminen. Ympäristöhyötyihin kuuluvat kasvihuonekaasupäästöjen, ilman ja veden pilaantumisen, jätteiden syntymisen ja maantarpeen väheneminen, mitkä kaikki edistävät ekosysteemien suojelua. Taloudelliset hyödyt johtavat paikallisten työpaikkojen syntymiseen, työvoiman tuottavuuden kasvuun ja energiaturvallisuuden paranemiseen ja edistävät yritysten innovointia ja kilpailukykyä. Kuvassa 3 on koottu näitä keskeisiä tekijöitä, joita voidaan arvioida kustannus-hyötyanalyysissä. Hyödyt tulisi kvantifioida fyysisinä yksikköinä, jotta niitä voidaan vertailla eri investointivaihtoehtojen välillä. Fyysisiin vaikutuksiin perustuvat hyödyt voidaan muuntaa rahalliseksi arvioiksi, mikä mahdollistaa laajemman kustannus-hyötyanalyysin. Arvioinnissa on vältettävä vaikutusten päällekkäisyyksiä, jotka voisivat johtaa hyötyjen kaksinkertaiseen laskentaan ja nettovaikutusten yliarviointiin.



Kuva 3. Energiatehokkuuden mahdolliset hyödyt. Vihreällä hyödyt ympäristölle, sinisellä sosiaaliset hyödyt ja oranssilla taloudelliset hyödyt. Kuva mukailtu EU:n (2021) mukaan.

Kustannus-hyötyanalyysien tekeminen on käytännössä haastavaa, koska hyötyjen arviointi on monimutkaista ja niiden kvantifiointi vaikeaa. Vaikka kansallisissa energia- ja ilmastosuunnitelmissa käsitellään esimerkiksi energiaköyhyyttä, sosiaalisia hyötyjä – kuten asumisviihtyvyyden paranemista ja terveyshyötyjä – tarkastellaan usein yleisellä tasolla ja ilman määrällistä arviointia (Chlechowicz ym. 2022). Energiatehokkuus ensin -periaatteen soveltaminen etenkin tuulivoiman yhteydessä vaatiikin edelleen tutkimusta, erityisesti hyötyjen arvottamisen, yksikköhintojen ja menetelmien yhdenmukaistamiseksi. Verrattuna esimerkiksi rakennussektorin investointeihin, tuulivoiman monivaikutteisten hyötyjen integrointi kustannus-hyötyanalyysiin on haastavaa.

5 Ympäristövaikutusten arviointi

Ympäristövaikutusten arviointi (YVA) on lakisääteinen menettely, jonka tavoitteena on selvittää hankkeen mahdolliset merkittävät ympäristövaikutukset ennen päätöksentekoa. YVA:n avulla haitallisia vaikutuksia voidaan ehkäistä tai lieventää ennen viranomaisen lupa- tai hyväksymispäätöstä, ja YVA-lain tavoitteena on myös lisätä hankkeiden avoimuutta ja yleisön osallistumismahdollisuuksia (Finlex 200/200). Tuulivoimalahankkeisiin YVA-menettelyä sovelletaan, jos yksittäisten laitosten lukumäärä on vähintään 10 tai kokonaisteho vähintään 45 megawattia, tai jos ELY-viranomainen päättää sen tarveharkinnassaan. YVA:n tulokset tulee ottaa huomioon hankkeen suunnittelussa ja lupaharkinnassa, mutta menettely ei itsessään tee päätöksiä. Siksi sen vaikuttavuus riippuu siitä, miten hyvin arvioinnin havainnot huomioidaan suunnittelussa ja päätöksenteossa. (Motiva 2024)

Tuulivoimahankkeen YVA-menettelyssä laaditaan selvityksiä, joissa hankkeen vaikutuksia arvioidaan luontoon, maankäyttöön, maisemaan, kulttuuriympäristöön ja alueen kulttuurihistoriaan. Selvityksissä rakennuspaikkojen vaikutuksista luonnonympäristöön otetaan huomioon mm. pinta- ja pohjavedet, maa- ja kallioperä, kasvillisuus (erityisesti suojeltavat lajit ja luontotyytit), eläimistö (erityisesti suojeltavat lajit kuten lepakot, viitasammakot ja liito-oravat), pesimä- ja muuttolinnusto sekä lähialueiden Natura- ja muut luonnonsuojelualueet. Selvitykset tehdään myös melun ja varjon vilkkumisen vaikutuksista sekä vaikutuksista ihmisten terveyteen, elinoloihin ja viihtyvyyteen. Muita laadittavia selvityksiä ovat sosiaalisten vaikutusten arviointi, liikennevaikutukset, vaikutukset tietoliikenneyhteyksiin ja puolustusvoimien tutkiin, vaikutukset ilmastoon, vaikutukset elinkeinoihin ja aluetalouteen sekä yhteisvaikutukset muiden hankkeiden kanssa. (Suomen Tuulivoimayhdistys 2019) Kaikki nämä selvitykset kootaan osaksi arviointiselostusta eli YVA-selostusta. Selvitykset ovat usein laadullisia, joten niistä ei sellaisenaan ole saatavilla suoria kvantitatiivisia arvioita esim. energiatehokkuus ensin -periaatteen kustannus-hyötyanalyysiin.

YVA-menettelyn vaikuttavuus riippuu pitkälti siitä, kuinka hyvin se vastaa paikallisyhteisöjen huolenaiheisiin. Parhaimmillaan YVA lisää hankkeen hyväksyttävyyttä, mutta tämä edellyttää, että arviointi ei jää kaavamaiseen muottiin, vaan se suunnitellaan aidosti vuorovaikutteiseksi ja paikalliskontekstin huomioivaksi. YVA:n ei myöskään tulisi olla pelkkä muodollisuus, vaan sen tulosten tulisi heijastua myös hankkeen päätöksenteossa. Mikäli YVA:n havainnot ja

suositukset eivät näy jatkopäätöksissä, heikentyy YVA:n uskottavuus ja hyväksyttävyyys.

Joissain tuulivoimahankkeissa YVA voidaan yhdistää tuulivoimayleiskaavan laatimiseen. Tällöin YVA ja kaavoitus etenevät rinnakkain, ja kuulemiset voidaan yhdistää yhdeksi menettelyksi. Tämä malli vähentää hallinnollista kuormaa, nopeuttaa hankkeen etenemistä ja tuo selkeyttä sidosryhmille, jotka voivat kommentoida molempia prosesseja samalla kertaa. (Motiva 2024)

6 Eri menetelmien vertailu

Vaikka kaikkia tässä raportissa käsiteltyjä ulkoisvaikutusten arvioinnin menetelmiä (LCA, YVA ja energiatehokkuus ensin -periaate) ei edellytetä jokaiselle hankkeelle, niiden rinnakkainen tarkastelu tarjoaa hyödyllisen kuvan siitä, mitä vaikutuksia voidaan tunnistaa ja miten vaikutuksia voidaan esittää ja arvioida. Lisäksi voimme pohtia, voitaisiinko arviointityötä tehostaa ja/tai monipuolistaa eri menetelmiä yhdistäen. Vertailu auttaa myös tunnistamaan tietokatveita ja mahdollisia täydentäviä lähestymistapoja sekä tietoaineistoja, jolloin päätöksentekoa voidaan tukea laajemmin. Raportissa esitetty menetelmien vertailu keskittyy ulkoisvaikutuksiin, jotka on koottu alla teemoittain erillisiin taulukoihin.

Energiatehokkuus ensin -periaatteeseen liittyvä komission suositus (Euroopan komissio 2024) mainitsee kolme erilaista laskentatyökalua kustannus-hyötyanalyysien tekemiseen: Horisontti 2020 -puiteohjelmasta tuetut COMBI-, MICAT- ja Odyssee-Mure-työkalut. Näiden työkalujen dokumentaatiosta löytyy tarkemmat laskentakaavat ja yksiköt niissä laskettaville vaikutuksille. Myös LCIA:ssa on avattu tarkkoja yksiköitä eri vaikutuksille (esim. kg CO₂-ekv.), mutta YVA:n edellyttämät selvitykset ovat yleensä laadullisia. Vertailu taulukoissa onkin tehty suurpiirteisemmin, koska menetelmien välillä on eroja käytettyjen yksiköiden ja laskentakaavojen osalta, vaikka taulukossa sama vaikutus olisi mainittu usean eri menetelmän alla.

Ilmatoon liittyviä ulkoisvaikutuksia on vertailtu taulukossa 1. Kasvihuonekaasupäästöt ovat selkeästi yleisimmin käsitelty ulkoisvaikutus: ne sisältyvät kaikkiin menetelmiin ja lähteisiin. Ilmansaasteet (NO_x, NH₃, SO₂, PM_{2.5}, PM₅, PM₁₀, VOC, NMVOC) esiintyvät lähes kaikissa menetelmissä, mutta vain LCA ja EEF-laskentatyökalut käsittelevät ne systemaattisesti ja yksityiskohtaisesti. YVA:ssa ilmansaasteet tunnistetaan, mutta niitä ei välttämättä kvantifioida yhtä tarkasti. Ilmaston lämpeneminen käsitteenä esiintyy lähinnä LCIA:ssa ja kirjallisuudessa, mutta ei EEF-työkaluissa erillisenä luokkana, mikä viittaa siihen, että EEF keskittyy enemmän suoriin päästöihin kuin niiden ilmastovaikutusmekanismeihin. Myrkyllisyys ihmiselle, otsonivaikutukset (sekä ylä-että alailmakehä) ja ionisoiva säteily ovat LCIA:lle ominaisia vaikutusluokkia, joita muut menetelmät eivät kata.

Yleisesti ottaen LCIA tarjoaa laajimman valikoiman ilmatoon liittyviä teknisiä vaikutusluokkia, kun taas EEF-laskentatyökalut ja YVA korostavat enemmän

tunnistettavia, mutta usein vähemmän kvantitatiivisia päästö- ja saastevaikutuksia. On kuitenkin huomioitava, että taulukkoon on listattu kaikki LCIA:n (ReCiPe 2016) kategoriat, vaikka nämä eivät käytännössä juuri tuulivoiman kohdalla olisikaan merkittäviä.

Taulukko 1. Ulkoisvaikutukset ilmastolle eri menetelmissä

Ulkoisvaikutus	Energiatehokkuus ensin -periaate	Energiätehokkuus ensin -periaate: laskentatyökulut	LCIA (ReCiPe 2016)	YVA	Tuulivoimatuotannon ulkoisvaikutukset kirjallisuudessa
Kasvihuonekaasupäästöt	x	x (kaikissa kolmessa)	x	x	x
Ilmansaasteet (NO_x, NH₃, SO₂, PM_{2.5}, PM₅, PM₁₀, VOC, NMVOC)	x	x (kaikissa kolmessa)	x	x	x
Ilmaston lämpeneminen			x		x
Myrkyllisyys ihmiselle (syöpä ja muut sairaudet)			x		
Ionisoiva säteily			x		
Otsoni (yläilmakehän otsonikato ja alailmakehän otsonin lisääntyminen)		x (COMBItool)	x		

Luontoon ja ympäristöön liittyviä ulkoisvaikutuksia on vertailtu taulukossa 2. Ne ovat selkeästi vaikeammin mitattavissa kuin ilmastovaikutukset. YVA kattaa laajimmin luonnon monimuotoisuuteen, eläimistöön, linnustoon, maankäyttöön sekä alueellisiin erityispiirteisiin liittyvät vaikutukset, kuten Natura-alueet, poronhoitoalueet, historiallisen ja kulttuuriperinnön kohteet, melun sekä valon vilkkumisen. Nämä vaikutukset ovat pitkälti myös niitä huolia, jotka nousevat esiin paikallisena vastustuksena (Niemi ym. 2025, Peltonen ym. 2024). Näidenkin vaikutusten laajuus ja kvantifiointi YVA:ssa on kuitenkin hankekohtaista ja suurimmaksi osaksi laadullista.

LCIA keskittyy teknisiin ja ympäristökemiallisiin vaikutusluokkiin, kuten vesistöjen rehevöitymiseen, ekotoksisuuteen, happamoitumiseen, luonnonvarojen käyttöön, veden käyttöön ja jätteiden muodostumiseen. Nämä ovat määrällistettävissä ja usein globaaleja vaikutuksia, mutta LCIA ei kata esimerkiksi suojeltuja lajeja, paikallista biodiversiteettiä tai kulttuuriperintöä.

Energiatehokkuus ensin -periaate ja sen laskentatyökalut sisältävät vain rajatusti ympäristövaikutuksia, ja silloin painopiste on mitattavissa olevissa ympäristöpäästöissä ja luonnonvarojen käytössä. Esim. luonnon monimuotoisuuden heikkeneminen, maankäyttö ja vaikutukset kasvillisuuteen ja eläimiin eivät ole mukana EEF-työkaluissa.

Taulukko 2. Luonto- ja ympäristövaikutukset eri menetelmissä.

Ulkoisvaikutus	Energiatehokkuus ensin -periaate	Energiatehokkuus ensin -periaate: laskentatyökalut	LCIA (ReCiPe 2016)	YVA	Tuulivoimatuotannon ulkoisvaikutukset kirjallisuudessa
Luonnon monimuotoisuuden heikentyminen					x
Vesistöjen rehevöityminen ja ekotoksisuus		x (COMBItool)	x	x	
Maa- ja kallioperän ekotoksisuus ja happamoituminen		x (COMBItool)	x	x	
Pohjavesialueet				x	x
Pesimä- ja muuttolinnusto (ml. suojellut ja uhanalaiset)				x	x
Eläimistö (ml. suojellut ja uhanalaiset)				x	x
Maaston sirpaloituminen					x
Luonnonvaraesiintymät alueella (ml. metallimalmit ja mineraalit)		x (COMBItool)		x	x
Luonnonvarojen käyttö		x (COMBItool)	x		x
Hiilivarastojen menetys (metsät ja suot)					x
Natura- ja muut luonnonsuojelualueet				x	x
Historiallisesti, kulttuurisesti tai				x	x

Ulkoisvaikutus	Energiatehokkuus ensin -periaate	Energiatehokkuus ensin -periaate: laskentatyökalut	LCIA (ReCiPe 2016)	YVA	Tuulivoimatuotannon ulkoisvaikutukset kirjallisuudessa
arkeologisesti merkittävät kohteet					
Maankäyttö			x	x	x
Veden käyttö			x		
Jätteet			x	x	
Jään putoaminen					x
Melu, valon välkkyminen				x	x

Sosiaalisia ulkoisvaikutuksia on vertailtu taulukossa 3. Kirjallisuudessa tuulivoimalla on myös merkittäviä sosiaalisia ulkoisvaikutuksia, etenkin negatiivisia vaikutuksia mm. Suomessa ja muissa Pohjoismaissa liittyen saamelaisten oikeuksiin, kulttuuriin ja elinkeinoihin. Tuulivoimahankkeista on tunnistettu myös syntyneen jopa sosiaalisia konflikteja paikallisten keskuudessa. Usein taustalla on kiistoja maankäytöstä, epäoikeudenmukaisuuden kokemuksia tai voimakkaita mielipide-eroja (esim. Niemi ym. 2025, Janhunen ym. 2018)

Energiatehokkuus ensin -periaate ja sen laskentatyökalut kattavat sosiaalisista vaikutuksista lähinnä energiaköyhyyden vähentämisen, mutta muut sosiaaliset ulkoisvaikutukset jäävät niiden ulkopuolelle. LCIA:ssa ei huomioida sosiaalisia vaikutuksia ollenkaan.

YVA:ssa laaditaan usein selvitykset saamelaisten oikeuksista hankealueella, alueen virkistyskäytöstä sekä yhteisvaikutuksista muiden hankkeiden kanssa. Näiden painotus liittyy paikallisiin olosuhteisiin ja yhteisövaikutuksiin, joita ei voi helposti mallintaa teknisillä tai teknistaloudellisilla laskentatyökaluilla. Yhteisvaikutukset muiden hankkeiden kanssa mainitaan vain YVA:ssa. On tärkeää ottaa huomioon myös kumulatiiviset vaikutukset ja muut sosiaaliset vaikutukset, sillä usein juuri niiden sivuuttaminen saattaa aiheuttaa hyväksyttävyyden puutetta paikallisella tasolla.

Taulukko 3. Sosiaaliset vaikutukset eri menetelmissä

Ulkoisvaikutus	Energia- tehokkuus ensin - periaate	Energiate- hokkuus ensin - periaate: laskentatyö- kalut	LCIA (ReCi Pe 2016)	YVA	Tuulivoima- tuotannon ulkois- vaikutukset kirjallisuus- udessa
Energia- köyhyyden vähentyminen	x	x (ODYSSEE- MURE tool, MICAtool)			x
Saamelaisten ja muiden alkuperäis- kansojen oikeudet				x	x
Alueen virkistyskäyttö				x	x
Sosiaaliset konfliktit					x
Yhteisvaikutukse t muiden hankkeiden kanssa				x	x

Taulukossa 4 on vertailtu taloudellisia ulkoisvaikutuksia. LCIA ei kata taloudellisia ulkoisvaikutuksia lainkaan. Makrotaloudelliset vaikutukset, kuten BKT, tuottavuus, julkistalous, kilpailukyky ja työllisyysvaikutukset esiintyvät energiatehokkuus ensin -periaatteessa, mutta eivät YVA:ssa. Tuulivoimakirjallisuudessa työllisyys on usein mainittuna ulkoisvaikutuksena, mutta muita makrotalouden vaikutuksia ei juurikaan nouse esiin.

Kiinteistöjen arvojen muutokset ovat tunnistettuina vain EEF-periaatteessa, mutta ne puuttuvat kokonaan YVA:sta, mikä voi jättää merkittävän paikallistaloudellisen vaikutuksen huomiotta virallisissa arvioinneissa.

Paikallistalouteen ja elinkeinoihin liittyvät vaikutukset (mm. aluetalouden kehitys, matkailu, poronhoito, uudet liikenneyhteydet, tietoliikenneyhteydet ja tutkat) ovat puolestaan lähes yksinomaan YVA:ssa ja kirjallisuudessa. Tämä korostaa sitä, että YVA täydentää EEF:n makrotason tarkastelua konkreettisilla paikallistason talousvaikutuksilla.

Kokonaisuutena EEF ja sen laskentatyökalut ovat vahvempia makrotaloudellisissa ja energiasektorin taloudellisissa vaikutusarvioissa ja YVA puolestaan paikallisissa ja alueellisissa talousvaikutusarvioissa. Yhdistettynä ne tarjoavat huomattavasti kattavamman kuvan kuin kumpikaan lähestymistapa yksinään.

Taulukko 4. Taloudelliset ulkoisvaikutukset eri menetelmissä

Ulkoisvaikutus	Energiatehokkuus ensin -periaate	Energiatehokkuus ensin -periaate: laskentatyökalut	LCIA (ReCiPe 2016)	YVA	Tuulivoimatuotannon ulkoisvaikutukset kirjallisuudessa
Kiinteistöjen arvojen muutokset	x				x
Makrotaloudelliset vaikutukset (mm. talouskasvu, BKT, tuottavuus, julkiset budjetit, kilpailukyky)	x	x (kaikissa kolmessa)			
Työllisyysvaikutukset	x	x (kaikissa kolmessa)		x	x
Energiansäästö		x (kaikissa kolmessa)			
Energian hinta		x (ODYSSEEMURE tool)			
Vaikutukset elinkeinoihin ja aluetalouteen				x	x
Uudet liikenneyhteydet hankealueella				x	x
Vaikutukset matkailuun				x	x
Vaikutukset poronhoitoon				x	x
Vaikutukset tietoliikenneyhteyksiin ja tutkiin				x	x

Taulukossa 5 on vertailtu teknologisia ja turvallisuuteen liittyviä vaikutuksia. Energiatehokkuus ensin -periaatteessa katetaan teknologiset ja turvallisuuteen liittyvät vaikutukset kaikkein laajimmin. Niissä huomioidaan mm. energiaturvallisuus, fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen, vältetyt investointi- ja tuotantokustannukset, vihreän siirtymän tavoitteisiin pääseminen sekä omavaraisuus- ja tuontiriippuvuuden pienentyminen. Energiatehokkuus ensin -periaatteen ydin onkin juuri varmistaa, voitaisiinko energiatehokkuustoimilla välttää uudet investoinnit.

LCIA sisältää tästä kategoriasta lähinnä fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämisen. YVA:ssa ei yleensä huomioida teknologisia tai turvallisuusvaikutuksia.

Taulukko 5 Teknologiset ja turvallisuusvaikutukset eri menetelmissä

Ulkoisvaikutus	Energiatehokkuus ensin -periaate	Energiatehokkuus ensin -periaate: laskentatyö -kalut	LCIA (ReCiPe 2016)	YVA	Tuulivoimatuotannon ulkoisvaikutukset kirjallisuudessa
Energia-turvallisuus	x	x (COMBItool, ODYSSEEMURE)			x
Parannettu energian ja resurssien hallinta	x				x
Vaihtelevan tuotannon aiheuttamat ongelmat sähköverkolle					x
Fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen		x (ODYSSEEMURE, COMBItool)	x		x
Vältetyt investointi- ja tuotantokustannukset	x	x (COMBItool, MICAtool)			x
Vihreän siirtymän tavoitteisiin pääseminen		x (ODYSSEEMURE tool, MICAtool)			x
Omavaraisuus ja pienempi tuontiriippuvuus	x	x (ODYSSEEMURE tool, MICAtool)			x

7 Mittayksiköt ja laskennan haasteet

Tässä raportissa tarkasteltujen menetelmien rinnakkainen käyttö tuulivoimahankkeiden arvioinnissa on käytännössä haastavaa, koska ne perustuvat erilaisiin yksiköihin, rajauksiin ja tietovaatimuksiin. Esimerkiksi LCA tuottaa tuloksia standardoiduissa ympäristövaikutusyksiköissä, kuten kilogrammoissa CO₂-ekvivalenttia, kun taas monet muut vaikutukset – kuten maisemavaikutukset, paikallisyhteisön hyvinvointi tai biodiversiteetin muutokset – jäävät laadullisiksi, koska kattavaa mittausdataa ei ole saatavilla. Vaikka joillekin vaikutuksille, kuten CO₂-päästöjen vähennyksille, on olemassa markkina-arvot tai vakiintuneet laskentaperusteet, suuri osa hyödyistä voidaan nykyisin ainoastaan tunnistaa ilman fyysistä mittayksikköä tai rahallista arvoa.

Osa vaikutuksista esitetään tarkkoina yksikköinä, kuten melutasoina (dB) tai menetettyinä elinvuosina, mutta rahallistaminen edellyttää usein monimutkaisia laskentakaavoja ja merkittäviä oletuksia esimerkiksi päästöjen hinnasta, energian markkinahinnasta tai terveysvaikutusten kustannuksista. Lisäksi eri menetelmien välillä on huomattavia eroja siinä, missä määrin laskelmat perustuvat empiiriseen mittausdataan ja missä määrin ne nojaavat mallinnettuihin tai kirjallisuudesta johdettuihin oletusarvoihin. Tämä moninaisuus tekee eri lähteiden tulosten suorasta vertailusta vaikeaa ja lisää epävarmuutta erityisesti silloin, kun tuloksia yritetään yhdistää kattavaksi kokonaiskuvaksi tuulivoiman vaikutuksista. Kokonaisvaltaisten vertailujen tekeminen edellyttäisi, että eri vaikutuksia voidaan verrata myös keskenään, mikä käytännössä vaatisi yhteisen yksikön – useimmiten rahallisen arvon – määrittämistä. Rahallistaminen tuo kuitenkin lisää epävarmuutta ja metodologisia haasteita, sillä monien vaikutusten arvottaminen perustuu väistämättä oletuksiin ja arvovalintoihin. Lisäksi rahallisen arvon määrittäminen voi joissain tapauksissa olla tarkoituksenhakuista tai ennakkoluuloista. Esimerkiksi sähkökatkojen yhteydessä on havaittu, että ihmiset vaativat merkittävästi suurempaa korvausta haitan jälkeen (WTA, willingness to accept) kuin mitä olisivat olleet valmiita maksamaan etukäteen sen välttämiseksi (WTP, willingness to pay), mikä havainnollistaa arvottamisen subjektiivisuutta ja kontekstisidonnaisuutta.

Tuulivoiman ulkoisvaikutusten laskentatapojen haasteet voivat myös johtaa paikallisten haittakustannusten yliarviointiin. Usein laskelmissa myös oletetaan, että haitat pysyvät vakiona tuulivoimalan koko eliniän ajan, vaikka tutkimusten mukaan ihmiset voivat ajan myötä tottua niiden aiheuttamiin häiriöihin. Haittakustannusten

arviointi on epävarmaa, ja tutkimustulokset vaihtelevatkin huomattavasti. (Lehmann ym. 2023) Lisäksi tuulivoimaloidenkin yhteydessä voimalinjojen rakentamiseen tai parantamiseen liittyviä ulkoisvaikutuksia paikallisella, alueellisella tai kansallisella tasolla on vaikea arvioida.

Eri menetelmien väliset ulkoisvaikutukset saattavat olla myös ristiriidassa keskenään. Mm. Grimsrud ym. (2023) osoittavat, että paikallisten haittojen ja luonnon monimuotoisuuden sekä erämaaluonnon menetyksen välillä on selkeä ristiriita: kun tuulivoimalat sijoitetaan pois asutuksen läheisyydestä, seurauksena voi olla haittaa luonnon monimuotoisuudelle ja erämaa-alueille. Tämän ristiriidan arvioimiseksi tehtiin laaja herkkyysanalyysi, jossa tarkasteltiin paikallisten haittakustannusten, hiilikustannusten ja poronhoidon oikeuksien rikkomisen estämiseen tähtäävän sijoitusrajoitteen vaikutuksia. Paikallisten haittojen osalta on syytä huomioida, että niiden ja biodiversiteettiin kohdistuvien vaikutusten erottaminen voi olla haastavaa, sillä ihmiset saattavat kokea luonnon monimuotoisuuden heikkenemisen osaksi kokonaisvaltaista haittakokemusta. Kuitenkin esimerkiksi melu, vilkkuvat valot, maiseman esteettisyyden heikkeneminen ja virkistyskäytön laadun lasku ovat todennäköisesti keskeisimmät paikalliset haitat.

Oleellista on myös pohtia, mihin järjestelmään ulkoisvaikutuksia arvioitaessa verrataan. Tuulivoiman käytöllä vältettävien päästöjen pääasiallinen lähde perustuu fossiilisten polttoaineiden korvaamiseen sähköntuotannossa. Tuotetun sähkön korvausvaikutus on monimutkainen aihe. Useita polttoaineita ja eri yksikkötyyppejä käyttävien sähköjärjestelmien osalta tämä edellyttää matalan ja korkean tuulisuuden dataa, yleensä vähintään yhden vuoden ajalta. Päästöjen väheneminen havaitaan, kun verrataan järjestelmää, johon on lisätty tuulivoimaa, tilanteeseen, joka olisi vallinnut ilman tuulivoimaa. Holtinen ym. (2025) tarkastelee, miten tuulivoima vähentää CO₂-päästöjä matkalla kohti hiilineutraalia energiajärjestelmää. Aluksi suurin hyöty syntyy fossiilisen sähköntuotannon korvaamisesta, mutta kun sähköntuotannon päästöt vähenevät, tuulivoiman marginaalinen päästövähennyshyöty laskee. Kuitenkin tuulivoimalla on yhä merkittävä rooli, kun fossiilisia polttoaineita korvataan muilla sektoreilla, erityisesti liikenteessä, lämmityksessä ja teollisuudessa, sähköistämisen kautta. Tuulivoiman päästövähennykset syntyvät yhä enemmän alentuneiden sähkön hintojen kautta lisääntyvästä sähköistämisestä, polttoaineiden korvaamisesta (esim. bioenergia lämmityksessä ja polttoaineen tuotannossa), sekä viennin kautta, kun suomalainen tuulivoima voi vähentää päästöjä myös muissa Euroopan maissa. Päästövähennyksiä arvioitaessa onkin siirryttävä pelkästä sähkön hankintaan liittyvästä analyysistä koko energiajärjestelmän tasolle. On huomioitava myös muut kuin CO₂-päästöt sekä sähkömarkkinoiden alueellinen vaikutus – sähkön vienti ja tuonti voivat hajauttaa päästövähennyksiä useaan maahan. Tätä taustaa vasten tuulivoimaa voisi tarkastella LCA-ajattelun mukaisesti koko energiaketjun vaikuttavuuden näkökulmasta, mutta laskenta on hyvin monimutkaista. (Holtinen ym. 2025)

Paikallisten haittakustannusten vaikutus on kansallisella tasolla rajallinen, mutta ne voivat merkittävästi muuttaa optimaalista tuulivoimaloiden sijoittelua maiden

sisällä. Perinteisessä teknistaloudellisessa analyysissä voimat sijoitetaan alhaisimman rakennuskustannuksen mukaan, mutta kokonaiskustannuksissa huomioidaan myös haittakustannukset. Tällöin voimaloita voidaan sijoittaa alueille, joilla tekniset kustannukset ovat korkeammat, mutta paikalliset haitat pienemmät. Esimerkiksi Ruhnau ym. (2024) laskivat, että jos tuulivoimakapasiteettia rakennetaan 1–2-kertaisesti EU:n vuoden 2050 referenssiskenaarioon nähden, keskimääräiset tekniset kustannukset nousevat noin 5 % (32 → 34 €/MWh), koska voimat sijoitetaan vähemmän tuulisiin paikkoihin haittojen minimoimiseksi, mikä vähentää tuotantoa noin 5 %. Tämä osoittaa, että haittakustannusten huomiointi vaikuttaa ensisijaisesti sijoituspäätöksiin, ei niinkään kokonaisinvestointien kannattavuuteen. Vaikka haittakustannukset eivät ole merkittävä este tuulivoiman kasvulle Euroopassa, niiden huomioiminen voi vaikuttaa energiantuotannon rakenteeseen kahdella tavalla: 1) harvaan asutuille alueille sijoittaminen voi tulla kannattavammaksi, vaikka tuuliolosuhteet olisivat heikommät, ja 2) tuulivoiman suhteellinen kilpailukyky saattaa heikentyä muihin teknologioihin, erityisesti aurinkoenergiaan verrattuna, mikä voi johtaa sen pienempään osuuteen energijärjestelmässä. (Ruhnau ym. 2024)

Arviointimenetelmien erojen lisäksi ulkoisvaikutusten huomiointi tuulivoimahankkeissa kärsii sidosryhmien erilaisista odotuksista. Aiempi tutkimus (esim. Niemi ym. 2025) osoittaa, että vaikka monet vaikutusarviot sisällytetään virallisesti YVA-menettelyihin, paikallisyhteisöt kokevat usein, että tietoa erityisesti luonto- ja ympäristövaikutusten huomioinnista on riittämättömästi tai se on hankalasti saavutettavissa. Tämä viittaa siihen, että kyse ei välttämättä ole vain puutteellisesta sisällöstä, vaan myös viestinnän ja läpinäkyvyyden haasteista. Lisäksi eri menetelmien osittain päällekkäinen ja osittain toisistaan poikkeava käsitteistö voi johtaa tilanteeseen, jossa samoja vaikutuksia käsitellään eri nimillä tai eri mittareilla, mikä hämärtää kokonaiskuvan saamista ja vaikeuttaa tulosten vertailua. Prosessien tehostaminen ja harmonisointi voisivat vähentää päällekkäistä työtä ja parantaa vertailtavuutta, mutta samalla on huomioitava hanketoimijoiden esittämä huoli siitä, ettei jo entuudestaan raskaita prosesseja tulisi tarpeettomasti monimutkaistaa. Näin ollen keskeinen kehittämiskohde on löytää tasapaino menetelmien yhdenmukaistamisen, paikallisten huolien huomioimisen ja hallinnollisen työn määrän välillä.

8 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tuulivoimahankkeiden vaikutusten arvioinnissa käytetään useita menetelmiä, jotka tuottavat keskenään erilaista, mutta osittain toisiaan täydentävää tietoa. Elinkaariarvioinnilla (LCA) voidaan tuottaa kvantitatiivinen tarkastelu hankkeen koko elinkaaren ajalta. Se huomioi esimerkiksi materiaalien tuotannon, voimaloiden valmistuksen, kuljetusten ja käytön aikaiset päästöt sekä purkamisen ja kierrätyksen vaikutukset. LCA:n vahvuus on tarkka päästöihin liittyvien vaikutusten, kuten kasvihuonekaasujen, ilmansaasteiden ja toksisuuksien, numeerinen arviointi. Ympäristövaikutusten arviointi (YVA) puolestaan keskittyy hankekohtaisiin ja paikallisiin vaikutuksiin, kuten maisemaan, meluun ja maankäyttöön. Sen luonne on usein laadullinen, ja määrällisiä arvioita käytetään vain rajallisesti. Energiatohokkuus ensin -periaate (EEF) painottaa esimerkiksi energiaköyhyyden lieventämistä, hyvinvointivaikutuksia ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä strategisella tasolla. Suomessa tätä menetelmää ei kuitenkaan ole vielä sovellettu tuulivoimahankkeisiin käytännössä. Lisäksi tutkimuskirjallisuus täydentää kuvaa nostamalla esiin ulottuvuuksia, jotka jäävät teknisissä menetelmissä vähemmälle huomiolle. Tällaisia ovat erityisesti sosiaalinen hyväksyttävyyden ja paikallisyhteisöihin kohdistuvat vaikutukset.

Mikään menetelmä ei yksinään kata kaikkia tuulivoimaan liittyviä ulkoisvaikutuksia. Biodiversiteetti ja maankäytön muutokset kvantifioidaan harvoin. Sosiaaliset vaikutukset ovat selvästi aliedustettuja teknisissä ja määrällisissä menetelmissä (EEF, LCA) ja painottuvat laadullisissa ja paikallistasoon perustuvissa arvioissa (YVA, kirjallisuus). Jos arvioinnissa nojataan vain numeerisiin, päästö- ja kustannuspohjaisiin lähestymistapoihin, tämä aiheuttaa selkeän tiedollisen aukon. Ulkoisvaikutusten rahallistaminen taas perustuu usein oletuksiin, mikä tekee niistä epävarmoja ja vaikeasti vertailtavia. Lisäksi tulosten esittämistavat vaihtelevat: esimerkiksi kasvihuonekaasupäästöjä käsitellään lähes kaikissa lähteissä, mutta niitä raportoidaan eri määräyksiköillä ja eri rajauksin; LCIA:ssa (ReCiPe 2016) eri ilmansaasteet on huomioitu ja niiden vaikutukset on jaettu ihmisen terveydelle, ekosysteemeille maalla ja ekosysteemeille vedessä, kun taas YVA:ssa määritellään hankekohtaisesti laajuus kategorialle "vaikutukset ilmastoon". Kirjallisuudessa ainoa selkeä ja johdonmukainen johtopäätös on, että tuulivoimaloiden haittakustannukset ihmisille vähenevät etäisyyden kasvaessa asutuksesta.

Toisaalta EEF:n mukaisiin kustannus-hyötyanalyysiin on suositeltu käytettävien LCA-menetelmiä, ja etenkin yksiköityjä LCIA-vaikutusarvoja voidaan käyttää ulkoisvaikutuksina, joita voitaisiin hyödyntää myös muissa analyyseissa.

Ulkoisvaikutusten läpinäkyvä ja alueellisesti eritelty tarkastelu on välttämätöntä niiden sisällyttämiseksi kustannus-hyötyanalyysiin, lupaprosesseihin ja politiikkatoimien valmisteluun sekä oikeudenmukaisen siirtymän mahdollistamiseksi. Samalla on muistettava, että tuulivoimalla on merkittäviä positiivisia ulkoisvaikutuksia, kuten päästöjen ja ilman epäpuhtauksien väheneminen sekä mahdollisesti alemmat järjestelmäintegraatiokustannukset verrattuna muihin päästöttömiin energiantuotantomuotoihin. Kun haitat ja hyödyt huomioidaan sekä jaetaan reilusti ja avoimesti, voidaan parantaa sekä hankkeiden taloudellista tehokkuutta että sosiaalista hyväksyttävyyttä.

Ilman ulkoisvaikutusten huomioimista tuulivoiman sijoittaminen perustuu usein pelkkiin tuotantokustannuksiin, mikä ei johda yhteiskunnallisesti optimaalisiin ratkaisuihin. Tutkimukset osoittavat, että ulkoisvaikutusten sisällyttäminen mallinnuksiin voi muuttaa voimaloiden optimaalista sijaintia merkittävästi. Hyväksyntää voidaan lisätä esimerkiksi erilaisilla kompensatioilla, mutta pelkkä taloudellinen hyvitys ei riitä. Ratkaisevaa on myös kokemus reilusta prosessista ja mahdollisuudesta osallistua päätöksentekoon, johon on varattava myös tarpeeksi resursseja hankkeen suunnitteluvaiheessa.

Hyvinvointia maksimoiva ja yhteiskunnallisesti kestävä päätöksenteko edellyttää sekä hyötyjen että haittojen tasapainoista punnintaa. Jatkossa tarvitaan lisää empiiristä tutkimusta, joka tarkentaa eri teknologioiden sosiaalisen hyväksynnän kustannuksia paikalliset erityispiirteet huomioiden. Lisäksi energiaoptimoimalleja on kehitettävä niin, että ne pystyvät ottamaan realistisemmin huomioon hyväksyttävyyden ja muiden sosioteknisten tekijöiden vaikutukset teknologian valintaan, kustannuksiin ja käyttöönoton aikatauluihin.

Kiitokset

Kiitos Tiina Koljoselle ja Lassi Similälle arvokkaista kommentteista ja ohjauksesta työhön. Tutkimushankkeelle on myönnetty Euroopan unionin NextGenerationEU – rahoitusta.

Viitteet

- Antikainen, R. (2010). Elinkaarimetodiikkojen nykytila, hyvät käytännöt ja kehitystarpeet. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 7/2010. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. <http://hdl.handle.net/10138/39822>
- Bolwig, S., Bolkesjø, T. F., Klitkou, A., Lund, P. D., Bergaentzlié, C., Borch, K., Olsen, O.J., Kirkerud, J. G., Chen, Y. K., Gunkel, P. A. & Skytte, K. (2020). 'Climate-friendly but socially rejected energy-transition pathways : The integration of techno-economic and socio-technical approaches in the Nordic-Baltic region ', *Energy Research and Social Science*, vol. 67, 101559. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101559>
- Chlechowicz, M., Reuter, M. & Eichhammer, W. (2022). How first comes energy efficiency? Assessing the energy efficiency first principle in the EU using a comprehensive indicator-based approach. *Energy Efficiency* **15**, 59 2022. <https://doi.org/10.1007/s12053-022-10063-8>
- COMBI: Calculating and Operationalising the Multiple Benefits of Energy Efficiency in Europe, <https://combi-project.eu/>.
- Dröes, M. I. & Koster, H. R.A. (2021). Wind turbines, solar farms, and house prices, *Energy Policy*, Volume 155, 2021, 112327, ISSN 0301-4215, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112327>.
- Dröes, M. I. & Koster, H. R.A. (2016). Renewable energy and negative externalities: The effect of wind turbines on house prices, *Journal of Urban Economics*, Volume 96, 2016, Pages 121-141, ISSN 0094-1190, <https://doi.org/10.1016/j.jue.2016.09.001>.
- EU (2021). Commission Recommendation (EU) 2021/1749 of 28 September 2021 on Energy Efficiency First: From Principles to Practice — Guidelines and Examples for its Implementation in Decision-making in the Energy Sector and Beyond. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reco/2021/1749/oj/eng>
- EU (2023). Euroopan unioni. Energiatohokkuusdirektiivi 2023/1791.

- Euroopan komissio (2017). Study on Technical Assistance in Realisation of the 2016 Report on Renewable Energy, in Preparation of the Renewable Energy Package for the Period 2020-2030 in the European Union. 'RES-Study' ENER/C1/2014-688, Brussels, 2017. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/res-study_final_report_170227.pdf
- Euroopan komissio (2024). LIITE asiakirjaan Komission suositus suuntaviivoista Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin (EU) 2023/1791 3 artiklan tulkittamiseksi energiatehokkuus ensin -periaatteen osalta. Bryssel 29.7.2024 C(2024) 5284 final.
- Euroopan komissio (2025). EU Emissions Trading System (EU ETS). https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-markets/eu-emissions-trading-system-eu-ets/about-eu-ets_en>
- Laki viranomaisten suunnitelmien ja ohjelmien ympäristövaikutusten arvioinnista (200/2005). Finlex. <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/2005/200>
- García, J. H., Todd L. C., Kallbekken, S. & Torvanger, A. (2016). "Willingness to accept local wind energy development: Does the compensation mechanism matter?" *Energy Policy* 99 (2016): 165-173. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.09.046>
- Greaker, M., Hagem, C. & Skulstad, A. (2024). Offsetting schemes and ecological taxes for wind power production, *Ecological Economics*, Volume 224, 2024, 108292, ISSN 0921-8009, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108292>
- Grimsrud, K., Hagem, C., Lind, A. & Lindhjem, H. (2021). Efficient spatial distribution of wind power plants given environmental externalities due to turbines and grids, *Energy Economics*, Volume 102, 2021, 105487, ISSN 0140-9883, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105487>
- Grimsrud, K., Hagem, C., Haaskjold, K., Lindhjem, H. & Nowell, M. (2024). Spatial Trade-Offs in National Land-Based Wind Power Production in Times of Biodiversity and Climate Crises. *Environ Resource Econ* 87, 401–436 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10640-023-00764-8>
- Holttinen, H., Lindroos, T. J., Lehtilä, A., Koljonen, T., Kiviluoma, J., & Korpås, M. (2025). Estimating the CO₂ Impacts of Wind Energy in the Transition Towards Carbon-Neutral Energy Systems. *Energies*, 18(6), 1548. <https://doi.org/10.3390/en18061548>
- Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A. & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *Int J Life Cycle Assess* 22, 138–147 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>

- International Carbon Action Partnership. (2026). *EU Emissions Trading System (EU ETS) – Factsheet*.
https://icapcarbonaction.com/system/files/ets_pdfs/icap-etsmap-factsheet-43.pdf
- Janhunen, S., Hujala, M. & Pätäri, S. (2018). The acceptability of wind farms: the impact of public participation. *Journal of Environmental Policy & Planning*, Vol. 20, No. 2:214-235. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2017.1398638>
- Jørgensen, S. L., Olsen, S. B., Ladenburg, J., Martinsen, L., Svenningsen, S. R., & Hasler, B. (2013). Spatially induced disparities in users' and non-users' WTP for water quality improvements—Testing the effect of multiple substitutes and distance decay. *Ecological Economics*, 92, 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.07.015>
- Krekel, C. & Zerrahn, A. (2017). Does the presence of wind turbines have negative externalities for people in their surroundings? Evidence from well-being data, *Journal of Environmental Economics and Management*, Volume 82, 2017, Pages 221-238, ISSN 0095-0696, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2016.11.009>.
- Laki ympäristövaikutusten arviointimenettelystä (YVA-laki) 252/2017.
- Lehmann, P., Reutter, F., & Tafarte, P. (2023). Optimal siting of onshore wind turbines: Local disamenities matter. *Resource and Energy Economics*, 74, 101386.
- Linnala, L-M. (2024). Property Value Impacts of Onshore Wind Power in Finland (September 07, 2024). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4949498> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4949498>
- Mandel, T., Pató, Z., Broc, J. S., & Eichhammer, W. (2022). Conceptualising the energy efficiency first principle: Insights from theory and practice. *Energy Efficiency*, 15(6), 41. <https://doi.org/10.1007/s12053-022-10053-w>
- Meier, J. N., Lehmann, P., Süßmuth, B., & Wedekind, S. (2024). Wind power deployment and the impact of spatial planning policies. *Environmental and Resource Economics*, 87(2), 491-550.
- MICAT: Multiple Impacts Calculation Tool, <https://micatool.eu/>
- Motiva. (2024). YVA-menettely. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoiman_ymparisto- ja_muut_vaikutukset/yva-menettely
- Niemi, A., Similä, L., Pihkola, H., & Koljonen, T. (2025). "Kyllähän se vähän yllätti" – Tiedontarpeet ja oikeudenmukaisuuden kokemukset tuulivoimasta kahdessa suomalaisessa kunnassa. *Alue ja Ympäristö*, 54(1), 160–180. <https://doi.org/10.30663/ay.148199>
- ODYSSEE-MURE <https://www.odyssee-mure.eu/data-tools/multiple-benefits-energy-efficiency.html/> .

- Peltonen, L., Donner-Amnell, J. & Nokelainen, S. (2024). Tuulivoiman hyväksyttävyyden nykytila ja näkymät Suomessa. Publications of the University of Eastern Finland. Reports and Studies in Social Sciences and Business Studies No 21. Itä-Suomen yliopisto. <https://erepo.uef.fi/handle/123456789/31645>
- Reutter, F., Drechsler, M., Gawel, E., & Lehmann, P. (2024). Social costs of setback distances for onshore wind turbines: a model analysis applied to the German state of Saxony. *Environmental and Resource Economics*, 87(2), 437-463. <https://doi.org/10.1007/s10640-023-00777-3>
- Ruhnau, O., Eicke, A., Sgarlato, R., Tröndle, T., & Hirth, L. (2024). Cost-potential curves of onshore wind energy: the role of disamenity costs. *Environmental and Resource Economics*, 87(2), 347-368. <https://doi.org/10.1007/s10640-022-00746-2>
- Sliz-Szkliniarz, B., Eberbach, J., Hoffmann, B. & Fortin, M. (2019). Assessing the cost of onshore wind development scenarios: modelling of spatial and temporal distribution of wind power for the case of Poland. *Renew Sustain Energy Rev* 109:514–531. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.039>
- Smith, M., Moerenhout, J., Thuring, M., Regel, S. de, & Altman, M. (2020). External costs: Final report (energy costs, taxes and the impact of government interventions on investments). European Commission.
- Sovacool, B. K., Kim, J., & Yang, M. (2021). The hidden costs of energy and mobility: A global meta-analysis and research synthesis of electricity and transport externalities. *Energy Research & Social Science*, 72, 101885. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101885>
- Stede, J., Blauert, M. & May, N. (2021). Way off: the effect of minimum distance regulation on the deployment and cost of wind power. DIW Berlin, German Institute for Economic Research
- Tikkanen, T., Rähkä, J. & Ruokamo E. (2026) Household preferences for clean energy transition. [Artikkeli valmistelussa]. Suomen Ympäristökeskus (Syke).
- Vignali, S., Lörcher, F., Hegglin, D., Arlettaz, R., & Braunisch, V. (2021). Modelling the habitat selection of the bearded vulture to predict areas of potential conflict with wind energy development in the Swiss Alps. *Global Ecology and Conservation*, 25, e01405. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01405>
- Wehrle, S., Gruber, K. & Schmidt, J. (2021). The cost of undisturbed landscapes, *Energy Policy*, Volume 159, 2021, 112617, ISSN 0301-4215, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112617>

Nimeke	Tuulivoiman ulkoisvaikutusten arvioinnin lähestymistavat ja haasteet
Tekijä(t)	Anni Niemi
Tiivistelmä	<p>Tuulivoiman laajentaminen on keskeinen osa puhtaan energian siirtymää, mutta siihen liittyy monenlaisia ulkoisvaikutuksia, niin myönteisiä kuin kielteisiä, joita ei aina huomioida riittävästi hankkeiden suunnittelussa ja päätöksenteossa. Tässä raportissa tarkastellaan, miten tuulivoiman ulkoisvaikutuksia arvioidaan neljässä eri lähteessä ja viitekehyksessä: tieteellisessä kirjallisuudessa, ympäristövaikutusten arviointi (YVA) -menettelyssä, elinkaariarvioinnissa (LCA) sekä energiatehokkuus ensin -periaatteen (EEF) mukaisissa kustannus-hyötyanalyyseissä, jotka perustuvat Euroopan komission energiatehokkuusdirektiiviin (EU 2023). Raportti kokoaa yhteen ilmasto-, ympäristö-, sosiaaliset, taloudelliset ja teknologiset ulkoisvaikutukset ja vertailee, miten kukin menetelmä niitä tunnistaa ja arvioi. Vertailu osoittaa, että samat ulkoisvaikutukset esiintyvät eri lähteissä varsin eri tavoin, eri yksiköin, eri rajauksiin ja eri menetelmin, eikä mikään yksittäinen lähestymistapa kata kaikkia olennaisia vaikutuksia kattavasti. Arviointimenetelmien harmonisointi ja tietojen yhteiskäyttö voisivat parantaa ulkoisvaikutusten huomioimista hankkeiden lupaprosesseissa ja politiikkatoimien valmistelussa sekä sujuvoittaa hankkeiden suunnittelua.</p> <p>Tutkimus on toteutettu osana REPower-CEST (Clean Energy System Transition) -hanketta, jonka tavoitteena on kehittää tietoperustaa tiekartan luomiseksi puhtaan energian kestäväen ja oikeudenmukaisen siirtymän toteuttamiseksi Suomessa.</p>
ISBN, ISSN, URN	ISBN 978-951-38-8810-7 ISSN-L 2242-1211 ISSN 2242-122X (Verkkajulkaisu) DOI: 10.32040/2242-122X.2026.T446
Julkaisuaika	Huhtikuu 2026
Kieli	Suomi, englanninkielinen tiivistelmä
Sivumäärä	35 s.
Projektin nimi	REPower-CEST
Rahoittajat	Euroopan unioni (NextGenerationEU)
Avainsanat	
Julkaisija	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy PL 1000, 02044 VTT, puh. 020 722 111, https://www.vtt.fi/

Title	Approaches and Challenges in Assessing Wind Energy Externalities
Author(s)	Anni Niemi
Abstract	<p>The expansion of wind power is a key component of the clean energy transition, yet it entails a wide range of externalities, both positive and negative, that are not always adequately addressed in project planning and decision-making. This report examines how wind energy externalities are assessed across four different sources and frameworks: scientific literature, Environmental Impact Assessment (EIA) procedures, Life Cycle Assessment (LCA), and the cost-benefit analyses associated with the Energy Efficiency First (EEF) principle, as set out in the EU Energy Efficiency Directive (EU 2023). The report brings together climate, environmental, social, economic, and technological externalities, comparing how each method identifies and evaluates them. The comparison reveals that the same externalities appear in quite different forms across sources, with different units, system boundaries, and methodologies, and that no single approach comprehensively captures all relevant impacts. Harmonising assessment methods and enabling greater data sharing could improve the integration of externalities into permitting processes and policy preparation, while also streamlining project planning.</p> <p>The study was carried out as part of the REPower-CEST (Clean Energy System Transition) project, which aims to develop the knowledge base for a roadmap towards a sustainable and just clean energy transition in Finland.</p>
ISBN, ISSN, URN	ISBN 978-951-38-8810-7 ISSN-L 2242-1211 ISSN 2242-122X (Online) DOI: 10.32040/2242-122X.2026.T446
Date	April 2026
Language	Finnish, English abstract
Pages	35 p.
Name of the project	REPower-CEST
Commissioned by	European Union (NextGenerationEU)
Keywords	
Publisher	VTT Technical Research Centre of Finland Ltd P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland, Tel. 020 722 111, https://www.vttresearch.com

Tuulivoiman ulkoisvaikutusten arvioinnin lähestymistavat ja haasteet



**Euroopan unionin
rahoittama**
NextGenerationEU

ISBN 978-951-38-8810-7
ISSN-L 2242-1211
ISSN 2242-122X (Verkojulkaisu)
DOI: 10.32040/2242-122X.2026.T446

VTT

beyond the obvious