



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 29/2025

Synteesiraportti: Kuinka tuulivoima sovitetaan yhteen metsien ja soiden käytön kanssa?

**Anne Tolvanen, Hannele Holttinen, Anna Laine-Petäjäkangas, Timo Tokola,
Eija Pouta, Marko Antila, Tero Heinonen, Mika Jokikokko, Timo Karlsson,
Kati Koponen, Maija Lampela, Tomi Lindroos, Liisa Maanavilja, Erkki Mäntymaa,
Parvez Rana, Henri Routavaara, Mari Selkimäki ja Artti Juutinen**

Synteesiraportti: Kuinka tuulivoima sovitetaan yhteen metsien ja soiden käytön kanssa?

**Anne Tolvanen, Hannele Holttinen, Anna Laine-Petäjäkangas, Timo Tokola,
Eija Pouta, Marko Antila, Tero Heinonen, Mika Jokikokko, Timo Karlsson,
Kati Koponen, Maija Lampela, Tomi Lindroos, Liisa Maanavilja, Erkki Mäntymaa,
Parvez Rana, Henri Routavaara, Mari Selkimäki ja Artti Juutinen**



Viittausohje:

Tolvanen A, Holttinen H, Laine-Petäjäkangas A, Tokola T, Pouta E, Antila M, Heinonen T, Jokikokko M, Karlsson T, Koponen K, Lampela M, Lindroos T, Maanavilja L, Mäntymaa E, Rana P, Routavaara H, Selkimäki M, & Juutinen A. Synteesiraportti: Kuinka tuulivoima sovite-
taan yhteen metsien ja soiden käytön kanssa? Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus
29/2025. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 97 s.

Anne Tolvanen ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5304-7510>



ISBN 978-952-419-049-7 (Verkkojulkaisu)

ISSN 2342-7639 (Verkkojulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-419-049-7>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Anne Tolvanen, Hannele Holttinen, Anna Laine-Petäjäkangas, Timo Tokola, Eija Pouta, Marko Antila, Tero Heinonen, Mika Jokikokko, Timo Karlsson, Kati Koponen, Maija Lampela, Tomi Lindroos, Liisa Maanavilja, Erkki Mäntymaa, Parvez Rana, Henri Routavaara, Mari Selkimäki ja Artti Juutinen

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2025

Julkaisuvuosi: 2025

Kannen kuva: Adobe Stock

Synteesiraportti: Kuinka tuulivoima sovitetaan yhteen metsien ja soiden käytön kanssa?

Anne Tolvanen, Hannele Holttinen, Anna Laine-Petäjäkangas, Timo Tokola, Eija Pouta, Marko Antila, Tero Heinonen, Mika Jokikokko, Timo Karlsson, Kati Koponen, Maija Lampela, Tomi Lindroos, Liisa Maanavilja, Erkki Mäntymaa, Parvez Rana, Henri Routavaara, Mari Selkimäki ja Artti Juutinen

Tämän raportin ydinviestit:

1. Tuulivoiman ilmastohyöty sen 30 vuoden elinkaaren ajan on kiistaton, mutta sen paikalliset vaikutukset luonnon monimuotoisuuteen ja asukkaisiin heikentävät sen hyväksyntää. Sekä ihmisiin että luontoon kohdistuvien haitallisten vaikutusten välttämiseksi, minimoimiseksi ja kompensoimiseksi tulisi soveltaa lievennyshierarkiaa. Tuulivoimayhtiöt voisivat osallistua vapaaehtoiseen kompensatio-ohjelmiin ja sitä kautta lisätä toiminnan hyväksyntää.
2. Tuulivoimaa sijoitettaessa tulisi välttää sellaisten loma-asutusalueiden ympäristöjä, joissa mielikuva luonnonrauhasta on vahva, ja luonnon monimuotoisuus on vakituista asuinymäristöä korkeammalla tasolla. Maisemakilpiä voitaisiin hyödyntää vähentämään tuulivoiman visuaalisia ja maisemavaikutuksia erityisesti taajamien läheisyydessä.
3. Tuulivoiman monimuotoisuusvaikutuksista tarvitaan lisää vertaisarvioitua tutkimustietoa Suomesta. Tietoa erityisesti direktiivilajien ja uhanalaisten eläinten siirtymäetäisyyksistä tulisi hyödyntää toteutettaessa lievennyshierarkiaa tuulivoiman sijoittamisessa ja toiminnassa. Silloin kun kotimaista tietoa ei ole riittävästi, tulisi noudattaa varovaisuusperiaatetta.
4. Kansalaiset tukevat yleisellä tasolla ilmastopolitiikkaa. Tarvitaan kuitenkin keinoja, joilla voidaan ratkaista tuulivoiman epätasaista hyötyjen ja haittojen jakautumista paikallisyhteisöissä. Maankäytön muutosmaksut, erilaiset yhteisön tulonjakomallit ja maisema-arvo-kauppa voivat auttaa ratkaisemaan näitä ongelmia.
5. Paikallisyhteisöt tulisi ottaa mukaan tuulivoimaa koskevaan suunnitteluun jo alkuvaiheessa.
6. Maanomistajia tulisi kannustaa hyväksyttävään ja kokonaiskestävään toimintaan kehittämällä taloudellisia ohjauskeinoja, joissa ilmastonmuutoksen hillintä ja monimuotoisuuden turvaaminen eivät ole keskenään ristiriidassa.

Tiivistelmä

Anne Tolvanen¹, Hannele Holttinen^{2,3}, Anna Laine-Petäjäkangas^{4,5}, Timo Tokola⁵, Eija Pouta⁶, Marko Antila⁷, Tero Heinonen⁵, Mika Jokikokko¹, Timo Karlsson⁷, Kati Koponen⁷, Maija Lampela⁸, Tomi Lindroos⁷, Liisa Maanavilja⁸, Erkki Mäntymaa¹, Parvez Rana¹, Henri Routavaara¹, Mari Selkimäki⁵ ja Artti Juutinen¹

¹ Luonnonvarakeskus, Paavo Havaksen tie 3, 90570 Oulu

² Recognis Oy, Tonttutytönkuja 3, 02200 Espoo

³ Aalto yliopisto, Otakaari 24, 02150 Espoo

⁴ Geologian tutkimuskeskus, Viestikatu 7A, 70211 Kuopio

⁵ Itä-Suomen yliopisto Metsätieteiden osasto, Yliopistokatu 7, 80130 Joensuu

⁶ Luonnonvarakeskus, Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki

⁷ VTT Teknologian tutkimuskeskus Oy, Tekniikantie 21, 02044 Espoo

⁸ Geologian tutkimuskeskus, Vuorimiehentie 5, 02151 Espoo

Suomen ilmastotavoite on saavuttaa hiilineutraalisuus vuoteen 2035 mennessä, mikä edellyttää merkittäviä toimenpiteitä kasvihuonekaasujen nettopäästöjen vähentämiseksi. Tuulivoimalla on keskeinen rooli tässä siirtymässä, ja sen kasvu on ollut nopeaa: voimaloiden määrä yli kaksinkertaistui vuosien 2020 ja 2024 välillä. Hiilineutraalisuuden saavuttamisessa on kuitenkin haasteena, kuinka voidaan samanaikaisesti turvata luonnon monimuotoisuus ja kansalaisten hyväksyntä, ja kuinka tämä kaikki voidaan toteuttaa kustannustehokkaasti. Käytännön toimenpiteiden lisäksi tarvitaan politiikkakeinoja, jotka kannustaisivat maanomistajia hallitsemaan omistamaansa maata niin, että toiminta tuottaa päästövähennyksiä ja monimuotoisuushyötyjä hyväksyttävällä tavalla.

Tuulivoiman ilmastohyöty koko sen 30 vuoden elinkaaren ajan on kiistaton. Vuosien 2030–2050 aikana sen arvioitu päästövähennyshyöty fossiilisten korvaajana oli keskimäärin 230–260 gCO₂eq/kWh, kun taas rakentamisen ja käytön aiheuttamat päästöt on kirjallisuudessa arvioitu kahta kertaluokkaa alhaisemmiksi, 5–7 gCO₂eq/kWh. Iin kunnan esimerkkitapauksessa tuulivoiman aiheuttamat metsäkadon tuottamat päästöt olivat 0,6 gCO₂eq/kWh, eli kymmenesosa rakentamisen ja käytön päästöistä. Kun turbiineille mallinnettiin optimaalisia sijoituspaikkoja metsäkadon minimoinnin ja kustannustehokkuuden näkökulmista, parhaat paikat sijoittuivat voimalinjojen läheisyyteen. Tuulivoiman metsäkatovaikutuksia, samoin kuin sen rakentamisen kustannustehokkuutta, määrää siten ainakin yhtä paljon voimajohtojen sijainti kuin se, mihin itse tuulivoimalaitokset rakennetaan.

Tuulivoimalla on merkittäviä vaikutuksia luonnon monimuotoisuuteen. Suomesta löytyy vain vähän vertaisarvioitua tutkimustietoa, mutta kansainvälinen katsaustutkimuksemme osoitti, että kahdessa kolmasosassa 160 tarkastellusta tapauksesta havaittiin lajien siirtymää tuulivoima-alueelta. Siirtymä ilmeni mm. muutoksina käyttäytymisessä, esiintymisessä, lisääntymisenestyksessä, lentoreiteissä ja pesimärunsauksissa. Siirtymäetäisyydet vaihtelivat huomattavasti sekä lajien välillä että niiden sisällä. Erityisesti kurjet, pöllöt, porot ja kanalinnut voivat reagoida tuulivoimaan useiden kilometrien säteellä. Petolintujen ja lepakoiden populaatiot voivat pienentyä törmäysten vaikutuksesta riippumatta siitä, tapahtuuko siirtymistä vai ei.

Metsän rakennepiirteillä, kuten puiden läpimitalla ja tiheydellä on vaikutusta tuulivoiman maisema- ja meluhaittojen vähentämisessä. Metsät voivat vaimentaa melua jopa 10 dB, jos ääni kulkee puuston läpi. Siten myös metsän käsittelyllä voidaan vaikuttaa tuulivoiman aiheuttamaan häiriöön. Eri-ikäisen ja tasaikäisen metsänhoidon yhdistelmällä voitaisiin luoda metsäisempi maisema, maisemakilpi, joka lieventää tuulivoiman vaikutuksia. Maisemakilvet tarjoavat myös metsäisiä elinympäristöjä tuulivoima-alueelta pois siirtyneelle metsälajistolle. Hankkeessa tuotettuja laskelmia voidaan hyödyntää metsäsuunnittelussa ja -hoidossa.

Soiden ennallistamispolulla, eli sekä suon lähtötilanteella että ennallistamisen lopputuloksella, on vaikutusta kasvihuonekaasutaseisiin, monimuotoisuushyötyihin ja vesistökuormitukseen. Käytännössä ennallistamisen on täytettävä monia samanaikaisia tavoitteita ja riskejä sekä tuettava useiden ekosysteemipalvelujen tuottamista. Alueiden valinta on tällöin hyötyjen ja haittojen kompromissi. Ennallistamisalueiden saatavuutta hankaloittaa suoalueiden hydrologinen pirstaloituminen, kirjava maanomistus sekä soiden maankäyttöön vaikuttavat ristiriitaiset ohjaukset, joista osa edelleen kannustaa soiden kuivatukseen.

Kansalaiset tukevat ilmastopolitiikkaa ja ovat valmiita osallistumaan taloudellisesti päästövähennyksiin ja monimuotoisuuden lisäämiseen. Tuulivoima, ilmastometsätalous (jatkovapeitteinen kasvatusta, pidennetty kiertoaika) ja soiden ennallistaminen saivat kyselytutkimuksessa merkittävää hyväksyntää kansalaisilta. Tuulivoima oli sitä hyväksytympää mitä etäämmällä se asukkaista sijaitsee. Negatiivisia vaikutuksia koettiin lähialueella johtuen erityisesti ääni- ja maisemahaitoista sekä haitallisista luontovaikutuksista. Kyselytutkimuksessa testattu maisema-arvo-kauppa, jolla luotaisiin metsäisiä maisemakilpiä, kiinnosti sekä metsänomistajia että metsää omistamattomia kansalaisia. Soiden ennallistamisen uskottiin parantavan erityisesti luonnon monimuotoisuutta, samoin kuin ilmastometsätalouden luonto- ja maisemavaikutukset koettiin positiivisina. Näiden vaikutukset metsätalouteen ja metsäteollisuuteen nähtiin kuitenkin vähemmän myönteisinä tai jopa kielteisinä.

Tuulivoima on maankäyttömuoto, jonka sijoittuminen kohdistuu Suomessa pääosin metsäisiin ympäristöihin. Siten se kilpailee yhä monitavoitteisemmaksi muuttuvasta maankäytöstä. Jos maankäytössä painotetaan vain ilmastoa, tuulivoima on ylivoimainen. Jos painotetaan monimuotoisuutta, soiden ennallistaminen ja peitteiset metsät ovat avainasemassa. Jos painotetaan taloutta, tuulivoima ja metsät ovat etusijalla, sillä ennallistamisen osalta tulonmuodostus, esimerkiksi hiili- tai biodiversiteettikaupan muodossa, on vielä alkutekijöissään. Koska kaikkia hyötyjä ei voida maksimoida yhtä aikaa, joudutaan pohtimaan, mitä hyötyjä missäkin tilanteessa painotetaan. Maanomistajat ovat tässä suhteessa avainasemassa.

Asiasanat: Hiilinielut, Hiilivarasto, Hyväksyttävyyys, Jatkovapeitteinen metsänkasvatusta, Metsäkato, Maankäyttö, Lievennyshierarkia, Soiden ennallistaminen, Tuulivoima, Uusiutuva energia

Abstract

Anne Tolvanen¹, Hannele Holttinen^{2,3}, Anna Laine-Petäjäkangas^{4,5}, Timo Tokola⁵, Eija Pouta⁶, Marko Antila⁷, Tero Heinonen⁵, Mika Jokikokko¹, Timo Karlsson⁷, Kati Koponen⁷, Maija Lampela⁸, Tomi Lindroos⁷, Liisa Maanavilja⁸, Erkki Mäntymaa¹, Parvez Rana¹, Henri Routavaara¹, Mari Selkimäki⁵ and Artti Juutinen¹

¹ Natural Resources Institute Finland, Paavo Havaksen tie 3, 90570 Oulu

² Recognis Oy, Karhumäentie 3, Vantaa

³ Aalto university, Otakaari 24, 02150 Espoo

⁴ Geological Survey of Finland, Viestikatu 7A, 70211 Kuopio

⁵ University of Eastern Finland, Yliopistokatu 7, 80130 Joensuu

⁶ Natural Resources Institute Finland, Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki

⁷ VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, Tekniikantie 21, 02044 Espoo

⁸ Geological Survey of Finland, Vuorimiehentie 5, 02151 Espoo

Finland's climate target is to achieve carbon neutrality by 2035, which requires significant actions to reduce net greenhouse gas emissions. Wind power plays a key role in this transition, and its growth has been rapid: the number of turbines more than doubled between 2020 and 2024. However, achieving carbon neutrality faces a challenge: how to simultaneously safeguard biodiversity and public acceptance – and how to do all this cost-effectively. In addition to practical measures, policy instruments are needed to encourage landowners to manage their land in ways that deliver both emission reductions and biodiversity benefits in an acceptable manner.

The climate benefit of wind power over its 30-year life cycle is undeniable. Between 2030 and 2050, its estimated emission reduction benefit as a fossil fuel substitute was on average 230–260 gCO₂eq/kWh. In contrast, emissions from the construction and operation of turbines have been estimated in the literature to be two orders of magnitude lower, about 5–7 gCO₂eq/kWh. In a case study from the municipality of Ii, the emissions caused by forest loss due to wind power were 0.6 gCO₂eq/kWh, being only a tenth of those from construction and operation. When optimal turbine locations were modeled to minimize forest loss and maximize cost-efficiency, the best sites were near power lines. Therefore, the climate and cost impacts of wind power are influenced at least as much by the location of transmission lines as by where the turbines themselves are built.

Wind power has significant impacts on biodiversity. Peer-reviewed research from Finland is scarce, but our international review found that in two-thirds of the 160 cases studied, species displacement was observed from wind power areas. Displacement was recorded as changes in behavior, presence, reproductive success, flight paths, and breeding abundance. The displacement distances varied greatly between and within species. Cranes, owls, reindeer, and gallinaceous species may react to wind power from several kilometers away. Populations of raptors and bats can decline due to collisions, regardless of whether displacement occurs or not.

Forest structure characteristics, such as tree diameter and density, influence how well forests can reduce the visual and noise impacts of wind power. Forests can dampen noise by up to 10 dB if sound travels through trees. Therefore, forest management can influence the level of disturbance caused by wind power. A combination of uneven-aged and even-aged forest management could create a more forested landscape—a "landscape shield" that mitigates the visual impacts of wind turbines. Such shields also provide habitats for forest species displaced from wind power areas. Calculations produced in the project can support forest planning and management.

The restoration trajectory of peatlands, i.e., both the starting conditions and the restoration outcome, has impacts on greenhouse gas balances, biodiversity, and water quality. In practice, restoration must simultaneously meet multiple goals and manage multiple risks while supporting a range of ecosystem services. Choosing restoration sites requires compromises between benefits and trade-offs. The availability of suitable areas is limited by hydrological fragmentation of peatlands, fragmented landownership, and conflicting land-use policies—some of which still incentivize drainage of peatlands.

Citizens support climate policy and are willing to contribute financially to emission reductions and biodiversity protection. Wind power, climate-smart forestry (continuous cover forestry, extended rotation periods), and peatland restoration received significant public approval in surveys. Wind power was more acceptable the farther it was from residential areas. Negative experiences were reported near homes, especially due to noise, visual impacts, and harmful effects on nature. The concept of a "landscape value trade"—whereby forested landscape shields would be created—was of interest to both forest owners and non-owners. Peatland restoration was believed to benefit biodiversity in particular, and the nature and landscape impacts of climate-smart forestry were also perceived positively. However, the effects of these actions on forestry and the forest industry were seen as less positive or even negative.

Wind power is a land use form that is placed principally in forested environments in Finland. Hence it competes with increasingly multifunctional land use demands. If land-use decisions prioritize climate goals, wind power is superior. If biodiversity is prioritized, peatland restoration and continuous cover forestry are key. If the focus is on the economy, wind power and forestry take precedence, since income from restoration—e.g., via carbon or biodiversity markets—is still in its infancy. Because not all benefits can be maximized simultaneously, decisions must be made about which benefits are prioritized in which contexts. Landowners are key players in this regard.

Keywords: Acceptance, carbon sink, carbon stock, continuous cover forestry, deforestation, mitigation hierarchy, land use, peatland restoration, renewable energy, wind power

Sisältö

1. Johdanto	10
2. Tavoitteet.....	11
3. Tuulivoima päästöjen vähentäjänä ja aiheuttajana	12
3.1. Päästöjen vähentäminen.....	12
3.1.1. Tuulivoiman päästövaikutusarvio Suomelle.....	12
3.1.2. Johtopäätökset tuulivoiman päästövähennysvaikutuksista	15
3.2. Päästöjen aiheuttaminen.....	16
3.2.1. Tuulivoiman elinkaaren aikaiset päästöt.....	16
3.2.2. Tuulivoiman maankäyttövaikutukset arvioiden pohjana	16
3.3. Tuulivoiman sijoittaminen metsien hiilitaseiden ja talouden näkökulmasta lin kunnassa.....	17
3.3.1. Tuulivoimatuotannon potentiaaliset alueet	17
3.3.2. Metsäkadon ja sen päästövaikutusten arviointi	18
3.3.3. Tuulivoimalle parhaat alueet taloudellisesta näkökulmasta	22
3.3.4. Tuulivoiman sijoittamisen yhteistarkastelu hiilitase- ja talousnäkökulmista.....	23
3.4. Yhteenveto tuulivoiman ilmastovaikutuksista	27
4. Tuulivoiman monimuotoisuusvaikutukset	28
4.1. Koostetutkimuksen tausta.....	28
4.2. Menetelmät.....	28
4.3. Tulokset eläinten siirtymävaikutuksista.....	30
4.3.1. Linnut.....	31
4.3.2. Lepakot	35
4.3.3. Maanisäkkäät.....	35
4.4. Siirtymän vaikutukset eläinpopulaatioihin.....	36
4.5. Ei-siirtymät	37
4.6. Miten tietoa siirtymästä ja ei-siirtymästä voidaan käyttää tuulivoiman aiheuttamien haittojen lieventämiseen?.....	38
4.7. Menetelmäpuutteet.....	39
4.8. Yhteenveto tuulivoiman monimuotoisuusvaikutuksista.....	40
5. Tuulivoima osana monitavoitteista metsäsuunnittelua.....	41
5.1. Tuulivoima ja audiovisuaaliset häiriöt: metsämaiseman suojaava vaikutus.....	41
5.2. Tuulivoiman melutason säätely optimoidulla metsänhoitosuunnitelmalla	43
5.3. Monitavoitteinen maankäytön analyysi tuulivoimalle luonnon monimuotoisuus huomioiden	45
5.4. Yhteenveto monitavoitteisesta suunnittelusta	50
6. Metsänkasvatusmenetelmien kustannustehokkuus hiilivaraston ja monimuotoisuuden näkökulmasta	51

6.1. Metsänkasvatusmenetelmien vaikutusten arviointi	51
6.2. Metsänkasvatusmenetelmien simulointi	52
6.3. Kustannustehokkuusindeksi (Cost-efficiency index CEI)	52
6.4. Metsänkasvatusmenetelmien kustannustehokkuus.....	53
6.5. Yhteenveto metsänkasvatusmenetelmistä	55
7. Soiden ennallistaminen	56
7.1. Soita koskeva tutkimus LandUseZero-hankkeessa.....	56
7.2. Metsäojitettujen soiden ennallistamisen ilmastovaikutus	56
7.2.1. Taustaa ja menetelmät.....	56
7.2.2. Vaikutus hiilitaseeseen eri ennallistamispoluissa	58
7.2.3. Vaikutus säteilypakotteeseen ja ilmastoon eri ennallistamispoluissa	58
7.2.4. Mitkä ovat parhaat ennallistamispolut ilmastonmuutoksen hillinnän ja muiden hyötyjen kannalta?	59
7.3. Soiden maankäytön historiaa, nykypäivää ja tulevaisuuden suuntaviivoja Suomessa, Irlannissa ja Skotlannissa	60
7.3.1. Taustatietoa soiden maankäytöstä	60
7.3.2. Soiden maankäyttö 2020 luvulla – tulevaisuuden suuntaviivoja.....	62
7.3.3. Esteitä ja ratkaisuja kestäväälle soiden maankäytölle.....	62
7.4. Yhteenveto hankkeen suotutkimuksista.....	64
8. Maankäyttövaihtoehtojen (tuuli, metsät, suot) hyväksyttävyys.....	65
8.1. Viitekehys hyväksyttävyyteen	65
8.2. Maankäyttövaihtoehtoihin liittyvät uskomukset ja hyväksyttävyys	65
8.3. Moniulotteinen etäisyys vaikuttaa hyväksyttävyyteen	70
8.4. Kansalaisten preferenssit maankäyttövaihtoehtoja kohtaan	71
8.5. Metsänomistajien kiinnostus maankäyttövaihtoehtoja kohtaan	75
8.6. Maisema-arvokaupalla hyväksyttävyyttä.....	76
8.7. Yhteenveto hankkeen hyväksyttävyytustutkimuksista	77
9. Suositukset: Miten tuulivoima voidaan sovittaa muuhun maankäyttöön kestävästi ja hyväksyttävästi?.....	79
9.1. Vaikutukset ihmisiin.....	79
9.2. Vaikutukset luontoon.....	80
9.3. Vaikutukset talouteen	81
9.4. Suunnitteluprosessi, sosiaaliset normit ja puhtaan siirtymän kokonaisvaltaiset hyödyt	81
9.5. Maanomistusolojen määräävä asema	82
9.6. Tutkimustarpeita	82
Viitteet.....	84

1. Johdanto

Maailmassa on kaksi toisiinsa liittyvää ympäristöhaastetta: ilmastonmuutos ja biologisen monimuotoisuuden heikkeneminen (OECD 2024). Useat EU-maat ovat sitoutuneet hiilineutraaliuuden vuoteen 2050 mennessä ja pysäyttämään luonnon monimuotoisuuden häviämisen vuoteen 2030 mennessä (Euroopan komissio 2020, 2022). Suomen EU:ta kunnianhimoisempi tavoite on saavuttaa hiilineutraalisuus jo vuoteen 2035 mennessä, mikä edellyttää toimenpiteitä kasvihuonekaasujen nettopäästöjen vähentämiseksi sekä maankäyttö- että energiasektorilla.

Tuulivoimalla on keskeinen rooli siirtymisessä hiilineutraaliin yhteiskuntaan, ja sen kasvu on ollut nopeaa. Vuonna 2022 uusiutuvan energiantuotannon osuus kokonaisenergiantuotannosta oli 42 % ja tuulivoiman 16 % (Tilastokeskus 2024). Tuulivoimaloiden määrä kaksinkertaistui vuosien 2020 ja 2024 välillä: vuonna 2020 turbiineja oli 821 kappaletta (2 586 MW) ja vuonna 2024 1835 kappaletta (yli 8 358 MW) (Suomen Uusiutuvat 2025). Jos uusien tuulivoimaloiden määrä kasvaa samaa vauhtia, tuulivoima voisi tuottaa 30 TWh vuoteen 2030 mennessä, mikä voisi olla noin 25 % Suomen energian kokonaistuotannosta.

Tuulivoima tuottaa ilmastohyötyjen lisäksi taloudellisia hyötyjä erityisesti kuntiin ja maanomistajille. Näiden hyötyjen ohella tulisi huomioida myös muut kestävyuden osa-alueet, kuten luonnon monimuotoisuus ja kansalaisten hyväksyntä. Suomessa suurin osa tuulivoimalaitoksista (eli tuulipuistoista) rakennetaan metsämaiseimiin, joten uusiutuvaan energiaan siirtyminen vaikuttaa maankäyttöön ja välillisesti luonnon monimuotoisuuteen mm. elinympäristöjen häviämisen, pirstoutumisen, audiovisuaalisten häiriöiden ja lajien suoran törmäyskuolleisuuden kautta (Tolvanen ym. 2023, Selkimäki ym. 2024, OECD 2024).

Euroopan komissio hyväksyi vuonna 2024 Suomen valtiontukiohjelman, joka koskee puhtaan siirtymän teollisia investointeja. Siirtymän investointeja edistävät hankkeet, kuten esimerkiksi tuuli- ja aurinkovoimahankkeet, saavat etusijan, eli nk. ohituskaistan ympäristön- tai vesien-suojelulain mukaisten lupien lupakäsittelyssä.

Vaikka kansalaiset suhtautuvat tuulivoimaan yleisellä tasolla myönteisesti, nopeasti kasvava tuulivoima on herättänyt ristiriitoja paikallisella tasolla. Tämä herättää kysymyksen, kuinka toiminnan hyväksyttävyyttä voitaisiin parantaa. Käytännön toimenpiteiden lisäksi tarvitaan erilaisia politiikkakeinoja, jotka kannustaisivat maanomistajia hallitsemaan omistamaansa maata niin, että toiminta tuottaa päästövähennyksiä ja monimuotoisuushyötyjä hyväksyttävällä tavalla.

Maa- ja metsätalousministeriön Hiilestä kiinni tutkimus- ja innovaatio-ohjelman rahoittama LandUseZero-hanke tuotti uusia näkökulmia siitä, kuinka kasvihuonekaasujen (khk) päästövähennyksiä voitaisiin saavuttaa sijoittamalla tuulivoiman tuotanto optimaalisesti siten, että metsien ja soiden hiilinielujen menetys ja luonnon monimuotoisuushaitat minimoidaan, ja toiminta on kansalaisten mielestä hyväksyttävää.

Hankkeessa tarkasteltiin kolmea maankäytön vaihtoehtoa, jotka sijoittuvat samaan maisemaan ja joilla on vaikutusta kasvihuonekaasutaseisiin, luonnon monimuotoisuuteen ja kansalaisten hyväksyntään: tuulivoima, metsänhoito ja metsäojitettujen soiden ennallistaminen.

Tämä synteisiraportti kokoaa yhteen hankkeen eri osatutkimukset, joiden tuloksista pääosa on julkaistu kansainvälisissä tieteellisissä vertaisarvioituissa julkaisusarjoissa.

2. Tavoitteet

LandUseZero-hankkeen päätavoitteena oli selvittää, kuinka tuulivoimaa, metsänhoitoa ja metsäojitettujen soiden ennallistamista voidaan sovittaa yhteen huomioiden päästövähennysvaikutukset, luonnon monimuotoisuus ja yleinen hyväksyttävyys.

Tarkemmat tavoitteet olivat:

- Tuottaa tietoa tuulivoiman päästövähennys- ja monimuotoisuusvaikutuksista sekä vaikutuksista metsien hiilivarastoihin ja -nieluihin.
- Kehittää menetelmiä tuulivoiman sijoittamiselle audiovisuaaliset häiriöt, metsämaise-
man suojausvaikutus ja monimuotoisuus huomioiden.
- Selvittää metsänkasvatusmenetelmien vaikutuksia metsien tuotantoon, moni-
muotoisuuteen ja hiilivarastoihin osana maankäytön toimenpiteitä.
- Tuottaa tietoa soiden ennallistamisen ilmastovaikutuksista sekä ennallistamiseen
vaikuttavista ohjauskeinoista osana maankäytön toimenpiteitä.
- Selvittää tuulivoiman, metsänhoidon ja soiden ennallistamisen yleistä hyväksyntää ja
siihen vaikuttavia taloudellisia ohjauskeinoja.

3. Tuulivoima päästöjen vähentäjänä ja aiheuttajana

3.1. Päästöjen vähentäminen

Tuulivoiman avulla voidaan vähentää energiantuotannon päästöjä. Tuulivoima korvaa fossiilisia polttoaineita, ja sen korvaavuus riippuu siitä, miten paljon mitäkin polttoainetta on käytössä silloin kun tuulivoimaa on saatavilla. Joskus polttoaineita korvataan naapurimaassa, eli tuulivoima vähentää sähkön tuontia tai lisää sähkön vientiä.

Tuulivoiman päästövaikutusta on aiemmin arvioitu sähköjärjestelmää simuloimalla: Suomelle tuulivoiman marginaalisen lisäyksen vaikutuksia on arvioitu julkaisussa Lindroos ym. (2021), ja kansainvälistä vertailua on raportoitu julkaisussa Holttinen ym. (2015). Niin kauan kuin sähkön- ja lämmöntuotannossa käytetään fossiilisia polttoaineita (hiiltä, kaasua, öljyä), tuulivoiman lisääminen vähentää päästöjä. Aiemmissa arvioissa vuosien 2000–2009 vähennyskerroin Suomelle oli luokkaa 550–700 gCO₂ /kWh tuulivoimalla tuotettua sähköä. Vuodelle 2020 kerroin oli luokkaa 200–300 gCO₂/kWh.

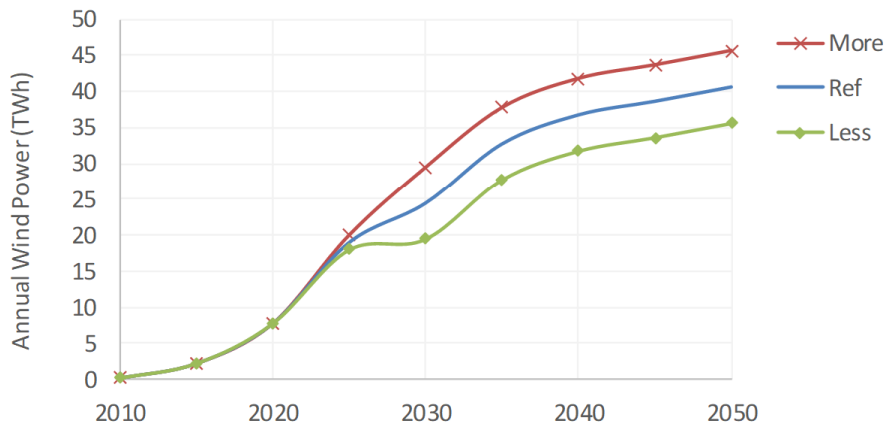
Mitä tapahtuu sitten, kun sähköntuotanto on päästötöntä? Suomessa sähköntuotannon päästöt ovat jo pienentyneet huomattavasti. Hiilineutraaliuden saavuttaminen vuonna 2035 tarkoittaisi arvioiden mukaan sähköntuotannon osalta jopa negatiivisia päästöjä, eli hiilen talteenottoa ja varastointia bioenergiasta jo 2030-luvulla (Koljonen ym. 2022). Mutta onko tuulivoiman marginaalinen päästövaikutus silloin 0 g CO₂/kWh? Tätä selvitettiin LandUseZero-hankkeessa mallintamalla koko Suomen ja Euroopan energijärjestelmää: sähkö, liikenne, lämpö ja teollisuus. Tutkimus julkaistiin tieteellisessä artikkelissa Holttinen ym. (2025).

3.1.1. Tuulivoiman päästövaikutusarvio Suomelle

Tuulivoiman marginaalista vaikutusta päästöihin arvioitiin TIMES-VTT-mallilla. Malli kattaa energiantuotannon, jalostuksen ja energian käytön kaikilla energiankäyttösektoreilla sekä kasvihuonekaasupäästöt ja niiden vähentämisen Suomen ja Euroopan energijärjestelmässä. Tässä työssä TIMES-VTT minimoi energijärjestelmän kokonaiskustannukset optimoimalla investointeja ja energian käyttöä vuosille 2025, 2030, 2035, 2040, 2045 ja 2050.

Skenaarioiden lähtökohtana käytettiin Sanna Marinin hallitusaikana laaditun kansallisen ilmasto- ja energiastrategian viiteskenaariota (WEM, With Existing Measures eli päätetyillä toimenpiteillä Koljonen ym., 2022). Hiilineutraaliutta koskevia tavoitteita ja päästörajoja koskevia tavoitteita ei asetettu mallin tavoitteiksi, vaan päästövähennykset toteutuivat markkinaehtoisesti, kun päästöoikeuksien hinta laitettiin nousemaan 80 euroon/tCO₂ vuonna 2050. Tämä johti huomattaviin päästövähennyksiin jo vertailuskenaariossa ("Ref" -skenaario). Suomen tuulivoimaa lisättiin vertailuskenaarioon 5 TWh/a "More" -skenaariossa ja poistettiin 5 TWh/a "Less" -skenaariossa. Sekä 5 TWh:n tuulivoimantuotannon lisäyksen ("More") että vähentymisen ("Less") marginaalivaikutus mallinnettiin vuosille 2030–2050 (Kuva 1). Malli uudelleenoptimoi kaikki investoinnit ja laitosten käytön jokaiselle vuodelle uuden tilanteen perusteella, jossa on lisätty tai vähennetty tuulivoimakapasiteettia Suomessa.

Tuulivoimaskenaarioiden vaikutukset arvioitiin vertaamalla tuloksia vertailuskenaarioon "Ref". Tuulienergian lisääminen "More"-skenaariossa vähentää päästöjä ja tuulivoiman vähentäminen "Less"-skenaariossa lisää päästöjä vertailuskenaarioon "Ref" verrattuna. 5 TWh tuulienergian päästöjen muutos voidaan laskea päästövaikutukseksi gCO₂/kWh.



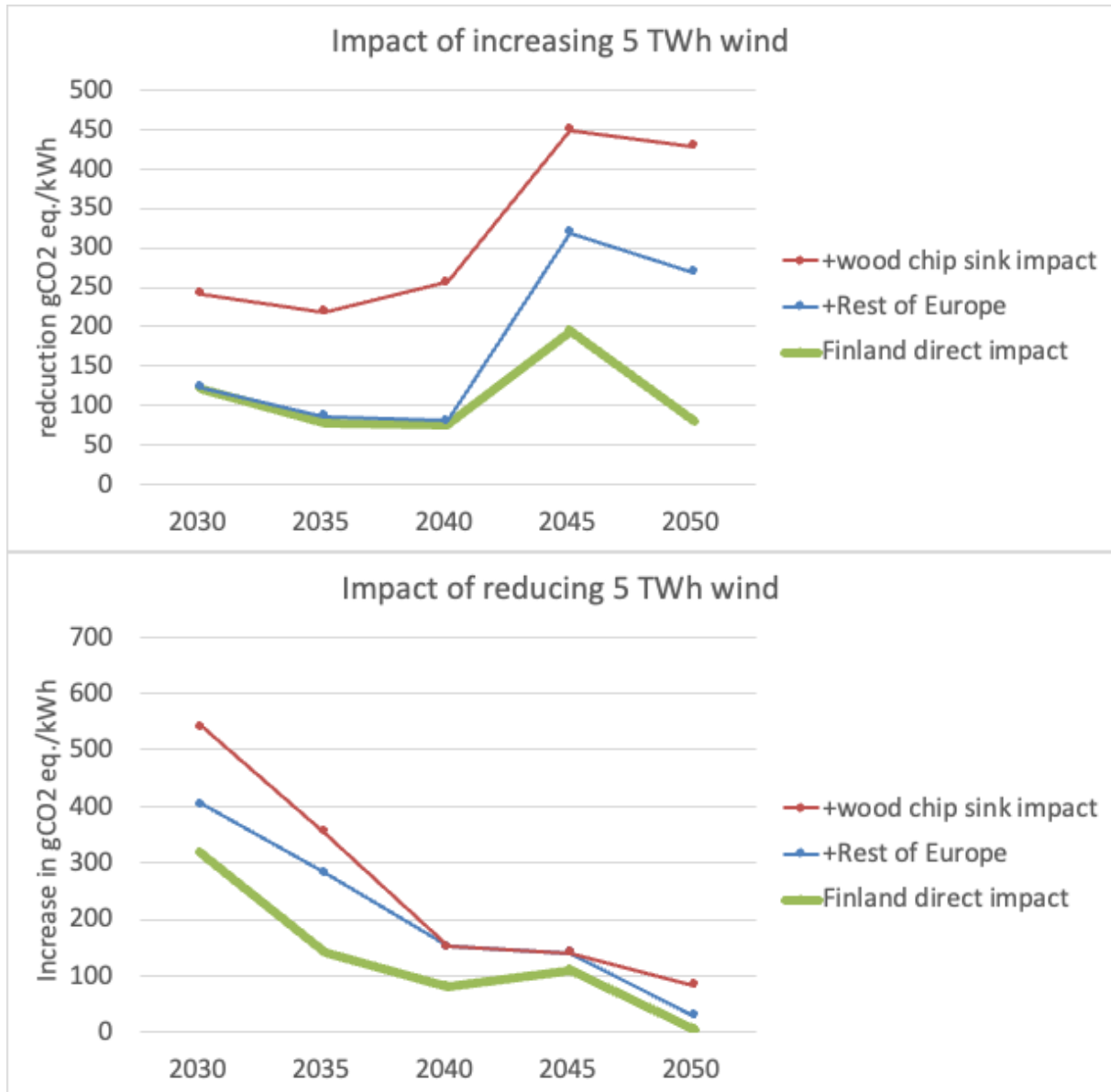
Kuva 1. Tuulienergia Suomessa mallinnetuissa skenaarioissa: tuulienergian lisäys (More), tuulivoiman vähennys (Less) ja vertailuskenaario ("Ref"). Tuulienergian marginaalinen päästövai-
kutus on arvioitu skenaarioiden eroista vuosille 2030, 2035, 2040, 2045 ja 2050.

Lisätuulivoimalla oli kolme päävaikutusta: i) polttoaineiden korvaaminen sähköntuotannossa Suomessa ja muualla Euroopassa, ii) sähköistymisvauhdin nopeutuminen sähkön marginaalisen hinnan alentamisen kautta sekä iii) bioenergian korvaaminen Suomessa lämmön ja polttoaineiden tuotannossa. Fossiilisten polttoaineiden korvausvaikutus sähköntuotannossa väheni kohti vuotta 2050, kun vertailuskenaariossa siirryttiin puhtaaseen sähköjärjestelmään. Vuoden 2030 jälkeen suurin vaikutus tuli loppukäyttösektoreiden sähköistämisestä ja neste-
mäisten biopolttoaineiden korvaamisesta vedyllä.

Vuotuinen sähkön siirto naapurimaihin pidettiin samana kuin vertailuskenaariossa, minkä vuoksi tuulienergian muutoksen vaikutukset näkyivät enimmäkseen Suomessa. Herkkyystar-
kasteluissa annettiin tuonin ja viennin muuttua tuulienergian vähentämisen yhteydessä skenaariossa "Less1", jolloin tuulivoiman päästösäästöt muualla Euroopassa näkyvät tuloksissa.

Vaikutukset kasviuonekaasujen päästöihin on esitetty erikseen Suomen (Finland direct im-
pact) ja muun Euroopan (Rest of Europe) osalta (Kuva 2). Tuulivoiman vähennysskenaarioita oli kaksi (Less1, Less2) joissa näkyy mikä vaikutus on sillä, kun rajoitetaan vaikutus vain Suo-
men energijärjestelmään: pitämällä sähkön vienti ja tuonti vuositasolla samana kuin refe-
rensiskenaariossa (More ja Less2) ja antamalla mallin optimoida sähkön tuonti ja vienti muu-
alle Eurooppaan (Less1).

Näiden mallitulosten lisäksi arvioitiin vaikutus metsänieluihin (wood chip sink impact) perus-
tuen hakkeen käytön muutoksiin. Tämä on karkea arvio käyttäen päästökerrointa puuhakkeen
käytölle, kun haketta poltetaan ja siihen sitoutunut hiili vapautuu. Päästökerrointa lasketta-
essa vertailuna oli se, että lähdepuu jätetään metsiin, joissa pieniläpimittainen runkopuu jat-
kaisi kasvuaan ja oksat ja kannot hajoaisivat. Liski ym. (2011) arvioi tälle päästövaikutukselle
Suomessa kertoimeksi 20–109 gCO₂eq/MJ. Vaihteluväli johtui eroista metsähakkeen lähde-
puussa, maantieteellisessä sijainnissa ja päästöjen tutkimuksessa aikakehyksessä. Käytimme laskel-
missa keskimääräistä kerrointa 55 gCO₂eq/MJ, koska TIMES-mallin tulokset eivät ole riittävän
yksityiskohtaisia eri metsähaketyypeille tai lähdepuun sijainnille Suomessa.



Kuva 2. Marginaalinen tuulivoiman päästövähennys, tulokset 5 TWh/a tuulienergian lisäämiselle ("More", yläkuva) ja vähentämiselle ("Less2", alakuva) Suomessa (Fin-Direct), Euroopassa (+Rest of Europe) ja mukaan lukien puuhakkeen käytön vähentämisestä tuleva vaikutus metsänieluihin (+wood chip sink impact).

Tulokset 5 TWh/a tuulienergian lisäämisestä ja vähentämisestä järjestelmässä eivät ole symmetrisiä ("More"- ja "Less2"-skenaariot, Kuva 2). Tämä johtuu vertailuskenaariosta, johon sisältyy suhteellisen lievä sähköistyminen. Tuulivoiman lisääminen ("More") mahdollistaa enemmän sähköistymistä, mutta sähköistyksen vähentämiseen ei ole paljon varaa tuulivoiman vähentyessä ("Less" skenaariot). Toisaalta tuulivoiman vähentäminen ("Less") mahdollistaa korvaavan lisätuotannon fossiililla, kun taas tuulivoiman lisääminen ei vähennä fossiilisia polttoaineita, ellei niitä ole vertailuskenaariossa ("More"). Arviot päästövähennysvaikutuksista eri skenaarioille ja vuosille on esitetty Taulukossa 1.

Taulukko 1. Kasvihuonekaasujen päästövähennysarviot tuulienergialle Suomessa, gCO₂eq/kWh tuotettua tuulienergiaa kohden. Suluissa lisävaikutus metsänielujen kautta, kun säästyy puuhaketta.

gCO ₂ eq/ kWh	2030	2035	2040	2045	2050	Average 2030-2050
More = 5 TWh/a lisäys	120 (+120=240)	90 (+130 =220)	80 (+170=260)	320 (+130=450)	270 (+160=430)	180 (+140=320)
Less 2 = 5 TWh/a vähennys	400 (+140=540)	280 (+70=350)	150 (+0=150)	140 (+0=140)	30 (+50=80)	230 (+20=250)
Less 1 = Suomi + Eurooppa	560 (+50=610)	380 (+40=420)	190 (+0=190)	50 (+0=50)	20 (+0=20)	240 (+20= 260)

Kuten Kuva 2 ja Taulukko 1 osoittavat, mallinnus antaa hyvinkin erilaisia tuloksia eri vuosille. "Less" -skenaarioissa nähdään vaikutuksia sähkön tuotannossa, ja "More" -skenaariossa nähdään vaikutuksia sähköistymisen kautta muilla energiasektoreilla.

Keskimäärin tuulivoiman päästöjä vähentävä vaikutus on 230–240 gCO₂eq/kWh, ja jos otetaan huomioon mahdollisuus vähentää puuhakkeen käytön vaikutusta metsänieluihin, päästöjä vähentävä vaikutus on 250–260 gCO₂eq/kWh.

Johtopäätöksiä tuloksista (ks. myös Holttinen ym. 2025):

- Sähköistytyn vaikutuksen sisällyttäminen arvioihin antaa suuremman päästösäästön tuulienergialle. Tämä näkyy "More"-skenaarion tuloksissa vuosille 2045–2050 lähes 300 gCO₂eq/kWh (tai 450 gCO₂eq/kWh, kun huomioidaan vaikutus metsänieluihin).
- Päästöjen vähennys sähköntuotannossa on aluksi suurempi (400 gCO₂eq/kWh) ja laskee alle 50 gCO₂eq/kWh vuonna 2050. Tämä näkyy "Less" skenaarioiden tuloksissa vuosille 2030–2035. Euroopan laajuiset tulokset ("Less1") osoittavat enemmän vaikutusta vuosille 2030-2040, mutta väheneminen tapahtuu nopeammin vuosina 2045–2050.
- Tuulivoiman on vaikutus metsänielujen pienenemiseen silloin kun tuulivoima korvaa haketta. Laskelmissa käytetyllä arvioidulla sakolla saadut tulokset näkyvät suluissa Taulukossa 1. Metsänielujen pienenemisen vaikutus on hyvin alhainen "Less1"-skenaariossa, joka mahdollistaa päästösäästöt Suomen ulkopuolella.

3.1.2. Johtopäätökset tuulivoiman päästövähennysvaikutuksista

Tuulivoiman päästövähennysvaikutusten arviointi on mahdollista mallisimulaatioiden avulla ainoastaan tietylle aikavälille ja verrattuna vertailuskenaarioon, toisin sanoen marginaaliselle hyödyille. Rakennetulla tuulivoimalla on päästövähennyskyötyä koko elinikänsä ajan, joka on uusille voimaloille noin 30 vuotta. Kumulatiivisen hyödyn arvioiminen tuleville vuosille, tietyn vuoden marginaalisen hyödyn lisäksi, on haastavaa. Ensimmäiset arviot tuulivoiman hyödyistä tehtiin, kun tuulivoimaa oli Suomessa hyvin vähän, ja silloin lisätuulivoiman (marginaalinen) hyöty oli hyvin lähellä koko kapasiteetin kumulatiivista hyötyä.

Tässä tutkimuksessa jokaisena tarkasteluvuotena arvioitiin jo lähtötilanteessa olevan paljon tuulivoimaa järjestelmässä. Vertailuskenaariossa olevan tuulienergiamäärän päästösäästöä ei ole arvioitu, ainoastaan lisätuulivoiman. Jos vertailuskenaarioksi ottaisi hypoteettisen tilanteen, jossa tuulivoimaa ei olisi rakennettu yhtään, vaan olisi jatkettu sähkön tuottamista hiilellä ja kaasulla, saataisiin suurempi hyöty kaikelle Suomeen rakennetulle tuulienergialle. Käytännössä tällaista hypoteettista vertailuskenaariota on hyvin vaikea, ellei mahdoton rakentaa.

Hiilineutraaliuden saavuttamisen jälkeen päästövähennysvaikutuksen arviointi energian korvaamisen kautta tulee käytännössä merkityksettömäksi. Päästöjen vähentäminen tietyn teknologian osalta ei ole olennainen kysymys, koska on tärkeämpää ymmärtää, kuinka saavuttaa halutut hiilibudjetit kustannustehokkaasti ja varmasti, osana ympäristötavoitteita ja maankäytön vaikutuksia. Kohti hiilineutraalia, tai jopa hiilnegatiivista tulevaisuutta on entistä tärkeämpää laskea laajempi valikoima taloudellisia, ympäristöllisiä ja sosiaalisia vaikutuksia pelkkien päästövähennysten sijaan.

3.2. Päästöjen aiheuttaminen

3.2.1. Tuulivoiman elinkaaren aikaiset päästöt

Tuulivoiman elinkaaren, eli keskimäärin 30 vuoden aikana tuotetun sähkön määrä on suuri verrattuna tuulivoiman rakentamiseen ja käyttöön tarvittavaan energiaan. Tämän osoittaa mm. elinkaaritehokkuus investointien energian tuotolle (energy return on investment EROI), joka on arvioitu olevan luokkaa 25 (Kubiszewski ym. 2010 meta-analyysi).

Tuulivoimateknologian elinkaaren aikaiset, eli rakentamisen ja käytön aikaiset kasvihuonekaasupäästöt on arvioitu useissa julkaisuissa, joista viimeaikaiset, nykYTEknologiaa vastaavat arviot ovat 5–7 gCO₂eq/kWh (Chipindula ym. 2018, Vestas 2022). Päästöjen vähäisyys johtuu muun muassa siitä, että suuri osa materiaaleista kierrätetään turbiinien elinkaaren lopussa. Päästöt ovat myös pienet verrattuna tuulivoiman arvioituun päästöjä vähentävään korvausvaikutukseen. Tämän on arvioitu olevan vuosina 2030–2050 rakennetulle tuulivoimalle keskimäärin 230–260 gCO₂eq/kWh (ks. Luku 3.1.1).

Tuulivoimaloista aiheutuvien päästöjen lisäksi erityisesti Suomen tapauksessa on kuitenkin syytä arvioida myös tuulivoiman rakentamisen ja käytön vaikutukset metsäkatoon ja sitä kautta muutoksiin metsien hiilivarastossa ja -nieluissa. Tuulivoimaa rakennetaan yleisesti metsäiseen maastoon, ja metsäkadolla voi olla merkittäviä vaikutuksia hiilitaseisiin.

3.2.2. Tuulivoiman maankäyttövaikutukset arvioiden pohjana

Tuulivoiman vaatima pinta-ala on pohjana arvioille, kuinka suureksi sen maankäytöstä ja metsäkadosta aiheutuvat päästöt tulevat. Tuulivoimalaitokset eli tuulipuistot koostuvat yksittäisistä tuuliturbiineista, jotka vaativat kokoonpanoa varten jokaisen turbiinin viereen asennusalueen, sekä voimalaitosalueelle sähköaseman ja tiet, joiden varrelle yleensä myös rakennetaan tuulivoimalaitoksen sisäinen sähköverkko. Lisäksi sähköasemalta rakennetaan yleensä ilmajohtona sähköverkkoliitäntää varten siirtolinja lähimpään keski- tai suurjänniteverkkoon, ja alueelle voi joutua rakentamaan uutta tietä.

Tilantarve arvioitiin 6,6 MW kokoisille turbiineille niin, että etäisyys niiden välillä on 0,9 km. Tämä on noin 5,3 kertaa roottorin halkaisija (170 m) ja tarkoittaa sitä, että tuulivoimaa

tuotetaan 8,15 MW/km². Jos esimerkiksi rakennetaan 18 turbiinin tuulipuisto (118,8 MW), koko voimalaitosalue on 13,2 km², ja tuulivoimaloiden tilantarve on:

- Turbiinit ja asennusalueet: Jokaista turbiinia varten tehdään pystytystä varten tasattu sorakenttä (50 m x 80 m), ja tältä alueelta täytyy kaataa puut. Asennusalue on pidettävä puuttomana myös käytön aikana mahdollisten nosturia vaativien korjausten varalta. Jos esimerkiksi rakennetaan 18 turbiinin tuulipuisto (118,8 MW), tästä itse turbiinit asennusalueineen vievät 0,072 km² (0,6 % voimalaitosalueen pinta-alasta).
- Voimalaitosalueen huoltotiet ovat noin 22 m leveitä (6 m leveä tie ja ojat), ja samaa tilaa voi käyttää voimalaitoksen sisäiseen sähkönsiirtoverkkoon. Tietä tulee 18 turbiinin tuulipuistoon 16,35 km, joka vie yhteensä 0,36 km² (2,7% voimalaitosalueen pinta-alasta).
- Sähköaseman tilantarve on 40 mx70 m (0,0028 km²)
- Yhteensä turbiinit, tiet ja sähköasema vievät 0,43 km² eli 3,3 % koko voimalaitosalueen pinta-alasta.

Lisäksi tulee 110 kV sähkön siirtolinja lähimpään keski- tai suurjänniteverkkoon. Täysin puuttomaksi menee 30 m levyinen johtokatu (lähde: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kunnossapito/voimajohdot/johtoalue/>). Jos esimerkkipuistolle tarvittaisiin 10 km sähkölinjaa, tästä tulisi 0,3 km² puuton alue (tämä vastaa 2,3 % tuulipuiston pinta-alasta). Pidempi sähkölinja siis voi yli kaksinkertaistaa alueen, jolta puut täytyy kaataa.

Seuraavissa luvuissa tarkastellaan tuulivoiman päästövaikutuksia käyttämällä pilottialueena lin kuntaa.

3.3. Tuulivoiman sijoittaminen metsien hiilitaseiden ja talouden näkökulmasta lin kunnassa

3.3.1. Tuulivoimatuotannon potentiaaliset alueet

Tuulivoiman rakentamisessa voidaan priorisoida metsien hiilivarastojen ja -nielujen säilyttämisen näkökohtia ja toisaalta talousnäkökohtia. Lin kunnan aluetta käytettiin esimerkkinä näiden priorisointivaihtoehtojen vertailuun.

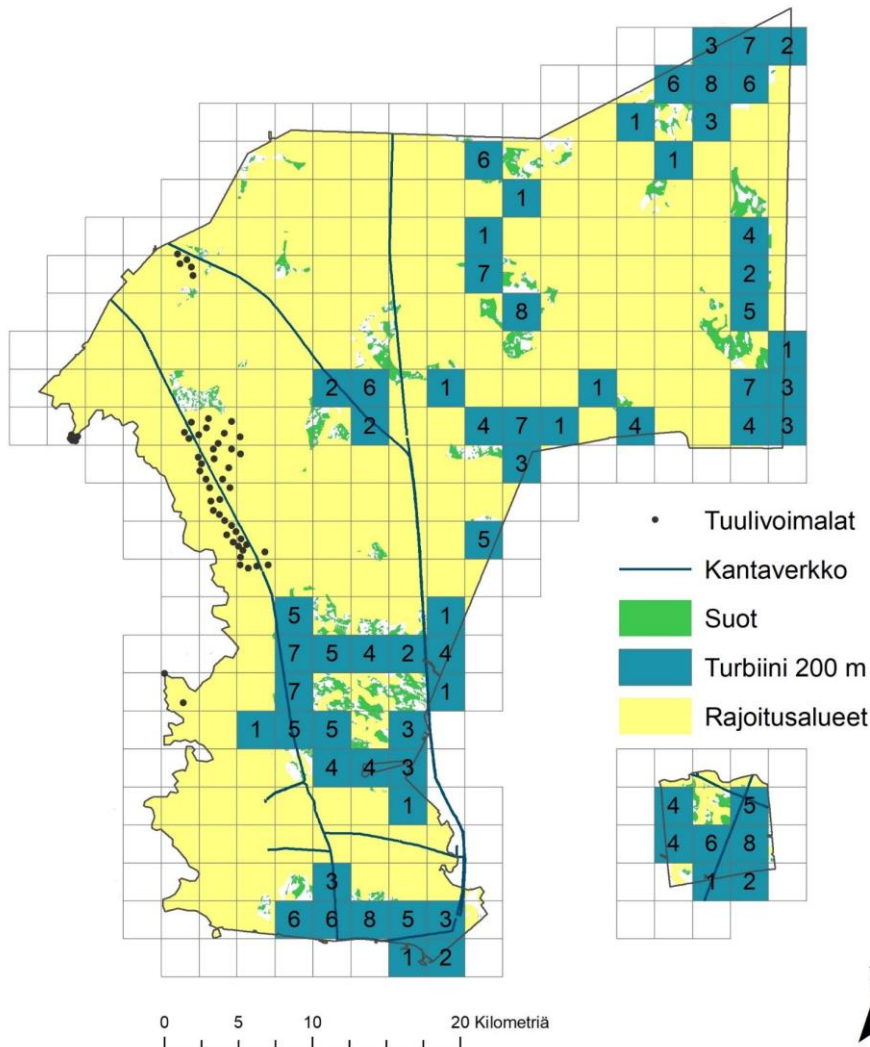
Lin kunnassa on jo vuoden 2023 lopussa ollut toiminnassa viisi tuulipuistoa (56 turbiinia, yhteensä 137 MW). Uusien tuulivoimaloiden sijoituspaikkojen alueellinen soveltuvuusanalyysi tehtiin ottaen huomioon maankäytön rajoitukset, turvaetäisyydet ja tuulivoiman tilantarve.

Vertailuturbiinina käytettiin Siemens-Gamesa SG-6.6 170 -mallia, jonka kapasiteetti on 6,6 MW, napakorkeus 200 m ja roottorin halkaisija 170 m. Maankäytön suojaetäisyydet, eli alueet, joille turbiineja ei voida sijoittaa, arvioitiin sekä 200 m korkeille turbiineille (Taulukko 6). Myös vesialueet rajattiin sopimattomiksi turbiinien sijoittamiselle.

Analyysi perustui ruudukkoon, joka kattaa lin kunnan alueen. Ruudun koko 2570 x 2570 m määritettiin siten, että siihen sopisi 9 tuuliturbiinia tasavälein sijoitettuna. Koko kunnan alueille saatiin näin 354 ruutua. Kunkin ruudun sisällä laskettiin soiden peittävyys: jos soiden

pinta-ala ylitti 50 % kokonaispinta-alasta, ruutu määritettiin turbiinien rakentamiseen soveltu-
mattomaksi. Suojaetäisyydeksi asuinrakennuksiin määritettiin 2 km ja vapaa-ajan asuntoihin
1.3 km. Jokaiseen ruutuun sopivien turbiinien määrä perustui siihen pinta-alaan, joka ei ole
maankäyttörajoitusten sekä suojaetäisyyksien piirissä (Taulukko 6).

Edellä mainittujen rajoitusten, eli maankäytön rajoitusten ja suojaetäisyyksien, vesialueiden ja
soiden jälkeen tuulivoimalle soveltuvia ruudukoita oli 65 kpl, joihin voisi rakentaa 200 m kor-
keita turbiineita 251 kappaletta (Kuva 3).



Kuva 3. lin kunta ja potentiaaliset alueet uusille tuuliturbiineille huomioiden maankäytön ra-
joitukset ja suojaetäisyydet (Taulukko 6), vesialueet ja suot. Numero ruudussa kertoo kuinka
monta tuuliturbiinia siihen enimmillään voisi rakentaa.

3.3.2. Metsäkadon ja sen päästövaikutusten arviointi

Metsien raivaamista tuulivoimalle kutsutaan tässä raportissa metsäkadoksi. Siinä menetetään
alueella kasvavan puuston hiilivarasto, vaikutetaan maaperän hiilivaraston kehitykseen, sekä
menetetään mahdollisuus sitoa hiiltä alueen metsään tulevaisuudessa (Peltoniemi ym. 2023).

Jokaiselle Kuvan 3 rasteriruudulle arvioitiin hiilivarasto ja keskimääräinen puuston vuosittainen kasvu keskiarvona rasteriruudun sisälle jäävistä metsäkuvioista. Puuston kehityksen arviointi SIMO-simulaatioiden avulla on kuvattu Luvussa 6. Pysty- ja maapuun hiilivaraston (tn C/ha) arvioitiin olevan 50 % kuivabiomassasta. Sähköverkkoon liittämistä aiheutuvalla metsäkadolla, joka tulee liitännäjohtoon alle jäävän johtokadun puustosta, käytettiin karkeaa arviota perustuen rasteriruudun hiilivarastoon ja puuston vuotuisen kasvuun. Johtokadun alle jäävän metsän tietoja ei siis tässä kohtaa laskettu tarkasti.

lin alueella tuulivoimalle soveltuvien alueiden etäisyys sähköverkkoon on keskimäärin 7 km (suurimmillaan 26 km). Alueet voivat myös hyödyntää yhteistä sähköverkkoliitännää, eli jokaiseen ruudukkoon ei ole arvioitu sähköverkon vaikutusta erikseen, mikäli lähellä on soveltuvia alueita.

Turbiinien aiheuttama metsäkato arvioitiin seuraavasti:

- Rakennustöiden jälkeen jokaisen 6,6 MW turbiinin kohdalle arvioitiin jäävän puuttomaksi alue, joka on suuruudeltaan noin 400 m², eli 0,4 ha (50x80m alue jokaisen turbiinin kohdalla sekä sähköasema). Turbiinien alta kaadetaan metsää jonkin verran enemmän rakennusaikana, mutta näiden alueiden metsänhoito jää ennalleen rakennustöiden jälkeen, eikä näitä alueita sen vuoksi huomioitu.
- Teiden rakentamisen arvioitiin lisäävän metsäkatoa enintään 2 ha/turbiini. lin alueella on paljon metsäteitä jo olemassa, joten arvioimme että teiden rakentaminen lisää metsäkatoa vain 0,8 ha/turbiini.
- Laskelmien mukaan metsäkato on siis 1,2 ha turbiinia kohden lin alueella (Taulukko 2).

Verkkoliitäntä lisää metsäkatoa seuraavasti:

- Verkkoliitäntä tuo 30 m leveän johtokadun lähimpään siirtolinjaan, kun arvio tehdään yleisimmin käytössä olevalle 110 kV siirtolinjalle. Useampi tuulivoimalaitos voi käyttää samaa sähkösiirtolinjaa.
- Kun verkkoliitäntä otettiin huomioon, lin alueen potentiaalisten turbiinipaikkojen metsäkato kasvoi 0,3-5,4 ha/turbiini, keskimäärin 1,6 ha/turbiini.
- Siten, turbiinien ja verkkoliitännän yhteisesti aiheuttama metsäkato on 1,5-6,6 hehtaaria, keskimäärin 2,8 hehtaaria / turbiini (Taulukko 2).

Metsäkadon vaikutukset puuston hiilivarastoon arvioitiin seuraavasti:

- lin sijoituspaikkojen metsätiedoilla 1,2 hehtaarin metsäkatoa vastaava hiilivarasto on 25–32 tC/turbiini, keskiarvon ollessa 30 t/turbiini (Taulukko 2).
- Kun laskentoihin lisättiin verkkoliitännän aiheuttama metsäkato, tuli hiilivaraston menetykseksi 36–178 tC/turbiini, keskimäärin 69 tC/turbiini (Taulukko 2).
- Verkon rakentamisen vuoksi kaadettava metsä muodostaa siten merkittävän osan tuulivoiman päästövaikutuksista

Puuston hiilivaraston menetys turbiinien 30 vuoden elinkaaren aikana arvioitiin seuraavasti:

*Puuston hiilivaraston menetys $tCO_2 / (30a * \text{turbiinin tuottama vuosienenergia GWh/a})$*

- Alueen puuston runkotilavuudet muunnettiin biomassaksi laajennuskertoimen avulla (Lehtonen ym. 2004, Muhonen 2024). Biomassasta 50% arvioitiin olevan hiiltä, ja se muunnettiin CO_2 :ksi hiilen ja CO_2 :n molekyylipainojen välisellä suhdeluvulla 44/12 eli $3,67 tCO_2eq / tC$.
- Menetettyä hiilivarastoa 25-32 tC/turbiini vastaava päästövaikutus oli siten 92–117 $tCO_2eq/turbiini$.
- 6,6 MW turbiini tuottaa lin alueella noin 22,0–23,5 GWh vuodessa, 30 vuoden ajan. Tästä saadaan päästövaikutukseksi tuotettua sähköä kohti keskimäärin 0,16 tCO_2eq/GWh (0,14-0,18 tCO_2eq/GWh), (Taulukko 2).
- Kun laskelmissa huomioitiin sähköverkkoliitäntä, turbiinit vähentävät puuston hiilivarastoa lin alueella 36–178 tC/turbiini. Tästä saadaan päästövaikutukseksi 131–654 $tCO_2eq/turbiini$. Suhteuttamalla tämä 30 vuoden tuulivoimatuotantoon saadaan tuulivoiman kokonaispäästövaikutukseksi keskimäärin 0,37 tCO_2eq/GWh (0,20–0,94 tCO_2eq/GWh), (Taulukko 2).

On huomioitavaa, että aurinkovoimalle vastaava arvio 30 vuodelle, ilman sähköverkkoliitintä, tuotti kahdelle esimerkkihankkeelle tulokseksi 5,5 ja 8,4 tCO_2eq/GWh (Ks. Muhonen 2024 julkaisussa Kuvat 8 ja 9). Näiden esimerkkien perusteella aurinkovoiman päästövaikutus menetetyn puuston hiilivaraston johdosta voi olla 6-42-kertainen tuulivoimaan verrattuna, vaikka huomioitaisiin tuulivoiman kohdalla verkkoliitäntä.

Hakatun puuston menetetty nieluvaikutus arvioitiin seuraavasti:

*Metsän vuosittainen kasvu m^3/ha , $a * 1 tCO_2eq/m^3 * \text{tuulivoiman alta kaadettu puusto } ha/voimala / \text{voimalan tuottama energia GWh/voimala, } a$*

Metsän vuosittaisen kasvuennusteen pohjalta arvioitiin päästövaikutus, joka johtuu siitä, että kaadettu metsä ei ole tuuliturbiinien alueella kasvamassa ja sitomassa hiiltä. Arvioinneissa ei huomioitu puuston tulevien kiertoaikojen hakkuita, jotka olisivat jossain määrin pienentäneet tulevia metsänieluja ja siten tuulivoiman vaikutusta metsänielujen menetykseen. Metsän vuosittainen kasvu ja hiilen sidonta vaihtelee eri-ikäisen puuston mukaan. Tässä käytettiin keskimääräisiä arvoja tuulivoiman eliniän, eli 30 vuoden ajalle.

- Lin potentiaalisten sijoituspaikkojen alueilla metsän kasvu on keskimäärin $2,3 m^3/ha$ vuodessa (keskimäärin $1,9-2,7 m^3/ha$ vuodessa eri sijoituspaikoissa) (SIMO simulaatiot, ks. Luku 6).
- Suomessa $1 m^3$ kasvu absorboi noin $1 tCO_2eq$ vuodessa (esim. [metsakeskus.fi](https://www.metsakeskus.fi)).
- Jos vain turbiinien suora metsäkatovaikutus ($1,2 ha/turbiini$) huomioitiin, metsänielun menetykseksi saatiin keskimäärin $2,8 tCO_2eq/turbiini/vuosi$ ($2,3-3,2 tCO_2eq/turbiini/vuosi$). Tämä on tuulienergiatuotantoa kohti laskettuna keskimäärin $0,12 tCO_2eq/GWh$ ($0,10-0,15 tCO_2eq/GWh$).

- Kun myös sähköverkon rakentamisen vaikutus huomioitiin (keskimäärin 2,8 ha/turbiini, 1,5–6,6 ha/turbiini), metsänielun menetykseksi saatiin keskimäärin 6,2 tCO₂eq/turbiini (3,5–15,1 tCO₂eq/turbiini/vuosi). Tämä on tuulienergian tuotantoa kohti keskimäärin 0,27 tCO₂eq/GWh (0,16–0,65 tCO₂eq/GWh).

Metsäkadon vaikutus metsien hiilitaseisiin (puuston hiilivarasto ja menetetty nielu laskettu yhteen):

- lin alueella keskimäärin 0,3 tCO₂eq/GWh kun voimaloiden alta kaadettu puusto huomioidaan (0,2–0,3 tCO₂eq/GWh).
- lin alueella sähköverkkoliitäntä huomioiden keskimäärin 0,6 tCO₂eq/GWh (0,4–1,6 tCO₂eq/GWh).

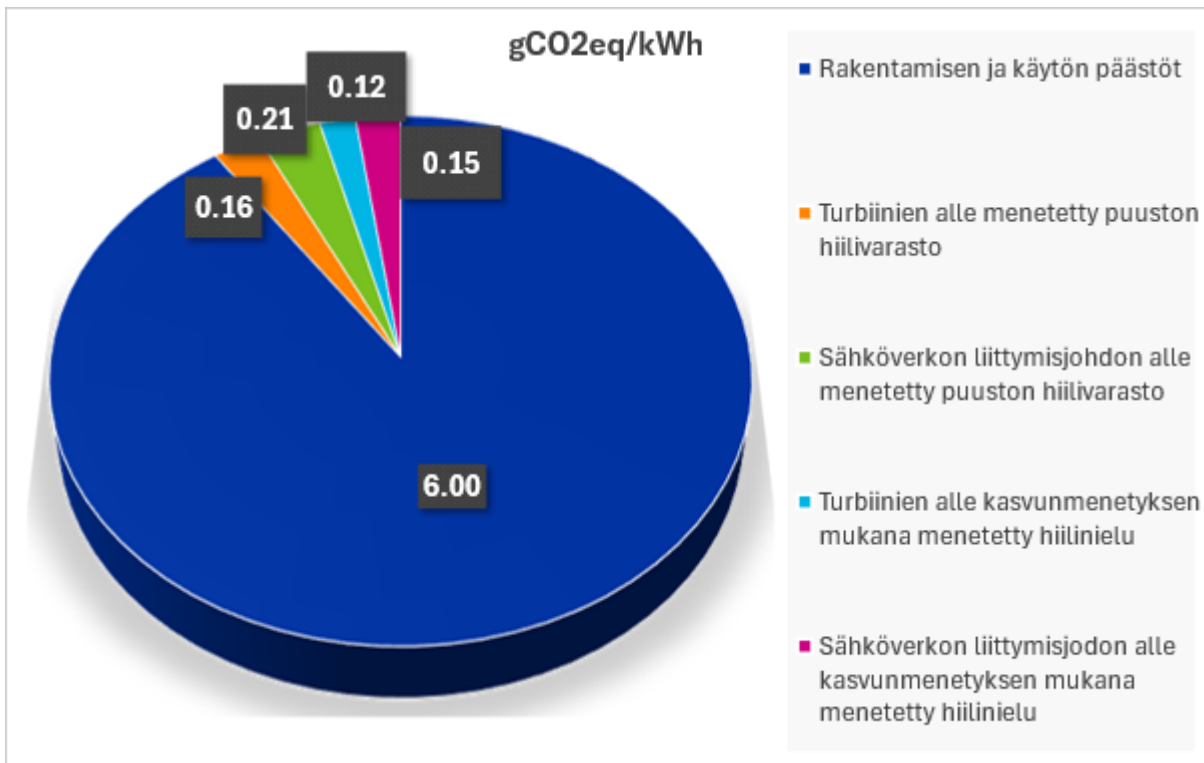
Metsäkadon aiheuttama vaikutus puuston hiilivarastoihin ja -nieluihin (eli tässä raportissa metsien hiilitaseisiin), lisää siten hyvin vähän tuulivoiman rakentamisen aiheuttamia elinkaari-päästöjä, jotka ovat noin 5–7 gCO₂eq/kWh (keskiarvo 6 gCO₂eq/kWh, Luku 3.2.1) (tonnia/GWh vastaa yksikköä g/kWh). Lisäksi ne ovat pieniä verrattuna tuulivoimalle arvioituun päästövähennysvaikutukseen (Luku 3.1.1.; keskimäärin 230–260 gCO₂eq/kWh vuosille 2030–2050).

Taulukko 2. Yhteenveto metsäkadon aiheuttamista keskimääräisistä muutoksista puuston hiilivarastoissa ja -nieluissa lin kunnassa (suluissa vaihteluväli eri sijoituspaikoille lin alueella). Vaikutukset on laskettu voimalaitoksen välittömälle alueelle (1,2 hehtaaria per turbiini) sekä voimalan ja verkkoliitännän alta yhteensä poistuneelle alueelle (keskimäärin 2,8 hehtaaria per turbiini).

Muuttuja.	Turbiini	Turbiini + verkkoliitäntä
Metsäkato (ha)	1,2	2,8 (1,5–6,6)
Puuston hiilivaraston menetys (tC/turbiini)	30 (25–32)	69 (36–178)
Tuulivoiman aiheuttaman hiilivaraston menetyksen päästövaikutus / tuulienergiatuotanto 30 vuoden elinkaaren aikana (tCO ₂ ekv/GWh)	0,16 (0,14–0,18)	0,37 (0,20–0,94)
Puuston kasvun menetys (m ³ /turbiini/vuosi)	2,8 (2,3–3,2)	6,2 (3,5–15,1)
Puuston hiilinielun menetys tuulienergiatuotantoa kohti (tCO ₂ eq/GWh)	0,12 (0,10–0,15)	0,27 (0,16–0,65)
Tuulivoiman aiheuttama vaikutus metsien hiilitaseisiin (tCO ₂ eq/GWh)	0,3 (0,2–0,3)	0,6 (0,4–1,6)

Luken Aurinkometsä-hankkeessa päästövaikutuksia arvioitiin puuston lisäksi myös maaperään, erityisesti soiselle maastolle (Muhonen 2024). lin tapauksessa, tuulivoiman kohdistuessa erityisesti kivennäismaille, vaikutus on todennäköisesti pienempi. Lisäksi Aurinkometsä-hankkeessa arvioitiin myös hiilivuotovaikutusta, kun metsähakkuut siirtyvät toiselle alueelle, mitä ei tässä tutkimuksessa tehty.

Kuva 4 havainnollistaa, että lin esimerkkitapauksessa pääosa (noin 90 %) tuulivoiman päästövaikutuksista aiheutuu 30 vuoden elinkaaren aikaisista rakentamisen aiheuttamista päästöistä.



Kuva 4. Tuulivoiman vaikutus päästöihin metsäkadon seurauksena (luvut Taulukosta 2) verrattuna 30 vuoden elinkaaren aikaisiin rakentamisen aiheuttamiin päästöihin (elinkaarianalyysiarvio kirjallisuudesta, ks. Luku 3.1.1).

3.3.3. Tuulivoimalle parhaat alueet taloudellisesta näkökulmasta

Tuulivoiman tuotantopotentiaalia koskevat tiedot laskettiin 200 metrin napakorkeuksille 3 kilometrin tarkkuudella olevasta New European Wind Atlas (NEWA) -rasteriaineistosta. Laskennassa arvioitiin varjostusvaikutuksen ja teknisen käytettävyyden aiheuttavan yhteensä 10 % tuotantotappion. Lisäksi otettiin huomioon jäätämisestä aiheutuvat tuotantomenetykset jokaiselle sijoituspaikalle (Rissanen & Lehtomäki 2015). Arvioissa käytettiin 200 m tornin korkeutta Euroopan tuuliatlaksen tiedoissa. Tämä on korkeampi kuin nykyiset turbiinit (150–160 m) ja antaa vastaavasti suuremmat tuotantoluvut. Korkeampi tornikorkeus on huomioitu kustannuslaskelmissa.

Tuulivoimalaitoskustannuksille käytettiin seuraavia oletuksia, perustuen NREL arvioihin tulevaisuuden tuulivoimakustannuksille <https://atb.nrel.gov>:

- Investointikustannukset (CAPEX): 1 000 €/kW. Tämä luku sisältää keskimääräiset tie- ja sähköliityntäkustannukset. Kustannusarvio on tehty ennen viimeisintä inflaation ja energiakriisin aiheuttamaa kustannusnousua. Lukua käytettiin, vaikka lisäteiden rakennustarve lin alueella on hyvin pieni kattavan metsätieverkoston ansiosta, ja lukuun lisättiin sähköverkkoon liittymiskustannukset 110 kV sähköliityntäjohtolle 250 000 €/km (lähimmältä 110, 220 tai 400 kV linjalta). Tämä kustannus on yhteinen viereisille rasteriruuduille: turbiinien ryhmittely huomioitiin liittymiskustannusta kohdennettaessa.

- Investointikustannuksiin lisättiin korkeamman tornin kustannus 600 000 € (Napa-korkeus 200 m lisäkustannus verrattuna 150 m korkeaan torniin arvioitiin 50 m x 10 000 €/m + 100 000 €).
- Käyttökustannukset (OPEX): 40 €/kW/vuosi.
- Investoinnin koon vaikutus eli skaalausvaikutus: kustannussäästöksi suuremmille tuulivoimalaitoksille (eli tuulipuistoille) käytettiin arviona:
 - 10–14 turbiinin tuulivoimalaitoksella arvioitiin yllä arvioidut kustannukset
 - 5–9 turbiinin tuulipuistoille arvioitiin 5 % korkeammat kustannukset
 - 15–20 turbiinin puistoille 5 % alhaisemmat kustannukset
 - yli 20 turbiinin tuulipuistoille 10 % alhaisemmat kustannukset.

Tuulivoiman tuotantokustannukset (Levelized cost of energy LCOE) laskettiin rasteriruuduille summaamalla vuotuiset kustannukset investoinnista (CAPEX kertaa annuiteettikerroin) ja käytöstä (OPEX) ja jakamalla nämä arvioidulla keskimääräisellä vuosituotannolla. Annuiteettikerroinena käytettiin 7.1 % (25 vuoden takaisinmaksuaika 5 % korolla).

Tuotantokustannus laskettiin ensin jokaiselle rasteriruudulle erikseen, ilman verkkoliitännän kustannuksia. Lisäksi arvioitiin verkkoliitännän (110/220/400 kV) kustannusten vaikutus.

Potentiaalisista tuulivoima-alueista valittiin tuotantokustannuksiltaan edullisimmat paikat 120 turbiinille. Tässä huomioitiin sähköverkkoon liittämiskustannukset (etäisyys sähköverkosta).

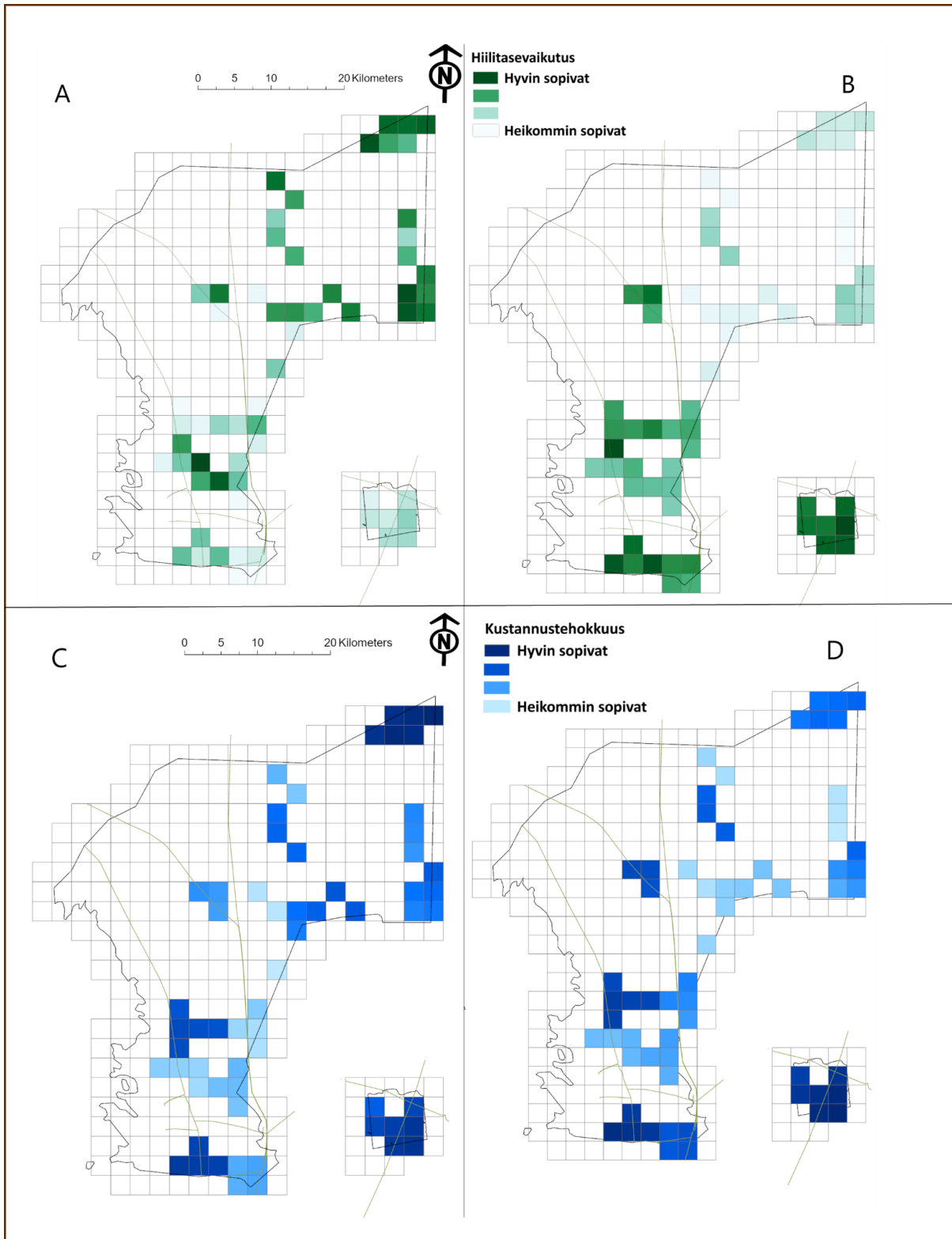
3.3.4. Tuulivoiman sijoittamisen yhteistarkastelu hiilitase- ja talousnäkökulmista

Luvussa 3.3.1. (Kuva 3) arvioidut sijoituspaikat esitetään kuvissa 5A ja B hiilitasevaikutuksen perusteella, käyttäen Taulukon 2 arvioita tuulivoiman aiheuttaman metsäkadon vaikutuksista hiilivarastoihin ja -nieluihin. Kuvat 5C ja D esittävät kaikki potentiaaliset sijoituspaikat kustannusnäkökulmasta ilman verkkoliitännää (5C) ja verkkoliitännä huomioiden (5D).

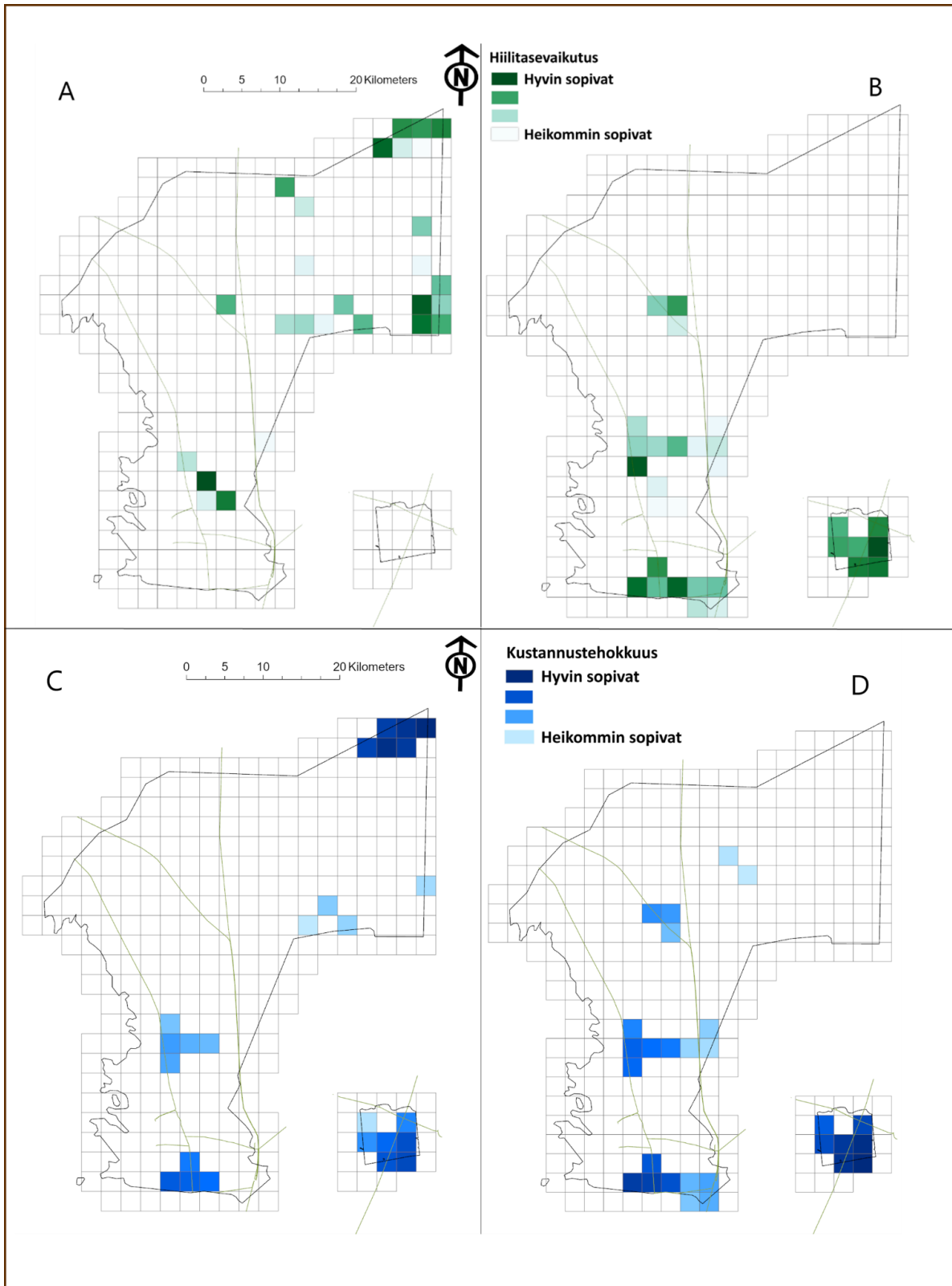
Tuulivoiman potentiaaliset paikat priorisoitiin lisäksi 120 turbiinille siten, että tuulivoiman hiilitasevaikutus olisi niissä mahdollisimman pieni (Kuvat 6A ja B) ja toisaalta siten, että kustannukset olisivat mahdollisimman vähäiset (Kuvat 6C ja D).

Kuvat 5B ja C osoittavat, että kun verkkoliitännää ei huomioitu, tuulivoiman kannalta parhaat paikat sijoittuivat eri kohteisiin. Jos taas verkkoliitännän vaikutus otettiin huomioon, sekä metsäkadon minimointi että kustannustehokkuus ohjasivat rakentamaan lähemmäksi jo olemassa olevaa sähköverkkoa, ja näin ollen parhaat paikat olivat suurelta osin samat (Kuva 6B ja D).

Syynä tähän on, että kauempana sähkön siirtoverkoista joutuu lisäämään metsän hakkuita liityntäjohton vuoksi, jolloin hiilivarastoa sekä vuotuista nielua menetetään enemmän. Vastavasti siirtoverkkoihin liittymisen kustannukset ovat korkeammat kauempana sijaitsevasta sähköverkosta.



Kuva 5. Turbiinien sijoituspaikkojen hiilitasevaikutukset (5A, 5B, tCO₂/GWh) ja sijoituspaikkojen kustannustehokkuus (5C, 5D, €/MWh). A) Tuulivoimalaitoksen alta hakattavan puuston hiilivarasto ja kasvunmenetyksen aiheuttama nieluvaikutus huomioitu, B) myös sähkön siirtolinjan alta hakattavan 30 m levyisen johtokadun vaikutus huomioitu. C) Tuulivoiman sijoituspaikat ilman verkkoon liittäminen kustannuksia, D) verkkoliittämisen kustannusten kanssa. Huomaa kuvien käänteinen väritys: parhaat paikat näkyvät tummempina alueina. Näillä alueilla on matala puuston hiilivarasto ja vuotuinen kasvu sekä alhaiset kustannukset.



Kuva 6. Priorisoidut sijoituspaikat 120 turbiinille, kun tuulivoiman hiilitasevaikutus on minimoitu (6A, B) ja kun kustannustehokkuus on maksimoitu (6C, D). A) Vain tuulipuiston alta harkittavan puuston hiilivarasto ja vuosikasvu huomioitu, B) myös sähkön siirtolinjan alta harkittavan puuston hiilivarasto ja vuosikasvu huomioitu. C) Kustannustehokkaimmat tuulivoiman sijoituspaikat ilman verkkoon liittäminen kustannuksia, D) verkkoliitännän kustannusten kanssa.

Huomaa kuvien A ja B käänteinen väritys: parhaat paikat näkyvät tummempina alueina. Näillä alueilla on matala puuston hiilivarasto ja vuotuinen kasvu sekä alhaiset kustannukset.

Kustannusarviot 254 turbiinille (65 rasteriruudulle) olivat hyvin samanlaiset, kun tarkasteltiin jokaista rasteriruutua erikseen ilman sähköverkkoliitännää (olettaen että jokaiseen ruutuun, huomioiden myös naapuriruudut, olisi mahdollista rakentaa 10 turbiinin tuulipuisto) (Taulukko 3). Tuuliresurssi 200 m korkeudella on erinomainen, eikä vaihtelee paljoa lin alueella.

- Tuotantokustannukset (LCOE) kaikille 254 turbiinille vaihtelivat välillä 30–38 €/MWh (keskiarvo 33 €/MWh) ja olivat parhaille 120 turbiinille 30–32 €/MWh (keskiarvo 31 €/MWh).
- Sähköverkkoliitännä nosti kustannuksia ja toi enemmän vaihteluväliä. Tuotantokustannukset (LCOE) kaikille 254 turbiinille vaihtelivat välillä 32–53 €/MWh (keskiarvo 39 €/MWh), ja parhaille 120 turbiinille 32–38 €/MWh (keskiarvo 34 €/MWh).
- Kun valittiin 120 turbiinia, joilla oli vähäisimmät vaikutukset metsän hiilitaseeseen (ilman sähköverkkoa), saatiin tuotantokustannuksiksi 30–37 €/MWh (keskiarvo 33 €/MWh). Jos huomioitiin myös sähköverkon vaikutus hiilitaseeseen, saatiin kustannuksiksi 32–40 €/MWh (keskiarvo 35 €/MWh).

Metsäkadon ja nieluvaikutuksen huomioiminen 120 parhaan sijoituspaikan valinnassa nosti siis kustannuksia ainoastaan hieman verrattuna siihen, että 120 parasta sijoituspaikkaa valittiin kustannustehokkuuden perusteella (Taulukko 3).

Taulukko 3. Yhteenveto tuulivoiman keskimääräisestä tuotantokustannuksesta (LCOE) lin alueella kaikille soveltuville sijoituspaikoille ja eri priorisointien kanssa (vaihteluvälit sulussa).

Sijoituspaikat	Ilman sähköverkkoliitännän kustannuksia €/MWh	Sähköverkkoliitännän kanssa €/MWh
Kaikki potentiaaliset sijoituspaikat	33 (30–38)	39 (32–53)
Kustannustehokkaimmat 120 sijoituspaikkaa	31 (30–32)	34 (32–38)
120 sijoituspaikkaa, joilla pienin vaikutus hiilitaseeseen	33 (30–37)	35 (32–40)

Tuulivoiman vaikutus hiilitaseeseen oli kaikille potentiaalisille sijoituspaikoille keskimäärin 0,28 (0,24–0,32) tCO₂ekv/GWh. Kun sähköverkon alta kaadettava metsä huomioidaan, saadaan päästövaikutukseksi keskimäärin 0,64 (0,37–1,59 tCO₂ekv/GWh).

Valitsemalla sijoituspaikat, joissa on vähiten puustoa, saadaan 120 turbiinille keskimäärin 0,27 (0,24–0,28) tCO₂ekv/GWh. Kun huomioidaan sähköverkkoliitännän vaikutus saadaan parhaille 120 turbiinille keskimäärin 0,40 (0,37–0,48) tCO₂ekv/GWh.

Kustannuksiltaan parhaat sijoituspaikat aiheuttivat metsäkadon, jonka vaikutus hiilitaseeseen oli keskimäärin 0,28 (0,25–0,30) tCO₂ekv/GWh 120 parhaalle turbiinille. Kustannuksiltaan parhaat sijoituspaikat, kun huomioitiin myös sähköverkkoliitännän kustannus, aiheuttivat metsäkadon, jonka vaikutus hiilitaseeseen oli keskimäärin 0,45 (0,37–0,85) tCO₂ekv/GWh, kun otetaan huomioon sähköverkkoliitännän alta poistuvat puut.

Kun tuulivoiman sijoituspaikkojen valinnassa huomioidaan metsäkato ja nieluvaikutus, saadaan huomattavasti vähennettyä tuulivoiman päästövaikutuksia, kun otetaan myös sähköverkon alta kaadettava metsä huomioon (Taulukko 4).

Taulukko 4. Yhteenvedo tuulivoiman keskimääräisestä vaikutuksesta hiilitaseeseen metsän hiilivaraston ja hiilinielun vähenemisen kautta, kaikille potentiaalisille sijoituspaikoille lin alueella sekä eri tavoin priorisoiduille sijoituspaikoille (vaihteluvälit suluissa).

Sijoituspaikat	Ilman sähköverkkoliitintää tCO ₂ eq/GWh	Sähköverkkoliitännän kanssa tCO ₂ eq/GWh
Kaikki potentiaaliset sijoituspaikat	0,28 (0,24–0,32)	0,64 (0,37–1,59)
Kustannustehokkaimmat sijoituspaikat	0,28 (0,25–0,30)	0,45 (0,37–0,85)
Sijoituspaikat, joilla pienin vaikutus hiilitaseeseen	0,27 (0,24–0,28)	0,40 (0,37–0,48)

3.4. Yhteenvedo tuulivoiman ilmastovaikutuksista

Tuulivoima on tärkeä keino tuottaa fossiilitonta energiaa, ja sen ilmastohyöty koko sen elinkaaren, eli noin 30 vuoden ajan, on kiistaton. Vuosien 2030–2050 aikana sen arvioitu päästövähenyshyöty fossiilisten korvaajana on keskimäärin 230–260 gCO₂eq/kWh eri skenaarioissa (Luku 3.1.1), vaikka ollaan siirtymässä hiilineutraaliin energiajärjestelmään - päästösäästöjä syntyy päästövapaan sähköntuotannon lisäksi energian eri kulutussektoreiden sähköistyessä. Tuulivoiman rakentamisen aiheuttamat päästöt on arvioitu olevan kahta kertaluokkaa alhaisemmat, eli 5–7 gCO₂eq/KWh (Luku 3.2.1.). Lin kuntaan tehdyt tuulivoimalaitosten ja verkkoliitännän aiheuttaman metsäkadon päästöt arvioitiin vielä huomattavasti pienemmäksi, keskimäärin yhteensä 0,6 gCO₂eq/KWh.

Tuulivoiman aiheuttaman metsäkadon päästöt ovat siten vain noin 10 % koko sen rakentamisen aiheuttamista päästöistä 30 vuoden elinkaaren aikana. Huomioitavaa on, että metsäkadon päästövaikutuksista keskimäärin yli puolet tulee voimajohtojen rakentamisesta. Esimerkiksi lin kunnassa, jossa on jo valmiiksi hyvä metsätie- ja voimajohtoverkosto, potentiaalisille alueille rakennettava tuulivoima johti keskimäärin yli kaksinkertaiseen hiilivaraston menetykseen turbiinia kohti uusien verkkoliitintöjen seurauksena (30t/turbiini --> 69t/turbiini). Myös lin alueella oli sijoituspaikkoja, joissa vaikutus oli huomattavasti suurempi, ja verkkoliitännän vaikutusten voidaan olettaa olevan suurempia alueilla, jossa etäisyydet voimajohtoihin ovat pitemmät tai joista ne puuttuvat kokonaan.

Kun turbiineille mallinnettiin optimaalisia sijoituspaikkoja metsäkadon ja kustannustehokkuuden näkökulmista, parhaat paikat sijoittuivat voimalinjojen läheisyyteen. Kauempana sähkön siirtoverkoista joudutaan lisäämään metsän hakkuita liityntäjohton vuoksi, jolloin hiilivarastoa sekä vuotuista metsänielua menetetään enemmän. Vastaavasti siirtoverkkoihin liittymisen kustannukset ovat korkeammat, jos olemassa oleva sähköverkko on kaukana. Voidaan siis sanoa, että tuulivoiman metsäkatovaikutuksia, samoin kuin sen rakentamisen kustannustehokkuutta, määrää ainakin yhtä paljon voimajohtojen sijainti kuin se, mihin itse tuulivoimalaitokset rakennetaan.

4. Tuulivoiman monimuotoisuusvaikutukset

4.1. Koostetutkimuksen tausta

Tässä yhteydessä monimuotoisuusvaikutukset ymmärretään vaikutuksina selkärankaisiin eläimiin. Tuulivoima voi vaikuttaa niihin monin tavoin. Elinympäristön muutos ja pirstoutuminen voivat heikentää lajien elinolosuhteita ja resurssien saatavuutta turbiinien läheisyydessä. Roottorien liike, melu, värinä, välkkyvät valot ja ihmistoiminnan lisääntyminen voivat aiheuttaa häiriöitä, jotka johtavat eläinten käyttäytymismuutoksiin, kuten alueiden välttelyyn ja lento-reittien muutoksiin.

Välttelyä voi esiintyä eri mittakaavoissa:

- Makrotaso: koko tuulivoimalaitoksen (eli tuulipuiston) laajuinen välttely
- Mesotaso: tuulivoimalaitoksen sisällä tapahtuva välttely
- Mikrotaso: yksittäisten tuuliturbiinien välittömässä läheisyydessä tapahtuva välttely

Siirtymä (tai siirtyminen, displacement) viittaa pääasiassa makro- ja mesotason välttelyyn, mikä voi johtaa eläintiheyksien pienenemiseen turbiinien lähialueilla. Tietoa siirtymästä voidaan hyödyntää määrittäessä etäisyyskynnyksiä, joiden ulkopuolelle tuulivoiman ei odoteta aiheuttavan merkittäviä vaikutuksia monimuotoisuuteen. Tämä puolestaan auttaa lieventämään tuulivoiman haitallisia vaikutuksia eläimiin.

Analysoimme systemaattisesti 84 vertaisarvioitua tutkimusta, joissa tarkasteltiin maatuulivoiman vaikutuksia lintujen, lepakoiden ja maanisäkkäiden siirtymäetäisyyksiin eri elinympäristöissä. Keskityimme seuraaviin kysymyksiin:

- Kuinka yleisiä ovat tuulivoiman aiheuttamat siirtymävaikutukset linnuilla, lepakoilla ja maanisäkkäillä?
- Mitkä eliöryhmät osoittavat pisimpiä siirtymäetäisyyksiä?
- Mitkä ovat syyt niille tapauksille, joissa ei havaita siirtymää?

Tulosten pohjalta tarkastelimme, miten siirtymäilmiöön liittyvää tietoa voidaan hyödyntää tuulivoiman haittavaikutusten lieventämisessä.

Tämä luku on suomenkielinen käännös ja osittainen lyhennelmä artikkelista Tolvanen ym. (2023): "How far are birds, bats, and terrestrial mammals displaced from onshore wind power development? – A systematic review", julkaistu CC BY -lisenssillä Biological Conservation-sarjassa. Alkuperäinen artikkeli on saatavilla osoitteessa <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110382>. Käytimme kääntämisessä apuna tekoälyä. Lukemisen helpottamiseksi poistimme tai järjestelimme uudelleen osan siteerauksista.

4.2. Menetelmät

Hyödynsimme Web of Science -tietokantaa (<https://www.webofknowledge.com>) ja Tethys Knowledge Base -tietokantaa (<https://tethys.pnnl.gov/knowledge-base-wind-energy>) kartoittaessamme vertaisarvioitua kirjallisuutta, joka käsittelee maatuulivoiman vaikutuksia lintuihin, lepakoihin ja maanisäkkäisiin (haku tehtiin 5.4.2023).

Tutkimukset sisällytettiin analyysiin, jos ne raportoivat alkuperäistä kvantitatiivista dataa lajien tai lajiryhmien siirtymäetäisyyksistä tuuliturbiineista tai tuulivoimalaitoksista (eli tuulipuis-toista). Mukaan otettiin myös tutkimukset, joissa ei havaittu tilastollisesti merkitsevää siirtymistä tai joissa lajien havaittiin jopa hakeutuvan tuuliturbiinien läheisyyteen, mikäli siirtymäetäisyyksistä oli raportoitu.

Siirtymäetäisyyksiä määritettiin läpikäydyissä tutkimuksissa monenlaisten muuttujien perusteella, kuten lajien aktiivisuus ja esiintyminen tietyllä alueella, käyttäytyminen, soidin- ja pesimäpaikat, pesimätiheys, lisääntymismenestys, lentoreittien muutokset, pesivien lintujen runsaus, lentoaktiivisuuden tai -reittien muutokset, ravinnonhankintaetäisyydet sekä ulosteiden esiintyminen.

Kirjasimme kaikki ilmoitetut etäisyydet, joita kutsumme vastaisuudessa tapauksiksi. Tapaus luokiteltiin kuuluvaksi siirtymäluokkaan, jos siinä oli havaittu tilastollisesti merkitsevä tai mallinnukseen perustuva siirtymä jossakin mitatussa muuttujassa tutkimuksen missä tahansa vaiheessa. Mukaan otettiin sekä suorat (esim. melu) että epäsuorat (esim. elinympäristön laadun heikkeneminen) vaikutukset. Tapaukset, joissa ei havaittu tilastollisesti merkitsevää siirtymistä tai joissa lajien havaittiin hakeutuvan tuuliturbiinien läheisyyteen, luokiteltiin ei-siirtymäksi.

Siirtymää havaitsemattomat, nk. ei-siirtymätutkimukset jaoteltiin neljään kategoriaan sen perusteella, miten tulosta oli käsitelty tutkimuksessa:

- Menetelmällinen syy – esimerkiksi pieni otoskoko tai tutkimuksen lyhyt kesto
- Lajikohtainen syy – esimerkiksi lajin elinkierron vaihe tai käyttäytymisominaisuudet
- Elinympäristöolosuhteet – esimerkiksi kasvillisuuden piirteet tai ravinnon saatavuus
- Syytä ei arvioitu – tutkimuksessa ei ollut analysoitu syitä tulokselle

Linnut jaoteltiin kahdeksaan toiminnalliseen ryhmään niiden taksonomisten ja ekologisten ominaisuuksien perusteella: kanalinnut, kurjet, varpuslinnut, petolinnut, pöllöt, kahlaajat, vesilinnut, ja useita lajeja kattava ryhmä.

Maanisäkkäät jaettiin kolmeen ryhmään: koiraeläimet (ketut, sudet), hirvieläimet (peurat, hirvet, porot), pikkunisäkkäät (jyrsijät, siilit, päästäiset)

Siirtymäetäisyydet luokiteltiin viiteen kategoriaan: enintään 100 m, enintään 500 m, enintään 1 000 m, enintään 5 000 m ja yli 5 000 m päässä turbiineista tai tuulivoima-alueista.

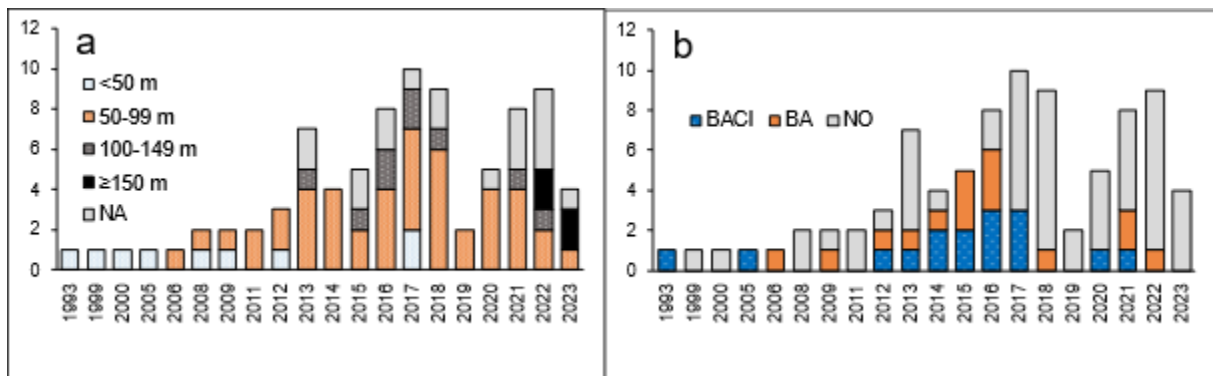
Tuuliturbiinit jaoteltiin napakorkeuden perusteella neljään luokkaan: alle 50 m, 50–99 m, 100–149 m ja 150 m tai korkeammat turbiinit.

Arvioidaksemme, vaikuttaako tutkimusasetelma havaintoihin siirtymisestä tai sen puuttumisesta, jaoimme tutkimusasetelmat kolmeen luokkaan: 1) vertailualueen sisältävä ennen-jälkeen tutkimusasetelma (before-after-control-impact BACI), 2) muut ennen-jälkeen-asetelmaa (before-after, BA) hyödyntävät tutkimukset ja 3) muut tutkimukset, joissa ei ollut aineistoa ajalta ennen tuulivoiman rakentamista (NO). Muihin tutkimusasetelmiin kuuluivat tutkimukset, joissa seurattiin tuulivoiman vaikutuksia rakentamisen jälkeen joko vertailualueiden kanssa tai ilman niitä.

4.3. Tulokset eläinten siirtymävaikutuksista

Alkuperäisestä 1 206 tutkimusartikkelin joukosta poistimme hakutietokantojen tuottamat päällekkäiset julkaisut ja koostimme siirtymäetäisyyksiä koskevan tiedon 84 tutkimuksesta, jotka oli julkaistu vuosina 1993–2023 (Kuva 7).

Tutkimuksissa yleisin tuulivoimaloiden napakorkeus oli 50–99 m, ja vain neljässä uusimmassa tutkimuksessa napakorkeus vastasi nykyisin rakennettavia turbiineja, ollen vähintään 150 m. BACI-tutkimusasetelmaa käytti 16 tutkimusta, BA-asetelmaa 15 tutkimusta ja muuta asetelmaa (NO) 53 tutkimusta.



Kuva 7. Tutkimuksissa käytetyt tuulivoimaloiden napakorkeudet (a) ja tutkimusasetelmat (b) vuosittain. Kuva julkaisusta Tolvanen ym. (2023).

Tutkimuksissa raportoitiin sekä lajikohtaisia siirtymäetäisyyksiä useita lajeja koskevia koottuja siirtymäetäisyyksiä. Kirjasimme kaikki ilmoitetut etäisyydet, ja näin päädyimme 160 erilliseen siirtymäetäisyyteen, joita kutsuttiin tapauksiksi.

Tieto siirtymistä ja ei-siirtymistä on koottu Taulukkoon 5.

Siirtymää havaitsemattomissa, nk. ei-siirtymätapauksissa syitä esitettiin usein useita. Menetelmällinen syy mainittiin 33 tapauksessa, lajikohtainen syy 23 tapauksessa ja elinympäristöolosuhteet 19 tapauksessa. Kolmessa tapauksessa syytä ei arvioitu.

Vaikka emme testanneet tuloksia tilastollisesti, siirtymä- ja ei-siirtymäkategoriat eivät näyttäneet eroavan merkittävästi toisistaan neljän eri tuuliturbiinikokoluokan välillä.

Taulukko 5. Tapaukset (kpl) lajiryhmittäin, joissa havaittiin siirtymiä ja ei-siirtymiä.

Lajiryhmä	Siirtymät	Ei-siirtymät	Yhteensä
Linnut			
Kurjet	3	0	3
Kanalinnut	11	7	18
Pöllöt	2	0	2
Varpuslinnut	16	16	32
Petolinnut	24	6	30
Kahlaajat	8	11	19
Vesilinnut	6	1	7
Useat linturyhmät	3	2	5
Linnut yhteensä	73	43	116
Lepakot	21	8	29
Maanisäkkäät			
Koiraeläimet	1	1	2
Hirvieläimet	8	1	9
Pikkunisäkkäät	1	3	4
Maanisäkkäät yhteensä	10	5	15
Kaikki yhteensä	104	56	160

4.3.1. Linnut

Kurjet: Kaikki kolme kurkia koskevaa tapausta luokiteltiin siirtymäluokkaan. Kaksi tutkimusta tarkasteli muuttavia trumpettikurkia (*Grus americana*) (Ellis ym. 2022, Pearse ym. 2021). Niiden aktiivisuus oli 20 kertaa suurempaa yli 5 000 metrin etäisyydellä tuulivoimalaitoksista lähempänä olevaan alueeseen verrattuna. Sama 5 000 m siirtymäetäisyys havaittiin myös lintujen etsiessä levähdyspaikkaa ruokaillakseen. Talvehtivat hietakurjet (*Grus canadensis*) puolestaan osoittivat välttämiskäyttäytymisen merkkejä alle 10 kilometrin etäisyydellä tuulivoimalaitoksista, mutta tämän oletettiin johtuvan myös elinympäristön valinnasta.

Kanalinnut: Luokittelimme 11/18 kanalintutapausta siirtymäluokkaan, mediaanietäisyyden ollessa 5 000 metriä. Lintujen havaittiin vähentävän soidinkäyttäytymistä turbiinien läheisyydessä (LeBeau ym. 2017a, Winder ym. 2015, Zwart ym. 2015). Pisimmän siirtymäetäisyyden, eli yli 5 000 metriä, havaittiin liittyvän preeriakanan alalajin (*Tympanuchus cupido pinnatus*) soidinkäyttäytymiseen. Lajin koiraat viettivät vähemmän aikaa ei-lisääntymiskäyttäytymiseen turbiinien läheisyydessä verrattuna kauempana oleviin yksilöihin, mahdollisesti kompensoidakseen melun aiheuttaman häiriön vaikutuksia (Smith ym. 2016). Preeriakananaaraat saattoivat pesiä jopa pienellä tuulivoimalaitosalueella, mutta koska ne valitsivat pesäpaikkansa yli 700 metrin etäisyydellä turbiineista (Harrison ym. 2017), luokittelimme tämänkin tapauksen siirtymäksi.

Metson (*Tetrao urogallus*) lisääntymiskäyttäytymiseen käytetyn ajan ja lisääntymismenestyksen havaittiin vähenevän jopa yli 800 metrin etäisyydellä turbiineista, todennäköisesti melun aiheuttaman häiriön vuoksi (Taubmann ym. 2021). Lajin populaation havaittiin pienentyneen tuulivoimarakentamisen seurauksena elinympäristön laadun heikkenemisen vuoksi (González ym. 2016), eikä tottumista ollut tapahtunut vielä kahdeksan vuotta rakentamisen jälkeen (Coppes ym. 2020a).

Suippopyrstökanan alalajin (*Tympanuchus phasianellus columbianus*) poikasten selviytyminen väheni 50 %, kun pesän läheisyydessä oli vähintään 10 turbiinia 2100 metrin säteellä (Proett ym. 2022). Syynä pidettiin kasvanutta saalistusriskiä sekä meluhäiriötä, joka esti emojen hälytysäänten välittymisen poikasille. Marunakanan (*Centrocercus urophasianus*) kesähabitaatin valinta väheni alle 1 200 metrin etäisyydellä turbiineista, mutta vaikutusta itse pesäpaikan valintaan tai naaraiden selviytymiseen ei havaittu (LeBeau ym. 2017b).

Seitsemän kanalintutapausta luokiteltiin ei-siirtymäksi. Näistä kaksi keskittyi preeriakanan pesintään ja elinympäristön valintaan (McNew ym. 2014, Raynor ym. 2019). Siirtymättömyyden oletettiin liittyvän muiden epäsopivien elinympäristöjen välttämiseen. Riekon alalajin (*Lagopus lagopus scoticus*) siirtymättömyyden puolestaan oletettiin johtuvan tutkimusmenetelmiin liittyvistä tekijöistä, kuten lyhytaikaisesta kolmen vuoden seurannasta vain yhdellä tuulivoimalaitosalueella (Douglas ym. 2011).

Joissakin tutkimuksissa havaittiin myös positiivisia yhteyksiä turbiineihin: fasaani (*Phasianus colchicus*) (Łopucki ym. 2017) ja riekon alalaji (*Lagopus lagopus scoticus*) (Douglas ym. 2011) näyttivät hyödyntävän turbiinien läheisiä alueita. Syiksi ehdotettiin vähentynyttä petolintujen määrää turbiinien läheisyydessä sekä rakennusalueen hiekkaa, joka on tärkeä materiaali lintujen ruoansulatukselle. Toisaalta Douglas ym. (2011) esitti, että lyhyt tutkimusaika yhdellä alueella saattoi vaikuttaa siihen, että siirtymää ei havaittu.

Pöllöt: Vain kaksi tutkittua tapausta käsitteli pöllöjä. Molemmissa linnut hylkäsivät reviirinsä ja pesänsä jopa 5 000 m etäisyydellä tuulivoimalaitoksista (Husby & Pearson 2022, López-Peinado ym. 2020). Pöllöjen oletettiin olevan herkkiä melulle ja häiriöille, ja avoimien tuulivoimaympäristöjen oletettiin olevan niille huonoja saalistusalueita.

Varpuslinnut: Varpuslinnuilla havaittiin sekä siirtymiä että ei-siirtymiä, molempia 16 tapauksessa. Mediaani siirtymäetäisyys oli 500 metriä, ja siirtymistä ilmeni välttämiskäyttäytymisenä sekä lintutiheyden vähenemisenä, pesivien lintujen määrän vähenemisenä ja pesätiheyden laskuna (esim. Fernández-Bellon ym. 2019, Shaffer & Buhl 2016, Stevens ym. 2013, Song ym. 2021).

Siirtymä saattoi ulottua jopa 4 500 metriin, kuten havaittiin Espanjassa uhanalaista kaitanokakiurua (*Chersophilus duponti*) koskevassa tutkimuksessa. Paikallisten sukupuuttojen oletettiin johtuvan turbiinien läsnäolosta, ja häiriötekijöiksi ehdotettiin turbiinien pyörimistä ja yöajan valoja, jotka haittasivat lintujen viestimistä (Gómez-Catasús ym. 2022, Leddy ym. 1999). Myös elinympäristön muutokset, erityisesti metsien väheneminen, pienensivät merkittävästi linnuille soveltuvia elinalueita.

García ym. (2015) havaitsi, että vaikka kahdessatoista 15 tapauksessa pesivien varpuslintujen populaatiot pienenevät turbiinien rakentamisen aikana, linnut palasivat vanhoille pesimäalueilleen rakennusvaiheen päätyttyä. Luokittelimme tämän tapauksen kuitenkin siirtymäksi, koska muutosta havaittiin rakennusvaiheessa.

Varpuslintuja koskevissa tutkimuksissa 16 tapauksessa ei havaittu siirtymiä. Hale ym. (2014) totesi, että pesivät ruohikkoalueiden varpuslinnut eivät reagoineet turbiineihin, osittain siksi, että tutkimuksessa oli vaikea erottaa turbiinien etäisyyden vaikutusta muiden tekijöiden, kuten piikkilanka-aitojen, vaikutuksista. Johnson (2016) kuitenkin kritisoi heidän johtopäätöstään, väittäen, että se perustui virheelliseen tilastolliseen analyysiin, ja että kaksi kolmesta tutkitusta lajista saattoi itse asiassa osoittaa siirtymää.

Shaffer & Buhl (2016) havaitsivat, että heidän tutkimuksissaan amerikanniittysirkku (*Pooecetes gramineus*) oli ainoa varpuslintulaji, joka ei reagoinut turbiineihin. Syynä pidettiin lajin ja sen suosiman elinympäristön erityispiirteitä: laji on yleensäkin ensimmäisiä lajeja, jotka asuttavat häiriintyneitä alueita. Heinäsirkkusen (*Ammodramus savannarum*) pesäpaikan valintaan vaikutti taas enemmän kasvillisuus kuin turbiinien etäisyys. Lisäksi havaittiin, että pesinnän epäonnistuminen johtui useammin käärmeiden aiheuttamasta saalistuksesta kuin turbiinien vaikutuksesta (Hatchett ym. 2013).

Stevens ym. (2013) havaitsi, että kolme neljästä varpuslintulajista ei osoittanut siirtymää, ja tämä liittyi petojen välttämistrategiaan. Sosiaaliset lintulajit käyttivät avoimia, turbiinien läheisiä alueita hyväkseen, ja niiden suuri yksilömäärä helpotti petojen havaitsemista. Tiheään kasvillisuuteen pedoilta piiloutuva laji osoitti sen sijaan siirtymistä pois turbiineiden läheisyydestä.

Devereux ym. (2008) havaitsi, että varikset ja kiuru (*Alauda arvensis*) eivät siirtyneet pois turbiinien läheisyydestä, vaan olivat itse asiassa todennäköisemmin lähempänä turbiineja kuin kauempana. Syiksi ehdotettiin tutkimuksen pientä otoskokoa (metodologinen tekijä) sekä parempaa ravinnon saatavuutta turbiinien läheisyydessä (elinympäristöolosuhteet).

Petolinnut: Siirtymää havaittiin 24 petolintutapauksessa. Mediaanisiiirtymäetäisyys oli 500 metriä, ja se vaihteli niittysuohaukan (*Circus pygargus*) 100 metristä 4 000 metriin merikotkalla (*Haliaeetus albicilla*) ja maakotkalla (*Aquila chrysaetos*) (Balotari-Chiebao ym. 2016, Schaub ym. 2020, Fielding ym. 2021, 2022). Siirtymä ilmeni eri tutkimuksissa lintujen runsauden muutoksina sekä lentokäyttäytymisen muutoksina turbiinien lähellä. Lentokäyttäytymisen muutosten oletettiin lisäävän lintujen energiankulutusta. Lisäksi havaittiin toiminnallisen elinympäristön menetystä ja pesimämenestyksen heikkenemistä.

Ajankohta saattoi vaikuttaa tuloksiin: petolintujen runsaus väheni välittömästi turbiinien asennuksen jälkeen, mutta osoitti lievää elpymistä 6,5 vuotta myöhemmin, vaikkakaan ei rakentamista edeltävälle tasolle (Farfán ym. 2009, 2017).

Siirtymää ei havaittu kuudessa petolintutapauksessa. Nuorten merikotkien havaittiin lentävän tuulivoima-alueille, mikä lisäsi niiden törmäysriskiä (Dahl ym. 2013, Krone & Treu 2018). Lentokäyttäytyminen vaihteli myös yksilöistä ja ravinnon saatavuudesta riippuen. Kolmen hiirihaukkalajin (*Buteo* sp.) yksilöt eivät muuttaneet pesimäreiviensä valintaa turbiinien läheisyydessä. Roottoreiden nopeuden kasvaessa niiden välttämislennot kuitenkin lisääntyivät, mikä vähensi törmäyksiä (Watson ym. 2018). Koska nämä lennot tapahtuivat turbiinilapojen välittömässä läheisyydessä, niitä ei luokiteltu siirtymiksi (mikrotason siirtymä, ks. Luku 4.1). Niittysuohaukan (*Circus pygargus*) pesäpaikan valinnan oletettiin perustuvan ensisijaisesti kasvillisuuden peittävyteen eikä häiriötekijöihin, kuten etäisyyteen turbiineista (Hernández-Pliego ym. 2015). Campedelli ym. (2014) havaitsi, että varpushaukka (*Accipiter nisus*) oli ainoa seitsemästä petolintulajista, jonka runsaudessa ei ollut merkitsevää eroa ennen ja jälkeen rakentamisen. Tulosta ei kuitenkaan tarkemmin analysoitu. Yhdessä tutkimuksessa haukat, kotkat ja jalohaukat eivät osoittaneet välttämiskäyttäytymistä turbiinien ympärillä, mikä viittaa siihen, että siirtymän voimakkuus ja esiintyminen saattavat vaihdella laji- ja aluekohtaisesti (Smith ym. 2017).

Kahlaajat: Kahlaajat olivat ainoa linturyhmä, jossa ei-siirtymiä havaittiin useammin kuin siirtymiä (11 vs. 8 tapausta). Siirtymä ilmeni lintutiheyden ja pesivien lintujen määrän vähenemisenä, ja sen mediaanietäisyys turbineista oli 500 metriä (Pearce-Higgins ym. 2009, Sansom

ym. 2016, Shaffer & Buhl 2016). Bai ym. (2021) havaitsivat, että neljässä tapauksessa linnut välttivät toisiaan lähekkäin sijaitsevien turbiinien ylittämistä. Niiden runsaus ei kuitenkaan muuttunut merkitsevästi tutkimusalueella kontrolliin verrattuna.

Ei-siirtymiä oli 11. Silkkihaikaran (*Egretta garzetta*) runsaus ei muuttunut Kiinassa (Xu ym. 2021). Sen runsauden havaittiin riippuvan ensisijaisesti elinympäristöolosuhteista, kuten ruokailuun soveltuvasta maankäyttötyypistä, eikä turbiinien etäisyydestä. Kapustarinnan (*Pluvialis apricaria*) ei havaittu välttelevän tuulivoimalaitoksia UK:ssa (Douglas ym. 2011), eikä sen lähisukulaisen (*Pluvialis dominica*) havaittu välttelevän vastaavia alueita USA:ssa (Homoya ym. 2017). Tulokset olivat ristiriidassa Pearce-Higgins ym. (2009) havaintojen kanssa, ja tämän oletettiin johtuvan tutkimuspaikan erityispiirteistä sekä havaintojen puuttumisesta ennen turbiinien rakentamista (Douglas ym. 2011). Lisäksi sääolosuhteiden vaihtelun oletettiin osittain selittävän kapustarintapopulaation kasvua kahden tutkimusvuoden välillä.

Mielenkiintoinen havainto tehtiin amerikkantyllistä (*Charadrius vociferous*), joka ei ainoastaan sietänyt hyvin turbiineja, vaan myös lisääntyi niiden läheisyydessä. Tämä attraktio eli vetovoimavaikutus selittyi sillä, että turbiinien ympärille muodostuneet sorapohjat tarjosivat lajille pesimäpaikkoja (Shaffer & Buhl 2016).

Neljä kosteikkojen kahlaajalajia ei osoittanut välttämiskäyttäytymistä turbiineita kohtaan. Tämä tulos saattoi kuitenkin johtua pienestä otoskoosta ja lyhyestä kolmen vuoden tutkimusjaksosta, joka ei kattanut mahdollisia pitempiaaikaisia vaikutuksia lajeihin (Niemuth ym. 2013).

Vesilinnut: Kuudessa vesilintutapauksessa seitsemästä havaittiin siirtymää, mediaanietäisyyden ollessa 500 metriä. Pisin siirtymä oli 1 300 metriä, joka havaittiin hymysorsalla (*Anas zonorhyncha*) ja sinisorsalla (*Anas platyrhynchos*) (Zhao ym. 2020). Siirtymä ilmeni usein muutoksina lepopaikkojen ja ruokailualueiden valinnassa. Lintujen täytyi lentää pidemmälle välttääkseen turbiineja, mikä oletettavasti lisäsi niiden energiankulutusta. Toisaalta yhdessä tutkimuksessa havaittiin, että siirtymistä aiheuttivat tuulivoimalaitoksiin liittyvä infrastruktuuri ja elinympäristöjen pirstoutuminen kuin itse turbiinit (Larsen & Madsen 2000).

Pienempien turbiinien vaikutus väheni 8–10 vuoden aikana lyhytnokkahanhilla (*Anser brachyrhynchus*) ja pikkujoutsenilla (*Cygnus columbianus bewickii*), joiden havaittiin ruokailevan lähempänä voimaloita ravinnon saatavuuden mukaan (Fijn ym. 2012).

Vanhin vesilintututkimus (Meek ym. 1993) osoitti, että ainoa laji, joka reagoi tuulivoimaan negatiivisesti, oli kaakkuri (*Gavia stellata*), mutta sen vähenemisen syy jäi epävarmaksi.

On huomionarvoista, että pääosa vesilintututkimuksista tehtiin turbiineilla, joiden tornikorkeus oli alle 50 metriä.

Useat linturyhmät: Kolme useita linturyhmiä käsittelevää tapausta havaitsi siirtymää, joka ilmeni lintujen runsauden ja lentomäärien vähenemisenä 6,5 vuoden jälkiseurantajakson aikana, lintujen aktiivisuuden laskuna turbiinien rakentamisen aikana sekä muutoksina lentoreiteissä ja ilmatilan käytössä (Pande ym. 2013, Farfán ym. 2017, Therkildsen ym. 2021).

Minderman ym. (2012) ei havainnut siirtymää lintujen aktiivisuuden osalta pienikokoisten turbiinien (<50 m tornikorkeus) läheisyydessä. Tutkijat olettivat, että joko turbiinien läsnäolo ei vaikuttanut elinympäristön käyttöön, tai siirtyminen tapahtui eri mittakaavassa kuin mitä tutkimuksessa tarkasteltiin.

Vain yksi tapaus keskittyi napakorkeudeltaan yli 200 korkeisiin turbiineihin. Se osoitti, että pienet metsälinnut (45 lajia) reagoivat erityisesti metsän rakenteeseen, vuodenaikaan ja roottorin halkaisijaan, mutta eivät itse turbiinien läheisyyteen (Rehling ym. 2023). Luokittelimme tämän tapauksen ei-siirtymäksi. Toisaalta tutkimus osoitti, että turbiinien korkeus, määrä ja roottorin pituus vähensivät lintujen runsautta ja monimuotoisuutta, joten tältä osin tulokset olivat hieman ristiriitaisia.

4.3.2. Lepakot

Lepakoiden siirtymää havaittiin 21 tapauksessa 29:stä, mediaanietäisyyden ollessa 1 000 metriä – mikä oli myös suurin tutkittu etäisyys. Mindermannin ym. (2012, 2017) pieniä turbiineja koskevia tapauksia (<50 m tornikorkeus) lukuun ottamatta muut tutkimukset keskittyivät isoihin turbiineihin, joiden napakorkeus saattoi ylittää 200 metriä (Ellerbrok ym. 2022). Yksikään tutkimus ei sisältänyt havaintoja ajalta ennen tuulivoimaa.

Lepakoiden reaktiot olivat vahvasti sidoksissa niiden saalistusympäristöön (metsä, reunahabitaatti, avoin) sekä lajin kaikuluotausetaisyyteen (lyhyt, keskipitkä, pitkä). Erityisesti metsälajit, kuten *Myotis* sp. ja *Barbastella barbastellus*, jotka ovat lyhyen kantaman kaikuluotaajia, osoittivat siirtymistä. Tämä ilmeni yksilöiden määrän ja aktiivisuuden vähenemisenä turbiinien läheisyydessä. Siirtymän syiksi ehdotettiin elinympäristön laadun heikkenemistä avoimien alueiden lisääntyessä, melua sekä turbiinien punaisten valojen vaikutusta (Barré ym. 2018, Ellerbrok ym. 2022, Gaultier ym. 2023).

Siirtymää havaittiin lepakoiden saalistusympäristöissä, kuten pensaikoissa (Barré ym. 2018) ja metsissä (Gaultier ym. 2023), kun taas avoimilla alueilla reaktio saattoi olla päinvastainen, eli turbiinit saattoivat houkutelaa lepakkoita (Leroux ym. 2022). Vähentynyt aktiivisuus turbiinien lähellä johti saalistusympäristöjen menetykseen, mikä trooppisilla alueilla katsottiin uhaksi lepakoiden suojelulle (Millon ym. 2018).

Mielenkiintoinen havainto tehtiin Reusch ym. (2022) tutkimuksessa, jossa 70 % isolepakoista (*Nyctalus noctula*) osoitti välttämiskäyttäytymistä, mutta mikäli attraktiota (eli vetovoimaa) havaittiin, sitä havaittiin enemmän suuria kuin pieniä turbiineja kohtaan.

Siirtymää ei havaittu kahdeksassa tapauksessa. Reunahabitaattien saalistajat (ja keskipitkän kantaman kaikuluotaajat), kuten *Pipistrellus pipistrellus* ja *P. kuhlii/nathusii*, eivät reagoineet turbiineihin metsäympäristöissä (Barré ym. 2018, Ellerbrok ym. 2022, Leroux ym. 2022). Toisaalta *Pipistrellus pipistrellus* -lajia koskeva tulos oli ristiriidassa Barré ym. (2018) ja Mindermannin ym. (2017) havaintojen kanssa, jotka osoittivat siirtymistä avoimessa maisemassa. Ellerbrok ym. (2022) oletti, että metsän raivaaminen turbiineja varten voisi luoda ihanteellisia saalistusympäristöjä reunahabitaattien saalistajille. *P. kuhlii/nathusii* -lajin vastakkaisten reaktioiden (välttäminen vs. attraktio) syyksi ehdotettiin niiden vaellustilannetta (Barré ym. 2018, Leroux ym. 2022). Avoimien alueiden saalistajien havaittiin hakeutuvan turbiinien läheisyyteen erityisesti avoimilla alueilla tai tiettyinä vuodenaikoina. Attraktion syytä ei kuitenkaan pystytty määrittelemään johdonmukaisesti.

4.3.3. Maanisäkkäät

Koirapetoja käsitteleviä tutkimuksia oli vain kaksi. Puolassa tehdyssä tutkimuksessa havaittiin ketun (*Vulpes vulpes*) siirtymistä jopa 700 metrin etäisyydelle turbiineista (Łopucki ym. 2017), kun taas kojoottien (*Canis latrans*) ei havaittu muuttavan käyttäytymistään lähes 10 000

metrin tutkimusalueella Nebraskassa, Yhdysvalloissa (Smith ym. 2017). Ketun siirtymisen oletettiin olevan epäsuora seuraus tuulivoimasta ja johtuvan saaliseläinten, erityisesti jänisten, vähentyneestä saatavuudesta turbiinien läheisyydessä (Łopucki ym. 2017). Vaikka turbiinien tappamien lintujen ajateltiin houkuttelevan kettuja, lintujen jäänteitä ei havaittu tämän oletuksen tueksi. Kajoottien sen sijaan oletettiin jo tottuneen tuulivoimaan tutkimuksen alkaessa, koska tutkimus käynnistyi vasta kahdeksan vuotta turbiinien täyden toiminnan jälkeen (Smith ym. 2017).

Hirvieläimiä käsittelevistä yhdeksästä tutkimuksesta kuusi koski poroja (*Rangifer tarandus*), ja niissä kaikissa havaittiin siirtymää. Kolme tutkimusta tehtiin samalla alueella, mutta eri ajan-kohtina Ruotsissa (Skarin & Alam 2017, Skarin ym. 2015, 2018). Siirtymää havaittiin 100 metrin etäisyydeltä päätieltä (Colman ym. 2013) jopa 15 000 metrin päähän turbiineista (Skarin & Alam 2017). Colman ym. (2013) tutkimuksen mukaan porojen esiintyminen liittyi enemmän elinympäristön laatuun kuin tuulivoimaan. Siirtymää tapahtui erityisesti rakennusvaiheen aikana, mutta myös turbiinien toiminnan aikana. Herkin ajanjakso poroille oli vasomisaika, jolloin turbiinien melun oletettiin häiritsevän vasojen ja emojen välistä vuorovaikutusta sekä heikentävän porojen kykyä havaita petoja. Tästä syystä siirtymistä tapahtui turbiinien toiminnan aikana kauemmas kuin rakennusvaiheessa (Skarin ym. 2018). Tsegaye ym. (2017) ei havainnut muutosta alueiden käytössä vasomisaikojen ulkopuolella. Eftestøl ym. (2023) havaitsi huomattavaa kausittaista ja vuosittaista vaihtelua porojen siirtymisessä, mikä selitettiin paitsi porojen luonnollisilla liikkumismalleilla myös poronhoidon vaikutuksella, mikä viittaa ihmisen vaikutukseen siirtymiseen.

Metsäkauris (*Capreolus capreolus*) vältti tuulivoimalaitosten sisäosia ja turbiinien läheisyyttä jopa 600–700 metrin etäisyydellä, mikä mahdollisesti johtui vaikeudesta havaita tai kuulla petoja (Łopucki ym. 2017). Hanka-antilooppi (*Antilocapra americana*) osoitti käyttäytymismuutoksia muuttomatkan aikana, vältellen turbiineja ja liikkuen nopeammin niiden läheisyydessä, minkä oletettiin vaikuttavan sen saalistusmenestykseen tai pitkän aikavälin reittien saatavuuteen (Milligan ym. 2023). Isokauris (*Cervus elaphus*) ei sen sijaan kärsinyt merkittäviä haittoja tuulivoimasta, sillä sen reviiri säilyi tutkituilla alueilla jopa yli 5000 metrin päässä voimaloista (Walter ym. 2006). Syyksi ehdotettiin, että vaikka häiriöitä ja elinympäristön menetystä tapahtui, jokivarsiympäristöt, jotka olivat kriittisiä hirvien selviytymiselle tiettyinä kausina, eivät muuttuneet rakentamisen seurauksena (Walter ym. 2006).

Pikkunisäkkäillä tehdyistä neljästä tutkimuksesta vain euroopan rusakko (*Lepus europaeus*) osoitti siirtymistä, enimmillään 700 metrin etäisyydelle (Łopucki ym. 2017). Sen sijaan kolme tutkimusta, jotka käsittelivät pikkujyrsijöitä, päästäisiä, siilejä ja hamstereita, eivät osoittaneet siirtymistä (de Lucas ym. 2005, Łopucki & Mróz 2016, Łopucki & Perzanowski 2018). Syiksi ehdotettiin populaatioiden suurta ajallista vaihtelua sekä lajien käyttäytymis- ja fysiologisia ominaisuuksia, joita ei tutkimuksissa seurattu. Lisäksi hamsterin tiedettiin elävän erilaisten ihmisen infrastruktuurien, kuten asutusten, läheisyydessä, mikä saattoi selittää siirtymisen puuttumista.

4.4. Siirtymän vaikutukset eläinpopulaatioihin

Eryteisesti pitkäikäisten lintujen, kuten pöllöjen ja petolintujen, populaatiot voivat olla erityisen herkkiä tuulivoiman vaikutuksille, mikä johtuu niiden myöhäisestä sukukypsyydestä ja alhaisesta lisääntymisnopeudesta. Jos tuulivoima vähentää lintujen määrää pesimäaikana, lisää pesien hylkäämistä tai heikentää niiden pesimismenestystä, ja nämä vaikutukset yhdistyvät vielä

törmäysten lisääntymiseen, seurauksena voi olla merkittävä populaation pieneneminen. Peto-
lintujen ei ole havaittu merkittävästi tottuvan turbiineihin, mikä viittaa siihen, että niiden po-
pulaatiomuutokset voivat olla pysyviä (Campedelli ym. 2014 ja siellä viitatu lähteet).

Lepakoiden osalta on havaittu kahdensuuntaista reaktiota: sekä siirtymistä että attraktiota. Siirtymä tapahtuu pidemmillä etäisyyksillä, kun taas turbiinit voivat houkuttaa lepakoita lä-
hiympäristöönsä. Suurin havaittu siirtymä oli tutkimuksissa 1 000 metriä, mutta todellinen vai-
kutusalue saattoi tutkijoiden mukaan olla suurempi, sillä pidempiä etäisyyksiä ei ole kattavasti
tutkittu (Barré ym. 2018). Siirtymän laajuus riippuu muun muassa suosituista ruokailualueista
(metsät ja pensaikat vs. avoimet elinympäristöt), kaikuluotauksen kantamasta ja lepakoiden
muuttokäyttäytymisestä, mutta tarkat mekanismit ovat suurelta osin tuntemattomia. Monet
tutkimukset raportoivat lepakopopulaatioiden vähenemisestä, ja on jopa ennustettu, että
jatkuva tuulivoiman lisääntyminen voi johtaa joidenkin lajien paikalliseen sukupuuttoon (Frie-
denberg & Frick 2021). Toisaalta tietyissä tapauksissa, kuten Meksikossa tutkituilla 22 troop-
pisella lepakolajilla, populaatiot ovat osoittaneet toipumiskykyä (Briones-Salas ym. 2017).

Maanisäkkäiden siirtymästä on suhteellisen vähän tutkimustietoa. Tuulivoimahankkeet voivat
vaikuttaa suurten nisäkkäiden elinalueisiin ja muuttokäyttäytymiseen elinympäristöjen pirs-
toutumisen, laadun heikkenemisen ja häiriöiden lisääntymisen kautta. Suuri osa (6/15) tutki-
muksista keskittyi poroihin Pohjois-Skandinavian vuoristoalueilla, joissa tuulivoiman määrä on
kasvussa. Pitkät siirtymämatkat viittaavat siihen, että porojen käytettävissä olevat laidunalueet
supistuvat entisestään, sillä niitä ovat jo heikentäneet metsätalous, kaivostoiminta, laidunnus
ja ilmastonmuutos (Kivinen 2015, Miina ym. 2020, Tonteri ym. 2021). Koska kuitenkin poroja
pidetään lisääntyvässä määrin aitauksissa ja niitä ruokitaan talvella, ne saattavat ajan myötä
tottua ihmisiin ja mahdollisesti myös turbiineihin paremmin kuin villieläimet.

Pikkunisäkkäät ovat erityisen herkkiä elinympäristön häviämislle ja pirstoutumiselle niiden
rajoitetun liikkumiskyvyn vuoksi (Merrick ym. 2021). Siirtymän laajuus riippuu lajin elinympä-
ristövaatimuksista: lajit, jotka pystyvät hyödyntämään monenlaisia elinympäristöjä, siirtyvät
todennäköisesti vähemmän. Suurten nisäkäspetojen runsauden on havaittu lisääntyvän tuuli-
voimalaitosalueilla sorateiden tarjoaman paremman kulkuyhteyden ansiosta (Gómez-Catasús
ym. 2021).

4.5. Ei-siirtymät

Noin kolmasosassa tapauksia ei havaittu merkitsevää siirtymistä, mikä selittyi useimmiten me-
todologisilla tekijöillä, kuten pienellä otoskoolla, havaintojen puuttumisella ennen rakenta-
mista, lyhyellä seuranta-ajalla, harvoilla tai yksittäisillä havaintopaikoilla tai vaikeutena erottaa
etäisyysvaikutuksia elinympäristöolosuhteista. Vaikka aiemmissa katsaustutkimuksissa on
suositeltu nk. BACI-tutkimuksia (Before-After-Control-Impact) (Marques ym. 2021, Schöll &
Nopp-Mayr 2021), niiden määrä ei näyttänyt ajan myötä kasvaneen. Yksi syy voi olla tuulivoi-
man nopea lisääntyminen, joka rajoittaa mahdollisuuksia käynnistää tieteellisesti pätevää seu-
ranta ennen turbiinien rakentamista. Lisäksi BACI-tutkimukset vaativat huomattavia resurs-
seja, sillä ne edellyttävät pitkäaikaista seuranta ja tutkimuspaikkojen ja ajanjaksojen harmo-
nisointia. Vaikka BACI-menetelmä on luotettava, se ei välttämättä sovellu pikkunisäkkäille, joi-
den populaatiot voivat vaihdella huomattavasti vuodesta toiseen vaikeuttaen vaikutusten ha-
vaitsemista eri vaiheissa.

Mielenkiintoista on, että siirtymättömyys – mukaan lukien attraktio – riippui myös laji- ja yksilökohtaisista tekijöistä. Esimerkiksi petolintujen nuori ikä sekä saalistajien välttämistästrategiat, kuten varpuslintujen kerääntyminen avoimille alueille suurina parvina, vaikuttivat tuloksiin. Lajikohtaiset tekijät ja elinympäristöolosuhteet esiintyivät usein yhdessä, liittyen esimerkiksi varpuslintulajien elinympäristöpreferensseihin: osa lajeista suosi häiriintyneitä elinympäristöjä, kun taas kahlaajat saattoivat hakeutua tuulivoimalaitosten sorapohjille pesimään, ja kanalinnut käyttivät alueita ruoansulatusmateriaalin lähteinä. Houkuttelu saattoi myös lisätä törmäysriskiä, ja esimerkiksi kanalinnut törmäsivät roottoreiden sijaan turbiinien torneihin.

Lepakoiden attraktion on puolestaan ehdotettu johtuvan parantuneista ruokailumahdollisuuksista, sillä turbiinit voivat kerätä hyönteisiä (Rydell ym. 2010), tai lepakot saattavat sekoittaa ne korkeisiin puihin (Goldenberg ym. 2021). Rehling ym. (2023) huomauttivat myös, että herkäät lepakkolajit saattavat kadota jo rakennusvaiheessa, ja jos seuranta toteutetaan vasta turbiinien käyttöönoton jälkeen, paikan päälle jäävät sietokykyisemmät yleislajit voivat antaa vaikutelman siitä, ettei tuulivoiman rakentamisella ole merkittävää ekologista vaikutusta.

4.6. Miten tietoa siirtymästä ja ei-siirtymästä voidaan käyttää tuulivoiman aiheuttamien haittojen lieventämiseen?

Tuulivoiman turvaetäisyyksiä koskevat ohjeet ovat yhä tärkeämpiä tuulivoimakapasiteetin nopean kasvun myötä. Haittojen lieventämishierarkia (tai mitigaatiohierarkia), joka sisältää välttämisen, lieventämisen ja kompensoinnin vaiheet (BBOP 2012), on ehdotettu strategiaksi tuulivoiman kehittämisen aiheuttamien populaatiovaikutusten vähentämiseksi.

Koskien lieventämishierarkian välttämävaihetta siirtymäetäisyydet tarjoavat tietoa eläinten elinympäristön toiminnallisesta menetyksestä. Tätä tietoa voidaan hyödyntää tuulivoimalaitosten sijoittamisessa arvioimalla laitosten päällekkäisyyttä herkkien lajien elinympäristöjen kanssa. Esimerkiksi lintujen ja lepakoiden muuttoreittejä sekä muita arvokkaita elinympäristöjä voidaan välttää, mikäli sopivia, jo heikentyneitä alueita löytyy. Suomessa esimerkiksi entiset turvetuotantoalueet tarjoavat potentiaalisia sijoituspaikkoja tuulivoimalle niiden valmiiksi heikentyneen ekologisen tilan vuoksi (Räsänen ym. 2023).

Vaikka siirtymäetäisyyksien ei ole havaittu riippuvan turbiinien teknisistä ominaisuuksista, kuten koosta (Pearce-Higgins ym. 2012, Stewart ym. 2007), on todennäköistä, että tuulivoimaloiden koon ja määrän kasvu lisää eläinten siirtymää. Tuulivoiman vaikutuksia ei voida todennäköisesti täysin välttää kaikissa arvokkaissa elinympäristöissä, jolloin lieventämishierarkian toinen vaihe, eli lieventäminen (tai minimointi) tulee keskeiseen rooliin. On esimerkiksi havaittu, että pienialaisten, mutta ekologisesti arvokkaiden elinympäristöjen säilyttäminen tuulivoimalaitosten sisällä voi vähentää elinympäristön menetyksen vaikutuksia hirvikannoille (Walter ym. 2006).

Törmäysten ehkäisyn kannalta ei-siirtymää koskeva tieto on erityisen tärkeää. On havaittu, että tuulivoimaloiden tornien maalaaminen mustaksi voi jossain määrin vähentää kanalintujen törmäyksiä (Coppes ym. 2020b, Stokke ym. 2020), kun taas roottorien maalaaminen voi vähentää petolintujen kuolleisuutta yli 70 % (May ym. 2020). Automaattinen tuulivoimaloiden pysäytys hanhikorppikotkien (*Gyps fulvus*) läheisyydessä vähensi törmäyskuolemia yli 90 % samalla kun arvioitu energiantuotannon menetys oli alle 0,5 % (Ferrer ym. 2022). Lepakoiden kuolleisuutta on puolestaan saatu vähennettyä 63 % rajoittamalla turbiinien toimintaa niiden läheisyydessä (Adams ym. 2021). Modernit algoritmipohjaiset tuulivoimaloiden rajoitus- ja

pysäytystoimenpiteet, jotka ennustavat lepakoiden liikkumista ympäristötekijöiden perusteella, näyttävät lupaavilta keinoilta vähentää lepakoiden kuolleisuutta vielä paremmin (Barré ym. 2023).

Kompensointi on haittojen lieventämishierarkian viimeinen vaihe, ja siihen kuuluu arvokkaiden elinympäristöjen palauttaminen tai uusien luominen tuulivoimahankkeiden lähialueille. Esimerkiksi naapurimetsien suojeleminen (Ellerbrok ym. 2022) ja vesiviljelyalaiden rakentaminen (Xu ym. 2021) ovat mahdollisia toimenpiteitä, mutta ne on toteutettava törmäysriskit huomioiden. Lepakoiden on havaittu hyötyvän viljelemättömistä kesantoalueista, pensakoista ja nurmikaistaleista, vaikkakin niiden vasteet niihin vaihtelevat lajeittain ja kausittain (Millon ym. 2015). Tuulivoimayhtiöt voisivat osallistua vapaaehtoiseen kompensatio-ohjelmiin, jotka lieventäisivät monimuotoisuuden kohdistuvia vaikutuksia ja edistäisivät sitä kautta tuulivoiman hyväksyttävyyttä.

Turvaetäisyyksien ja lieventämiskeinojen määrittely on haastavaa, sillä tutkimustieto on hajanaista ja lajien käyttäytymisvasteet vaihtelevat lajien, yksilöiden ja niiden elinkierron vaiheesta riippuen, samoin kuin ajallisesti vuodenaikojen ja vuosien välillä. Tämä vaihtelu edellyttää tutkimuksia siirtymän (ja attraktion) taustalla olevista fysiologisista ja käyttäytymiseen liittyvistä mekanismeista, lajikohtaisten vasteiden pitkän aikavälin seuranta sekä alueellisten ja ajallisten erojen tarkastelua. Lisäksi tarvitaan tutkimusta, joka hyödyntää standardoituja menetelmiä ja tehokkaita indikaattoreita. Johdonmukaisesti mitattuja tietoja siirtymän taustalla olevista mekanismeista voitaisiin käyttää malleissa, jotka yleistävät vasteita eri eliöryhmille ja ekosysteemeille. Yhdistämällä ekologista siirtymätietoa talouteen, eli energiantuotannon kustannuksiin ja hyötyihin, voitaisiin optimoida tuulivoiman haittavaikutusten lieventämiskeinoja.

4.7. Menetelmäpuutteet

Katsauksellamme on useita metodologisia rajoituksia. Seuloimme tutkimukset manuaalisesti otsikoiden, tiivistelmien ja lopulta koko artikkelin perusteella. Tämä lähestymistapa voi aiheuttaa epävarmuutta sen suhteen, sisällyttimmekö tai jätimmekö pois kaikki relevantit tutkimukset. Jos tutkimus osoitti tuulivoiman läheisyyden vaikuttavan lajiin, mutta siinä ei esitetty numeerisia etäisyystietoja tai etäisyyttä ei voitu luotettavasti johtaa kuvista tai taulukoista, tutkimus jouduttiin jättämään pois. Tämä voi aiheuttaa havaintojen vinoutumista ja johtaa siirtymää osoittavien tutkimusten aliarviointiin. Emme voi myöskään arvioida tämän vinouman suuruutta. Lisäksi havaitut siirtymäetäisyydet eivät välttämättä kerro, olisivatko vaikutukset ulottuneet vielä kauemmas.

Tarkastelimme vain vertaisarvioituja, englanninkielisiä tieteellisiä tutkimuksia. Näin varmistimme, että ne perustuivat tieteellisesti arvioituihin menetelmiin. Tämä sulki kuitenkin pois suuren määrän mahdollisesti olennaisia raportteja ja harmaan kirjallisuuden julkaisuja, mahdollisesti vinouttaen tuloksia erityisesti Euroopan ja Pohjois-Amerikan tutkimusten suuntaan. Toisaalta harmaan kirjallisuuden sisällyttäminen olisi voinut tuoda uuden vinouman kohti ainostaan helposti saatavilla olevia ja käännettävissä olevia julkaisuja.

4.8. Yhteenveto tuulivoiman monimuotoisuusvaikutuksista

Tutkimuksemme perusteella noin kahdessa kolmasosassa 160 tarkastellusta tapauksesta havaittiin siirtymää, ja etäisyydet vaihtelivat huomattavasti sekä lajien välillä että niiden sisällä. Erityisesti kurjet, pöllöt, porot ja kanalinnut voivat reagoida tuulivoimaan useiden kilometrien säteellä, mikä viittaa huomattavaan toiminnallisen elinympäristön menetykseen näillä lajeilla. Petolintujen ja lepakoiden kohdalla siirtymä ja törmäykset muodostavat kaksiteräisen miekan: populaatiot pienenevät riippumatta siitä, tapahtuuko siirtymistä vai ei.

Katsaus tarjoaa tietoa etäisyysrajoista, joita voidaan hyödyntää tulevien tuulivoimahankkeiden suunnittelussa. Tieto siirtymäetäisyyksistä auttaa lieventämään tuulivoiman haitallisia vaikutuksia välttämällä uhanalaisille lajeille tärkeitä arvokkaita elinympäristöjä, minimoimalla elinympäristön menetyksiä ja törmäysriskejä sekä palauttamalla tai luomalla korkealaatuisia elinympäristöjä korvauksena lajien toiminnallisen elinympäristön menetykselle.

Tuulivoiman etäisyysvaikutuksia koskevaa tieteellistä tutkimustietoa on vielä käytettävissä hyvin vähän, ja Suomessa sitä ollaan vasta tuottamassa. Tulokset voivat siis muuttua tiedon lisääntyessä. Kansainvälisiin julkaisuihin pohjautuva katsaustutkimus on herättänyt kysymyksiä sen soveltuvuudesta Suomen oloihin. Eri maissa on erilaiset ympäristöolosuhteet samoin kuin niiden lajit yleensä eroavat kotimaisesta lajistostamme. Voidaan kuitenkin olettaa, että tietyt ekologiset periaatteet pätevät alueesta ja lajista riippumatta. Esimerkiksi metsäisiin ympäristöihin sopeutuneet lajit todennäköisesti reagoivat tuulivoimaan herkemmin kuin avoimia ja häiriittyjä elinympäristöjä suosivat lajit, maasta ja lajista riippumatta. Tutkimukset ovat aina otoksia, eikä kaikkia alueita voida koskaan kattavasti tutkia.

Esimerkkinä voidaan käyttää myös metsäpeuraa. Lajin seurantalutkimukset ovat tämän raportin ilmestyessä vasta meneillään, jolloin joudutaan soveltamaan Ruotsissa ja Norjassa tehtyjä porotutkimuksia, jotka ovat parasta tietoa, mitä tällä hetkellä käytettävissä on. Poroilla tehdyt tutkimukset eivät luonnollisestikaan täysin sovellu metsäpeuraan, joka on metsäisiin ympäristöihin sopeutunut ja ihmiseen tottumaton laji. Koska poro on tottunut ihmistoimintaan, voidaan olettaa, että metsäpeuran siirtymäetäisyydet ovat todennäköisesti vielä suurempia kuin se viisi kilometriä, mitä poroilla on Ruotsissa ja Norjassa todettu keskimäärin olevan. Niin kauan kuin meillä ei ole kotimaista tietoa saatavilla, olisi syytä noudattaa varovaisuusperiaatetta ja tarkastella metsäpeuraympäristöjä erityisellä huolella tuulivoimaa sijoitettaessa.

Lopuksi on huomioitava, että useimmat katsauksessa tarkastellut tutkimukset keskittyivät alle 100 metriä korkeisiin turbiineihin. Nykyisin rakenteilla olevista turbiineista on vielä hyvin vähän tietoa.

5. Tuulivoima osana monitavoitteista metsäsuunnittelua

5.1. Tuulivoima ja audiovisuaaliset häiriöt: metsämaiseman suojaava vaikutus

Tuulivoiman kasvu Suomessa on ollut nopeaa, sen osuus sähköntuotannosta nousi vuoden 2019 7 %:sta lähes 25 %:iin vuonna 2024 (Suomen Uusiutuvat). Teknologinen kehitys, kuten korkeat tornit ja pitkät lavat, on mahdollistanut hyvän tuulienergiatuotannon myös metsäisillä alueilla (Sogachev ym. 2020). Tuulivoiman nopea kasvu on kuitenkin tuonut mukanaan uusia ympäristöhaasteita, erityisesti maisema-arvoihin ja audiovisuaalisiin häiriöihin liittyen. Ihmisten asenteet tuulivoimaa kohtaan vaihtelevat ja erityisesti turbiinien läheisyydessä asuvien keskuudessa visuaaliset ja ääniin liittyvät häiriöt voivat herättää kielteisiä tunteita, mikä korostaa tarvetta löytää ratkaisuja, kuten maisema-arvokauppa, paikallisten hyväksynnän parantamiseksi (Pouta ym. 2024, Luku 8).

Suomessa suurin osa tuulivoimalaitoksista on rakennettu metsäisille alueille. Tutkimuksia metsän roolista melunvaimennuksessa (esim. Kellomäki ym. 1976, Tarrero ym. 2008) tai toimimisesta visuaalisena esteenä (Haapakangas ym., 2020) on kuitenkin niukasti, ja vielä vähemmän niitä on nimenomaan tuulivoimaan liittyen (Wondollek 2009).

Tämä luku esittelee lyhyesti tutkimuksen, jossa selvitettiin, millainen suojaava vaikutus metsällä voisi olla koskien turbiinien melun vaimennusta. Lisäksi tutkittiin, millainen metsä voisi toimia visuaalisena esteenä, eli eräänlaisena maisemakilpenä (ks. myös Luku 8.6) pienentäen turbiinien visuaalisia haittoja. Tutkimus julkaistiin tieteellisessä artikkelissa Selkimäki ym. (2024).

Turbiinien melumallinnukset tehdään suunnitteluvaiheessa, jolloin selvitetään, miten turbiniesta aiheutuva melu jakaantuu maisemassa. Nykyiset melumallit ovat monimutkaisia ja sisältävät useita fysikaalisesti toisiinsa liittyviä parametreja. Mallinnukset perustuvat useimmiten ISO 9613-2 (1996) tai Nord2000 (2000) -malleihin. Laskennat tehdään tyypillisesti koviille pinoille tai käytetään vakiota, joka on sama sekä metsä- että viljelymaille. Metsät kuitenkin kasvavat ja voivat olla rakenteeltaan hyvin vaihtelevia, minkä takia myös niiden äänenvaimennuksessa ja maiseman suojavaikutuksessa on eroja.

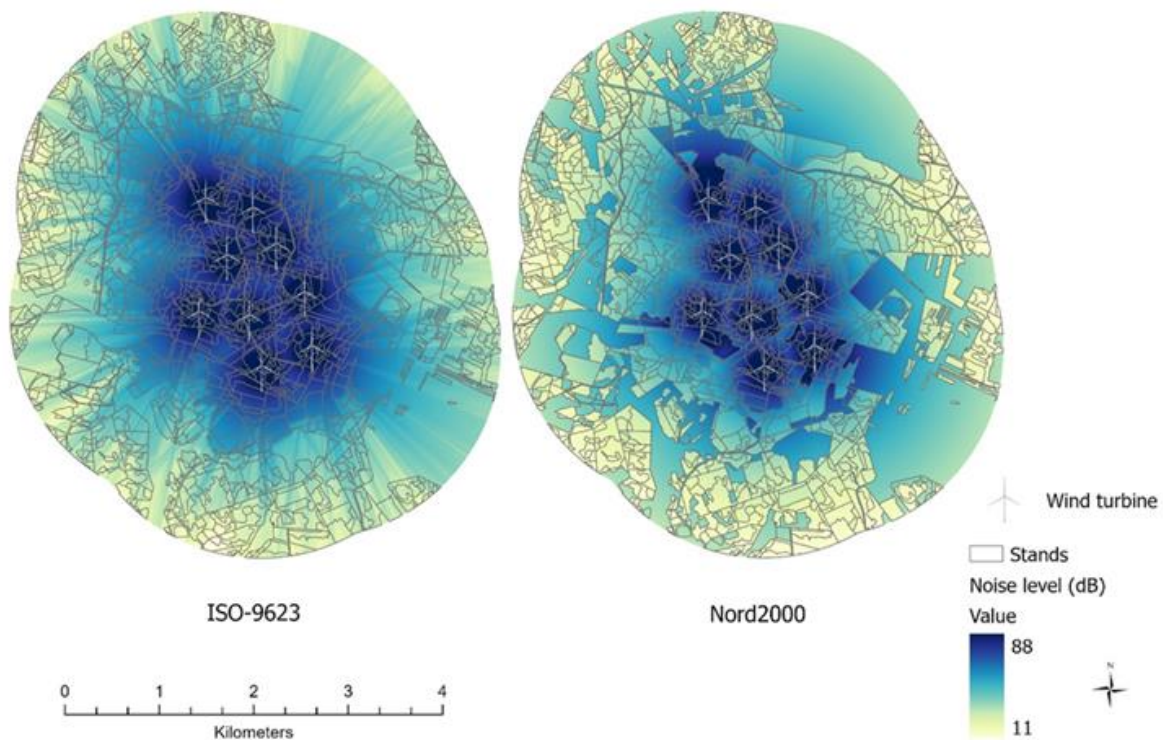
Tässä työssä testattiin yksinkertaistettua melumallia, jossa vaimennusvaikutus suhteutetaan metsikön rakenteeseen, ja mallia sovellettiin GIS-ympäristöön. Tulokset viittaavat siihen, että metsät voivat toimia tehokkaina meluesteinä, ja äänenvaimennustaso vaihtelee sen mukaan, kuinka pitkän matkan ääni kulkee metsän läpi, sekä metsän rakenteesta riippuvista muuttujista kuten puiden läpimitasta ja tiheydestä.

Tulosten mukaan metsät voivat vaimentaa melua jopa 10 dB, jos ääni kulkee puuston läpi. Tulos on linjassa aiempien tutkimusten kanssa (Kellomäki ym. 1976, White and Swearingen 2004). Jos äänilähde on korkealla (kuten turbiinit), metsä alkaa kuitenkin toimia melusuojana 500 metrin – 1 500 metrin etäisyydellä metsän korkeudesta ja maan pinnanmuodosta riippuen (Kuva 8).

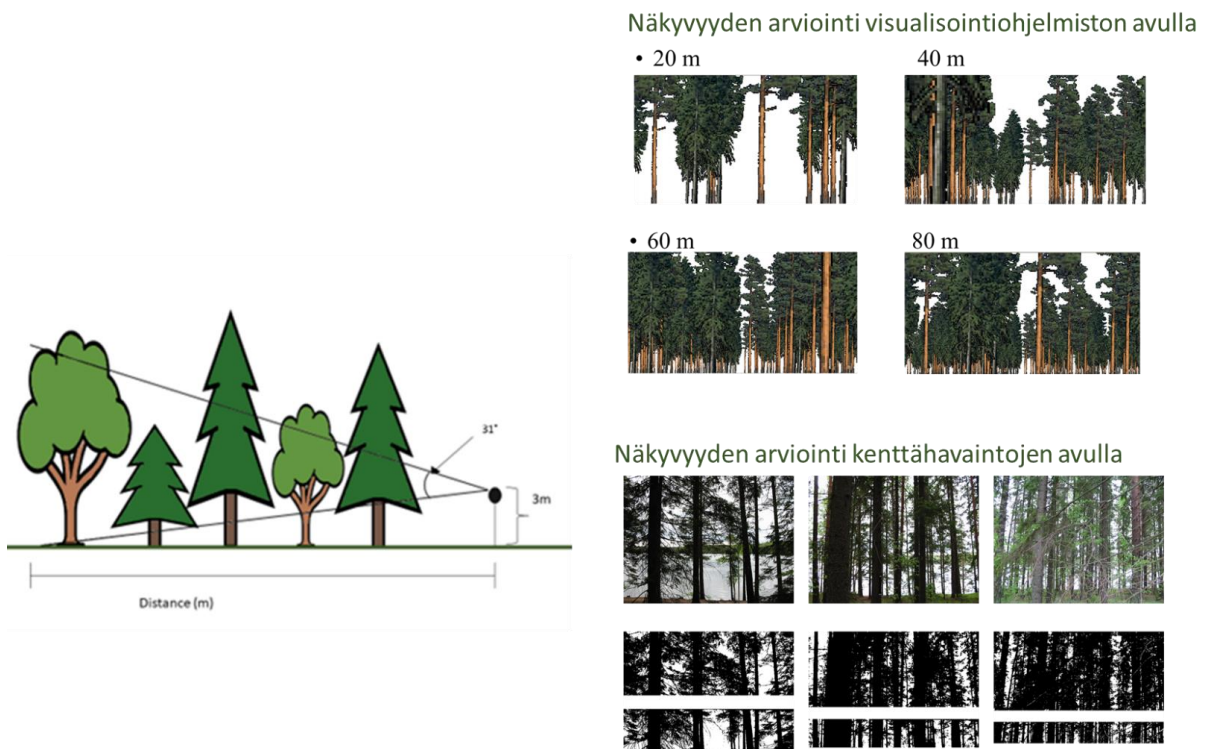
Tutkimuksessa laadittiin myös näkyvyysmalli, joka arvioi turbiinien näkyvyyttä metsän läpi ottaen huomioon puiden koon, tiheyden, puulajit sekä aluskasvillisuuden ja harvennustoimenpiteet (Kuva 9). Tulokset osoittavat, että kuusikko toimii hyvänä visuaalisena rajoitteena, kun taas näkyvysetäisyydet kypsissä kanervatyypin mäntymetsissä ovat yleensä laajempia.

Molemmat mallit, sekä melu- että näkyvyys-, sisälsivät muuttujia, joita voidaan säätää metsänhoidon mukaan, mikä mahdollistaa niiden integroinnin metsäsuunnitteluohjelmistoihin. Kaiken kaikkiaan tässä tutkimuksessa esiteltiin suuntaa antavia menetelmiä, joilla voidaan arvioida metsäisten maisemakilpien potentiaalia, ja käsitteellä voi olla laajoja sovelluksia liittyen myös esimerkiksi maisema-arvokauppaan (Mäntymaa ym. 2024b; Luku 8.6). Mallien avulla voidaan mahdollisesti määrittää, millainen metsäkilpi toimisi parhaiten sekä arvioida sen mahdollista kompensatiokorvauksen suuruutta metsäomistajalle.

Aihe kaipaa kuitenkin vielä lisää tutkimusta. Melumalliin voitaisiin esimerkiksi tehdä parannuksia ottamalla huomioon tuulen suuntautuvuus, koska ääni kulkee pidemmän matkan tuulen alapuolella (Hannah 2006). Lisäksi olisi hyödyllistä kehittää tarkempia melumalleja, joissa otetaan huomioon eri puulajit ja niiden vaikutukset melun vaimenemiseen.



Kuva 8. Metsän vaikutus melun vaimenemiseen käytetyillä malleilla (Selkimäki ym. 2024).



Kuva 9. Metsämaisema näkyvyydsmallin laatiminen.

5.2. Tuulivoiman melutason säätely optimoidulla metsänhoitosuunnitelmalla

Metsät voivat toimia tehokkaasti meluesteenä, ja niiden melunvaimennuskyky vaihtelee metsän ominaisuuksien mukaan (Selkimäki ym. 2024). Vaimennustaso riippuu erityisesti äänen kulkeutumismatkasta metsän läpi sekä puiden koosta ja tiheydestä. Tässä tutkimuksessa metsän rakenteeseen perustuva melumalli sisällytettiin metsäsuunnittelulaskelmiin. Tavoitteena oli pyrkiä lieventämään turbiinien aiheuttamaa melusaastetta sekä tarkastella eri metsänkäsittelyvaihtoehtojen vaikutusta melutasoihin. Tutkimus julkaistiin tieteellisessä artikkelissa Heino ym. (2024).

Realistisimpia skenaarioita, joihin sisältyy tasainen hakkuukertymä, tarkasteltiin visuaalisesti kolmen 10-vuotiskauden aikana tasaikäisen (A) ja tasaikäisen sekä eri-ikäisen metsänhoidon osalta (B) (Kuva 10). Keskeisin havainto oli, että tasaikäisen ja eri-ikäisen metsänhoidon seurauksena hakkuualaa, erityisesti harvennuksia, oli selvästi enemmän (kuvissa sinisellä värillä merkityt). Korjuualat jakautuivat jokseenkin tasaisesti koko tutkimusalueelle, kun lineaarista osahyötyfunktioita sovellettiin tasaikäisen metsänhoidon yhteydessä. Sitä vastoin sigmoidin muotoinen osahyötyfunktio näytti siirtävän hakkuuta pois turbiinien läheisiltä paikoilta, joissa melutaso (TN) on korkein. Tämän seurauksena nämä alueet pysyivät metsäisinä, jotta turbiinien melutaso pysyisi pienempänä eikä häiritsisi. Tämä vaikutus oli selvästi havaittavissa, kun turbiinin melutaso oli optimoinnin ainoa tavoite.

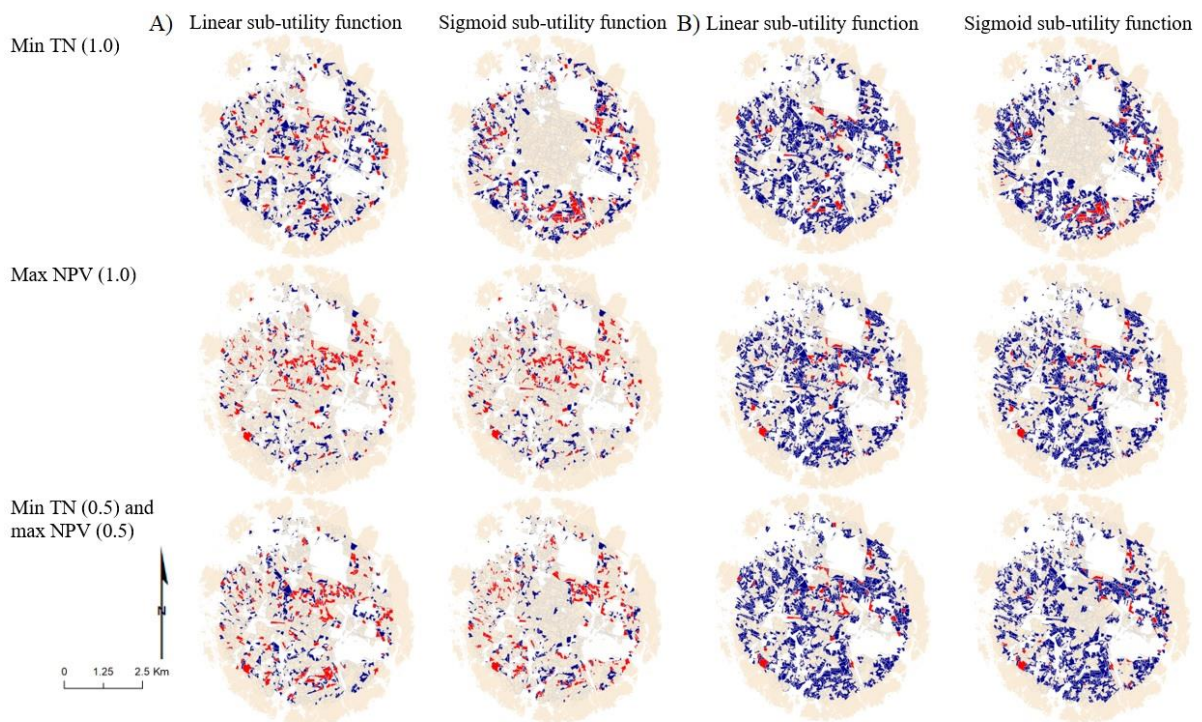
Tutkimuksessa käytetty hajautettu optimointimenetelmä laskee tavoitefunktion kuviokohtaisesti. Tämä lähestymistapa pienentää hakuavaruutta ja tekee laskennasta tehokkaampaa, mutta mahdollistaa myös hienojakoisempien tietojen, kuten mikrosegmenttien tai rasterisolu-
jen, sisällyttämisen. Näin laskelmiin voidaan sisällyttää yksityiskohtaisempi kuvaus

maisemasta ja metsistä, mikä auttaa lieventämään turbiinien meluvaikutuksia. Hajautettu menetelmä tarkoittaa myös sitä, että suunnittelulaskelmat voidaan suorittaa laajemmilla alueilla. Esimerkiksi maankäytön kohdentamiseen liittyviä ongelmia voidaan käsitellä laajempien, usean turbiinin tuulivoimalaitosten mittakaavassa. Menetelmällä on siis paljon potentiaalia tulevaisuuden tutkimuksissa, jotka liittyvät melun tai näkyvyyden vähentämiseen metsänhoidossa.

Melumallin sisällyttäminen metsänhoidon tavoitteeksi vähensi melutasoja pilottitutkimusalueella merkittävästi, mikä oli parempi kuin perinteiset tavanomaiset metsänhoitostrategiat. Lisäksi eri-ikäisen ja tasaikäisen metsänhoidon yhdistelmällä saatiin aikaan metsäisempi maisema, joka oli tehokkaampi korkeampien melutasojen lieventämisessä.

Melumallin käyttö metsäsuunnittelussa voi alentaa melutasoja verrattuna niin sanottuun tavanomaiseen metsänkäsittelyyn. Useiden metsäsuunnittelun tavoitteiden muotoilu ajan myötä vaikuttaa suoraan optimoinnin tuloksiin maisematasolla, kuten tässä tutkimuksessa osoitettiin. Metsänhoidon suunnittelussa on tyypillisesti useita tavoitteita ja rajoitteita, eivätkä yksittäisten uusien muuttujien vaikutukset ole aina kovin selkeitä. Taloudellisten arvojen lisäksi suunnitteluprosessiin sisällytetään hyvin usein luonnon monimuotoisuutta ja maisematasoa koskevia tavoitteita.

Tulokset antavat tärkeitä tietoja, jotka yhdessä lisätutkimusten kanssa voivat ohjata tulevaa metsäsuunnittelua ja -hoitoa kohti kestävämpää kehitystä ja vaikuttaa tuulivoiman hyväksyttävyyteen.



Kuva 10. Kolmannen 10-vuotiskauden hakkuualueet, kun käytetään A) tasaikäistä metsänhoitoa ja B) tasaikäistä sekä eri-ikäistä metsänhoitoa ja lineaarista tai sigmoidista osahyötyfunktioita turbiinien melutavoitteen saavuttamiseksi. Punainen väri = uudistushakkuu ja sininen väri = harvennus (Heinonen ym. 2024).

5.3. Monitavoitteinen maankäytön analyysi tuulivoimalle luonnon monimuotoisuus huomioiden

Tuulivoiman nopea leviäminen asettaa haasteita maankäytön suunnittelulle, jossa joudutaan tasapainottelemaan keskenään ristiriitaisten vaihtoehtojen välillä. Maankäytön soveltuvuuden arviointi voi toimia arvokkaana suunnitteluvälineenä erityisesti kriittisten maankäyttömuotojen, kuten energiantuotannon, kohdentamisessa ja auttaa päätöksentekijöitä maankäytön optimoinnissa. Tässä osatutkimuksessa kartoitettiin monitavoitteisella paikkatietoanalyysillä (GIS-MCE) uusia, tuulivoimalaitoksille soveltuvia alueita huomioiden taloudelliset, teknologiset, sosiaaliset ja ympäristökriteerit. Uusille tuulivoimalle soveltuvien alueiden tunnistaminen on haastavaa, ja monitavoitteinen paikkatietoanalyysi tarjoaa tähän tehokkaan ratkaisun.

GIS-pohjainen monikriteerinen päätösanalyysi (MCDA) yhdistää paikkatiedot ja muut relevantit tiedot monimutkaisissa päätöksentekoprosesseissa, mahdollistaen useiden kriteerien arvioinnin ja vertailun (Malczewski & Rinner 2015). Menetelmä mahdollistaa erilaisten paikkatietojen tarkastelun siten, että mahdollisesti keskenään ristiriitaiset maankäytön tavoitteet voidaan ottaa huomioon. MCDA:ssa eri tavoitteita ja vaihtoehtoja vertaillaan ja arvotetaan suhteessa arviointikriteereihin, joita voivat olla esimerkiksi ympäristövaikutukset tai sosiaalinen hyväksyntä. Eri kriteereiden vertailussa käytetään analyyttistä hierarkiaprosessia (AHP), jossa kriteereitä vertaillaan pareittain. Tämä vertailu tuottaa numeerisen tuloksen, jota voidaan käyttää arviointiperusteiden painoina kokonaistuloksen laskennassa (Saaty 1980).

Soveltuvuuden arviointi perustui Siemens-Gamesa SG-6.6 170 -tuuliturbiinimalliin, jonka napakorkeus on 200 metriä ja lavan pituus 85 m. Tutkimusalueena toimi Satakunta, jossa on jo 25 tuulivoimala-alueita, ja useita uusia voimaloita on eri suunnitteluvaiheissa. Tuulivoimaloille sopivimmat alueet arvioitiin taloudellisten ja teknisten tekijöiden, kuten tuulivoimapotentiaalilin, etäisyyden kantaverkosta ja maanpinnan kaltevuuden suhteen, sekä maankäyttöä koskevien rajoitusten (Taulukko 6) perusteella. Biologisen monimuotoisuuden indikaattoreina käytettiin monimuotoisuudelle tärkeiden metsäalueiden aineistoa (alueellinen Zonation), jossa on pyritty tunnistamaan aiemmin suojelemattomat monimuotoisuudelle arvokkaat metsät. Lisäksi käytettiin Suomen Punaisen listan lajihavaintoja FinBIF (2024) sekä GTK:n hallinnoimaa soiden luonnontilaisuusluokittelua.

Tutkimuksen GIS-MCE-malli koostui kolmesta syötteestä: (1) Boolean muotoon uudelleen luokitellut maankäyttörajoituksiin perustuvat tasot (Taulukko 6), joka tuotti numeerisen tason, jossa 0 = ei-sopivat ja 1 = sopivat alueet; (2) valittujen muuttujien epätarkkarajaisesti (fuzzy) uudelleenluokitellut tasot, jossa arvot skaalataan 0 ja 1 välille; (3) AHP-matriisien avulla johdetut muuttujien painotukset. Analyysi tehtiin Terrset2000 paikkatieto-ohjelmalla.

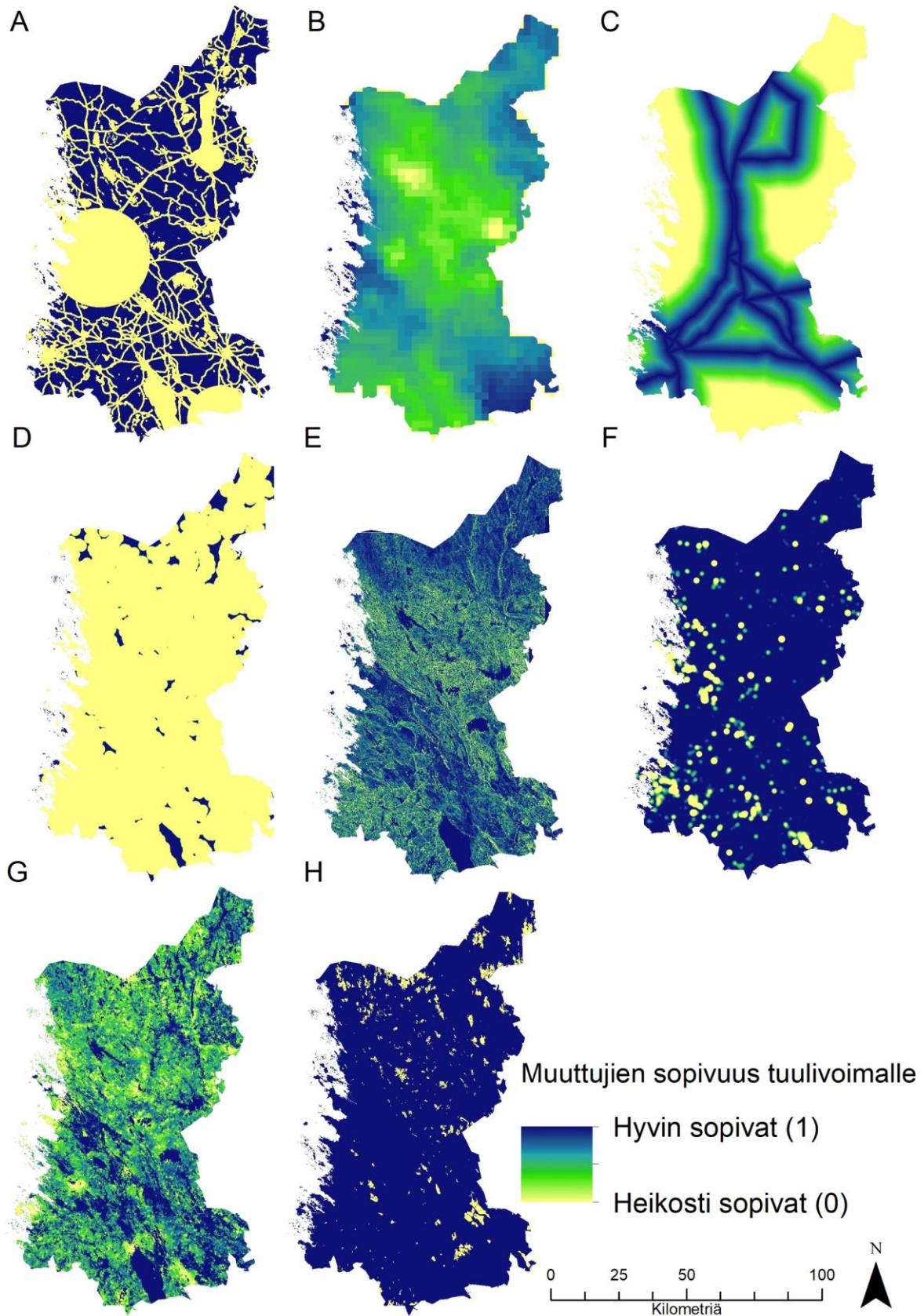
Suurin osa tuulivoimalle asetetuista rajoituksista (Taulukko 6) on määritelty liikennehallinnon toimesta (Liikennevirasto 2012) lento-, raide- ja tieliikenteen turvallisuuden vuoksi, kun taas asuinrakennusten ja vapaa-ajan asuntojen osalta turvallisuusrajoitukset perustuvat turbiinien melutasoon, jonka tulisi olla alle 45 dB päivällä ja 40 dB yöllä (Valtioneuvoston asetus 527/2014). Lisäksi turbiinien 1,5-kertainen korkeus on suositeltava turvaetäisyys muihin laitoihin, teollisuuteen ja urheilualueisiin jääheittoriskin vuoksi (Seifert 2003). Etäisyys olemassa oleviin turbiineihin suositellaan turbulenssin ja varjostusvaikutuksen vuoksi viisinkertaiseksi roottorin halkaisijaan nähden, joten tässä tutkimuksessa käytetyn turbiinimallin mukainen suojaetäisyys on 860 metriä.

Taulukko 6. Maankäytön rajoitukset uusien tuuliturbiinien sijoittamisessa.

Maankäyttöluokka	Suojaetäisyys (m)	Lähde
Muut rakennukset, teollisuus, urheilu jne.	428	Seifert ym. (2003)
Tiet yli 100 km/t*	335	Liikennevirasto (2012)
Muut tiet*	315	Liikennevirasto (2012)
Rautatiet*	315	Liikennevirasto (2012)
Suojelualueet	1 000	Gauglitz ym. (2019)
Lentorajoitusalueet	18 000	ANS Finland (2021)
Varalaskentupaikka	12 000	Liikennevirasto (2012)
Säätutka	5 000	OPERA II (2006)
Olemassa olevat turbiinit	860	Motiva (2024)

* Etäisyys rautateihin turbiinin kokonaiskorkeus + 30 m, tiet kokonaiskorkeus + 30 m, päätiet >100 km/t kokonaiskorkeus + 50 m (Liikennevirasto 2012).

Maankäyttörajoitteet ja suojaetäisyydet toimivat Boolean-operaattorina, rajaten tietyt alueet pois tuulivoimalle soveltuvista alueista (Kuva 11A). Muiden muuttujien arvot skaalattiin tuulivoimalle sopivuuden suhteen siten, että 0 tarkoittaa ei-sopivaa ja 1 sopivaa aluetta. Tuulivoimatuotannon määriteltiin olevan kannattavaa alueilla, joiden potentiaalinen tuotanto on ylittää 17 GWh (Kuva 11B). Kantaverkon läheisyys määriteltiin parhaiten sopivaksi, kun etäisyys on alle 12 km (Kuva 11C). Analyysissä asuinrakennusten minimietäisyytenä käytettiin yhtä kilometriä, minkä jälkeen soveltuvuus kasvaa vähitellen sigmoidifunktion mukaan kahteen kilometriin asti, jonka jälkeen alueet katsotaan täysin soveltuviksi (Kuva 11D). Rinteiden kaltevuuden vaikutusta rakennuskustannuksiin huomioitiin siten, että soveltuvuus alkaa laskea 10 % kaltevuudesta alkaen ja alueet, joiden kaltevuus ylittää 30 %, eivät ole enää soveltuvia (Kuva 11E). Uhanalaisten lajien esiintymistiheyttä (havaintoa/km²) käytettiin soveltuvuuden määrittämisessä siten, että soveltuvuus alkaa heikentyä yhden havainnon jälkeen, ja alue ei ole enää sopiva, jos havaintoja on yli 10 (Kuva 11F). Monimuotoisuudelle arvokkaiden metsien indikaattori arvo (0 = matala ja 1 = korkean biodiversiteetin alue) käännettiin päinvastaiseksi tuulivoimalle soveltuvuuden suhteen (Kuva 11G). Soiden luonnontilaisuuden muuttuja skaalattiin siten, että luonnontilaisimmat suot katsottiin vähiten sopiviksi, kun taas peruuttamattomasti muuttuneet suot katsottiin osittain sopiviksi (arvo 0.75) (Kuva 11H).

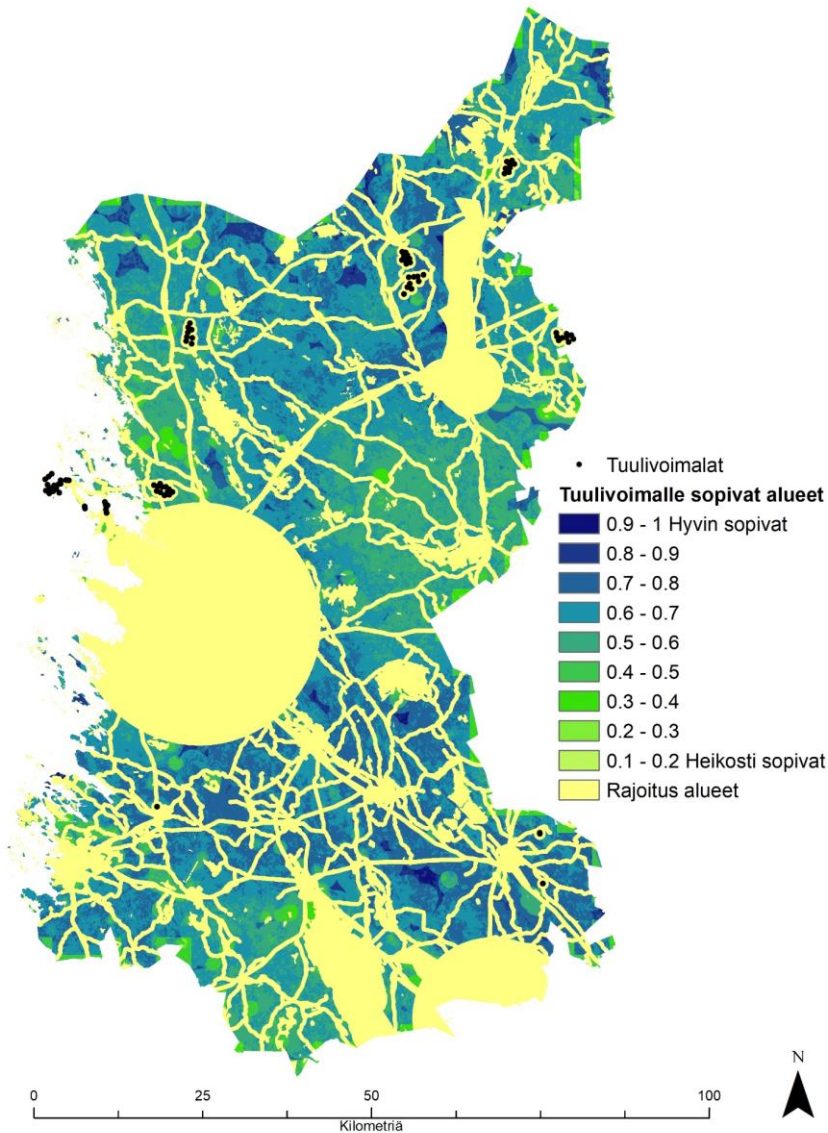


Kuva 11. Käytettyjen muuttujien uudelleen luokitellut tasot: A maankäytön rajoitukset; B tuulivoimatuotanto; C etäisyys kantaverkkoon; D etäisyys asuinrakennuksiin; E rinteiden kaltevuus; F punaisen listan lajit; G monimuotoisuudelle arvokkaat metsät ja H soiden luonnontilaisuusluokka.

Muuttujien vertailu tehtiin pareittain AHP-menetelmän mukaisesti siten, että tavoitteena oli priorisoida tuulivoiman rakentamisen kannalta tärkeimpiä muuttujia. Määrittelyssä hyödynnettiin aiempia tutkimuksia sekä tutkimusprojektin asiantuntijoiden näkemyksiä. Jokaisen muuttujan suhteellinen painoarvo määräytyi pareittaisen vertailun arviointiperusteisen kokonaistuloksen laskennassa perusteella (Taulukko 7). Tyypillisesti suurimman painoarvon saivat tuulivoimapotentiaali, etäisyys sähköverkosta sekä etäisyys asuinrakennuksista, kun taas kaltevuudelle annettiin pienempi paino (esim. Gorsevski ym. 2013, Höfer ym. 2016). Tuulivoimaselvitysten ympäristövaikutusarvioinneissa huomioidaan luontodirektiivin IV (Luontotyyppien... 1992) mainitsemat lajit, joiden lisääntymis- ja levähdyspaikkojen hävittäminen ja heikentäminen on kielletty. Tämän vuoksi niillä oli korkeampi paino verrattuna muihin biodiversiteettimuuttujiin.

Taulukko 7. Muuttujien painot MCE analyysissä.

Muuttuja	Paino
Tuulivoimapotentiaali	0.2813
Etäisyys kantaverkkoon	0.1206
Etäisyys asuinrakennuksiin	0.1761
Kaltevuus	0.0508
Punaisen listan lajit	0.1833
Monimuotoisuudelle arvokkaat metsät	0.1370
Soiden luonnontilaisuusluokka	0.0509



Kuva 12. Uusille tuulivoimalaitoksille soveltuvat alueet Satakunnassa sekä olemassa olevat tuulivoimalaitokset.

Uusille tuulivoimalaitoksille soveltuvat alueet on esitetty kartassa (Kuva 12). Pelkästään maankäyttörajoitukset kattavat noin 45 % Satakunnan alueesta, mikä rajoittaa merkittävästi uusien tuulivoimarakentamiseen soveltuvia alueita. Parhaiten sopivia alueita, joissa lähes kaikkien muuttujien soveltuvuusarvot ovat 0.9–1, on noin 11 km² mikä on vain alle 0,2 % koko maakunnan maa-alasta. Jos mukaan lasketaan alueet, joiden soveltuvuus on yli 0.7, saadaan noin 1 126 km² eli noin 24,5 % maakunnan kokonaisalasta.

Merkittävin tuulivoiman rakentamista rajoittava tekijä on asuinrakennusten sijainti. Satakunnassa on paljon maaseutumaista asutusta, joten asuinrakennusten määrä ja sijoittuminen vaikuttavat merkittävästi tuulivoimarakentamisen mahdollisuuksiin. Asuinrakennuksien sijainnit perustuvat Maanmittauslaitoksen maastotietokantaan, mutta tiedot eivät välttämättä kerro, onko rakennuksissa nykyisin asukkaita. Tuulivoiman potentiaalinen tuotanto on suurinta rannikon läheisyydessä sekä maakunnan koillis- ja kaakkoisosissa. Rannikon maatuulivoimaloiden rakentamista rajoittaa kuitenkin asuin- ja lomarakennusta tiheä sijoittuminen näille

alueille. Kantaverkon läheisyydessä soveltuvuusarvot ovat paikoin korkeampia. Rakentaminen kauemmaksi kantaverkosta lisää kuitenkin kustannuksia ja johtaa myös suurempaa metsäkaatoon (ks. myös Luvut 3.2 ja 3.3), sillä voimalinjojen alta on kaadettava puustoa. Uhanalaisten lajien esiintymät keskittyvät rannikoiden läheisyyteen ja monimuotoisuudelle arvokkaiden metsien alueille, mikä heikentää näiden alueiden soveltuvuutta tuulivoimarakentamiseen. Useiden rajoittavien muuttujien kasaantuminen samoille alueille tarkoittaa, että maakunnassa on vain vähän alueita, jotka soveltuvat hyvin uusille tuulivoimavoille.

5.4. Yhteenveto monitavoitteisesta suunnittelusta

Tuulivoiman hyväksyttävyyttä heikentäviä seikkoja ovat muun muassa turbiinien aiheuttama melu ja visuaalinen haitta. Niihin voidaan vaikuttaa metsien käsittelyllä. Tutkimuksemme osoitti, että metsän rakennepiirteellä kuten puiden läpimitalla ja tiheydellä oli merkitystä haittojen vähentämisessä. Metsät voivat vaimentaa melua jopa 10 dB, jos ääni kulkee puuston läpi. Melumallin sisällyttäminen metsänhoidon tavoitteeksi vähensi pilottitutkimusalueen melutasoja merkittävästi perinteisiin metsänhoitostrategioihin verrattuna. Eri-ikäisen ja tasaikäisen metsänhoidon yhdistelmällä saatiin aikaan metsäisempi maisema, joka oli tehokkaampi tuulivoiman korkeampien melutasojen lieventämisessä. Myös metsätyypillä oli merkitystä: näkyvyysmallin mukaan kuusikko toimii hyvänä visuaalisena rajoitteena, kun kanervatyypin mäntymetsät toimivat tässä heikommin.

Metsänhoidon suunnittelussa on tyypillisesti useita tavoitteita ja rajoitteita, eivätkä yksittäisten uusien muuttujien vaikutukset ole aina kovin selkeitä. Tulokset antavat tärkeitä tietoja, jotka yhdessä lisätutkimusten kanssa voivat ohjata tulevaa metsäsuunnittelua ja -hoitoa kohti ja vaikuttaa tuulivoiman hyväksyttävyyteen.

6. Metsänkasvatusmenetelmien kustannustehokkuus hiilivaraston ja monimuotoisuuden näkökulmasta

6.1. Metsänkasvatusmenetelmien vaikutusten arviointi

Jatkuvapeitteinen metsänkasvatus (continuous cover forestry, CCF) on tullut vaihtoehdoksi tasaikäiselle metsänkasvatukselle, ja sen on arvioitu parantavan metsien hiilivarastoja sekä monimuotoisuutta erityisesti vanhan metsän lajiston osalta (Peura ym. 2018, Pukkala 2016). Jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen taloudellinen hyöty on aiheuttanut runsaasti keskustelua, paljolti koska se on riippuvainen metsän rakenteesta ja olosuhteista lähtötilanteessa (Juntinen ym. 2018).

Hankkeen metsiä koskevassa osiossa arvioitiin jatkuvapeitteisen kasvatuksen ja tasaikäisen metsänkasvatuksen vaikutuksia metsien monimuotoisuuteen ja hiilivarastoon, sekä toimenpiteiden kustannustehokkuutta eri maaperä-, ravinteisuus- ja puuston ikäluokissa. Tutkimus julkaistiin tieteellisessä artikkelissa Rana ym. (2024).

Tutkimus tuotti taustatietoa hankkeen muille työpaketeille, joissa arvioitiin tuulivoiman optimaalista sijainninhajausta metsäkadon ja metsän hiilivarastojen pohjalta (Luku 3.3) ja kolmen maankäyttömuodon (tuulivoima, metsänhoito, soiden ennallistaminen) hyväksyttävyyttä (Luku 8).

Tutkimusalueena oli Iin kunta Pohjois-Suomessa. Alueen metsät koostuvat 45 559 metsäkuviosta. Suurin osa (57 %) kuvioista on pieniä, alle yhden hehtaarin kokoisia ja niistä noin 60 % sijaitsee kivennäismailla ja 40 % turvemilla. Pääpuulajit ovat mänty kuusi ja koivu. Kuviot edustavat sekä ravinteikkaita että ravinneköyhiä kasvupaikkatyyppinä. Tutkimusaineistona oli Suomen metsäkeskuksen (www.metsaan.fi) ylläpitämä julkisesti saatavilla oleva metsävaratieto.

6.2. Metsänkasvatusmenetelmien simulointi

Työssä simuloitiin kahta eri metsänkasvatusmenetelmää, tasaikäinen ja jatkuvapeitteinen kasvatusta, ja kummallekin niistä kaksi eri tasoa (Rana ym. 2024, Taulukko 8).

Taulukko 8. Metsänkasvatusmenetelmät, jotka tutkimuksessa simuloitiin.

Metsänkasvatusmuoto	Lyhenne	Kuvaus
1. Tasaikäinen (Rotation forestry)	RF	Perinteinen metsänkasvatusmenetelmä. Kasvupaikkatyypistä riippuen päätehakkuu suoritettiin, kun valtapituus ylitti joko 14 tai 16 metriä ja kuvion ikä oli yli 70 tai 90 vuotta. Uudistaminen toteutettiin istuttamalla tai kylvämällä. Kierron aikana suoritettiin 1-3 harvennusta riippuen pohjapinta-alasta, kasvupaikkatyypistä ja valtapituudesta. Päätehakuussa jätettiin 5 puuta/hehtaari säästöpuiksi.
2. Tasaikäinen kasvatusta pidennettynä 15 vuodella	RF+15	Sama kuin edellä, mutta kiertoaika pidennettiin 15 vuodella.
3. Jatkuvapeitteinen kasvatusta, suuri pohjapinta-ala (Continuous cover forestry)	CCF high post-harvest BA	Hakkuu tehtiin yläharvennuksena. Säästöpuuvaatimusta ei ollut. Hakkuun jälkeinen minimipohjapinta-alan raja oli 14-16 m ² /ha riippuen kasvupaikan ravinteisuudesta.
4. Jatkuvapeitteinen kasvatusta, pieni pohjapinta-ala	CCF low post-harvest BA	Sama kuin edellä, mutta hakkuun jälkeinen minimipohjapinta-alan raja vaihteli välillä 8-10 m ² /ha.

Simulointi toteutettiin avoimesti saatavilla olevaa SIMO (SIMulation and Optimization) -metsäsimulaattorilla (Rasinmäki ym. 2009). Tasaikäisen metsän simuloinnissa käytettiin Hynysen ym. (2002) kehittämiä kasvu- ja tuottomalleja, ja jatkuvan kasvatuksen simuloinneissa Pukkanen ym. (2013) malleja. Simulaatiot tehtiin 100 vuoden ajanjaksolle, joka jaettiin 20 viiden vuoden jaksoon. Näin voitiin varmistaa riittävä aika eri kasvatusmenetelmien taloudellisten ja ekologisten vaikutusten arvioimiselle.

6.3. Kustannustehokkuusindeksi (Cost-efficiency index CEI)

Kullekin kuviolle laskettiin niiden puuntuotannon netto nykyarvo (NPV), monimuotoisuus (BD) ja hiilivarasto, jokaiselle kasvatusmenetelmälle erikseen 100 vuoden aikajaksolla. Diskonttaus-korkona käytettiin 3 %.

Monimuotoisuuden mallinnuksessa arvioitiin elinympäristön suotuisuus (Habitat suitability index HSI) kuudelle vanhan metsän tai sekametsän lajille: pyy, liito-orava, metso, pikkutikka, pyrstötiainen ja pohjantikka (Triviño ym. 2017). Lisäksi mallinnettiin elinympäristön suotuisuus neljälle lahoppulajiryhmälle (Tikkanen ym. 2007, Mönkkönen ym. 2014).

Hiilivarastolaskelmat sisälsivät pystyjuuston, lahoppuun ja maaperän hiilipitoisuuden (tn C/hehtaari). Kivennäismailla käytettiin alkuperäisiä hiilivarastotietoja ja Yasso07-mallia maaperän hiilen ennustamiselle huomioiden harvennukset, luontainen poistuma ja aluskasvillisuuden ja puiden karike. Turvemaiden hiilivaraston laskemiseksi käytettiin Ojasen ym. (2014) malleja.

Työssä kehitettiin kaksi kustannustehokkuusindeksiä (CEI) arvioimaan eri metsänkasvatusmenetelmien tehokkuutta:

$$CEI_{HSI} = \frac{HSI_i / HSI_{max}}{(1.1 - NPV_i / NPV_{max})}$$

$$CEI_C = \frac{C_i / C_{max}}{(1.1 - NPV_i / NPV_{max})}$$

CEI_{HSI} tarkoittaa monimuotoisuuteen perustuvaa kustannustehokkuusindeksiä ja CEI_C hiilivarastoon perustuvaa kustannustehokkuusindeksiä. HSI_i tarkoittaa monimuotoisuuden arvoa tietyllä kuviolla i , ja HSI_{max} monimuotoisuuden maksimiarvoa kaikkien kuvioiden ja metsänkäsittelymenetelmien yli. Vastaavasti, C_i tarkoittaa hiilivaraston kokoa tietyllä kuviolla i , ja C_{max} maksimaalista kokoa kaikkien kuvioiden ja metsänkasvatusmenetelmien yli. Kuviotason nettonykyarvoa ilmentää NPV_i , ja maksimiarvoa NPV_{max} . Indeksit kuvaavat monimuotoisuuden, hiilivaraston ja nettonykyarvon tasapainoa, jonka maksimiarvo on 10 silloin, kun ne ovat tasapainossa.

CEI-arvojen erot eri metsänkasvatusmenetelmien välillä testattiin varianssianalyysillä ja Tukeyn post-hoc -testillä.

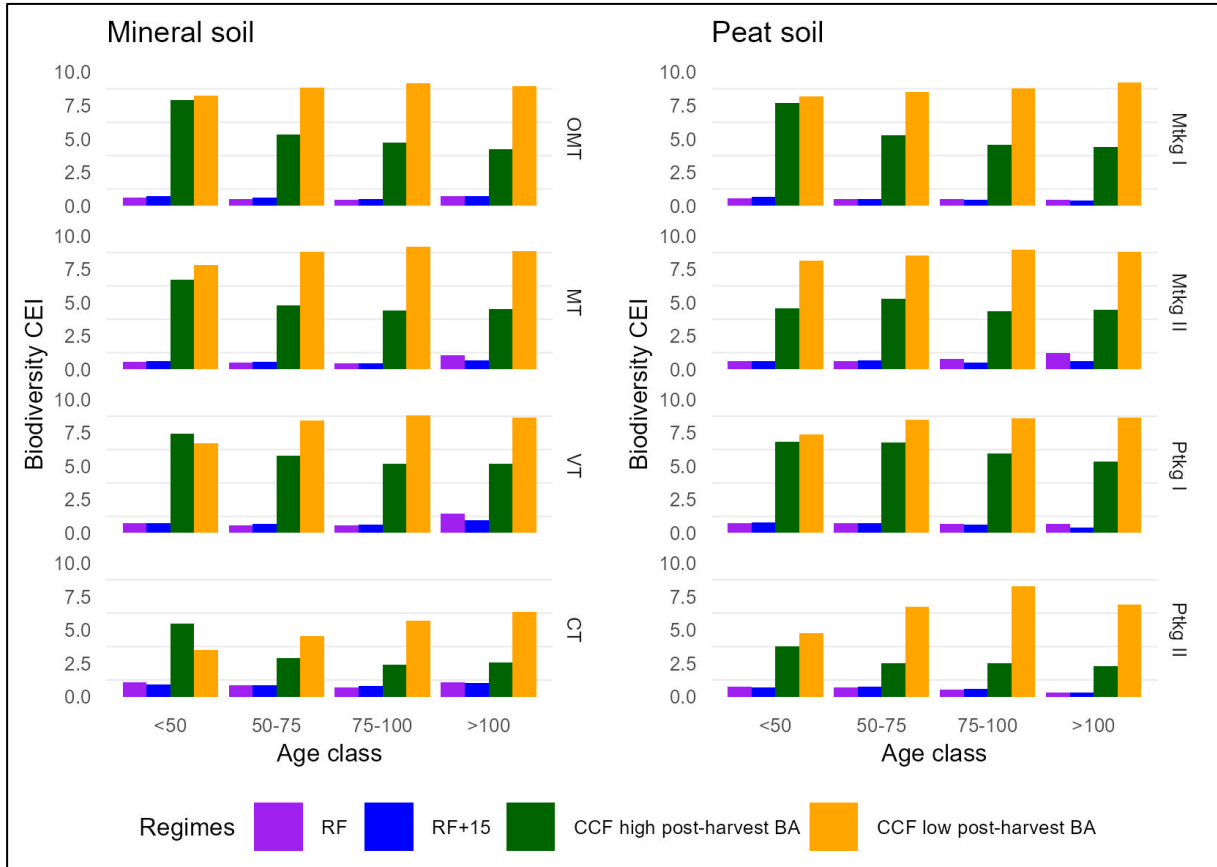
6.4. Metsänkasvatusmenetelmien kustannustehokkuus

Monimuotoisuuteen perustuva kustannustehokkuus (CEI) oli korkeampi kummassakin jatkuvan kasvatuksen (CCF) menetelmässä verrattuna jaksollisen kasvatuksen (RF) menetelmiin (Taulukko 9). Jatkuva kasvatus, jossa oli pieni hakkuun jälkeinen pohjapinta-ala (BA), kustannustehokkuusarvoltaan korkein. Tämä tarkoittaa, että se oli kustannustehokkain metsänkasvatusmenetelmä nimenomaan monimuotoisuuden kannalta. Tulos oli samanlainen sekä kivennäis- että turvemilla.

Taulukko 9. Monimuotoisuuteen perustuva kustannustehokkuusindeksi (CEI) kaikilla kuvioilla sekä maaperätyypeittäin tasaikäisessä metsänkasvatuksessa (RF ja RF+15) ja jatkuvapeitteisessä metsänkasvatuksessa. Metsänkasvatusmuotojen väliset ovat tilastollisesti merkitseviä ($p=0.05$ Tukey-HSD).

Metsänkasvatusmuoto	Kaikki kuviot, Mean±SD	Kivennäismaat, Mean±SD	Turvemaa, Mean±SD
RF	0.72±0.72	0.71±0.69	0.72±0.77
RF+15	0.67±0.42	0.67±0.42	0.64±0.40
CCF suuri pohjapinta-ala	5.48±2.42	5.51±2.38	5.39±2.53
CCF pieni pohjapinta-ala	8.23±2.00	8.20±2.02	8.34±1.94

Tarkasteltaessa kasvupaikka- ja ikäluokkia erikseen, havaittiin, että jatkuvan kasvatuksen kustannustehokkuus oli alimmillaan ravinneköyhillä kasvupaikoilla (CT, Ptkg II, Kuva 13). Vastavasti tasaikäisen metsänkasvatuksen monimuotoisuusperustainen kustannustehokkuus oli silloin korkeimmillaan. Kustannustehokkuus laski metsän iän myötä siinä jatkuvan kasvatuksen muodossa, jossa oli suuri hakkuunjälkeinen pohjapinta-ala (Kuva 13).



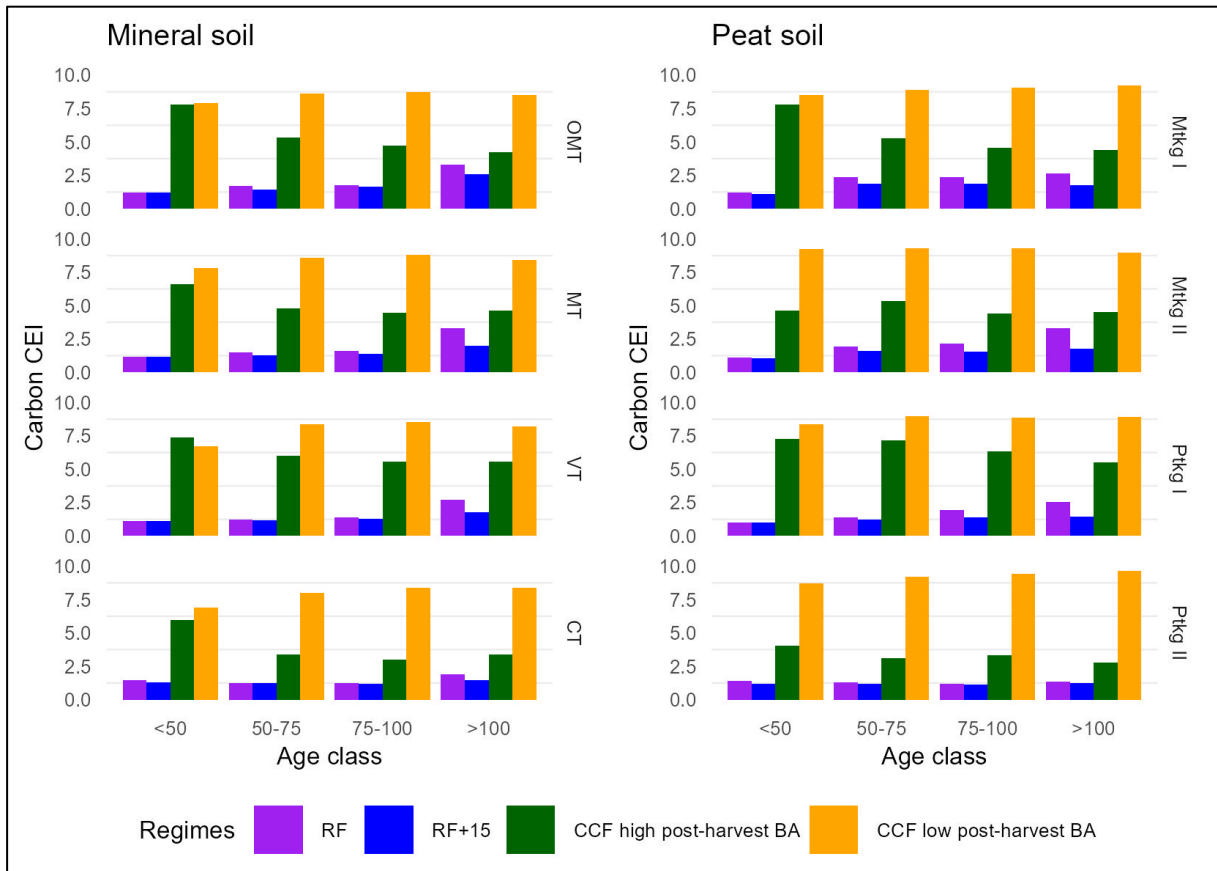
Kuva 13. Monimuotoisuuden perustuvat kustannustehokkuusarvot (CEI) kivennäis- ja turvemilla kasvupaikkatyypeittäin ja ikäluokittain jaksollisessa metsänkasvatuksessa (RF ja RF+15) ja jatkuvapeitteisessä metsänkasvatuksessa (CCF suuri hakkuun jälkeinen pohjapinta-ala (BA) ja matala hakkuun jälkeinen pohjapinta-ala). (Kuva julkaisusta Rana ym. 2024).

Myös hiilivarastoon perustuva kustannustehokkuus (CEI) oli korkeampi kummassakin jatkuvan kasvatuksen (CCF) menetelmässä verrattuna jaksollisen kasvatuksen (RF) menetelmiin (Taulukko 10). Samoin kuin monimuotoisuuden perustuvan kustannustehokkuuden kohdalla, jatkuva kasvatusta, jossa oli pieni hakkuun jälkeinen pohjapinta-ala (BA), oli kustannustehokkuusarvoltaan korkein sekä kivennäis- että turvemilla. Tästä syystä jatkuvapeitteistä kasvatusta kutsuttiin hankkeen maankäytön hyväksyttävyytutkimuksissa ilmastometsätaloudeksi (Luku 8, Mäntymaa ym. 2024a).

Taulukko 10. Hiilivarastoon perustuva kustannustehokkuusindeksi (CEI) kaikilla kuvioilla sekä maaperätyypeittäin tasaikäisessä metsänkasvatuksessa (RF ja RF+15) ja jatkuvapeitteisessä metsänkasvatuksessa. Metsänkasvatustyyppien väliset ovat tilastollisesti merkitseviä ($p=0.05$ Tukey-HSD).

Metsänkasvatustyyppi	Kaikki kuviot, Mean±SD	Kivennäismaat, Mean±SD	Turvemaa, Mean±SD
RF	1.65±1.27	1.62±1.14	1.73±1.59
RF+15	1.35±0.66	1.35±0.58	1.37±0.85
CCF suuri pohjapinta-ala	5.63±2.40	5.64±2.33	5.60±2.59
CCF pieni pohjapinta-ala	8.37±1.58	8.14±1.48	9.05±1.66

Tarkasteltaessa kasvupaikka- ja ikäluokkia erikseen havaittiin, että hiilivarastoon perustuva kustannustehokkuus laskee metsän iän myötä siinä jatkuvan kasvatuksen muodossa, jossa oli suuri hakkuun jälkeinen pohjapinta-ala (Kuva 14).



Kuva 14. Hiilivarastoon perustuvat kustannustehokkuusarvot (CEI) kivennäis- ja turvemaidella kasvupaikkatyypeittäin ja ikäluokittain jaksollisessa metsänkasvatuksessa (RF ja RF+15) ja jatkuvapeitteisessä metsänkasvatuksessa (CCF suuri hakkuun jälkeinen pohjapinta-ala (BA) ja matala hakkuun jälkeinen pohjapinta-ala). (Kuva julkaisusta Rana ym. 2024).

6.5. Yhteenveto metsänkasvatusmenetelmistä

Tuulivoiman kokonaispäästövaikutuksiin vaikuttaa myös se, mitä niiden alle jääville metsille ja soille tehtäisiin silloin, jos niiden kohdalle ei rakennettaisi tuulivoimaa. Metsien osalta tutkimuksemme osoitti, että jatkuvapeitteinen metsänkasvatus on kustannustehokkain metsänkasvatusmenetelmä monimuotoisuuden ja metsien hiilivaraston kannalta sekä kivennäis- että turvemaidella (Rana ym. 2024). Metsikön rakenne vaikuttaa kuitenkin tuloksiin, ja se luo tarvetta monipuolisille, eri tilanteisiin sopiville metsänkasvatusmenetelmille. Niiden avulla voidaan luoda monikäyttöisiä ja eri ekosysteemipalveluita tukevia maisemia. Työssä kehitetyt kustannustehokkuusindeksit voivat toimia käytännöllisinä työkaluina päätöksenteossa.

7. Soiden ennallistaminen

7.1. Soita koskeva tutkimus LandUseZero-hankkeessa

Hankkeen soita koskeva tutkimus sisälsi kaksi eri osaa. Aluksi arvioitiin soiden ennallistamisen ilmastovaikutuksia (Luku 7.2), jonka jälkeen tarkasteltiin soiden maankäyttöä kolmessa pohjoisessa suovaltaisessa maassa, Suomessa, Irlannissa ja Skotlannissa (Luku 7.3).

Tutkimukset toimivat paitsi itsenäisinä kokonaisuuksina, myös tarjosivat pohjaa hankkeen maankäyttömuotojen hyväksyttävyyttä koskevalle osiolle (Luku 8).

7.2. Metsäoijitettujen soiden ennallistamisen ilmastovaikutus

7.2.1. Taustaa ja menetelmät

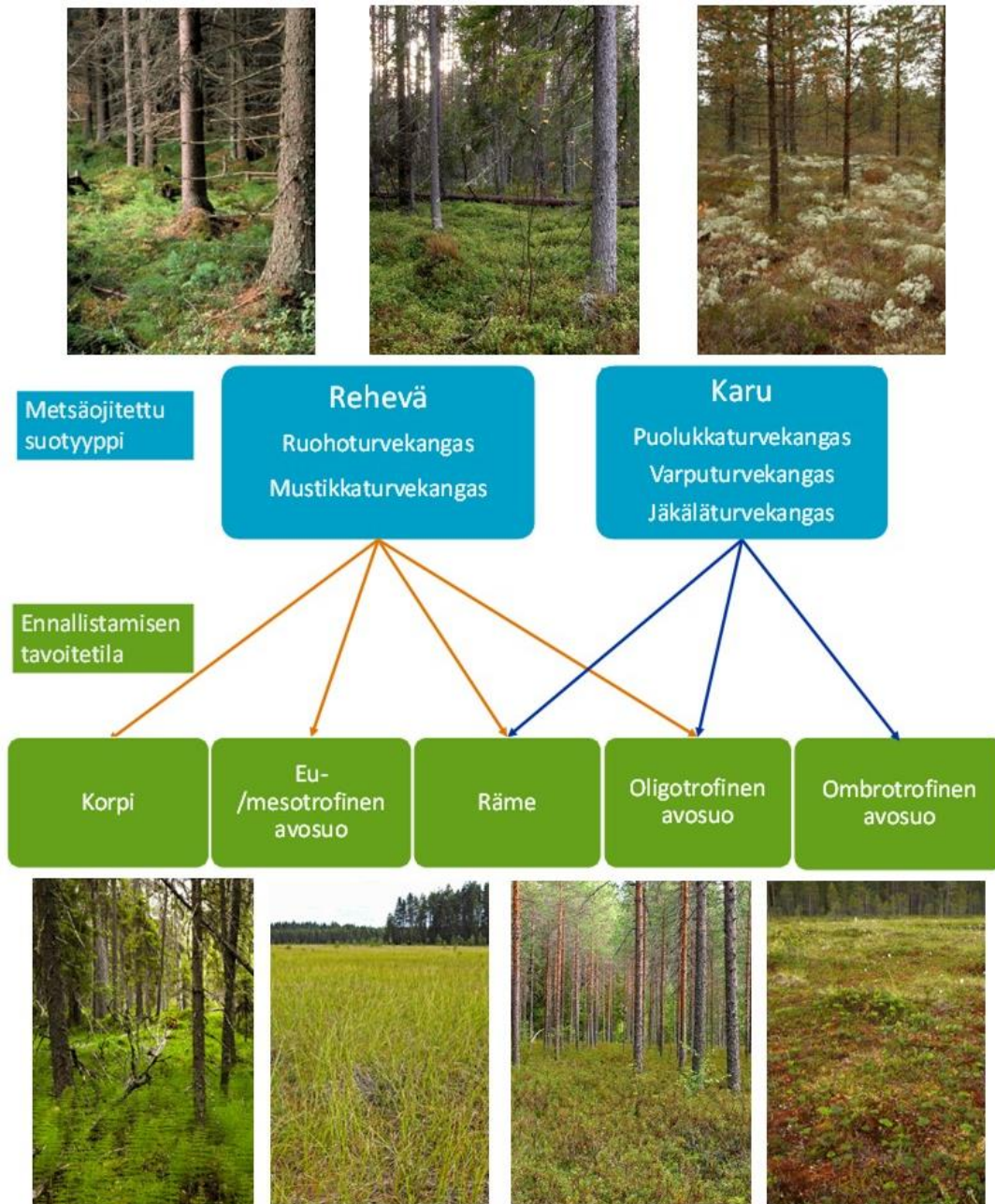
Metsäoijitettujen soiden maaperä vaihtelee hiilidioksidilähteestä (CO₂) pieniin nieluihin riippuen kohteiden ravinteisuudesta ja kosteudesta. Rehevämmät ojitetut suot (ruoho- ja mustikaturvekankaat) ovat voimakkaampia CO₂-päästölähteitä kuin karummat ojituskohdeet (Ojanen ym. 2013, Alm ym. 2023). Myös typpioksiduulipäästöt (N₂O) ovat tämän tyyppisillä soilla voimakkaampia (Minkkinen ym. 2020), kun taas metaanipäästöt (CH₄) ovat ojitetuilla soilla vähäiset (Ojanen ym. 2010, Rissanen ym. 2023).

Suon ennallistaminen vettämällä muuttaa kasvihuonekaasuvirrat luonnontilaisten soiden kaltaiseksi (Wilson ym. 2016). CO₂- ja N₂O-päästöt vähenevät ja CH₄-päästöt kasvavat ennallistamisen seurauksena. Kuten luonnontilaisilla soilla, myös ennallistetuilla soilla kasvihuonekaasutaseiden voidaan olettaa vaihtelevan suon ravinteisuuden ja kosteuden mukaan.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli arvioida boreaalisten metsäoijitettujen soiden ennallistamisen ilmastomuutoksen hillintäpotentiaalia (Laine ym. 2024). Tarkastelimme, kuinka paljon ennallistamisen ilmastovaikutukseen voidaan vaikuttaa valitsemalla ennallistettavaksi reheviä tai karuja ojitettuja suokohteita sekä tähtäämällä ennallistamistoimenpiteillä erilaisiin ennallistamisen tavoitetiloihin (märkä avosuo, puustoinen räme tai korpi). Tutkimus julkaistiin tieteellisessä artikkelissa Laine ym. (2024).

Kaikki tässä tarkastellut ennallistamisen tavoitetilat ovat Suomessa luontaisesti esiintyviä suo-luontotyyppisiä, eli Gann ym. (2019) mukaisia luontaisia referenssikohteita, mutta ne eivät välttämättä edusta täysin historiallista tilaa, eli ennen ojitusta vallinnutta suotyyppiä.

Loimme seitsemän ennallistamispolkua (Kuva 15) ja arvioimme kunkin ilmastovaikutukset. Kasvihuonekaasujen päästökertoimet koottiin kirjallisuudesta (lähteet ja tarkemmat menetelmät julkaisussa Laine ym. 2024), ja säteilypakote laskettiin 500 vuoden ajanjaksolle ennallistamisesta REFUGE 4 laskentaohjelmalla (Lindroos 2023). Tässä tutkimuksessa emme huomioi-neet puuston hiilensidontaa.



Kuva 15. Arvioidut ennallistamispolut, eli erilaiset tavoitetilat lähtötilanteeltaan erityyppisille soille. Ylärivin valokuvissa ojitetut suotyypit vasemmalta oikealle: Mustikkaturvekangas, Puolukkaturvekangas ja jäkäläturvekangas; Alarivillä vasemmalta oikealle luonnontilaiset suotyypit: metsäkortekorpi, oligotrofinen sarasuo, isovarpuräme ja rahkaräme. Kuvat: Jukka Laine.

Ennallistamisen lähtötilanteessa metsäojitetut suot jaettiin kahteen luokkaan niiden ravinnetilanteen perusteella. Ehdotimme sekä reheville että karuille kohteille useita ennallistamisen tavoitetiloja, sillä suokasvillisuus on riippuvainen ekohydrologiasta, eli veden määrästä ja laadusta, ja ennallistamistoimenpiteillä voidaan ohjata suon kehitystä kohti metsäisiä tai avoimia suoluontotyyppejä. Joissain tapauksissa voidaan vaikuttaa jopa ravinteiden saatavuuteen. Jotkut rehevän suotyyppiryhmän karummassa päässä olevat elinympäristöt, eli ne, jotka ennen ojitusta olivat märkiä avosuita, kasvavat nykytilanteessa mäntyä. Niillä on ravinne-epätasapaino, jonka vuoksi niiden ennallistaminen voi tehdyistä toimenpiteistä riippuen johtaa rämeeseen tai oligotrofiseen sarasuohon.

7.2.2. Vaikutus hiilitaseeseen eri ennallistamispoluissa

Suon ennallistaminen parantaa maaperän ja pintakasvillisuuden hiilitasetta, eli ennallistettu suo sitoo ojitettua suota enemmän ilmakehän hiiltä (Taulukko 11). Rehevien metsäojitettujen soiden ennallistamisella on kuitenkin karuja soita voimakkaampi myönteinen vaikutus hiilitaseeseen, johtuen niiden korkeista CO₂-päästöistä nykytilassa.

Taulukko 11. Kirjallisuuteen pohjautuvat arviot metsäojitettujen ja ennallistettujen (eli ojittamattomien) turvemaiden CO₂-, CH₄- ja N₂O-päästöistä (g kaasua/m²/a (±SE). Negatiiviset arvot ilmentävät kaasun poistumista ilmakehästä. Ennallistamisen vaikutus ilmakehän C-tasapainoon (CO₂ ja CH₄, g C/m²/a) lasketaan ojitettujen ja ennallistettujen soiden erotuksena. Estimaatit sisältävät maaperän ja pintakasvillisuuden kaasuvirrat, mutta eivät huomioi puuston hiilen sidontaa.

Metsäojitettu				Ennallistettu				Muutos
Suotyyppi	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Suotyyppi	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	C taseessa
Rehevä (RHTKG, MTkg)	265 (±70)	0,34 (±0,12)	0,23 (±0,04)	Korpi	-91 (±6)	1,7 (±0,4)	0,1 (±0,01)	-96 (±21)
				avosuo eu-/ meso	-104 (±6,5)	15 (±2,3)	0,1 (±0,01)	-90 (±23)
				Räme	-97 (±8,2)	4,8 (±3,1)	0,03 (±0,003)	-95 (±24)
				avosuo oligo	-124 (±7,3)	22 (±2,6)	0,03 (±0,003)	-90 (±13)
Karu (PTKG, Vatkg, Jätkg)	-45 (±30)	0,34 (±0,12)	0,08 (±0,004)	avosuo oligo	-124 (±7,3)	22 (±2,6)	0,03 (±0,003)	-5 (±13)
				avosuo ombro	-95 (±8,9)	9,7 (±1,6)	0,03 (±0,003)	-7 (±12)
				Räme	-97 (±8,2)	4,8 (±0,8)	0,03 (±0,003)	-11 (±12)

7.2.3. Vaikutus säteilypakotteeseen ja ilmastoon eri ennallistamispoluissa

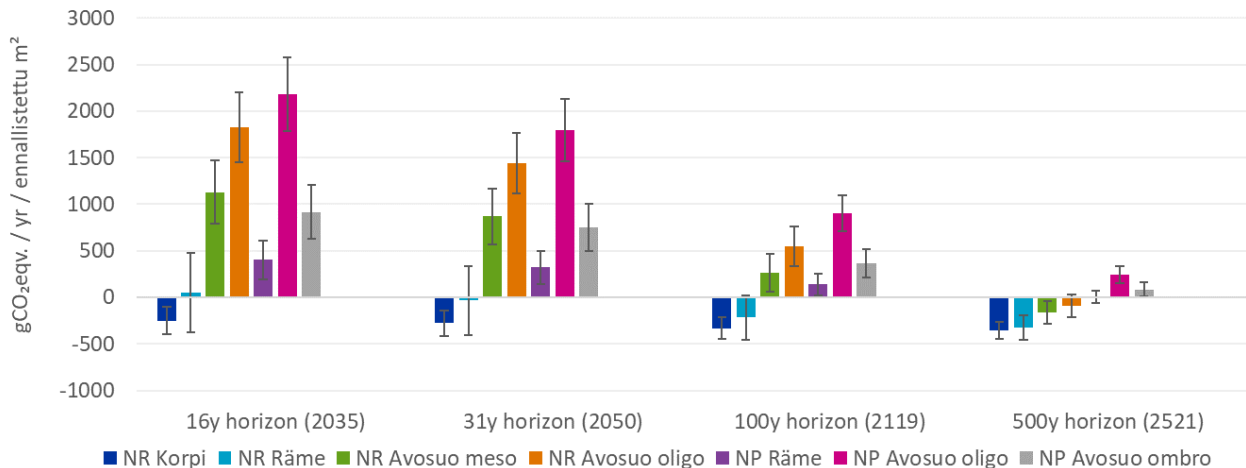
Ennallistamisen ilmastovaikutus riippuu vähenevien tai lisääntyvien kasvihuonekaasupäästöjen määrästä (Taulukko 9) sekä eri kaasujen säteilypakotteesta ja elinkaaresta ilmakehässä. Myös tarkasteltava aikajänne vaikuttaa keskeisesti arviointiin.

REFUGE:n tarkemmat päästödynamiikkalaskelmat osoittavat, että tarkastelluista ennallistamispoluista rehevien metsäojitettujen soiden ennallistamisella puustoisiksi korviksi on nopein ja voimakkain viilentävä vaikutus (Kuva 16). Kuudentoista vuoden aikajänteellä vuotuinen päästövähennys olisi 250 g CO₂-ekv. jokaista ennallistettua neliometriä kohti ja 100 vuoden aikajänteellä 330 g CO₂-ekv./m²/a. Arvioiden epävarmuudet ovat kuitenkin suuria ja pohjautuvat oletukseen, että ennallistetun korven khk-taseet vastaavat luonnontilaisen korven estimaatteja (Kuva 16).

Kaikki neljä rehevien metsäojitettujen soiden ennallistamispolkua ovat ilmaston kannalta hyödyllisempiä pitkällä aikavälillä kuin lyhyellä aikavälillä (Kuva 16). Korveksi ennallistaminen aiheuttaa pienimmät CH₄-päästöt ja se vähentää globaalia säteilypakotetta tarkastellun aikahorisontin alusta alkaen. Ennallistaminen avoimeksi sarasuoksi kasvattaa vuotuista säteilypakotetta usean vuosikymmenen ajan, ja sen kumulatiivinen vaikutus ilmaston lämpenemiseen on

positiivinen huolimatta pienestä vähenemisestä 500 vuoden horisontin loppua kohti (Kuva 16).

Kaikkien tarkasteltujen karujen metsäojitettujen soiden ennallistamispolkujen kumulatiivinen vaikutus oli ilmastoa lämmittävä tutkitulla 500 vuoden aikahorisontilla (Kuva 16). Ennallistamispolkujen järjestys oli sama kuin rehevillä turvemailla: kuivemmalla rämevaihtoehdolla oli pienin lämmittävä vaikutus, kun taas ennallistaminen avoimeksi sarasuoksi johti voimakkaimpaan lämpenemiseen.



Kuva 16. Seitsemän ennallistamispolun pysyvä vuotuinen CO₂-ekv. päästö. Ennallistamisen lähtötilanteena on rehevä (nutrient rich, NR) tai karu (nutrient poor, NP) metsäojitettu suo. REFUGE 4 -malli laskee pysyvän vuotuisen CO₂-ekv. päästön vertailupäästöskenaarioista, joiden vuotuiset CO₂-päästöt ovat vakiot $x \text{ t CO}_2 / \text{vuosi}$ ja sama lämmittävä vaikutus tietyllä aikavälillä. Laskenta huomioi päästöjen aikadynamiikan toisin kuin staattinen, esimerkiksi GWP100-kertoimilla, laskettu CO₂-ekv:n estimaatti. Puuston CO₂-nielu ei ole mukana laskelmissa.

7.2.4. Mitkä ovat parhaat ennallistamispolut ilmastonmuutoksen hillinnän ja muiden hyötyjen kannalta?

Jos keskitytään puhtaasti ilmastohyötyihin, paras vaihtoehto olisi ennallistaa reheviä ojitettuja soita puustoisiksi korviksi. Suomessa korvet kuuluvat uhanalaisimpiin suotyyppeihin, joilla on korkea suojeluarvo (Kontula & Raunio 2019), ja siksi tällä ennallistamispolulla olisi suuri hyöty myös luonnon monimuotoisuudelle.

Haaste korprien ennallistamiselle on niiden monimutkainen hydrologia. Intensiivisestä suunnittelusta ja ammattitaitoisesta toiminnasta huolimatta riskinä ovat erittäin korkeat CH₄-päästöt ja vesien rehevöityminen (Koskinen ym. 2016, 2017). Toinen haaste on, löytyykö maanomistajilla kiinnostusta ennallistaa reheviä ojitettuja soita, jotka yleensä tuottavat kannattavasti puustoa. Kolmas haaste on, että metsäojitetut korvet ovat Suomessa suhteellisen harvinaisia (Korhonen ym. 2021). Niiden ennallistamiseen keskittyvä ennallistamisalue jäisi siten varsin vaatimattomaksi.

Ilmaston kannalta toiseksi paras vaihtoehto on ennallistaa keskireheviä mäntyvaltaisia soita kohti rämeitä. Rämeeet ovat kuitenkin Suomen tyypillisimpiä suotyyppejä, joten niiden ennallistaminen ei tarjoa suuria monimuotoisuushyötyjä etenkin harvinaisten luontotyyppien tai lajien osalta (Kontula & Raunio 2019). Vaikka ojitettujen rämeiden pinta-ala tarjoaisi suuria

ennallistamisalueita, maanomistajat saattavat olla haluttomia ennallistamaan alueita, mikäli ne tuottavat hyvin puuta.

Ilmaston kannalta huonoin vaihtoehto on ennallistaa karuja ojitusalueita kohti märkiä, sara-valtaisia avosuoja. Luonnontilaisten sarasoiden metaanipäästöt ovat korkeat (Zhang ym. 2021), ja samaa voidaan odottaa ennallistetuilta soilta, joilla on samanlaiset ominaisuudet. Tällaisilla luontotyypeillä on kuitenkin Suomessa suuri monimuotoisuusarvo, ja ne tarjoavat elinympäristön suurimmalle osalle punaisen listan suolajeista (Hyvärinen ym. 2019). Lisäksi niiden ennallistaminen parantaa veden laatua (Menberu ym. 2017).

Käytännössä ennallistamisen on täytettävä monia samanaikaisia tavoitteita ja riskejä sekä tuettava useiden ekosysteemipalvelujen tuottamista (Taulukko 12). Siten ei ole realistista ennallistaa vain tiettyntyyppisiä soita. Soiden tarjoamia ekosysteemipalveluja ovat esimerkiksi ilmaston säätely, luonnon monimuotoisuus ja elinympäristöjen tarjonta sekä veden virtauksen ja laadun säätely (Kimmel & Mander 2010). Koska ojitus on merkittävin tekijä näiden ekosysteemipalvelujen heikentämisessä, ennallistaminen on ensiarvoisen tärkeää niiden palauttamisessa (esim. Humpenöder ym. 2020). Myös sosioekonomiset näkökohdat ja yleinen hyväksyntä on otettava huomioon.

Taulukko 12. Rehevistä (nutrient rich, NR) tai karuista (nutrient poor, NP) metsäojitetuista soista alkavien ennallistamispolkujen vaikutus ilmastoon, monimuotoisuuteen ja veden laatuun; ennallistamistoimenpiteiden epäonnistumisen riskitaso; Oletettu ennallistettavien kohteiden saatavuus maanomistajan näkökulmasta. Vihreä väri osoittaa positiivista vaikutusta, matalaa riskiä ja korkeaa saatavuutta, oranssi väri päinvastoin.

Ennallistamisvaihtoehto	Ilmaston muutoksen torjuntapotentiaali	Monimuotoisuus	Vedenlaatu	Ennallistamistoimenpiteiden epäonnistumisen riskitaso	Saatavuus ennallistamiseen
NR -> Korpi					
NR -> Rämpe					
NR -> Avosuo					
NP -> Rämpe					
NP-> Avosuo					

7.3. Soiden maankäytön historiaa, nykypäivää ja tulevaisuuden suuntaviivoja Suomessa, Irlannissa ja Skotlannissa

Vertailimme kolmen suovaltaisen Euroopan maan soiden maankäyttöä keskittyen erityisesti soiden ennallistamiseen ja luonnontilan parantamiseen. Tavoitteena oli löytää yhtäläisyyksiä, eroavaisuuksia ja mahdollisia käännekohtia soiden maankäytössä, selvittää mahdollisia esteitä ja ratkaisuja soiden kestäväälle maankäytölle, sekä ottaa oppia toisten maiden kokemuksista. Työ on osa M. Lampela ym. (2025) julkaisukäsikirjoitusta.

7.3.1. Taustatietoa soiden maankäytöstä

Suomen soiden pinta-ala on n. 9,1 Mha (30 % maapinta-alasta), josta n. 1 Mha ohutturpeisia alueita on muuttunut ojitusten myötä kivennäismaiksi ja 4.1 Mha on edelleen ojitamatta (Turunen 2008). Irlannissa soiden pinta-ala on n. 1,46 Mha (21 % maapinta-alasta), josta

ojittamatonta on 0,27 Mha (Tanneberger ym., 2017). Skotlannissa soiden pinta-ala on 1,92 Mha (25 % maapinta-alaa), josta ojittamatonta on n. 0,27 Mha (Brown ym. 2023). Soiden maankäyttö jakautuu näissä kolmessa maassa UNFCCC:n raportoinnissa Taulukon 13 mukaisesti.

Taulukko 13. Orgaanisten maiden pinta-alat vuonna 2021 YK:n ilmastonsuojelun puitesopimuksen (UNFCCC) mukaan. Skotlannin osalta tiedot julkaisusta Brown ym. (2023). Arvioitu nykyinen turvemaan pinta-ala Suomessa julkaisusta Turunen & Valpola (2020), Irlannissa julkaisusta Tanneberger ym. (2017), ja Skotlannissa julkaisusta Brown ym. (2023).

Orgaanisten maiden pinta-alat vuonna 2021 YK:n ilmastonsuojelun puitesopimuksen (UNFCCC) mukaan	Suomi	Irlanti	Skotlanti
	Pinta-ala (kha)	Pinta-ala (kha)	Pinta-ala (kha)
Viljelys, yksivuotiset (viljat)	106	1	5
Viljelys, monivuotiset (nurmi)	173	-	Sisältyy yksivuotisiin (yllä)
Laidun	63	339	103
Laidun Skotlanti: muokattu suo, ei viljelty			892
Metsä	5 963	459	360
- ojitettu	4 313	459	360
Turvetuotantoalueet	101	125	47
Rakennetut kosteikot ja tekoaltaat	13	-	-
Ennallistettu/vetetty turvema	55	85	48
Rakennetut ympäristöt	17	3	6
Eri maankäytöissä raportoitu turvema, yhteensä	6 491	1 012	1 461
Luonnontilainen / ei käytössä	2 609	448	491
Arvioitu nykyinen turvemaan pinta-ala	9 100	1 460	1 952

Soiden käyttö on alkanut kaikissa kolmessa maassa jo tuhansia vuosia sitten, ensimmäisen kirjallisten lähteiden kertoessa Irlannissa turpeen korjuusta eläinten kuivikkeeksi ja lämmitykseen jo 600–700 luvuilla. Kaikissa kolmessa maassa soita on kuivatettu historiallisella ajalla ensin maatalouden tarpeisiin, sekä viljelykseen että laitumiksi. 1900-luvulle tultaessa soiden käytön intensiteetti kasvoi. Maatalouden ohella Suomessa alkoi soiden kuivatus metsätalouden tarpeisiin, kun taas Irlannissa ja Skotlannissa alkoi peittosoiden metsitys. Toisen maailmansodan jälkeen merkittäviä käyttömuotoja olivat turpeen teollisen mittakaavan energia-käyttö ensin Irlannissa ja myöhemmin myös Suomessa ja Skotlannissa, soiden suurimittainen ojitus metsätalouden käyttöön Suomessa ja peittosoiden metsitys ulkomaisilla havupuilla (sitkankuusi) erityisesti Skotlannissa. Intensiivisen soiden maankäytön muutoksen myötä soiden

suojelu nähtiin tarpeelliseksi, ja kaikissa kolmessa maassa syntyi soiden suojeluohjelmia 1980-luvulta lähtien. Soiden ennallistaminen alkoi samoihin aikoihin pienimuotoisin kokeiluina, mutta varsinaisesti vauhtiin ennallistamisessa päästiin 1990-luvulla EU LIFE -rahoituksen myötä. 2000-luvulle tultaessa soita sekä ennallistettiin että otettiin yhä turvetuotantoon ja kuivatettiin maatalouskäyttöä varten. Ilmastomuutoksen aiheuttama uhka ja soiden luontoarvojen jatkuva heikentyminen johtivat tarpeeseen kokonaisvaltaisemmalle soiden käytön suunnittelulle. Vuonna 2012 Suomi ensimmäisenä maailmassa teki kansallisen suostrategian, jossa linjattiin soiden käytön ja suojelun suuntaviivoja. Irlanti ja Skotlanti seurasivat vuonna 2015 omilla suostrategioillaan, kaikilla kolmella tavoitteena soiden luonnontilan parantaminen elinkeinot samalla huomioiden (Nordbeck & Hognl 2024).

7.3.2. Soiden maankäyttö 2020 luvulla – tulevaisuuden suuntaviivoja

2020-luvulle tultaessa kaikkien kolmen maan soiden maankäyttöä on leimannut ilmastonmuutoksen vaikutusten ja biodiversiteetin heikkenemisen torjuminen. Ennallistamisella pyritään vastaamaan soiden heikkenevään tilaan, ja pinta-alat, joilla ennallistamista tehdään ovat kaikissa kolmessa maassa kasvussa. Samaan aikaan turpeen energiatuotanto on joko loppunut (Irlanti) tai vähentynyt merkittävästi (Suomi).

Energiasiirtymä. Tarve uusiutuville energiamuodoille vaikuttaa soiden maankäyttöön monella tavalla. Skotlannissa ja Irlannissa tuulivoimaa on rakennettu varsinkin peittosoille jo vuosikymmeniä. Tuulivoimaloiden huono sijoittelu maaperän suhteen on aiheuttanut varsinkin Skotlannissa maanvyörymiä, eroosiota ja soiden kuivumista. Sen sijaan Suomessa tuulivoima on vasta viime vuosina lisääntynyt ja kohdentuu turvemaille lähinnä käytöstä poistuneille turvetuotantoalueille. Irlannissa ja Suomessa onkin tavoitteena suunnata tuulivoimaa, aurinkovoimaa ja energiakasveja käytöstä poistuneille turvetuotantoalueille. Nämä uudet energiamuodot voivat aiheuttaa kilpailua maankäytössä muiden kestävämpien maankäyttömuotojen kanssa, kuten ennallistamisen kanssa. Ratkaisuna tähän on haviteltu esim. aurinkovoimaloiden perustamista vetetyille turvemaille. Energiasiirtymän suoluonnolle potentiaalisesti haitallisin puoli on akkumineraalien kaivaminen suoalueilla, josta esimerkkinä suojellulle Viiankiaavalle suunnitteilla oleva maanalainen kaivos Suomessa.

7.3.3. Esteitä ja ratkaisuja kestäväälle soiden maankäytölle

Ekologiset esteet ja ratkaisut. Suoalueiden pirstaloituminen ja tilan heikentyminen ovat kaikissa kolmessa maassa etenevä ongelma. Pirstaloituminen vaikeuttaa ennallistettavaksi soveltuvien kokonaisuuksien löytymistä ja mitä kauempana ollaan luonnontilasta, sitä vaativampaa ja kalliimpaa on ennallistaminen. Irlannissa ja Skotlannissa ilmastonmuutoksen myötä vähentyneet sateet ovat myös aiheuttaneet soihin liittyvää vesipulaa, kun alueiden käyttövedet ovat riippuvaisia suovesistä.

Ratkaisuna pirstaloitumisen aiheuttamiin ongelmiin voidaan kehittää maankäytön suunnittelun työkaluja, jotka ottavat laajasti huomioon mm. ilmastonmuutoksen hillinnän, luonnon monimuotoisuuden, ekosysteemipalvelut ja yleisen hyväksyttävyyden, kuten Land-UseZero-hankkeessa on tehty. Soiden tilan heikentymisen ratkaisut voidaan jakaa ekologiseen ennallistamiseen, jossa tavoitteena on alkuperäisen ekosysteemin palauttaminen, ja muihin kasvihuonekaasutasetta tai biodiversiteettiä, tai niitä molempia hyödyttäviin toimenpiteisiin. Muita toimenpiteitä ovat mm. kosteikkoviljely, soiden viljely tai suometsätalous tavanomaista

korkeammilla vedenpinnoilla, ja maankäytön intensiteetin vähentäminen muuttamalla viljelyksiä laitumiksi tai suometsien jatkuva kasvatus.

Ennallistamisen esteet ja ratkaisut. Kolmen maan vertailussa havaittiin, että soiden ennallistamiselta puuttuu yleisiä pelisääntöjä. Ennallistamisen onnistumisen indikaattorit eivät ole yhteisiä, eikä ennallistamisalan laskennalle ole selvää määritelmää. Samoin havaittiin miten maanomistusolot ohjaavat ennallistamista. Sekä Suomessa että Irlannissa maanomistus on jakautunut suurelle määrälle yksityisiä maanomistajia ja yhtenäisten hydrologisten kokonaisuuksien löytäminen ennallistettavaksi on ollut vaikeaa. Suomessa soiden ennallistaminen on myös keskittynyt tähän asti lähinnä valtion maille ja siten pohjoiseen, kun taas Irlannissa ennallistamisen pinta-alat ovat tästä syystä olleet melko pieniä. Skotlannissa sen sijaan maanomistajat ovat lähinnä yksityisiä ja heitä on vain muutama. Tämä aiheuttaa toisenlaisia ongelmia, kun isojen alueiden maankäyttö on hyvin pienen joukon päätettävissä.

Uusia työkaluja ja toimintamalleja ennallistamisen suuntaamisessa luontoarvojen kannalta parhaimmille alueille tarvitaan, ja tähän ei vielä ole löytynyt valmista vastausta.

Ennallistamisen seurantaan ja määritelmiin tarvitaan tulevaisuudessa yhteiset pelisäännöt. EU:n ennallistamisasetus saattaa osaltaan vastata tähän tarpeeseen. Suomessa, jossa ennallistaminen on kohdentunut pääosin valtion maille, on toiminnassa ennallistamisen seurantaverkosto, joka on tuottanut pitkään laadukkaita tuloksia ennallistamisen kehitystyötä varten. Vastaavan koealaverkoston tarve on huomattu ainakin Irlannissa.

Poliittiset esteet ja ratkaisut. Kaikissa kolmessa maassa on havaittu ohjauskeinojen vaikuttavan ristiriitaisesti soiden käyttöön. Samalla kuin EU-tasolla korostetaan biodiversiteettiä ja ennallistamista, tukia kohdistetaan edelleen ainakin osittain soiden kuivatukseen. Lisäksi EU:n maataloustukia ei saa käyttää kosteikkoviljelyyn soveltuville lajeille, kuten osmankäämille, ruokohelvelle tai rahkasammalle. Tarvitaan siis johdonmukaisuutta kansallisiin suostrategioihin sekä kansallisiin ja EU-tason säädöksiin ohjaamaan soiden käyttöä kohti luontopohjaisia ratkaisuja.

Sosioekonomiset esteet ja ratkaisut. Soiden vettämiseen ja kosteikkoviljelyyn kohdistettu rahoitus on monin paikoin vähäistä, ja neuvonta ja koulutus puutteellista. Suomessa maanomistajien toimintaan vaikuttaa vahvasti valtion tukirahoitus, kun taas Skotlannissa taas yksittäisen maanomistajan valta on suuri ja ohjaa laajan alueen maankäyttöä.

Ratkaisuna maankäytön suunnitteluun voidaan hakea Irlannista, jossa on käytössä Co-creation-konsepti, yhteiskehittäminen. Siinä soiden maankäyttöä suunnitellaan yhdessä paikallisten asukkaiden, liike-elämän, muiden toimijoiden ja tutkijoiden kanssa. Monimuotoisissa soiden maankäytön kokonaisuuksissa yhteisöjä osallistamalla on saatu osin hyviä tuloksia aikaan.

Ennallistamisen ja muun kestävämmän soiden maankäytön rahoitukseen yksi mahdollisuus on vapaaehtoinen hiili- ja biodiversiteettikauppa. Skotlanti on tässä edelläkävijä, jossa on ollut jo vuodesta 2015 toiminnassa Peatland CODE, yksityisten kasvihuonekaasuvähennysten rahoitusmalli soiden ennallistamistoimista. Vastaavaa mallia kehitetään myös Irlannissa, ja Suomessa on jonkin verran yritystoimintaa turvemaiden hiilikaupassa. Hiilikaupan- ja biodiversiteettikaupan kehittämisessä maiden välinen yhteistyö ja oppiminen toisten kokemuksista voisi taata toimivan lopputuloksen.

7.4. Yhteenveto hankkeen suotutkimuksista

LandUseZero-hanke tuotti tietoa soiden ennallistamispoluista, joissa sekä suon lähtötilanteella että ennallistamisen lopputuloksella on vaikutusta kasvihuonekaasutaseisiin, monimuotoisuus-hyötyihin ja vesistökuormitukseen.

Ilmaston kannalta paras vaihtoehto olisi ennallistaa reheviä ojitettuja soita puustoisiksi korviksi, jolloin myös monimuotoisuus hyötyisi. Riskinä ovat kuitenkin korkeat metaanipäästöt ja vesien rehevöityminen. Toiseksi paras vaihtoehto ilmaston kannalta olisi ennallistaa keskireheviä mäntyvaltaisia soita kohti rämeitä. Nämä eivät kuitenkaan tarjoa merkittäviä monimuotoisuushyötyjä muutoin kuin suuren pinta-alansa kautta. Ilmaston kannalta huonoin vaihtoehto on ennallistaa karuja ojitusalueita kohti märkiä, saravaltaisia avosoita, koska tällöin metaanipäästöt kasvaisivat todennäköisesti merkittävästi. Näillä luontotyypeillä on kuitenkin suuri monimuotoisuusarvo, ja niiden ennallistaminen parantaa veden laatua (Menberu ym. 2017). Käytännössä ennallistamisen on täytettävä monia samanaikaisia tavoitteita ja riskejä sekä tuettava useiden ekosysteemipalvelujen tuottamista. Alueiden valinta on tällöin hyötyjen ja haittojen kompromissi, ja siihen vaikuttaa vahvasti myös niiden saatavuus.

Suoalueiden hydrologinen pirstaloituminen ja niiden kirjava maanomistus vaikeuttavat ennallistettavaksi soveltuvien kokonaisuuksien löytymistä. Ennallistamista hankaloittaa myös soiden maankäyttöön vaikuttavat ristiriitaiset ohjauskeinot, joista osa edelleen kannustaa soiden kuivatukseen. Ennallistamisen ja muun soiden maankäytön rahoitukseen yksi mahdollisuus on vapaaehtoinen hiili- ja biodiversiteettikauppa.

8. Maankäyttövaihtoehtojen (tuuli, metsät, suot) hyväksyttävyyden

8.1. Viitekehys hyväksyttävyyteen

Hyväksyttävyyden ymmärretään LandUseZero -hankkeen tutkimuksissa myönteisenä tai kielteisenä asenteena maankäyttövaihtoehtoja kohtaan, kun kontekstina oli ilmastonmuutoksen hillitseminen.

Hyväksyttävyyden tarkastelu pohjautui löyhästi Ajzen (1991) suunnitellun käyttäytymisen teorian (Theory of planned behavior TPB) komponentteihin (Kuva 17). Ihminen muodostaa eri maankäyttövaihtoehtoista enemmän tai vähemmän tietoisia uskomuksia, jotka voivat perustua esimerkiksi eri lähteistä hankittuun tietoon tai henkilökohtaisiin kokemuksiin. Näiden uskomusten pohjalta henkilö muodostaa myönteisen tai kielteisen suhtautumisen, eli asenteen, joka kuvaa sitä, missä määrin henkilö hyväksyy maankäyttövaihtoehdon, esim. tuulivoiman. Ihmissryhmän asenteet muodostavat yhdessä hyväksyttävyyden.

Asenteiden pohjalta syntyy myös käyttäytymisaikomuksia kiinnostuksen kohteena olevan asian suhteen. Ne voivat johtaa käyttäytymiseen. Tässä tutkimuksessa käyttäytymisaikomuksia ovat esimerkiksi kyselyssä ilmaissut aikomukset kannattaa esitettyä maankäyttöpolitiikkaa, tai maanomistajien aikomukset toteuttaa erilaisia metsänkäsittelymenetelmiä, tai vuokrata maata tuulivoimayhtiöiden käyttöön.



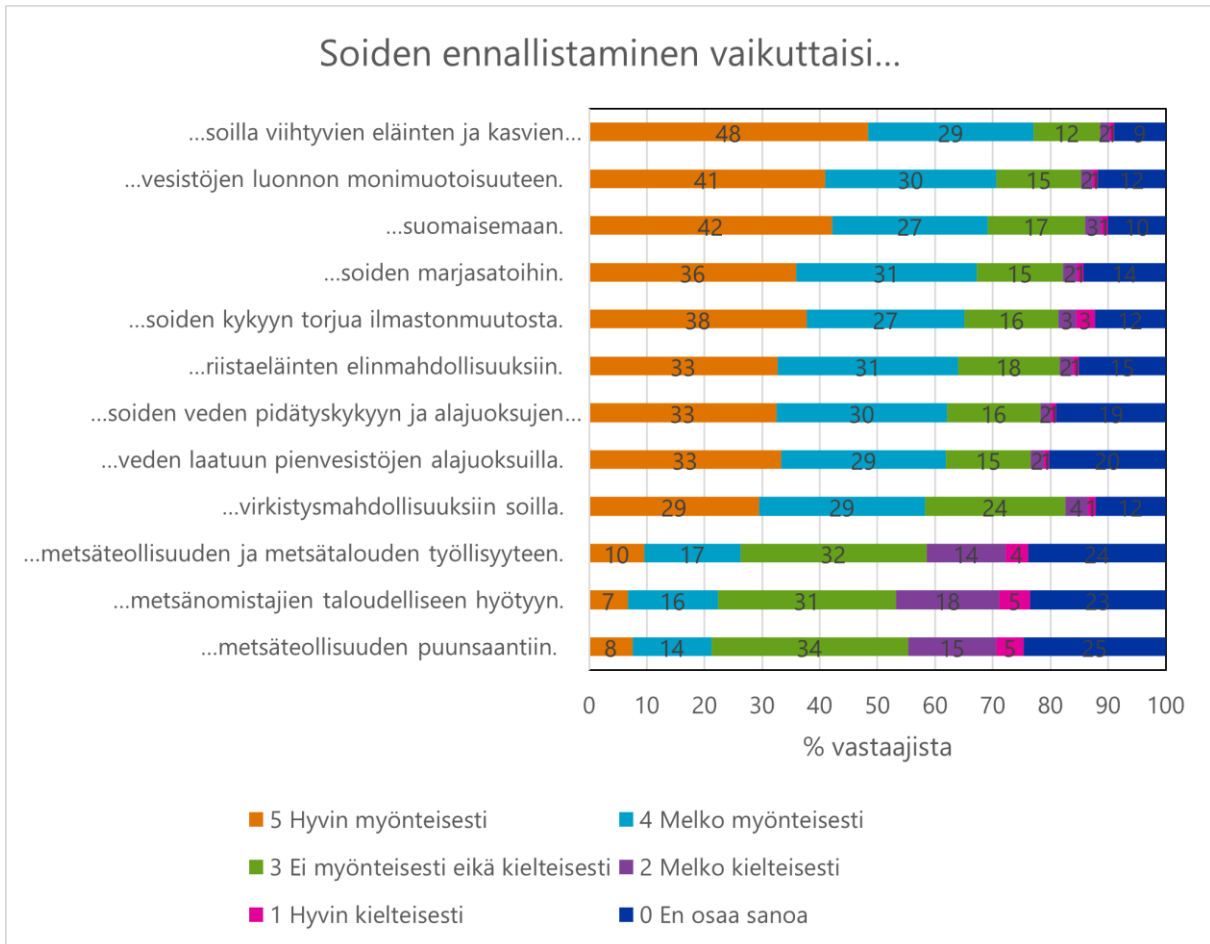
Kuva 17. Hyväksyttävyyden pohjaa uskomuksiin.

8.2. Maankäyttövaihtoehtoihin liittyvät uskomukset ja hyväksyttävyyden

LanduseZero -hankkeessa toteutettiin vuonna 2022 valtakunnallinen kysely, johon saatiin väestöä koskeva edustava kyselyaineisto, 2103 vastausta (vastausosuus 17.3 %). Kyselytutkimus tarjoaa tietoa siitä, millaisia uskomuksia suomalaisilla on kolmen maankäyttövaihtoehdon, eli soiden ennallistamisen, tuulivoiman ja ilmastometsätalouden (eli jatkuvapeitteinen kasvatusvaikutuksista).

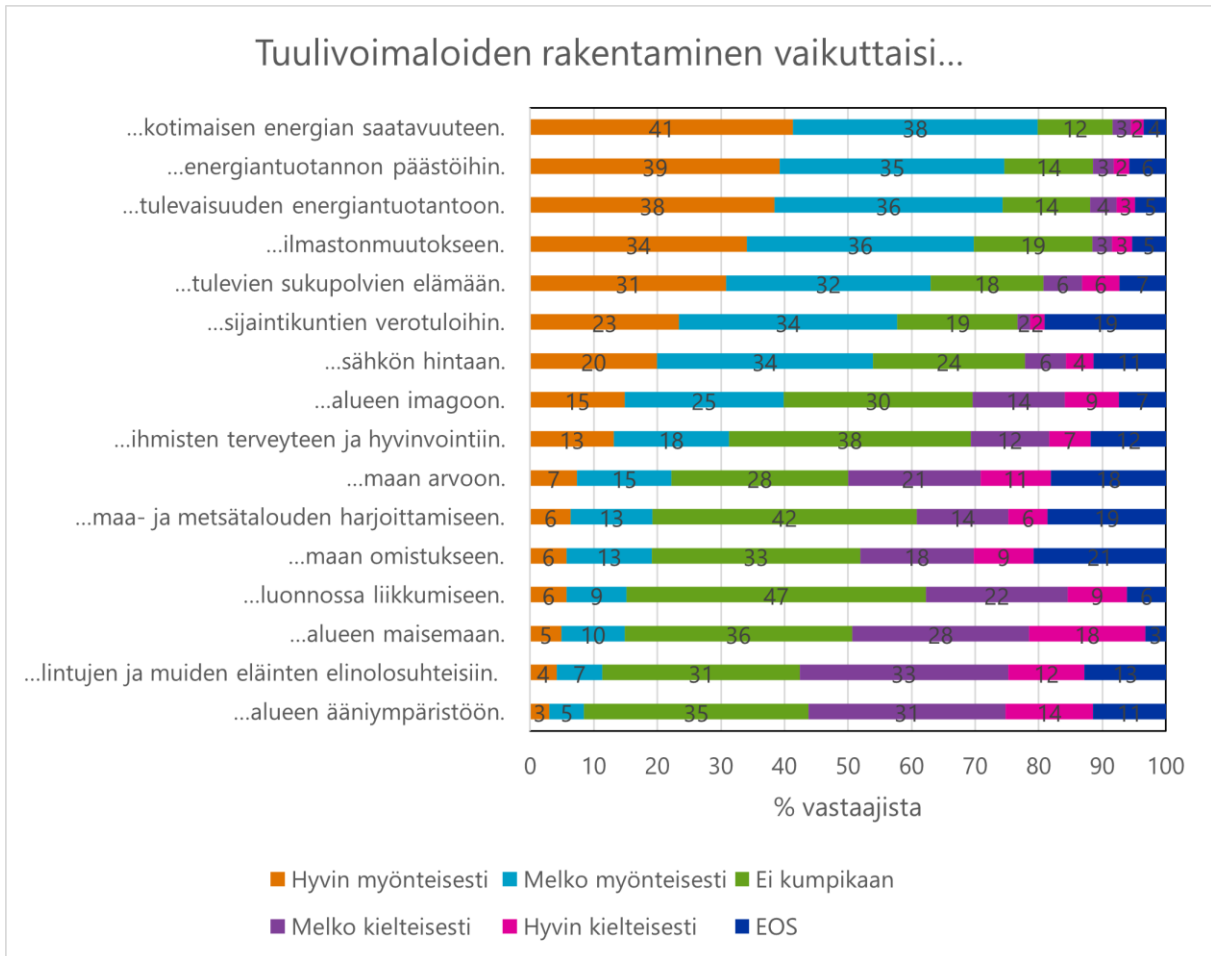
Kuva 18 kertoo, millaisia vaikutuksia soiden ennallistamisella uskottiin olevan, ja erityisesti, kuinka kielteisiä tai myönteisiä eri vaikutuksia pidettiin. Eniten myönteisiä vaikutuksia odotettiin soilla viihtyvien eläinten ja kasvien elinmahdollisuuksiin, sillä 48,4 % vastaajista uskoi, että ennallistaminen vaikuttaa niihin hyvin myönteisesti. 40,9 % vastaajista uskoi ennallistamisen vaikuttavan myös vesistöjen luonnon monimuotoisuuteen hyvin myönteisesti. Suuri osa vastaajista uskoi ennallistamisen parantavan suomaisemaa ja soiden marjasatoja. Vähemmän

myönteisiä vaikutuksia ennallistamisella arvioitiin olevan metsätalouden työllisyyteen ja metsänomistajien taloudelliseen hyötyyn. Metsäteollisuuden puunsaantiin soiden ennallistamisen vaikutukset nähtiin enimmäkseen kielteisinä tai neutraaleina. Yleisesti ottaen suurin osa vastaajista näki soiden ennallistamisen positiivisena ympäristötoimena. Vaikutukset koettiin myös epävarmoina, sillä väittämästä riippuen 9–25 % vastaajista ei osannut ottaa kantaa väittämiin vaikutuksista.



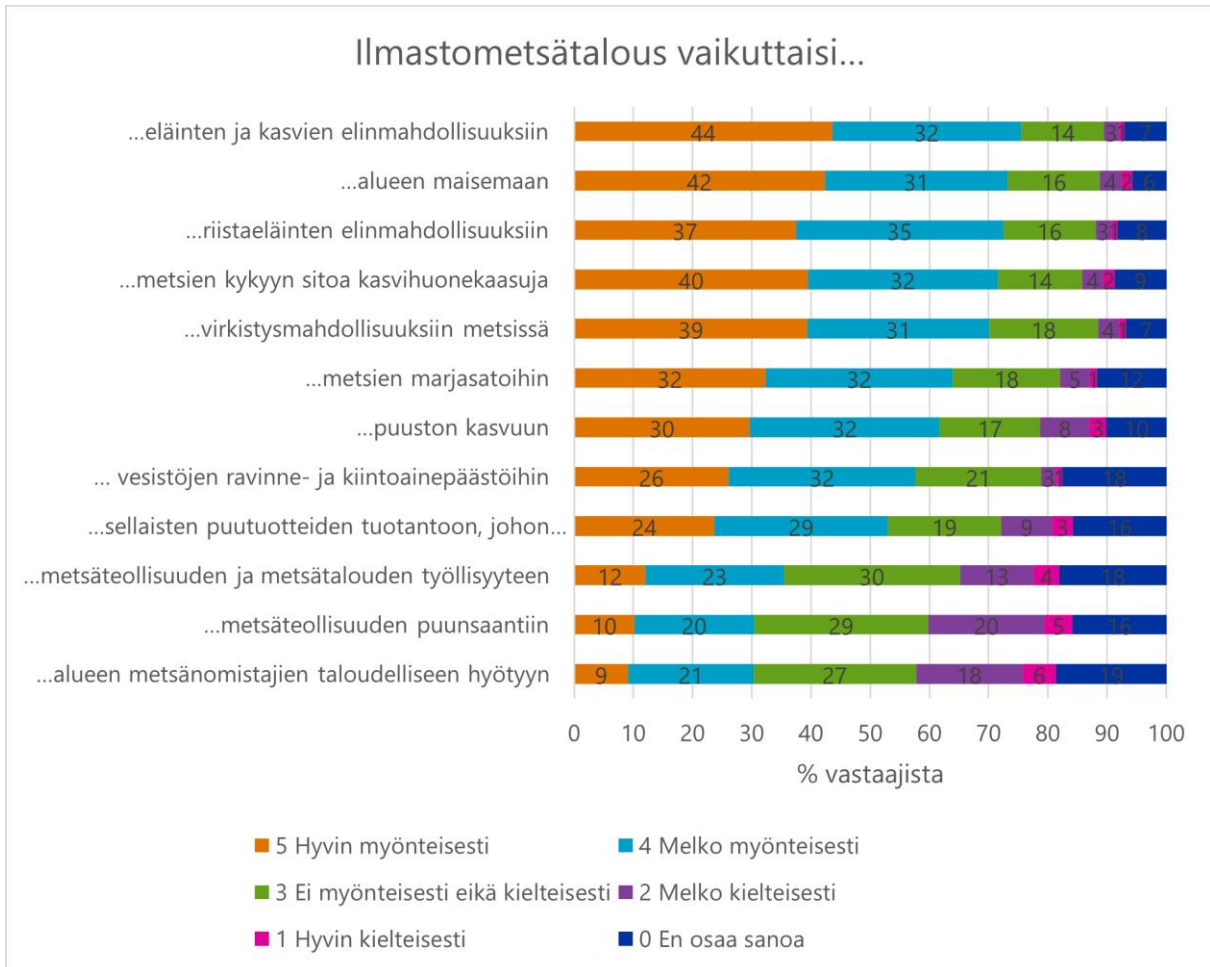
Kuva 18. Uskomukset soiden ennallistamisen vaikutuksista.

Kyselyaineiston mukaan tuulivoiman vaikutusten uskottiin olevan pääasiassa myönteisiä (Kuva 19). Eniten myönteisiä vaikutuksia koettiin liittyvän kotimaisen energian saatavuuteen: 41,3 % vastaajista koki tämän vaikutuksen hyvin myönteisenä. Tuulivoiman vaikutus energiantuotannon päästöihin koettiin myös hyvin myönteisenä (39,5 % vastaajista). Tuulivoimaloilla uskottiin olevan myös merkittäviä positiivisia vaikutuksia tulevaisuuden energiantuotannon ja ilmastonmuutoksen hillinnän kannalta. Negatiivisia vaikutuksia koettiin liittyvän eniten voimaloiden ympäristön äänimaailmaan, sillä 18,7 % koki vaikutukset hyvin kielteinä. 16,9 % vastaajista koki myös maisemavaikutukset hyvin kielteinä. Hyvin tai melko kielteinä nähtiin myös vaikutukset lintujen ja muiden eläinten elinolosuhteisiin. Ihmisten terveyteen ja hyvinvointiin tuulivoimaloiden rakentaminen nähtiin pääasiassa myönteisenä, mutta myös jonkin verran kielteisiä vaikutuksia koettiin. Vaikutukset maan arvoon ja omistukseen sekä maa- ja metsätalouden harjoittamiseen nähtiin enimmäkseen neutraaleina tai hieman kielteinä.



Kuva 19. Käsitteet tuulivoimaloiden rakentamisen vaikutuksista.

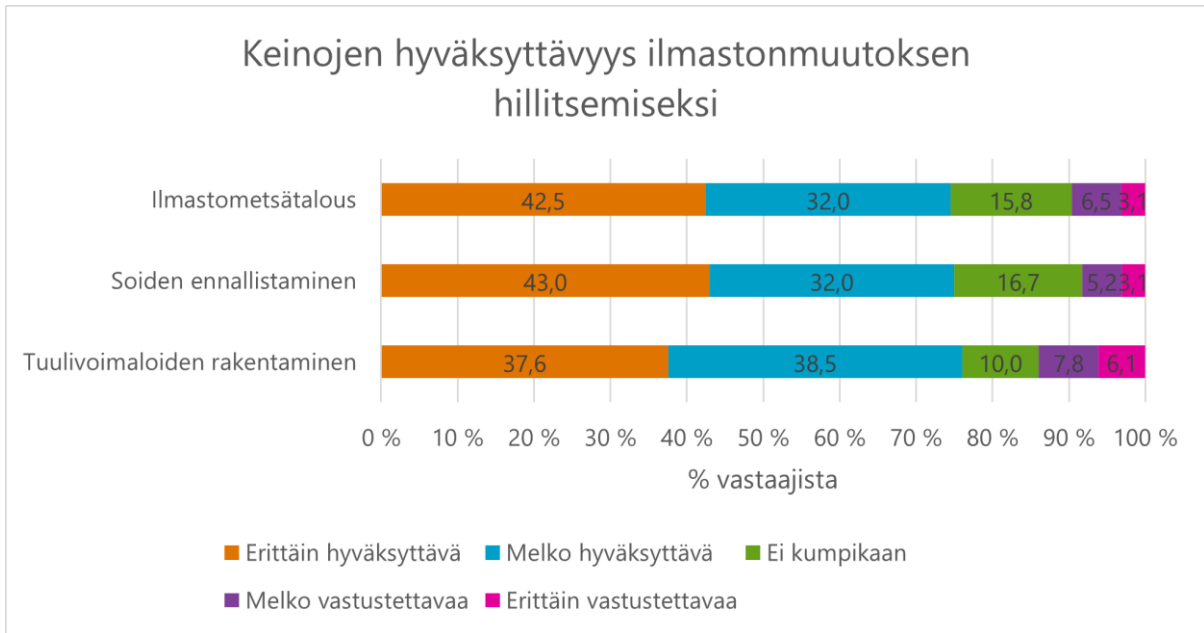
Kun kyselyyn vastaajat arvioivat ilmastometsätalouden vaikutuksia, eniten myönteisiä vaikutuksia koettiin olevan eläinten ja kasvien elinmahdollisuuksiin, sillä 43,6 % koki nämä vaikutukset hyvin myönteisinä (Kuva 20). Myös vaikutukset maisemaan koettiin usein (42,3 %) hyvin myönteisinä. 37,5 % arvioi ilmastometsätalouden vaikutuksen riistaeläinten elinmahdollisuuksiin olevan myös hyvin myönteinen. Metsien kyvyn sitoa kasvihuonekaasuja nähtiin hyötyvän ilmastometsätaloudesta. Myös vaikutukset virkistyskäyttöön ja metsien marjasatoihin nähtiin pääosin myönteisinä. Kuva vaikutuksista järeää puuta käyttävien puutuotteiden tuotantoon ja metsätalouden työllisyyteen oli jakautuneempi, mutta pääosin myönteinen. Vaikutukset metsäteollisuuden puunsaantiin ja alueen metsänomistajien taloudelliseen hyötyyn nähtiin vähemmän myönteisinä tai jopa kielteisinä. Yleisesti ottaen ilmastometsätalouden vaikutukset koettiin monilta osin positiivisina, erityisesti eri ekosysteemipalveluiden näkökulmasta. Kaikkien väittämien osalta ilmaantui myös epävarmuutta, eli vastaajia, jotka eivät osanneet arvioida vaikutuksia.



Kuva 20. Käsitukset ilmastometsätalouden vaikutuksista.

Kuva 21 kertoo vastaajien kokemasta eri maankäyttövaihtoehtojen hyväksyttävyydestä ilmastomuutoksen hillinnän yhteydessä. Soiden ennallistaminen sai voimakkaimman hyväksynnän, sillä 43,0 % vastaajista piti sitä erittäin hyväksyttävänä ja 32,0 % melko hyväksyttävänä. Tuulivoimaloiden rakentamista 37,6 % vastaajista piti erittäin hyväksyttävänä ja 38,5 % melko hyväksyttävänä. Ilmastometsätalous koettiin myös laajasti erittäin hyväksyttävänä (42,5 %) ja melko hyväksyttävänä (32,0 %) maankäyttövaihtoehtona. Vähemmän kuin 10 % vastaajista piti näitä keinoja erittäin vastustettavina tai melko vastustettavina. Soiden ennallistamista vastustettiin vähiten, sillä vain 3,1 % piti sitä erittäin vastustettavana. Vastaavasti ilmastometsätaloutta piti erittäin vastustettavana 3,1 % ja tuulivoimaloiden rakentamista 6,1 % vastaajista. Yleisesti ottaen kaikki kolme keinoa ilmastomuutoksen hillitsemiseksi saivat merkittävää hyväksyntää vastaajilta.

Vastaavaan tapaan kyselyssä tiedusteltiin käsityksiä erilaisten keinojen tarpeellisuudesta ilmastomuutoksen hillitsemiseksi. Tulokset olivat hyvin samansuuntaisia kuin hyväksyttävyydestä kysyttäessä (ei kuvaa).



Kuva 21. Maankäyttövaihtoehtojen hyväksyttävyyden hillitsemiseksi.



Kuva 22. Kuinka toivottavia eri keinot ovat ilmastopäästöjen vähentämiseksi.

Kolme tarkasteltua maankäyttövaihtoehtoa haluttiin esittää kyselyn vastaajille myös muiden ilmastonmuutosta hillitsevien toimenpiteiden joukossa ja mitata hyväksyttävyyttä tässä yhteydessä. Kuva 22 esittää, kuinka toivottavia asteikolla yhdestä viiteen erilaiset toimet ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi ovat. Hukkalämmön talteenotto jätevedestä kunnallisissa puhdistuslaitoksissa oli toivottavin toimi saaden keskiarvon 4,50. Kaatopaikkajätteen vähentäminen sai myös korkean hyväksynnän (keskiarvo 4,46). Aurinkokennojen ja -voimaloiden rakentaminen sekä aurinkoenergian tuotannon lisääminen olivat kolmanneksi hyväksyttävimmät toimet, arvolla 4,35. Myös metsien hiilensidonnallisuuden lisääminen (4,06) ja tuulivoimaloiden rakentaminen (3,95) saivat laajaa hyväksyntää. Tämän mittarin mukaan soiden ennallistaminen oli hieman vähemmän hyväksyttyä saaden kuitenkin korkeahkon keskiarvon 3,89. Kaupunkien rakenteen tiivistäminen oli vähiten hyväksytty toimi (keskiarvo 2,88), mutta sekin sai kohtalaista tukea.

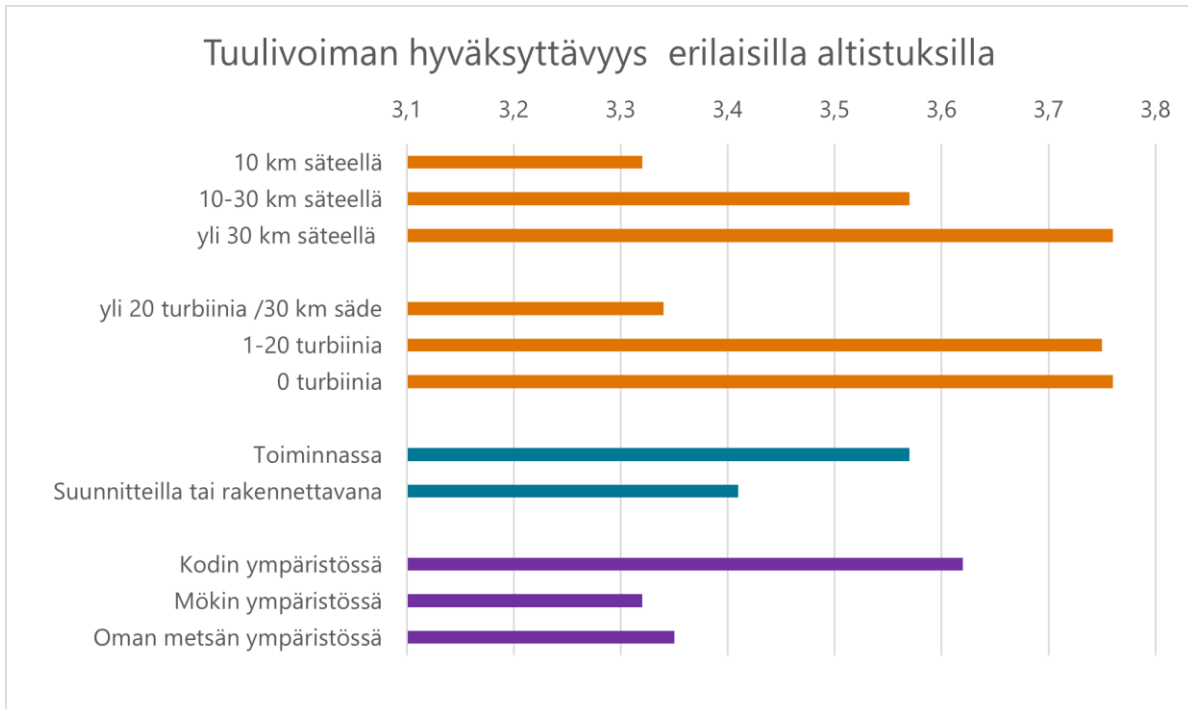
8.3. Moniulotteinen etäisyys vaikuttaa hyväksyttävyyteen

Tuulipuistojen (jota tässä luvussa käytetään tarkoittamaan tuulivoimalaitoksia, koska ko. termiä käytettiin myös kyselytutkimuksissa) sijaintietäisyyden vaikutusta niiden yleiseen hyväksyttävyyteen tutkittiin Varsinais-Suomesta ja Satakunnasta 2019 kerätyn noin 2 400 vastaajan kyselyaineiston avulla. Nämä maakunnat ovat tuulivoimakeskittymiä ja niiden väestötiheys on suomalaisittain suurehko. Hyväksyttävyyttä tarkasteltiin suhteessa etäisyyden eri ulottuvuuksiin, eli spatiaalisesta, sosiaalisesta, ajallisesta tai kokemuspohjaisesta näkökulmasta. Huomiota otettiin vastaajien kodin sekä mahdollisen loma-asunnon ympäristöissä olevat tuulipuistot sekä suunnitteluvaiheessa olevat voimalahankkeet. Kiinnostuksen kohteena oli tuulivoiman yleinen hyväksyttävyys, kun lähimmän tuulipuiston ominaisuudet (etäisyys, toteutuksen vaihe ja vastaajan sosiaalinen ympäristö eli koti, loma-asunto tai metsätila) vastaajan suhteen vaihtelivat. Tutkimus julkaistiin tieteellisessä artikkelissa Pouta ym. (2024).

Kyselyn mukaan 70 prosenttia lounaissuomalaisista kannattaa tuulivoiman rakentamista, joskin tuulipuistohankkeen käynnistyminen lähialueella myös huolestuttaa. Mitä kauempana tuulipuistot vastaajista sijaitsivat sitä myönteisempinä ne ja ylipäätään tuulivoima koettiin (Kuva 23). Suhtautumisessa painottuivat mielikuvat tuulivoimasta puhtaana energiamuotona sekä ylipäätään tulevaisuuden energiantuotannon mahdollisuudet. Lähietäisyyksillä suhtautumisessa puolestaan painottuivat paikalliset konkreettiset vaikutukset, kuten vaikutukset ulkoilu-ympäristöön, maa- ja metsätalouden mahdollisuuksiin sekä vaikutukset eläinten elinolosuhteisiin.

Tavanomaisesta oletuksesta poiketen maisemavaikutukset saatettiin kokea myös myönteisinä. Tuulipuistojen voitiin kokea helpottavan alueella suunnistamista ja vahvistavan alueen identiteettiä. Tuulipuistojen hyväksyttävyys oli suurempi, kun lähin puisto sijaitsi vakituisen kodin lähipiirissä verrattuna loma-asunnon lähiympäristöön. Mitä todennäköisimmin tulokseen vaikuttivat erilaiset elämäntyyli näissä paikoissa. Vakituksessa kodissa ihmisten arki on riippuvaista teknologiasta ja sähköntuotannosta, joten siinä ympäristössä voidaan hyväksyä näkyviä teknologisia ratkaisuja. Sen sijaan loma-asumisen ihanne voi olla yksinkertainen elämä luonnossa ja pakeneminen teknologiasta riippuvaisia päivittäisiä toimintoja. Sellaisessa ympäristössä tuulipuistot voivat aiheuttaa ristiriitaisia mielikuvia ja niiden hyväksyttävyys asettuu alemmalle tasolle.

Tuulivoiman hyväksyttävyys näytti pohjautuvan myös mielikuviin turbiinien vaikutuksista. Tämä tuli esiin siten, että käytössä jo olevat tuulipuistot koettiin hyväksyttävämpänä kuin vasta suunnitteilla olevat. Asenteet näyttävät siis muuttuvan myönteiseen suuntaan ihmisten tottuessa tuulipuistoihin. Voimalahankkeen toteutuksen myötä konkretia kasvaa ja osa uhkavista saattaa väistyä.



Kuva 23. Tuulivoiman yleinen hyväksyttävyyys asteikolla yhdestä (erittäin kielteinen) viiteen (erittäin myönteinen), kun henkilön altistus tuulivoimalle vaihtelee.

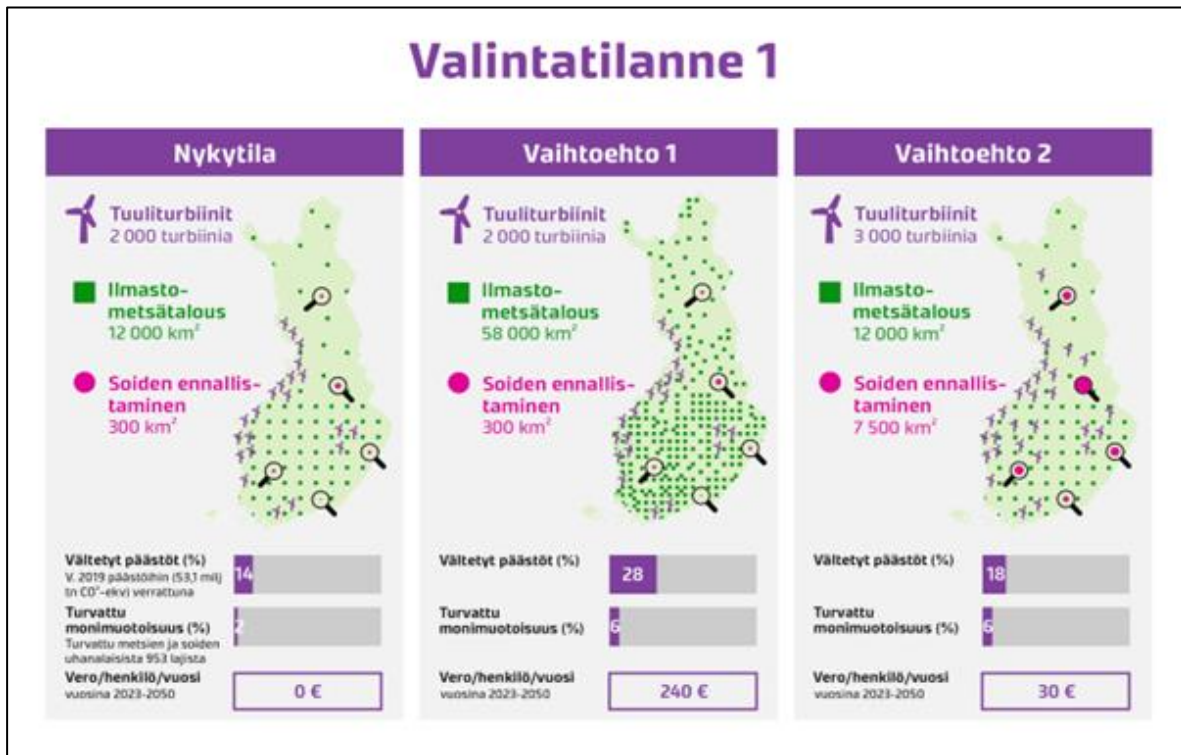
8.4. Kansalaisten preferenssit maankäyttövaihtoehtoja kohtaan

Ympäristötaloudellisen arvottamistutkimuksen menetelmillä saadaan tietoa ihmisten kokeeman ympäristöhyödyn rahallisesta arvosta, mikä mahdollistaa sen vertailun erilaisten hankkeiden taloudellisten kustannusten kanssa. Arvottamistutkimuksessa jokaisella vastaajalla on yhtäläinen merkitys, ja tutkimuksissa voidaan selvittää, miten eri väestöryhmät, kuten maanomistajat tai kaupunkilaiset, arvostavat erilaisia maankäyttövaihtoehtoja. Kyselytutkimuksessa vastaajille tarjotaan taustatietoa, jonka avulla he voivat muodostaa kantansa ja ilmaista arvotuksensa. Taloudellinen arvottaminen on ihmiskeskeistä ja demokraattista, koska jokaisella yksilöllä on yhtäläinen ääni ja jokainen vaikuttaa tutkimuksen lopputulokseen (Hiedanpää ym. 2020). Arvottamistutkimuksessa voidaan käyttää monia menetelmiä. Koska markkinattomien ympäristöhyötyjen taloudellinen arvo ei paljastu ihmisten käyttäytymisestä markkinoilla, arvon mittaamiseksi on luotava kuvitteelliset markkinat tai valinta-asetelmat.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli mitata eri maankäyttövaihtoehtojen vaikutusta ihmisten kokemaan hyvinvointiin. Tutkimus julkaistiin tieteellisessä artikkelissa Mäntymaa ym. (2024a).

Tutkimusmenetelmänä käytettiin valintakoemenetelmää (engl. choice experiment, CE). Siinä vastaajille esitetään erilaisia valintatilanteita, joissa heidän tulee valita kahden tai useamman vaihtoehdon välillä (e.g. Hensher ym. 2015). Eri vaihtoehtoja kuvataan ominaisuuksien avulla, ja näiden ominaisuuksien tarjonnan tasoa voidaan vaihdella esimerkiksi laajasta suppeaan. Ympäristöhyötyjen tarjonnan esitetään aiheuttavan vastaajalle kustannuksia, tyypillisesti korkeampina veroina. Sisällyttämällä tällainen rahamääräinen tekijä ominaisuuksien joukkoon, vastaajien maksuhalukkuus ympäristön laadun paranemisesta voidaan määrittää heidän tekemien valintojen perusteella.

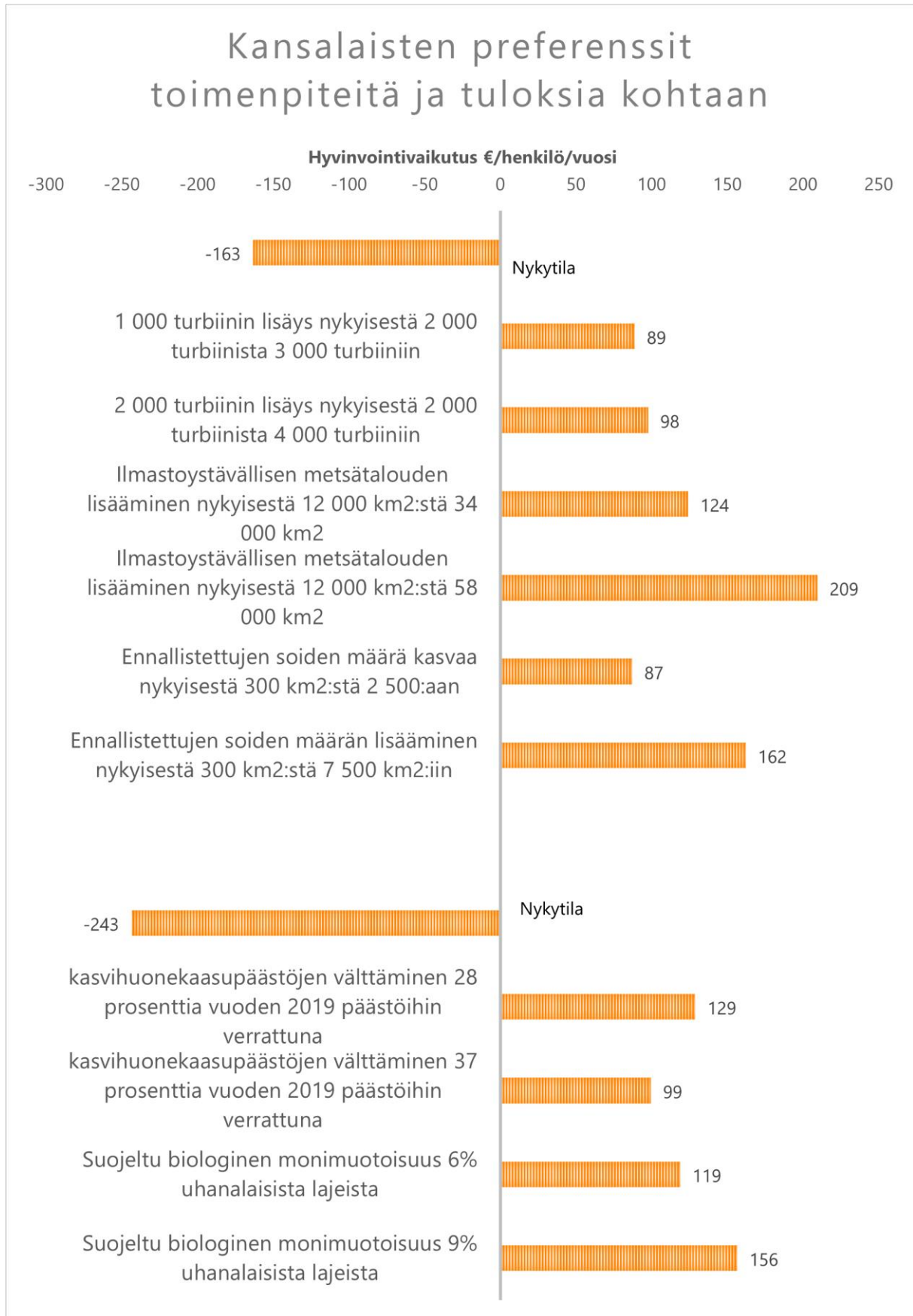
LandUseZero-hankkeessa toteutetussa valintakokeessa vastaajille kerrottiin, että maankäyttö- vaihtoehtojen vaikutukset eivät kohdistu pelkästään ilmastovaikutuksiin, vaan myös metsä- ja suomalaisiin sekä biodiversiteettiin (Kuva 24). Vaihtoehtoihin liittyvät kustannukset, kuten turvemaiden ennallistamisen ja metsien hiilensidonnan kustannukset mainittiin. Kyselyssä kerrottiin osallistujille, että maankäyttövaihtoehtojen toteuttamisen tukemiseksi tarvittavat rahalliset korvaukset rahoitetaan veronkorotuksilla kaikille suomalaisille. Kyselyssä esitettyjen toimenpiteiden toteuttamisen oli määrä alkaa vuonna 2023, ja niiden tulokset toteutuisivat vuoteen 2050 mennessä.



Kuva 24. Esimerkki valintakokeen valinta-asetelmasta.

Jokainen osallistuja sai vastattavakseen kuusi valintatehtävää, jotka sisälsivät nykytilan ja kaksi hypoteettista valtakunnallista maankäyttövaihtoehtoa (Kuva 24). Vastaajan tuli valita hänelle mieluisin vaihtoehto. Nykytilanteessa kaikki attribuuttitasot, ennallistetut suot, tuulivoima, ilmastometsätalous, ilmastovaikutukset ja biodiversiteetti, vastasivat nykyistä tilannetta, ja tällöin lisäveron taso oli nolla. Jokaisessa maankäyttövaihtoehdossa kolmen toimenpiteen tasot vaihtelivat. Vuosittainen lisävero projektin keston (2023–2050) ajalta vaihteli satunnaisesti 30 ja 960 euron välillä. Vastaajilla oli mahdollisuus arvioida havainnollistavien karttojen avulla vaihtoehtojen alueellisia vaikutuksia.

Tilastollinen malli, joka kuvasi vastaajien valintoja, kertoi vastaajien mieltymyksistä. Vastaajat ilmaisivat olevansa keskimäärin valmiita maksamaan vuosittain tukeakseen ilmastopolitiikkaa, joka vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja tehostaa hiilinieluja. Vastaajien valintoihin vaikuttivat kaikki maankäyttövaihtoehdot, ja niihin kohdistui positiivista maksuhalukkuutta, mutta erityisesti he olivat valmiita maksamaan ilmastolähtöisen metsätalouden toteuttamisesta. Vastaajien valintoihin vaikuttivat voimakkaasti myös saavutetut luonnon monimuotoisuuden lisäykset sekä jonkun verran myös ilmastohyödyt. Kuvassa 25 on esitetty vastaajien maksuhalukkuus eri attribuuttien tasoille.



Kuva 25. Keskimääräinen maksuhalukkuus €/henkilö/vuosi maankäytön keinoista ja tuloksista.

Vastaajien mieltymykset vaihtelivat asuinalueen mukaan. Pääkaupunkiseudun asukkaat osoittivat suurempaa maksuhalukkuutta tuulivoiman ja ilmastometsätalouden kasvattamiselle, vähentyneille kasvihuonekaasupäästöille ja lisääntyneelle biodiversiteetille. Tämä heterogeenisuus voi johtua arvojen ja preferenssien alueellisista vaihteluista tai politiikan alueellisesta jakautumisesta. Suuri osa toimenpiteistä kohdistuu Suomen muille alueille kuin pääkaupunkiseudulle.

Selvitimme valintoja kuvaavan tilastollisen mallin pohjalta, kuinka kansalaiset arvostavat erilaisia toimenpideohjelmia. Erilaisille maankäyttövaihtoehdoille voidaan laskea kansalliset kokonaismaksuhalukkuudet, jotka kuvaavat suomalaisten kokemia hyötyjä. Toimenpideohjelmien keskimääräinen vuotuinen maksuhalukkuus henkeä kohden vaihteli 299,9 eurosta 469,2 euroon. Kun tämä luku kerrotaan Suomen aikuisväestön määrällä (noin 4,5 miljoonaa), saatiin koko maan tasolla maksuhalukkuudeksi erilaisista ohjelmista 1 349,6 miljoonaa – 2 111,4 miljoonaa euroa. Jos vain kyselyyn vastanneiden osuuden 17,3 % oletetaan saavan hyötyä ohjelmista, summat olivat 233,5 miljoonaa – 365,3 miljoonaa euroa.

Kun arvioitiin kokonaismaksuhalukkuutta ohjelmien tuloksista, saatiin koko väestölle maksuhalukkuus 982,4 miljoonaa – 1 283,4 miljoonaa euroa. Vastaajien osuudelle saadut arviot olivat 170,5 miljoonaa – 222,0 miljoonaa euroa.

Näiden keskimääräisiin maksuhalukkuuksiin pohjaavien tulosten lisäksi tutkimme sitä, kuinka vastaajat eroavat toisistaan. Havaitimme että vastaajat voidaan ryhmitellä neljään luokkaan, joissa vastaajat muistuttavat toisiaan, mutta joiden välillä havaitaan selviä eroja. Luokat voitiin nimetä seuraavasti: "Nykytilan kannattajat", jotka eivät halunneet lisätä ilmastopolitiikan toimia nykyisestä tasosta, "Kohtalaiset osallistujat", joilla oli positiivinen maksuhalukkuus, mutta jotka reagoiva voimakkaasti veron nousuun, "Turbiinien vastustajat", jotka eivät pitäneet lisätuulivoimaloista, ja "Maksimiosallistujat", joilla oli korkeimmat maksuhalukkuudet eri toimille.

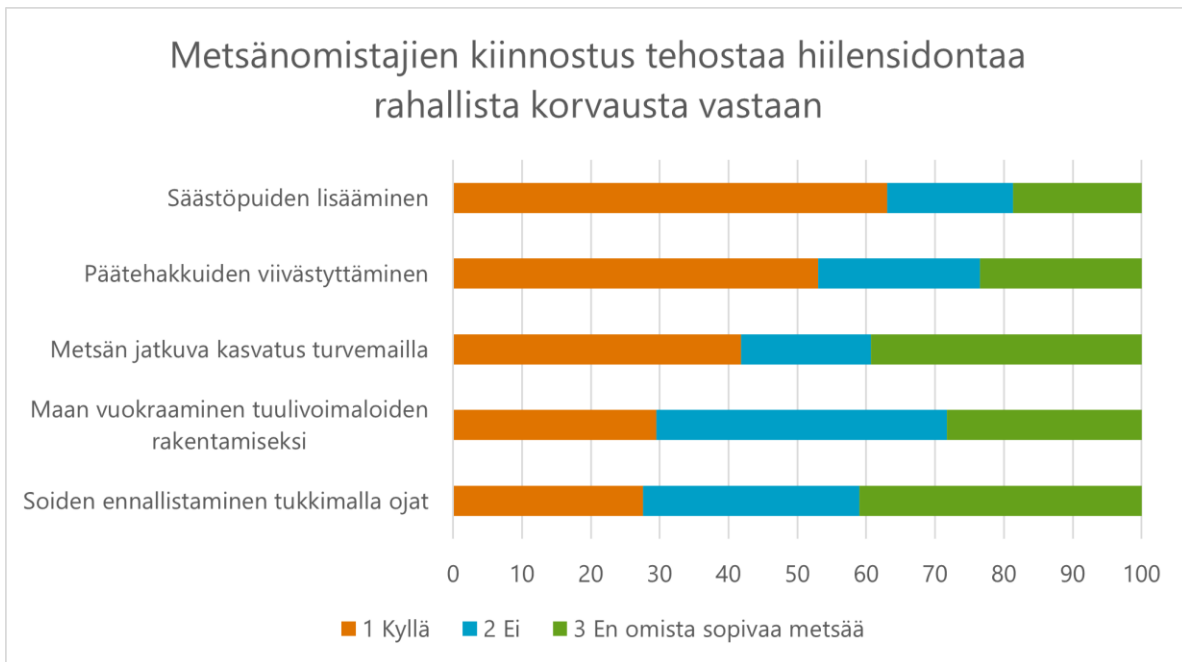
Eryityisesti korkea koulutustaso tai matala tulotaso selittivät luokkiin kuulumista. Korkea koulutustaso lisäsi todennäköisyyttä kuulua "Kohtalaiseihin osallistujiin", "Turbiinien vastustajiin" ja "Maksimiosallistujiin", kun taas matalat tulot lisäsivät todennäköisyyttä kuulua "Nykytilan kannattajiin", "Kohtalaiseihin osallistujiin" ja "Maksimiosallistujiin".

Tutkimusaineisto kerättiin keväällä 2022, pian Venäjän Ukrainaan tapahtuneen hyökkäyksen jälkeen. Sodan vaikutukset energia-alalle ja hintoihin eivät olleet vielä näkyvissä aineistonkeruujankohtana, mutta uusiutuvan energian suosio oli todennäköisesti kasvanut. Tulokset korostavat kansalaisten halukkuutta tukea ilmastopolitiikkaa ja osallistua taloudellisesti kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen ja luonnon monimuotoisuuden lisäämiseen. Tämä tarkoittaa merkittävää panostusta ilmastonmuutoksen hillintätoimiin ja ympäristönsuojeluun.

Tutkimus osoittaa myös, että metsätalouteen liittyvät toimenpiteet ovat erityisen tärkeitä, koska ne tuottavat samanaikaisesti sekä ilmasto- että biodiversiteettihyötyjä. Alueellisten erojen vuoksi on kuitenkin tärkeää ottaa huomioon eri asuinalueiden preferenssit, jotta politiikkatoimet voivat tuottaa mahdollisimman laajalti hyväksytyjä ja tehokkaita tuloksia.

8.5. Metsänomistajien kiinnostus maankäyttövaihtoehtoja kohtaan

Vuonna 2020 toteutetun kansalaiskyselyn pohjalta hankkeessa selvitettiin myös metsänomistajien kiinnostusta tehostaa erilaisin toimin hiilen sidontaan tai tukea luonnon monimuotoisuutta. Kyselyyn vastanneista 519 oli metsänomistajia. Metsänomistajat olivat erityisesti kiinnostuneita säästöpuiden lisäämisestä omistamissaan metsissä rahallista korvausta vastaan (Kuva 26). 63 % heistä katsoi sen sopivan heille toimenpiteenä. Yli puolet katsoi myös päätehakkuiden viivästyttämisen sopivan toteutettavaksi omistamissaan metsissä. Jatkuva kasvatus turvemilla oli hieman vähemmän suosittu käytäntö; lähes 40 % metsänomistajista katsoi, ettei omista siihen sopivaa metsää. Kyselyssä selvitettiin myös, ovatko metsänomistajat kiinnostuneita vuokraamaan maata tuulivoimaloiden rakentamiseksi. Lähes 30 % oli kiinnostunut, mutta lähes saman verran katsoi, ettei omista sopivaa metsää. Soiden ennallistamisesta oli kiinnostunut noin 28 % prosenttia metsänomistajista ja yli 40 % katsoi, ettei omista ennallistamiseen sopivaa alaa.



Kuva 26. Metsänomistajien kiinnostus toteuttaa ilmastonmuutosta hillitseviä ja monimuotoisuutta lisääviä toimenpiteitä.

Niiltä metsänomistajilta, jotka olivat kiinnostuneita edellä mainituista toimenpiteistä, kysyttiin, kuinka paljon hehtaareita he halusivat allokoida toimenpiteen piiriin. Metsänomistajat, jotka olivat kiinnostuneita päätehakkuiden viivästyttämisestä, olivat kiinnostuneita allukoimaan siihen keskimäärin 19 hehtaaria (Taulukko 14). Samaa suuruusluokkaa oli säästöpuiden jättämiseen allukoitava keskimääräinen pinta-ala. Ne metsänomistajat, jotka olivat kiinnostuneita jatkuvasta kasvatuksesta, halusivat suunnata siihen keskimäärin 15 hehtaaria. Soiden ennallistamiseen puolestaan oltiin valmiita jättämään noin 50 hehtaaria. Maan vuokraamisesta tuulivoimalle kiinnostuneet metsänomistajat olivat halukkaita vuokraamaan keskimäärin 20 hehtaaria.

Edellä mainittujen toimenpiteiden kompensationsvaatimukset vaihtelivat paljon toimenpiteiden välillä. Pienin kompensationsvaatimus oli säästöpuiden jättämiselle ja selkeästi suurin

kompensaatiovaade oli maan vuokraamiselle tuulivoimalle, joka toimenpiteenä olikin hyvin erilainen kuin metsätalouden toimenpiteet.

Taulukko 14. Maanomistajien kompensatiovaatimukset keskimäärin hiilensidontaa edistävästä toimenpiteistä.

Toimenpide	Halukkuus allokoida metsäalaa (ha)	Kompensaatiovaade, mediaani, €/ha/vuodessa
Viivästetty päätehakkuu	18,50	92,1
Jatkuva kasvatus turvemailla	15,00	49,1
Säästöpuiden lisääminen 10 m ² :een/ha	18,90	11,9
Soiden ennallistaminen tukkimalla ojat	52,20	85,1
Maan vuokraaminen tuulivoimalle	20,40	725,7

8.6. Maisema-arvokaupalla hyväksyttävyyttä

Metsien käsittelystä sopiminen metsänomistajien ja asukkaiden tiiviissä yhteistyössä voisi olla yksi keino vähentää tuulivoiman maisema- ja meluhaittoja ja siten parantaa hyväksyttävyyttä. Negatiivisia vaikutuksia voitaisiin vähentää välttämällä metsänhakkuita asuinalueiden ja turbiinien välimaastossa tai harjoittamalla siellä tavallista kevyempää metsienkäsittelyä, kuten jatkuvapeitteistä kasvatusta tai kiertoaikojen pidentämistä (Mäntymaa ym. 2021). Näin valtaosa puustosta säilyisi ja peittäisi turbiinit näkyvistä. Tällaisia metsäalueita voidaan kutsua *maisemakilviksi* (Kuva 27, ks. myös Luku 5.1). Samalla kun ne vaikuttavat maisemaan ne vaimentavat melua ja tuottavat asukkaille virkistyshyötyjä.



Kuva 27. Maisemakilven perusajatus.

Maisemakilpien käytännön toteutus noudattaisi Payment for Ecosystem Services (PES, maksu ekosysteemipalveluista) -ajatusmallia. Siinä maisemakilvistä hyötyvät paikalliset asukkaat, korvaavat kyseisen ekosysteemipalvelun tuottajalle, eli metsänomistajalle, toimenpiteestä aiheutuneen rahallisen menetyksen. Rahallinen menetys aiheutuisi, kun hakkuita siirretään myöhemmäksi niiden metsätaloudellisesti parhaasta ajankohdasta. Maisemakilvet toteutettaisiin sopimusten avulla, jotka olisivat vapaaehtoisia ja määräaikaista.

Maisemakilven toteuttamista saattaa vaikeuttaa kysymys omistajuudesta. Paikalliset asukkaat saattavat kokea olevansa maiseman omistajia, jos ovat asuneet alueella pitkään. Omistamisen kokemukseen voi liittyä ajatus siitä, että itse asiassa asukkaille pitäisi maksaa korvausta, jos maisema heikkenee tuulivoimaloiden rakentamisen takia. Tällöin olisi myös mahdollista useamman osapuolen mukaantulo maisemakilpien rahoittamiseen. Hyvitykseen tarvittavien varojen keräämiseen saattaisivat olla valmiita myös voimalahankkeista hyötyvät energiayhtiöt sekä alueiden kunnat.

Kyselytutkimuksen mukaan suurin osa (83,7 %) varsinaissuomalaisista ja satakuntalaisista oli kiinnostuneita osallistumaan tuulivoimaan liittyvään maisema-arvokauppaan (Mäntymaa ym. 2023). Keskimäärin he olivat valmiita maksamaan 80,9 euroa hehtaarilta vuosittain tuuliturbiinit peittävistä maisemakilvistä. Käytimme asenne-käyttäytymiskehystä ymmärtääksemme asukkaiden maksuhalukkuuden taustalla olevia tekijöitä. Analyysi korosti asenteiden ja subjektiivisten normien merkitystä maksuhalukkuuden selittämisessä. Tämä tulos korostaa voimakkaasti viestinnän ja paikallisen yhteistyön merkitystä maisemakilpien järjestämisessä

Maanomistajista jopa 74 prosenttia oli halukkaita osallistumaan maisema-arvokauppaan ja tuottamaan maisemakilpiä, eli tavanomaista lievempää metsienkäsittelyä (Mäntymaa ym. 2024b). Metsänomistajan vähäinen riippuvuus metsätaloudesta ja metsätuloista lisäsi kiinnostusta osallistua maisema-arvokauppaan ja pienensi korvausvaatimuksia. Myös maisema-arvokaupan vapaaehtoisuus lisäsi osallistumishalukkuutta. Mitä kiinnostuneempia omistajat olivat paikallisesta keskustelusta ja yhteistyöstä, sitä vähemmän he olivat valmiit vaatimaan korvausta. Keskimääräinen vuosikorvausvaatimus tässä tutkimuksessa oli 298 euroa hehtaarilta.

Koska asukkaiden maksuhalukkuus oli kyselyn mukaan kuitenkin pienempi kuin metsänomistajien rahallinen korvausvaade, maisema-arvokauppa voisi käytännössä toimia vain silloin, kun maisemakilvet hyödyttävät samanaikaisesti useita maksuhalukkaita kotitalouksia. Maisemakilvet voidaan nähdä tehokkaana välineenä hyväksyttävyyden edistämiseen erityisesti silloin, jos tuulivoimaloita tullaan rakentamaan taajamien läheisyyteen. Maisemakilvet voivat tuoda maisemahyötyjen lisäksi asukkaille myös muita hyötyjä, kuten virkistysympäristöä ja mahdollisuuden ylläpitää luonnon monimuotoisuutta.

8.7. Yhteenveto hankkeen hyväksyttävyydestä tutkimuksista

Soiden ennallistaminen, tuulivoimaloiden rakentaminen ja ilmastometsätalous saavat merkittävää hyväksyntää kansalaisilta ilmastomuutoksen hillinnän keinoina. Soiden ennallistamisen uskotaan parantavan erityisesti luonnon monimuotoisuutta, mutta vaikutukset metsätalouteen ja metsäteollisuuteen nähdään enimmäkseen kielteisinä tai neutraaleina. Tuulivoiman yleinen hyväksyttävyys kasvaa henkilön ja lähimmän voimalan etäisyyden kasvaessa. Tuulivoiman vaikutusten uskottiin olevan pääasiassa myönteisiä, erityisesti kotimaisen energian saatavuuteen ja energiantuotannon päästöihin, mutta negatiivisia vaikutuksia koettiin liittyvän voimaloiden ympäristön äänimaailmaan, maisemaan sekä mahdollisiin luontovaikutuksiin. Ilmastometsätalouden vaikutukset koettiin pääosin positiivisina, erityisesti luonnon monimuotoisuuteen sekä maisemaan liittyvät vaikutukset, mutta vaikutukset metsäteollisuuden puunsaantiin ja metsänomistajien taloudelliseen hyötyyn nähtiin vähemmän myönteisinä tai jopa kielteisinä.

Kansalaiset haluavat tukea ilmastopolitiikkaa ja osallistua taloudellisesti kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen ja luonnon monimuotoisuuden lisäämiseen. Metsätalouteen liittyvät toimenpiteet koettiin erityisen tärkeiksi, koska ne tuottavat samanaikaisesti sekä ilmastoa että biodiversiteettiä. Erilaisista metsätalouden toimista metsänomistajat ovat erityisesti kiinnostuneita säästöpuiden lisäämisestä omistamissaan metsissä rahallista korvausta vastaan.

Kyselytutkimuksessa testattu maisema-arvokauppa tuulivoiman haittojen ehkäisemiseksi kiinnostaa sekä metsänomistajia että metsää omistamattomia kansalaisia. Maisema-arvokauppa voisi toimia tuulivoiman haittojen ehkäisemisessä, jos se hyödyttäisi useita maksuhalukkaita kotitalouksia. Näin maisema-arvokaupalla voitaisiin torjua tuulivoiman haittoja erityisesti taajamien läheisyydessä.

9. Suositukset: Miten tuulivoima voidaan sovittaa muuhun maankäyttöön kestävästi ja hyväksyttävästi?

Tuulivoima on maankäyttömuoto, jonka sijoittuminen kohdistuu Suomessa pääosin metsäisiin ympäristöihin. Siten se kilpailee yhä monitavoitteisemmaksi muuttuvasta maankäytöstä. Tuulivoiman hyöty on ylivoimainen, jos maankäytössä painotetaan vain ilmastoa. Jos painotetaan monimuotoisuutta, soiden ennallistaminen ja peitteiset metsät ovat avainasemassa. Jos painotetaan taloutta, tuulivoima ja metsät ovat etusijalla, sillä ennallistamisen osalta tulonmuodostus esimerkiksi hiili- tai biodiversiteettikaupan muodossa on vielä alkutekijöissään. Koska kaikkia hyötyjä ei voida maksimoida yhtä aikaa, joudutaan pohtimaan, mitä hyötyjä missäkin tilanteessa painotetaan.

Tuulivoiman nopea leviäminen asettaa haasteita maankäytölle ja sen suunnittelulle. Keskeiset ongelmat liittyvät monimuotoisuus- ja ympäristövaikutuksiin, meluun ja visuaaliseen haittaan, suunnitteluprosessiin ja taloudellisten hyötyjen ja haittojen epätasaiseen jakautumiseen. Kaikki nämä heijastuvat tuulivoiman hyväksyttävyyteen. Heikko hyväksyntä voi hidastaa uusien tuulivoimahankkeiden käynnistämistä ja sitä kautta hidastaa ilmastomuutoksen hillintätoimia.

Tuulivoiman hyväksyntään vaikuttaa kuusi osatekijää: 1) vaikutukset ihmisiin, 2) vaikutukset luontoon, 3) vaikutukset talouteen, 4) luottamus suunnitteluprosessiin, 5) sosiaaliset normit ja 6) asenteet puhtaan energian siirtymää kohtaan (Tolvanen ym. 2024).

9.1. Vaikutukset ihmisiin

Tuulivoiman maisemallisia, visuaalisia ja meluhaittoja voidaan vähentää viisaalla ja ennakoivalla suunnittelulla. Lievennyshierarkiaa voitaisiin soveltaa ihmisiin kohdistuvien vaikutusten kohdalla vastaavalla tavalla kuin haitallisten luontovaikutusten lieventämisen kohdalla.

Välttä. Tuulivoimala-alueet pyritään maakuntakaavoituksessa sijoittamaan metsäisille ja harvaan asutuille vyöhykkeille kauas kuntakeskuksista, jotta taajamien asukkaisiin kohdistuva häiriö vähenisi. Tästä huolimatta tuulivoiman hyväksyntä on suurempaa, kun se havaitaan vakituisen kodin lähipiirissä verrattuna loma-asunnon lähiympäristöön (Luku 8.3, Pouta ym. 2024). Tuulivoimaa sijoitettaessa tulisi välttää sellaisten loma-asutusalueiden ympäristöjä, joissa mielikuva luonnonrauhasta on vahva, ja luonnon monimuotoisuus on todennäköisesti vakituista asuinympäristöä korkeammalla tasolla.

Lievennä. Melu- ja äänimallit osoittavat, että metsät voivat toimia tehokkaina maisemakilpinä tuulivoiman vaikutukselle (Luku 5.2, Heinonen 2024, Selkimäki 2024). Metsäisten maisemakilpien avulla voidaan siis lieventää tuulivoiman häiriövaikutusta erityisesti taajamien läheisyydessä. Maisemakilvet voivat tuoda maisemahyötyjen ohella asukkaille muita hyötyjä, kuten virkistysympäristöä ja mahdollisuuden ylläpitää luonnon monimuotoisuutta.

Kompensoi. Satakunnassa ja Varsinais-Suomessa tehty kyselytutkimus osoitti, että asukkaat ja metsänomistajat olivat kiinnostuneita osallistumaan maisema-arvokauppaan, jossa asukkaat maksavat metsänomistajille peitteisestä metsänkasvatuksesta (Luku 8.6, Mäntymaa ym.

2024b). Maisema-arvokauppa voi käytännössä toimia kuitenkin vain silloin, kun maksajia on riittävästi, keskimäärin ainakin neljä maksuhalukasta kotitaloutta. Myös tuulivoimayhtiöt voisivat osallistua maisema-arvokauppaan maksamalla metsänomistajille peitteisestä metsänkasvatuksesta. Tämä edesauttaisi maisema-arvokaupan toteutusta harvaanasutuilla alueilla loma-asuntojen ympäristössä ja lisäisi hyväksyntää tilanteessa, jossa tuulivoimalaitoksia joudutaan rakentamaan taajamien läheisyyteen.

Tuulivoiman hyväksyntä oli tutkimustemme (Luku 8.3, Pouta ym. 2024b) mukaan pienempää suunnitteluvaiheessa kuin tuulivoimalaitosten toiminnan vaiheessa. Tämä voi kertoa paitsi epävarmuudesta suunniteltavan tuulivoiman mahdollisista vaikutuksista elämänlaatuun, myös siitä, että kun käytössä oleva tuulivoima on hyvin suunniteltu ja sijoitettu, asukkaat voivat sopeutua siihen.

9.2. Vaikutukset luontoon

Ihmisiin kohdistuvan häiriön minimoiminen tuulivoimahankkeiden sijoittamisessa johtaa siihen, että hankkeet sijoitetaan syrjäseutujen luonnonympäristöihin ja joskus myös lähelle luonnonsuojelualueita. Seurauksena saattaa olla elinympäristöjen pirstoutuminen ja jopa lajien uhanalaistumiskehityksen nopeutuminen. Tässä yhteydessä ilmastonmuutoksen hillintä on potentiaalisesti ristiriidassa monimuotoisuuden turvaamisen kanssa, ja tuulivoiman luontovaikutus on päinvastainen kuin mihin EU:n Biodiversiteettistrategian ja ennallistamisasetuksen avulla pyritään saamaan aikaan. Haitalliset luontovaikutukset huolestuttavat myös paikallisyhteisöjä ja heikentävät osaltaan tuulivoiman hyväksyntää.

Ympäristövaikutusten arvioinnin eli YVA:n tavoitteena on vähentää tai estää maankäyttöhankkeiden kielteisiä vaikutuksia. Tuuli- ja aurinkovoimahankkeiden nopea lisääntyminen haastaa YVA-prosessia erityisesti toisiaan lähekkäin sijaitsevien hankkeiden osalta. Yhteisvaikutukset voivat nousta yksittäisiä hankkeita suuremmiksi erityisesti silloin, kun ne sijoittuvat lajien leviämisen kannalta tärkeisiin ympäristöihin. Tehokas sijainninhjaus sekä maakunta- että kuntatasolla samoin kuin vierekkäisten maakuntien ja kuntien välillä on siten keskeistä.

Kun lievennyshierarkiaa sovelletaan viisaasti, voidaan samanaikaisesti torjua sekä luontoon että ihmisiin kohdistuvia haittoja.

Vältä. Tietoa eläinten siirtymäetäisyyksistä voidaan hyödyntää toteutettaessa lievennyshierarkiaa tuulivoiman sijoittamisessa ja toiminnassa (Luku 4.6, Tolvanen ym. 2023). Kaikkein tehokkainta on välttää direktiivi- ja uhanalaisille lajeille tärkeitä tai muutoin arvokkaita elinympäristöjä turbiinien sijoittelussa. Tämä toteutuu esimerkiksi pitämällä riittävä etäisyys sellaisiin suojelualueisiin, jotka ovat tärkeitä suurnisäkkäille tai petolinnuille, jotka liikkuvat suojelualueita huomattavasti laajemmalla alueella. Niin kauan kuin kotimaista tieteellistä tutkimustietoa lajien käyttäytymisestä ja populaatiomuutoksista ei ole saatavilla, kansainvälinen tieteellinen tutkimustieto tarjoaa hyvän lähtökohdan vaikutusten arviointiin. Sijoittelussa tulisi myös noudattaa varovaisuusperiaatetta, ettei lajien uhanalaistumiskehitystä edesauteta lisää.

Lievennä. Toinen lievennyshierarkian vaihe on minimoida (tai lieventää) tuulivoimasta aiheutuvia haittoja, ja tätä voidaan tehdä esimerkiksi vähentämällä törmäysriskejä erilaisten teknisten keinojen, kuten voimaloiden tai niiden roottoreiden maalaamisella sekä lintututkien ja automaattisen pysäytyksen avulla, mikäli hanke potentiaalisesti vaarantaa uhanalaisen lajin esiintymistä alueella. Ihmisiin kohdistuvia vaikutuksia lieventävät peitteiset maisemakilvet

voivat auttaa myös monimuotoisuuden turvaamisessa, sillä ne tarjoavat elinympäristöjä tuulivoima-alueelta pois siirtyneelle metsälajistolle.

Kompensoi. Ympäristöä palauttavia toimenpiteitä voidaan tehdä tuulivoimalaitosalueilla, mutta törmäysriskien minimoimiseksi järkevämpää on toteuttaa niitä lähialueilla esimerkiksi lähialueita suojelemalla tai ennallistamalla. Tuulivoimayhtiöt voisivat osallistua vapaaehtoiseen kompensatio-ohjelmiin, jotka lieventäisivät monimuotoisuuteen kohdistuvia vaikutuksia ja edistäisivät sitä kautta tuulivoiman hyväksyntää.

9.3. Vaikutukset talouteen

Tuulivoimaprojektit voivat vaikuttaa paikallisiin elinkeinoihin, kuten matkailuun, virkistykseen, pohjoisessa poronhoitoon ja merituulivoiman tapauksessa kalastukseen. Hyödyt ja haitat jakautuvat usein epätasaisesti, mikä voi aiheuttaa paikallisten asukkaiden keskuudessa ristiriitaja.

Ainakin kolme eri ihmisryhmää kokee hyödyt ja haitat eri tavoin. Maanomistajat, joiden maille tuulivoimalat ja niiden väliset yhdystiet sijoitetaan, hyötyvät jatkuvista vuokratuloista tuulivoimalaitoksen toiminnan aikana sekä parantuneista tieyhteyksistä. Toisaalta ne maanomistajat, joiden omistama alue jää voimalaitoksen verkkoonliittymän siirtolinjojen alle, voivat saada siirtolinjasta kertakorvauksen, koska menettävät mahdollisuutensa hyödyntää johtokadun alla sijaitsevaa maata haluamallaan tavalla. Kolmas ryhmä on muut paikalliset asukkaat, jotka eivät saa suoraa taloudellista hyötyä tuulivoimahankkeesta, joskin voivat hyötyä hankkeen työllistävästä vaikutuksesta ja paikkakunnan kiinteistöverotuloista. He voivat kokea tuulivoimahankkeen vaikutukset haitallisina arjessaan, vapaa-ajan ympäristössään tai elinkeinonsa harjoittamisen kannalta. Vastustus voi kaataa yksittäisten voimaloiden tai koko tuulivoimalahankkeiden sijoittamisen, mikä puolestaan aiheuttaisi tulonmenetyksiä niille metsänomistajille, joiden maille hankkeet olisivat sijoittuneet.

On tärkeää tunnistaa tuulivoiman tuottamat taloudelliset hyödyt ja haitat sekä kehittää uusia keinoja niiden epätasaisesta jakautumisesta aiheutuvien ongelmien ratkaisemiseksi. Maankäytön muutosmaksut, erilaiset yhteisön tulonjakomallit ja maisema-arvokauppa voisivat osaltaan auttaa ratkaisemaan hyötyjen ja haittojen epätasaisesta jakautumisesta aiheutuvia ongelmia.

9.4. Suunnitteluprosessi, sosiaaliset normit ja puhtaan siirtymän kokonaisvaltaiset hyödyt

Tuulivoiman hyväksyntään vaikuttavat myös suunnitteluprosessin avoimuus, sosiaaliset normit ja kansalaisten asenteet puhtaan energian siirtymää kohtaan.

Tuulivoimahankkeiden suunnittelu alkaa yleensä neuvotteluilla maanomistajien kanssa. Siinä vaiheessa, kun suunnittelu tulee avoimeksi, alustavat sopimukset on usein tehty, jolloin ulkopuolisten tahojen asiaan vaikuttaminen on vaikeampaa. Varhainen ja aktiivinen vuorovaikutus lisää kansalaisten luottamusta ja hyväksyntää, ja siksi paikallisyhteisöt tulisi ottaa mukaan suunnitteluun jo alkuvaiheessa.

LandUseZero-hankkeen kyselytutkimukset osoittivat, että tuulivoimaan kohdistuva mielipideilmasto on lähtökohtaisesti positiivinen, kun taas huolet ilmenevät paikallistasolla (Luku 8).

Tuulivoimaprojektit rakennetaan usein syrjäseuduille, joiden yhteisöt ovat jo saattaneet kohdata arkeensa vaikuttaneita suuria teollisuushankkeita, kuten vesivoimaa, kaivostoimintaa tai massaturismia. Uusi hanke voi olla yhteisölle "viimeinen pisara" ja aiheuttaa suurempaa vastarintaa kuin mitä olisi ilman aiempia hankkeita. Toisaalta, jos tuulivoimahanke on yhteisön ensimmäinen suurten investointien kohde, asukkaat eivät välttämättä ole tottuneet näin suuriin kehityshankkeisiin. Tällöin vastustajat voivat olla aktiivisempia kuin kannattajat tai neutraalit asukkaat, vaikka nämä muodostaisivat enemmistön.

Pelkkien kuulemisten sijaan tarvitaankin monisuuntainen prosessi, jossa paikallisilla on mahdollisuus saada äänensä kuuluville ja vaikuttaa osaltaan siihen, kuinka tuulivoimalat sijoitetaan, jos hanke lähtee käyntiin.

9.5. Maanomistusolojen määräävä asema

Suomessa on yli puoli miljoonaa metsänomistajaa, joiden toiminta pitkälti ohjaa tuulivoiman sijoittamista, samoin soiden ennallistamisen ja metsänhoitotapojen toteuttamista. Tästä syystä kokonaisvaltainen maankäytön suunnittelu, jossa toimintojen sijoittelu tehdään kaikki kestävyuden elementit (taloudellinen, sosiaalinen, ekologinen, kulttuurinen) huomioiden, on vaikeaa. Esimerkiksi soiden ennallistamisen osalta yhtenäisten hydrologisten kokonaisuuksien löytäminen ennallistettavaksi on kirjavista maanomistusoloista johtuen haasteellista. Tuulivoimahankkeiden etenemiseen vaikuttaa sen sijaan olennaisesti, keiden maanomistajien kanssa sopimukset saadaan tehtyä. Tällöin luontoarvot ja muiden asukkaiden mielipiteet saattavat jäädä vähemmälle huomiolle, elleivät asukkaat aktiivisesti osallistu YVA-prosessiin ja kaavoitukseen eri oikaisumenettelyjen kautta.

Tarvitaan taloudellisia ohjauskeinoja, jotta maanomistajia voitaisiin kannustaa hyväksyttävään ja kokonaiskestävään toimintaan kannattavasti. Myöskään poliittisten ohjauskeinojen, kuten ilmastonmuutoksen hillinnän ja monimuotoisuuden turvaamisen, ei tulisi olla keskenään ristiriidassa.

9.6. Tutkimustarpeita

Tuulivoiman rinnalle on nousemassa aurinkovoima, jonka maankäyttöön ja luontovaikutuksiin liittyvä tutkimus on Suomessa vielä alkuvaiheessa. Aurinkovoiman pinta-alavaatimus tuotettua energiaa kohti on tuulivoimaan verrattuna moninkertainen, vaikka toisaalta sitä voidaan sijoittaa lähemmäs asutusta ja pienimuotoisena myös kaupunkiympäristöihin. Näiden kahden energiamuodon sijoittamista tulisi tutkia ja suunnitella kokonaisuutena, jolloin niille voitaisiin samanaikaisesti haarukoida optimaaliset alueet ja samalla pienentää maankäytön yhteisvaikutuksia – tuuli- ja aurinkovoimaa on nykyään suunnitteilla samoihin paikkoihin hybridihankkeina, sekä maankäytön että verkkoliitännän tehokkuuden takia.

Tuulivoiman luontovaikutuksia koskeva tieteellinen tutkimus on tehty pääasiassa Suomen ulkopuolella ja on lyhytaikaista. Aurinkovoimaa koskevaa luontovaikutusten tutkimus on vasta viime aikoina alkanut. Tarvitaan tietoa näiden energiamuotojen pitkäaikaisista ja yhteisvaikutuksista luonnon monimuotoisuuteen sekä tietoa siitä, voidaanko lieventämishierarkian avulla tuottaa energiaa ilman monimuotoisuuden heikkenemistä tai jopa luontoposiitiivisesti.

Maanomistajuus vaikuttaa energiahankkeiden sijoittumiseen ja johtaa hyötyjen ja haittojen epätasaiseen jakautumiseen paikallisyhteisöissä. Tarvitaan tutkimusta paikallisten ei-markkinahyötyjen ja -kustannusten sisällyttämisestä päätöksentekoon ja niiden vaikutuksesta paikallistalouteen ja hyväksyntään.

Aurinkovoima oli LandUseZero-hankkeen kyselytutkimuksen mukaan hyväksytympää kuin tuulivoima (Luku 8.2, Kuva 22), mutta kysely tehtiin aikana, jolloin teollisen mittakaavan aurinkovoima oli vasta alkutaipaleella. Tarvitaan tutkimusta hyväksynnän ajallisesta muutoksesta ja erilaisten osallistamis- ja vuorovaikutuskeinojen merkityksestä hyväksynnälle.

Viitteet

- Adams EM, Gulka J, Williams KA (2021) A review of the effectiveness of operational curtailment for reducing bat fatalities at terrestrial wind farms in North America. *PLoS One* 16, e0256382. doi:10.1371/journal.pone.0256382
- Ajzen I (1991) The theory of planned behavior. *Organizational behavior and human decision processes* 50:179-211. [https://doi.org/10.1016/0749-5978\(91\)90020-T](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T)
- Alm J, Wall A, Myllykangas JP, Ojanen P, Heikkinen J, Henttonen HM, Laiho R, Minkkinen K, Tuomainen T, Mikola J (2023) A new method for estimating carbon dioxide emissions from drained peatland forest soils for the greenhouse gas inventory of Finland. *Biogeosciences*, 20, 3827–3855, <https://doi.org/10.5194/bg-20-3827-2023>.
- ANS Finland (2021) Air Navigation Services Finland, Height restriction areas dataset (shapefile).
- Bai ML, Chic W-C, Lee P-F, Lien Y-Y (2021) Response of waterbird abundance and flight behavior to a coastal wind farm on the East Asian-Australasian Flyway. *Environ Monitoring and Assessment* 193:181. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08985-4>
- Balotari-Chiebao F, Villers A, Ijäs A, Ovaskainen, O, Repka S, Laaksonen, T (2016) Post-fledging movements of white-tailed eagles: Conservation implications for wind-energy development. *Ambio* 45:831-840. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0783-8>
- BBOP (2012) Business and Biodiversity Offsets Programme. Resource Paper: Limits to What Can Be Offset. https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/imported/BBOP_-_Resource_Paper_Limits_20_Mar_2012_Final_Rev.pdf
- Barré K, Le Viol I, Bas Y, Julliard R., Kerbiriou C (2018) Estimating habitat loss due to wind turbine avoidance by bats: Implications for European siting guidance. *Biological Conservation* 226:205-214. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.07.011>
- Barré K, Froidevaux JSP, Sotillo A, Roemer C, Kerbiriou C. (2023) Drivers of bat activity at wind turbines advocate for mitigating bat exposure using multicriteria algorithm-based curtailment. *Science and the Total Environment* 866:161404. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.-161404
- Briones-Salas M, Lavariega MC, Moreno CE (2017) Effects of a wind farm installation on the understory bat community of a highly biodiverse tropical region in Mexico. *PeerJ* 5: e3424. <https://doi.org/10.7717/peerj.3424>
- Brown, P. Cardenas L, Del Vento S, Karagianni E, MacCarthy J, Mullen P, Passant N, Richmond B, Thistlethwaite G, Thomson A, Wakeling D, Willis D (2023) UK Greenhouse Gas Inventory 1990 to 2021: Annual Report for submission under the Framework Convention on Climate Change. Department for Energy Security and Net Zero. Ricardo Energy & Environment, UK. https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat09/23041-71441_ukghgi-90-21_Main_Issue1.pdf, Annexes therein: https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat09/2304171442_ukghgi-90-21_Annex_Issue1.pdf

- Campedelli T, Londi G, Cutini S, Sorace A, Tellini Florenzano G (2014) Raptor displacement due to the construction of a wind farm: preliminary results after the first 2 years since the construction. *Ethology Ecology & Evolution* 26:376-391. <https://doi.org/10.1080/03949370.2013.862305>
- Chipindula, J., Botlaguduru, V.S., Du, H., Kommalapati, R.R., Huque, Z. 2018. Life Cycle Environmental Impact of Onshore and Offshore Wind Farms in Texas. *Sustainability* 2018, 10, 2022. <https://doi.org/10.3390/su10062022>
- Colman JE, Eftestøl S, Tsegaye D, Flydal K, Mysterud A (2013) Summer distribution of semi-domesticated reindeer relative to a new wind-power plant. *European Journal of Wildlife Research* 59:359-370. <https://doi.org/10.1007/s10344-012-0682-7>
- Coppes J, Kämmerle J-L, Grünschachner-Berger V, Braunisch V, Bollmann K, Mollet P, Suchant R, Nopp-Mayr U (2020a) Consistent effects of wind turbines on habitat selection of capercaillie across Europe. *Biological Conservation* 244:108529. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108529>
- Coppes J, Braunisch V, Bollmann K, Storch I, Mollet P, Grünschachner-Berger V, Taubmann J, Suchant R, Nopp-Mayr U (2020b) The impact of wind energy facilities on grouse: a systematic review. *Journal of Ornithology* 161:1-15. <https://doi.org/10.1007/s10336-019-01696-1>
- Dahl EL, May R, Lund Hoel P, Bevanger K, Pedersen HC, Røskaft E, Stokke BG (2013) White-Tailed Eagles (*Haliaeetus albicilla*) at the Smøla Wind-Power Plant, Central Norway, Lack Behavioral Flight Responses to Wind Turbines. *Wild Society Bulletin* 37:66-74. <https://doi.org/10.1002/wsb.258>
- de Lucas M, Janss GFE, Ferrer M (2005) A bird and small mammal BACI and IG design studies in a wind farm in Malpica (Spain). *Biodiversity and Conservation* 14:3289-3303. DOI 10.1007/s10531-004-0447-z
- Devereux CL, Denny MJH, Whittingham MJ (2008) Minimal effects of wind turbines on the distribution of wintering farmland birds. *Journal of Applied Ecology* 45:1689-1694. doi: 10.1111/j.1365-2664.2008.01560.x
- Douglas DJT, Bellamy PE, Pearce-Higgins JW (2011) Changes in the abundance and distribution of upland breeding birds at an operational wind farm. *Bird Study* 58(1):37-43. DOI: 10.1080/00063657.2010.524914
- Eftestøl S, Tsegaye D, Flydal K, Colman JE (2023) Effects of Wind Power Development on Reindeer: Global Positioning System Monitoring and Herders' Experience. *Rangeland Ecology and Management* 87:55-68. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2022.11.011>
- Ellerbrok JS, Delius A, Peter F, Farwig, Voigt CC (2022) Activity of forest specialist bats decreases towards wind turbines at forest sites. *Journal of Applied Ecology* 9:2497-2506. DOI: 10.1111/1365-2664.14249
- Ellis KS, Pearse AT, Brandt DA, Bidwell MT, Harrell W, Butler MJ and Post van der Burg M (2022) Balancing future renewable energy infrastructure siting and associated habitat loss for migrating whooping cranes. *Frontiers of Ecology and Evolution* 10:931260. doi: 10.3389/fevo.2022.931260

- Euroopan komissio (2020) EU Biodiversity Strategy for 2030 Bringing nature back into our lives. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0380>
- Euroopan komissio (2022) Proposal for a Nature Restoration Law. https://environment.ec.europa.eu/publications/nature-restoration-law_en
- Farfán MA, Duarte J, Real R, Muñoz AR, Fa JE, Vargas, JM (2017) Differential recovery of habitat use by birds after wind farm installation: A multi-year comparison. *Environmental Impact Assessment Review* 64:8-15. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.02.001>
- Fernández-Bellon D, Wilson MW, Irwin S, O'Halloran J (2019) Effects of development of wind energy and associated changes in land use on bird densities in upland areas. *Conservation Biology* 33:413-422. <https://doi.org/10.1111/cobi.13239>
- Ferrer M, Alloing A, Baumbush R, Morandini V (2022) Significant decline of Griffon Vulture collision mortality in wind farms during 13-year of a selective turbine stopping protocol. *GECCO* 38:e02203 <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02203>
- Fielding AH, Anderson D, Benn S, Dennis R, Geary M, Weston E, Whitfield DP (2021) Non-territorial GPS-tagged golden eagles *Aquila chrysaetos* at two Scottish wind farms: Avoidance influenced by preferred habitat distribution, wind speed and blade motion status. *PLoS ONE* 16:e0254159. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254159>
- Fielding AH, Anderson D, Benn S, Dennis R, Geary M, Weston E, Whitfield DP (2022) Responses of dispersing GPS-tagged Golden Eagles (*Aquila chrysaetos*) to multiple wind farms across Scotland. *Ibis* 164:102-117. <https://doi.org/10.1111/ibi.12996>
- Fijn RC, Krijgsveld KL, Tijssen W, Prinsen HAM, Dirksen S (2012) Habitat use, disturbance and collision risks for Bewick's Swans *Cygnus Columbianus bewickii* wintering near a wind farm in the Netherlands. *Wildfowl* 62:97-116.
- Friedenberg NA, Frick WF (2021) Assessing fatality minimization for hoary bats amid continued wind energy development. *Biological Conservation* 262:109309. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109309>
- Gann GD, McDonald T, Walder B, Aronson J, Nelson CR, Jonson J, Hallett JG, Eisenberg C, Guariguata MR, Liu J, Hua F (2019) International principles and standards for the practice of ecological restoration. *Restoration Ecology*, 27(S1), pp. S1-S46. <https://doi.org/10.1111/rec.13035>
- Garcia DA, Canavero G, Ardenghi F, Zambon M (2015) Analysis of wind farm effects on the surrounding environment: Assessing population trends of breeding passerines. *Renewable Energy* 80:190-196. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.004>
- Gauglitz P., Schicketanz S., Pape C. (2019). Nature conservation as a driver in wind energy scenarios. *Energy, Sustainability and Society*, 9:47. <https://doi.org/10.1186/s13705-019-0233-0>
- Gaultier SP, Lilley TM, Vesterinen EJ, Brommer JE. (2023) The presence of wind turbines repels bats in boreal forests. *Landscape and Urban Planning* 231:104636. doi:10.1016/j.landurbplan.2022.104636

- Goldenberg SZ, Cryan PM, Gorresen PM, Fingersh LJ (2021) Behavioral patterns of bats at a wind turbine confirm seasonality of fatality risk. *Ecology and Evolution* 11:4843-4853. <https://doi.org/10.1002/ece3.7388>
- Gómez-Catasús J, Barrero A, Reverter M, Bustillo-de la Rosa D, Pérez-Granados C, Traba J (2021) Landscape features associated to wind farms increase mammalian predator abundance and ground-nest predation. *Biodiversity and Conservation* 30:2581-2604. <https://doi.org/10.1007/s10531-021-02212-9>
- Gómez-Catasús J, Barrero A, Llusia D, Iglesias-Merchan C, Traba J. (2022) Wind farm noise shifts vocalizations of a threatened shrub-steppe passerine. *Environmental Pollution* 303:119144. doi:10.1016/j.envpol.2022.119144
- González MA, García-Tejero S, Wengert E, Fuertes B (2016) Severe decline in Cantabrian Capercaillie *Tetrao urogallus cantabricus* habitat use after construction of a wind farm. *Bird Conservation International* 26:256-261. <https://doi.org/10.1017/S0959270914000471>
- Gorsevski P.V., Cathcart S.C., Mirzaei G., Jamali M.M., Ye X., Gomezdelcampo E. (2013). A group-based decision support system for wind farm site selection in Northwest Ohio. *Energy Policy* 55:374-385. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.013>
- Haapakangas A, Hongisto V, Oliva D (2020) Audio-visual interaction in perception of industrial plants – effects of sound level and the degree of visual masking by vegetation. *Applied Acoustics* 160:107121 <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107121>
- Hale Am, Hatchett ES, Meyer JA, Bennett VJ (2014) No evidence of displacement due to wind turbines in breeding grassland songbirds. *CONDOR* 116:472-482. DOI: 10.1650/CONDOR-14-41.1
- Hannah L (2006). Wind and temperature effect on sound propagation. *New Zealand Acoustics*, 20:22-29. [https://www.acoustics.org.nz/sites/www.acoustics.org.nz/files/journal/pdfs/Hannah,_L_NZA2007_\(a\).pdf](https://www.acoustics.org.nz/sites/www.acoustics.org.nz/files/journal/pdfs/Hannah,_L_NZA2007_(a).pdf)
- Harrison JO, Brown MB, Powell LA, Schacht WH, Smith JA (2017) Nest site selection and nest survival of Greater Prairie-Chickens near a wind energy facility. *CONDOR* 119:659-372. DOI: 10.1650/CONDOR-17-51.1
- Hatchett ES, Hale AM, Bennett VJ, Karsten KB (2013) Wind turbines do not negatively affect nest success in the Dickcissel (*Spiza americana*). *The Auk* 130:520–528. DOI: 10.1525/auk.2013.12187
- Heinonen T, Selkimäki M, Rana P, Tokola T. (2024). How can optimized forest management plan regulate noise levels from wind turbines? *European Journal of Forest Research*, 143:1513-1524. <https://doi.org/10.1007/s10342-024-01707-8>
- Hensher DA, Rose JM, Greene WH. *Applied choice analysis*. Cambridge university press, 2015.
- Hernández-Pliego J, de Lucas M, Muñoz AR, Ferrer M (2015) Effects of wind farms on Montagu's harrier (*Circus pygargus*) in southern Spain. *Biological Conservation* 191:452-458. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.07.040>

- Hiedanpää J, Kniivilä M, Pouta E (2020) Talous monimuotoisuuden vaalimisessa. Julkaisussa Mattila, H. (toim.) Elämän verkko – Luonnon monimuotoisuutta edistämässä. Gaudeamus, p. 150-163.
- Holtttinen H, Kiviluoma J, Pineda I, McCann J, Clancy M, et al. (2015) Reduction of CO2 emissions due to wind energy - methods and issues in estimating operational emission reductions. IEEE Power & Energy Society General Meeting, 26 - 30 July 2015, Denver, USA: IEEE. Proceedings, pp. 1-5. ISBN 978-1-4673-8040-9
doi:10.1109/PESGM.2015.7286288
- Holtttinen H, Lindroos T, Lehtilä A, Koljonen T, Kiviluoma J, Korpås M (2025) Estimating CO2 impacts of wind energy towards carbon neutral energy systems. *Energies* 18(6), 1548, <https://doi.org/10.3390/en18061548>.
- Homoya W, Moore JW, Ruhl PJ, Dunning JB Jr (2017) Do American Golden-Plovers (*Pluvialis dominica*) avoid wind-energy turbines agricultural fields in Indiana during spring migration? *The Wilson Journal of Ornithology* 129(4):863-871.
- Humpenöder F, Karstens K, Lotze-Campen H, Leifeld J, Menichetti L, Barthelmes A, Popp A (2020) Peatland protection and restoration are key for climate change mitigation. *Environmental Research Letters* 15:104093. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abae2a>
- Husby M, Pearson M (2022) Wind Farms and Power Lines Have Negative Effects on Territory Occupancy in Eurasian Eagle Owls (*Bubo bubo*). *Animals* 12:1089.
<https://doi.org/10.3390/ani12091089>
- Hyvärinen E, Juslén A, Kemppainen E, Uddström A, Liukko UM. (toim.) (2019) The 2019 Red List of Finnish Species. Ympäristöministeriö & Suomen ympäristökeskus. Helsinki. 704 p. <http://hdl.handle.net/10138/299501>
- Höfer T, Sunak Y, Siddique H, Madlener R (2016) Wind farm siting using a spatial Analytic Hierarchy Process approach: a case study of the Städteregion Aachen. *Applied Energy* 163: 222-243. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.138>
- ISO 9613-2 (1996) ISO 9613-2 Acoustics. "Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation". International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Johnson DH (2016) Comment on "No evidence of displacement due to wind turbines in breeding grassland songbirds" *CONDOR* 118:674-675. DOI: 10.1650/CONDOR-15-84.1
- Juutinen A, Ahtikoski A, Mäkipää R, Shanin V (2018) Effect of harvest interval and intensity on the profitability of uneven-aged management of Norway spruce stands. *Forestry* 91:1-14. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpy018>
- Kellomäki S, Haapanen A, Salonen H (1976) Tree stands in urban noise abatement. *Silva Fennica* 10:237-256.
- Kimmel K, Mander Ü (2010) Ecosystem services of peatlands: Implications for restoration. *Progress in Physical Geography*, 34(4):491-514.

- Kivinen S (2015) Many a little makes a mickle: cumulative land cover changes and traditional land use in the Kyrö reindeer herding district, northern Finland. *Applied Geography* 63:201-211. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.06.013>
- Koljonen T, Lehtilä A, Honkatukia J, Markkanen J (2022) Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ilmasto- ja energiapolitiittisten toimien vaikutusarviot: Hiilineutraali Suomi 2035 (HIISI) -jatkoselvitys. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Technology No. 402 <https://doi.org/10.32040/2242-122X.2022.T402>
- Kontula T, Raunio A (2019) Threatened Habitat Types in Finland 2018 - Red List of Habitats Results and Basis for Assessment. *The Finnish Environment* 2/2019. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-5110-1>
- Korhonen T, Hirvonen P, Rämetsä J, Karjalainen S (2021) Turvetyöryhmän loppuraportti. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu 2021:24, pp. 123. (Final report of the working group on peat. Publications of the Ministry of Economic Affairs and Employment 2021:24). <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-856-1>
- Koskinen M, Maanavilja L, Nieminen M, Minkkinen K, Tuittila ES (2016) High methane emissions from restored Norway spruce swamps in southern Finland over one growing season. *Mires and Peat* 17(2): 1–13. <https://doi.org/10.19189/MaP.2015.OMB.202>
- Koskinen M, Tahvanainen T, Sarkkola S, Menberu MW, Laurén A, Sallantausta T, ..., Nieminen M (2017) Restoration of nutrient-rich forestry-drained peatlands poses a risk for high exports of dissolved organic carbon, nitrogen, and phosphorus. *Science of the Total Environment*: 586:858-869.
- Krone O, Treu G (2018) Movement Patterns of White-Tailed Sea Eagles Near Wind Turbines. *J Wildlife Management* 82:1367-1375. DOI: 10.1002/jwmg.21488
- Kubiszewski I, Cleveland CJ, Endres PK (2010) Meta-analysis of net energy return for wind power systems. *Renewable Energy* 35(1):218-225. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.01.012>
- Laine AM, Ojanen P, Lindroos T, Koponen K, Maanavilja L, Lampela M, Turunen J, Minkkinen K, Tolvanen A (2024) Climate change mitigation potential of restoration of boreal peatlands drained for forestry can be adjusted by site selection and restoration measures. *Restoration Ecology* 32(7):e14213.
- Larsen JK, Madsen J (2000) Effects of wind turbines and other physical elements on field utilization by pink-footed geese (*Anser brachyrhynchus*): A landscape perspective. *Landscape Ecology* 15:755-764. <https://doi.org/10.1023/A:1008127702944>
- LeBeau CW, Beck JL, Johnson GD, Nielson RM, Holloran MJ, Gerow KG, McDonald TL (2017a) Greater sage-grouse male lek counts relative to a wind energy development: Wind Energy Development and Lek Counts. *Wildlife Society Bulletin* 41:17-26. <https://doi.org/10.1002/wsb.725>
- LeBeau CW, Johnson GD, Holloran MJ, Beck JL, Nielson RM, Kauffman ME, Rodemaker EJ, McDonald TL (2017b) Greater sage-grouse habitat selection, survival, and wind energy infrastructure: Greater Sage-Grouse and Wind Energy. *Journal of Wildlife Management* 81:690-711. <https://doi.org/10.1002/jwmg.21231>

- Leddy KL, Higgins KF, Naugle DE (1999) Effects of Wind Turbines on Upland Nesting Birds in Conservation Reserve Program Grasslands. *The Wilson Bulletin* 111:100-104.
<https://www.jstor.org/stable/4164034>
- 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* 188:211-224. DOI: 10.1016/j.foreco.2003.07.008
- Leroux C, Kerhiriou C, Le Viol I, Valet N, Barré K (2022) Distance to hedgerows drives local repulsion and attraction of wind turbines on bats: Implications for spatial siting. *Journal of Applied Ecology* 59:2142-2153. DOI: 10.1111/1365-2664.14227
- Liikennevirasto (2012) Tuulivoimalaohje – ohje tuulivoimalan rakentamisesta liikenneväylien läheisyyteen. Liikennevirasto 8, 2012. ISBN 978-952-255-130-6. <https://www.trafi.com.fi/sites/default/files/media/file/Tuulivoimalaohje.pdf>
- Lindroos TJ, Mäki E, Koponen K, Hannula I, Kiviluoma J, Raitila J (2021) Replacing fossil fuels with bioenergy in district heating – Comparison of technology options. *Energy* 231:120799. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120799>
- Lindroos TJ (2023) REFUGE4 - Radiative forcing calculation tool (4.1). Zenodo.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.8304100>
- Liski J, Repo A, Känkänen R, Vanhala P, Seppälä J, Antikainen R, Grönroos J, Karvosenoja N, Lähtinen K, Leskinen P, Paunu VV, Tuovinen JP (2011). Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutukset Suomessa. *Suomen Ympäristö* 5/2011.
- López-Peinado A, Lis Á, Perona AM, López-López P (2020) Habitat preferences of the tawny owl (*Strix aluco*) in a special conservancy area of eastern Spain. *Journal of Raptor Research* 54:402-413. <https://doi.org/10.3356/0892-1016-54.4.402>
- Łopucki R, Mróz I (2016) An assessment of non-volant terrestrial vertebrates response to wind farms—a study of small mammals. *Environmental Monitoring and Assessment* 188:122. DOI 10.1007/s10661-016-5095-8
- Łopucki R, Perzanowski K (2018) Effects of wind turbines on spatial distribution of the European hamster. *Ecological Indicators* 84:433-436
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.09.019>
- Łopucki R, Klich D, Gielarek S (2017) Do terrestrial animals avoid areas close to turbines in functioning wind farms in agricultural landscapes? *Environmental Monitoring and Assessment* 189:343. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6018-z>
- Luontotyyppien sekä luonnonvaraisen eläimistön ja kasviston suojelusta annettu neuvoston direktiivi, 1992/43/ EY.
- Malczweski J, Rinner C (2015) *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. Springer. ISBN 978-3-540-74757-4. DOI 10.1007/978-3-540-74757-4
- Marques AT, Batalha H, Bernardino J (2021) Bird Displacement by Wind Turbines: Assessing Current Knowledge and Recommendations for Future Studies. *Birds* 2:460-475.
<https://doi.org/10.3390/birds2040034>

- May R, Nygård T, Falkdalen U, Åström J, Hamre Ø, Stokke B (2020). Paint it black: Efficacy of increased wind turbine rotor blade visibility to reduce avian fatalities. *Ecology and Evolution* 10:8927-8935. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112279>
- McNew LB, Hunt LM, Gregory AJ, Wisely SM, Sandercock BK (2014) Effects of Wind Energy Development on Nesting Ecology of Greater Prairie-Chickens in Fragmented Grasslands. *Conservation Biology* 28:1089-1099. DOI: 10.1111/cobi.12258
- Meek ER, Ribbands JB, Christer WG, Davy PR, Higginson I (1993) The effects of aero-generators on moorland bird populations in the Orkney Islands, Scotland, *Bird Study* 40:140-143. DOI: 10.1080/00063659309477139
- Menberu MW, Marttila H, Tahvanainen T, Kotiaho JS, Hokkanen R, Kløve B, Ronkanen AK (2017) Changes in pore water quality after peatland restoration: Assessment of a large-scale, replicated before-after-control-impact study in Finland. *Water Resources Research*, 53(10), 8327-8343.
- Merrick M, Morandini M, Greer VL, Koprowski JL (2021) Endemic Population Response to Increasingly Severe Fire: A Cascade of Endangerment for the Mt. Graham Red Squirrel. *BioScience* 71:161-173. doi:10.1093/biosci/biaa153
- Miina J, Hallikainen V, Härkönen K, Merilä P, Packalen T, Rautio P, Salemaa M, Tonteri T, Tolvanen A (2020) Incorporating a model for ground lichens into multi-functional forest planning for boreal forests in Finland. *Forest Ecology and Management* 460:117912. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117912>
- Milligan MC, Johnston AN, Beck JL, Taylor KL, Hall E, Knox L, Cufaude T, Wallace C, Chong G (2023) *Ecology and Evolution* 2023:13:e9687. <https://doi.org/10.1002/ece3.9687>
- Millon L, Julien J-F, Julliard R, Kerbiriou C. (2015) Bat activity in intensively farmed landscapes with wind turbines and offset measures. *Ecological Engineering* 75:250-257. doi:10.1016/j.ecoleng.2014.11.050
- Millon L, Colin C, Brescia F, Kerbiriou C (2018) Wind turbines impact bat activity, leading to high losses of habitat use in a biodiversity hotspot. *Ecological Engineering* 112:51-54. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.024>
- Minderman J, Pendlebury CJ, Pearce-Higgins JW, Park KJ (2012) Experimental Evidence for the Effect of Small Wind Turbine Proximity and Operation on Bird and Bat Activity. *PLoS ONE* 7: e41177. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041177>
- Minderman J, Gillis MH, Daly HF, Park KJ (2017) Landscape-scale effects of single- and multiple small wind turbines on bat activity. *Anim Conservation* 20:455-462. <https://doi.org/10.1111/acv.12331>
- Minkkinen K, Ojanen P, Koskinen M, Penttilä T (2020) Nitrous oxide emissions of undrained, forestry-drained, and rewetted boreal peatlands. *Forest Ecology and Management*, 478:118494.
- Motiva (2024) https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa/tuulivoimateknologia.

- Muhonen T (toim.) 2024. Aurinkometsä -hankkeen loppuraportti 2. painos. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 108/2024. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 52 s.
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-419-003-9>
- Mäntymaa E Pouta E, Hiedanpää J. (2021). Forest owner's interest in participation and their compensation claims in voluntary landscape value trading: The case of wind power parks in Finland. *Forest Policy and Economics* 124:102382.
<https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102382>
- Mäntymaa E, Kaseva J, Hiedanpää J, Pouta E (2023) Residents' interest in landscape value trade related to wind energy: application of the attitude-behavior framework to willingness to pay, *Ecosystems and People*, 19:1. DOI: 10.1080/26395916.2023.2212797
- Mäntymaa Pouta E, Juutinen A Tolvanen A (2024a) The People are willing to pay for climate- and biodiversity-friendly policies in Finland: opportunities of wind power, forest management, and peatland restoration. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2024. <https://doi.org/10.1080/09640568.2024.2364763>
- Mäntymaa E, Kangas K Karhu J Pouta E (2024b) Feasibility of landscape value trade between landowners and citizens in reducing the landscape damage caused by wind power. *Journal of Forest Economics* 39(2):105-135.
- Mönkkönen M, Juutinen A, Mazziotta A, Miettinen K, Podkopaev D, Reunanen P, Salminen H, Tikkanen OP (2014) Spatially dynamic forest management to sustain biodiversity and economic returns. *Journal of Environmental Management* 134:80-89.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.021>
- Niemuth ND, Walker JA, Gleason JS, Loesch CR, Reynolds RE, Stephens SE, Erickson MA (2013) Influence of wind turbines on presence of Willet, Marbled Godwit, Wilson's phalarope and Black tern on wetlands in the Prairie Pothole region of North Dakota and South Dakota. *Waterbirds* 36:263-276.
- Nord2000 model (2000). Comprehensive outdoor sound propagation model. Part 1: Propagation in an atmosphere without significant refraction. AV 1849/0. DELTA.23
- Nordbeck R, Høgl K (2024) National peatland strategies in Europe: current status, key themes, and challenges. *Regional Environmental Change* 24:5. <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02166-4>
- OECD (2024). Mainstreaming biodiversity into renewable power infrastructure. OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/357ac474-en>.
- Ojanen P, Minkkinen K, Alm J, Penttilä T (2010) Soil-atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in boreal forestry-drained peatlands. *Forest Ecology and Management* 260(3):411-421.
- Ojanen P, Minkkinen K, Penttilä T (2013) The current greenhouse gas impact of forestry-drained boreal peatlands. *Forest ecology and management* 289:201-208.
- Ojanen P, Lehtonen A, Heikkinen J, Penttilä T, Minkkinen K (2014) Soil CO₂ balance and its uncertainty in forestry-drained peatlands in Finland. *Forest Ecology and Management* 325:60-73. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.03.049>

- Opera II (2006) OPERA II (2006). Impact of wind turbines on weather radars. OPERA II WP1.8. OPERA Group EUMETNET (December 2006). <https://users.ece.utexas.edu/~ling/EU1%20OPERA.pdf>
- Pearce-Higgins JW, Stephen L, Langston RHW, Bainbridge IP, Bullman R (2009) The distribution of breeding birds around upland wind farms. *Journal of Applied Ecology* 46:1323-1331. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01715.x>
- Pearce-Higgins JW, Stephen L, Douse A, Langston RHW (2012) Greater impacts of wind farms on bird populations during construction than subsequent operation: results of a multi-site and multi-species analysis: Changes in bird populations on wind farms. *Journal of Applied Ecology* 49:386-394. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02110.x>
- Pearse AT, Metzger KL, Brandt DA, Shaffer JA, Bidwell MT, Harrell W (2021) Migrating Whooping Cranes avoid wind-energy infrastructure when selecting stopover habitat. *Ecological Applications* 31(5):e02324. <https://doi.org/10.1002/eap.2324>
- Peltoniemi M, Huttunen S, Hyyrynen M, Similä J, Halonen KM, Haltia E, Leppänen J, Pohjola J, Tikkanen VM, Arola T, Assmuth A, Autto H, Lehto T, Lonkila A, Pitzén S, Uusivuori J, Vesala J, Viitala EJ, Lintunen J (2023) Hiilinieluja ja ilmastohyötyjä hallituin riskein : Metsäsektorin ohjauskeinojen monitieteinen analyysi. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 110/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 164 s.
- Peura M, Burgas D, Eyvindson K, Repo A, Mönkkönen M (2018) Continuous cover forestry is a cost-efficient tool to increase multifunctionality of boreal production forests in Fennoscandia. *Biological Conservation* 217, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.10.018>
- Pouta E, Rajala T, Mäntymaa E, Kangas K, Hiedanpää J (2024) Does multidimensional distance matter? Perceptions and acceptance of wind power. *Journal of Environmental Policy & Planning* 26:47-59. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2023.2279053>
- Proett M, Roberts SB, Messmer TA (2022) Columbian sharp-tailed grouse brood success and chick survival in a wind-energy landscape. *Journal of Wildlife Management* 2022,86:e22287. <https://doi.org/10.1002/jwmg.22287>
- Pukkala T (2016) Which type of forest management provides most ecosystem services? *Forest Ecosystems* 3. <https://doi.org/10.1186/s40663-016-0068-5>
- Rana P, Juutinen A, Eyvindson K, Tolvanen A (2024) Cost-efficiency analysis of multiple ecosystem services across forest management regimes. *Journal of Environmental Management* 370:122438 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122438>
- Raynor EJ, Harrison JO, Whalen CE, Smith JA, Schacht WH, Tyre AJ, Benson JF, Brown MB, Powell LA (2019) Anthropogenic noise does not surpass land cover in explaining habitat selection of Greater Prairie-Chicken (*Tympanuchus cupido*) *CONDOR* 121:1-15. DOI: 10.1093/condor/duz044
- Rehling F, Delius A, Ellerbrok J, Farwig N, Peter F (2023) Wind turbines in managed forests partially displace common birds. *Journal of Environmental Management* 328: 116968. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116968>

- Reusch C, Lozar M, Kramer-Schadt S, Voigt CC (2022) Coastal onshore wind turbines lead to habitat loss for bats in Northern Germany. *Journal of Environmental Management* 310:114715 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114715>
- Rissanen S, Lehtomäki V (2015) "Wind Power Icing Atlas (WIceAtlas) & icing map of the world", in *Winterwind*, Piteå, 2015.
- Rissanen A J, Ojanen P, Stenberg L, Larmola T, Anttila J, Tuominen S, ..., Mäkipää R (2023) Vegetation impacts ditch methane emissions from boreal forestry-drained peatlands—Moss-free ditches have an order-of-magnitude higher emissions than moss-covered ditches. *Frontiers in Environmental Science*: 11: 1121969.
- Rydell J, Bach L, Bach P, Diaz LG, Furmankiewicz J, Hagner-Wahlsten N, Kyheröinen E-M, Lilley T, Masing M, Meyer MM, Ptersons G, Šuba J, Vasko V, Vintulis V, Hedenström A (2014) Phenology of Migratory Bat Activity Across the Baltic Sea and the South-Eastern North Sea. *Acta Chiropterologica* 16:139-147. <https://doi.org/10.3161/150811014X683354>
- Räsänen A, Albrecht E, Annala M, Aro L, Laine AM, Maanavilja L, Mustajoki J, Ronkanen AK, Silvan N, Tarvainen O, Tolvanen A (2023) After-use of peat extraction sites – A systematic review of biodiversity, climate, hydrological and social impacts. *Science of the Total Environment* 882: 163583 <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163583>
- Saaty TL (1980) *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
- Sansom A, Pearce-Higgins JW, Douglas DJT (2016) Negative impact of wind energy development on a breeding shorebird assessed with a BACI study design. *Ibis* 158:541-555. <https://doi.org/10.1111/ibi.12364>
- Schaub T, Klaassen RHG, Bouten W, Schlaich AE, Koks BJ (2020) Collision risk of Montagu's Harriers *Circus pygargus* with wind turbines derived from high-resolution GPS tracking. *Ibis* 162:520-534. <https://doi.org/10.1111/ibi.12788>
- Schöll EM, Nopp-Mayr U (2021) Impact of wind power plants on mammalian and avian wild-life species in shrub- and woodlands. *Biological Conservation* 256:109037. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109037>
- Seifert H, Westerhellweg A, Kröning J (2003) Risk analysis of ice thrown from wind turbines. Paper presented at BOREAS 2003, Pyhä, Finland. https://www.windland.ch/doku_wind/seifert_eiswurf.pdf
- Shaffer JA, Buhl DA (2016) Effects of wind-energy facilities on breeding grassland bird distributions: Wind-Energy Effects on Grassland Birds. *Conservation Biology* 30:59-71. <https://doi.org/10.1111/cobi.12569>
- Selkimäki M, Riippi J, Rana P, Lamula L, Antila M, Heinonen T, Tokola T (2024) Forest landscape shield models for assessing audio-visual disturbances of wind turbines. *Journal of Environmental Management* 352: 120070. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120070>
- Skarin A, Alam M (2017) Reindeer habitat use in relation to two small wind farms, during pre-construction, construction, and operation. *Ecology and Evolution* 7:3870-3882. <https://doi.org/10.1002/ece3.2941>

- Skarin A, Nellemann C, Rönnegård L, Sandström P, Lundqvist H (2015) Wind farm construction impacts reindeer migration and movement corridors. *Landscape Ecology* 30:1527-1540. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0210-8>
- Skarin A, Sandström P, Alam M (2018) Out of sight of wind turbines-Reindeer response to wind farms in operation. *Ecology and Evolution* 8:9906-9919. <https://doi.org/10.1002/ece3.4476>
- Smith JA, Whalen CE, Brown MB, Powell LA (2016) Indirect Effects of an Existing Wind Energy Facility on Lekking Behavior of Greater Prairie-Chickens. *Ethology* 122:419-429. doi: 10.1111/eth.12489
- Smith A, Brown MB, Harrison JO, Powell A (2017) Predation risk: a potential mechanism for effects of a windenergy facility on Greater Prairie-Chicken survival. *Ecosphere* 8(6):e01835. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1835>
- Sogachev A, Cavar D, Kelly M, Dellwik E, Klaas T, Kühn P (2020) Numerical modelling of the wind over forests: roughness versus canopy drag. *Advances in Science and Research* 17: 53–61. <https://doi.org/10.5194/asr-17-53-2020>.
- Song N, Xu H, Zhao S, Liu N, Zhong S, Li B, Wang T (2021) Effects of wind farms on the nest distribution of magpie (*Pica pica*) in agroforestry systems of Chongming Island, China. *GECCO* 27: e01536. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01536>
- Stevens TK, Hale AM, Karsten KB, Bennett VJ (2013) An analysis of displacement from wind turbines in a wintering grassland bird community. *Biodiversity and Conservation* 22:1755-1767. <https://doi.org/10.1007/s10531-013-0510-8>
- Stewart GB, Pullin AS, Coles CF (2007) Poor evidence-base for assessment of windfarm impacts on birds. *Environmental Conservation* 34:1-11. <https://doi.org/10.1017/S0376892907003554>
- Stokke BG, Nygård T, Falkdalen U, Pedersen HC, May R (2020) Effect of tower base painting on willow ptarmigan collision rates with wind turbines. *Ecology and Evolution* 10:5670-5679. <https://doi.org/10.1002/ece3.6307>
- Suomen Uusiutuivat 2025. Tuulivoimatilastot 2024. <https://suomenuusiutuivat.fi/tuulivoimatilastot-2024/> siteerattu 7.4.2025.
- Tanneberger F, Tegetmeyer C, Busse S, Barthelmes A, Shumka S, ..., Joosten H (2017) The peatland map of Europe. *Mires and Peat* 19(22)21-17. DOI: 10.19189/MaP.12016.OMB.19264.
- Tarrero AI, Martín MA, Gonzalez J, Machimbarrena M, Jacobsen F (2008) Sound propagation in forest: a comparison of experimental results and values predicted by the Nord2000 model. *Applied Acoustics* 69:662–671. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.01.007>
- Taubmann J, Kämmerle JL, Andrén H, Braunisch V, Storch I, Fiedler W, Suchant R, Coppes J (2021) Wind energy facilities affect resource selection of capercaillie *Tetrao urogallus*. *Wildlife Biology* 2021(1). <https://doi.org/10.2981/wlb.00737>

- Therkildsen OR, Balsby TJS, Kjeldsen JP, Nielsen RD, Bladt J, Fox AD (2021) Changes in flight paths of large-bodied birds after construction of large terrestrial wind turbines. *J of Environmental Management* 290:112647. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112647>
- Tikkanen H, Rytkönen S, Karlin OP, Ollila T, Pakanen V-M, Tuohimaa H, Orell M (2018) Modelling golden eagle habitat selection and flight activity in their home ranges for safer wind farm planning. *Environmental Impact Assessment Reviews* 71:120-131. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.04.006>
- Tilastokeskus (2024). Official Statistics of Finland (OSF): Energy supply and consumption [online publication]. ISSN=1799-7976. Helsinki: Statistics Finland [Referenced: 21.5.2024]. Available: <https://stat.fi/en/statistics/ehk>
- Tolvanen A, Routavaara H, Jokikokko H, Rana P (2023) How far are birds, bats and terrestrial mammals displaced from onshore wind power development? – a systematic review. *Biological Conservation* 288: 110382. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110382>.
- Tolvanen A, Holttinen H, Aston J, Lampela M, Mathiesen KE, Merilä P, Peltonen L, Pouta E, Rudolph DP, Schmidt H, Tegen S, Tokola T, Hübner G (2024). Näin rakennat luottamusta: Kuusi tapaa vahvistaa tuulivoiman hyväksyntää. Luke Policy Brief 8/2024. Luonnonvarakeskus, 8 s. <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/555308>
- Tonteri T, Hallikainen V, Merilä P, Miina J, Rautio P, Salemaa M, Tolvanen A (2021) Response of ground macrolichens to site factors, co-existing plants and forestry in boreal forests. *Applied Vegetation Science* 2022,25:e12690. <https://doi.org/10.1111/avsc.12690>
- Triviño M, Pohjanmies T, Mazziotta A, Juutinen A, Podkopaev D, Le Tortorec E, Mönkkönen M (2017) Optimizing management to enhance multifunctionality in a boreal forest landscape. *Journal of Applied Ecology* 54:61–70. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12790>
- Tsegaye D, Colman JE, Eftestøl S, Flydal K, Røthe G, Rapp K (2017) Reindeer spatial use before, during and after construction of a wind farm. *Appl Animal Behaviour Science* 195:103-111. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2017.05.023>
- Turunen J (2008) Development of Finnish peatland area and carbon storage 1950-2000. *Boreal Environment Research*, 13(4):319–334. <http://www.borenv.net/BER/pdfs/ber13/ber13-319.pdf>
- Turunen J, Valpola S (2020) The influence of anthropogenic land use on Finnish peatland area and carbon stores 1950–2015. *Mires and Peat* 26:26, 27pp. (Online: <http://www.mires-and-peat.net/pages/volumes/map26/map2626.php>). <https://doi.org/10.19189/MaP.2019.GDC.StA.1870>
- Vestas (2022) Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V136-4.2 MW Wind. Plant. Vestas Wind Systems A/S, Denmark, 22nd March 2022. 133 p. https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/reports-and-ratings/lcas/LCA%20of%20Electricity%20Production%20from%20an%20onshore%20V136-4.2MW%20Wind%20Plant_Final.pdf.coredownload.inline.pdf

- Walter WD, Leslie DM, Jenks JA (2006) Response of Rocky Mountain Elk (*Cervus elaphus*) to Wind-power Development. *Am Midland Naturalist* 156:363-375.
[https://doi.org/10.1674/0003-0031\(2006\)156\[363:RORMEC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1674/0003-0031(2006)156[363:RORMEC]2.0.CO;2)
- Watson JW, Keren IN, Davies RW (2018) Behavioral accommodation of nesting hawks to wind turbines: Nesting Hawks and Wind Turbines. *Journal of Wildlife Management* 82:1784-1793. <https://doi.org/10.1002/jwmg.21532>
- Wilson D, Blain D, Couwenberg J, Evans CD, Murdiyarto D, Page SE, Renou-Wilson F, Rieley JO, Sirin A, Strack M, Tuittila ES (2016) Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils. *Mires & Peat*: 17:1-28. DOI: 10.19189/MaP.2016.OMB.222
- Winder VL, Gregory AJ, McNew LB, Sandercock BK (2015) Responses of male Greater Prairie-Chickens to wind energy development. *The Condor* 117:284-296.
<https://doi.org/10.1650/CONDOR-14-98.1>
- White MJ, Swearingen ME (2004) Sound propagation through a forest: a predictive model. U. S. Army Corps Engineers, No. ERDC/CERL. MP-04-3. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA428938>
- Wondollek M (2009) Sound from wind turbines in forest areas – Are the sound propagation models used today adequate? Examenarbete 20 hp Januari 2009. Teknisk- naturvetenskaplig fakultet UTH-enheten, Uppsala Universitet. Available:
https://www.utn.uu.se/sts/student/wp-content/uploads/gamla%20exjobb/0901_wondollek.pdf
- Xu H, Zhao S, Song N, Liu N, Zhong S, Li B, Wang T (2021) Abundance and behavior of little egrets (*Egretta garzetta*) near an onshore wind farm in Chongming Dongtan, China. *Journal of Cleaner Production* 312:127662.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127662>
- Zhang H, Tuittila ES, Korrensalo A, Laine AM, Uljas S, Welti N, Kerttula J, Maljanen M, Elliott D, Vesala T, Lohila A (2021) Methane production and oxidation potentials along a fen-bog gradient from southern boreal to subarctic peatlands in Finland. *Global Change Biology* 27(18):4449-4464.
- Zhao S, Xu H, Song N, Wang Z, Li B, Wang T (2020) Effect of wind farms on wintering ducks at an important wintering ground in China along the East Asian-Australasian Flyway. *Ecology and Evolution* 10:9567-9580. <https://doi.org/10.1002/ece3.6701>
- Zwart MC, Robson P, Rankin S, Whittingham MJ, McGowan PJK (2015) Using environmental impact assessment and post-construction monitoring data to inform wind energy developments. *Ecosphere* 6:art26. <https://doi.org/10.1890/ES14-00331.1>



**Löydät meidät
verkosta**

luke.fi



Luonnonvarakeskus (Luke) Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki