

Tuuli- ja aurinkovoiman ympäristö- ja maankäyttövaikutukset

Säätytalo, 9.5.2023

Professori Jyri Seppälä

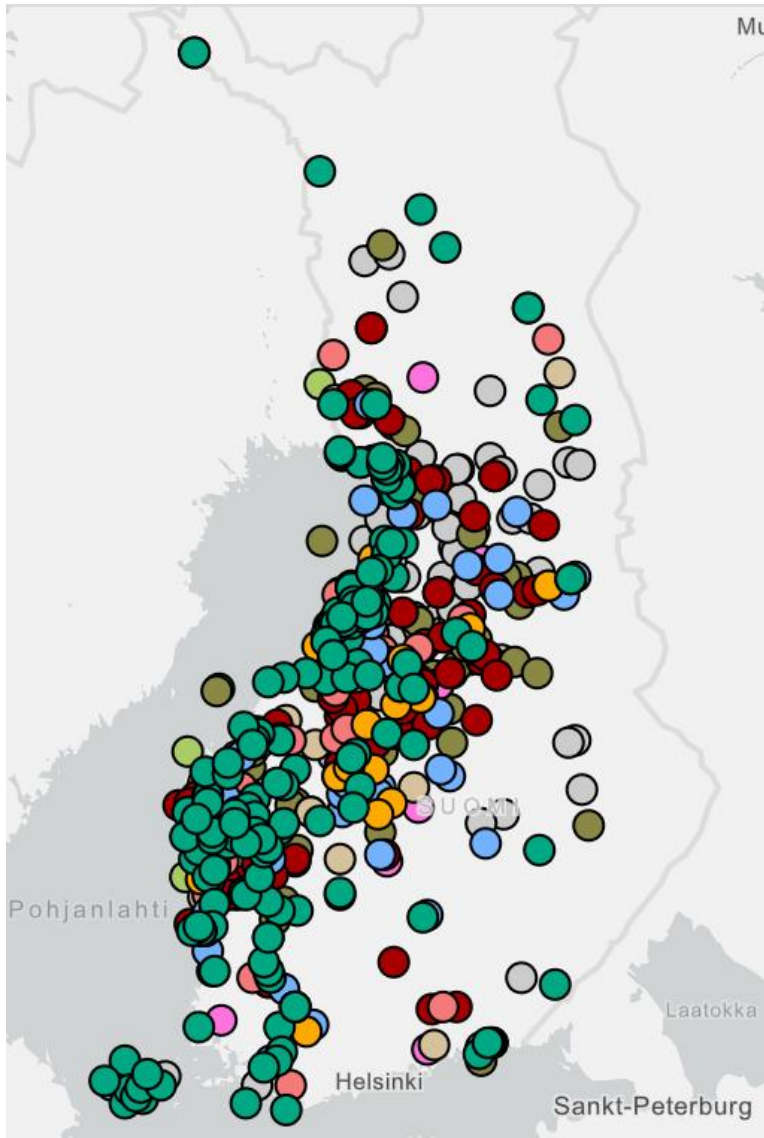


Suomen ympäristökeskus
Finlands miljöcentral
Finnish Environment Institute

Lähtökohdat

- **Tuulivoima on tällä hetkellä edullisin tapa tuottaa sähköä**
- **Aurinkovoiman hintataso laskenut siten, että on yhä paremmat edellytykset sähkön teollisen mittakaavan tuotantoon**
- **Sähköistyminen avainasemassa mentäessä kohti vähähiilistä energiatuotantoa**
 - 1) Sähkö on helpoin energiatuotantotapa muuttaa pienipäästöiseksi
 - 2) Sähkön avulla energiatehokkuutta on helppo tehostaa loppukäytössä
 - 3) Lämmitys sähköistyy (korvataan polttoon perustuvia vaihtoehtoja)
 - 4) Teollisuuden prosessipäästöjen vähähiilistyminen, mm. vedyn valmistuksen ja käytön kautta
 - 5) Vähäpäästöistä sähköä tarvitaan liikenteessä sähköajoneuvojen käyttöön ja sähköpolttoaineiden valmistukseen vedyn avulla (fossiilisten liikennepolttoaineiden korvaaminen)
 - 6) Vaihtelevan sähkön tuotannon tasaamiseen tarvitaan ylimääräsähköä (akut, pumppuvoimalat)

Suomen tuulivoimalat ja -voimalahankkeet



Suomen tuulivoimakapasiteetti oli
5 677 MW vuoden 2022 lopussa

Rakenteilla olevien tuulivoimaloiden kapasiteetti oli 3188
MW tammikuussa vuonna 2023

Vuoden 2022 lopussa suunnitteilla olevien

- maatuulivoimaloiden kapasiteetti
oli 52 920 MW
- merituulivoimaloiden kapasiteetti
oli 13 025 MW

Aurinkosähkö

- Vuoden 2022 lopussa asennetun aurinkosähkön teho oli noin 700 MW
- Fingridin sähköjärjestelmäskenaarioissa aurinkosähköteho on vuonna 2035 noin 6 000–20 000 MW
- Tulevien aurinkosähköinvestointien arvo mitataan miljardeissa euroissa

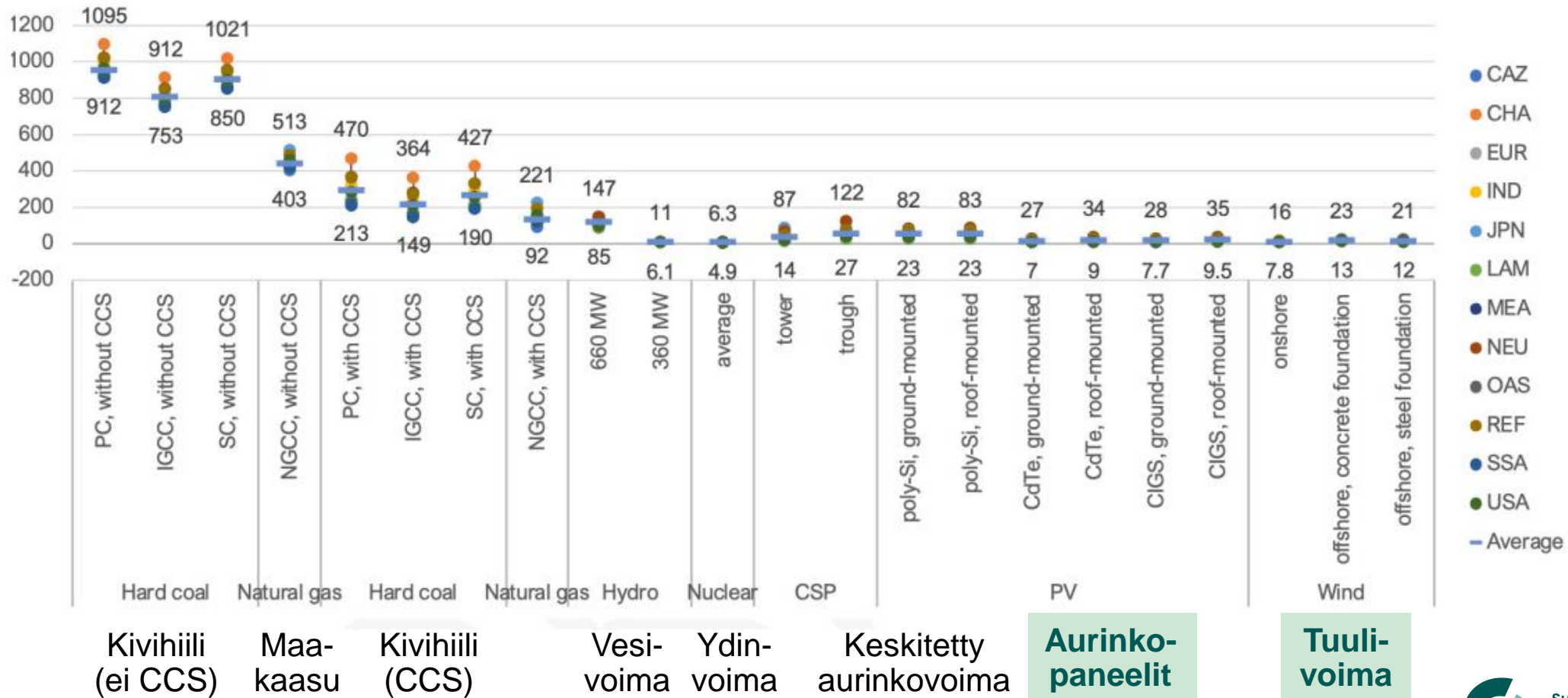
Lähde: Suomen Tuulivoimayhdistys

Tuuli- ja aurinkovoiman vaikutuksia

- **Talous- ja työllisyysvaikutukset**
 - Aluetalousvaikutukset
 - Energiaturvallisuus - vähentää fossiilisten polttoaineiden tuonti- ja hintariippuvuutta
 - Mahdollistaa vihreän siirtymän investointeja ja laskee pitemmän päälle sähkön hintaa
- **Positiiviset ympäristövaikutukset – suurempia kuin aiheutetut haitat (vaihtoehtoihin nähden)**
 - Fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen
- **Keskeiset negatiiviset ympäristövaikutukset**
 - Raaka-aineiden käyttö ja jätteet – luonnonvaranäkökulma
 - Globaalit ja yli maarajojen vaikuttavat ympäristöpäästöt (pl. maankäytön kautta syntyvät päästöt)
 - Maankäyttövaikutukset – itse tuotantolaitokset, tiet ja siirtolinjat
 - Muut paikalliset ja alueelliset vaikutukset
 - Luontovaikutukset maa- ja meriympäristössä – linnut, lepakot
 - Melu, välkkymis- ja maisemahaitat

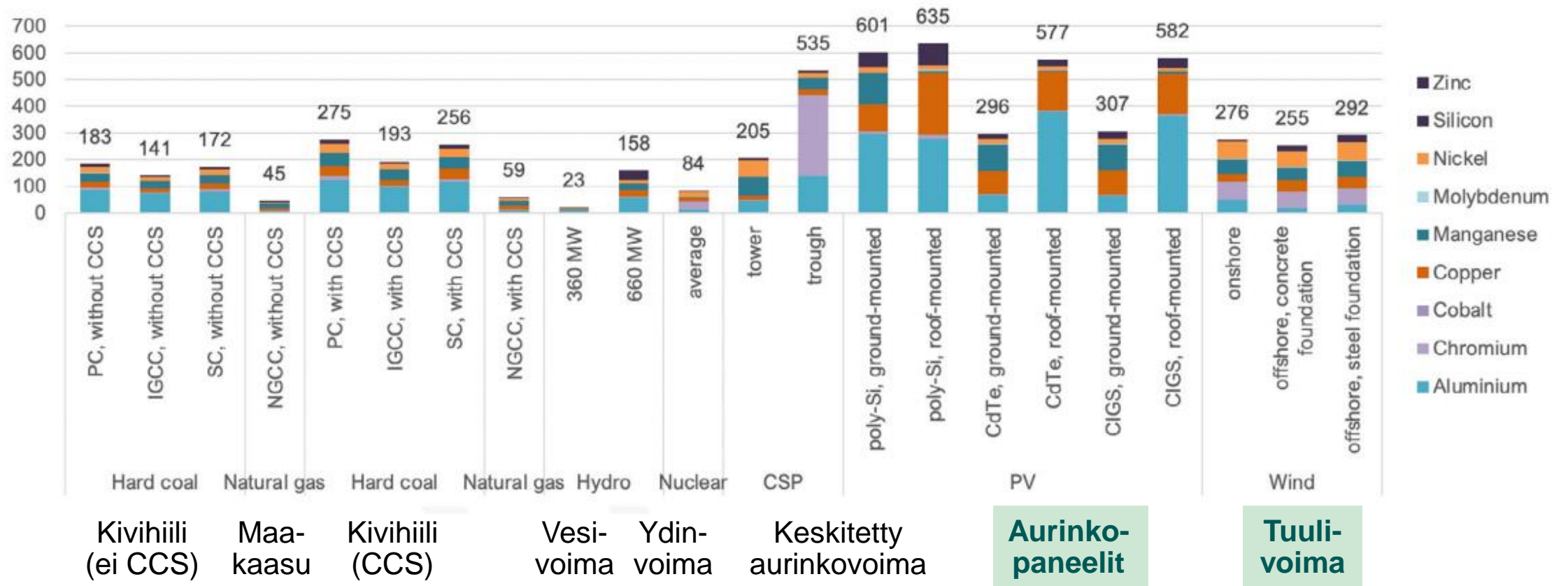
Eri energiatuotantotapojen elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt eri maissa 2020

(g CO₂ ekv. /kWh)



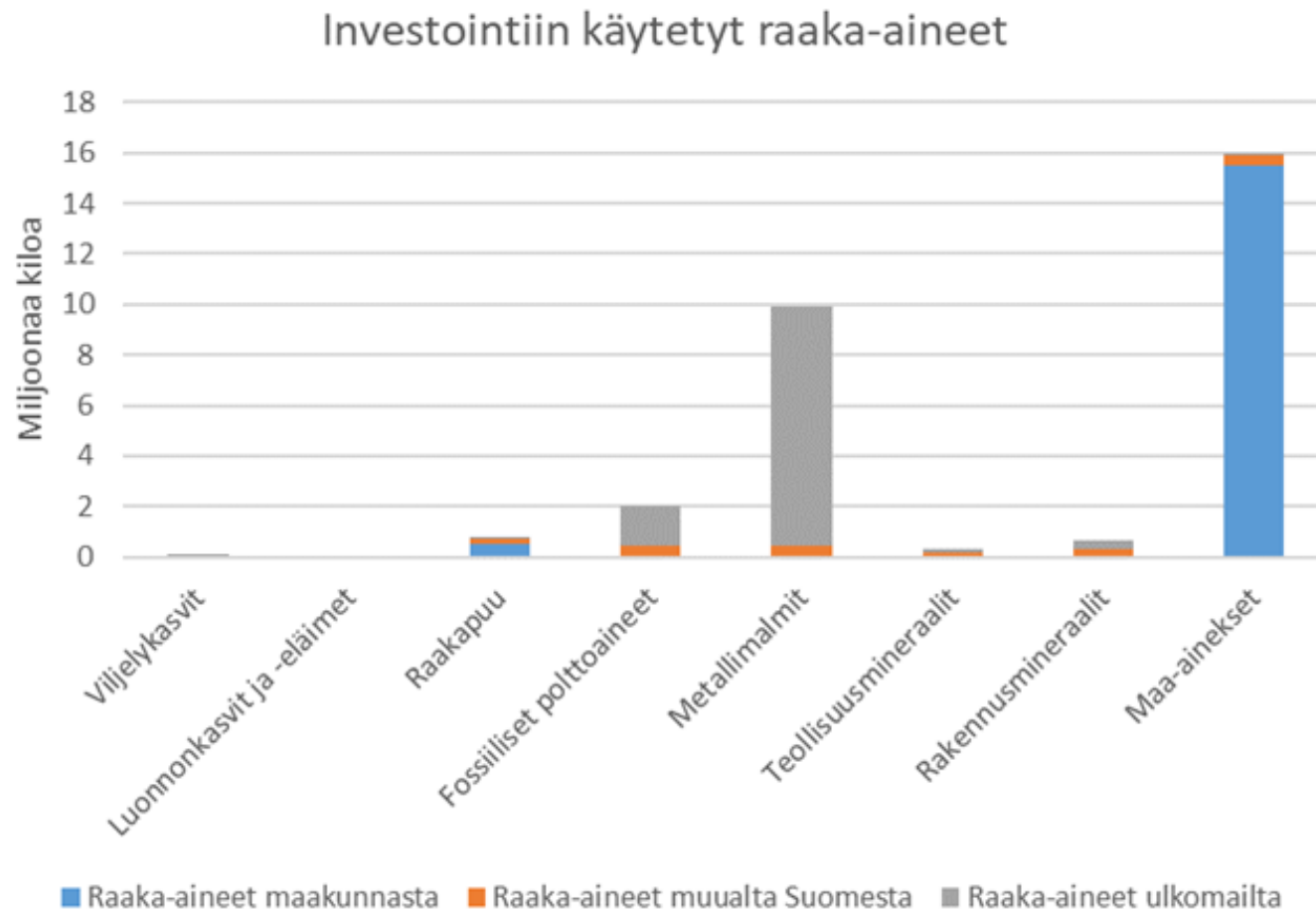
Lähde UNECE 2021. Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations, Geneva 2021.

Eri energiatuotantotapojen materiaalityrve (g/MWh)



Lähde UNECE 2021. Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations, Geneva 2021.

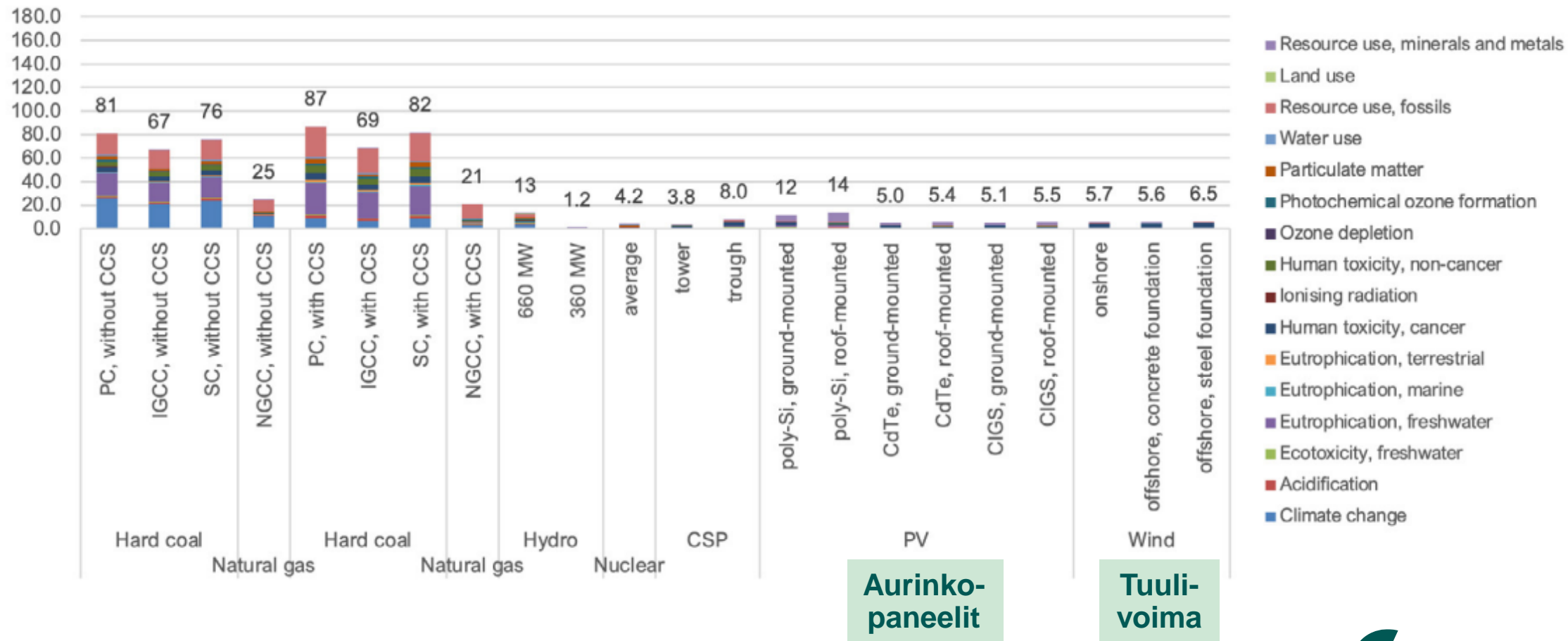
Raaka-aineiden tarve 7 MW tuulivoimalan investointiin



Lähde: Santtu Karhinen, SYKE, Envimat-malli

Eri energiatuotantotapojen elinkaariset kokonaisympäristövaikutukset

Globaalit ja yli maan rajojen menevät ympäristöongelmat



Lähde UNECE 2021. Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations, Geneva 2021.

Eri energialähteisen maankäyttövaikutukset

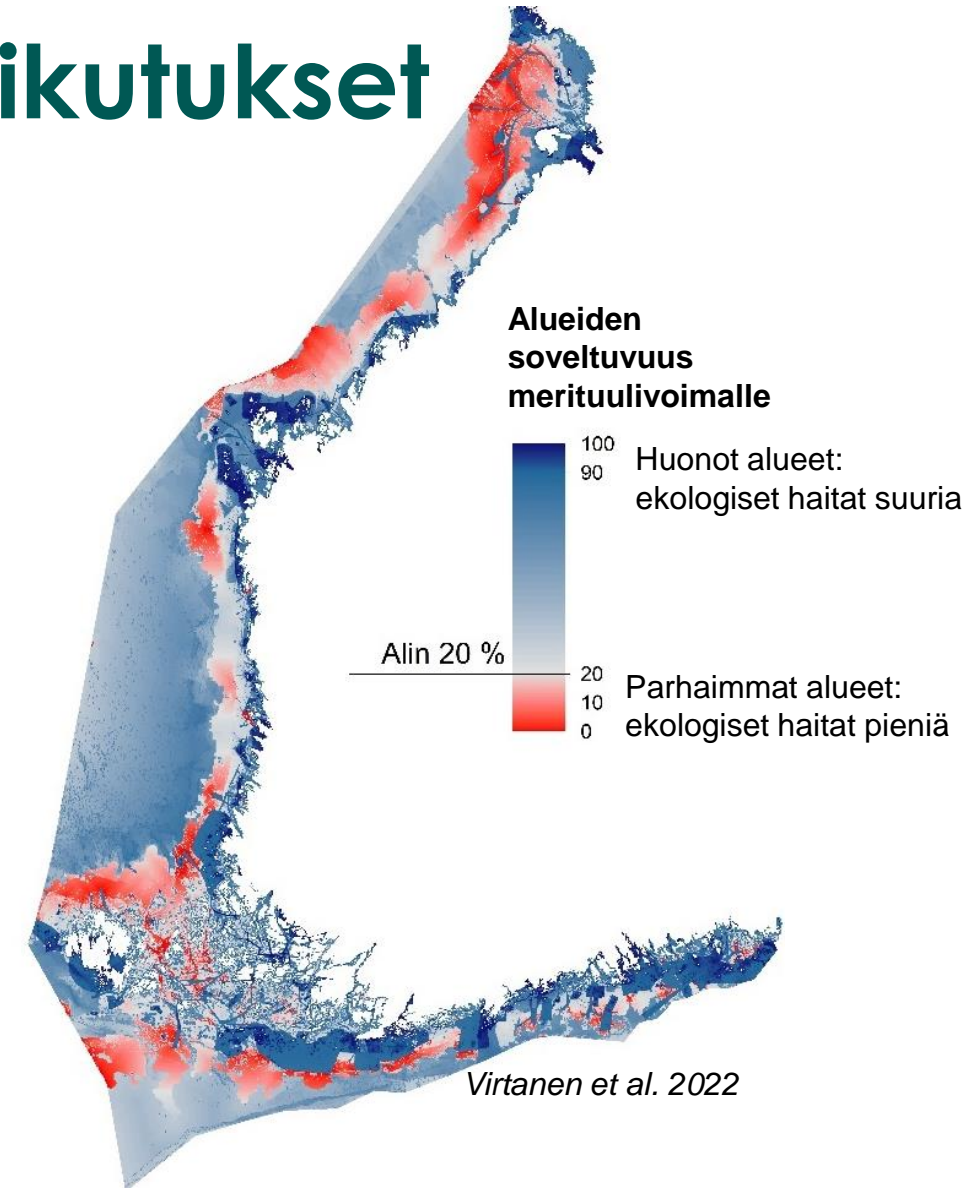
- **Aurinkovoima** olemassa oleviin rakenteisiin integroituna ei maankäyttövaikutuksia
- **Ydinvoima** 2.9 km²/TWh
- **Tuulivoima 1–10 km²/TWh**
riippuen sijainnista, tuotannon tasaamisen, jalostuksen ja jakelun vaatimista rakenteista
- **Aurinkovoima 6–16 km²/TWh**
riippuen sijainnista, tuotannon tasaamisen, jalostuksen ja jakelun vaatimista rakenteista
- **Energiaturve** 25–27 km²/TWh
- **Vesivoima** virtavesiä patoamalla 680 km²/TWh
- **Puuenergia** 1 300–1 500 km²/TWh
kun käytössä on koko hakkuukertymä, ei vain jäte- ja hukkavirtoja

Arvio tuulivoimapuiston maankäyttövaikutusten kasvihuonekaasupäästöistä

- Voimala vaatii suoraan noin 3 ha puutonta alaa ja siirtoyhteydet 5,6 ha (luvut vaihtelevat tapauskohtaisesti suuresti)
 - Esimerkki: **100 TWh tuulivoimatuotanto jossa 7 MW voimaloita 4660** (32 615 MW tehoa, 35 % tuotantokerroin)
 - Maankäyttövaikutus -> **400 km²**
 - Kasvihuonekaasuinventaariossa metsäkadon päästövaikutus on ollut keskimäärin 200 t CO₂-ekv./ha
 - Päästövaikutus yhteensä -> **8 Mt CO₂-ekv.**
 - Pitoaika 30 vuotta -> noin **3 g CO₂-ekv./kWh**
 - Tuulivoiman elinkaariset khk-päästöt **ilman metsäkatoa noin 12-23 g CO₂-ekv./kWh** (ks. aikaisempi kuva)
- Vertailun vuoksi Suomi on aiheuttanut metsäkatoa (pellon raivaus ja yhdyskuntien rakentaminen) vuosittain noin **3 Mt CO₂-ekv.** (noin 15 000 ha/vuosi) vuosina 1990-2020.
- Yhteensä **90 Mt CO₂-ekv.**

Merituulivoiman ympäristövaikutukset

- Vaikutukset voidaan jaotella pinnan päällisiin, pinnan alapuolisiin (vesipatsas, merenpohja) sekä sähkönsiirrosta maalle (kaapelit ja muu infrastruktuuri) aiheutuviin vaikutuksiin
- Suurimmat vaikutukset rakentamisen aikana, pienemmät toiminnan aikana; myös huoltoliikenne vaikuttaa
- Suurin haaste: merituulipuistojen pitkäaikaisia ja kasautuvia yhteisvaikutuksia meriekosysteemiin ei tiedetä, eikä pienempiä ympäristövaikutuksia pitkällä aikavälillä (esim. kertaantuvat vaikutukset ravintoverkoissa)
- Ekologiset vaikutukset linnustoon, kaloihin, merinisäkkäisiin ja merenpohjan lajistoon



Tuulivoiman linnusto- ja lepakkovaikutuksia meri- ja maa-alueilla

Häirintävaikutuksia

- Esimerkiksi kuikka- ja ruokkilinnulla tuulivoimaloiden pelotevaikutus ulottuu avomerellä yli 10 kilometrin päähän.

Törmäysvaikutuksia

- Suomessa tuulivoimaloihin on törmännyt varsin paljon metsoja ja merikotkia. Merikotka on vähälukuinen hitaasti lisääntyvä lisäkuolleisuudelle herkkä laji, jonka populaatiolle väärin sijoitetut tuulivoimalat aiheuttavat riskin.

Elinympäristövaikutuksia

- Jos kaikki vuonna 2022 suunnitteilla olleet tuulivoimalaprojektit toteutuisivat, Suomen maapinta-alasta olisi 7 % vähemmän siippalepakoille suotuisaa pinta-alaa vuoteen 2022 verrattuna.

Yhteisvaikutuksia

- Suomessa potentiaalisin yhteisvaikutusten uhka maa-alueilla kohdistuu merikotkaan ja maakotkaan.

Teemme tiedolla toivoa.

Professori Jyri Seppälä
yksikönjohtaja, ilmastonmuutosratkaisut, Suomen ympäristökeskus
+358 (0)295 251 629, jyri.seppala@syke.fi



Suomen ympäristökeskus
Finlands miljöcentral
Finnish Environment Institute

Kiitos

Professori Jyri Seppälä, johtava tutkija Sampo Soimakallio, kehittämispäällikkö Ari Nissinen, erikoistutkija Santtu Karhinen, ryhmäpäällikkö Kari Oinonen, tutkija Kimmo Nurmio, tutkimusprofessori Paula Kivimaa, erikoistutkija Ulla-Maija Liukko, erikoistutkija Elina Virtanen, erikoissuunnittelija Markku Mikkola-Roos, yksikönjohtaja Aino Juslén
Akatemiatutkija Thomas Lilley HY/Luomus, suunnittelija Eeva-Maria Tidenberg HY/Luomus



Suomen ympäristökeskus
Finlands miljöcentral
Finnish Environment Institute

Lisäaineistoa

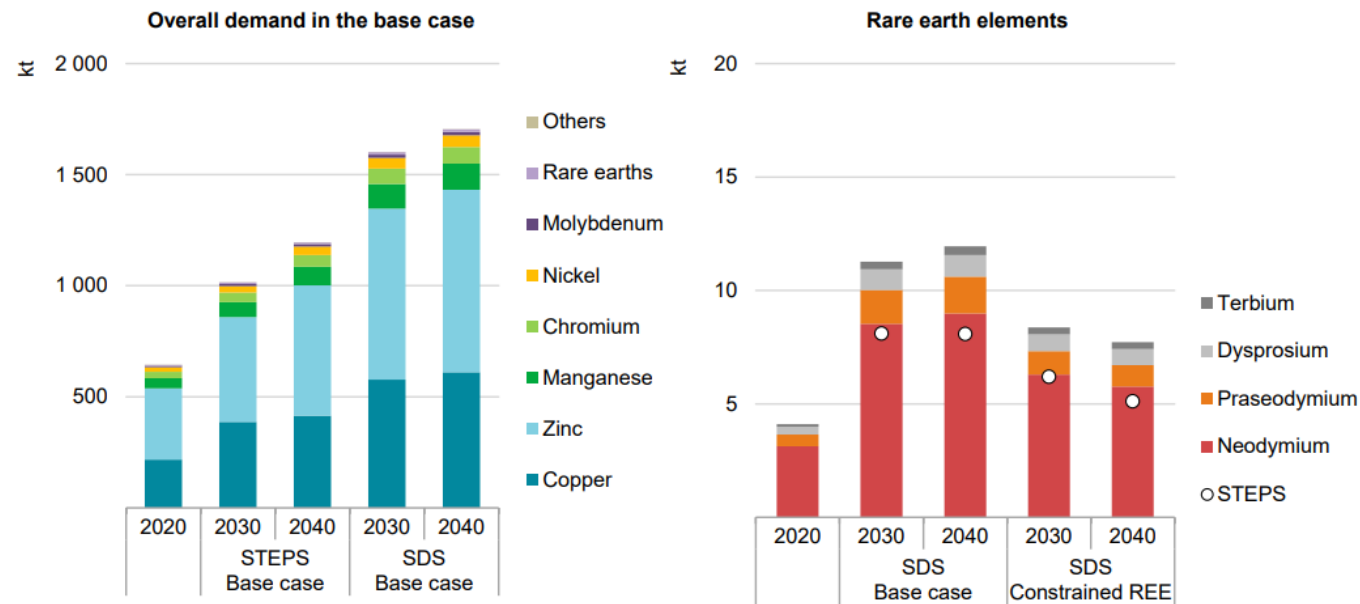


Suomen ympäristökeskus
Finlands miljöcentral
Finnish Environment Institute

Kriittisten raaka-aineiden kysyntä kasvaa tuulivoiman kasvun myötä

Wind: Demand for rare earths quadruples in the SDS by 2040, although the scale of growth may vary depending on the choice of turbine technologies

Mineral demand for wind by scenario



IEA. All rights reserved.

Lähde: International Energy Agency (2022). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. [The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions \(windows.net\)](#)

Kriittiset raaka-aineet ja puhtaat energiateknologiat EU- politiikassa

- EU:n politiikka korostaa kriittisten raaka-aineiden hallinnan ja kierrätyksen tärkeyttä.
 - Kierrätysasteet ovat tyypillisesti matalia.
 - Kriittisten raaka-aineiden asetuksella (CRM Act, maaliskuu 2023) lisätään EU:n sisäistä kriittisten raaka-aineiden louhintaa, prosessointia ja kierrätystä.
 - Vähennetään riippuvuutta Euroopan ulkopuolisista toimitusketjuista
 - Diversifioidaan EU:n riippuvuutta tietyistä toimittajamaista
- Puhtaiden energiateknologioiden kilpailukyvyen edistymistä käsittelevässä raportissa kehoitetaan lisäämään merkittävästi **sekundääristen raaka-aineiden** käyttöä akuissa. Edistymisraportti kiinnittää huomion tarpeeseen käsitellä resurssitehokkuutta ja -riippuvuutta niiden arvoketjun osien osalta, jotka ovat riippuvaisia kriittisistä raaka-aineista, ja ehdottaa, että H2020-rahoituksella tehdään parannuksia kiertotalouden T&I-toimintaan. (COM 2021 952 ja SWD 2021 307).
 - *Ehdotetussa akkuasetuksessa asetetaan korkeampia kierrätystavoitteita ja kierrätysraaka-aineiden käyttöosuusvelvoitteita*
- Lisäksi tietyillä aloilla, kuten tuulivoimaloissa ja vetytaloudessa, on kehoitettu ryhtymään toimiin, jotka liittyvät kiertotalouden tarpeeseen vähentää riippuvuutta raaka-aineista (SWD 2021 307). Erityisesti:
 - **Tuulivoimaloiden pidennetty käyttöikä (COM 2020), sekundääriset resurssit, tuulivoimaloiden lappojen uudelleenkäyttö, kierrätys ja hyödyntäminen (COM 2021).**

Tiedot koonnut: **tutkija Johanna Suikkanen, erikoistutkija Susanna Horn**

Tuulivoiman maankäyttövaikutuksista

- Keskimäärin tuulivoiman suora maankäyttövaikutus vaihtelee tutkimuksissa 0,34 - 1,37 km²/TWh välillä, kun huomioidaan vain tuulivoimalan nostoalueen ja tiestön vaatima maankäyttö. Kun huomioidaan myös sähköasemien ja voimajohtojen vaatima pinta-ala, tarvitaan aluetta keskimäärin noin 2,32–2,9 km²/TWh. Tapauskohtaisesti vaihtelu on merkittävää ja systemaattista kotimaista tarkastelua ei ole tehty.
- Tuulivoiman suorista maankäyttövaikutuksista osa on ns. väliaikaisia rakentamisen aikaisia vaikutuksia.
- Sähkönsiirtolinjat ovat olleet pisimmillään 170 km. Suorien maankäyttövaikutusten näkökulmasta myös niiden optimaalinen suunnittelu on olennaista.
- Tuulivoimapuistojen hankealueet ovat laajoja mutta on arvioitu että suorat maankäyttövaikutukset ovat noin 3 – 5% luokkaa suhteessa koko hankealueen laajuuteen. Metsähakkuut saattavat lisääntyä tuulivoimapuistojen rakentamisen yhteydessä esimerkiksi metsäteiden parantamisen johdosta.
- Maankäyttövaikutusten arviointi sisältää paljon epävarmuuksia etenkin jos huomioidaan epäsuoria ja ketjuuntuneita vaikutuksia.
- Tuulivoimalla maisema ja meluvaikutukset ovat merkittäviä ja arvioidaan aina kaavoituksen yhteydessä tapauskohtaisesti.

Energiajärjestelmän tuotannon ja kulutuksen joustavuus

- Tulevaisuuden sähköjärjestelmässä tehotasapainoa ylläpidetään edistämällä sekä kulutuksen että tuotannon joustavuuden hallintaa (Huuki ym., 2020). Koska joustavia tuotannonlähteitä (mm. vesivoima) on rajallisesti ja yhä suurempi osa tuotannosta on vaihtelevaa, korostuu kysyntään liittyvät joustoratkaisut ja varastointi tehotasapainon hallinnassa.
- Energiajärjestelmäkokonaisuus muodostuu eri osa-alueista, jotka kytkeytyvät toisiinsa sähköjärjestelmän kautta (sektori-integraatio). Sektori-integraatiossa pyritään luomaan infrastruktuuri tuotetun ja eri muotoihin varastoidun energian (sähkö, lämpö, kaasu) kohdentamiseen sinne, missä sen arvo kullakin ajanhetkellä on suurin
- Sähköjärjestelmän kautta toisiinsa kytkeytyvät sektorit (mm. teollisuus, liikenne ja lämmitys), joilla olevia toisiaan täydentäviä energian tuotanto-, kulutus- ja varastointikyvykkyksiä (mm. teollisuuden prosessit, ajoneuvot ja rakennukset) voidaan hyödyntää sähköntuotannon vaihtelevuuden tasaamisessa samalla pienentäen energiankulutuksen/tuotannon kustannuksia
- Teollisuuden ja suurten rakennusten tuottamien kulutusjoustojen lisäksi on osoitettu, että myös suomalaiset kotitaloudet reagoivat sähkön kulutuksen informaatio-ohjaukseen (Ruokamo ym., 2022) ja ovat halukkaita osallistumaan joustojen tarjoamiseen (Ruokamo ym., 2019)
- Joustavuutta voidaan lisätä myös markkinaehtoisesti kannattavin energiavarastoin (Karhinen & Huuki, 2019) ja kantaverkkoinvestointeja säästävällä sähkömarkkinan hinta-aluejaolla (Karhinen & Huuki, 2020) ohjaamalla tuotannon ja kulutuksen investointeja sinne missä ne ovat taloudellisesti kannattavimpia