

Jonna Marjunen

TUULIVOIMAN POTENTIAALI JA HAASTEET ARKTISILLA ALUEILLA

Vertailu muihin energiantuotantomuotoihin

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Seppo Syrjälä
Elokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Jonna Marjunen: Tuulivoiman potentiaali ja haasteet arktisilla alueilla
The potential and challenges of wind power in arctic regions
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka
Elokuu 2023

Arktisen luonnon suojelemiseksi on tärkeää kehittää vähemmän saastuttavia energiamuotoja. Tämä työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena ja siinä tutkitaan arktisen alueiden tuulivoiman mahdollisuuksia ja haasteita. Haasteisiin ja ongelmiin pyritään löytämään ratkaisut. Tuulienergiaa verrataan myös muihin mahdollisiin energiatuotantomuotoihin arktisilla alueilla. Lisäksi kehitetyjä tuulivoiman ja muiden energiamuotojen yhdistelmiä tarkastellaan mahdollisina kehityskohteina.

Arktinen alue on laaja, ja siihen kuuluu useita valtioita, joiden energiaverkot poikkeavat merkittävästi toisistaan. Useiden alueiden eristäytyneisyys luo monia haasteita tuulivoimalle. Siirtoverkkojen ja teiden puuttuminen ja heikko kunto vaikeuttavat suurempien voimaloiden rakentamista ja toimintaa. Arktinen ilmasto luo omat haasteensa tuuliturbiinien toiminnalle sekä niiden rakentamiselle ja huollolle ympäri arktista aluetta. Kuitenkin ilmaston aiheuttamiin ongelmiin on jo löydetty toimivia ratkaisuja. Paikallisten yhteisöjen tuulivoiman vastustus vaikeuttaa voimaloiden rakentamista. Hankkeiden täytyykin tapahtua yhteisymmärryksessä alkuperäsikansojen ja muiden lähellä asuvien ihmisten kanssa.

Arktisen ilmaston kylmät ja tiheät tuulet voivat lisätä tuulivoimalan tuottavuutta jopa 20 %. Kovat tuulet aiheuttavat rakennuksissa lämpöhäviöitä, mutta samalla saadaan myös tuulesta energiaa lämmitykseen, joka on suurin energiankulutuksen kohde kylmissä olosuhteissa. Tuulta saadaan siis silloin, kun sitä tarvitaan, ja se onkin yksi tuulivoiman suurimmista eduista. Muihin uusiutuviin energiamuotoihin verrattuna tuulivoimaa on helppo valjastaa lisää käyttöön ja sitä on saatavilla ympäri vuoden ja vuorokauden. Tuulivoima toimii myös hyvin pienemmissä yksikkökoissa kuin esimerkiksi ydinvoima. Tulevaisuudessa merituulivoiman oletetaan yleistävän arktisilla alueilla, kunhan rakenteet saadaan kestäämään liikkuvien jäämassojen aiheuttamaa rasitusta. Tälläkin hetkellä arktisille meri- ja maa-alueille on suunnitteilla uusia tuulivoimaloita.

Tutkimuksen perusteella tuulivoimalla on paljon potentiaalia arktisilla alueilla, kunhan lukuisat haasteet saadaan ratkaistua. Tuulivoiman tekniikka on jatkuvassa kehityksessä, ja ratkaisuja ongelmiin kehitellään koko ajan. Oletettavasti tuulivoima tulee lisääntymään maalla ja merellä arktisilla alueilla jo lähitulevaisuudessa.

Avainsanat: tuulivoima, arktinen alue, uusiutuvat energialähteet

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkistettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. ARKTINEN ALUE	2
3. TUULIVOIMA	4
3.1 Tuulivoimalan rakenne	4
3.2 Tuulivoimaloiden teho	4
3.3 Tuulivoima maalla ja merellä	5
4. ARKTISTEN TUULIVOIMALOIDEN HAASTEET	7
4.1 Jäätäminen	7
4.2 Tuuliturbiinien kuljetus, rakentaminen ja huolto	8
4.3 Siirtoverkot ja säätövoima	9
4.4 Tuulivoiman vastustus	11
5. TUULIVOIMAN POTENTIAALI ARKTISILLA ALUEILLA	13
5.1 Arktiset tuulet	13
5.2 Hyödyt muihin energiamuotoihin nähden	14
5.3 Tuulivoiman ja muiden energialähteiden yhdistelmät	16
6. ARKTISEN TUULIVOIMAN NYKYTILA JA TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT	18
7. JOHTOPÄÄTÖKSET	21
LÄHTEET	23

1. JOHDANTO

Arktisilla alueilla ilmastonmuutoksen aiheuttama lämpeneminen on kolme kertaa nopeampaa kuin muualla maailmassa (Climate Change). Arktinen ekosysteemi on herkkä pienillekin muutoksille, minkä takia ilmastonmuutos vaikutukset ovat voimakkaita arktisessa ympäristössä. (de Witt et al. 2021) Lämpötilan nousu ja paikalliset nokipäästöt arktisilla alueilla sulattavat niin lunta, ikiroutaa kuin jäätikköjäkin. Jään ja lumen alta paljastuvat maa- ja merialueet sitovat itseensä lisää auringon säteilyä kiihdyttäen edelleen ilmastonmuutosta. Ilmaston lämpeneminen ja lumen sekä jään sulaminen siis voimistavat tosiaan ja aiheuttavat vierivän lumipallon lailla kasvavan ongelman.

Edellä mainittujen syiden takia hiukkaspäästöjä tuottavien energialähteiden käyttöä tulisi vähentää varsinkin arktisilla alueilla. Päästöjen vähentämiseksi on tärkeä tutkia ja kehittää toimivia uusiutuvia energiantuotantomuotoja arktisten yhteisöjen tarpeisiin. Valitettavasti joidenkin arktisten alueiden eristäytyneisyys ja ilmasto aiheuttavat haasteita uusien energiamuotojen käyttöönottoon. Arktisista olosuhteista voi olla myös etuja uusiutuville energiamuodoille esimerkiksi kylmät tuulet ja matala kasvusto lisäävät tuulivoiman tuottavuutta. Siksi etenkin tuulivoima muiden uusiutuvien energialähteiden rinnalla on kustannustehokas ja ympäristöystävällinen ratkaisuja pienten asutusalueiden lämmön ja sähkön tuotantoon (Kryltcov & Solovev 2019, s. 1).

Tässä tutkimuksessa arvioidaan tuulivoiman potentiaalia eli mahdollisuuksia käyttää tulivoimaa arktisilla alueilla. Tutkimuksessa käsitellään, mitkä ovat arktisten olosuhteiden hyödyt ja haitat tuulivoiman kohdalla. Tutkimuksessa pyritään myös löytämään ratkaisuja ilmeneviin haasteisiin. Tuulivoimaa vertaillaan myös muihin arktisten maiden energiantuotantotapoihin.

Luvussa 2 määritetään tutkimuksen kohteena oleva arktinen alue ja sen erityispiirteet. Luvussa 3 käydään läpi tuulivoiman perusteita sekä eri voimalatyyppejä. Tuulivoiman haasteita ja niiden mahdollisia ratkaisuja arktisilla alueilla käsitellään luvussa 4. Luvussa 5 taas vastataan tutkimuskysymykseen: millainen potentiaali tuulivoimalla on arktisilla alueilla? Luvussa 6 tarkastellaan tuulivoiman nykytilaa arktisilla alueilla sekä mahdollisia tulevia hankkeita. Työn johtopäätökset esitetään luvussa 7.

2. ARKTINEN ALUE

Kahdeksan maata määrittelee itsensä arktisiksi valtioiksi. Nämä ovat Islanti, Tanska, Norja, Ruotsi, Suomi, Venäjä, Yhdysvallat ja Kanada (Kolker et al. 2022). Arktiselle alueelle ei kuitenkaan ole yhtä oikeaa määritelmää, vaan se voidaan rajata useilla eri tavoilla. Etelä-rajaa voidaan tulkita ikiroudan, merijään, metsärajan, lämpötilan tai poliittisten sopimusten perusteilla (Määrittely). Rajauksesta riippuen arktisella alueella asuu noin neljä miljoonaa ihmistä (de Witt et al. 2021). Tässä tutkimuksessa arktisella alueella tarkoitetaan napapiirin pohjoisella puolella sijaitsevia alueita eli kuvassa 1 tumman sinisellä ympäröityä aluetta.



Kuva 1: Arktiset maat ja arktisen alueen eri määritelmät (Määrittely)

Arktisille alueille ovat yhteistä ankarat sääolosuhteet, harva asutus ja pitkät välimatkat, jotka lisäävät energian tuotannon kustannuksia. Yhteistä on myös tarve lämmitykseen, joka onkin hallitseva energiankäytön kohde. (Kolker et al. 2022). Arktisten maiden energijärjestelmät ovat kuitenkin hyvin erilaisia verrattuina toisiinsa. Osassa maista energia tuotetaan lähes täysin uusiutuville energialähteillä, kuten Norjassa ja Islannissa.

Pohjoismaissa lämmitys hoidetaan yleisesti kaukolämpöjärjestelmien avulla sekä sähköllä. Norja, Ruotsi ja Suomi ovat myös osa kansallista sähköverkkoa, jonka kautta sähkö toimitetaan lähes poikkeuksetta kaikille asukkaille. (Kolker et al. 2022)

Kuitenkin, koska Arktis on laaja ja harvaan asuttu, useissa maissa on paljon pieniä ja syrjäisiä yhteisöjä, joiden energiajärjestelmät eivät ole yhteydessä suurempaan valtakunnalliseen energiaverkkoon. Venäjällä, Grönlannissa, Kanadassa ja Alaskassa pienet paikalliset sähköntuotantojärjestelmät ovat yleisiä ja ne tuottavat energiaa niin yksittäisille laitoksille kuin koko yhteisöillekin. Näitä pieniä järjestelmiä kutsutaan mikroverkoiksi. Mikroverkot ovat joukko yhteen kytkettyjä kuormia ja hajautettuja resursseja, jotka voivat toimia itsenäisesti tai osa keskitettyä verkkoa. Yhteisöjen itsetuottamasta energiasta noin 80 % tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla. (Kolker et al. 2022)

3. TUULIVOIMA

Tuulivoima on painetilaeroista johtuvan ilman liike-energian muuttamista roottorin liike-energiaksi, jota edelleen muutetaan generaattorin avulla sähköksi. Tuulivoima on uusiutuva ja ehtymätön energianlähde sekä yksi nopeimmin kasvavista energiantuotantomuodoista. Nopeaa kasvua selittää tuulivoiman kustannustehokkuus ja sillä tuotetun sähkön halpa hinta. Tuuliturbiinit ja niiden teknologia kehittyvät jatkuvasti parantaen vielä entisestään niiden kustannustehokkuutta. (Advantages and Challenges of Wind Energy)

3.1 Tuulivoimalan rakenne

Karkeasti määriteltynä tuulivoimala koostuu roottorista, konehuoneesta ja tornista. Roottoriin kuuluvat sekä napa että lavat. Nykyaikaisissa tuulivoimaloissa lapojen lukumäärä on kolme, koska lapojen lisääntyessä roottorin pyörimisliike muuttuu stabiilimmaksi, mutta samalla myös rakennuskustannukset kasvavat. Kolmelapainen roottori onkin siis teknisten ja taloudellisten seikkojen kompromissin tulos. (Korpela 2016, s.49–69)

Tuulivoimalan konehuoneen eli nasellin sisältö ja muoto riippuu voimalan koosta ja konseptista. Yleensä pienemmät tuulivoimalat kääntyvät tuulen suhteen oikeaan suuntaan peräsimen avulla, mutta suuremman kokoluokan voimalat tarvitsevat suunnanmuutosmoottorin, -laakerin ja laitteiston tuulen suunnan mittaamiseen. Suuren kokoluokan tuulivoimaloiden generaattorit ovat vaihtosähkögeneraattoreita, jotka ovat joko tahti- tai epätahtigeneraattoreita. Generaattorin ja suunnanmuutosjärjestelmän lisäksi nasellista löytyy voimalan vikaherkin osa eli vaihdelaatikko ja pääakseli, joka yhdistää roottorin ja vaihdelaatikon toisiinsa. Isoissa voimaloissa, joissa lavan pituus on yli 50 metriä ja roottori pyörii erittäin hitaasti, voidaan käyttää tuulivoimaloihin suunniteltuja kestopagneettigeneraattoreita, joiden kanssa ei tarvita vaihdelaatikkoa. (Korpela 2016, s.70-86)

3.2 Tuulivoimaloiden teho

Tuulivoimalan tehokkuutta kuvaavat hyötysuhde, huipunkäyttöaika ja kapasiteettikerroin. Tuulivoimalan hyötysuhde on generaattorin tuottaman sähkötehon ja ilmavirtauksen tehon suhdetta, jolle Benzin laki antaa ylärajan. Huipunkäyttöaika on aika, jonka voimala tarvitsee tuottaakseen vuosituotantonsa nimellistehollaan.

Huipunkäyttöajan ylärajaa tuulivoimalle pidetään yleisesti 2400 tunnissa. Kapasiteetikerron taas on huipunkäyttöajan prosentuaalinen esitys eli huipunkäyttöaika jaettuna vuoden tunneilla. (Korpela 2016)

Tuulivoima tuottama teho perustuu ilmavirtauksen tehoon, joka voidaan esittää seuraavasti

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v_0^3. \quad (1)$$

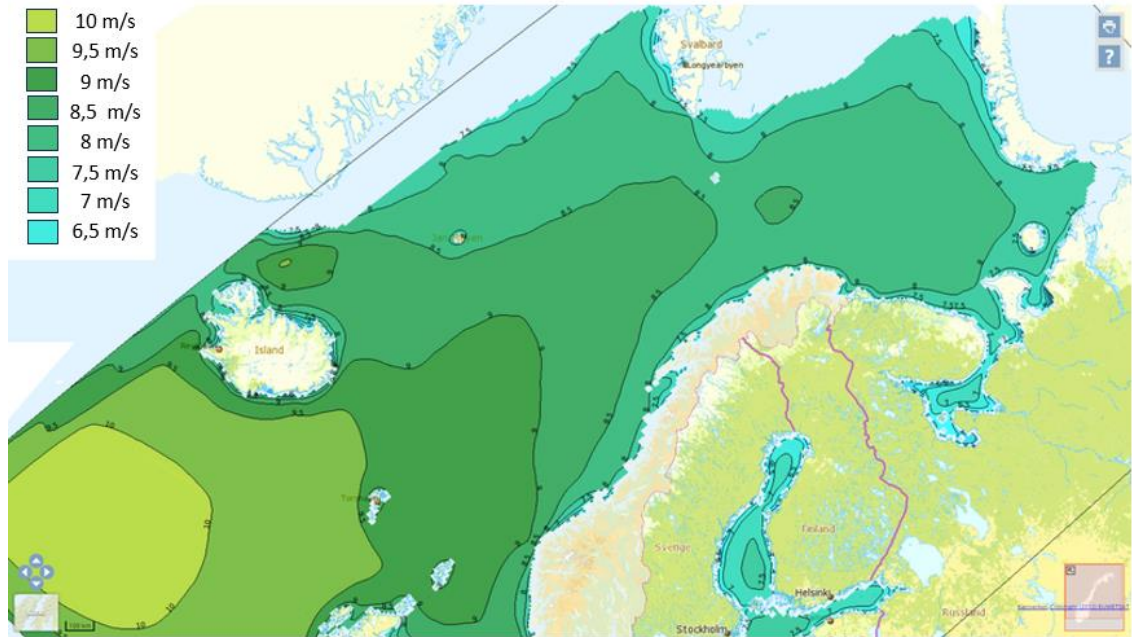
P_0 on ilmavirtauksen teho, ρ ilman tiheys, A ilmavirtausta vastaava kohtisuora pinta-ala ja v_0 tuulen nopeus. Voimala ei kuitenkaan tuota suoraan tuulen tehoa vastaavaa energiamäärää aikayksikössä. Betzin laki kertoo roottorin tuottaman tehon ja tuulen tehon suhteelle teoreettisen ylärajan, joka on 59,3 %. Käytännössä roottorin tehosta täytyy vielä vähentää generaattorin ja muiden osien tehohäviöt, joten nykyisten tuulivoimaloiden hyötysuhde on noin 40 %. Kuitenkin voimalan teho on suoraan verrannollinen tuulen nopeuden kolmanteen potenssiin. Näin ollen tuulen nopeuden kaksinkertaistuksessa voidaan ajatella tuotetun tehon 8-kertaistuvan. (Korpela 2016, s. 36, 37, 42) Tämän takia voimalan tehoa ei voi arvioida vain tuulen nopeuden keskiarvon avulla. Tuulen tehotiheyden mallintaminen onkin erittäin tärkeää tuulivoimalan rakentamisen suunnittelussa.

3.3 Tuulivoima maalla ja merellä

Tuulivoimalan perustukset voivat olla maalla, merenpohjassa tai kelluvia, mikä mukaan ne luokitellaan joko maatuulivoimaloiksi (onshore) tai merituulivoimaloiksi (offshore). Voimala luokitellaan myös merituulivoimalaksi, jos se on rakennettu keinoisaarelle ja sen sähkökaapeli kulkee merenpohjassa (Yleistä merituulivoimasta). Kiinteät merituulivoimalat voidaan rakentaa noin 50 metrin syvyyteen ja kelluvia turbiineja noin 500 metrin syvyyteen. Kelluvat turbiinit ovat kuitenkin vielä kehitysvaiheessa, eikä niitä ole ollut käytössä kovinkaan paljon. (Wind farm Siting) Merituulivoima yleistyy maailmalla kovaa vauhtia, mutta vielä niiden osuus kaikesta tuulivoimasta on vielä pieni.

Jään ja veden liikkeet varsinkin myrskyjen aikana voivat vaurioittaa turbiineja, minkä takia merellä sijoitettavien turbiinien rakenteet täytyy tehdä vahvoiksi. (What are the advantages and disadvantages of offshore wind farms?) Vaikka turbiinit ovat toimintaperiaatteiltaan samat, on merituulivoimaloiden rakentaminen jopa 20 % kalliimpaa kuin maatuulivoimaloiden (Beauchamp 2022). Merituuliturbiinit ovat myös yleensä suurempia maalle asennettaviin verrattuna ja merellä tuuli on navakampaa ja tasaisempaa, mikä lisää merivoimalan tuottavuutta maavoimalaan nähden. (What are

the advantages and disadvantages of offshore wind farms?) Keskituulennopeus kasvaa edettäessä rannikosta pois päin, kuten kuvasta 2 nähdäänkin.



Kuva 2: Vuotuinen keskiverto tuulennopeus 10 metrin korkeudella Norjanmerellä ja Barentsinmerellä. (muokattu lähteestä Wind farm Siting 2020)

Vuonna 2022 maailmanlaajuisesti tuulivoiman kapasiteetti oli 906 GW, mikä oli 9 % kasvu verrattuna vuoteen 2021 (Global Wind Report 2023). Kokonaiskapasiteetista merituulivoiman osuus oli 57,6 GW. (Global Offshore Wind Report 2022)

Merituulivoiman osuus oli siis hieman reilu 6 % kokonaiskapasiteetista.

Tuulivoimakapasiteetin oletetaan kasvavan 2 TW vuoteen 2030 mennessä (Global Wind Report 2023).

4. ARKTISTEN TUULIVOIMALOIDEN HAASTEET

Tuulivoimaloiden yleisiä haasteita ovat tuulisuuden vaihtelusta johtuvat ongelmat, meluhaitat ja visuaaliset haitat sekä eettisyys paikalliseen ympäristöön suhteen. Perinteisten haasteitten lisäksi arktisilla alueilla karut sääolosuhteet vaikeuttavat niin voimaloiden rakentamista, toimintaa kuin huoltoakin. Sääolojen lisäksi hankaluuksia aiheuttavat useilla alueilla siirtoverkkojen heikko kunto ja pitkät välimatkat.

4.1 Jäätäminen

Jäätämällä tarkoitetaan kylmän ilman kosteuden tiivistymistä ja jäätymistä tuulivoimalan lavan pintaan. Jäätämistä tapahtuu yleensä, kun ilma on kostea ja sen lämpötila on alle nollan asteen. Jääkertymiä aiheuttavia luonnon ilmiöitä ovat jäätävät sateet ja pilvijäätäminen, muttei lumisade. Jäätävän sateen aikana alijäähtyneet vesipisarat muodostavat sisäisen lämpöenergiansa takia tasaisen jääkerroksen lavan pinnalle. Pilvijäätämisessä sadepisaroita huomattavasti pienemmät pilvipisarot muodostavat lavan pinnalle karhean jääpeitteen. Jäätymistä aiheuttavia alijäähtyneitä pilviä syntyy, kun ilmassa ei ole tarpeeksi epäpuhtauksia muodostamaan kiinteitä jääkiteitä. (Tuulivoima ja jäätäminen)

Jäätäminen aiheuttaa tuulivoimalan tehon alenemista, kun jää muuttaa lavan ominaisuuksia ja näin heikentää tuulesta lapaan aiheutuvaa nostetta. Tehohäviö on suurinta ensimmäisenä jäätämistuntina, joten jo lyhytkestoinen jäätäminen vaikuttaa huomattavasti tuotantoon (Karlsson et al. 2013). Jäätäminen voi pienentää voimalan energian tuotantoa jopa 80 % (Vella 2020). Lapoihin kertynyt jää kuormittaa voimalaa sekä kuluttaa komponentteja ennenaikaisesti. Lavoista irtoava jääkertymä voi myös aiheuttaa vaaratilanteita, mutta tapaturmat ovat kuitenkin erittäin epätodennäköisiä. (Suomen Tuulivoimayhdistys)

Arktisilla alueilla, varsinkin vesistöjen lähetyvillä, olosuhteet ovat otolliset jääkertymien syntymiseen ja sitä voikin esiintyä jopa 20 % vuodesta (Kryltcov & Solovev 2019). Jäätämistä pystytään kuitenkin estämään tai poistamaan erilaisten järjestelmien avulla. Järjestelmät voivat joko ennaltaehkäistä (anti-icing) jäätämistä tai poistaa jo muodostuneen jään (de-icing). Järjestelmät voivat lämmittää lavan pintaa tai puhalttaa kuumaa ilmaa lapaan käyttäen voimalan omaa tai verkosta otettua sähköä. Sähkön kulutus on kuitenkin pientä verrattuna voimalan tehon tuotantoon, noin 0,5–1,0 % vuosituotannosta. Tapauksessa, jossa lämmitintä jouduttiin pitämään päällä yli 1000

tuntia, lämmitykseen kului kaksi prosenttia voimalan vuosituotannosta.

(Tuulivoimatuotanto talvella) Lämmitysjärjestelmän sähköntarve on siis niin vähäinen, että siihen kannattaa investoida jäätämisen ollessa todennäköistä.

Lapojen pintasuunnittelullakin voidaan estää jäänkertymän syntymistä. Tämänhetkiset kaupalliset jäänestopinnoitteet perustuvat hydrofobisuuteen, voiteluaineisiin sekä sulamispistettä alentaviin aineisiin ja ablaatioon eli lumen vesiarvon pienenemiseen. Pinnoitteet eivät tarvitse sähköenergiaa toimiakseen, mikä on niiden etu lämmitykseen perustuviin jäänestomenetelmiin nähden. Pinnoitteet voidaan valmistamaan ilman haitallisia kemikaaleja ja tulevaisuudessa niillä voitaisiin estää jään kertymät myös muissa rakenteissa. Termisesti ruiskutetut pinnoitteet ovat halpoja ja tehokkaita jään estossa. Ne ovat myös kestäviä vaikeissa olosuhteissa ja suojaavat turbiinin osia korroosiolta. (Koivuluoto et al. 2017)

4.2 Tuuliturbiinien kuljetus, rakentaminen ja huolto

Tuulivoimalan osat voidaan kuljettaa rakennuskohteeseen autoilla ja junilla maata pitkin tai meriteitse laivalla. Jokaiseen kuljetusmuotoon liittyvät omat riskitekijänsä ja ne vaativat paljon suunnittelua onnistuakseen. Tuulivoimalan osat ovat suuria ja painavia, minkä vaikeuttaa jo lähtökohtaisesti niiden kuljetusta rakennuskohteeseen. Lapojen pituus ja alati kasvava korkeus tekee niistä hankalia kuljetettavia varsinkin maanteillä, joilla esimerkiksi tunnelien koko ei ole riittävä tai käännökset ovat liian jyrkkiä. (shippin wind turbines is not a breeze) Osien suuri koko näkyy myös niiden painossa. Voimalan naselli voi painaa 75 tonnia, yksittäinen lapa 12 tonnia ja torni noin 24 tonnia (How to transport a wind turbine). Suurimmat turbiinit voivat painaa täysin koottuina jopa yli 300 tonnia. Autolla kuljetettuna isoimmat voimalat voidaan kuljettaa noin kymmenessä kuormassa. (shippin wind turbines is not a breeze)

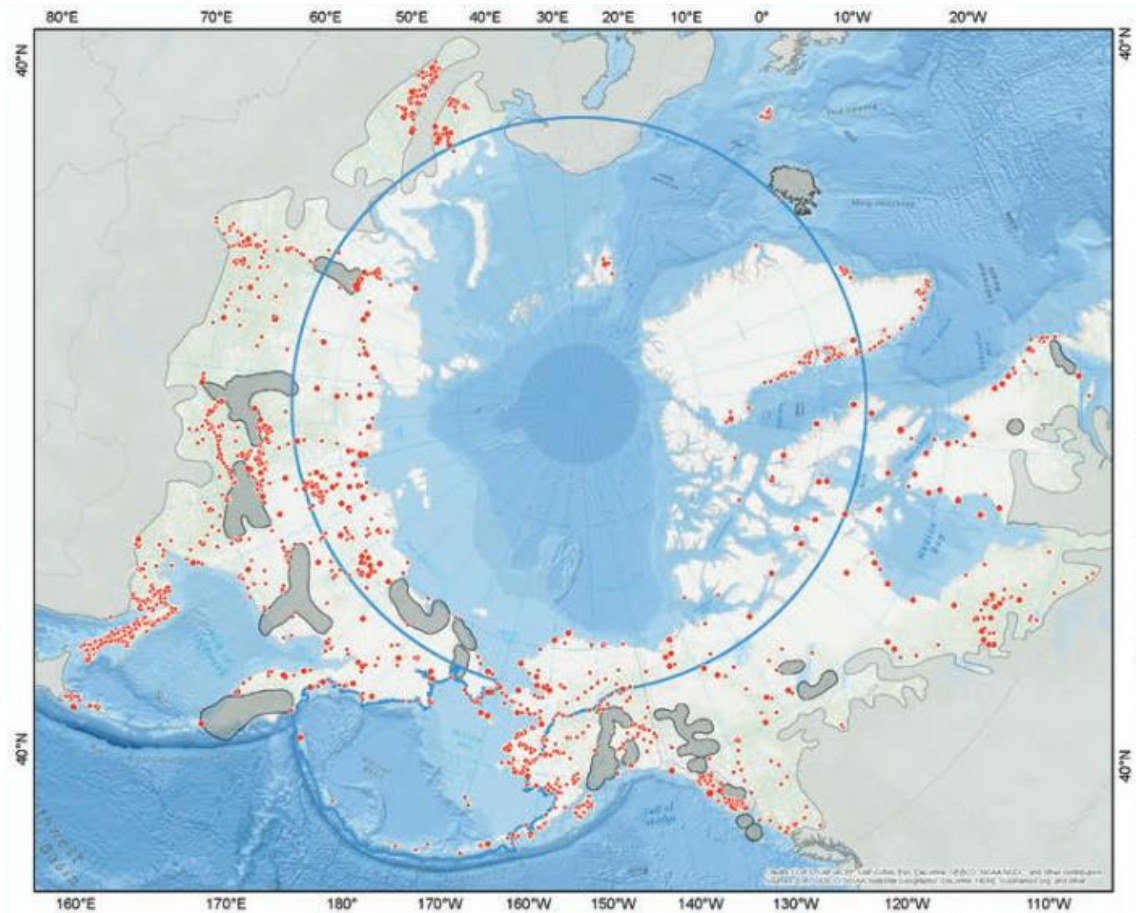
Arktiksella pitkät välimatkat ja teiden vähäisyys sekä niiden huono kunto aiheuttavat useissa paikoissa lisähaasteita infrastruktuurihankkeiden toteuttamiseen, kuten voimaloiden rakentamiseen (de Witt et al. 2021). Myös ankarat ilmasto-olosuhteet vaikeuttavat kuljetusta, uudisrakentamista sekä korjaustöitä osassa arktista aluetta. Kuljetuksen helpottamiseksi voimalan osat tulisi suunnitella mahdollisimman kevyiksi, mutta niiden tulisi silti kestää arktisen alueen alhaisia lämpötiloja. Turbiinien osien kokoon on kuitenkin vaikea vaikuttaa, koska voimalan teho riippuu suoraan lapojen pituudesta. (Kryltcov & Solovev 2019)

Tuulivoimalan käyttöönoton jälkeen sitä on pystyttävä huoltamaan ympäri vuoden säässä kuin säässä. Varsinkin merituulivoiman kohdalla oikeanlainen kalusto ja osaava huoltotiimi ovat tärkeitä, sillä huoltoa vaativan turbiinin luokse on päästävä, vaikka meri olisikin jäässä. (Offshore wind farms tailored for winter 2023) Tuulivoimateknikoiden on asuttava työssäkäyntialueella huollon vasteaika takaamiseksi. Turvallisuussyistä huoltotyöt tehdään aina pareittain. Optimaalisesti reilua kahtakymmentä tuuliturbiinia hoitaa kolme teknikkoo. Suomessa kuitenkin optimi ei toteudu pitkien välimatkojen, pienten puistokokonaisuuksien sekä teknikkopulan takia, joten noin kymmentä turbiinia hoitaa kaksi huoltajaa. (Takuut ja huollot) Syrjäisillä seuduilla ongelmaksi voikin koitua osaavan huoltohenkilöstön puuttuminen pienillä tuulivoimapuistoilla.

4.3 Siirtoverkot ja säätövoima

Arktiset maat voidaan jakaa niiden sähköverkkojen perusteella Euroopan laajojen sähköverkkojen maihin ja maihin, joissa on paljon syrjäisiä mikroverkkoja (kuva 3). (Kolker et al. 2022) Esimerkiksi Kanadassa on yli 175 verkkoon kuulumatonta yhteisöä, joista 140 on pelkästään dieselpolttogeneraattoreiden varassa (Poelzer et al. 2016). Syrjäisillä ja leudoilla alueilla sähköverkot kulkevat teitä mukailien, mutta ilman teitä sähkölinjojen rakentaminen ja huoltaminen on vaikeampaa. Tämä johtaa usein saarekkeisiin sähköverkkoihin, mikä tekee verkosta haavoittuvamman. (de Witt et al. 2021) Lisäksi ilmastonmuutoksen seurauksena ikiroutaan asennetut sähköverkon ilmajohtojen perustukset saattavat muuttua epävakaiksi ja niiden huoltaminen vaikeutua entisestään (Poelzer et al. 2016).

Eryisesti Venäjällä rajallinen ja vanhentunut infrastruktuuri lisäävät verkkoon liitettävien uusiutuvien energialähteiden riskejä (Boute 2016). Hyvänä esimerkkinä tästä toimii Venäjällä Sahan tasavalta eli Jakutia, jossa 18,5 % sähköverkosta on ylittänyt 40 vuoden käyttöiän ja niissä tapahtuu suuria energiahäviöitä (Shakirov et al. 2020). Suurten voimalaitosten rakentaminen ole kannattavaa kyseisille seuduille, joissa asuintiheys on pieni ja sähköverkko on puutteellinen.



Kuva 3: Kuvaan on merkitty sinisellä pohjoinen napapiiri. Tumman harmaalla merkityillä alueilla on alueellinen sähköverkko ja vaaleanharmaalla merkityillä alueilla on kansallinen sähköverkko. Kuvaan on merkitty kolmilla eri kokoisilla pisteillä 1 492 off-grid-siirtokuntaa eli yhteisöä, joita ei ole yhdistetty muihin alueisiin voimalinjoilla, putkistoilla tai useissa tapauksissa myöskään teillä. Pienempien pisteiden yhteisöjen väkiluku on 1–500 henkilöä, keskikokoisten 500–5 000 ja suurimpien yli 5 000. Yhteensä yhteisöissä asuu 1 642 095 ihmistä. Kartta ei ole vielä kokonaan valmis vaan noin 90 % kaikista alueella sijaitsevista yhteisöistä on merkitty siihen. (muokattu lähteestä Poelzer et al. 2016)

Sähköverkossa on pidettävä tasainen taajuus, jotteivat sähkölaitteet mene rikki. Sähkön tuotannon ja kulutuksen on siis vastattava toisiaan. Tuulivoiman tuottama sähkö on kuitenkin riippuvainen tuulesta eikä sähköä pysty tuottamaan, jollei tuule tarpeeksi. Tuulivoima tarvitsee siis rinnalleen säätövoimaa eli nopeasti käynnistyvää sähköntuotantoa, joka tasaa hetkellisiä kulutuksen ja tuotannon vaihteluita (Säätövoiman tarve). Valtakunnalliseen verkkoon liitetyillä alueilla säätövoimantarve ei

tuota ongelmia, mutta autonomisia energialähteitä käyttävien mikroverkkojen kohdalla säätövoima on suunniteltava tarkoin.

Energiavarmuus on tärkeä aihe varsinkin syrjäisillä arktisilla alueilla, joiden kylmissä olosuhteissa sähkökatko voi nopeasti aiheuttaa hengenvaarallisia tilanteita. Alueilla, joilla ei ole yhteyttä valtakunnalliseen verkkoon, varakapasiteettina käytetään yleensä dieselgeneraattoreita. Sähkön toimitusvarmuuden turvaamiseksi generaattori tai muu varakapasiteetti helposti ylimitoitetaan, jotta sähköä saadaan tuotettua, vaikkei tuuliturbiini tuottaisi sitä ollenkaan. (de Witt et al. 2021) Ylimitoituksesta aiheutuu merkittäviä lisäkustannuksia niin sähköntuotantoon kuin sen jakeluunkin.

Kustannustehokkuuden lisäämiseksi on kehitetty keinoja vähentää säätövoiman tarvetta megawattien suuruisissa autonomisissa tuulivoimaloissa hyödyntämällä voimalan virtareserviä. Verkon jännitteen laatua voidaan parantaa siis tuuliturbiinin tehokertoimen, harmonisten vääristymien ja jännitteen säätelyn avulla, kun tuulennopeus on alle nimellinopeuden. Nimellinopeus tarkoittaa pienintä tuulennopeutta, jolla tuuliturbiini tuottaa sähköä. Käytännössä jännitteen laatua voidaan säädellä erilaisten tehomuuntimien avulla. (Kryltcov & Solovev 2019) Säätövoiman tarpeeseen voidaan vaikuttaa myös yhdistelemällä eri energiatuotantomuotoja.

4.4 Tuulivoiman vastustus

Yksi tuulivoiman kehitystä hidastava tekijä on niin kutsuttu NIMBY-ilmiö, joka tulee sanoista ”not in my backyard”. NIMBY tarkoittaa siis ihmisten monista syistä johtuvaa vastustusta asunalueensa lähelle suunniteltuja rakennusprojekteja kohtaan. (Arktiset aamiaiset Pariisissa - Vihreän energian mahdollisuudet arktisella alueella 2019) Vaikka arktinen alue on monin paikoin harvaan asuttua, löytyy tuulivoiman vastustajia sieltäkin. Esimerkiksi Norjassa on kritisoitu tuuliturbiinien rakentamista kauniiden luonnontilassa oleville vuonoille ja vuorille (How Wind Power and Indigenous Rights Clash in Norway 2023). Myös alueella asuvien alkuperäisasukkaiden mielipiteet tuulivoimasta on otettava huomioon.

Useat alkuperäiskansat elävät ja hankkivat toimeentulonsa arktisen alueen luonnosta. Porojenhoito on yksi saamelaisten tärkeimmistä elinkeinoista ja iso osa heidän kulttuuriaan. Porot liikkuvat vapaasti metsässä suurimman osan vuodesta ja tekevät usein laajoja vaelluksia sopivien laidunmaiden löytämiseksi. Juuri näiden vaellusalueiden pirstaloituminen ja häviäminen muiden maankäyttötarkoitusten takia on iso uhka poronhoidolle. (Skarin et al. 2015) Myös huonosti sijoitetut tuulivoimalat

haittaavat porojenhoitajien elinkeinoa. Tuulivoimalat ja niiden voimalinjat voivat siirtää tärkeitä muuttoreittejä tai tehdä laidunalueista käyttökelvottomia. (McGwin 2020) Ruotsissa tehdyn tutkimuksen mukaan tuulivoimalan rakennuksen aikana porot välttelivät rakennusaluetta ja niiden askelpituus kasvoi viiden kilometrin säteellä rakennusmaasta verrattuna aikaan ennen projektin alkua. Porojen huomattiin myös välttelevän rakennustyömaan teiden ylitystä ja alueelle pysähtymistä. (Skarin et al. 2015) Porojen laidun ja vasomisalueet tulisi ottaa huomioon tuulivoimaloita suunniteltaessa poronhoitoalueille. Myös paikallisten kanssa pitäisi käydä keskustelua.

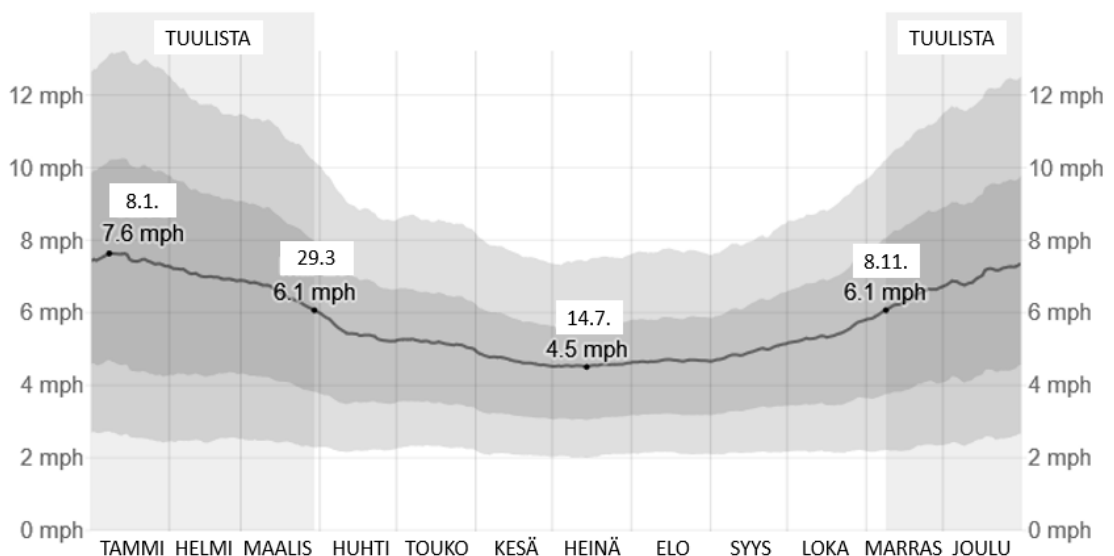
Norjassa vaaditaan 151:n tuuliturbiinin sulkemista Fosenin alueella, koska Norjan korkein oikeus päätti niiden rikkovan saamelaiden ihmisoikeuksia. Paimentajat sanovat porojen laidunalueilla sijaitsevien puistojen rakennustöiden ja turbiinien siipien liikkeen pelottavan poroja. YK:n kansalaisoikeuksia ja poliittisia oikeuksia koskevan yleissopimuksen 27 artiklan mukaan vähemmistöiltä ei saa kieltää oikeutta nauttia omasta kulttuuristaan. Tuomioistuin kuitenkin katsoi turbiinien lupien olevan vain pätemättömiä, ei laittomia, joten voimala voi jatkaa toimintaansa. Voimalan saama huomio saattaa kuitenkin vaikuttaa negatiivisesti tulevaisuuden hankkeisiin. Alkuperäiskansojen oikeuksia pyritäänkin ottamaan paremmin huomioon tulevaisuudessa. (How Wind Power and Indigenous Rights Clash in Norway 2023)

5. TUULIVOIMAN POTENTIAALI ARKTISILLA ALUEILLA

Arktisen tuulivoiman haasteista huolimatta, sillä on paljon etuja muihin energiamuotoihin nähden. Myös eri tuotantomuotoja yhdistelemällä voidaan saavuttaa halvempia ja ekologisempia ratkaisuja arktisten alueiden energiatuotantoon. Pohjoisen harvaanasutut seudut ja tuuliolosuhteet luovat oivan mahdollisuuden kehittää laajoja tuulipuistoja isoja turbiineja hyödyntäen (Arktiset aamiaiset Pariisissa – Vihreän energian mahdollisuudet arktisella alueella 2019).

5.1 Arktiset tuulet

Napa-aluetta kiertää tuulijärjestelmä napapyörre eli polaaripyörre, joka erottaa napa-alueen ja lämpimämmät eteläiset vyöhykkeet toisistaan. Uusiutuvien energialähteiden suorituskyky USA:n vuoden 2019 voimakkaan napapyörteen aikana osoitti, että varsinkin tuulivoima pystyy tuottamaan halpaa sähköä verkkoon erittäin kylmissä olosuhteissa. Sähköä tuottava yhtiö raportoi katkoksien määrän olleen 9,6 % kapasiteetista vuoden 2019 napapyörteen aikana, mikä on yli puolet vähemmän, kuin vuonna 2014 samassa tilanteessa. Siis vaikka uusiutuvien energialähteiden tuotto laskee napapyörteen aikana, ne pystyivät silti vastaamaan energian kysynnän nousuun äärimmäisen kylmien sääolosuhteiden aikana paremmin kuin fossiiliset polttoaineet. (Not even a Polar Vortex can knock out renewables 2019)



Kuva 4: Tuulisuus Alaskassa napapiirillä 10 m korkeudessa vuosien 2015-2023

perusteella. Tummanharmaa viiva on muodostettu tuntikohtaisten tuulennopeuksien keskiarvoista. Sen ympärillä ovat 25–75 ja 10–90 prosenttipisteiden vyöhykkeet. Tuulennopeudet on esitetty kuvassa maileina per tunti. Yksi mph on 0,44704 m/s. (muokattu lähteestä Weatherspark.com)

Yleinen harhaluulo tuulettomista pakkaspäivistä ei pidä paikkaansa. Kuvasta 4 nähdäänkin, että Alaskassa keskituulennopeudet ovat suurimpia talvikuukausina. Varsinkin nykyaikaisten tuulivoimaloiden roottorin korkeudella tuulee kylminä pakkaspäivinäkin. Kylmä ilma on myös tiheämpää kuin lämmin, joten se tuottaa samalla tuulennopeudella enemmän energiaa lämpimään ilmaan verrattuna. (Wind Power in cold temperatures 2023) Nämä kylmät ja tiheät tuulet voivat kasvattaa tuuliturbiinin tehoa jopa 20 % (Kolker et al. 2022). Merillä, rannikoilla ja ylängöillä tuulennopeus vaihtelee merkittävästi ympärivuoden, mutta sisämaassa kuukausittaiset vaihtelut ovat pieniä. (Wind Power in cold temperatures 2023) Ilmastonmuutoksenkaan ei odoteta vaikuttavan tuulennopeuksiin arktisilla alueilla ainakaan usean vuosikymmenen (Pustovalov), joten otolliset tuuliolosuhteet eivät ole muuttumassa lähitulevaisuudessa.

Tuulennopeus lähellä maanpintaa kasvaa leveysasteen kasvaessa (Pustovalov). Keskituulennopeus arktisilla alueilla on noin 5–6 m/s ympäri vuoden, mutta osasta alueilla se voi yltää jopa 10–12 m/s (Kryltcov & Solovev 2019). Esimerkiksi Grönlannissa ja Pohjois-Islannissa vuotuinen tuulennopeus on 11 m/s, Norjanmerellä 10 m/s ja Kanadassakin 7 m/s (The Arctic: Critical Metals, Hydrogen and Wind Power for the Energy Transition). Alaskassa tuulennopeus 10 metrin korkeudessa on keskimäärin 2-3,5 m/s (kuva 3), mutta yleensä tuuliturbiinit ovat korkeammalla maanpinnasta, joten tuulennopeudet ovat myös korkeampia.

5.2 Hyödyt muihin energiamuotoihin nähden

Arktisilla alueilla pitkät välimatkat ja alueiden luonnonvarat vaikuttavat energiantuotannon valintoihin. Osa energiamuodosta sopeutuu hyvin energian kysynnän vaihteluihin, mikä on tärkeää varsinkin kylmissä olosuhteissa. Myös energiatuotantotapojen kuorma ympäristölle sekä sääolosuhteet ovat tärkeässä roolissa mietittäessä vaihtoehtoisia energian lähteitä.

Dieselillä tuotettu energia on todettu toimivaksi arktisissa olosuhteissa ja sitä on käytetty jo useiden vuosikymmenien ajan sen luotettavuuden ja hyvän energiankulutukseen mukautuvuuden takia. Kuitenkin fossiilisilla polttoaineilla on kaksi

huonoa puolta: kuljetuksen kulut ja kasvihuonekaasupäästöt. Kolmantena voidaan ajatella olevan mahdolliset polttoaine vuodot maaperään ja vesistöihin. (de Witt et al. 2021)

Fossiilisten polttoaineiden käyttö energian tuotannossa on tuhoisaa jo ennestään herkälle arktiselle luonnolle. Poltosta syntynyt noki nopeuttaa jään ja lumen sulamista, mikä kiihdyttää ilmastonmuutosta ja muuttaa paikallista ekosysteemiä. Vapautuneet kasvihuonekaasupäästöt vaikuttavat myös muun maailman ilmastoon. Fossiilisten polttoaineiden käyttö on kestäväntöntä myös niiden vähäisyyden vuoksi eikä enää voida luottaa niiden riittävän loputtomiin. Jo nyt Alaskan syrjäisten kylien infrastruktuuri on kärsinyt sähkökatkojen vuoksi, jotka ovat aiheutuneet polttoaineiden vähäisyydestä ja hinnasta. (Kolker et al. 2022) Syrjäisillä seuduilla, esimerkiksi Venäjän ja Kanadan pohjoisissa osissa, kuljetuskustannuksien osuus polttoaineen hinnasta on jopa 70 % (Shakirov et al. 2020).

Bioenergia taas vaatii jatkuvalla syötöllä biomassaa, jota on vaikea tuottaa arktisilla alueilla. Mitä pohjoisemmaksi arktisilla alueilla mennään, sitä vähemmän puustoa ja kasvillisuutta on. Arktiksen vähäinenkin kasvusto tarvitaan herkän luonnon hiilinieluiksi. Bioenergiakaan ei ole päästötöntä ja sen tuonti kauempaa ei ole järkevää, koska se lisää hiilidioksidipäästöjä ja energian kustannuksia. (de Witt et al. 2021)

Lähes jokaisella arktisella maalla on ydinenergiaa, mutta vain Venäjällä on kaksi reaktoria napapiirin pohjoisella puolella (Background: What are the sources of radioactive contamination in the arctic? 2023). Ydinenergian ongelmana ovat kalliit rakennuskustannukset ja radioaktiivisen ydinjätteen varastointi. Ne vaativat toimiakseen kattavan sähkönsiirtoverkon eikä niiden rakentaminen pienien yhteisöjen energiantuotantoon ei ole järkevää. (de Witt et al. 2021) Tiheämmin asutetuilla seuduilla kallis investointi voi olla kannattava, mutta paikallisen väestön ennakkoluulot vaikuttavat ydinenergian käytön kasvuun.

Pitkien ja pimeiden talvien aikana aurinkoenergialla ei pystytä tuottamaan energiaa juuri kysynnän ollessa korkeimmillaan. Toki kesäisin yöttömien öiden aikana aurinkoenergiaa saadaan tuotettua lähes ympäri vuorokauden ja kylmä sää tehostaa aurinkopaneelien tuottavuutta. Myös arktisen alueen puuttomuus ja lumesta aiheutuneet heijastukset lisäävät tuottavuutta. Aurinkoenergia voikin olla hyvä ratkaisu tietoliikennetyhteyksien, maanviljelyn tai kesämökkien käyttöön sekä sähkölaskujen keventämiseen. Ympärivuotiseen voimalaitos toimintaan se ei kuitenkaan sovi arktisilla alueilla. (de Witt et al. 2021) Aurinkosähkön osuus arktisten maiden sähköntuotannosta onkin alle prosentin (Kolker et al. 2022).

Vesivoima on tällä hetkellä arktisten maiden yleisimmin käytetty ja pitkäikäinen uusiutuvan energian lähde. Vesivoima vastaa myös hyvin energiankysynnän vaihteluihin. Kuitenkin megawatin kokoisen vesivoimalan rakentaminen on suuri hanke ja erityisesti syrjäisillä seuduilla suuret pääomakustannukset usein estävät pieniä yhteisöjä käyttämästä vesivoimaa energialähteenään. Varsinkin pienien voimaloiden kustannukset asennettua kW kohden ovat korkeat. (de Witt et al. 2021) Useilla alueilla kaikki vesivoima on jo valjastettu käyttöön tai voimalat eivät pysty hyödyntämään virtaavan veden koko potentiaalia. (Kolker et al. 2022)

Kuten vesivoimalat myös geotermiset voimalat ovat suuria hankkeita ja niillä tuotetaan sähköä vain harvoilla arktisilla alueilla. Osa syynä on se, etteivät geotermiset järjestelmät toimi alueilla, jotka ovat jatkuvasti ikiroudassa. Myös osittain ikiroudassa olevin maaperän järjestelmien pitkän aikavälin suorituskyvystä on vain vähän tutkimuksia. (Kolker et al. 2022)

5.3 Tuulivoiman ja muiden energialähteiden yhdistelmät

Tuulivoimaa voidaan käyttää osana yksittäisten rakennuksien dieselillä toimivaa lämmitysjärjestelmää. Tuuli aiheuttaa energiahäviötä rakennuksissa ja mitä voimakkaampaa tuli on, sitä enemmän energiahäviötä aiheutuu. Toisaalta saman aikaisesti tuulivoimalla pystytään tuottamaan enemmän energiaa, joten tuuliolosuhteiden epäsäännöllisyys ei haittaa. Mininin ja Furtaevin laskelmien mukaan tuulivoimalla on mahdollista kattaa 60–80 % lämmitykseen vaadittavasta energiasta arktisilla alueilla ja näin vähentää merkittävästi lämmityksen kuluja. Samalla myös hiilidioksidipäästöt pienenevät. (Minin & Furtaev 2020) Tällaiset hybridikoneet tarvitsevat usein suuremman kapasiteetin tuulienergian vaihtelevuuden vuoksi. Dieselgeneraattorit ovat siis riittävän suuria tuottamaan energiaa koko yhteisölle, jos tuulivoimaa ei ole saatavilla esimerkiksi tyyninä pakkaspäivinä. (de Witt et al. 2021) Hybridimallilla voidaan kuitenkin säästää huomattava määrä polttoainetta, joten sen hyödyt ovat merkittävät.

Norjassa on tehty tutkimusta kotitalouksien tuuli- ja aurinkoenergian hybridiennergiajärjestelmien tuottavuudesta arktisilla leveyspiireillä. Tutkimuksen perusteella aurinko- ja tuulivoiman korrelaatio oli negatiivinen eli hybridijärjestelmä pystyi paremmin kattamaan talouden energiankulutuksen, kuin pelkkä tuuli- tai aurinkovoima. Toimiakseen hybridimalli täytyy kuitenkin olla osa verkkoa tai energian varastointijärjestelmää. (Solbakken et al. 2016) Aurinko- ja tuulienergian yhdistelmän toimivuutta on arvioitu myös Venäjän arktisilla alueilla. Tutkimuksessa todettiin aurinkoenergian saanti suurimmaksi kesällä ja tuulienergian taas vastaavasti vuoden

kylmimpinä aikoina. Eroavuudet energialähteiden saatavuudessa luovat hyvät edellytykset niiden käytön yhdistämiseksi. (Pustovalov)

6. ARKTISEN TUULIVOIMAN NYKYTILA JA TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

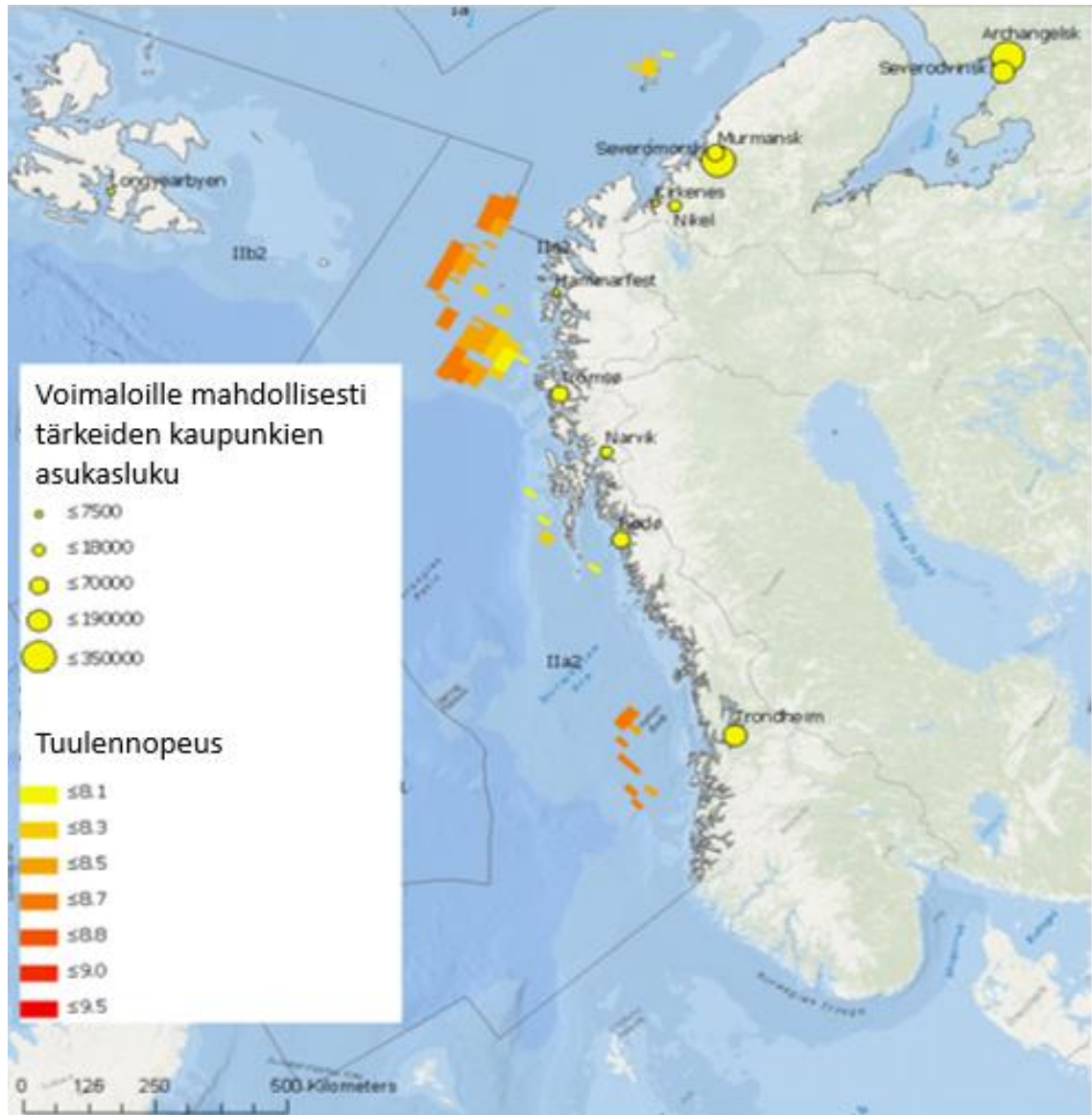
Merituulivoimapuistoja ei vielä olekaan arktisilla tai subarktisilla merialueilla, vaikkakin teknisesti olisi mahdollista rakentaa merijään liikkeitä kestäviä tuuliturbiineja. Riittävän vahvat rakenteet lisäävät kuitenkin merituulivoimalan jo ennestään maatuulivoimalaa kalliimpaa hintaa. Korkeamman hinnan takia ei ole vielä kustannustehokasta rakentaa merituulivoimapuistoja arktisille vesialueille. Tuulenopeustietoja jääpeitteisiltä merialueilta ei ole vielä saatavilla, mikä myös osaltaan hidastaa arktisen tuulivoiman kehitystä. (Wind farm Siting 2020) Kuitenkin Suomessa on rakennettu joo ensimmäinen merituulivoimapuisto jäätyvälle merialueelle. Voimala valmistui vuonna 2010 ja oli maailman ensimmäinen merituulipuisto jäätyvällä merellä. Samainen Tahkoluodon tuulivoimapuisto on saanut tukirahan hankkeen laajentamiseksi syvempään veteen soveltuvaa tuulivoimalan tutkimiseksi. (Finland Provides Grant to Develop Wind Farm in Freezing Sea Conditions 2023)

Merituulivoimapuistoja suunniteltaessa tulee ottaa huomioon myös merialueiden muut käyttötarkoitukset, kuten kalastus, merenkulku ja turismi. Myös mahdollisen hankkeen vaikutusta luonnon monimuotoisuuteen on arvioitava. Euroopan merien seuranta- ja tietoverkko (EMODnet) organisoi tutkimuksen arktisten merialueiden tuulivoimapotentialin kartoittamiseksi. Tutkimuksen aikana päätettiin, ettei jääpeitteisille vesialueille ehdoteta tuulivoimalan rakentamista tuulenopeustietojen puuttumisen ja kustannuskysymyksien takia. Analysoitavat kohteet sijaitsevat napapiirin sisällä Norjanmerellä ja Barentsinmerellä. Tutkimuksessa selvitettävät kriteerit olivat tuulenopeedet, merenpohjan geologia, etäisyys sähköverkosta ja satamista, laivaväylät sekä ympäristövaikutukset. Kohde huomioitiin, vaikka jokin edellä mainituista kriteereistä estäisi voimalan rakentamisen ja selvitettiin, olisiko kiinteä vai kelluva tuulipuisto sopivampi vaihtoehto. (Wind farm Siting 2020)

Tutkimuksen tuloksena kiinteille tuulivoimaloille ei löytynyt sijoituskohteita, koska tärkeät laivareitit tai merensuojelualueet estäisivät hankkeet. Kuitenkin kelluville voimaloille löydettiin 124 potentiaalista aluetta, jotka on esitetty kuvassa 5 keskimääräisten tuulenopeuksien kanssa. Alueista kuusi sijaitsee Murmanin kohoumalla Barentsinmerellä ja loput Norjan vesialueilla. Selvityksen perusteella tuulivoimaa voidaan tulevaisuudessa hyödyntää näillä alueilla, kunhan kelluva turbiinitekniikka kehittyy tarpeeksi. (Wind farm Siting 2020) Ensimmäinen arktiselle alueelle sijoitettava kelluva tuulivoimala on jo kuitenkin suunnitteilla Norjaan

Barentsinmerelle. Projekti on vielä varhaisessa vaiheessa ja sen toteutuminen vaatii esimerkiksi kannustimien, viranomaislupien ja sääntelykehysten selvittelyä.

Toteutuessaan vuonna 2026 voimala olisi 75 MW kokoinen, 400 m syvyydessä ja tuottaisi energiaa öljyntuotantolautalle sekä kaapelin kautta mantereelle. (First-ever floating wind power array in Arctic Circle planned with link to offshore oil 2023)



Kuva 5: Potentiaaliset kelluvan merituulivoiman sijoituskohteet Norjan merellä ja Barentsin merellä ja niihin mahdollisesti vaikuttavat asutuskohteet. Kohteista on karsittu pois sijainnit, jotka haittaisivat muuta meren käyttötarkoituksia, kuten kalastusta tai laivaliikennettä. (muokattu lähteestä Wind farm siting 2020)

Maatuulivoimaloita sen sijaan on jo useita arktisilla alueilla. Vuonna 2022 tehdyn selvityksen mukaan Lapin maakunnassa on 18 toimivaa tuulivoima-aluetta, joilla on

yhteensä 150 tubiinia. Sen lisäksi rakenteilla on kaksi aluetta ja suunnitteilla 24. (Stark 2022) Tosin toimivista voimaloista vain neljä ovat napapiirin pohjoispuolella (Kartta).

Venäjällä Jäämeren rannikolla sijaitsevassa Jamalin niemimaassa on kehitteillä uusiutuviin energialähteisiin perustuva tutkimuskeskus nimeltä Snowflake. Vuonna 2024 aukeavassa laitoksessa kehitetään ja testataan arktisia olosuhteita kestäviä energiatekniikoita. Tutkimuskeskus käyttää energialähteenään tuulivoimaa ja varastoi energian vetyyn, litiumakkuihin ja lämpövarastoihin. (Vella 2020) Myös Norjan arktisella Finmarkin läänillä suunnitellaan vedyn tuotantoa tuuli- ja vesivoiman avulla. Vuoteen 2025 mennessä 2 GW:n suuruinen tuulivoimala tuottaisi vuodessa 8 TWh, jolla voitaisi valmistaa vetyä yli miljoonan henkilöauton käyttöön. (The Arctic: Critical Metals, Hydrogen and Wind Power for the Energy Transition)

Arktisen alueen tuulivoimaresurssit ovat myös perusta ajatukselle maailmanlaajuisesta älykkästä sähköverkosta (Global Energy Interconnection, GEI), joka yhdistää kaikki mantereet (Etelämanteretta lukuun ottamatta) ultrakorkeajännitteisillä sähköverkoilla vuoteen 2050 mennessä. Verkko tukeutuisi arktiseen tuulivoimaan ja verkot yhdistyisivät arktisella alueella. Arvioiden mukaan arktisella alueella pystyttäisiin tuottamaan 600 TWh puhdasta energiaa vuodessa. (The Arctic: Critical Metals, Hydrogen and Wind Power for the Energy Transition 2019)

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Arktisen alueen tuulivoiman potentiaali näyttää lupaavalta, vaikkakin haasteita vielä löytyy runsain mitoin. Karut olosuhteet luovat tuulivoimalle sekä hyvät edellytykset että paljon vaikeuksia. Suurin osa haasteista johtuu alueiden eristäytyneisyydestä sekä ankarasta ilmastosta. Kylmä ilmasto vaikuttaa tuulivoimaloiden toimintaan monella tavalla. Kylmästä ja kosteasta ilmasta aiheutuva jäätäminen kuluttaa tuulivoimaloiden osia, laskee tuottavuutta ja aiheuttaa mahdollisia vaaratilanteita. Jäätäminen on kuitenkin haasteista helpoiten selätettävissä, sillä jäänesto- ja -poistolaitteistot ovat kehittyneitä, eivätkä kuluta paljon energiaa. Enemmän ilmasto vaikeuttakin voimaloiden rakentamista sekä huoltoa. Lisäksi rakennus- ja huoltotoimenpiteiden haasteina ovat vielä pitkät välimatkat ja ammattitaitoisen huoltohenkilöstön puute.

Osassa maista siirtoverkkojen huono kunto voi estää suurien voimaloiden rakentamisen. Lisäksi tuulivoiman säätövoiman tarve eristäytyneissä mikroverkoissa aiheuttaa lisäkustannuksia sähköntuotantoon. Säätövoiman tarpeeseen on kuitenkin pyritty kehittämään ratkaisuja tehomuuntimien sekä energiantuotantomuotojen yhdistelmien avulla. Haasteita aiheuttavat myös kiistat maankäytöstä alkuperäisasukkaiden kanssa. Tuulivoimaloita on rakennettu luvatta alkuperäisasukkaiden käyttämille maa-alueille haitaten heidän elinkeinoaan poronhoitoa.

Lukuisista haasteista huolimatta tuulivoimalla on paljon potentiaalia arktisilla alueilla. Kylmät ja tiheät tuulet puhaltavat suurilla tuulennopeuksilla napapiirin pohjoispuolella lisäten tuulivoiman tehoa jopa 20 %. Tuulivoimaa saadaankin juuri silloin, kun sitä tarvitaan lämmitykseen. Tuulivoiman on myös todettu kestävänsä paremmin arktisen alueen ääri-ilmiötä, kuin fossiilisten energiamuotojen.

Tuulivoimalla on paljon hyötyjä muihin energiamuotoihin nähden. Tuulivoimaa ja muita energiamuotoja yhdistelemällä voidaan myös saavuttaa hyötyjä energiatuotannossa. Energiaa voidaan tuottaa tuuli- ja aurinkovoiman yhdistelmällä pienemmässä mittakaavassa tai tuulienergia voidaan varastoida vetyyn. Myös tuulivoiman ja dieselgeneraattorin yhdistelmät vähentävät hiilidioksidipäästöjä ja dieselin kuljetukseen kuluva kustannuksia.

Tekniikan kehittyessä tuulivoimalla on edessä uudet aluevaltaukset Arktiksella. Jo nyt arktisille vesialueille on suunnitteilla kokeellisia merituulivoimaloita rakenteiden kehittämiseksi. Myös maalla toimivia voimaloita on jo useita. Tulevaisuus näyttää

kuinka suureksi tuulivoima voi energianlähteenä kasvaa ja miten sen potentiaali on parhaiten hyödynnettävissä arktisilla alueilla.

LÄHTEET

- Advantages and Challenges of Wind Energy. Energy.gov. Saatavissa (viitattu 11.6.2023): <https://www.energy.gov/eere/wind/advantages-and-challenges-wind-energy>
- Global Wind Report 2023. Global Wind Energy Council. Saatavissa (viitattu 7.6.2023): <https://gwec.net/globalwindreport2023/>
- Analysis | How Wind Power and Indigenous Rights Clash in Norway. (2023). Washington Post.
- Arktiset aamiaiset Pariisissa - Vihreän energian mahdollisuudet arktisella alueella. Suomi ulkomailla: Ranska. Saatavissa (viitattu 3.6.2023): https://finlandabroad.fi/web/fra/ajankohtaista/-/asset_publisher/TV8iYvdcF3tq/content/arktiset-aamiaiset-pariisissa-vihrean-energian-mahdollisuudet-arktisella-alueella/384951
- Background: What are the sources of radioactive contamination in the arctic? AMAP projects. Saatavissa (viitattu 10.4.2023): <https://radioactivity.amap.no/background>
- Beauchamp, E., 2022. Onshore vs Offshore Wind Power. Today's Homeowner. Saatavissa (viitattu 6.6.2023): <https://todayshomeowner.com/solar/guides/onshore-vs-offshore-windpower/>
- Boute, A., 2016. Off-grid renewable energy in remote Arctic areas: An analysis of the Russian Far East. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 59, 1029–1037. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.034>
- Climate Change. Uni of Lapland. Saatavissa (viitattu 21.4.2023): <https://www.arcticcentre.org/EN/arcticregion/climatechange>
- de Witt, M., Stefánsson, H., Valfells, Á. & Larsen, J.N. (2021). Energy resources and electricity generation in Arctic areas. Renewable Energy. 169, 144–156. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.025>
- Finland Provides Grant to Develop Wind Farm in Freezing Sea Conditions. The Maritime Executive. Saatavissa (viitattu 12.6.2023): <https://maritime-executive.com/article/finland-provides-grant-to-develop-wind-farm-in-freezing-sea-conditions>
- First-ever floating wind power array in Arctic Circle planned with link to offshore oil (2023). Recharge | Latest renewable energy news. Saatavissa (viitattu 1.8.2023): <https://www.rechargenews.com/energy-transition/first-ever-floating-wind-power-array-in-arctic-circle-planned-with-link-to-offshore-oil-field/2-1-1442059>
- How To Transport a Wind Turbine – VeriTread. Saatavissa (viitattu 2.6.2023): <https://www.veritread.com/how-to-transport-a-wind-turbine/>
- Kartta. Suomen Tuulivoimayhdistys. Saatavissa (viitattu 22.8.2023): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoima-suomessa/kartta>
- Koivuluoto, H., Stenroos, C., Kylmälahti, M., Apostol, M., Kiilakoski, J. & Vuoristo, P. (2017). Anti-icing Behavior of Thermally Sprayed Polymer Coatings.
- Kolker, A., Garber-Slaght, R., Anderson, B., Reber, T., Zyatitsky, K. & Pauling, H. (2022). Geothermal Energy and Resilience in Arctic Countries (No. NREL/TP-5700-80928, 1862005, MainId:78706). <https://doi.org/10.2172/1862005>
- Korpela, A. (2016) Tuulivoiman perusteet. 1. painos. Tampere: AMK-Kustannus Oy Tammertekniikka.
- Kryltcov, S. & Solovev, S. (2019). Efficient wind energy generation within Arctic latitudes. E3S Web Conf. 140, 11005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914011005>
- Määrittely. Uni of Lapland. Saatavissa (viitattu 6.3.2023): <https://www.arcticcentre.org/FI/arktinenalue/maaritelma>
- McGwin, K. (2020). Wind energy conflicts show how Arctic renewable energy projects can founder. ArcticToday. Saatavissa (viitattu 2.6.2023): <https://www.arctictoday.com/wind-energy-conflicts-show-how-arctic-renewable-energy-projects-can-founder/>

- Minin, V.A. & Furtaev, A.I. (2020). Prospects for the use of wind power for heat supply to consumers in the western sector of the Russian Arctic. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 539, 012150. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/539/1/012150>
- Not even a Polar Vortex can knock out renewables. *Wartsila.com*. Saatavissa (viitattu 18.4.2023): <https://www.wartsila.com/insights/article/not-even-a-polar-vortex-can-knock-out-renewables>
- Offshore wind farms tailored for winter (2023). *Aker Arctic*. Saatavissa (viitattu 12.6.2023): <https://akerarctic.fi/en/arctic-passion/offshore-wind-farms-tailored-for-winter/>
- Poelzer, G., Hoogensen Gjørsv, G., Holdmann, G., Johnson, N., Már Magnússon, B., Sokka, L., Tsyiachniouk, M. & Yu, S. (2016) Developing renewable energy in arctic and sub-arctic regions and communities: Working recommendations of the Fulbright Arctic Initiative Energy Group
- Pustovalov, K.N., Kharyutkina, E.V., Korolkov, V.A. & Nagorskiy, P.M. (2020). Variations in Resources of Solar and Wind Energy in the Russian Sector of the Arctic. *Atmos Ocean Opt* 33, 282–288. <https://doi.org/10.1134/S1024856020030082>
- Reporter, L.B., Senior Environment and Technology (2019). Shipping wind turbines is not a breeze. *FreightWaves*. Saatavissa (viitattu 3.6.2023): <https://www.freightwaves.com/news/shipping-wind-turbines-is-not-a-breeze>
- Shakirov, V.A., Tuguzova, T.F. & Muzychuk, R.I. (2020). Problems of power supply in the public utility sector of the Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia). *Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. AEE* 106–116. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-4-106-116>
- Skarin, A., Nellemann, C., Rönnegård, L., Sandström, P. & Lundqvist, H. (2015). Wind farm construction impacts reindeer migration and movement corridors. *Landscape Ecol* 30, 1527–1540. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0210-8>
- Solbakken, K., Babar, B. & Boström, T. (2016). Correlation of wind and solar power in high-latitude arctic areas in Northern Norway and Svalbard. *Renewable Energy and Environmental Sustainability* 1. <https://doi.org/10.1051/rees/2016027>
- Stark, E. (2022). *Lapin tuulivoimaselvitys 2022*.
- Säättövoiman tarve. *Suomen Tuulivoimayhdistys*. Saatavissa (viitattu 11.6.2023): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto/saatovoiman-tarve>
- Takuut ja huollot. *Suomen Tuulivoimayhdistys*. Saatavissa (viitattu 15.6.2023): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimahanke/takuut-ja-huollot>
- The Arctic: Critical Metals, Hydrogen and Wind Power for the Energy Transition. Saatavissa (viitattu 9.6.2023): <https://www.ifri.org/en/publications/editoriaux-de-lifri/edito-energie/arctic-critical-metals-hydrogen-and-wind-power-energy>
- Tuulivoima ja jäätäminen. *Suomen Tuulivoimayhdistys*. Saatavissa (viitattu 2.6.2023): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto/jaataminen>
- Tuulivoimatuotanto talvella. *Suomen Tuulivoimayhdistys*. Saatavissa (viitattu 22.4.2023): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietopankki/tuulivoimatuotanto-talvella>
- Vella, H. (2022). Arctic exploration: developing green energy technology in an extreme region. *Power Technology*. Saatavissa (viitattu 9.6.2023): <https://www.power-technology.com/features/russia-arctic-renewable-power-wind-green-hydrogen/>
- What are the advantages and disadvantages of offshore wind farms? (2016). *American Geosciences Institute*. Saatavissa (viitattu 23.4.2023): <https://www.americangeosciences.org/critical-issues/faq/what-are-advantages-and-disadvantages-offshore-wind-farms>
- Wind farm Siting (2020). *European Marine Observation and Data Network (EMODnet)*. Saatavissa (viitattu 27.4.2023): <https://emodnet.ec.europa.eu/en/checkpoint/arctic/challenges/windfarm-siting>

Wind power in cold temperatures. Suomen Tuulivoimayhdistys. Saatavissa (viitattu 14.6.2023): <https://tuulivoimayhdistys.fi/en/wind-power-in-finland-2/wind-power-in-finland/wind-power-in-cold-temperatures>