

Paavo Tertsunen

**TUULESTA TEMMATTUA - MITEN TURVATA
KRIITTISIÄ PERUSRAKENTEITA MUUTTUVASSA
ENERGIAJÄRJESTELMÄSSÄ?**



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
INFORMAATIOTEKNOLOGIAN TIEDEKUNTA
2024

TIIVISTELMÄ

Tertsunen, Paavo

Tuulesta temmattua – miten turvata kriittisiä perusrakenteita muuttuvassa energiajärjestelmässä?

Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2020, 82 s.

Turvallisuus ja strateginen analyysi, pro gradu -tutkielma

Ohjaaja: Hämäläinen, Timo

Tässä pro-gradu-tutkielmassa parannettiin ymmärrystä muuttuvasta ja kompleksisesta sähköjärjestelmästä tuulivoimajärjestelmiin kohdistuvan tutkimuksen kautta. Tavoitteena oli ymmärtää, mitä kriittisten perusrakenteiden turvaamisessa tulisi huomioida lisääntyvän tuulivoimatuotannon ja sähköjärjestelmän muutoksen myötä. Tavoitteena oli myös kuvata, millaisia tai millaista ilmiötä, rakenteita tai toimijuutta tuulivoimajärjestelmiin liittyy.

Työn teoreettinen viitekehys käsitteli systeemiteoriaa, kriittisiä perusrakenteita sekä niiden kompleksisuutta, resilienssiä ja muutosta koskevaa tutkimusta. Teoreettisessa viitekehyksessä myös kuvattiin energiajärjestelmiä osana kompleksisia, adaptiivisia systeemeitä sekä kriittisiä rakenteita. Tutkimustavoitteita lähestyttiin konstruktiiivisesti eli pyrkien ratkaisemaan oikean maailman ongelmia tuottaen viitekehystenä olevalle tietelle kontribuutiota. Lopputuloksena esitettiin ratkaisumalleja tuulivoimajärjestelmiä koskien. Tutkimusmenetelminä käytettiin asiantuntijahaastatteluita, systemaattista kirjallisuuskatsausta sekä skenaarioanalyysia.

Tutkimustulosten perusteella tuulivoiman mahdolliset häiriötilanteet liittyvät muun muassa jännite-epätasapainoon, matalaan varautumismaturiteettiin, tietoliikenne- ja tietojärjestelmien haavoittuvuuksiin, muuntajiin liittyviin häiriöihin, ennustemallien epävarmuuksiin, kyberhyökkäyksiin, inertian vähenemiseen sähköjärjestelmässä, älykkäiden sähköverkkojen lisäämiin kyberhaavoittuvuuksiin ja esimerkiksi kriittisiin materiaaleihin liittyviin toimitusketjun haasteisiin. Tutkimuksessa tunnistettiin aineiston pohjalta kolme ratkaisumallia: kyberresilienssi ja sen kehittäminen, sähköteknisesti laadukkaat hallinta-, valvonta- ja ennustuskeinot, sekä organisatorinen kyvykkyys. Skenaarioanalyysin perusteella vakavia häiriötilanteita voi muodostua esimerkiksi kybervaikuttamisen, sähköjärjestelmien häiriöiden sekä ns. pirstaloituneiden uhkatilanteiden kautta. Tulosten mukaan erityisesti organisatorisen kyvykkyuden kehittäminen parantamalla valmiuksia kohdata odottamattomiakin häiriöitä voi ehkäistä, estää tai hillitä kaikenlaisten häiriöiden vaikutuksia.

Asiasanat: energia, tuulivoima, kriittinen infrastruktuuri, kriittiset perusrakenteet, systeemiteoria, kompleksisuus, resilienssi

ABSTRACT

Tertsunen Paavo

Caught in the wind – how to protect critical energy infrastructure in the middle of energy transition?

Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2020, 82 pp.

Security and Strategic Analysis, Master's Thesis

Supervisor: Hämäläinen, Timo

This Master's Thesis produced understanding in regard to complex and evolving electricity system via researching wind energy systems. The goal was to understand, what should one consider due to increasing wind energy production and changes in electricity infrastructures. The goal was also to explain, what kind of phenomena, actors or constructs wind power systems hold inside them.

Theoretical part assessed system theory, critical infrastructure and its complexity, resilience, and change. The theoretical part also described energy systems being a part of both complex adaptive systems and critical infrastructure. The research problem was approached with constructive method, trying to solve real life problems while also producing value to scientific community. As a result, solution models were presented. Research methods included expert interviews, a systematic literature review and scenario analyses.

Based on the results, the possible disturbance in terms of wind power systems can result from errors in voltage balance or converters, uncertainties in regard to prediction models, cyberattacks, minimal inertia in electric system, cyber vulnerabilities in smart grids, and, for example supply chain issues in critical materials. Three solution models were identified: cyber resilience, high quality electric system management, and organizational capabilities. According to the scenario analysis, serious disturbances may occur due to, for example, cyber activities, errors in electricity systems or due to so-called spallated dangers. Based on the results, especially by improving organizational readiness and capabilities, one can increase preparedness to all kinds of errors and mitigate effects of all three scenarios.

"Aina samoja pieniä ilmiöitä, eikä vielääkään tuulivoimaa."

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Tutkimusongelman kuvaus ja rajaus.....	9
1.2	Tutkimusmenetelmät ja -strategia.....	11
2	TEOREETTINEN VIITEKEHYS.....	14
2.1	Systemiteoria, kompleksisuus ja kompleksiset systeemit	14
2.1.1	Kompleksiset adaptiiviset systeemit	15
2.1.2	Systeemiset muutokset	20
2.2	Kompleksiset kriittiset perusrakenteet.....	21
2.2.1	Kriittisten perusrakenteiden määrittely.....	22
2.2.2	Perusrakenteiden suojaus, resilienssi ja riskit.....	25
2.3	Energiajärjestelmät kriittisinä perusrakenteina	29
2.3.1	Energiajärjestelmät kompleksisina systeemeinä	29
2.3.2	Energiajärjestelmien häiriönsietoisuus	31
2.3.3	Energiajärjestelmien muutos	34
3	EMPIIRINEN OSA.....	36
3.1	Tutkimusaluetta pohjustavat haastattelut	36
3.1.1	Menetelmä, aineiston keruu ja hakutermit.....	36
3.1.2	Haastattelujen havainnot	38
3.2	Systemaattinen kirjallisuuskatsaus	43
3.2.1	Menetelmä, aineiston keruu ja hakutermit.....	44
3.2.2	Katsauksen yleiskuva	48
3.2.3	Tiivistelmä havainnoista	50
3.3	Synteesi ja ratkaisumallit	53
4	TULOSTEN TESTAAMINEN: SKENAARIOANALYYSI	56
4.1	Vakavat häiriötilanteet ja poikkeusolot.....	56
4.2	Skenaarioanalyysi.....	59
4.2.1	Menetelmän kuvaus.....	60
4.2.2	Uhkaskenaarioiden luominen	60
4.3	Analyysi	62
5	TULOSTEN SOVELTAMISALA JA TEOREETTINEN KONTRIBUUTIO.....	64
6	YHTEENVETO	69
	LÄHTEET	71
	LIITE 1 HAASTATTELUN OHJEKIRJA	82

1 JOHDANTO

Infrastructures – the largest urban architectures of all – often become most visible when they lie dormant or inactive. (Graham, 2009)

Keskustelu yhteiskunnan kriittisistä rakenteista on ajankohtaisempaa kuin koskaan ennen. Kuluneiden vuosien kriisi- ja häiriötilanteet ovat vaikuttaneet konkreettisesti myös ihmisten jokapäiväiseen arkeen. Maailman nopeaksi koettu muutos sekä uudella tavalla ilmenevät uhkatekijät herättävät huolta esimerkiksi elintasomme edellyttämien teknisten järjestelmien kyvystä sietää häiriöitä. Samalla yhä vahvemmin nousee esille kysymys siitä, kuinka hyvin ymmärrämme jokapäiväisen arkemme kannalta välttämättömiä palveluita ja rakenteita. Millaisia riippuvaisuuksia järjestelmiin liittyy, millä tavoilla kriittiset perusrakenteet voivat vaarantua, ja miten tai kenen pitäisi varautua erilaisiin vaaratilanteisiin?

Suuret infrastruktuurit eli perusrakenteet, kuten sähkö-, lämmitys-, liikenne- sekä tietoliikennejärjestelmät, ovat yhteiskuntien toimimisen kannalta välttämättömiä (mm. Silvast, 2018, 3). Koska yhteiskuntamme on yhä riippuvaisempi häiriöttömästä sähkön saannista, on energiassektori, ja erityisesti sähköjärjestelmä, yhteiskunnan normaalin toiminnan kannalta kriittisimpiä rakenteita (mm. Atputharajah & Saha, 2009; Nadeem ym. 2023). Suuri osa muista välttämättömät toiminnoista on puolestaan häiriöttömän sähköntuotannon varassa (esim. Little, 2009, 28; Pöyhönen, 2022; Nepal & Jamasb, 2013). Modernin sivilisaation on arvioitu pysähtyvän alle kuukaudessa ilman energian häiriötöntä tuotantoa (Lewis, 2020, 249–254). Onkin aiheellista kysyä, miten hyvin ymmärrämme ja hallitsemme energiajärjestelmämme rakenteita.

Energiajärjestelmien suurhäiriöt ja pitkäkestoiset poikkeustilanteet ovat kehittyneissä yhteiskunnissa hyvin harvinaisia. Esimerkiksi Suomen sähköjärjestelmässä on tapahtunut suurhäiriöksi luokiteltava tilanne viimeksi vuonna 1974 (Fingrid, 2021). Vakavien seurausten vuoksi huolellinen poikkeustilanteisiin varautuminen koetaan kuitenkin välttämättömäksi, sillä sähköjärjestelmän häiriöt voivat pitkittyessään lamauttaa kaikki muut välttämättömät toiminnot. Vaikka kantaverkko on Suomessa vahvempi nyt kuin 50 vuotta sitten (Fingrid, 2017),

solmukohtien sekä vaaratilanteiden tunnistaminen on järjestelmien muuttumisen vuoksi yhä tärkeämpää.

Välttämättömien toimintojen turvaaminen häiriö- ja poikkeusoloissa edellyttää sähköjärjestelmän kaltaisten perusrakenteiden jatkuvuutta. Siksi niiden resilienssi eli kyky ennakoiden ja reagoiden säilyttää suorituskykyä erilaisista häiriöistä huolimatta (Kulev ym. 2019) koetaan välttämättömäksi piirteeksi. Resilienssin käsitteen suosion on arveltu johtuvan havainnosta, jonka mukaan rakenteiden täydellinen suojaaminen on käytännössä mahdotonta (Lewis, 2020, 2). Siksi monimutkaistuvien järjestelmien haltijoiden on paitsi ymmärrettävä niitä mahdollisimman hyvin, myös varauduttava äärimmäisen epätodennäköisiin uhkamalleihin. Tehtävä ei ole helppo, sillä perusrakenteet ovat keskinäisriippuvia, kompleksisia sekä monitasoisia, ja epätodennäköiset häiriöt hankalasti hallittavissa perinteisin riskienhallintamenetelmin. Jos häiriötilanteet ovat erittäin epätodennäköisiä, niihin ei ole taloudellisesti järkevää varautua.

Suomessa kykyä selvitä kriiseissä sekä häiriöissä kutsutaan huoltovarmuudeksi. Huoltovarmassa järjestelmässä yhteiskunta ja elinkeinoelämä toimivat ja ihmiset voivat turvallisesti elää arkeaan (Huoltovarmuuskeskus, 2023), oli tilanne mikä hyvänsä. Huoltovarmuusajattelussa korostetaan kriittisten sektoreiden sekä niihin kohdistuvien uhkakuvien tunnistamista ja riskien hallitsemiseksi tehtyjä varautumistoimenpiteitä. Huoltovarmuus- ja varautumistoimenpiteillä ei kuitenkaan välttämättä voida eliminoida vakavia riskejä. Sen sijaan niillä voidaan saada lisää aikaa reagoinnille, ja siten turvata välttämättömien toimintojen jatkuvuus myös vakavimmissa häiriötilanteissa. Huoltovarmuus- ja resilienssiajatteluun palataan myöhemmin tässä työssä.

Varautuminen erilaisiin vakaviin häiriötilanteisiin tapahtuu jatkuvan muutoksen keskellä. Esimerkiksi sähköjärjestelmän perusrakenteet eli tuotantoon, jakeluun ja käyttöön liittyvät järjestelmät ovat murroksessa. Ne siis muuttuvat nopeasti, merkittävästi ja jopa yllätyksellisesti. Energiajärjestelmä on muuttunut paljon jo aiempina vuosikymmeninä (ks. esim. Bouwmans ym., 2006, 26–29 kuvaus sähkömarkkinoiden liberalisaatiosta), mutta myös tuoreeltaan 2010–2020-luvuilla. Merkittävimmät muutokset ovat vasta näköpiirissä tulevana vuosikymmeninä, jolloin energiajärjestelmässä on ennakoitu irtauduttavan suuressa määrin fossiilisista polttoaineista (ks. esim. IEA, 2023). Fossiilisista polttoaineista irtautuminen olisi tapahtuessaan vaikutuksiltaan hyvin merkittävä systeeminen muutos (esim. Michaux ym. 2023), jonka ensiaskelten vaikutuksia näemme enenevässä määrin halki yhteiskunnan.

Energiajärjestelmien muutoksiin viitataan usein termillä *energiamurros*. Tämän käsitteen alle voi lukeutua monenlaisia tapahtumaketjuja, kuten siirtymä pois fossiilisista energiamuodoista, sektori-integraatiot eli eri energiamuotojen toisiinsa kytkeytyminen, energiarakenteiden digitalisoituminen, tai esimerkiksi erilaiset energiatehokkuusratkaisut. Merkittävä osa energiamurrosta koskevasta keskustelusta liittyy fossiilisia energialähteitä korvaavaan uuteen teknologiaan ja tuotantoon. Uusissa ratkaisuissa kiinnostuksen kohteena on usein paitsi hinta, myös vaikutukset ympäristöön sekä laajemmin energiajärjestelmään.

Uuden teknologian hallittu käyttöönotto edellyttää muuttuvien rakenteiden, järjestelmien ja keskinäisriippuvuuksien ymmärrystä. Koska energiasektori on kompleksinen systeemi, vaikutuksia on kuitenkin vaikeaa täysin ennakoida tai hallita. Kompleksiset systeemit ovat dynaamisia, useista itsenäisistä ja vuorovaikuttavista elementeistä koostuvia kokonaisuuksia, joissa pienetkin muutokset voivat synnyttää isoja vaikutuksia, ja jonka tulevaa tilaa ei voida ennustaa (esim. Snowden & Boone, 2007). Kompleksisissa järjestelmissä on vain vähän lineaarisuutta eli selviä syy-seuraussuhteita. Niiden luonnetta ymmärretäänkin usein vasta silloin, kun ne syystä tai toisesta muuttuvat merkittävästi. Tätä onkin todistettu energiasektorin osalta kuluneina vuosina.

Kriittiset perusrakenteet, kuten energiasektorin toiminnot, ovat systeemiä kokonaisuuksia. Systeemiajattelussa kiinnitetään huomiota yksittäisten kohteiden tai prosessien sijaan erilaisten toimintojen väliselle vuorovaikutukselle ja keskinäisriippuvuuksille. Vuorovaikutusta ja riippuvaisuuksia korostavaa näkökulmaa tarvitaan erityisesti järjestelmän muuttuessa, sillä uudet toimijat tai rakenteet synnyttävät uusia tapahtumaketjuja sekä vaikuttavat systeemin muihin toimijoihin (Geels, 2002). Ne siis tavallaan lisäävät eräänlaista järjestelmätason yllätyksellisyyttä, jonka tarkastelu edellyttää systeemiajattelua.

Tässä pro gradu-työssä yritetään ymmärtää kompleksisen energiajärjestelmän luonnetta tuulivoimajärjestelmien sekä niiden synnyttämien muutosten tutkimisen kautta. Työssä selvitetään jo muuttuneen järjestelmän synnyttämiä ilmiöitä ja rakenteita rakenteiden turvaamisen näkökulmasta. Tutkimuksen yleisenä tavoitteena on ymmärtää tuulivoiman tuotantoa ja tunnistaa siihen liittyviä ilmiöitä ja elementtejä vakavien häiriötilanteiden kontekstissa. Työn taustalla on erityisesti havainto nopeasta muutosvauhdista, joka sekä luo epävarmuutta järjestelmään, mutta toisaalta mahdollistaa uusien ilmiöiden tutkimisen, ja edelleen niihin varautumisen. Näkökulma on systeeminen ja ennakoiva, ja sillä pyritään avaamaan tunnistettujen monitasoisten rakenteiden ja ilmiöiden mahdollistamia vaaratilanteita esimerkiksi vakavissa häiriötilanteissa.

Tuulivoima on valikoitunut tämän pro gradun aiheeksi muutamasta erityisestä syystä. Pääasiallinen ja tärkein syy on tuulivoiman sekä tuulivoimalla tuotetun sähkön huomattavan nopea kasvu 2020-luvulla. Toissijaisesti tuulivoimaan kohdistuu suuria kasvupaineita ja -odotuksia tuleville vuosille ja vuosikymmenille. Tuulivoiman kiinnostavuutta ja merkittävyttä korostaa hyvin se, että se on kuvattu yhdeksi nopeimmin kasvavista, kilpailukykyisimmistä ja vähiten haittoja aiheuttavista uusista teknologioista (Summerfield-Ryan & Park, 2023). Yhtä lailla tuulivoimatuotannolla on jo nyt keskeinen rooli sähköjärjestelmässä, ja riippumatta tulevasta kehityksestä on tärkeää ymmärtää, kuinka sen toiminta-edellytyksiä ja jatkuvuutta voidaan kehittää entisestään. Olipa henkilökohtaisesti tuulivoiman kannalla tai sitä vastaan, hyötyy tuulivoimatuotannon jatkuvuudenhallinnan kehittämistä, sillä vakavissa häiriötilanteissa voittajia ei ole.

Työn teoriaosassa on kuvattu systeemitheoriaa ja kompleksisten adaptiivisten systeemien luonnetta – ennen kaikkea siksi, koska energiajärjestelmät ovat kompleksisia systeemeitä. Lisäksi on avattu systeemisten muutosten luonnetta ja muotoa. Lopuksi on kuvattu kompleksisia kriittisiä perusrakenteita sekä niiden

turvaamisen ja resilienssin periaatteita, ja edelleen kompleksisia kriittisiä energiajärjestelmiä. Energiajärjestelmää, muita kriittisiä toimintoja sekä niiden muutosta onkin välttämätöntä tarkastella systeemisesti sekä kompleksisuus huomioiden. Tätä avataan tarkemmin teoriaosuuden loppuosioissa.

Energiajärjestelmän monitasoinen, kompleksinen ja vahvasti muuttuva luonne tekee tästä tutkimuksesta mielenkiintoisen. Esimerkiksi sähköjärjestelmä koostuu erillisistä tuotantoyksiköistä ja tuotantoa sekä kulutusta yhdistävistä yhteyksistä eli siirtoverkosta. Rakenteet ovat eri-ikäisiä, ja monia toimintoja ohjataan enenevässä määrin monimutkaisten hallintajärjestelmien kautta. Sähköverkot ovat kirjaimellisesti kompleksinen verkosto, jossa kaikki vaikuttaa kaikkeen, mikä korostaa sekä välttämättömien teknisten ratkaisujen, osaavan henkilöresurssin että jatkuvuudenhallintaa tukevien käytänteiden tunnistamisen tärkeyttä. Mitä havaintoja muuttuvasta sähköjärjestelmästä ja tuulivoimasta on jo nyt tehty, mitä asiantuntijat ja tutkijat odottavat olevan tulossa, ja millaisia varautumismalleja tuulivoima-alalla voitaisiin kehittää? Tässä pro gradu-työssä on tarjottu arvokasta näkökulmaa näihin kysymyksiin.

1.1 Tutkimusongelman kuvaus ja rajaus

Kriittisiä perusrakenteita, niiden muutoksia, energiasektoria ja energiahuoltovarmuutta sekä tuulivoimaa on tutkittu monista näkökulmista. Esimerkiksi energiamurrokseen ja energiajärjestelmiin liittyvää, luonteeltaan teknistä tutkimusta on paljon. Tällaisessa tutkimuksessa keskitytään mm. sekä uuden järjestelmän ominaisuuksiin ja vaikutuksiin (mm. Hyvönen ym. 2023; Michaux ym. 2023), että ns. vanhaan järjestelmään, kuten öljy- ja kaasuteollisuuteen, kohdistuvaan muutospaineeseen (esim. Halttunen ym. 2023). Osa tiettyyn energiamuotoon liittyvästä tutkimuksesta on hyvin teknistä ja yksityiskohtaista mallintamista – näin myös tuulivoiman tapauksessa. Aiemmassa tutkimuksessa on myös arvioitu erilaisilla ennakoitimenetelmillä teknologiatason muutoksia sekä niiden järjestelmätason vaikutuksia. Esimerkiksi energiaan liittyvässä skenaariotutkimuksissa on voitu mallintaa tietyn teknologioiden lisääntymistä ja vaikutuksia (mm. Khosravi ym. 2020). Aiemmassa tutkimuksessa on myös tunnistettu teknologiakohtaisia haavoittuvuuksia ja uhkia, esimerkiksi tuulivoima ja kyberturvallisuus (mm. Kulev & Torres, 2022; Kulev, 2019). Sähkönjakelun kaltaisia infrastruktuureja on tutkittu myös esimerkiksi yhteiskuntatieteellisistä lähtökohdista (esim. Silvast, 2013).

Tässä tutkimuksessa tuulivoimaa lähestytään systeemisestä näkökulmasta pyrkien valottamaan sen asemaa ja synnyttämiä vaikutuksia energiajärjestelmän kriittisissä rakenteissa. Tutkimuksen tarpeellisuutta korostaa se, että tuulivoimatuotannon määrä on jo nyt lisääntynyt merkittävästi. Näin ollen voidaan sanoa, että se väistämättä synnyttää energiajärjestelmän kriittisiin perusrakenteisiin uusia ilmiöitä. Uudenlaisten ominaisuuksien syntyminen yksinkertaisempien ominaisuuksien vuorovaikutuksesta eli *emergenssi* on kompleksisille järjestelmille tyypillinen piirre ja yksi lähtökohta tälle tutkimukselle. Onkin hyvä havaita, että

sähkönjakelu on itse asiassa emergentti ilmiö. Sähköjärjestelmä ei ole pelkkä koelma eri-ikäisiä johtimia, pylväitä, turbiineita ja muuntajia, vaan systeemi, jonka huolellinen järjestäminen tuottaa uusia ominaisuuksia.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on ymmärtää ja tuottaa ymmärrystä meitä ympäröivästä, muuttuvasta sähköjärjestelmästä. Näin voidaan entistä paremmin varautua vakaviin häiriö- ja poikkeustilanteisiin. Tutkimuksella ei oteta kantaa energiapolitiikkaan tai esimerkiksi häiriösietoisuuden hyväksytyyn tasoon, vaan analysoidaan järjestelmää ja sen ominaisuuksia mahdollisimman objektiivisesti. Tutkimuksella ei myöskään pyritä turvallistamaan energiamurrosta koskevaa keskustelua, vaan viemään huomiota systeemin rakenteisiin ja käytänteisiin, ja niiden toimintakykyyn mahdollisissa häiriötilanteissa. Tutkimuksessa valotetaan energiajärjestelmien ja tuulivoiman luonnetta monitieteisesti ja -menetelmäisesti lähestyen aihetta sekä viranomaisien ja regulaation, systeemejä sekä kompleksisuutta ja energiajärjestelmiä koskevan laaja-alaisen tutkimuksen, että tuulivoimaan keskittyvän empiirisen osion kautta.

Tutkimuskysymykset ovat:

- Mitä kriittisten perusrakenteiden turvaamisessa tulisi huomioida lisääntyvän tuulivoimatuotannon ja sähköjärjestelmän muutoksen myötä?
- Millaisia tai millaista vakaviin häiriöihin johtavia ilmiöitä, rakenteita tai toimijuutta tuulivoimatuotannossa ja -järjestelmissä on ja kuinka ne voivat ilmetä?

Empiirisessä osiossa on keskitytty tuulivoimajärjestelmiin sekä niiden häiriösietoisuuteen, uhkiin ja resilienssiin. Systemaattisella kirjallisuuskatsauksella on pyritty syntetisoimaan mahdollisimman kattavasti, millaisia erilaisia näkökulmia tuulivoimajärjestelmiä koskevassa tuoreimmassa tutkimuksessa on yllä mainittujen tutkimuskysymysten osalta noussut esille. Tutkimuksessa on huomioitu teknisten näkökulmien lisäksi myös esimerkiksi regulaatioon, käytänteisiin ja toimijoihin liittyviä asioita. Tuulivoiman ja sähköjärjestelmän piiristä mahdollisesti tunnistettavia ilmiöitä ja rakenteita ei ole rajattu etukäteen, jotta on välttytty tiedonhankinnan vinoutumiselta.

Tutkimuksen ulkopuolelle on rajattu kaikki suoraan tuulivoima-alaan liittyvät näkökulmat. Työssä ei esimerkiksi tarkasteltu sektori-integraatioita tai sähkön käyttöä ja käyttäjälähtöisiä riskejä, vaikka näistä onkin julkaistu paljon tuoretta tutkimusta, ja kuluttajanäkökulma on olennaista huomioida systeemien tutkimuksessa (ks. esim. Silvast 2017, 161). Tässä tutkimuksessa ei myöskään ole keskitytty sähköstä riippuvaiseen toimintaan tai sähköjärjestelmän ulkopuolisten rakenteiden resilienssiin, vaan kohdennettu tarkastelu nimenomaisesti tuulivoimaan ja tuulivoimasta syntyviin ilmiöihin. Tutkimuksella ei ole otettu kantaa siihen, soveltuuko tuulivoima sähköjärjestelmään vai ei, vaan pyritty luomaan sellaista ymmärrystä, joka voivat tukea tulevaisuudessa entisestään muuttuvan järjestelmän resilienssiä. Vaikka kirjallisuuskatsaus on tehty kansainvälisen tieteellisen kirjallisuuden pohjalta, toteutetuissa haastattelussa sekä skenaarioanalyyseissä tutkimus on rajattu käytännössä koskemaan Suomea. Näin ollen on

huomioitava, että tieteellisestä kirjallisuudesta esille nousseet näkökulmat eivät välttämättä sellaisenaan koske suomalaista tuulivoima-alaa ja sähköjärjestelmän tilaa. Samoin kehitetyt ratkaisumallit eivät sellaisenaan ole välttämättä yleistettävissä laajemmin muihin valtioihin.

1.2 Tutkimusmenetelmät ja -strategia

Tieteellinen prosessi koostuu Singletonin ja Straitsin mukaan (2018) *teorian ja datan syklisestä vuoropuhelusta*: tutkimuksessa voidaan joko koetella olemassa olevia teorioita erilaisin hypoteesein tai luoda kerätystä tiedosta kokonaan uusia teorioita. Kun lähestytään energiasektoria, tässä tapauksessa tuulivoimaa, käsittelevää tutkimusaihetta, tutkimus voi olla sekä määrällistä että laadullista, tai tutkimuksessa voi olla piirteitä molemmista. Energiasektoria ja energian tuotantoa voidaan analysoida määrällisesti esimerkiksi tehojen ja energiamäärien pohjalta, ja se on usein erittäin perusteltua. Yhtä lailla on tärkeää havainnoida energiaan liittyviä ilmiöitä laadullisesti.

Tämän tutkimuksen tutkimusote on konstruktiiivinen eli työssä pyritään ratkaisemaan ja analysoimaan oikean maailman ongelmia tuottaen viitekehystenä olevalle tieteelle kontribuutiota. Konstruktiiivisen tutkimuksen lopputuloksena voidaan synnyttää esimerkiksi malleja, diagrammeja, suunnitelmia, organisaatorakenteita, ja niin edelleen. Konstruktiiivisen otteen mukaisesti tässä työssä on syvennytty ajankohtaisiin, ratkaisua vaativiin ongelmiin, luotu ongelmia ratkaiseva konstruktio ja huomioitu erityisesti kokonaisuuden kytkeminen teoreettiseen tietämykseen ja empiiristen löydösten reflektointiin takaisin teoriaan. (ks. Lukka, 2014; Lukka, 2000)

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli ymmärtää kohteena olevaa järjestelmää eli tuulivoimatuotantoa ja pyrkiä esimerkiksi tunnistamaan erityisesti sellaisia teknisiä ja sosioteknisiä ominaisuuksia ja ilmiöitä, jotka ovat merkittäviä vakavien häiriö- ja poikkeustilanteiden näkökulmasta. Konstruktiiiviselle tutkimusotteelle tyypilliseen tapaan lopulliset konstruktiot eivät olleet lähtövaiheessa tiedossa, vaan ne luotiin, keksittiin ja kehitettiin aineiston pohjalta (ks. Lukka, 2014).

Lukan mukaan (2014, 2000) konstruktiiivisessä tutkimusotteessa on seitsemän vaihetta (ks. luetelma alla). Vaiheita sekä niihin liittyviä menetelmiä on kuvattu tarkemmin taulukossa 1.

- Löydetään ongelma, joka on sekä olennainen, ja jolla on potentiaalia teoreettiseen kontribuutioon.
- Selvitetään mahdollisuuksia pitkän tähtäimen tutkimuksen yhteistyömahdollisuuden kohdeorganisaation kanssa.
- Saavutetaan syvä ymmärrys tutkimusalueesta sekä käytännössä että teoriasolla.
- Innovoidaan ratkaisumalli ja kehitetään konstruktio, jolla on myös teoreettista kontribuutiota.

- Toteutetaan ja testataan kehitettyä ratkaisua.
- Pohditaan kehitetyn ratkaisun soveltamisalaa.
- Reflektoidaan löydöksiä ja tunnistetaan sekä analysoidaan teoreettista kontribuutiota.

TAULUKKO 1 Konstruktiivisen tutkimuksen vaiheet, niiden soveltamisen periaatteet ja menetelmät tässä tutkimuksessa.

Vaihe	Huomiot ja menetelmät
Ongelman tunnistaminen	Ongelma on tunnistettu relevantiksi sekä tutkimuskirjallisuudessa että energia-alalla. Energiasektori on kompleksinen ja muutoksessa, mikä merkitsee uusien, yllättävien ilmiöiden syntyä. Varautuminen häiriötilanteisiin on kirjoittamisen hetkellä yhteiskunnallisesti merkittäväksi koettu aihe.
Tutkimusyhteistyö	Lähestymistapa on systeeminen ja ratkaisuja kehitetään toimialavetoisesti esim. yhden organisaatiotapauksen tai kohteen sijaan. Aineisto on kerätty asiantuntijahaastatteluin ja vertaisarvioitujen julkaisujen tietokannoista. Tutkimukselle on hyviä verkostoja.
Syvällinen ymmärrys tutkimusalueesta	Tutkimusaihetta kartoitettiin teoriataustan selvityksen jälkeen sekä toimialalle suunnatuilla haastatteluilla että systemaattisella kirjallisuuskatsauksella. Teoriaosuudessa taustoitettiin eritoten kompleksisten systeemien ja energiasektorin häiriöiden sekä muutoksen luonnetta.
Ratkaisumallin kehitys	Ratkaisuja kehitettiin luovasti, objektiivisesti ja huolellisesti aineiston perusteella. Pohjana ratkaisukehityksessä oli synteesi, joka yhdisteli haastatteluista ja kirjallisuuskatsauksesta esille nousseita ja syntetisoituja näkökulmia.
Ratkaisun testaaminen	Ratkaisukehitykset testattiin ja viimeisteltiin skenaarioanalyysin avulla. Skenaarioanalyysissä luotiin kuvitteellisia uhkatilanteita äärimmäisistä ja nykyhetkellä uskottaviksi koetuista uhkatilanteista, ja arvioitiin synteessin havaintojen pohjalta vaikutuksia kriittisten rakenteiden turvaamiseen ja energiasektorin jatkuvuuteen.
Soveltamisalan pohdinta	Soveltamisalan pohdinnassa hyödynnettiin edeltävien osa-alueiden havaintoja ja kerrytettyä ymmärrystä alasta pyrkien muun muassa kuvaamaan, millaisia rajoituksia tuloksilla on.
Löydösten reflektointi	Teoreettisen kontribuution analysointi toteutettiin teoreettisen viitekehityksen kautta. Reflektiossa pohdittiin erityisesti, vahvistavatko tutkimuksen tulokset narratiivia energiasektoriin ja tuulivoimaan liittyvästä systeemisestä muutoksesta ja kompleksisuudesta, ja millaisia edellä mainittuihin teoriakokonaisuuksiin liittyviä havaintoja tuloksista ja aineistosta on tunnistettu.

Ratkaisumalli kehitettiin monimenetelmäisesti asiantuntijoille toteutettujen haastatteluiden, systemaattisen kirjallisuuskatsauksen ja skenaarioanalyysin

avulla. Systemaattisella kirjallisuuskatsauksella selvitettiin tuulivoimajärjestelmiä yleisellä tasolla koskettavia asioita. Haastatteluiden avulla puolestaan kartutettiin ymmärrystä järjestelmien ja toimintaympäristön tilasta Suomessa. Haastattelutiedon ja kirjallisuuskatsauksen johtopäätösten pohjalta luotiin pohja myöhemmin testattaville ratkaisumalleille. Koska tutkimuksen tavoitteena on ymmärtää, mikä on tuulivoimajärjestelmissä keskeistä vakavien häiriö- ja poikkeustilanteiden näkökulmasta, tuloksia on viimeistelty ja arvoitu skenaarioanalyysin avulla. Skenaarioanalyysi on strategisen analyysin menetelmä, jossa arvioidaan ja tunnistetaan tulevaisuuden kehityskulkuja nykyisen tilanteen pohjalta, jotta voidaan tehdä tarkempia suunnitelmia ja päätöksiä (Bunn & Salo, 1993). Tämän tutkimuksen osalta skenaarioita on käytetty sekä validointi- että ennakoitavuuskaluina. Tarkempi menetelmäkuvaus on esitetty jäljempänä.

Tieteellistä kontribuutiota on tarkasteltu erillisenä osiona ja kriittisesti, palaten työn teoreettiseen viitekehykseen. Erityisesti tuloksia on peilattu systeemiteoriaan, kompleksisiin adaptiivisiin systeemeihin sekä systeemiseen muutokseen. Työstä tulee seuraamaan lukuisia jatkotutkimustarpeita; nekin identifioidaan ja arvioidaan mahdollista tulevaa tutkimusta varten.

2 TOUREETTINEN VIITEKEHYS

Global infrastructure networks are the Achilles heel of the great powers. (John Robb)

2.1 Systeemiteoria, kompleksisuus ja kompleksiset systeemit

Georg F. Weberin (2013) mukaan maailma koettiin 1900-luvulla eräänlaiseksi koneeksi. Näkemykseen liittyi ajatus, että jos kaikki maailmamme asetelmat ja elementit tunnettaisiin riittävän hyvin, voitaisiin ennustaa, mitä kulloinkin tulee tapahtumaan. Tämä Weberin kuvaama lähestymistapa oli hyvin deterministinen. Samalla kuitenkin elettiin aikaa, jolloin ymmärrettiin, miten paljon tietopuutteita ja aukkoja omassa maailmanymmärryksessämme on. Havaittiin esimerkiksi, ettei moniakaan teorioita voi asettaa täysin varmalle pohjalle. (Weber, 2013) Vastaavaa yksinkertaisuuteen perustuvaa ajattelua pohti myös Weaver (1948) kuvaamalla yhden biljardipallon liikkumista pöydän halki klassisena esimerkkinä 1900-luvun ongelmanratkaisujattelusta.

Tämän tutkimuksen kohteena olevat perusrakenteet eli infrastruktuurit ovat suuria, kerroksellisia sekä kompleksisia systeemeitä (Star, 1999, 380–382). Niitä ei siis voi mallintaa tai ennakoida aksiomaattisesti toimivan koneen tavoin, vaan tarvitaan *systeemistä* lähestymistapaa. Unruh havainnollistaa (2000) systeemistä lähestymistapaa liikennejärjestelmällä. Se koostuu niin autoista, teistä kuin liikennevaloista, huoltoasemista, ja toimintoja johtavasta joukosta sekä yksityisiä että julkisia toimijoita. Systeemisessä tarkastelussa iso järjestelmä voidaan aina hajottaa monitasoiseen osiin, ja tarkastella yksittäisiäkin elementtejä – esimerkin tapauksessa autoja, niiden moottoreita, jarrujärjestelmiä, ja niin edelleen. Kompleksisten systeemien osalta on lisäksi huomioitava, että näiden elementtien muodostama kokonaisuus on enemmän kuin osiensa summa. (Unruh, 2000) Esimerkiksi liikenne on tosiasiallisesti muutakin, kuin vain ajoneuvojen liikettä: taustalla on itsenäisten toimijoiden tekemiä päätöksiä ajoreiteistään, institutionaalista ohjausta, ja sattumaakin. Kompleksisuuteen palataan tarkemmin seuraavassa osiossa.

Systemiajattelua on määritelty monin eri tavoin. Systemisellä lähestymistavalla on terminä myönteinen konnotaatio, sillä se korostaa ”koko järjestelmän huomioimista”. Yksinkertaistettuna systeemit tarkoittavat järjestelmiä, joiden osatekijät muodostavat yhdessä tiettyä tavoitetta ajavan kokonaisuuden, ja systemiajattelu puolestaan tapaa ajatella tai lähestyä näitä elementtejä ja järjestelmiä. (Churchman, 1968, 11) Esimerkki systeemistä voisi olla siis esimerkiksi sähköjärjestelmä. Sen systemisessä tarkastelussa analysoidaan esimerkiksi sähköjärjestelmään kuuluvia voimalaitoksia ja siirtoyhteyksiä sekä näiden välistä vuorovaikutusta.

Seuraavassa kahdessa osiossa on kuvattu systemisyyttä, kompleksisuutta sekä systeemistä muutosta koskevaa teoriataustaa. Systemisyys on samanaikaisesti sekä työkalu että selitys kriittisille perusrakenteille ja niiden luonteelle. Infrastruktuurit ovat kompleksisia systeemeitä, minkä takia niitä on tarkasteltava systeemistä lähestymistapaa käyttäen. Systemiajattelun avulla voidaan paremmin ymmärtää kompleksisten perusrakenteiden vivahteikkoutta, mutta samalla saada selitys sille, miksi niiden ymmärtäminen on toisinaan niin vaikeaa.

2.1.1 Kompleksiset adaptiiviset systeemit

Kompleksisuus on keskeinen käsite perusrakenteita analysoitaessa. Kompleksisten organisaatioiden toimintaan liittyy muun muassa yllättävyyttä ja epälineaarisuutta (Anderson, 1999). Epälineaarisuus tarkoittaa prosessia tai tapahtumasarjaa, jossa tapahtumat eivät ole suoraan tai selvästi jatkumoa toinen toisilleen. (Cambridge Dictionary, 2024). Lineaarisisissa järjestelmissä puolestaan esimerkiksi materiaalien ja työvoiman erikoistumista on vain vähän (Perrow, 1984, 86). Jokapäiväinen ympäristömme on täynnä lineaarisuuden periaatetta noudattavia elementtejä; liikenne-esimerkkiin palaten esimerkiksi auto tuottaa kiihdyttäessään pakokaasua ja ääntä, ja sen ajaminen vaatii melko yksinkertaisia toimenpiteitä. Yksittäistä ajoneuvoa ei voida siis pitää kovin kompleksisena järjestelmänä.

Kompleksisia järjestelmiä on tunnistettu niin ihmisten kehittämistä, biologisista kuin sosiaalisista systeemeistä. (Ahmad ym. 2024) Kompleksisuutta on Hanenin ja Raision mukaan sovellettu lukuisilla eri tieteenaloilla kuluneina vuosikymmeninä (2017), ja samalla on yhä yleisempää todeta, että *maailmasta on tullut monimutkaisempi*, tai että *teknologiasta on tullut kompleksisempää*. Yleisellä tasolla ei kuitenkaan vaikuta olevan konsensusta siitä, minkä takia kompleksisuutta esiintyy, ja miksi esimerkiksi pienet yhteisöt ovat ajan myötä väistyneet isompien ja kompleksisempien yhteiskuntien tieltä (Tainter, 1988, 22). Kompleksisuudelle ei myöskään ole olemassa yleisesti hyväksyttyä määritelmää, vaan sitä tulkitaan eri tavoin eri koulukunnissa ja tutkimussuuntauksissa (Hananen, 2017).

Kompleksisuus ymmärretään muun muassa yhteiskunnan koon, sen osien lukumäärän ja erikoistuneiden roolien sekä mekanismien monipuolisuuden kautta. Nyrkkisääntönä voidaankin pitää, että mitä enemmän yhteiskunnassa on heterogeenisuutta, sen todennäköisemmin se on myös kompleksinen. (Tainter, 1988, 22) Simon kuvaakin (1996) kompleksisuutta yksinkertaisesti järjestelmäksi, jossa on hyvin paljon keskenään vuorovaikuttavia elementtejä, ja jossa kokonaisuus on enemmän, kuin osiensa summa. Snowden ja Boone korostavat (2007),

että kompleksisessa järjestelmässä vuorovaikutus on epälineaarista. Pienetkin muutokset saattavat johtaa isoihin ja yllättäviin kerrannaisvaikutuksiin. Kompleksisille järjestelmille on lisäksi tyypillistä, että vuorovaikuttavia toimijoita on paljon, toiminta on dynaamista, eikä järjestelmä ole ns. osiensa määräämä summa, vaan olosuhteet vaikuttavat tilanteiden kulkuun. Niissä siis esiintyy *emergenssiä*. (Snowden & Boone, 2007)

Emergenssiä voidaan lyhyesti kuvata uudenlaisten ominaisuuksien synty-miseksi yksinkertaisempien vuorovaikutuksesta. Esimerkiksi yhteiskunnallisilla ilmiöillä voi olla yhteiskunnallisista rakenteista koostuvia ominaisuuksia, joita ei voida ymmärtää vain yksilöiden tarkastelemisen kautta. Lansinhgin mukaan (2003) emergenssissä yksittäisten elementtien käytös muodostaa tunnistettavia piirteitä vasta ns. ylätasolla, mutta yksittäisten elementtien vuorovaikutukseen liittyvät kausaalisuhteet jäävät näkymättömiin. Rinaldi ym. (2001) mukaan sähkön tuotanto ja jakelu sähköjärjestelmässä on hyvä esimerkki emergenssistä: järjestelmän komponenttien asettelu satunnaisiin sijainteihin ja järjestykseen ei johda turvalliseen sähköjakeluun, vaan tarvitaan jatkuvaluonteista ja hyvin huolellista järjestelmäsuunnittelua. Emergenssin vaikutukset voivat siis olla sekä myönteisiä että kielteisiä.

Snowden & Boone ovat määritelleet (2007) kompleksisuuden osana viisi-osaista jaottelua: yksinkertaiset, monimutkaiset, kompleksiset, kaoottiset ja epä-järjestyneet asiat ja ilmiöt. Tämän ns. Cynefin-viitekehyksen mukaan yksinker-taiset tilanteet ja ilmiöt ovat vakaita ja sisältävät selkeitä sekä ennustettavia kau-saalisuhteita; näitä ovat esimerkiksi selkeät, prosessimaiset tilanteet. Monimut-kaisuudessa selkeät kausaalisuhteet ovat myös olemassa, mutta niiden havain-nointi vaatii erityistä paneutumista. Monimutkaisesta järjestelmästä löytyy lo-pulta kuitenkin vähintään yksi oikea vastaus. Näin ollen esimerkiksi auto on mo-nimutkainen laite; sen toimintaperiaatteen voi ymmärtää ja kuvata paperille riit-tävän asiantuntemuksen turvin. Kompleksiset tilanteet ja järjestelmät ovat puo-lestaan jatkuvassa muutoksessa, eikä vastaavanlaista osiin jaottelua voida tehdä. Kompleksisesta järjestelmästä esimerkkinä Snowden ja Boone mainitsevat sade-metsän. (Snowden & Boone, 2007)

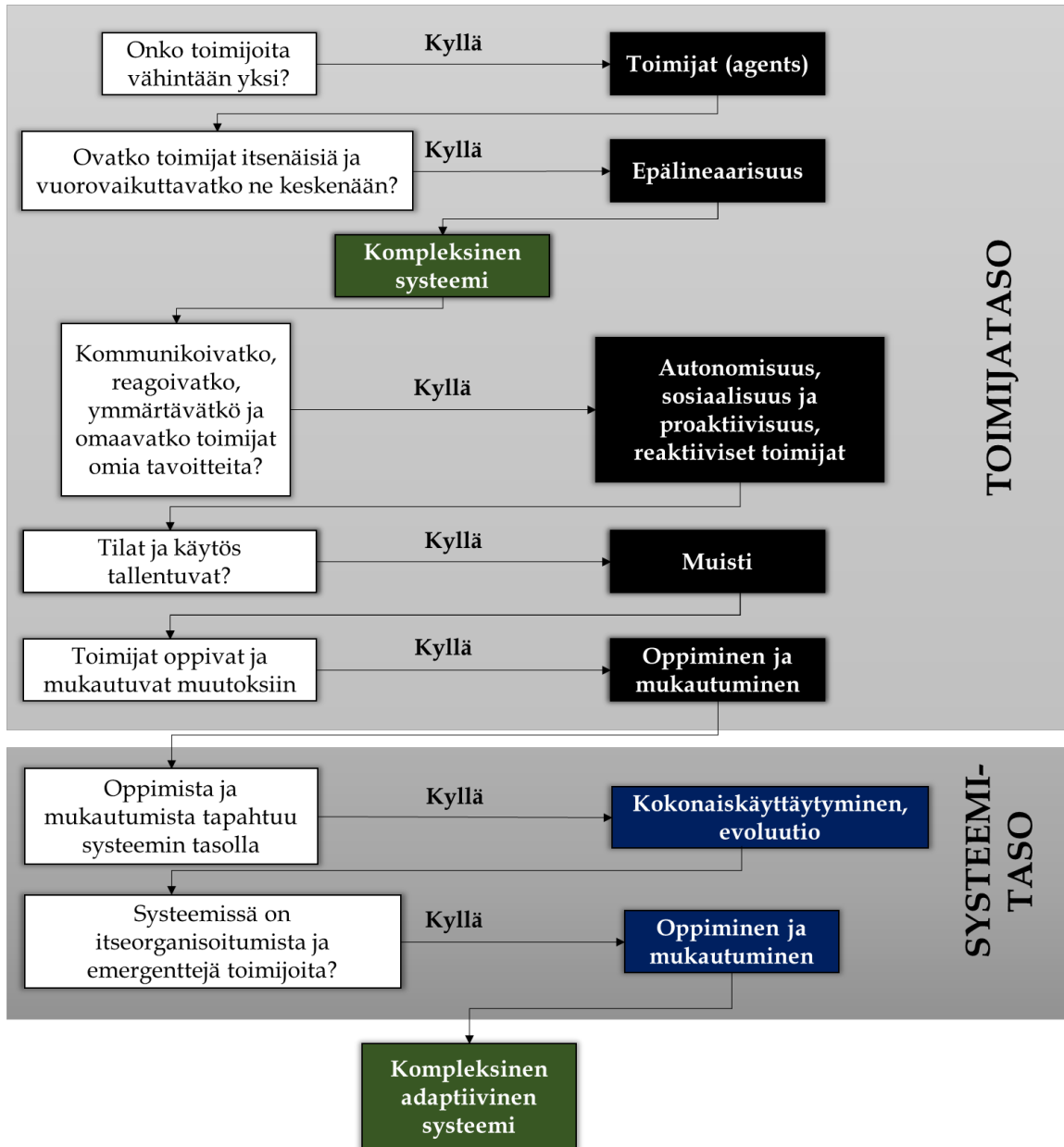
Zack puolestaan käyttää (1999) nelijaottelua epävarmuus, epäselvyys, kompleksisuus ja monitulkintaisuus (uncertainty, ambiguity, complexity, equivocality). Kompleksiset tilanteet eivät Zackin mukaan ole täysin ennusta-mattomia tai epämääräisiä, mutta niihin liittyy useita vaiheita ja toimijoita, jotka vaikuttavat kokonaisuuteen, sekä monia potentiaalisia ja keskinäisriippuvia muuttujia, ratkaisuja sekä menetelmiä. Kompleksisuutta voidaan hallita oikean-laisilla tietokäytännöillä ja asiantuntemuksella. Epävarmuudessa puolestaan ei aina puhuta täydellisestä ymmärryksen puutteesta tai epäselvyydestä, vaan tilo-jen ja vaihtoehtojen määrittelyn mahdottomuudesta olosuhteiden epävarmuu-den vuoksi. Epäselvyys, kontrastina kompleksisuuteen ja epävarmuuteen, voi-daan puolestaan selättää jopa pienellä määrällä lisätietoa; siinä on kyse vaikeu-desta esittää oikeita kysymyksiä. Monitulkintaisuus taas kuvaa tilanteita, joissa tietoa on, mutta sen tulkintaan liittyy nimensä mukaisesti monitulkintaisuutta eli esimerkiksi ristiriitaisuuksia. (Zack, 1999)

Warren Weaver kuvaa kompleksisuutta järjestyneen (organized) ja epäjärjestyneen (unorganized) kompleksisuuden käsitteiden kautta. Epäjärjestyneessä kompleksisuudessa muuttujien määrä on hyvin suuri, ja jokaisen muuttujan käytös on joko ailahtelevaa tai tuntematonta. Järjestyneessä kompleksisuudessa, toisin kuin epäjärjestyneessä, systeemin tilaa tai tapahtumia ei kuitenkaan voida tutkia esimerkiksi tilastollisin menetelmin (esimerkiksi kuinka paljon vahinkoilmoituksia vakuutusyhtiö keskimäärin tai todennäköisesti vastaanottaa), vaan muuttujat tai elementit ovat järjestyneet ja vuorovaikuttavat orgaanisena kokonaisuutena. Weaverin mukaan esimerkiksi järjestäytyneet ammattiyhdistysliikkeet ovat järjestäytyneitä kompleksisuutta: vuorovaikuttavia toimijoita on paljon, eikä päätelmiä voida tehdä pelkästään tilastollisin menetelmin. (Weaver, 1948)

Kompleksisuutta voidaan mallintaa tutkimalla yksittäisten toimijoiden vuorovaikutusta *kompleksisessa adaptiivisessa systeemissä*. Anderson kuvailee (1999) kompleksisten adaptiivisten systeemien edustavan uudenlaista yritystä yksinkertaistaa monimutkaisuutta. Kompleksisiin adaptiivisiin systeemeihin liitetään yleisesti tiettyjä piirteitä, ennen kaikkea neljä seuraavaa:

- toimijoista koostuva verkosto on itseorganisoituva,
- toimijoilla on itsenäinen kognitiivinen rakenne
- toimijat yhteiskehittyvät (co-evolve) keskinäisen vuorovaikutuksen seurauksena, ja
- systeemi itsessään kehittyä ajan myötä joko esimerkiksi uusien toimijoiden ilmaannuttua järjestelmään tai nykyisten toimijoiden muuntauduttua. (Anderson, 1999)

Kompleksiset systeemit vuorovaikuttavat ja kehittyvät dynaamisesti myös muiden itsenäisten systeemien ja ympäristönsä kanssa (esim. Kuokkanen, 2016). Kuvio 1 havainnollistaa kompleksisen adaptiivisen systeemin tunnistamista. Kompleksiivisissa adaptiivisissa systeemeissä on useita osallistujia ja toimijoita, jotka vaikuttavat monimutkaisin tavoin toisiinsa sekä tuleviin kehityskulkuihin. (Little, 2002) Järjestelmän koon kasvu johtaa yhä useampiin eri toimintoihin ja kytkentöihin muiden järjestelmien kanssa, mikä tekee niistä riskialttiita systeemisille onnettomuuksille, jotka ovat harvinaisia, mutta jotka voivat olla vaikutuksiltaan merkittäviä. (Perrow, 1984, 5, 72)



KUVIO 1 Kompleksisen adaptiivisen systeemin piirteet, määrittely ja tunnistaminen (muokattu ja yksinkertaistettu lähteestä Ahmad ym. 2024)

Sekä yksinkertaisissa että kompleksisissa järjestelmissä esiintyy itseorganisoitumista. Kauffmanin mukaan elävät järjestelmät, kuten organismit, ovat tärkein esimerkki organisoituneesta kompleksisuudesta. Organismit eivät paitsi itse kehity ja muutu, vaan ne muuttuvat osana abioottista ympäristöä ja yhdessä muiden organismien kanssa. (Kauffman, 1993) Järjestelmien elementit voivat siis olla saavuttaneet tietyn tilan, mutta koska toimivat osana laajempaa toimintaympäristöä, myös koko itse järjestelmä on muutospaineen alla. Kompleksiset adaptiiviset systeemit eivät tarvitse vahvaa keskusjohtoa, ja voivat toimia jopa huonommin, jos niiden toimintaa pyritään rajoittamaan merkittävästi. (Rinaldi ym. 2001)

Systemiseen ajatteluun ja kompleksisuuteen liittyy epävarmuus ja vaikeus tehdä järjestelmiä koskevia havaintoja. Yhtä lailla havaintoja on vaikea yleistää

koskemaan koko systeemiä. Taustalla voidaan nähdä kompleksisten järjestelmien tuntematon luonne: suurikaan määrä empiirisiä havaintoja ei välttämättä riitä todistamaan teoriaa todeksi. Esimerkiksi Weberin (2013) mukaan on vaikeampaa arvioida varmuudella, mikä on aina totta, kuin päätellä, mikä ei ole. Tunnettu havainnollistus epävarmuudesta on Karl Popperin (1935, 82–84) joutsenesimerkki. Popperin mukaan mikään määrä havaittuja valkoisia joutsenia ei riitä oikeuttamaan johtopäätöstä, jonka mukaan kaikki joutsenet ovat valkoisia (Popper, 1935, 4). Popperin ajattelun mukaan yleisväittämästä ilman alkuehtoja ei voida päätellä peruslausetta, mutta toisaalta myöskään universaali väittämä ja perusväittämä eivät voi olla ristiriidassa keskenään. (Popper, 1935, 82–83) Kompleksisuusajattelun kannalta Popperin esimerkissä huomionarvoista on juuri yksittäisen havainnon yleistämättömyys koko järjestelmään nähden

Epävarmuuteen liittyy myös aiemmin esitelty epälineaarisuuden käsite. Weberin mukaan (2013) epälineaarisissa järjestelmissä tapahtumia kuvataan ns. lentoratoina. Epälineaaristen järjestelmien bifurkaatio- eli haarautumispisteessä yksittäiset tapahtumat risteävät, ja järjestelmä voi kehittyä ennalta arvaamattomiin suuntiin. (Weber, 2013) Jokainen piste parametrien avaruudessa osaltaan määrittää järjestelmän tilaa. Kun parametrit muuttuvat, vaikutukset näkyvät myös muualla järjestelmässä. (Kauffman, 1993) Kun yksi auto moottoritiellä ajaa kolarin, siitä voi syntyä ketjureaktio, jonka seuraukset voivat ulottua hyvinkin laajalle.

Kompleksiset järjestelmät eivät kuitenkaan ole havainnoijalleen täysiä mysteereitä. Perrow esimerkiksi huomauttaa (1984, 75) että jopa kompleksisimmissä systeemeissä pääosa yhteyksistä on suunniteltuja ja näkyviä, ja että lineaarinen vuorovaikutus on hallitsevaa kaikissa järjestelmissä. Perrow'n mukaan vain prosentti kaikista osista tai yksiköistä lineaarisessa järjestelmässä voi tuottaa kompleksista vuorovaikutusta, kun taas kompleksisessa järjestelmässä kompleksiseen vuorovaikutukseen kykenevä osuus on 10 %. Koska erilaisten vuorovaikutusreitien määrä lisääntyy kompleksisten yksikköjen määrän kasvaessa eksponentiaalisesti, pieneltäkin tuntuva lisäys kompleksisuuteen voi tuottaa hyvin merkittävän määrän uutta kompleksista vuorovaikutusta. (Perrow, 1984, 75–76)

Kompleksisuutta voidaan tarkastella sekä positiivisena että negatiivisena ilmiönä. Innovaatio- ja organisaatiotutkimuksessa kompleksisuus kytkeytyy kaaoksen reunalle ajautumiseen ja muutoksen mahdollistumiseen. Toisaalta kompleksisuuteen liittyy näkökulma, jonka mukaan se lisää epäselvyyttä, hahmottomuutta sekä emergenssin ennustamattomia seurauksia, jotka voivat olla negatiivisia. (Hanan, 2017) Kompleksisille systeemeille tyypillinen itseorganisoiduminen tarkoittaa sisäsyntyistä ja spontaania järjestäytymistä ilman ohjausta ja kontrollointia. Systemien sisäiset keskinäisriippuvuudet eivät ole jakautuneet tasaisesti, vaan toiset ovat toisia kytkeytyneempiä. Muutos kompleksisissa systeemeissä onkin luonteeltaan yllättävää: näkyviä tai selkeitä syitä voi olla vaikeaa erottaa. Tämän näkemyksen mukaan kompleksisuusajattelu on siis eräänlainen työkalu, ohjaten kysymään olennaisia kysymyksiä. (Uusikylä ym. 2021)

2.1.2 Systemiset muutokset

Uutta teknologiaa on jo kauan pidetty ratkaisuna maailman ongelmiin. Ihmiskunnalla olisi esimerkiksi riittävä teknologinen osaaminen ja kyky tarjota kaikille ruokaa, suojaa ja terveyspalveluita. Erilaiset haasteet ja ongelmat ovat kuitenkin sekä toisistaan riippuvia että päällekkäisiä, eikä nykyinen järjestelmä ole organisoitunut tukemaan niiden ratkaisemista. (Churchman, 1968, 3–4) Voidaan siis sanoa, että systeemisen tason ongelmia ei voida ratkaista lineaarisella ajattelulla. Miten systeemi sitten muuttuu, kuinka sitä voidaan muuttaa tai ongelmia ratkaista?

Muutos ja sen ennakoimattomuus ovat keskeisiä piirteitä kompleksisille systeemeille. Muutos on seurausta toimijoiden monimutkaisesta keskinäisestä vuorovaikutuksesta, joka myös vaikuttaa tuleviin kehityskulkuihin (Little, 2002). Vuorovaikutus on epälineaarista, ja pienilläkin muutoksilla voi olla merkittäviä seurauksia. (Snowden & Boone, 2007). Martinin mukaan (1996) isot muutokset eivät kuitenkaan tapahdu hetkessä. Esimerkiksi yhdestä teknologiajärjestelmästä toiseen siirtyminen saatetaan mitata ennemmin vuosisadoissa kuin -kymmenissä. (Martin, 1996) Jokainen systeemin elementti toimii kuitenkin vuorovaikutuksessa muiden kanssa. Jos yksi elementti poistetaan järjestelmästä, tai sen ominaisuudet muuttuvat merkittävästi, vaikutus heijastuu myös muualle systeemiin. (Hughes, 2012, 45) Tämä onkin systeemiajattelun ja systeemisen muutoksen tarkastelun lähtökohta: muutosta tapahtuu, mutta sen mittakaavaa voi olla vaikea arvioida.

Martinin mukaan (1995) teknologisen muutoksen taustalla on kompleksisia ilmiöitä. Systeemisten muutosten kohdalla usein käytetään teknologisen muutoksen käsitteen sijaan termiä sosiotekninen muutos. Sosioteknisiin muutoksiin liittyy kauaskantoisia seurauksia eri ulottuvuuksissa. Näitä ovat materiaaliset, organisatoriset, institutionaaliset, poliittiset, taloudelliset ja sosiokulttuuriset ulottuvuudet. Sosiotekniset muutokset eroavat olennaisesti teknologisista transiitioista. Sosioteknologisiin transiitioihin liittyy toimijoiden käytäntöihin ja instituutioiden rakenteisiin liittyviä muutoksia teknologiatason ohella. (Markard ym. 2012)

Systemiset muutokset ovat myös monitasoisia ilmiöitä. Frank Geels kuvaa sosioteknisiä muutoksia muun muassa käsitteiden *landscape* (ns. maisema) ja *niche* (ns. lokero) avulla monitasoisen näkökulman teoriaa (multi-level perspective) koskevassa tutkimuksessaan. Geelsin teoria pyrkii kuvaamaan ja selittämään, kuinka esimerkiksi erilaiset teknologiset siirtymät ilmenevät, ja miten parhaiten ymmärtää niiden monitasoista luonnetta. Yksi Geelsin havainnoista on, että muutokset eivät tosiasiallisesti tapahdu esimerkiksi vain teknologisella, vaan myös käytäntöjen, sääntelyn, verkostojen ja esimerkiksi kulttuurin, tasolla. Toisaalta Geels kuvaa radikaalien muutosten edellyttävän eräänlaista läpimurtoa lokerotasolta regiimitasolle, mutta yhtä lailla muutosten tarvetta linkittää erilaisia kehityskulkuja toinen toisiinsa, sillä uusien elementtien ilmaantuminen järjestelmään itsessään avaa uusia mahdollisuuksia ja ohjaa toimijoita uusiin suuntiin:

The introduction of new elements changed the incentive structures and situation of other elements. New opportunities opened up which guided actors in different directions. (Geels, 2002)

Geelsin monitasoteorian avulla voidaan ymmärtää ja tulkita systeemistä muutosta. Sen avulla voidaan esimerkiksi tunnistaa pieniä muutostekijöitä, eräänlaisia läpimurtavia voimia, jotka voivat parhaimmillaan muuttaa koko laajaa ympäristöä useine systeemeineen. Toisaalta Geelsin myöhempien havaintojen mukaan (2011) suuret, mullistusmaiset muutokset tai *transitiot* ovat monitahoinen ja kompleksinen tutkimusaihe, eikä ole olemassa jaettava näkemystä siitä, kuinka niitä oikeastaan pitäisi tutkia. Jos järjestelmään liittyy uusia elementtejä, ne voivat kuitenkin laukaista muutoksia, ja muutokset edelleen luoda painetta ja uusia mahdollisuuksia ns. maisematasolle (landscape level). (Geels, 2002) Olennainen kysymys tällöin on, miten tunnistaa mahdollisuudet, ja elää mahdollisten riskien kanssa.

Martinin mukaan pelkät yksittäisten teknologiakohteiden (esimerkiksi elektroniikan ja tietotekniikan) kehitysharppaukset eivät selitä esimerkiksi 1900-luvun lopun nopeaa teknologista kehittymistä. Niiden kehitys on kiistatta ollut edellytys muutokselle, mutta institutionaalisen kehyksen muutokset yritysten toimintaympäristössä ovat vaikuttaneet lopputulemaan merkittävästi. Esimerkkinä institutionaalisen tason muutoksista Martin mainitsee muun muassa sähköön liittyvät teollisuuden deregulaation, joka johti tuotannon hajautumiseen sekä alueellisten monopolien vähenemiseen. (Martin, 1996) On siis selvää, että systeminen muutos itsessään on kompleksinen ilmiö, ja sitä tulisi tarkastella monitasoisesti.

2.2 Kompleksiset kriittiset perusrakenteet

Yhteiskuntiemme jokapäiväinen arki on yhä riippuvaisempi erilaisten infrastruktuurien eli rakenteiden jatkuvaluonteisesta toiminnasta. (Star, 1999, 380–382). Infrastruktuureita tarvitaan urbaanien yhteisöjen toimintojen ylläpitämiseksi. Taloudellisen kasvun, julkisen sektorin kehittymisen ja lisääntymisen pluralismin seurauksena infrastruktuureista on tullut suuria teknisiä systeemeitä (large technical systems). Infrastruktuurien standardisoidun kehityksen voidaan nähdä olevan osa modernin yhteiskunnan edellytyksiä palvelevaa, länsimaille tyypillistä kehitystä. (Heino & Anttiroiko, 2014)

Häiriötilanteiden kontekstissa infrastruktuuria on yleistä käsitellä niiden välttämättömyyden ja kriittisyyden arvioinnin kautta. Yhteiskunnan toiminnan kannalta välttämättömiin palveluihin ja rakenteisiin viitataan yleisesti käsitteillä *kriittinen infrastruktuuri* tai *kriittiset perusrakenteet*. Sanan ”kriittinen” alkuperä ja juuret ovat kreikankielisissä sanoissa *kritikos*, joka tarkoittaa kykyä tehdä päätöksiä, ja *krinein*, joka tarkoittaa erottamista tai päättämistä. Käsitettä on myös käytetty esimerkiksi kirjallisuuden arvioinnin yhteydessä, mutta vianetsintää ja päätöksiä olettava asiayhteys on säilynyt hallitsevana. (Williams, 1985; Peoples &

Vaughan-Williams, 2010, 2) Huolellinen olennaisuuden arviointi on merkittävä osa kriittisiä perusrakenteita koskevaa keskustelua edelle; se kuvastaa päätöksiä siitä, mikä on kriittistä, ja millä perustein.

Kriittisiä perusrakenteita tarkastellaan usein yksilön tai yhteiskunnan tarpeiden täyttämisen näkökulmasta. Mitkä toiminnot, rakenteet ja organisaatiot ovat keskeisiä jokapäiväisen elämämme turvaamiseksi? Mikä rautatiekisko voi vääntyessään, tai tuotantolaitos häiriintyessään käynnistää ketjureaktion, joka vaikeuttaa tai jopa pysäyttää yhteiskunnan normaalin toiminnan? Minkä laiva-reitin tukkeutuminen johtaa maailmanlaajuisiin toimitusketjun häiriöihin? Edellä kuvatut kysymykset vaativat kriittisten rakenteiden tarkastelua kompleksisina systeeminä.

Kriittiset infrastruktuurit ovat suuria ja kompleksisia adaptiivisia systeemeitä. Niiden osatekijät vaikuttavat toisiinsa sekä menneet tapahtuvat tuleviin kehityskulkuihin. (Star, 1999, 380–382; Rinaldi ym. 2001) Yhteiskunnan kannalta välttämättömän ja kompleksisen luonteensa lisäksi kriittisiin perusrakenteisiin liittyy merkittäviä keskinäisriippuvuuksia (Alkhaleel, 2024). Vaikka tällaisten rakenteiden toiminnan häiriintyminen voi tarkoittaa sekä ihmisten, tuotteiden ja tiedon seisahtumista, ne koetaan laajalti itsestään selvinä (esim. Shove ym. 2019, 3). Vasta toimimattomuus ja mullistukset osoittavat käytännössä, kuinka tärkeitä normaalille elämälle ne ovat (esim. Graham, 2009, XI). Asetelma on siis ristiriitainen: samalla koemme tarvetta määritellä ja päättää yhä tarkemmin, mikä on välttämätöntä normaalin arjen kannalta, mutta toisaalta kohtaamme kompleksisiin systeemeihin liittyvän havainnoinnin vaikeuden.

Kriittisyys myös elää ja muuttuu ajassa. Shoven & Trentmann ovat pohtineet (2019), kuinka ihmisten käsitys ja standardit normaalista elämästä ovat jatkuvassa muutoksessa. 2020-luvulla välttämättömät perusrakenteet eivät olleet kriittisiä vielä sata vuotta sitten – osin siitä syystä, että niitä ei ollut silloin vielä olemassa. Jos jätetään huomiotta ennusteet tarpeiden ja käytänteiden muutoksesta tulevaisuudessa, esille nousee kaksi kysymystä: mitä oikeastaan ovat kriittiset perusrakenteet, ja mitä tarkoitetaan niiden toiminnan turvaamisella? Tässä osiossa on perehdytty näihin kysymyksiin lähestymällä kriittistä infrastruktuuria sekä sen suojaamista paitsi tieteellisen kirjallisuuden myös muun muassa regulaation kautta.

2.2.1 Kriittisten perusrakenteiden määrittely

Yleisen konsensuksen mukaan kriittiset perusrakenteet koostuvat useista erilaisista palveluista ja järjestelmistä, jotka ovat välttämättömiä yhteiskunnalle. (esim. Pöyhönen, 2022) Käytännössä valtiot määrittelevät itsenäisesti, mitkä elementit tai sektorit sisältyvät sen kriittiseen infrastruktuuriin (esim. Rehak ym. 2018). Siihen miellettyjen sektorien määrä vaihtelee maittain, mikä johtuu Hagelstamin mukaan (2005) erilaisista käsityksistä kriittisyydestä, uhkien erilaisuudesta, teknisestä kehitystasosta ja muun muassa turvallisuuskulttuurista. Kriittisiä perusrakenteita tarkastellaankin usein sektoriperustaisesti. Vaikuttaa siltä, että on yleisempää tarkastella, millaisia sektoreita kukin valtio on kriittisen infran käsitteen

alle sijoittanut. Vähemmän huomiota kiinnitetään määritelmien laadullisiin eroihin (vrt. Hagelstam, 2005).

Kriittisen infrastruktuurin käsitteen on esitetty saaneen alkunsa 1990-luvulla USA:ssa (Lewis, 2020). USA:n presidentti Bill Clintonin *Executive Order 13010*-asetuksessa vuonna 1996 esitettyä määritelmää on pidetty ensimmäisenä. Asetuksen määritelmän mukaan kriittistä infrastruktuuria ovat esimerkiksi voimajärjestelmän, telekommunikaation tai vesihuollon kaltaiset toiminnot, joiden toimimattomuus tai tuhoutuminen voisi heikentää kansallista turvallisuutta (ks. lainaus alla). Rinaldi ym. mukaan (2001) käsite ”infrastruktuuri” sai asetuksen myötä sekä uuden merkityksen että tärkeysasteen.

Certain national infrastructures are so vital that their incapacity or destruction would have a debilitating impact on the defense or economic security [of the United States]. These critical infrastructures include telecommunications, electrical power systems, gas and oil storage and transportation, banking and finance, transportation, water supply systems, emergency services (including medical, police, fire, and rescue), and continuity of government. (National Archives and Records Administration, 2023)

Varmuutta käsitteen alkuperästä ei kuitenkaan ole tiedossa. Lisäksi kriittisen infrastruktuurin määritelmät eroavat toinen toisistaan. Yksiselitteistä määritelmää välttämättömille palveluille ja rakenteille ei ole olemassa, vaan välttämättömyys riippuu mm. määrittelijästä ja ajanhetkestä, kuten tässä osiossa on kuvattu. Käsitteelle ei ole olemassa esimerkiksi yhtenevää pohjoismaista määritelmää. Määritelmissä on toisaalta merkittäviä yhteneväisyyksiä. Niissä toistuvat esimerkiksi tietyille valtiolle tai alueelle välttämättömien palvelujen ja resurssien tunnistaminen ja turvaaminen (ks. esim. Gheorghe ym. 2006b; U.S Congress 2001; Turvallisuuskomitea 2018; Wigell ym. 2022; Euroopan Parlamentti 2021). Esimerkiksi Euroopan Parlamentin CER-direktiivissä (Critical Entities Resilience, 2022/2557) kriittinen infrastruktuuri on määritelty seuraavasti:

Kriittisellä infrastruktuurilla [tarkoitetaan] hyödykettä, tilaa, laitteistoa, verkostoa tai järjestelmää tai osaa hyödykkeestä, tilasta, laitteistosta, verkostosta tai järjestelmästä, joka on välttämätön keskeisen palvelun tarjoamiseksi. (EU 2022/2557)

CER-direktiivissä keskeinen palvelu on edelleen määritelty palveluksi, joka:

... on olennainen välttämättömien yhteiskunnan toimintojen, taloudellisen toiminnan, kansanterveyden, yleisen turvallisuuden tai ympäristön ylläpitämiseksi. (EU 2022/2557)

Eri määritelmillä on siis selkeitä yhtymäpintoja toisiinsa sekä käsitteen ensimmäiseen määritelmään. Myös sektoriperustaisessa lähestymistavassa on samankaltaisuuksia. Esimerkiksi CER:ssä direktiivin liitteessä on määritetty 11 toimialaa, jotka luokitellaan kriittisiksi, ja joita direktiivi koskee (EU 2022/2557). Näitä ovat energia (sähkö, kaukolämmitys ja -jäähdytys, öljy, kaasu, vety), liikenne

(ilma-, raide-, vesi-, tieliikenne ja julkinen liikenne), pankkiala, rahoitusmarkkinoiden infrastruktuuri, terveys, juomavesi, jätevesi, digitaalinen infrastruktuuri, julkishallinto, avaruus ja elintarvikkeiden tuotanto, jalostus ja jakelu. (EU 2022/2557) USA:n kyberpuolustusvirasto CISA (Cybersecurity & Infrastructure Agency) sisällyttää puolestaan kriittiseen infrastruktuuriin 16 sektoria. Näitä ovat

- kemia (chemical sector)
- kaupalliset tilat (commercial facilities)
- viestintä (communications sector)
- kriittinen teollisuus (critical manufacturing)
- padot (dams sector)
- puolustusteollisuus (defense industrial base sector)
- pelastuspalvelut (emergency services sector)
- energia (energy sector)
- finanssi (financial services sector)
- ruoka ja maatalous (food and agriculture sector)
- julkinen hallinto (government facilities sector)
- terveydenhuolto (healthcare and public health sector)
- informaatioteknologia (information technology sector)
- ydinvoima (nuclear reactors, materials and waste sector)
- liikenne (transportations systems sector), sekä
- vesi- ja jätevesihuolto (water and wastewater systems). (CISA, 2024)

Suomessa kriittinen infrastruktuuri on perinteisesti linkitetty kokonaisturvallisuuden toimintamalliin. Sen tavoitteena on ylläpitää yhteiskunnan välttämättömiä toimintoja julkisen ja yksityisen sektorin sekä kolmannen sektorin ja kansalaisten välisenä yhteistyönä. Yhteiskunnan turvallisuusstrategiassa (YTS) esitellään toiminnot, jotka on kyettävä ylläpitämään kaikissa tilanteissa. (Wigell ym. 2022) Näihin sisältyvät johtajuus; kansainvälinen ja EU-toiminta; puolustuskyky; sisäinen turvallisuus; talous, infrastruktuuri ja huoltovarmuus; väestön toimintakyky ja palvelut; henkinen kriisinkestävyys. (Turvallisuuskomitea, 2017)

Mitä muuta kriittiset perusrakenteet ja infrastruktuuri ovat, kuin esimerkiksi turvallisuusviranomaisten sekä lainsäädännön tärkeäksi tunnistamia sektoreita ja toimialoja? Star kuvaa (1999) infrastruktuurille useita erilaisia, laadullisia piirteitä. Starin mukaan infrastruktuuri on esimerkiksi imeytynyt osaksi muita rakenteita, sosiaalista järjestystä sekä teknologioita. Se sekä muotoutuu käyttäjäyhteisönsä käytänteiden mukaan, että myös muokkaa käyttäjien käytöstä. Infrastruktuuri ei kasva tyhjän päälle vaan sitä rajoittaa eräänlainen ns. perustuksen inertia. Infrastruktuuri myös tulee näkyväksi silloin, kun se hajoaa, ja on rakenteeltaan suuri, kerroksellinen sekä kompleksinen, eikä sitä voi muuttaa ylhäältä alaspäin. (Star, 1999, 380–382) Modernit yhteiskunnat talouksineen ovat myös riippuvaisia tuotteiden ja palvelujen, ihmisten ja tiedon nopeasta, turvallisesta ja luotettavasta liikenteestä. (Little, 2009, 27).

Käsite *infrastruktuuuri* luo ihmisille usein mielikuvan fyysisistä rakenteista. Fyysisiä rakenteita voivat olla esimerkiksi rautatiekiskot, voimalaitokset ja johtimet. (Star, 1999, 380). Kun tarkastellaan infrastruktuurien toimintaa häiritsevää epävarmuutta, niitä voidaan Silvastin ja Virtasen mukaan (2013) tutkia teknologisin järjestelminä tai systeeminä. Esimerkiksi energiainfrastruktuuuriin sisältyvät teknologiset elementit, kuten sähkönjakelutekniikka, mutta myös yhtiöt, lait ja standardit. (Silvast & Virtanen, 2013) Kriittinen infrastruktuuuri on siis ennen kaikkea systeeminen kokonaisuus, ei vain kokoelma yksittäisiä näkyviä rakenteita

Infrastruktuuuri siis yhdistyy usein ihmisten mielissä esimerkiksi keskitettyihin voimajärjestelmiin, suuriin yrityksiin ja investointiprojekteihin. Laaja-alaiset infrastruktuurit eivät kuitenkaan ole olemassa vain kyetäkseen ylläpitämään elämää tässä ja nyt, vaan myös kohtaamaan tulevaisuuden tarpeita. Erilaisten käytänteiden ja rakenteiden väliset suhteet eivät myöskään ole luonteeltaan pysyviä. (Shove ym. 2019, 3–5) Esimerkiksi Grahamin mukaan (2009, 2) riippuvaisuus toimivista urbaaneista infrastruktuureista kasvaa entisestään kaupungistumisen myötä. Vielä muutama kymmenen vuotta sitten globaali internet oli merkityksellinen lähinnä harrastelijoille, mutta nyt sen varassa on merkittävä määrä muita kriittisiä toimintoja.

Kriittistä infrastruktuuria koskeva keskustelu rajautuu helposti koskemaan fyysistä todellisuutta. Eritoten rakenteiden turvaamisen kontekstissa on ymmärrettävä, että perusrakenteisiin kuuluvat laajemmin myös immateriaaliset tekijät ja resurssit. Kriittisen infrastruktuurin eli yhteiskunnan toiminnan kannalta välttämättömien palvelujen hengen mukaisesti rakenteet on hyvä käsittää laajassa mielessä sisältäen sekä teknologisia rakenteita fyysisessä maailmassa, käytänteitä ja immateriaalisia tekijöitä, tietojärjestelmiä kyberulottuvuudessa kuin näitä kaikkia operoivia ihmisiäkin (ks. esim. Silvast & Virtanen, 2013). Myös Shove ym. (2019, 210) korostaa, että rakenteiden luonne ei ole vain materiaallinen, vaan siihen liittyvät sekä valtioiden, yritysten, asukkaiden ja kuluttajien tahtotila ja toimet. Materiaalinen sekä immateriaalinen luonne tekevätkin perusrakenteiden turvaamisesta hyvin epäselvän kokonaisuuden.

2.2.2 Perusrakenteiden suojaus, resilienssi ja riskit

Kriittisten rakenteiden tunnistamista seuraava askel on, miten niitä suojataan. Suojaaminen, hallinta ja varautuminen korostuvat Silvastin & Järvisen mukaan (2013) erityisesti laajojen infrastruktuurisysteemien yhteydessä: niiden toimintaan vaikuttavat monet tapahtumakulut eri aikajäntein. Littlen mukaan (2009, 26) rakennettu ympäristö on altis erilaisille uhkille. Uhkat voivat olla lähtöisin luonnosta, tai olla ihmisperäisiä. Niin luonnolliset uhkat (maanjäristykset, tulvat, äärimmäiset tuuliolosuhteet, lumi ja jää, vulkaaninen aktiivisuus, maanvyörymät, tsunamit ja metsäpalot) kuin ihmisperäinen toiminta (terrorismi, suunnitteluvirheet, vanhenevat komponentit, puutteellinen huolto, ja niin edelleen) muodostavat jonkinlaisen uhkan kriittisille perusrakenteille. (Little, 2009, 26)

Aiempiin häiriöihin kohdistunut analyysi on parantanut kyvykkyyttä enustaa ja selviytyä tulevista häiriötilanteista. Uusia häiriöitä on kuitenkin

odotettavissa myös tulevaisuudessa. (Little, 2009, 26) Perrow'n mukaan (1984, 70) erilaisten tapausten (incident) ja onnettomuuksien sekä komponenttien haajoamisen ohella tulisi keskustella *systemionnettomuuksista*, joissa esiintyy useiden eri häiriöiden odottamatonta vuorovaikutusta. Alkhaleel puolestaan korostaa (2024), että häiriöitä tapahtuu säännönmukaisesti huolimatta siitä, että valtiot ja teollisuus pyrkivät aktiivisesti parantamaan rakenteiden resilienssiä. Häiriöiden taustalla ovat niin luonnonkatastrofit, äärimmäiset sääilmiöt, kyberhyökkäykset, terrorismi ja muut ihmis- tai ympäristölähtöiset tekijät. (Alkhaleel, 2024)

Monissa valtioissa perusrakenteiden turvaamista tavoittelevaa työtä kutsutaan kriittisen infrastruktuurin suojaukseksi (*Critical Infrastructure Protection*). Kriittisen infrastruktuurin suojaaminen on Naton USA:ssa 1990-luvulla levittämä käsite, jonka laajentuneen suosion taustalla oli havainto infrastruktuurien sektoreiden entistä vahvemmassa sidoksesta toisiinsa. (Hagelstam 2005) Kriittisen infrastruktuurin suojaaminen merkitsi alun perin vaikutusten hallintaa (consequence management) esimerkiksi luonnonkatastrofien jäljiltä. Myöhemmin alettiin kiinnittää huomiota myös haavoittuvaisuuteen terrori-iskuille. Huolenaiheena olivat eritoten suojaamattomat rakenteet. Kuitenkin vasta syyskuun 11. päivän World Trade Center (WTC)-terrori-iskujen jälkeen kriittisen infrastruktuurin ja sen suojelun määrittelyä laajennettiin ja tarkennettiin. (Lewis 2020, 1–6) Myös Nato alkoi keksittyä kriittisen infrastruktuurin suojaamiseen liittyviin toimiin WTC-iskujen jälkeen (Hagelstam 2005).

Kriittisen infrastruktuurin ja perusrakenteiden suojaus on usein valtiojohtoista. Esimerkiksi Suomessa elintärkeiden toimintojen suojausta johtaa ja valvoo valtioneuvosto ja työtä toteuttaa kukin toimivaltainen ministeriö omalla hallinnonalallaan. Perusrakenteiden turvaamisesta puolestaan vastaa erillinen valtiolinainen toimija Huoltovarmuuskeskus, joka on perustettu vuonna 1992. Huoltovarmuuskeskus myös ylläpitää Suomen kriisiajanvarmuusvarastoja. (Hagelstam, 2005) Suomalaisessa keskustelussa ja kontekstissa huoltovarmuus tarkoittaa Huoltovarmuuskeskuksen mukaan:

...varautumista mahdollisiin kriiseihin ja häiriötilanteisiin sekä jatkuvuudenhallintaa turvaamalla elintärkeät toiminnot, jotta yhteiskunta ja elinkeinoelämä toimivat ja ihmiset voivat turvallisesti elää arkeaan. (Huoltovarmuuskeskus, 2023)

Huoltovarmuuden turvaamisesta annetun lain (18.12.1992/1390) mukaan huoltovarmuustoiminnan tarkoituksena on

...poikkeusolojen ja niihin verrattavissa olevien vakavien häiriöiden varalta turvata väestön toimeentulon, maan talouselämän ja maanpuolustuksen kannalta välttämättömät taloudelliset toiminnot ja niihin liittyvät tekniset järjestelmät. (Laki huoltovarmuuden turvaamisesta 18.12.1992/1390).

Huoltovarmuuden määrittelyssä suomalaisessa kontekstissa on siis kolme keskeistä elementtiä. Huoltovarmuusajattelu rakentuu, tai sitä perustellaan, ennen kaikkea kriisien ja häiriötilanteiden mahdollisuudella. Huoltovarmuusajattelun voidaan näin ollen nähdä sisältävän sellaista toimintaa ja toimintaympäristöanalyysia, jossa ymmärretään mahdollisia ja todennäköisiä

vaaratilanteita ja riskejä, ja jossa niitä pystytään jollakin tavalla suhteuttamaan toinen toisiinsa. Huoltovarmuuden kontekstissa keskitytään eritoten vakaviin häiriötilanteisiin ja kriiseihin, ei tavanomaisiin ja pienimuotoisiin häiriöihin.

Toinen keskeinen elementti liittyy kysymykseen *mikä on välttämätöntä?* Huoltovarmuuden määritelmässä korostetaan välttämättömien toimintojen ja teknisten järjestelmien toimivuutta vakavissa häiriötilanteissa. Välttämättömien palvelujen ja järjestelmien tunnistaminen johdattaa kolmanteen elementtiin, *varautuminen ja jatkuvuudenhallinta*. Huoltovarmuusajattelussa on siis paitsi tunnistettava keskeiset vakavat riskit ja häiriötilanteet, myös määriteltävä ne sektorit ja toiminnot, joiden toiminnan on jatkuttava mahdollisimman häiriöttä myös vakavimmissa poikkeustilanteissa. Infrastruktuurit itsessään eivät ole kriittisiä, vaan infrastruktuurien mahdollistamat toiminnot ovat. Jotta nämä toiminnot voidaan turvata, on selvitettävä niihin liittyvien järjestelmien jatkuvuuden ja toimivuuden kannalta välttämättömät osat ja komponentit (Hagelstam, 2005). Huoltovarmuuteen viitataan englanniksi käsitteellä *security of supply*, jolle ei ole olemassa laajasti hyväksyttyä määritelmää (Nepal & Jamasb, 2013).

USA:ssa viranomaiset ovat kehittäneet suojausajattelua entistä enemmän sektoriperustaisesta tarkastelusta kriittisten toimintojen tunnistamiseen. Lähestymistavassa pyritään tunnistamaan toimintoja (*National Critical Functions*), joiden toimimattomuus tai muunlainen toiminnan katkeaminen synnyttäisi vakavia vaikutuksia esimerkiksi kansalliselle turvallisuudelle. Toimintoja voidaan jaotella neljään kategoriaan vapaasti suomentaen: yhteydet (connect), jakelu (distribute), hallinto (manage) ja tarjonta (supply). Esimerkiksi sateelliittiverkon tarjoaminen on kriittinen toiminto yhteys- kategoriassa, jakeluun voidaan puolestaan lukea esimerkiksi sähkönjakelu ja hallintoon vaalien järjestäminen. Tarjontakategoriassa on puolestaan monien hyödykkeiden ja palveluiden tuotanto ja tarjonta. (mm. Prier ym. 2023)

Valtiojohtoista lähestymistapaa kriittisten rakenteiden suojaamiseen voidaan pitää mielenkiintoisena. Kriittiset infrastruktuurit ovat kehittyneet toisistaan riippuvaisiksi, monimutkaisiksi järjestelmiksi, jotka kuuluvat monille eri omistajille. Yksittäinen hallintoelin ei siis käytännössä voi järjestää niiden suojausta. (Hagelstam, 2005) Koska kriittiset perusrakenteet ovat kompleksisia adaptiivisia systeemeitä, niiden keskusjohtomallinen turvaaminen ja suunnitteleminen ei välttämättä ole toimivin strategia (vrt. esim. Rinaldi ym. 2001). Taus-talla lienee ajatus siitä, että kompleksinen adaptiivinen systemi koostuu lopulta itsenäisistä toimijoista ja muutostekijöistä, joita yksittäisen tahon on sellaisenaan vaikea kontrolloida tai johtaa.

Lähinnä vain Suomessa käytetyssä huoltovarmuuden käsitteessä on vahva rajapinta resilienssin käsitteeseen. Yleisen näkemyksen mukaan resilienssin käsitteen tausta on ekologiassa, ja sillä on alun perin viitattu nimenomaisesti ekologisiin systeemeihin. (Rehak ym. 2018) Resilienssin tunnetun määritelmän mukaan (Holling, 1973) käsitteellä viitataan jonkin järjestelmän kykyyn absorboida tai vastustaa häiriöiden tai muiden stressitekijöiden vaikutuksia ilman muutoksia järjestelmän toiminnassa. Usein juuri Hollingin määritelmään on viitattu

resilienssin ensimmäisenä määritelmänä. Alexander (2013) haastaa tämän näkemys, sillä resilienssi-käsitettä tiedetään käytetyn jo 1600-luvulla (OED, 2024). Sanan juuret ovat latinankielisessä *resiliere*-sanassa, jonka voisi suomentaa ”ponnahtaa takaisin”. (Alexander, 2013)

Resilienssiä analysoidaan hyvin eri tavoin eri tieteenaloilla. Esimerkiksi kriittisten perusrakenteiden kohdalla resilienssi on jonkinlainen tavoitetila, kun taas ekologiassa työväline, jolla oppia järjestelmän kyvystä reagoida erilaisiin häiriötekijöihin. (Rehak ym. 2018a; Rehak ym. 2018b) Rehak ym. (2018a) mukaan kriittisen infrastruktuurin elementtien resilienssi määrittelee sen yhteiskunnalle tarjoamien palvelujen ja hyödykkeiden luotettavuutta. Resilienssiä voidaan myös kuvata laaduksi, joka vähentää elementin haavoittuvuutta, absorboi itseensä mullistavien tapahtumien vaikutuksia, parantaa yleisesti kykyä vastata ja toipua niistä sekä edistää sopeutumista jo aiemmin koettuihin mullistaviin tapahtumiin. (Rehak ym. 2018a; Rehak ym. 2018b)

Resilienssiajattelussa kiinnitetään paljon huomiota keskinäisriippuvuuksiin. Rinaldi ym. (2001) jakaa keskinäisriippuvuudet neljään kategoriaan: fyysiset keskinäisriippuvuudet, riippuvaisuudet kyberulottuvuudessa, maantieteelliset keskinäisriippuvuudet ja loogiset keskinäisriippuvuudet. Fyysiset keskinäisriippuvuudet tarkoittavat tilanteita, joissa riippuvaisuus liittyy esimerkiksi tiettyyn materiaalivirtaan. Kyberriippuvuuksissa keskinäisriippuvuus liittyy tietoon ja tietojärjestelmiin. Maantieteellisissä riippuvuuksissa infrastruktuurit sijaitsevat maantieteellisesti lähellä toisiaan ja voivat sen vuoksi vaikuttaa toinen toisiinsa esimerkiksi alueellisen häiriön yhteydessä. Loogisissa keskinäisriippuvuuksissa riippuvaisuus perustuu johonkin muuhun kuin kolmeen edellä mainittuun, esimerkiksi sosiaalisiin kytköksiin toimijoiden välillä. (Rinaldi ym. 2001)

Resilienssiajattelun taustalla on arvioitu olevan 2000-luvun puolivälin havainnot infrastruktuurin ja resurssien täydellisen suojaamisen mahdottomuudesta. (Lewis, 2020, 2) Vaikka sille ei ole yleisesti hyväksyttyä määritelmää, resilienssillä usein viitataan kykyyn varautua ja mukautua muuttuviin olosuhteisiin sekä toipua nopeasti erilaisista muutoksista. (esim. Lewis 2020, 2; The White House 2013) Resilienssin käsite vaikuttaa siis ilmaantuvan keskusteluun muutoksen ja epävarmuuden hetkillä. Järjestelmiltä odotetaan ”joustokykyä” riskien varalta, kun ei täysin tiedetä, mihin kaikkeen ja millaisiin häiriöihin yhteiskuntien pitäisi varautua, ja miten olosuhteet tulevat muuttumaan.

Ulrich Beckin mukaan riskit eivät ole modernin ajan ilmiö, vaan niitä on ollut olemassa aina. Beck kuitenkin nostaa esille riskien luonteen muutoksen henkilökohtaisista riskeistä globaaleiksi vaaroiksi. Siinä, missä sanan ”riski” konnotaatio aiemmin kuvasti rohkeutta ja seikkailua, se nykyään voidaan yhdistää jopa kaiken elämän tuhoon maapallolla. Ulrich Beckin käsitteellistämässä riskiyhteiskunnassa modernisaation luomia riskejä pyritään hallitsemaan, estämään ja minimoimaan niin, että ne eivät haittaa kehitystä tai ylitä esimerkiksi luonnon kantokykyä. Beck kuvaa riskiyhteiskuntaa uudeksi paradigmaksi. Siinä, missä Karl Marx ja Max Weber teoretisoivat käsitteitä, kuten ”teollinen” ja ”luokkayhteiskunta”, sekä pyrkivät yhteisesti tuotetun varallisuuden legitiimiin jakamiseen, riskiyhteiskunnassa ei huolehdi vain ihmiskunnan perinteisistä

huolista vaan koko teknoekonomisen kehityskulun synnyttämistä ongelmista. (Beck, 1986, 19–20) Beckin riskiyhteiskunta-ajattelussa on tunnistettavissa resilienssiajattelun piirteitä.

O'Malleyyn mukaan riskiyhteiskunnasta puhuminen on kuitenkin latteaa (O'Malley, 2004, 1). Beckin ajattelu on silti vanhentunut vain vähän. O'Malleyyn mukaan (2004, 2) riskiyhteiskuntateoriassa keskeistä on hahmottaa muuttunut maailma ja sen uudet, ennakoimattomat ja katastrofaaliset, laskennallisesti määrittelmättömät riskit. Riskiyhteiskuntateorian modernisaatioriskit syntyvät modernin yhteiskunnan onnistumisesta. Niiden kompleksisen luonteen sekä harvan esiintyvyyden takia riskipohjaiset ennakkovaroituskäytännöt ovat merkityksettömiä. (O'Malley 2004, 2–3) Kriittisten rakenteiden turvaamisen lähtökohdat ovat siis hyvin haastavat: kompleksiset järjestelmät ovat yhä vaikeammin hallittavissa, järjestelmät jatkuvassa muutoksessa ja riskien torjuminen osaltaan myös niiden parempaa ymmärrystä ja sietokykyä.

2.3 Energiajärjestelmät kriittisinä perusrakenteina

Energiajärjestelmät ovat näkymätön välttämättömyys. Siinä, missä esimerkiksi sähköjakelun katkeamisen vaikutukset näkyvät sekunnin murto-osissa, ihmisillä on yhä kehnompaa ymmärrystä siitä, millaisin rakentein sähköjärjestelmää varsinaisesti ylläpidetään. Tutkimuksen perusteella voidaan lisäksi perustellusti väittää, että järjestelmät ovat muuttumassa yhä kompleksisemmiksi, ja niiden häiriönsietoisuudesta tulee vielä aiempaakin kriittisempi ominaisuus.

Seuraavissa osioissa käsitellään energiajärjestelmää, eritoten sähköjärjestelmiä, systeemisestä näkökulmasta sekä pohditaan niiden häiriönsietoisuutta yleisellä tasolla. Lopuksi osio kiteytetään energiajärjestelmien muutoksen käsitteilyyn. Osion tavoitteena on luoda yleissilmäys kompleksisten energiajärjestelmien tutkimukseen, jossa laajemmassa kontekstissa on tunnistettavissa ainakin tieteen ja teknologian tutkimuksen kenttä, tekniseen kompleksisuuteen ja häiriöihin liittyvät suuntauksat, toimijaverkkoteoria sekä systeemijattelu ja systeemien muutos.

2.3.1 Energiajärjestelmät kompleksisina systeemeinä

Energiajärjestelmää voidaan tarkastella kompleksisena, verkottuneena järjestelmänä. Kompleksinen energiajärjestelmä rakentuu suuresta määrästä yksilöitä (elementtejä) ja vuorovaikutuksesta niiden välillä. Lisäksi järjestelmässä on erilaisia solmukohtia (node), jotka energiajärjestelmän kontekstissa voivat tarkoittaa erilaisia tuotantolaitoksia tai kuluttajia, ja yhteyksikohtia (edge), jotka voivat olla esimerkiksi sähkösiirtolinjoja (Sun & Tang, 2014). Sähköön liittyvät fyysiset elementit eli siirtolinjat ja muuntajat muodostavat sähköjärjestelmän, joka on perinteinen aihe tieteen ja teknologian tutkimuksessa (Science and Technology Studies, STS). Silvastin ja Järvisen mukaan (2014) aihetta on kirittänyt

eritoten historioitsija Thomas P. Hughes sähköistymistä koskevalla työllään. (Silvast & Järvinen, 2014)

Yleisellä tasolla teknologiset järjestelmät koostuvat kompleksisista komponenteista. Energiasektorilla näitä ovat, kuten edellä mainittiin, erilaisten generaattoreiden, muuntajien ja siirtolinjojen kaltaiset fyysiset rakenteet. Kuitenkin myös organisaatiot sekä lainsäädännölliset kehykset ovat osa teknologisia järjestelmiä. (Hughes, 2012, 45) Onkin hyvä huomata, että teknologisten järjestelmien, kuten sähköjärjestelmän, kompleksisuus perustuu itse asiassa sekä tekniseen kompleksisuuteen että ns. organisatoriseen tai toimijaverkkoihin liittyviin kompleksuuksiin. Powellin mukaan (2014) koko sähköjärjestelmän toiminta kokonaisuutena on erilaisten kompleksisten prosessien ja riippuvaisuuksien varassa. Sähköjärjestelmän jatkuvuus edellyttää systeemiä, jossa keskenään kompleksisesti vuorovaikuttavat komponentit, tuotanto, siirto, varastointi sekä kuormanhallintajärjestelmät ovat hallinnassa. Järjestelmän toimintaa mutkistaa sähköön varastoinnin hankaluus. (Powell, 2014) Viime kädessä näiden kompleksisten prosessien hallinta kulminoituu niitä valvoviin toimijoihin eli ihmisiin.

Van der Vleuten & Kaijser kuvaavat erilaisten verkottuneiden teknologioiden kehitystä eräänlaiseksi jatkumoksi, jossa ensiksi tulivat tiet ja vesiyhteydet (1700-luku), sitten rautatie- ja sähkötyshytydet (1800-luku), ja 1900-luvulla merkittävässä määrin sähkö- ja autoinfrastruktuuri sekä näihin liittyvät verkostot. 2000-luku on puolestaan ollut tietoteknisten yhteyksien kehityksen aikaa. Van der Vleutenin ja Kaijserin mukaan eurooppalaisten yhteiskuntien kompleksinen luonne juontaa juurensa niiden fyysisiin infrastruktuureihin. Silvastin ja Järvisen mukaan suuria systeemeitä koskeva keskustelu on kuitenkin varsin heterogeenistä. (Van der Vleuten & Kaijser, 2006; Silvast & Järvinen, 2014) Silvast ja Järvinen erottavat kuitenkin kaksi suuntausta suurilla teknisiä energiajärjestelmiä koskevasta tutkimuksesta:

- Ensimmäisen tulokulman mukaan esimerkiksi sähköön kaltaiset infrastruktuurit ovat hauraita, epävarmoja ja käytännöllisiä aikaansaannoksia.
- Toisessa tulokulmassa niitä tarkastellaan systeemisisissä, kulttuurillisissa ja yhteiskunnallisissa konteksteissa, jotka eivät välttämättä ilmenny käytännöllisissä tilanteissa.

Energiajärjestelmiin kompleksisina systeemeinä liittyy monia mielenkiintoisia epävarmuuksia ja keskustelua herättäviä väitteitä. Esimerkiksi joidenkin väitteiden mukaan systeemitutkimuksessa keskitytään yhteyksiin vähemmän kuin solmukohtiin. Vaikka sekä solmu- että yhteyshkohdat ovat tärkeitä komponentteja kompleksisessa järjestelmässä, ei ole selvää, millä yhteyshkohdilla on koko järjestelmän toiminnan kannalta kriittisin merkitys. Solmukohtien kriittisyys on helpompaa tunnistaa, sillä yhden solmukohtan jääminen pois katkaisee samanaikaisesti useita yhteyksiä. (Ouyang ym. 2018) Periaatetta voi havainnollistaa esimerkiksi sähkönsiirron kantaverkon ja siihen kytkeytyneiden sähkö- ja kytkinasemien kautta. On selvää, että sähköasema, johon saapuu ja josta lähtee useita johtoyhteyksiä, on kriittinen solmukohta sähköverkossa. Sen

tuhoutuminen johtaisi kaikkien siihen saapuvien ja siitä lähtevien yhteyksien katkeamiseen. Ei puolestaan ole yhtä helppoa sanoa, mikä asemalle saapuvista johtoyhteyksistä on enemmän, ja mikä vähemmän kriittinen, tai millaiset vaikutukset niiden tuhoutumisella olisi. Johtoyhteyden kriittisyys voi riippua esimerkiksi siitä, millaista kulutusta sen takana on.

2.3.2 Energiajärjestelmien häiriönsietoisuus

Energiajärjestelmiä voidaan perustellusti pitää modernin infrastruktuurin pääajureina. Kaikki yhteiskunnan toiminnot ovat riippuvaisia energiasta, jonka globaali kysyntä nousee. Perinteisesti yhteiskuntien energiantarve on turvattu keskitetyllä tuotannolla. Voimalaitokset ovat esimerkiksi suunniteltu tuottamaan sähköä isoilla asutuskeskittymille jopa tuhansien kilometrien päähän kompleksisen jakelujärjestelmän välityksellä. (Nadeem ym. 2023)

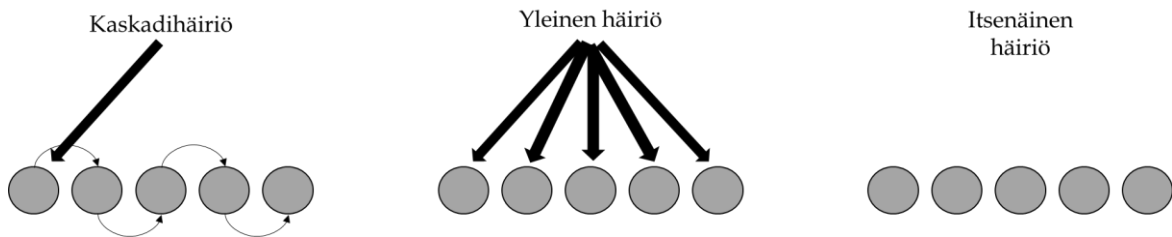
Sähköverkko on paitsi modernin yhteiskunnan tärkeimpiä rakenteita, myös erittäin haavoittuvainen. Sähkön jakeluun liittyviä epävarmuuksia pyritään minimoimaan haavoittuvuuksia ymmärtämällä. (Silvast & Virtanen, 2013) Sähköjärjestelmän vikaantumiseen tai merkittäviin sähkönjakelun häiriöihin johtavia tilanteita sekä näihin liittyviä uhkatekijöitä onkin tutkittu paljon. Esimerkiksi äärimmäiset sääilmiöt, eritoten kovat tuuliolosuhteet ovat merkittävä voimajärjestelmän häiriöihin vaikuttava tekijä. (Jasiunas ym. 2023) Erilaisia uhkia eli potentiaalisia häiriöitä tai onnettomuuksia aiheuttavia tekijöitä ovat myös esimerkiksi erilaisten sähköjärjestelmän komponenttien hajoamiset, jotka voivat johtaa pahimmillaan jopa koko verkon kaatumiseen. (Bombard ym. 2013)

Koska häiriöitä esiintyy kaikissa järjestelmissä, myös keinot häiriöistä palautumiseksi ovat kriittisiä (Perrow, 1984, 95). Näin ollen ei ole yllättävää, että resilienssin käsite on käytössä myös energiajärjestelmien osalta. Taustalla ovat erityisesti ilmaston lämpenemisen aiheuttamat äärimmäiset sääilmiöt, joiden ilmaantuvuus on tietävästi lisääntynyt. Tutkimuksessa voimajärjestelmien resilienssin analyysissa kiinnostuksen kohteina on laaja kirjo niin sanottuja HILP-häiriöitä (High Impact Low Probability, suuri vaikutus mutta matala todennäköisyys), kuten luonnonolosuhteisiin perustuvat häiriöt ja ihmislähtöinen toiminta. (Caro & Vaccaro, 2022)

Perinteisesti voimajärjestelmään kohdistuvat uhkatekijät on luokiteltu luonnonuhkiin ja onnettomuuksiin. Luonnonuhkia ovat esimerkiksi meteorologiset ja geologiset uhkatekijät. Onnettomuuksia voivat olla esimerkiksi huoltovirheet tai -häiriöt tai komponenttien vikaantumiset. Yhä enemmän huomiota on alettu kiinnittämään viheliäisiin (malicious) uhkiin, kuten kyberhyökkäyksiin, mellakointiin tai tuotteiden peukalointiin tai räjäytyksiin. (Bombard ym. 2013) 2000-luvulla tapahtuneet laajalle levinneet sähkökatkoja eri puolilla maailmaa ovat johtaneet järjestelmien palautukseen kohdistuvien toimenpiteiden lisääntymiseen. Sähkönjakelun ja järjestelmän palautus normaalitilaan osittaisen tai täydellisen romahtamisen jälkeen on kompleksinen prosessi, joka on täynnä epälineaarisuutta ja epävarmuuksia. (Liu ym. 2016)

Sähköjärjestelmän resilienssin kannalta kiinnostavia tekijöitä ovat siis sekä uhkatekijät, niiden synnyttämät häiriöt, että tapahtuneista häiriöistä

palautuminen. Tutkimuksessa sähköjärjestelmän uhkien osalta korostetaan myös erilaisia ns. kaskadiuhkia ja -häiriöitä. (ks. esim. Sun & Tang, 2014) Kaskadihäiriöllä tarkoitetaan ns. dominoefektia eli tilannetta, jossa häiriö leviää laajalle systeemiin ketjureaktiona. Erityisesti energiahuoltoon liittyvät häiriöt voivat käynnistää kuvattuja ketjureaktioita. Kaskadihäiriöissä vaikutus ketjuuntuu, kun taas yleisen häiriön taustalla on sama, kaikkiin sektoreihin vaikuttava uhkatekijä, esimerkiksi tulva. Itsenäisissä häiriöissä taustatekijöillä ei ole keskinäistä yhteyttä. (Prier ym. 2023) Hughesin mukaan (2012, 47) teknologisiin järjestelmiin liittyykin kahdenlaisia ympäristöjä: kyseisestä järjestelmästä riippuvaisia, ja niitä, joista kyseinen järjestelmä on riippuvainen. Kuviossa 2 on esitetty havainnollistus kaskadihäiriöistä sekä yleisistä ja itsenäisistä häiriöistä.



KUVIO 2 Kaskadihäiriöiden, yleisten häiriöiden ja itsenäisten häiriöiden ero. Kuva muokattu lähteestä Prier ym. (2023).

Sähkö- ja energiajärjestelmät kehittyvät kohti älykkäämpiä kokonaisuuksia. (esim. Bombard ym. 2013) Ihmisillä ja ihmisten työpanoksella on kuitenkin yhä merkittävä rooli häiriöiden ehkäisemisessä ja niistä toipumisessa. Antti Silvast tutki väitöskirjassaan sähköjakelun häiriöiden ennakoitua ja hallintaa riskeinä sekä haastatteluin että etnografisin menetelmin. Silvastin tutkimuksessa tarkasteltiin empiirisesti riskienhallintaan liittyviä järjestytyylejä ja hallintatekniikoita suomalaisesta näkökulmasta. Sähköjärjestelmän riskienhallinnan erityisiin toimintatapoihin kuuluvat Silvastin mukaan muun muassa sähkövalvomoiden reaaliaikainen riskimonitorointi ja kilpailulle vapautettujen sähkömarkkinoiden riskienhallinta. (Silvast, 2013) Huolimatta siis teknologisesta kehityksestä, järjestelmän nykytilan valvonta on yhä lopulta ihmisten ympärivuorokautisen työpanoksen käsissä.

Resilienssijattelussa sekä häiriöihin varautumisessa tunnistetaan riskejä ja arvioidaan niiden vaikutuksia. Riskienhallintaa on tehty jossakin muodossa hyvin kauan (mm. Perrow, 1984, 307). Erityisen pitkät perinteet sillä on energiasektorilla. Morison ym. (2004) ovat arvioineet ja luokitelleet sähköjärjestelmän häiriöihin johtavia tekijöitä ja ominaisuuksia, jotka voivat edesauttaa niiden syntymistä. Yhteenveto tekijöistä sekä arvioiduista on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2 Sähköjärjestelmän häiriöiden ominaisuuksia ja vaikutuksia (Morison ym. 2004).

Ominaisuus	Mahdollinen vaikutus
Vanheneva siirtoinfrastruktuuri	Komponenttien hajoamisen ja toimimattomuuden todennäköisyys kasvaa, mikä voi johtaa järjestelmätason häiriöihin.
Uuden siirtoinfrastruktuurin puute	Siirtojärjestelmien ylikuormitus, joka voi mm. myötävaikuttaa jännitteen romahtamiseen; pullonkaulojen syntyminen
Järjestelmän ylläpidon leikkaukset	Komponenttiviaat ja häiriöt, mm. puiden leimahdukset
Lisääntynyt riippuvaisuus erityisistä hallinta- ja suojausjärjestelmistä	Suojausten ja erityisten suojausjärjestelmien tahattoman virheellisen toiminnan todennäköisyys kasvaa; ns. kaskaditapahtumien arvaamattomuus lisääntyy
Suuri määrä pieniä levittäytyneitä generaattoreita	Järjestelmä- ja tuotantosuunnittelu vaikeutuu generaattorien hajautuksen vuoksi
Markkinalähtöinen toiminta	Verkon käyttö ja toimet vaikeita ennakoida, mikä voi johtaa ylikuormittumiseen tai huonoon dynaamiseen käyttäytymiseen; uudenlaisia vakausongelmia.
Lisääntynyt riippuvaisuus viestintä- ja tietotekniikkaratkaisuista	Ohjelmisto- ja laitteistovikojen vuoksi viestintä- ja tietotekniikkaratkaisuja ei välttämättä voida valvoa tai operoida häiriötilanteissa
Rajallinen järjestelmäsuunnittelu	Riittämättömät tai epäasianmukaiset tuotanto- ja siirtoresurssit
Suuntaus / trendi kohti yhteenliittymisiä	Altistuminen läheisten / naapurijärjestelmien aiheuttamille kaskadihäiriöille; uudenlaiset vakausongelmat
Uudet teknologiat, kuten kehittyneet hallintajärjestelmät, tuulivoima, bioenergia, polttokennot, jne.	Puutteellinen kokemus uusista dynaamisista ominaisuuksista omaavien teknologioiden käytöstä; ennakoimaton käyttäytyminen häiriöolosuhteissa
Ikääntyvä ja vähenevä työvoima	Ei tarpeeksi kokenutta henkilöstöä, mikä voi johtaa ongelmiin hätätilanteissa.

Vaikka sähköjärjestelmään liittyvillä riskeillä voi olla äärimmäisiä vaikutuksia, vakavien häiriöiden todennäköisyys ja esiintyvyys ovat hyvin matalia. Toisaalta samasta syystä näitä riskejä on vaikeaa käsitellä perinteisellä taloudellisiin vaikutuksiin keskittyvällä lähestymistavalla. (Nepal & Jamasb, 2013)

Toinen merkittävä haaste riskien ajantasaiselle seurannalle ja tunnistamiselle on järjestelmän systeeminen muutos. Muutosta ja siihen liittyviä näkökulmia energijärjestelmien osalta on esitelty seuraavassa osiossa.

2.3.3 Energiajärjestelmien muutos

Yhteiskunnan välttämättömien palvelujen turvaaminen on kompleksinen kokonaisuus. Järjestelmien kehitys on vauhdikasta, mikä on systeemien luonteen vuoksi pulmallista myös vakaviin häiriötilanteisiin varautumisen kannalta. Kuinka ymmärtää, saati turvata jonkin sellaisen järjestelmän rakenteita, jonka keskeisimmät kivijalat ja ominaisuudet tulevat muuttumaan perusteellisesti lähitulevaisuudessa, ja varmaa on vain epävarmuus?

Epäselvissä olosuhteissa toimiminen on työlästä. Jatkuvien mullistusten, turbulenttien ongelmien ja hankalasti ennakoitavien tilanteiden sietäminen vaatii riittäviä toimenpiteitä esimerkiksi julkishallinnolta (mm. Ansell ym. 2021). Samoin energijärjestelmän kehitys kohti kestävämpää ja tehokkaampaa järjestystapaa on kuvattu haasteeksi, joka edellyttää useiden tekijöiden ratkaisemista epävarmuuden vallitessa (Powell, 2014). Energiajärjestelmien muutoksen on lisäksi aiemman tutkimuksen valossa tiedetty tulevan aiheuttamaan uusia ongelmia esimerkiksi tuuli- ja aurinkoenergian tuotannon lisääntyessä. (esim. Franco & Salza, 2011) Kriittisten järjestelmien kompleksistuminen on puolestaan haaste rakenteiden suojaamiselle. Infrastruktuuri saatetaan suunnitella kestävänsä ensimmäisen kertaluvun häiriöitä, kuten maanjäristyksiä tai sabotaasia. Järjestelmien kompleksistumisen myötä niiden tulisi kuitenkin kestää lisäksi myös sekundäärisiä ja tertiäärisiä vaikutuksia: esimerkiksi vesihuollon tulisi toimia myös pitkittyneissä sähkökatkoissa. (Little, 2002; Little, 2009, 28)

Vielä ennen 1990-lukua yksittäinen yritys saattoi hallita kokonaista kaupunkia koskevaa sähkön tuotantoa ja jakelua eli sähkön koko toimitusketjua (esim. Silvast, 2019, 172). Viime vuosikymmeninä sähköjärjestelmät ovat kuitenkin liberalisoituneet ja hajautuneet. Sähkömarkkinan avautuminen kilpailulle, muutos kohti hajautettua uutta tuotantoa ja sektoreiden sekä alueiden väliset liitännät ovat lisänneet sähköjärjestelmän kompleksisuutta. (Körner ym. 2022; Nepal & Jamasb, 2013) Atputharajahin & Sahan mukaan (2009) monopolitoimintaan perustuva järjestämistapa oli varmatoimisempi, ja markkinaehtoiseen suuntaan siirtyminen on lisännyt järjestelmiin kohdistuvaa stressiä sekä heikentänyt toimintojen ennakkointikykyä. Avoimemmalla markkinalla mahdollisiin järjestelmähäiriöihin johtavia tekijöitä on enemmän ja järjestelmien kestävyys on matalampi. (Morison ym. 2004) Markkinoiden rakenne ja toiminta onkin keskeinen tekijä teknisten järjestelmien toiminnan taustalla.

Uusien teknologioiden ja järjestelmien käyttöönotto on harvoin lineaarista. Esimerkiksi siirtymä pois öljynkäytöstä ei ole ollut yhtä nopea, kuin esimerkiksi 1960-luvulla visioitiin, vaan asteittainen ja hidas. Martinin mukaan syynä on ollut geneerisiä teknologioita koskeva teknologinen kehitys, joka on suosinut hiilivetyteollisuuden ja lämpövoiman kehitystä, sekä epävakailta markkinoilla tapahtuva kilpailu, joka on pakottanut yritykset keskittymään pienempiriskisiin aloihin. (Martin, 1996) Schollin & Westphalin mukaan (2017) myös

energiasiirtymän suunta ja lopputulos ovat epävarmoja, ja se voi luoda sekä uudenlaisia riskejä että mahdollisuuksia pitkällä ja lyhyellä aikavälillä. Energiajärjestelmän muutoksessa on lisäksi tarkasteltava teknologisen muutoksen systeemistä luonnetta. Esimerkiksi teknologiaan liittyvät keskinäisriippuvuudet ja infrastruktuurin vaatimukset edellyttävät yksittäisen teknologian tarkastelua laajempaa näkökulmaa. Teknologiaan liittyvät systeemiset muutokset ovat monimutkaisia ilmiöitä: toisaalta esimerkiksi nykyisiin teknologioihin kohdistuneet resurssoinnit saattavat hidastaa uusien teknologioiden kehitystä, mutta toisaalta teknologian muutos synnyttää moninaisuutta järjestelmän sisälle johtaen ns. teknologiseen pluralismiin. (Martin, 1996)

Energiajärjestelmien kehitystä kuvataan usein positiivisin sisällöin (vrt. esimerkiksi Bombard ym. 2013 kuvaus: muutos ”älykkääksi ja puhtaaksi”). Samalla on kuitenkin hyvä huomioida, että digitalisoitu energiasektori edellyttää uudenlaista suojaamista ja esimerkiksi kyberturvallisuuden näkökulmasta kriittisen infran uudelleenarviointia. (Scholl & Westphal, 2017) Perinteisissä voimajärjestelmissä suurin osa tehosta tuotetaan isoissa ja maantieteellisesti tarkoituksenmukaisesti sijoitetuissa tuotantoyksiköissä. Tuotettu sähkö siirretään suurempiin kulutuskeskittymiin ja järjestelmää valvotaan ja hallitaan taukoamatta tehon, ennen kaikkea taajuuden ja jännitteen, laadun varmistamiseksi. Voimajärjestelmän muutos eli hajautetun ja vaihtelevan tuotannon lisääntyminen kuitenkin muuttaa järjestelmän toiminnan perusteita. Sään mukaan vaihtelevaa tuotanto on luonteeltaan hallitsematonta, ja siihen liittyy esimerkiksi voimakasta päivä- ja kausitason vaihtelua. (Blaabjerg ym. 2004)

Energiajärjestelmien murros voi haastaa sähköjärjestelmän vakautta. Esimerkiksi voimakkaasti lisääntyvä ja vaihteleva tuuli- ja aurinkoenergian tuotanto voi aiheuttaa ongelmia (mikä oli motivaatio koko tälle tutkimukselle – toim. huom.). Yhteiskunnan sähkönkäytön turvaaminen myös edellyttää jatkossa yhä enemmän sähkönsiirtoinfrastruktuuria. (Liu ym. 2016) Myös materiaalisella puolella pyrkimysten vaikutukset ovat merkittäviä. Jos esimerkiksi Suomessa korvattaisiin kaikki fossiiliset polttoaineet eli öljy, maakaasu, turve ja kivihiili, tarvittaisiin korvaavasta valitusta teknologian mukaan merkittäviä panostuksia uuteen teolliseen infrastruktuuriin. Esimerkiksi Suomen liikennesektorin sähköistämisen olisi paitsi teknisesti haastavaa, myös johtaisi fossiilittoman sähköntuotannon kaksinkertaistumiseen. Yleisesti ottaen tilanne Suomessa on kuitenkin hyvä, sillä fossiilisilla energialähteillä tuotetaan sähköä vain vähäisesti. (Michaux ym. 2023) Ja kuten Silvast huomauttaa (2017) van der Vleutenia & Kajseria lainaten (2006): myös kuluttajat ovat osa isoja systeemeitä, etenkin, jos systeemiset haasteet asettavat heille toimia, kuten käyttää sähköä, tietyllä tavalla.

3 EMPIIRINEN OSA

Turha mua tutkia maisin mainesanoiin; tieni ma vallitsen säkenöivin vanoin.
(Eino Leino, *Sähkön sävel*, 1908)

Tämän tutkimuksen empiirinen osio perustuu tuoreimpaan vertaisarvioituun tutkimukseen sekä suomalaisille energia-alan ja varautumistyön asiantuntijoille keväällä 2024 toteutettuihin haastatteluihin. Tutkimustiedon sekä haastatteluaineiston pohjalta on koottu synteesi, jonka perusteella on hahmoteltu tuulivoimajärjestelmien keskeisimpiä piirteitä tai niihin liittyviä ilmiöitä ja rakenteita vakavien häiriö- ja poikkeustilanteiden kontekstissa.

Seuraavissa osioissa on kuvattu tutkimuksen empiirisen osion menetelmät sekä tulosten keskeisimmät havainnot. Haastattelumenetelmää on kuvattu tarkemmin liitteessä 1. Systemaattisessa kirjallisuuskatsauksessa hyödynnetty PRISMA-viitekehys on kuvattu osiossa 3.2.

3.1 Tutkimusaluetta pohjustavat haastattelut

3.1.1 Menetelmä, aineiston keruu ja hakutermit

Tämä osio perustuu energia-alan sekä varautumistyön asiantuntijoille keväällä 2024 toteutettuihin haastatteluihin. Haastatteluita toteutettiin X kappaletta puolistrukturoidulla menetelmällä. Haastatteluista varten tehtiin ohjekirja, joka on esitetty liitteessä X. Ohjekirja toimi haastattelijan ohjenuorana kunkin haastattelun pohjalla.

Haastattelujen tavoitteena oli parantaa ymmärrystä tuulivoimajärjestelmää koskevista ja energiajärjestelmän kaltaisille systeemeille tyypillisimmistä tai keskeisimmistä kysymyksistä vakaviin häiriö- ja poikkeustilanteisiin liittyen. Haastattelujen tavoitteena oli lisäksi selvittää, mitkä näkökulmat, ilmiöt ja kysymykset ovat erityisen kiinnostavia tämän tutkimuksen kannalta. Haastateltavia valikoitiin siten, että haastateltavien taustat ja asiantuntemus heijastelisivat mahdollisimman hyvin kriittisen infrastruktuurin ja energiajärjestelmän kompleksista ja

systemistä luonnetta. Haastateltavien valintakriteerit on kuvattu luettelussa alla.

- Kaikilla haastateltavilla on usean vuoden tuore työkokemus suomalaisesta energiajärjestelmästä, kriittisen infrastruktuurin parissa toimimisesta tai varautumistyöstä.
- Vähintään yhdellä haastateltavalla on kokemusta energia-alan resilienssi-työn nykytilanteesta ja ymmärrystä myös tuulivoimaan liittyvistä resilienssikysymyksistä.
- Haastateltavien joukossa on vähintään yksi viranomaisedustaja tai julkishallinnon työntekijä.
- Haastateltavat seuraavat työnsä puolesta suomalaisen kriittisen infrastruktuurin tai energiajärjestelmän tilaa ja muutosta sekä ymmärtävät sen systemistä luonnetta.
- Haastateltavien joukossa on vähintään yksi taho, joka työskentelee energiasektoriin kytköksissä olevien toimintojen parissa toisella kriittisellä toimialalla tai sektorilla kuin energia-alalla.

Yllä kuvatut kriteerit rajasivat haastattelujen ulkopuolelle esimerkiksi tietyn teknologian tai tuotantomuodon operatiiviseen toimintaan keskittyneet asiantuntijat. Valinta on tehty tietoisesti, sillä tutkimusote oli systeminen, ja haastatteluilla oli tarkoituksena sekä suunnata kirjallisuuskatsauksen tiedonhankintaa että täydentää olemassa olevan tutkimustiedon havaintoja uuden toimintamallien keittämiseksi. Haastatteluilla ei näin ollen ollut tarkoitus selvittää yksityiskohtaisesti esimerkiksi teknologian keskinäisriippuvuuksia tai yksityiskohtaisia varautumiskäytänteitä. Yhteenvedo haastatteluista on esitetty taulukossa 3 ja haastattelu-havainnoista taulukossa 4.

TAULUKKO 3 Haastateltavien yhteenvedo

Haastateltava	Kuvaus
Haastateltava 1	Asiantuntija energia-alalla, yli 20 vuoden työkokemus.
Haastateltava 2	Asiantuntija energia-alalla, töissä järjestössä, yli 20 vuoden työkokemus.
Haastateltava 3	Asiantuntija energia-alalla, töissä hankekehittäjänä tuulivoimaan liittyen, neljän vuoden työkokemus energia-alalta.
Haastateltava 4	Asiantuntija valtion varautumisorganisaatiossa, yli 8 vuoden työkokemus varautumisen saralla, ei suoraa kokemusta energia-alalta.
Haastateltava 5	Väitöskirjatutkija, joka on tutkinut Suomen energiapolitiikkaa sekä turvallisuus- ja kestävyyskysymysten vuorovaikutusta, seitsemän vuoden työkokemus energia- ja turvallisuuskysymyksistä.

3.1.2 Haastattelujen havainnot

Ensimmäinen haastateltava (HAA1) korosti erityisesti sähköjärjestelmän murrosta ja siihen liittyviä epävarmuuksia. Hän kuvasi, kuinka varmatoiminen säädettävä kapasiteetti, jolla vastata huippukulutustilanteisiin, vähenee, ja sen tilalle tulee heikosti säädettävää, sääriippuvaista kapasiteettia. Toisaalta haastattelussa nousi esille yhteiskunnan sähköriippuvaisuuden lisääntyminen. HAA1 mukaan voidaan sanoa, että tuulivoimaan liittyvä kehityssuunta on yleisellä tasolla hyvä, joskin hän tunnisti tilanteessa myös riskejä:

Tuulivoiman hallinta tulee tärkeämmäksi, kun skaala kasvaa. (...) Tuulivoimaloita tehdään ulkomailla, komponentteja, myös ohjausta on ulkomailla? Mitä kyberturvallisuusriskejä tähän liittyy? Alalle tulee uusia toimijoita, hankekehittäjiä ja sijoittajia. Miten uudet toimijat varautuvat riskeihin? (Haastateltava 1)

HAA1 korosti toimijoihin ja teknologiaan liittyviä muutoksia sekä riskejä. HAA1:n mukaan tuulivoimalat ovat etävalvonnassa ja hajautettuja, eivätkä ne tuota inertiaa verkkoon, mikä on iso kontrasti perinteiseen lämpövoimaan verrattuna. Kysyttäessä varautumisesta vakaviin häiriö- ja poikkeustilanteisiin HAA1 korosti toimijoiden omaa riskienhallintaa, varautumista ja harjoittelua. Haastateltava korosti myös, että joistain kysymyksistä on puutteellinen tietopohja tällä hetkellä.

Toinen haastateltava (HAA2) korosti Suomen sähköjärjestelmän olevan osa pohjoismaista markkinaa ja olevan yhteydessä Baltian kautta myös Manner-Eurooppaan. HAA2 kertoi Suomen tuotantomuotojen olevan monipuolisia, mutta kertasi myös käynnissä olevia muutoksia:

Erilaiset kulutusjoustot ovat lisääntyneet ja lisääntymässä. Erityisesti tavallisen kulutusasiakkaan tietämys sähköasioista on lisääntynyt. Kulutusasiakkaiden kohdalla iso muutos on, että monin paikoin kuluttajat ovat myös sähkön tuottajia, erityisesti aurinkosähkön myyjä. Tämä näkyy myös sähköverkkojen suunnittelussa. (Haastateltava 2)

HAA2 korosti, että muutosten taustalla ovat muun muassa ilmastonmuutoksen torjunta ja sitä tukevat päästötavoitteet sekä energiatehokkuuden lisäämistavoitteet. HAA2 kertoi myös alueellisen näkökulman merkityksestä, kuten esimerkiksi alueellisten kulutus- ja tuotantoprofiilien aiempaa suuremmasta vaihtelusta. HAA2 totesi tuulivoiman olevan alueellisesti keskittyntä ja vaikuttavan voimakkaasti esimerkiksi alueellisten jakeluverkkojen kehittämiseen. HAA2:n mukaan tuotannon vaihtelu heijastuu sähköjärjestelmään sekä teknisten ominaisuuksien (inertian puuttuminen) että markkinatason muutosten kautta. Muiden toimijoiden on löydettävä kannattavuus muuttuneessa tilanteessa; toisaalta muutos tuo sekä tarvetta että mahdollisuuksia kulutusjoustopon ja varastointiratkaisujen kehittämiseksi.

HAA2:n mukaan nykymuotoinen tuulivoimatekniikka ei sinällään sisällä merkittäviä epävarmuuksia mutta siihen liittyvät ilmiöt, esimerkiksi

tuulivoimaloiden lapojen jäätäminen, voivat ilmastonmuutoksen seurauksena yleistyä. Toisaalta myös jäätämisenesto on kehittynyt merkittävästi viime vuosina. Yleisesti haastattelussa nousi esille toimijakenttään liittyvät huomiot sekä tietoliikenteen jatkuvuuden ja osaamisen merkitys:

Tuulivoimassa usein toteutusmalli on, että on hankekehittäjä, joka kehittää hankkeen, ja myy sen eteenpäin. Liittyykö tähän jotain tiettyjä epävarmuuksia? (...) Tuulivoimapuistoilla on suhteellisen pieni yksikkökoko ja ne ovat hajallaan ympäri Suomea. Jos on tietoliikennehäiriöitä, ja pitäisi siirtyä paikalliskäyttöön, niin miehitettäviä paikkoja on aika paljon. Miten tähän on varauduttu? Kotimaassa alkaa olla erityisosaamista, mutta onko osaamis pohja riittävä? (Haastateltava 2)

Vakavien häiriö- ja poikkeustilanteiden osalta HAA2 korosti sitä, että tuulivoimayhtiöillä on normaalit jatkuvuudenhallintasuunnitelmat, kuten muillakin yhtiöillä. Tuulipuistot ovat usein järjestelmävastaavan järjestelmäteknisten vaatimusten alaisia, ja niitä sitovat myös muut tekniset perusvaatimukset, esimerkiksi viestintäyhteyksien osalta. Tuulivoiman luonteen kannalta on HAA2:n mukaan sekä vahvuus että heikkous, että tuotanto perustuu pieniin hajallaan sijaitseviin yksiköihin. Vaikka yksittäisen tornin ”poistaminen pelistä” ei aiheuta merkittävää vaikutusta, hajautuneisuus on fyysisen turvallisuuden näkökulmasta haaste. Yleinen havainto HAA2:n mukaan on kuitenkin se, että tuulivoimassa korostuvat eritoten kyberturvallisuus ja -uhkat, sillä ohjaus tapahtuu pääosin etänä. Mielienkiintoisena lisänä HAA2 toi esille tuulipuistojen huollon, joka on täysin riippuvaista riittävästä ja kunnossa olevista huoltoyhteyksistä:

Kriittistä on tiestön kunto. Varaosat voivat olla isoja. (..) Tuulipuistot sijaitsevat hajallaan ja erilaisten yksityisteiden päässä. (Haastateltava 2)

Haastateltava 3 (HAA3) oli haastatelluista ainoa, joka työskenteli tuulivoimaan keskittyvässä yhtiössä. HAA3 kuvaili kahden ensimmäisen haastatellun tapaan sähköjärjestelmän olevan voimakkaassa uudistuksessa, ja verkon olevan paikoin ns. täysi eli lisääntyneen tuotannon synnyttäneen pullonkauloja, joiden poistaminen voi kestää jopa vuosia. Tuotanto on HAA3:n mukaan esimerkiksi Suomessa vahvasti keskittynyt ennen kaikkea Pohjois-Pohjanmaalle muun muassa maankäytöllisten haasteiden vuoksi. Tuulivoiman tuotannon lisääntymisen vaikutuksia HAA3 kuvaili muun muassa kertomalla niiden aiheuttavan säätöpaineita verkoille.

Haastattelussa HAA3 toi myös useaan otteeseen esille ongelmia liittyen maankäyttöperiaatteisiin, jotka johtavat voimaloiden sijoitteluun syrjäisiin sijainteihin. Tällöin huoltokustannukset nousevat ja kokonaisuinfraan käyttöön muodostuu haasteita. HAA3 nosti myös ainoana haastateltuna esille tuulivoiman siirtymävaiheeseen liittyvät ympäristölliset ja sosiaaliset vaikutukset. Lisäksi haastattelussa nousi esille tuulivoimajärjestelmien kehittymiseen liittyvä epävarmuus:

Ei tiedetä, mihin tuulivoimaloiden huippukorkeus tulee jäämään. Alueita kaa-voitetaan jonnekin 350 metriin. Nykyään [tuulivoimalat] on 250 metrisiä huippukorkeudeltaan, jossain 270-metrisiä. (Haastateltava 3)

HAA3 pohti lisäksi ilmastonmuutoksen vaikutusta tuulisuuteen. HAA3:n mukaan Suomen leveysasteilla tuulisuus tulisi todennäköisesti lisääntymään, mutta epävarmuuskysymys ovat jäätämisolosuhteet – voivatko ne jopa lisääntyä? Jäätämisolosuhteista on HAA3:n mukaan olemassa huonosti mittausdataa. Tuulivoimaloiden rakenteellisista seikoista HAA3 kertoi seikkaperäisesti:

Kuluvimmat osat ovat voimalan lavat ja sähkögeneraattori. Seuraavaksi kuluvimmat ovat jalusta ja teräsrakenne. Jos joudutaan uusimaan osia, ensimmäisenä uusitaan lavat, koska ne kuluu. (...) Myös kuluva osa on maakaapeli voimalalta sähköasemalle, johtuen joko huonosta johdon tekniikasta tai siitä, että asennus on tehty siten, että [johto] altistuu sähkömagneettiselle induktiolle. Ilmajohdo kestää huomattavasti paremmin. (Haastateltava 3)

Haastattelussa nousi lisäksi esille muitakin infrastruktuuriin, voimaloiden huoltoon ja varautumiseen liittyviä asioita. HAA3:n mukaan esimerkiksi rakennustuotteiden laatu ja saatavuus on ”aina ongelma”. Lisäksi keskustelussa nousi esille varaosien tarve. Joitakin tuotteita saatetaan valmistaa merkittävässä määrin vain yhdessä tuotantoyksikössä. Esimerkkinä HAA3 mainitsi ukrainalaisen lasieristintehtaan. HAA3:n mukaan yhtiöt ovat kuitenkin varautuneita tyypillisimpien osien rikkoutumiseen. Taustalla ovat eritoten taloudelliset motiivatiotekijät: tuulivoimatoimijat haluavat pitää kiinni tuotannon jatkuvuudesta. Vikoja ja ongelmia pyritään havaitsemaan etukäteen esimerkiksi tarkastus- ja huoltokäynneillä. Lisäksi HAA3 kertoi, että lupaprosessissa varautumistyö ei näy käytännössä lainkaan, vaan siihen liittyen on tunnistettavissa jopa riskejä:

[Lupaprosessi on] hyvin avoin. Voi olla riskejä; voidaan käyttää väärin tarkoitukseen. (...) Tuulivoimaan liittyvät hallinnolliset työt ovat julkisia. Tietoja on helppo saada, mikä ei ole tarkoituksenmukaista. (Haastateltava 3)

Lupanäkökulman lisäksi myös HAA3 korosti tuulivoimaloiden olevan etäohjattavia, ja pohdiskeli ohjaukseen sekä tuulivoimaan yleisesti liittyviä kyberriskejä. Yhteenvetona pohdinnasta voidaan todeta, että tietoverkoissa tapahtuvalla vaikuttamisella voidaan pahimmillaan saada aikaan merkittäviä vaikutuksia. Tarkkaan kohdennetuilla ja sofistikoituilla hyökkäyksillä voidaan pudottaa yksittäisiä tai useampia laitoksia pois verkosta, myös niin, että esimerkiksi tuulipuistooperaattorin näkyvyys puiston tuotannon tilaan katkeaa. Tämä puolestaan pidentää vasteaikoja jouduttaessa pahimmillaan manuaalisesti tarkistamaan voimaloita.

Haastateltava 4 (HAA4) lähestyi tuulivoimaan liittyvää kehitystä itseorganisoitumisen kautta. HAA4:n mukaan olisi teknisesti mahdollista, että tuulivoimajärjestelmiä kehitetään ns. alhaalta ylöspäin syntyen niin, että paikalliset yhteisöt ja ihmiset motivoituvat ja ponnistelevat niiden vuoksi. Jos toiminta

perustuisi itseorganisoitumiseen, siihen liittyvät riskit sekä kytkennät olisivat lähempänä käyttäjää, ja ehkä nykytilannetta henkilökohtaisempia.

Top-down- suunnittelumaailmassa riski ei ole kenelläkään henkilökohtaisesti, riski piilee varautumissuunnitelmissa raportointikäytännöissä, valvontakäytännöissä; ei kenelläkään. Kenelläkään ei ole velvollisuutta välittää kokonaisuudesta. Ei mietitä, onko uhkaa tosiasiallisesti ajateltu. (Haastateltava 4)

HAA4 käsitteli pohdinnoissaan myös kompleksisuutta, joka teknisissä ”top-down” systeemeissä on hänen mukaansa ns. kaavioksi piirrettävissä. HAA4 kuvasi lisäksi, että nykyisessä järjestelmässä lisääntyy erityisesti tekninen kompleksisuus, mutta riskin henkilöityminen ei lisäännä missään kohdassa.

Tekninen monimutkaistuminen lisääntyy, mutta kun [se] lisääntyy järjestelmässä, jossa (...) on jo kyvykkyyttä hallita monimutkaistumista, onko [se] valtava lisäriski? Tekninen monimutkaistaminen tuomalla jotain samaa ei välttämättä lisää riskiä. Kun mukaan tuodaan ihminen, se olisi todellinen uhka. (Haastateltava 4)

Haastattelussa HAA4 pohdiskeli systeemin muutosta puhumalla jätehuollon muuttumisesta: vain parikymmentä vuotta sitten jäte oli jotain, mikä haluttiin lähinnä ”pois nurkista; joku keräsi ja vei sen johonkin pois”. Nykymaailmassa tilanne on muuttunut täysin, ja ihmisten suhtautuminen jätteisiin on vaihtunut perustavanlaatuisesti. Jäte nähdään jopa resurssina, josta kamppaillaan, ja sen kierrättämistä mietitään vaivalla. Sähkön osalta HAA4 arveli keskeisimmän muutoksen liittyvän sähköriippuvaisuuden kasvuun. Edelleen HAA4 jatkoi systeemin rakennetta ja siihen liittyvien riskien pohdintaa seuraavasti:

Paitsi että tehdään arkea kannattelevasta systeemistä monimutkaisempi, kysyttäisiin, miten ollaan [top-down] systeemistä vähemmän riippuvaisia? (...) Huoltovarmuuden kannalta kysymys on kahtalainen: miten systeemistä [saadaan] häiriösietoisempi ja miten järjestelmistä riippuvaisista toimijoista vähemmän riippuvaisia järjestelmistä? (Haastateltava 4)

Haastateltava 5 (HAA5) nosti haastattelussa esille sekä teknis-taloudellisia että sosiaalisia näkökulmia sähköjärjestelmän nykytilanteen osalta. HAA5:n mukaan tuulivoiman kasvu tuo paineita huomioida sosiaalisen oikeudenmukaisuuden piirteitä ja teemoja, sillä tuulivoimatuotanto ei jakaudu tasaisesti alueellisesti. Hänen mukaansa haaste korostuu, mitä enemmän tuulivoimaa liitetään sähköjärjestelmään. Teknis-taloudellisesti Suomen yhteydet muihin pohjoismaihin ja baltiaan ovat hyvät, mutta tuulivoimatuotannon lisääntyminen nostaa esille kysymyksen, kuinka vaihtelevaa tuotantoa tasapainotetaan.

HAA5 nosti havainnoissaan esille muitakin alueelliseen jakautumiseen liittyviä havaintoja. Hän pohdiskeli mm. aluevalvontakysymystä Itä-Suomen tuulivoiman osalta sekä kiristyneen turvallisuustilanteen vaikutusta siihen, kuinka hankkeisiin suhtaudutaan. Toisaalta hän laajensi näkökulmaa myös Suomen ulkopuolelle:

Tietysti [on huomioitava] arvoketjujen epävarmuudet. Tähänkin kytkeytyy turvallisuuspuolen huolia. Iso osa tuulivoimateknologiasta ja tuotteista on muita kuin suomalaisia. (...) Siinä on se huoli jossain määrin myös omistajuudesta. Edistääkö ne [tuulivoimatuottajat] suomen kansallisia intressejä? (..) Mitä isommassa määrin tuulivoimaa tuotetaan, sitten komponenttien saataavuus saattaa jossain määrin olla epävarmuustekijä. (Haastateltava 5)

HAA5:n mukaan tuulivoima on luonteeltaan periaatteessa hajautettua ja sen myötä saadaan ”hajautetun järjestelmän mahdollistama resilienssi”. Joiltain osin esimerkiksi suuret merituulihankkeet alkavat kuitenkin hänen mukaansa muistuttaa keskitettyä järjestelmää. HAA5 toisaalta kuitenkin korosti, että tuulivoima tuotantotapana mahdollistaa hajautetut piirteet. Esimerkiksi sotatilanteessa ei olisi sotastrategisessa mielessä järkevää tuhota yksittäisiä voimaloita, vaan suunnata huomiota esimerkiksi sähkön siirtoverkkoihin.

Kiinnostavana havaintona HAA4:n huomioihin liittyen, HAA5 nosti esille eron suomalaisen ja saksalaisen tuulivoimakehittämisen välillä. Suomessa tuulivoimakehitys on HAA5:n mukaan ollut yritys vetoista, kun taas Saksassa sitä on tehty osuuskuntavetoisesti, ja alueellista yhteisöllistä energiantuotantoa on pyritty jopa edistämään. Tuulivoiman resilienssistä keskusteltaessa HAA5 kuvaili ymmärtävänsä resilienssin tietynlaiseksi ”sosiotekniseksi sietokyvyksi”, jonka turvin sekä yksittäiset tuulivoimalat että laajemmin järjestelmät kestävät hyvin erilaisia epävarmuustekijöitä.

HAA5 toisaalta puhui myös organisatorisesta resilienssistä ja siitä, kuinka organisaatiot kykenevät riittävällä tasolla ylläpidetyn osaamisen turvin reagoimaan myös epävarmuustilanteissa sekä toimimaan ”eri aikajanojen häiriötilanteissa” valmiiksi tunnistetuilla toimintatavoilla. Haasteeksi tuulivoima-alan resilienssin kannalta HAA5 tunnisti sen, että se on uudempi sektori, jolla toimijoilla ei välttämättä ole riittävää ymmärrystä tai riittäviä resursseja varautumistyötä ajatellen. Yleisesti häiriötilanteiden ja varautumisen osalta keskustelussa nousi esille ilmastonmuutos. HAA5:n mukana kaikkea kymmeniksi vuosiksi suunniteltavaa infrastruktuuria tulisi suunnitella ilmastonmuutoksen sopeutumisen näkökulmasta.

TAULUKKO 4 Yhteenvedo haastatteluista.

Havainnon kuvaus	Haastateltava	Johtopäätös tai yhteenvedo
------------------	---------------	----------------------------

Tekniset muutokset sähköverkkoihin	HAA1 ja HAA2	Tuulivoima ei tuota verkkoon inertiaa.
Tietoliikenteen jatkuvuuden merkitys, kyberriskit	HAA1, HAA2, HAA4	Tuulivoimaloita ohjataan etänä ja tuotanto on riippuvaista erilaisista kyberhäiriöille alttiista tietojärjestelmistä. Ei ole varmaa, onko tuotantoa mahdollista ohjata paikalliskäytössä häiriötilanteissa.
Tuotannon hajautuneisuus	HAA2, HAA4, HAA5	Tuotannon hajautuneisuus on sekä vahvuus että heikkous.
Systeeminen riski	HAA4	Järjestelmän kehittäminen ja kehittyminen sekä sähköriippuvaisuuden kasvu lisäävät monimutkaisuutta ja teknistä kompleksisuutta. Järjestelmän häiriösietoisuudelle kasvavia paineita.
Ilmatoriskit	HAA5	Tuulivoimajärjestelmät ovat käytössä kymmeniä vuosia. Niitä on suunniteltava ilmastonmuutoksen tuomat riskit huomioiden.
Matala varautumismaturiteetti	HAA5	Tuulivoima-ala on nuori, eikä kaikilla toimijoilla ole välttämättä ymmärrystä varautumisen käytännöistä tai resursseja sen kehittämiseksi.
Arvoketjujen ja omistajapohjien epävarmuudet	HAA5	Tuulivoiman komponenttien kotimaisuusaste on matala ja komponenttien saatavuuteen sekä yhtiöiden omistajapohjiin liittyy epävarmuuksia.
Alueelliset vaikutukset ja eroavuudet	HAA3, HAA5	Tuulivoimaa ei rakenneta tasapainoisesti kaikille alueille. Eri alueilla tuulivoimahankkeisiin liittyy erilaisia haasteita sekä esimerkiksi sosiaalisen hyväksyttävyyden kysymyksiä.

3.2 Systemaattinen kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsaukset auttavat vastaamaan kysymykseen siitä, millaisia tutkimattomia aihealueita tai puutteita kohteena olevasta aihealueesta löytyy. Kirjallisuuskatsauksissa *tutkitaan tutkimuksia*: niiden avulla selvitetään, millaista tutkimusta on tehty, ja kuinka aihepiiriä voisi tulevaisuudessa työstää ammatti- ja tieteenalalla. Kirjallisuuskatsausten avulla voidaan myös luoda uusia käytänteitä, ohjeita ja ohjeistuksia sekä uusia tutkimuskysymyksiä. (Vilka, 2023, 7) Tämän tutkimuksen kohteeksi on valittu osin nopeasti kehittyvä ilmiö, johon tunnistettuja ilmiöitä ja teemoja on pyritty konstruimaan laadullisesti. Tästä syystä havaintojen pohjaaminen tutkimuksissa esille nousseisiin näkökulmiin on perusteltua.

Systemaattinen kirjallisuuskatsaus on puolestaan työkalu, jolla voidaan tehokkaasti ja vaikuttavasti syntetisoida kirjallisuutta tiettyyn aiheeseen liittyen. Systemaattisissa kirjallisuuskatsauksissa keskitytään tiedon laatuun, tarkkuuteen ja relevanssiin. Niiden suosion taustalla on eritoten läpinäkyvä metodologia. (Alkhaleel, 2024) Vilka syntetisoi systemaattisten kirjallisuuskatsausten keskeisiä piirteitä kirjassaan (2023, 27) seuraavasti: systemaattisten

kirjallisuuskatsausten käyttö on levinnyt terveydenhuollosta laajempaan käyttöön viime vuosikymmeninä, niiden lähtökohtana ovat tarkat, järjestelmälliset ja toistettavat menettelytavat, mihin viitataan käsitteellä *protokolla*, ja niiden tavoitteena on synnyttää puolueettomia, yleistettäviä ja uskottavia tuloksia. (Booth ym. 2022, 6-7; Fink, 2020, 20-21; Fan ym. 2022, 4; Efron & Ravid, 2019, 33)

Systemaattisia kirjallisuuskatsauksia käytetään yleisesti tietoon perustuvan päätöksenteon tukena. Systemaattinen kirjallisuuskatsaus on menetelmä, jossa todisteista tehdään objektiivista synteesiä siten, että menetelmällä vastataan tiettyyn määriteltyyn kysymykseen ja samalla vähennetään tutkimusten valintaan liittyviä vinoumia. (esim. Petticrev, 2001) Tässä tutkimuksessa systemaattisella kirjallisuuskatsauksella tuotettiin tietoa mahdollisimman objektiivisesti tuulivoimajärjestelmiin liittyen. Koska tuulivoima-ala ja tuulivoiman tuotanto on lisääntynyt erittäin merkittävästi lyhyessä ajassa, katsaus kohdennettiin tuoreimpaan, 2020–2024 välillä julkaistuun tutkimukseen. Tutkimuksissa esille nousseet havainnot analysoitiin hyödyntäen laadullisen tutkimuksen sisällönanalyysia menetelmänä. Systemaattisen kirjallisuuskatsauksen avulla varmistetaan, että haastatteluista mahdollisesti esille nouseva ns. hiljainen tieto ei ole vinoutunutta vertaisarvoituun tieteelliseen tietoon verrattuna.

Katsaus aloitettiin tunnistamalla ja luokittelemalla aiheeseen liittyviä keskeisiä kysymyksiä, joiden pohjalta tarkasteltiin kirjallisuutta kyseisen aihepiirin syvemmäksi ymmärtämiseksi. Katsauksen aikana pyrittiin tunnistamaan tietoa aukkoja sekä rajoituksia aiheesta koskevasta tutkimuksesta sekä lopuksi hyödynnettiin materiaalia tulevan tutkimuksen suuntaamiseksi. Tämän tutkimuksen tapauksessa kirjallisuuskatsauksella pyrittiin erityisesti myös syntetisoimaan tunnistettuja aihepiirejä skenaarioanalyysia varten. Seuraavissa osioissa on kuvattu tämän tutkimuksen kontekstissa toteutetun systemaattisen kirjallisuuskatsauksen vaiheet sekä synteesi.

3.2.1 Menetelmä, aineiston keruu ja hakutermit

Tässä tutkimuksessa protokollan kehittelyn ja dokumentaation tukena käytettiin Liberati ym. (2009) PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) -viitekehystä sekä Page ym. (2021) ohjeistusta katsauksen koostamisen ohjenuorina. PRISMA on alun perin kehitetty tukemaan systemaattisten kirjallisuuskatsausten kirjoittajia heidän raportoidessaan syitä, miksi katsaus on tehty, miten se on tehty, ja mitä katsauksessa on selvinnyt. PRISMA-viitekehukseen kuuluu mm. 27-kohtainen tarkistuslista sekä ohjeita havaintojen visualisoimiseksi. (Page ym. 2021) Tarkistuslista on tehty tieteellistä artikkelia varten, mutta alla on lueteltu tämän pro gradun näkökulmasta keskeisimmät osiot.

- *Rationale*: perustelu tutkimuksen eli katsauksen toteuttamiselle
- *Objectives*: katsauksen yksiselitteiset tavoitteet
- *Eligibility criteria*: millä kriteereillä tutkimuksia sisällytetään tai ne rajataan katsauksen ulkopuolelle

- *Information sources*: luettelo ja kuvaus kaikista katsaukseen hyödynneistä tietolähteistä ja -kannoista
- *Search*: kuvaus tiedonhakustrategiasta sisältäen vähintään yhden tietokannan ja mahdolliset rajoitteet, jotta haku on tarvittaessa toistettavissa
- *Study selection*: kuvaus prosessista, jonka mukaisesti tutkimuksia on tai ei ole sisällytetty systemaattiseen katsaukseen
- *Study selection (results)*: listaus läpikäydyistä tutkimuksista ja miten iso osa niistä valikoitui lopulta katsaukseen, mielellään kaaviokuvassa
- *Summary of evidence*: keskeisten löydösten yhteenveto ja merkityksen kuvaus
- *Limitations*: tutkimuksen rajoitteet

Tarve systemaattiselle kirjallisuuskatsaukselle on kuvattu osana tämän pro gradun johdantoa. Koska työn tavoitteena oli kehittää ratkaisumalleja vakavista häiriö- ja poikkeustilanteista peilattuna, oli välttämätöntä pohjata toteutettava tutkimustyö olemassa olevaan tutkimustietoon. Systemaattisen katsauksen tavoitteena oli selvittää, millaisia riskejä tuulivoimajärjestelmiin sekä niiden turvallisuuteen liittyy, millaisia kyberturvallisuusriskejä tuulivoimajärjestelmiin liittyen on tunnistettu ja millaiset rakenteet tai ilmiöt tuulivoimajärjestelmissä voivat joutaa vakaviin häiriötilanteisiin.

Tietokantahaussa (Elsevierin ylläpitämä ScienceDirect) käytettiin rajaavina tekijöinä ikää, tarkastelutasoa sekä julkaisutyyppejä. Systemaattinen katsaus rajattiin koskemaan tuoretta, maksimissaan noin viisi vuotta vanhaa tieteellistä kirjallisuutta. Katsaukseen sisällytettiin vain vuosina 2020–2024 tieteellisissä aikakauslehdissä julkaistut artikkelit. Ikärajaus oli kapea, sillä merkittävä osa tuulivoimakapasiteetista on asennettu 2020-luvulla, ja teknologia on kehittynyt huomattavasti 2020-lukua edeltäneestä ajasta. Vanhat tuulivoimalat ja -puistot erosiivat moderneista sekä profiililtaan että korkeudeltaan ja mittakaavaltaan. Toisaalta myös tutkimusjulkaisut painottuivat yleisesti 2020-luvulle. Tietokantahauihin ei sisälly 21.6.2024 jälkeen julkaistuja artikkeleita.

Artikkelien tuli käsitellä tuulivoimaa järjestelmä- tai infrastruktuuritasolla. Näin ollen tietokantahakuja tehtiin seuraavilla hakutermeillä, soveltaen kunkin tietokannan kohdalta sille soveltuvia hakukäytänteitä:

- wind power system AND cyber
- wind energy system AND cyber
- wind energy infrastructure AND cyber
- wind energy infrastructure AND security of supply
- wind power system AND security of supply
- wind energy system AND security of supply
- wind power system AND threats
- wind energy system AND threats
- wind energy infrastructure AND threats
- wind power system AND resilience
- wind energy system AND resilience
- wind energy infrastructure AND resilience

- wind power system AND crisis
- wind energy system AND crisis
- wind energy infrastructure AND crisis
- wind power system AND disturbance
- wind energy system AND disturbance
- wind energy infrastructure AND disturbance

Ensimmäisessä seulontavaiheessa katsauksen ulkopuolelle rajattiin kaikki sellaiset tutkimukset, joiden otsikoissa ei esiintynyt hakusanaa "wind energy/power/system/infrastructure", ja jotka käsittelivät laadullisesti arvioiden selkeästi tämän tutkimuksen tavoitteisiin nähden eri asiakokonaisuutta. Tietokantahauissa nousi esimerkiksi esille paljon tutkimusta liittyen hybridienergiajärjestelmiin ja sähkön varastointiin. Hybridijärjestelmiä koskeva tutkimus rajattiin katsauksessa tarkasteltavan aineiston ulkopuolelle.

Myös tutkimukset, joissa tarkasteltiin tuulivoimajärjestelmää tietyn valtion tai alueen kontekstissa, jätettiin katsauksen ulkopuolelle. Esimerkiksi Diaz & Moya tutkivat (2024) urbaania tuulivoimatuotantoa trooppisella alueella, mikä oli selkeästi tämän tutkimuksen rajauksen ulkopuolella. Magallones Jr. ja Singh (2023) puolestaan tutkivat teemaa puolestaan tietyn Filippiineillä sijaitsevan 500 kV yhteyden kontekstissa; sisällöllisesti teema on tähän katsaukseen siis liian alueellisesti rajattu. Tyypillistä tuloksissa oli myös tietyn tuuliturbiiniteknologian, yleisimmin DFIG (Double-Fed Induction Generator), valvonnan tai ohjauksen tehokkuuden tarkasteleminen tai parantamiseen pyrkiminen. Esimerkiksi Jaladi & Sandu (2020) esittivät tekniikkaa, jolla parantaa turbiinien jännitteenhallintaa tiettyjen vikojen aikana. Myös tämänkaltaiset tutkimukset jätettiin tämän katsauksen ulkopuolelle.

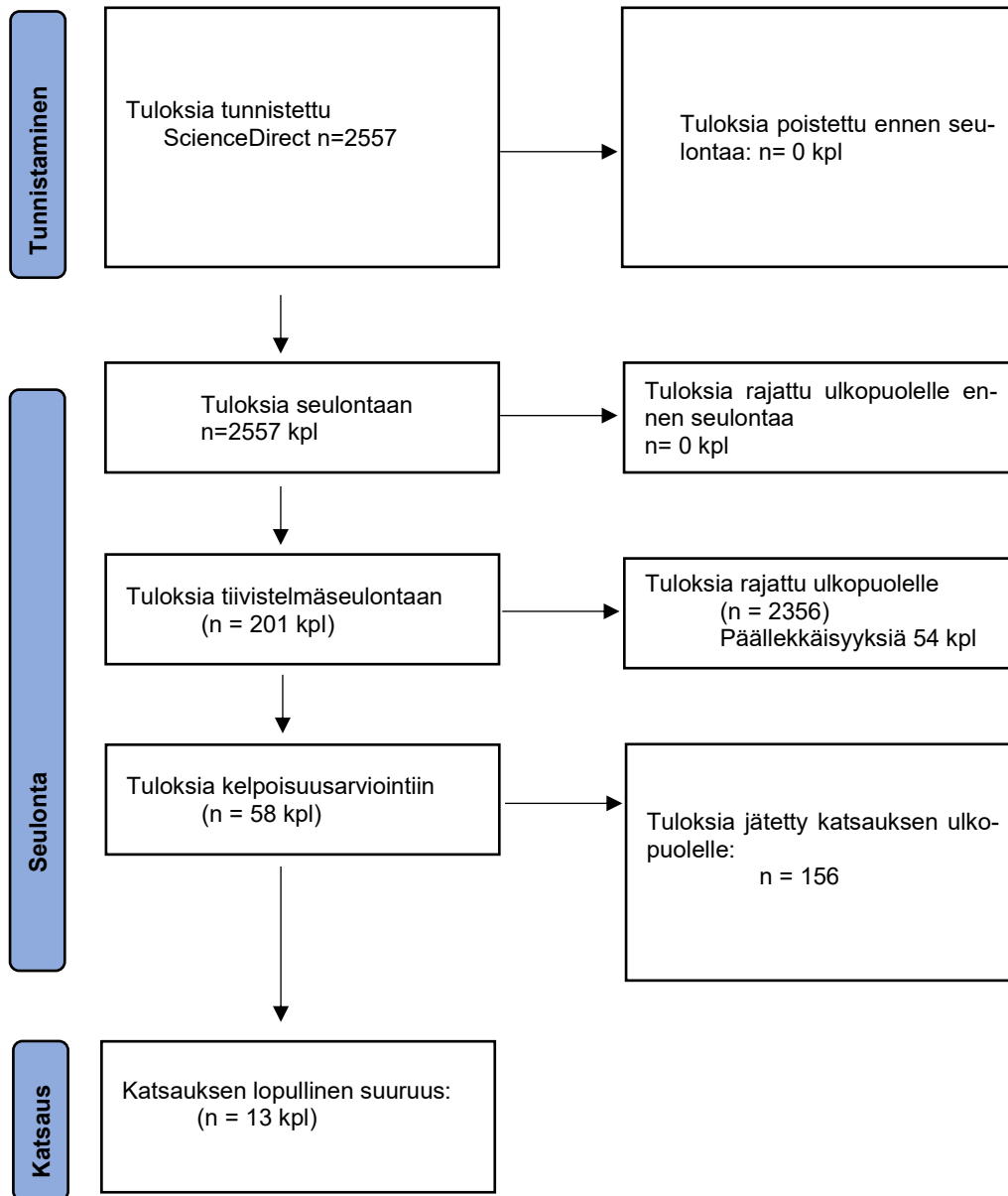
Poikkeuksia tehtiin, jos otsikossa käytettiin selkeästi avainsanoihin liittyvää synonyymia, esim. "renewable power system" tai "distributed energy system". Lisäksi sellaiset tutkimukset sisällytettiin katsaukseen, joissa sanan "Wind" ja sanan "system" välissä oli muita substantiiveja, esimerkiksi "wind energy generation systems". Esimerkiksi Zakariya & Teh (2023) artikkelissa otsikossa viitataan uusiutuvien energiajärjestelmien häiriöihin, ja vasta myöhemmin varsinaisessa tekstissä esille nousee tuulivoima. Synonyymeja arvioitiin laadullisesti ja tapauskohtaisesti. Myös sanan "system" synonyymeja tai siihen nähden riittävän samansisältöisiä termejä hyväksyttiin (esim. wind energy sites, offshore wind farm, renewable energy supply chains). Poikkeusten kohdalla arvioitiin erityisesti, kuvastaako termi ja tutkimuksen kohde järjestelmä- ja systeemitason näkökulmaa, vai esimerkiksi prosessi- ja kohdetasoa. Jos näkökulma oli selkeästi esimerkiksi kokonaisuudessa tuulipuistossa yksittäisen voimalan sijaan, tutkimus sisällytettiin terminologisista eroavuuksista huolimatta katsaukseen. Joidenkin artikkeleiden kohdalla tehtiin poikkeuksia huolimatta siitä, että niiden otsikoinnissa ei ollut lainkaan yllä kuvattuja avainsanoja, mutta jotka laadullisesti arvioituina liittyivät kuitenkin selkeästi tutkimuksen rajaukseen. Esimerkiksi Zhang ym. (2022): *Texas Electric Power Crisis of 2021 Warns of a New Blackout Mechanism*.

Esimerkiksi Liang ym. (2020) tutkivat tuulivoimajärjestelmiin liittyvää viantunnistusta ja vikadiagnostiikan tarkkuutta esitellen artikkelissaan sinänsä

tämänkin tutkimuksen kannalta kiinnostavia näkökulmia, mm. mihin komponentteihin tai tuulivoimalan osiin liittyy keskimäärin eniten vikatilanteita. Tämänkaltaiset artikkelit on kuitenkin jätetty tämän katsauksen ulkopuolelle, sillä ne keskittyvät enemmän voimalatason kuin järjestelmätason analyysiin. Toisena esimerkkinä ulossuljetusta artikkelista voidaan mainita Liu ym. (2023) tutkimus, jossa syvennyttiin järjestelmätason sijaan yksittäisten tuulivoimaloiden valvontaan sekä valvonnassa hyödynnettävien valokuvien turvalliseen välittämiseen enkryptauksen avulla. Liu ym. (2023) ja Liang ym. (2020) olisivat sellaisenaan olleet rajatapauksia tai rajautuneet tarkastelun ulkopuolelle pelkän otsikointinsa osalta. Ensimmäisen seulontavaiheen jäljiltä 2557 artikkelista jäi jäljelle 201 artikkelia.

Toisessa vaiheessa otsikkotason seulonnan läpäisseistä artikkeleista luettiin tiivistelmät. Tämän perusteella jatkoon valikoitiin ne tutkimukset, jotka selvästi käsittelevät tuulivoimajärjestelmiä eivätkä esimerkiksi laajemmin sähköjärjestelmää tai muita uusiutuvan energian järjestelmiä. Toisessa vaiheessa keskeisintä oli pyrkiä arvioimaan, onko tutkimuksessa tunnistettu tuulivoimajärjestelmiä koskeva haavoittuvuus, uhkatekijä tai potentiaalisesti vakavaan häiriötilanteeseen johtava rakenne tai ominaisuus. Arvioinnissa kiinnitettiin huomiota erityisesti siihen, onko tutkimuksessa tarkasteltu tuulivoimajärjestelmiä, vain osaa siitä, tai onko tuulivoimajärjestelmiä tutkittu jonkin toisen kontekstin kautta. Huomattava määrä tutkimuksia esimerkiksi seuloutui tarkastelun ulkopuolelle jo ensimmäisessä vaiheessa, sillä niiden todettiin tarkastelevan tuulivoimaa osana hybridijärjestelmää. Toisen vaiheen jälkeen artikkeleita päätyi lopulliseen seulontaan (menetelmät ja tutkimuskysymykset) 58 artikkelia.

Viimeisessä vaiheessa jäljelle jääneistä 58 julkaisusta luettiin tiivistelmät johdanto- ja menetelmäkuvaukset ja johtopäätökset, minkä perusteella varmistuttiin siitä, vastaavatko ne asetettuja tutkimuskysymyksiä ja -tavoitteita. Tässä vaiheessa merkittävä määrä aiemmin mukaan sisällytetyistä tutkimuksista jäi tarkastelun ulkopuolelle esimerkiksi siitä syystä, että niiden lähestymistapa oli algoritmien, niissä kehitettiin tuulivoimaan spesifisti liittyviä strategioita ja/tai niiden menetelmä oli systeemiseen katsaukseen liian spesifi, tai niiden keskittymisalue liittyi enemmän esimerkiksi sähköverkkoihin kuin tuulivoimajärjestelmiin. Tämän jälkeen jäljelle jäi 13 kpl tutkimuksia, jotka otettiin analysoitaviksi lopulliseen katsaukseen. Prosessi on kuvattu kuviossa 3.



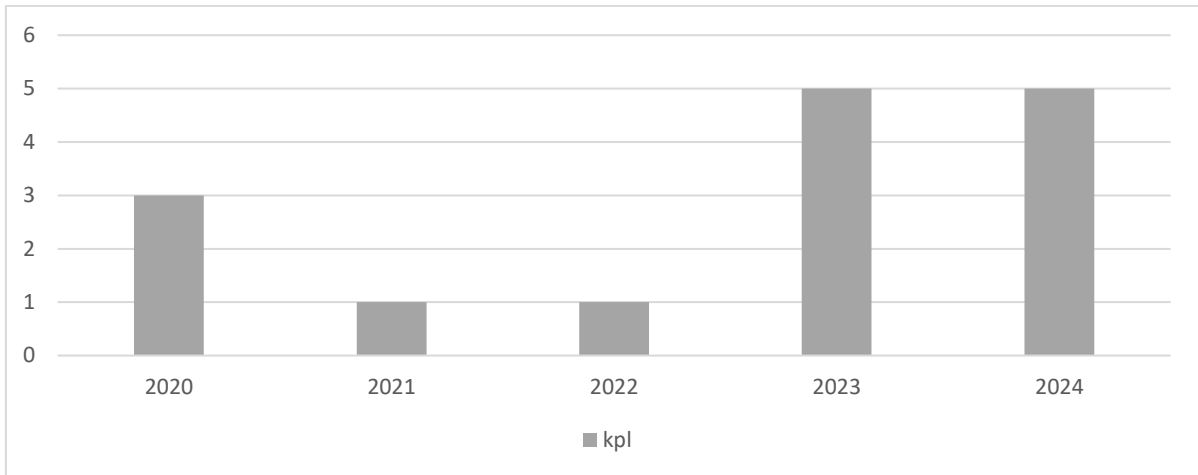
Kuvio 3. Systemaattisen kirjallisuuskatsauksen vaiheet.

3.2.2 Katsauksen yleiskuva

Lopulliseen katsaukseen päätyi osiossa 3.2.1 esitettyjen poissulkukriteerien ja prosessin päätteeksi 13 tutkimusartikkelia. Yhteenveto artikkeleista sekä niiden jakautumisesta aikavälillä 2020–2024 on esitetty taulukossa 5 ja kaaviossa 4.

TAULUKKO 5. Katsaukseen päätyneet tutkimukset.

Artikkeli ja julkaisu vuosi	Otsikko	Lehti
Ranjan & Shankar, 2022	A literature survey on load frequency control considering renewable energy integration in power system: Recent trends and future prospects	Journal of Energy Storage
Liang ym. 2022	A state-of-the-art review on wind power converter fault diagnosis	Energy Reports
Lu ym. 2024	Advances in model predictive control for large-scale wind power integration in power systems	Advances in Applied Energy
Mostafa ym. 2023	An overview and case study of recent low voltage ride through methods for wind energy conversion system	Renewable and Sustainable Energy Reviews
Bin Nadeem ym. 2023	Distributed energy systems: A review of classification, technologies, applications, and policies	Energy Strategy Reviews
Ahmed ym. 2023	Dynamic grid stability in low carbon power systems with minimum inertia	Renewable Energy
Deng & Ge, 2020	Global wind power development leads to high demand for neodymium praseodymium (NdPr): A scenario analysis based on market and technology development from 2019 to 2040	Journal of Cleaner Production
Kumar ym. 2020	Improving security for wind energy systems in smart grid applications using digital protection technique	Sustainable Cities and Society
Wiegner ym. 2024	Interdisciplinary perspectives on offshore energy system integration in the North Sea: A systematic literature review	Renewable and Sustainable Energy Reviews
Yadav ym. 2023	Low voltage ride through capability for resilient electrical distribution system integrated with renewable energy resources	Energy Reports
Ren ym. 2021	Offshore wind turbine operations and maintenance: A state-of-the-art review	Renewable and Sustainable Energy Reviews
Shao ym. 2024	Power quality monitoring in electric grid integrating offshore wind energy: A review	Renewable and Sustainable Energy Reviews
Teixeira ym. 2024	Raw materials for the Portuguese decarbonization roadmap: The case of solar photovoltaics and wind energy	Resources Policy



KUVIO 4. Katsauksen tutkimusten julkaisuvuosijakauma.

Katsaukseen päätyneistä tutkimuksista enemmistö painottui vuosiin 2023 ja 2024. On kuitenkin todennäköistä, että tämä on sattumaa, eikä sen perusteella voida tehdä esimerkiksi päätelmää tutkimuksen määrällisestä kasvusta. Katsauksen ulkopuolelle jäi merkittävästi julkaisuja, joissa oli sinänsä tämän tutkimuksen aihepiirin kannalta relevantteja teemoja, mutta joita oli analysoitu esimerkiksi tuulivoiman tai sähköjärjestelmän paremman, tehokkaamman tai turvallisemman hallinnan näkökulmasta. Julkaisuissa painottuivat ennen kaikkea jännitteen ylläpitoon liittyvät seikat sekä kyberturvallisuus, joista molempia analysoidaan usein varsin teknisesti.

3.2.3 Tiivistelmä havainnoista

Katsaukseen valikoituneet tutkimukset luovat kokonais kuvan, jonka mukaan sähköjärjestelmään tulee yhä enemmän osaksi uusia tuotantomotoja, kuten tuulivoimaa, ja kasvutrendin ennakoidaan vain jatkuvan. Tutkimuksessa nousi esille monilta osin puutteellista tietopohjaa liittyen käynnissä olevaan muutokseen (esim. Ranjan & Shankar, 2022: kuormanhallintaa koskeva tutkimus keskittyy pääosin perinteisiin tuotantomuotoihin.). Yhteenvedo on esitetty taulukossa 6.

Ren ym. tutkivat (2021) merituulivoiman käyttö- ja huoltotoimintaa, joilla on merituulipuistojen kehityksen kannalta iso merkitys. Huolto on erityisen haastava ja sikäli tärkeä tekijä merituulivoiman osalta. Tämä johtuu ennen kaikkea mahdollisesti pitkästä etäisyydestä ja heikommasta saavutettavuudesta. Sopivan kaluston hankkiminen tai ylläpito voi myös olla kallista. (Ren ym. 2021) Kaluston ja henkilöstön saatavuus merituulipuistossa oikeaan aikaan ja oikeaan paikkaan on toisaalta merkittävä seikka myös häiriötilanteisiin varautumisen näkökulmasta. Renin ym. mukaan (2021) merituulivoimaloissa on useita kriittisiä komponentteja ja niiden häiriötilastoissa on vaihtelua: häiriöiden määrä riippuu esimerkiksi siitä, kuinka kypsää teknologiaa on käytössä. Yleisesti tuulivoiman osalta yksi kriittisimmistä voimalakomponenteista on muuntaja, sillä se on kallis,

ja sen hajoamisen seuraukset ovat kriittisiä (Liang ym. 2022). Liangin ym. mukaan (2022) muuntajiin liittyvällä jatkuvalla kehitystyöllä voidaan parantaa tuulivoiman luotettavuutta

Ren ym. (2021) tunnistivat myös kyberturvallisuuden yhdeksi kriittiseksi aiheeksi liittyen esimerkiksi etäensensoreihin. Vaikka digitaalisten järjestelmien ja etäviestinnän kehitys on ollut nopea ja parantanut esimerkiksi toiminnan tehokkuutta merituulivoima-alalla, kyberturvallisuus tuulivoimasektorilla on suhteellisen vähän tutkittua. Kyberturvallisuuden osalta voi muodostua koko järjestelmää koskeva riski, mikä korostaa systemaattisia kehitys- ja parannustoimia. Yleisellä tasolla merituulivoiman huoltotoiminnan haasteet liittyvät kuitenkin pitkään etäisyyteen rannikosta, säähän liittyviin epävarmuuksiin, etähallinnan kautta saatavan tiedon epätäydellisyyteen, odottamattomiin häiriöihin, ikääntymiseen ja ns. subjektiivisiin tekijöihin, kuten teknisten työntekijöiden osaamiseen.

Myös Bin Nadeem ym. (2023) nostivat julkaisussaan esille kyberuhkat. Heidän mukaansa kyberturvallisuudesta on tulossa yhä suurempi haaste, kun hajautunut energiantuotanto lisääntyy, ja tuotanto on yhä enemmän reaaliaikaisen valvonnan, viestinnän ja mittaamisen varassa. Bin Nadeemin ym. mukaan rakenteisiin kohdistuvien kyberhyökkäysten vaikutuksia on mahdotonta määrällistää tai ennakoita. Toisaalta Bin Nadeem ym. tuovat esille hajautettujen energiantuotantojärjestelmien tehokkuuden, joustavuuden ja taloudellisuuden keskitettyihin järjestelmiin verrattuna. Niihin liittyy toisaalta myös luotettavan ja tehokkaan ennakkoinnin haaste: ilman riittävää ennakkointia, ne voivat vaarantaa verkon vaurauden.

Myös verkon älykkyyden kehittyminen lisää kyberhaavoittuvuuksia tai voi heikentää kyberturvallisuutta. Paitsi, että älykkäiden järjestelmien on kestettävä kyberhyökkäysten kaltaiset, ulkoiset uhkatekijät, ne on kyettävä suojaamaan myös sisäisiltä tekijöiltä, kuten taajuuteen liittyviltä häiriöiltä. (Kumar ym. 2020) Järjestelmätasolla merkittävä haaste kohdataan, mikäli valtaosa tuotannosta on invertteripohjaista eli se ei tuota inerttia sähköverkkoon. (Ahmed ym. 2023) Inertia tarkoittaa tässä yhteydessä pyörivien koneiden (kuten generaattoreiden) verkkoon tuomaa hitautta, joka vastustaa taajuuden muutoksia. Sähkötekniisiä, verkon hallintaan liittyviä näkökulmia käsittelee myös Mostafa ym. (2023) ja Yadav ym. (2023).

Useissa tutkimuksissa nostettiin esille merituulivoimaan liittyviä havaintoja. Eritoten tutkimuksissa korostui ennakoitavuuden haasteet liittyen sääolosuhteisiin. (Ren ym. 2021; Shao ym. 2024) Wiegner ym. (2024) tutkivat erilaisia ratkaisuja merituulivoimaan ja eritoten sen verkkoon integrointiin liittyen: väli-varastointi, elektrolyysi merellä, vai suora johtoyhteys maalle, ja niin edelleen. Wiegnerin kirjallisuuskatsauksessa ei kuitenkaan erityisesti tarkasteltu toteutusvaihtoehtoja vakavien häiriötilanteiden tai esimerkiksi turvallisuuden näkökulmasta. Ren ym. (2021) toivat esille erityisesti käyttö- ja huoltotoimintaan liittyviä haasteita, kun taas Shao ym. (2024) näkökulma oli sähköteknisempi: heidän mukaansa tuulipuistot ovat alttiita esimerkiksi sähkömagneettiselle interferenssille, joka on lähtöisin läheisistä sähkölaitteista, viestintäjärjestelmistä ja radiotaajuuksista. Shao ym. mukaan (2024) merituulivoiman sähkötehon laatua koskeva

tutkimus on vielä varhaisella asteella, ja esimerkiksi tähän liittyen tulisi tehdä muun muassa tarkempia standardointeja. Jännite-epätasapainoon, taajuuden heittelyyn ja tehopoikkeamiin kiinnittivät huomiota kuormanhallintaa koskevassa katsauksessaan yleisesti myös Ranjan & Shankar (2022).

Katsauksessa nousi esille myös tuulivoiman materiaalitarpeet sekä niihin liittyvät muutokset (ks. Deng & Ge, 2020; Teixeira ym. 2024). On epäselvää, millaisia konkreettisia uhka- ja häiriömalleja tähän liittyen on olemassa. Teixeira ym. mukaan (2024) esimerkiksi lyhytaikainen kysynnän ja tarjonnan välinen epäsuhta voi johtaa esimerkiksi kohoaviin kustannuksiin ja uhata esimerkiksi asetettuja, vähähiilisyteen liittyviä politiikkatavoitteita. Poliittikatavoitteiden uhkaaminen ei kuitenkaan – ainakaan lyhyellä aikavälillä – merkitse vakavaa häiriötilannetta. Esimerkiksi Teixeiran ym. (2024) tutkimuksessa aihetta käsiteltiin Portugalin näkökulmasta päätyen johtopäätökseen, että materiaalitarpeet eivät ole ongelma kansallisella tasolla, mikäli globaaleissa toimitusketjuissa ei ilmene häiriöitä. Metallien tarpeen ja kysynnän ennakoidaan kasvavan, koska esimerkiksi tuulivoiman kasvuennusteet ovat merkittäviä, ja niiden kestopagneeteissa tarvitaan esimerkiksi dysposiumia, praseodyymia ja neodyymia. (Teixeira ym. 2024) Dengin & Gen mukaan (2020) NdPr (neodyymi-praseodyymi) on yksi merkittävimmistä materiaaleista tuulivoimaloiden kestopagneetteja ajatellen, ja sen tuotannon kasvu on haaste globaalia tuotantoa ajatellen, mutta kierrätysteknologia voi lievittää tähän kohdistuvaa painetta.

TAULUKKO 6 Tarkastellut tutkimukset

Artikkeli	Artikkelin luokittelu / kategoriat	Tutkimuksen tavoitteet / sisältö	Artikkelissa tunnistettuja häiriö- ja uhkamalleja
Ranjan & Shankar, 2022	Kuormanhallinta, tuuli- ja aurinkoenergia, pääasialliset trendit	Kirjallisuuskatsaus kuormanhallintaan sekä esim. aurinko- ja tuulienergian käytön lisäämisen haasteisiin ja mahdollisuuksiin	Jännite-epätasapaino, taajuuden heittely, tehopoikkeamat
Liang ym. 2022	Vikadiagnostiikkaa koskevan tutkimuksen nykytila sekä diagnostiikkaan liittyvien työkalujen ja mallien haasteet	”State of art”-katsaus tuulivoiman muuntajien vikadiagnostiikkaan	Voimalan muuntajiin liittyvät häiriöt ovat kriittisiä
Mostafa ym. 2023	LVRT	Katsaus LVRT-menetelmiin yleisimmissä tuuliturbiinigeneraattoreissa	Tuuliturbiinit voivat pudota verkosta muiden verkossa tapahtuvien häiriöiden myötä
Bin Nadeem ym. 2023	Hajautetut energijärjestelmät, niiden keskeiset teknologiat ja ominaisuudet	Katsaus hajautettuihin energijärjestelmiin	Ennustemalleihin liittyvä epävarmuus, kyberhyökkäykset ja -haavoittuvuudet
Ahmed ym. 2023	Invertteripohjaiset järjestelmät, minimaalinen inertia	Katsaus matalan inertian järjestelmien haasteisiin ja uhkiin sekä mm.	Kehityssuunta kohti invertteripohjaista, minimi-inertiajärjestelmää on järjestelmätason haaste

		verkkokoodikäytänteisiin jännitekuoppien aikana	
Deng & Ge, 2020	Tuulivoiman kriittiset materiaalit, NdPr	Arvio / skenaarioanalyysi NdPr:n kysynnän kehityksestä globaalilla tuulimarkkinalla	NdPr:n kysynnän kasvu jatkuu ja voi muodostaa haasteita tuulivoimateollisuudessa
Kumar ym. 2020	Tuulienergiajärjestelmien turvallisuuden parantaminen, älykkään sähköverkon ratkaisut	Artikkelissa kehitetään saarekejärjestelmä, joka koostuu mm. tuulivoimasta ja sähkövarastoista.	Älykkäisiin sähköjärjestelmiin liittyy haasteita sekä ulkoisilta (kyber) että sisäisiltä (taajuuden heittely) häiriöiltä suojautumiseksi.
Wiegner ym. 2024	Merituulivoima, kaapeliyhteydet, varastointi	Systemaattinen kirjallisuuskatsaus merituulijärjestelmien integrointimahdollisuuksiin sekä mm. varastointimahdollisuuksiin	Katsauksessa on tuotu esille näkökulmia, jotka liittyvät merituulivoiman merenalaisiin rakenteisiin
Yadav ym. 2023	LVRT (low voltage ride through), ts. jännitekuoppa	Analyysi keinoista, joilla hallitaan mm. jännitekuoppia (LVRT) esimerkiksi tuuli- ja aurinkovoimassa	Tuuli- ja aurinkovoiman lisääntymiseen liittyy erilaisia sähkötekniisiä haasteita ja mm. tuotantolähteen putoaminen verkosta voi aiheuttaa monia ongelmia
Ren ym. 2021	Merituulivoiman käyttö- ja huoltotoiminnan haasteet	”State of art”-katsaus nykhetken tilanteeseen	Pitkä etäisyys rannikosta, säähän liittyvät epävarmuudet, etähallinnan kautta saatava puutteellinen informaatio, odottamattomat häiriöt, ikääntyminen, subjektiiviset tekijät ja kyberhaavoittuvuudet sekä -uhkat.
Shao ym. 2024	Merituulivoima ja tehonlaadun valvonta	Katsaus merituulivoiman liitettiin tehonlaadun valvonnan haasteisiin	Sähkömagneettinen interferenssi, joka on lähtöisin läheisistä sähkölaitteista, viestintäjärjestelmistä ja radiotaajuuksista, ja vaikuttaa sähkötehon laatuun sekä sen ylläpitoon.
Teixeira ym. 2024	Tuuli- ja aurinkovoiman kriittiset materiaalit	Arvio tuuli- ja aurinkovoiman lisääntymiseen liittyvistä materiaalarpeista Portugalin kontekstissa	Globaali toimitusketjujen häiriö voi uhata kriittisten materiaalien saatavuutta

3.3 Synteesi ja ratkaisumallit

Aineiston perusteella muutos perinteisestä ja helposti säädettävästä tuotannosta kohti heikommin säädettäviä korostaa esimerkiksi tuulivoiman kokonaisvaltaisen hallinnan merkitystä. Tuulivoiman hajautunut tuotanto on riippuvaista monenlaisten etävalvonta-, ohjaus- ja viestintäjärjestelmien jatkuvaluonteisesta

toiminnasta, ja juuri näihin järjestelmiin kohdistuu erilaisia kyberriskejä. Tuuli-voimatuotannon volyymin kasvu sekä toimialalle tulevat, uudet toimijat edellä mainittujen mallien merkittävyyttä. Tuulivoima ei ole enää marginaalinen tuotantomuoto, vaan voi parhaimmillaan vastata merkittävästä osasta kulutetusta sähköstä. Tämä korostaa erityisesti toiminnalle keskeisten riskien tunnistamista ja niihin varautumista sekä häiriönsietoisuuden kehittämistä. Edellä mainitun aiheiston perusteella voidaan tunnistaa kolme ratkaisumallia liittyen tuulivoimaan ja sen kriittisten rakenteiden turvaamiseen:

1) Kyberresilienssi

- Tuulivoimalle kriittisten tieto- ja automaatiojärjestelmien kyberresilienssin parantaminen ja siitä huolehtiminen

2) Sähkötekninen hallinta ja laadunvalvonta

- Tuulivoimajärjestelmien sähkötekniisesti laadukkaat hallinta- ja valvonta sekä ennustuskeinot ja -työvälineet; rajapinta muuhun verkkoon ja inertian sekä taajuuden ylläpitäminen

3) Organisatorinen kyvykkyys

- Organisaatioiden rakenteeseen sekä valmiuksiin liittyvät seikat, jotka parantavat kykyä kohdata odottamattomiakin häiriöitä; toimitusketjujen hallinta

Kyberuhkatekijät nousivat odotetusti esille sekä systemaattisesta kirjallisuuskatsauksesta että haastatteluista. Systemaattisen kirjallisuuskatsauksen lopullisesta kattauksesta jätettiin kuitenkin käytettyjen rajausten vuoksi pois kaikkein teknisimmät artikkelit, joten analyysissä ei päästy kovin yksityiskohtaiselle tasolle esimerkiksi haavoittuvuuksissa tai uhkavektoreissa. Kirjallisuudessa yleisesti kyberhyökkäysten osalta on kuitenkin tunnistettu ennen kaikkea palvelunestohyökkäykset ja valheellisen tiedon syöttämiseen perustuvat hyökkäykset (FDIA, false data injection attack). Tuulipuistoihin kohdistuvia FDIA-hyökkäyksiä ovat tutkineet esimerkiksi Bi ym. (2022) sekä Wu ym. (2020). FDIA-hyökkäykset on Bi ym. (2022) mukaan alun perin konseptoinut Liu ym. (2011). FDIA perustuu sähköjärjestelmän kompleksisen luonteen edellyttämään, jatkuvaluonteiseen järjestelmän tilan tarkkailuun ja arviointiin. FDIA-hyökkäyksissä suunnataan toimia sähköverkon tilan arviointiin, jolloin voidaan pahimmillaan päästä käsiksi voimajärjestelmän konfiguraatietoihin sekä manipuloida mittaustietoja esimerkiksi sähköasemilla. Tämä voi johtaa mielivaltaisiin (*arbitrary*) häiriöihin ilman, että olemassa olevat algoritmit tunnistavat käynnissä olevaa hyökkäystä. Liun ym. mukaan FDIA-hyökkäykset edellyttävät toisaalta kuitenkin hyökkääjältä hyvin paljon: hyökkääjän on mm. tiedettävä kohteena olevan voimajärjestelmän voimassa olevat konfiguraatietiedot sekä järjestelmän topologia. Konfiguraatietiedot vaihtuvat säännönmukaisesti ja normaalisti niihin pääsee käsiksi vain verkkoyhtiöiden ohjauskeskuksista, jotka puolestaan ovat fyysisesti hyvin suojattuja. Pelkästään se, että pääsee käsiksi kuvattuihin tietoihin, on siis kaikkea muuta, kuin yksinkertaista; puhumattakaan siitä, hyökkäys edellyttää lisäksi hyökkääjältä kykyä fyysisesti peukaloida antureita tai mittaustietoja. (Liu ym. 2011)

Kyberuhkatekijöiden lisäksi sekä haastatteluaineistosta että systemaattisessa kirjallisuuskatsauksessa nousi yhtä lailla odotetusti esille sähköverkon inertian väheneminen sekä sähkötekniseen hallittavuuteen liittyviä näkökulmia. Sähköverkon inertian väheneminen voi johtaa esimerkiksi merkittäviin poikkeamiin taajuudessa ja väyläjännitteissä. (Ahmed ym. 2023). Ahmed ym. kuvailleenkin (2023) inertiaavasteen olevan tärkein yksittäinen ominaisuus vaihtovirtasähköjärjestelmässä, sillä se antaa säätimellä varustetuille synkronigeneraattoreille aikaa toimia ja pysäyttää taajuuden muutokset jo häiriön alkuvaiheessa. Samoin, kuin kyberturvallisuuden osalta, merkittävä määrä hyvin teknisesti yksityiskohtaista tutkimusta rajautui tämän tutkimuksen katsauksen ulkopuolelle.

Kuten mainittua, kaikki tuulivoimaan, eritoten tuulivoiman kehittämiseen liittyvät ilmiöt ja epävarmuudet eivät aineiston perusteella ole teknisiä, kuten järjestelmiin liittyviä kyberriskejä tai inertian vähenemistä. Haastatteluhavaintojen perusteella on esimerkiksi epäselvää, liittyykö tuulivoiman hankekehitysmalleihin epävarmuuksia: jos yksi taho kehittää hankkeen, ja myy sen eteenpäin, säilyykö tässä välissä ymmärrys esimerkiksi häiriönsietoisuuden kannalta keskeisten ratkaisujen toteutustavasta? Toinen epävarmuustekijä liittyy tuulivoima-alan maturiteettiin: onko alalla esimerkiksi yhtä vakiintuneita riskienhallintakäytänteitä, kuin energiasektorilla yleisesti? On siis kriittistä parantaa yleisesti organisaattorista kyvykkyyttä sen ohella, että kiinnitetään huomiota puhtaasti teknisiin seikkoihin.

Aineistosta tunnistettiin monia kaikille yllä kuvatuille ratkaisumalleille yhteisiä, tai niistä riippumattomia trendejä sekä epävarmuustekijöitä. Näitä olivat esimerkiksi jatkuva teknologinen kehitys ja isossa kuvassa koko sähköjärjestelmän muutos, mitkä näkyvät tuulivoimajärjestelmissä sekä muuttuvina perusrakenteina (ts. yhä korkeampia, monimutkaisempia tai vaativampia rakennelmia) että niiden myötä muuttuvina tai vakavoituvina uhkatekijöinä – esimerkiksi isojen merituulipuistojen voidaan nähdä luovan monia uusia kommervenkkejä (ks. esim. Shao ym. 2024; Ren ym. 2021). Yhtä lailla tutkimusaineistosta nousi esille näkemyksiä, joiden konstruointi käytetyssä vakavien häiriöiden viitekehyksessä oli vaikeaa tai vähemmän mielekästä: esimerkiksi alueelliset vaikutukset ja eroavuudet sekä sosiaalisen hyväksyttävyyden kysymykset. Näiden tarkastelua oli sikin syytä jatkaa tulevassa tutkimuksessa.

4 TULOSTEN TESTAAMINEN: SKENAARIOANALYYSI

The built environment is subject to a formidable array of natural and man-made hazards. (Little, 2009)

4.1 Vakavat häiriötilanteet ja poikkeusolot

Tämän pro gradu-työn tavoitteena on ymmärtää tuulivoimajärjestelmiä vakavien häiriö- ja poikkeusolojen kontekstissa. Tutkimuksella on pyritty vastaamaan sekä kysymykseen, millaiset rakenteet tai ilmiöt voivat tuulivoimajärjestelmien osalta johtaa vakaviin häiriötilanteisiin, että siihen, kuinka tuulivoimajärjestelmät toimivat näissä olosuhteissa. Tutkimus siis avaa näkökulmaa ja tarjoaa työkaluja tuulivoiman jatkuvuudenhallintaan ja resilienssiin. Jatkuvuudenhallinta tarkoittaa Huoltovarmuuskeskuksen mukaan (2024c) prosessia, jonka avulla tunnistetaan liiketoiminnan uhkia, riskejä, häiriötilanteita ja riippuvuuksia, ja jossa arvioidaan näiden vaikutuksia sekä toteutetaan menettelytapoja häiriötilanteiden varalta.

Vakavat häiriötilanteet ja poikkeusolot voidaan määritellä lukuisin tavoin. Esimerkiksi Suomen valmiuslain mukaan (29.12.2011/1552) poikkeusoloja ovat mm.

- Suomeen kohdistuva aseellinen hyökkäys, sen uhka tai sen jälkitila
- Väestön toimeentuloon tai talouselämän perusteisiin kohdistuva erityisen vakava tapahtuma tai uhka, jonka seurauksena välttämättömät toiminnot olennaisesti vaarantuvat
- Erityisen vakava suuronnettomuus ja sen välitön jälkitila
- Hyvin laajalle levinnyt vaarallinen tartuntatauti

Lisäksi poikkeusoloiksi on määritelty uhkat, toiminnat, tapahtumat tai niiden yhteisvaikutukset, missä esimerkiksi julkisen vallan päätöksentekokyky,

rajaturvallisuus, välttämättömät sosiaali- ja terveydenhuollon palvelut, energian tai veden, elintarvikkeiden tai lääkkeiden saatavuus, välttämättömät maksu- ja arvopaperipalvelut, kriittiset liikennejärjestelmät tai kaikkien näiden toimintojen ylläpidossa tarvittut tieto- ja viestintätekniset palvelut ovat uhattuna. (Valmiuslaki 29.12.2011/1552) Tutkimuksellisesti on epäselvää, mitä tarkoittaa vakava häiriötilanne, kuinka se eroaa ns. normaalista häiriötilanteesta, tai milloin se johtaa poikkeusoloihin. Tämän tutkimuksen osalta on nojattu Suomen valmiuslain mukaiseen määritelmään.

Suomessa vakavia häiriötilanteita ja poikkeusoloja ennakoidaan kansallisella riskiarvioinnilla. Ensimmäinen kansallinen riskiarvio on laadittu vuonna 2015 ja tuorein arvio on julkaistu vuonna 2023. Seuraavaksi on kuvattu tuoreimman kansallisen riskiarvion pohjalta ajureita, jotka todennäköisesti vaikuttavat vakavien häiriö- ja poikkeusolojen syntymisen taustalla, sekä edelleen esitelty kansallisesti merkittäviä riskejä kansallisen riskiarvion pohjalta. Myöhemmin näitä ajureita ja riskejä hyödynnetään tutkimuksen skenaarioanalyysissä. Menetelmä on kuvattu tarkemmin osiossa 5.2.1. Kansallisen riskiarvion mukaan turvallisuusympäristö on muutoksessa. Muutoksen taustalla vaikuttaa kuusi tekijää ja ajuria: ulko- ja turvallisuuspoliittisen ympäristön muutos, globaalit arvo- ja toimitusketjut, yhteiskunnalliset muutokset, digitalisoitunut yhteiskunta, hybridi-vaikuttaminen ja ilmastonmuutos. Keskeiset havainnot ajureista on esitetty taulukossa 7.

TAULUKKO 7 Turvallisuusympäristön muutoksen ja riskien taustalla olevat ajurit (Sisäministeriö, 2023).

Ajuri	Kuvaus
Ulko- ja turvallisuuspoliittisen ympäristön muutos	Suurvaltojen keskinäinen kilpailu ja sääntöpohjaisen järjestelmän heikentyminen lisää epävakautta. Venäjän hyökkäyssota Ukrainaan heikentää vakautta. Sotilaalliseen voimankäyttöön ja painostukseen varaudutaan. Globaalit haasteet vaikuttavat toimintaympäristöön sekä itsenäisinä että toisiinsa liittyvinä ilmiöinä. Ne voivat lisätä eriarvoisuutta, luoda näköalattomuutta ja kasvattaa jakolinjoja lisäten populististen liikkeiden vetovoimaa.
Digitalisoitunut yhteiskunta	Digitaalinen murros on lisännyt uusia teknologioita ja toimintatapoja. Teknologinen ympäristö monimutkaistuu tulevaisuudessa. Kyberturvallisuuden kokonaistilan parantamista korostavat esimerkiksi kehittyvät kyberuhkat ja ICT-ympäristöjen kompleksisuuden lisääntyminen. Keskinäisriippuvuudet ovat suuria. Kriittisessä infrastruktuurissa kybertoimintaympäristöjä ovat esimerkiksi energiatoimijoiden ohjausjärjestelmät.
Globaalit arvo- ja toimitukset	Geopoliittinen tilanne ja suurvaltakilpailu lisäävät markkinoiden epävarmuutta. Arvo- ja toimitusketjujen häiriöt tuovat mukanaan merkittäviä kerrannaisvaikutuksia. Energiamarkkinoiden häiriöistä tulee heijastevaikutuksia.
Yhteiskunnalliset muutokset	Yhteiskunnallisen eriarvoistuminen sekä polarisaatio vaikuttavat turvallisuuteen. Myönteinen kehitys ei koske kaikkia. Eriarvoistuminen vaikuttaa osattomuuteen sekä rikollisuuteen ja radikalisoitumiseen. Kehityskulut voivat heikentää oikeusvaltiota ja demokratiaa.
Hybridivaikuttaminen	Valtiollinen tai muu toimija pyrkii vaikuttamaan samanaikaisesti tai jatkumona sekä suunnitelmallisesti usein eri keinoin kohteen haavoittuvuuksiin. Keinot voivat olla niin poliittisia, diplomaattisia, taloudellisia kuin sotilaallisia. Vaikuttaminen voi kohdistua kaikkiin elintärkeisiin toimintoihin. Työkaluna on talous ja sen sisällä olevat kriittiset hyödykkeet ja niihin liittyvät toimitusketjut riippuvuussuhteineen.
Ilmastonmuutos	Nopeasti lämpenevät ilmaston vaikutukset näkyvät monissa uhkamalleissa. Ilmastonmuutos lisää ja muuttaa alueellisia sään ääri-ilmiöitä ja riskejä. Se synnyttää uusia riskejä paitsi ekosysteemeille, myös terveydelle ja kriittiselle infrastruktuurille. Rajat ylittävien riskien heijastevaikutusten todennäköisyys kasvaa. Hillintäpolitiikan riskit eli siirtymäriskit nousevat tärkeämpään asemaan.

Kansallinen riskiarvio tunnistaa viisitoista häiriötilannetta tai uhkamallia. Näitä ovat:

1. Informaatiovaikuttaminen
2. Poliittinen, taloudellinen ja sotilaallinen painostus
3. Sotilaallisen voiman käyttö
4. Laajamittainen maahantulo ja painostaminen maahantulijoita ohjaamalla
5. Yhteiskunnan rakenteisiin tai laajoihin ihmisjoukkoihin tehty terroristin tai muu väkivaltainen isku

6. Isojen väkijoukkojen, ryhmien tai yhteisöjen väkivaltainen liikehdintä tai yhteiskuntajärjestystä vaarantava toiminta
7. Julkisen talouden häiriö
8. Rahoitusjärjestelmän häiriö
9. Energiahuollon häiriöt (sähkön saannin suurhäiriö, polttoaineiden saannin vakavat häiriöt)
10. Tieto- ja viestintäverkkojen palveluiden häiriöt
11. Kuljetusten jatkuvuuden häiriöt
12. Terveysturvallisuuden häiriöt
13. Vesihuollon häiriöt
14. Elintarvikehuollon häiriöt ja ruoka- ja ravintoturvan heikkeneminen
15. Laajat tai pitkäkestoiset onnettomuustilanteet

Kansallisen riskiarvion perusteella voidaan tehdä muutamia tärkeitä havaintoja. Ensiksi vakaviin häiriö- ja poikkeusoloihin johtavia ilmiöitä tai uhkamalleja on analysoitava ja ennakoitava kansainvälisten kehityskulkujen kautta. Vaikka esimerkiksi fyysiset rakenteet ovat lopulta alueellisia ja paikallisia, ne ovat osa kansainvälistä järjestelmää, ja alttiita globaaleille ilmiöille, kuten ilmastonmuutokselle, tai esimerkiksi globaalien arvo- ja toimitusketjujen häiriöille. Vakavan häiriötilanteen laukaiseva tekijä tai kehityskulku voi heijastua paikalliselle tasolle, tai päinvastoin.

Toiseksi uhkamalleja sekä häiriötilanteita voidaan ja tulisi tarkastella sekä infrastruktuurilähtöisesti että edellä kuvattujen laajempien ilmiöiden kautta. Kansallisessa riskiarviossa on tunnistettu monia ilmiöpohjaisia uhkia (mm. informaatiovaikuttaminen, poliittinen, taloudellinen ja sotilaallinen painostus) ja useita infrastruktuurin häiriötilanteita, kuten esimerkiksi energiahuollon häiriöt ja tieto- ja viestintäverkkojen ja palveluiden häiriöt. Infrastruktuurin häiriöt voivat syntyä esimerkiksi kaskadiperiaatteen tai yleisen häiriön periaatteen kautta tai erillisinä häiriöinä (ks. Prier ym. 2023). Uhkakuvien tarkastelun on siis oltava systemistä, ja siinä on huomioitava kompleksisuus.

Kolmanneksi monien uhkamallien ja järjestelmien yhteisenä vaikuttavana kehityskulkuna on yhteiskuntien digitalisoituminen ja kyberturvallisuus. Digitalisoituvat välttämättömät palvelut linkittyvät sekä ilmiöpohjaiseen että infrastruktuurilähtöiseen tarkastelutapaan. Niiden taustalla on sekä fyysisiä rakenteita että niihin liittyvien haavoittuvuuksien mahdollistamia ominaisuuksia, jotka yhdessä uusien ilmiöiden kanssa synnyttävät merkittävän uhkakokonaisuuden.

4.2 Skenaarioanalyysi

Tässä osiossa on koeteltu tutkimuksen aineistossa esille nousseita havaintoja pyrkien ymmärtämään, miten aineistosta esille nousseet havainnot suhteutuvat kansallisesti tunnistettuihin vakaviin häiriö- ja uhkamalleihin. Menetelmänä on käytetty strategisen analyysin menetelmää, skenaarioanalyysia, jossa arvioidaan ja

tunnistetaan tulevaisuuden kehityskulkuja nykyisen tilanteen pohjalta, jotta voidaan tehdä tarkempia suunnitelmia ja päätöksiä (Bunn & Salo, 1993). Kuten aiemmin mainittiin, skenaarioanalyysi on tässä pro gradu-työssä sekä ennakointi- että validointityökalu. Skenaariot on koostettu osion 5.1. uhkamallien, empiirisen aineiston sekä teoriassa tunnistettujen tekijöiden pohjalta. Niiden avulla on voitu todentaa kehitettyjen konstruktioiden merkittävyyttä tuulivoimajärjestelmän toimintaa vakavissa häiriö- ja poikkeustilanteissa.

4.2.1 Menetelmän kuvaus

Skenaarioanalyysin pohjana on käytetty osiossa 5.1 esiteltyjä ajureita ja uhkamalleja. Näistä on yhdistelemällä ja valikoimalla koostettu kolme uhkaskenaariota. Uhkaskenaarioiden koostaminen perusteluineen on esitetty osiossa 5.2.2. Skenaariotyypit on pohjattu viiteen pääajuriin, ja niiden sisältö on muodostettu näiden ajureiden vaikutuksen merkittävyyttä vaihtelemalla. Lopputuloksena on syntynyt aluksi lyhyt yleiskuvaus kustakin skenaariosta sekä ajurien muuntelemisen avulla koostettu kuvaus skenaarion sisältämästä kehityskulusta. Lopuksi skenaarioita on viimein arvioitu tunnistettuja konstruktioita vasten. Tämä analyysi todentaa empiirisen aineiston merkittävyyttä ja konstruktioiden roolia erilaisten häiriötilanteiden kannalta.

4.2.2 Uhkaskenaarioiden luominen

Skenaarioanalyysi perustuu viiteen pääajuriin: digitalisoitunut yhteiskunta, toimijatasen riskit, sähköjärjestelmän tekniset muutokset, tekninen kompleksisuus, materiaalit ja komponentit. Näiden ajurien kuvaus ja sisältö on esitetty taulukossa 8.

TAULUKKO 8 Ajurit skenaarioanalyysia varten.

Ajuri	Ajurin keskeinen sisältö ja tausta
Digitalisoitunut yhteiskunta; yhä enemmän kybervaikuttamiselle alttiita tietojärjestelmiä	Tieto- ja automaatiojärjestelmien kehitys on vauhdikasta. Yhteiskunta on yhä riippuvaisempi kompleksisista ja kerroksellisista tietojärjestelmistä sekä niiden jatkuvaluonteisesta toiminnasta. Tuulivoiman valvonta ja operointi tapahtuu etäohjauksessa erilaisin tietojärjestelmin. Järjestelmät ovat haavoittuvia mm. palvelunestohyökkäyksille ja muille kyberhyökkäyksille.
Toimijatasen riskit ja organisatorinen resilienssi (omistajat, operaattorit, turbiinivalmistajat, hankekehittäjät)	Tuulivoima-alan toimintamallit eroavat ns. perinteisestä energia-alan toimintatavasta, ja esim. hankekehitys voi olla monimutkaista. Tuulivoimainfrastruktuurien omistajilla tai operoijilla ei välttämättä ole joko intressiä, kiinnostusta tai näkyvyyttä rakenteisiin liittyviin riskeihin tai niihin vaikuttamiseen. Maturiteetti varautumisen osalta voi vaihdella perinteiseen energiatoimialan tasoon verrattuna. Pahimmassa tapauksessa ilmiö heikentää varautumista ja häiriönsietoisuutta tai lisää vakavien häiriöiden riskiä keuhkojen päätösten takia.
Sähköjärjestelmän muutokset	Tuulivoima, samoin kuin muu sään mukaan vaihteleva tuotanto (mm. aurinkovoima), ei tuota verkkoon inertiaa, mikä mutkistaa verkon tasapainon ylläpitämistä sekä lisää siihen liittyviä epävarmuuksia. Tuulivoimatuotanto vaihtelee merkittävästi, myös hyvin lyhyen ajan sisällä. Tuotanto voi olla kokonaiskapasiteettiin nähden mitä vain nollan ja sadan prosentin väliltä, mikä voi olla

	erityinen ongelma esimerkiksi huippukulutustilanteissa. Vaihteleva tuotanto kuormittaa järjestelmää; ylikuormittunutta järjestelmää voidaan hyödyntää pahantahtoisten tahojen toimesta tai se voi olla alttiimpi muille häiriöille ja vioille.
Tekninen kompleksisuus, <i>unknown unknowns</i>	Tuulivoimateknologia on sinänsä tunnettua ja yksinkertaista. Sen käyttöönotto on toisaalta laajamittaista, ja se monimutkaistaa sekä hajauttaa olemassa olevia rakenteita niin paljon, että muutos voi vaikuttaa merkittävästi muuhun yhteiskuntaan tai ympäröiviin rakenteisiin samalla heikentäen järjestelmän hallittavuutta tai ennakoitavuutta odottamattomin tavoin. Nyt käyttöön otettavissa ratkaisuisa voi olla jotain sellaista, jota emme tiedä, että emme tiedä. Järjestelmien tekninen kompleksistuminen edellyttää huomattavaa suunnittelua järjestelmistä vastaavien toimijoiden tasolla.
Materiaaleihin ja komponentteihin sekä huoltoon liittyvät ja toimitusketjujen haasteet	Tuulivoiman hajautetun luonteen vuoksi huoltotoimenpiteisiin liittyy erityispiirteitä. Varaosat voivat myös olla isoja, hankalasti tavoitettavissa, niiden laadussa sekä toisaalta saatavuudessa voi olla ongelmia. Sähköasemakomponenteilla voi olla hyvin pitkiä toimitusaikoja ja tiettyjä komponentteja sekä materiaaleja valmistetaan vain tietyissä valtioissa EU:n ulkopuolella.

Seuraavaksi on kehitetty kolme uhkaskenaariota edellä mainittuja viittä ajuria muuntelemalla. Skenaarioiden nimet ja lyhyet kuvaukset on tiivistetty alle ja analysoitu erikseen pidemmin konstruktioita vasten jäljempänä osiossa 4.3.

- Skenaario 1: Kyber iskee tuulettimeen
 - o Perustuu erityisesti ajureihin 1-3
 - o Tuulivoimajärjestelmien välttämättömiin tietojärjestelmiin kohdistuu kybervaikuttamista, joka johtaa sähköjärjestelmän toiminnan kannalta merkittävään tuotantovajeeseen. Kybervaikuttamisen onnistumisen taustalla on keho kyberresilienssi, toimijakentän välipitämättömyys riskeistä sekä sähköjärjestelmien kasvanut riippuvaisuus tuulivoimasta. Tarkoin ajoitettu kyberhyökkäys heikentää sähköjärjestelmän häiriönsietoisuutta olennaisesti ja altistaa sähkön tuotannon ja jakelun myös enemmän rutiininomaisten riskien, kuten äärimmäisten sääolosuhteiden, riskeille. Tuulivoimatoimijoilla on rajoittunut kyky operoida laitoksia paikallisesti ilman etähallintaan tarvittuja järjestelmiä. Tilanteen varalle ei myöskään ole tehty varautumissuunnitelmia eikä vastaavaa tapahtumakulkua ole aiemmin harjoiteltu, mikä hidastaa häiriöstä toipumista.
- Skenaario 2. Sähköjärjestelmän häiriö
 - o Perustuu erityisesti ajureihin 3-4
 - o Tuulivoimajärjestelmät toimivat lähtötilanteessa tavanomaisesti. Tuulivoimatuotannon kasvu on kuitenkin tehnyt sähköjärjestelmästä teknisesti vaikeamman hallita, mikä osaltaan myötävaikuttaa häiriönsietoisuuden tason laskuun. Skenaariossa sähköjärjestelmään syntyy häiriö tuulivoimaan liittymättömistä syistä, esimerkiksi äärimmäisen sääilmion, teknisten vikojen ja sabotaasin yhteisvaikutuksena. Häiriön seurauksena tuulivoiman rakenteet vahingoittuvat tai niiden käyttö muuttuu joko vaikeaksi tai

mahdottomaksi. Tuulivoiman sähkötekniset valmiudet (esim. liityntä verkkoon ja tosiasiallinen valmius reagoida häiriöihin) todetaan myös paikallisesti riittämättömiksi. Skenaarion 1 tapaan myös yleinen varautumis- ja harjoituskäytänteiden puute hidastaa häiriöstä toipumista ja saattaa johtaa tuotantojen pitkäaikaisiin katkoihin.

- Skenaario 3. Pirstaloitunut uhkatilanne
 - o Perustuu erityisesti ajureihin 2, 4 ja 5, osittain myös ajureihin 1 ja 3.
 - o Tuulivoimajärjestelmiä rakennetaan tulevina vuosina lisää hyvin merkittävästi. Järjestelmien näennäinen yksinkertaisuus johtaa kehoon varautumiseen sekä käytänteiden ja organisatoristen toimien kuin materiaalisten seikkojen osalta (vrt. havainnot varautumiskäytänteiden puutteista skenaarioissa 1 ja 2). Fyysisiä rakenteita suunnitellaan pelkästään kustannustehokkuus edellä, minkä kautta syntyy piileviä riskejä. Piilevät riskit realisoituvat sekä normaalien huoltotilanteiden että globaaleihin toimitusketjujen häiriöihin liittyvien häiriöiden yhteydessä. Samanaikaisesti tuulivoiman ohjattavuutta vaikeutetaan kybervaikuttamisella, ja on toisinaan epäselvää, mitkä viat ovat fyysisiä, ja mitkä liittyvät kybertoi-miin. Skenaarion myötä syntyy toistuvia tai epäselviä uhkatilanteita, joissa tilannekuva on keho, mutta joihin kyetään reagoimaan ilman merkittäviä kerrannaisvaikutuksia.

4.3 Analyysi

Yhteenveto ja analyysi skenaarioista sekä niihin liittyvistä havainnoista ratkaisumalleittain on esitetty taulukossa 9. Kukin ratkaisumalli (R1-R3) on arvioitu osiossa 4.2 luotuja ja kuvattuja skenaarioita vasten. Taulukossa on siis kuvattu, miten ratkaisumallin mukainen toiminta voi hillitä, ehkäistä tai jopa estää uhkamalliskenaariota.

TAULUKKO 9 Ratkaisumallit skenaarioita vasten.

Skenaario / Ratkaisumalli	R1. Kyberresilienssi	R2. Sähkötekni- nen hallinta ja laadunvalvonta	R3. Organisatorinen kyvykkyys
S1. Kyber iskee tuulettimeen	<p>Riittävä kyberresilienssi estää skenaarion toteutumisen tai merkittävästi hillitsee sen haitallisia vaikutuksia. Esimerkiksi palvelimista on olemassa varmuuskopioita ja kriittisiä järjestelmiä on erotettu toisistaan ja salauksista on huolehdittu, mikä hillitsee hyökkääjän etenemistä.</p>	<p>Kyberhäiriötilanteissa järjestelmien häiriönsietoisuus on myös madaltuneella tasolla ja resurssit kuormittuneita. Kyky esimerkiksi ylläpitää järjestelmän tasapainoa kyberhäiriöissä voi hillitä häiriöiden kertaantumista ja muita vaikutuksia.</p>	<p>Jos organisaatio on varautunut kyberhäiriötilanteisiin, esimerkiksi luoden erilaisia toimintamalleja ja -kehyksiä, reagointi tilanteisiin sekä toipuminen voi olla nopeampaa, kuin niitä ilman. Parhaimmillaan organisatorinen valmius ja kyvykkyys voi estää myös kyberhäiriöiden syntyä: esimerkiksi valpas henkilöstö.</p>
S2. Sähköjärjestelmän häiriö	<p>Tuulivoimajärjestelmien kyberresilienssi voi mahdollisesti parantaa myös muuta jatkuvuudenhallintaa ja näin ollen hillitä sähköjärjestelmän häiriöstä seuraavia vaikutuksia.</p>	<p>Riittävin toimenpitein voidaan välttää omaisuuden tai henkilöstön vahingot, ajaa tuotantoa suunnitellusti alas tai jopa pitää tuotantoa käynnissä häiriöstä riippumatta.</p>	<p>Tuulivoimajärjestelmiin liittyvä organisatorinen kyvykkyys parantaa sekä toimijoiden omaa jatkuvuudenhallintaa, ja näin ollen myös omaisuuden ja henkilöstön suoja, mutta myös koko sähköjärjestelmän häiriönsietokykyä. Omilla valmiuksilla ei voida estää muualla syntyviä häiriöitä mutta niillä voidaan parantaa omaa varautumista.</p>
S3. Pirstaloitunut uhkatilanne	<p>Riittävä hillitsee merkittävästi skenaarion haitallisia vaikutuksia kohdennettujen kyberhyökkäysten osalta.</p>	<p>Pelkistä verkon hallintaan ja valvontaan liittyvistä miniminäköku- lmista huolehtiminen ei välttämättä ehkäise kaikkia uhkatilanteita tai minimoi niiden vaikutuksia.</p>	<p>Pirstaloituissa ja epäselvissä tilanteissa tarvitaan kykyä kerätä, muodostaa ja jakaa tilannekuvaa sekä -ymmärrystä, mikä puolestaan karttuu organisatoristen kyvykkyyskehityksen kautta. Riittävin valmiuksin voidaan jopa estää uhkatilanteiden synty.</p>

5 TULOSTEN SOVELTAMISALA JA TEOREETTINEN KONTRIBUUTIO

Tuulivoimajärjestelmät ovat vähintään joiltain osin kompleksisia järjestelmiä. Osana sähköjärjestelmää ne ovat myös osa laajempaa kompleksista ja adaptiivista systeemiä. Kompleksiselle adaptiiviselle systeemille luonteenomaisesti (ks. esim. Ahmad ym. 2024) energiajärjestelmään liittyy esimerkiksi itseorganisoitumista, oppimista ja mukautumista sekä emergenssiä myös systeemitasolla. Jo tämä tekee tuulivoimatoimijoista ja -järjestelmistä kiinnostavan tutkimuskohteen. Mielenkiintoa entisestään lisää se, että tuulivoimaa on sanottu yhdeksi nopeimmin kasvavista, kilpailukykyisimmistä ja vähiten haittoja aiheuttavista uusista teknologioista (Summerfield-Ryan & Park, 2023)

Uutta teknologiaa on pidetty jo kauan ratkaisuna maailmassa vallitseviin ongelmiin (mm. Churchman, 1968, 3–4). Teknologisen kehityksen ja systeemisten muutosten seurauksena on kuitenkin käynyt ilmi, että lopputuloksena maailmasta on tullut yhä kompleksisempi – enemmän kuin osiensa summa (mm. Unruh, 2000). Jos tätä teoriataustaa tarkastellaan tämän tutkimuksen aihepiirin – tuulivoimajärjestelmien – kautta, on syytä aivan ensiksi todeta juuri niiden kerroksellinen ja kompleksinen luonne (ks. Star, 1999, 380–382). Kompleksisuutta ja siihen liittyvää teoria ei tule kuitenkaan nähdä leimana, vaan eräänlaisena työkalupakkina. Kun ymmärrämme yleisesti kompleksisiin järjestelmiin liittyviä piirteitä, osaamme etsiä oikeita asioita oikein menetelmin myös tutkimuskohteenä olevista järjestelmistä.

Kun puhutaan tuulivoimajärjestelmistä, puhutaan paljon muustakin, kuin vain tuuliturbiineista, ja niiden edellyttämistä johtimista, pylväistä, maakaapeleista ja sähköasemista. Tuulivoimajärjestelmät viittaavat siihen systeemiseen kokonaisuuteen, johon kuuluvat paitsi tuulivoimaan liittyvän teknologian taustalla olevat organisaatiot, kuten hankekehittäjäyhtiöt, omistajayhtiöt, huolto- ja valvomo-operaattorit ja niin edelleen, mutta myös tukirakenteet ja niitä ylläpitävät toimijat, kuten tietoliikenne ja tieto- sekä automaatiojärjestelmien kyberturvallisuus. Esimerkiksi Silvast & Virtanen katsovat (2013) energiainfrastruktuuriin kuuluvan teknologisten elementtien, kuten sähköjakelutekniikan, lisäksi myös yhtiöt, lait ja standardit. Koska teknologinen kehitys on tällä hetkellä

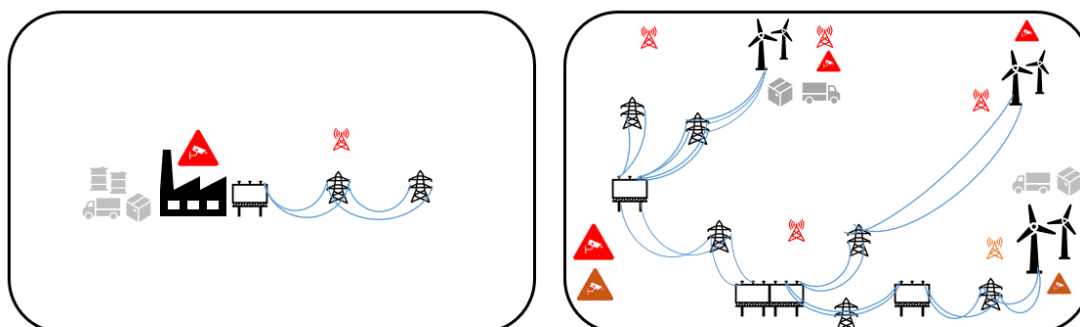
huomattavan nopeaa, myös regulaatio- ja politiikkatoimet kehittyvät ja muuttuvat merkittävästi: tästä hyvä esimerkki on EU-komission tuulivoimapaketti (Euroopan komissio, 2023).

Tuulivoimajärjestelmistä on tullut ennen kaikkea osa kriittisiä perusrakenteita. Niitä koskevassa keskustelussa käytetään usein käsitettä ”kriittinen infrastruktuuri”. Myös tässä tutkimuksessa esille nousseiden havaintojen pohjalta voidaan kyseenalaistaa tämän käsitteen käytön mielekkyyttä. Ensinnäkin, ”kriittinen infrastruktuuri” ei ole pysyvä tai yksittäinen entiteetti vaan se on kokoelma erilaisista, osin toisiinsa suoraan fyysisesti mutta usein vähintään välillisesti kytkeytyneistä infrastruktuureista. Olisikin siis perusteltua puhua kriittisistä infrastruktuureista, ellei viitata tiettyyn infrakohteeseen, esimerkiksi helsinkiläisille juomavettä valuttelevaan Päijänne-tunneliin, jota voidaan painovoimaisen toimintaperiaatteensa vuoksi pitää enemmän yhtenä entiteettinä. Yksittäinen tuulivoimala on sen sijaan pikemminkin vain yksi ja samalla näkyvin ja konkreettisin osa kriittisiä rakenteita.

Toisekseen, kun käytetään sanaa infrastruktuuri, keskitytään käsittelemään juuri fyysisiä rakenteita, ja jätetään huomiotta siihen olennaisesti liittyvät ei-materiaaliset kerrokset, jotka liittyvät erityisen vahvasti esimerkiksi tuulivoimajärjestelmiin. Fyysisiä rakenteita myös ohjataan ihmisten toimesta ja verkoston taustalla toimii vahvoja institutionaalisia rakenteita ja käytänteitä. Ja etenkin, kun puhe kääntyy kriittisen infrastruktuurin resilienssiin, on tärkeää huomioita teknisen häiriönsietoisuuden lisäksi myös ns. organisatorinen taso, sillä valmius kohdata erilaisia ääritilanteita on ennen kaikkea organisatorinen kyky. Erityisesti kriittinen infrastruktuuri tulisi käsittää kriittisten rakenteiden verkostona, kun kyseessä on historian perusteella epälineaarisesti (mm. Martin, 1996) ja systeemisesti (mm. Michaux ym. 2023; IEA, 2023) muuttuva energiajärjestelmä. Edellä mainitut kaksi näkökulmaa näkyvät hyvin tämän tutkimuksen lopputuloksena syntyneissä ratkaisumalleissa.

Tuulivoiman rakenteiden verkottuneisuutta voidaan havainnollistaa toimijarakenteiden vertailulla perinteiseen keskitettyyn lauhdetuotantoon nähden (ks. yksinkertaistus kuviossa 5). Perinteisessä lauhdetuotannossa niin tuotanto, polttoainevarasto, huolto, kunnossapito, valvonta ja sähköasema päämuuntajineen voivat sijaita jopa kärjistäen jopa saman aidatun hehtaaritontin sisällä. Tuulivoimajärjestelmät ovat puolestaan hajautettuja paitsi tuotannon, verkkoinfrastukturin kuin valvonnan ja huollon osalta. Tuulivoimaloiden sähköasemien ja -verkkojen valvontatoimintaa tehdään siihen erikoistuneista valvomoista, lisäksi turbiinitason valvontaa tehdään voimalaitosvalmistajien toimesta. Turbiinit yhdistyvät toisiinsa ja valvomoihin erilaisin tietoliikenneyhteyksin. Kokonaisuus on siis hyvin systeeminen ja kompleksinen, ja kaikkien palasten on toimittava, jotta järjestelmä toimii odotetulla tavalla. Hajautettuun infrastruktuuriin liittyy monia haasteita, mutta toisaalta hajautunut infrastruktuuri voi olla myös keskitettyä järjestelmää tehokkaampi, joustavampi ja taloudellisempi (Nadeem ym. 2023). Tuulivoiman tapauksessa etua hajautuneisuudesta tulee esimerkiksi silloin, jos yksittäisessä tuotantoyksikössä tapahtuu vikaantumista: esimerkiksi

yhden muutaman megawatin tuulivoimalan putoaminen pois verkosta vian takia ei välttämättä näy kuluttajarajapinnassa lainkaan.



KUVIO 5 Yksinkertaistus perinteisen energiantuotannon ja tuulivoimajärjestelmien eroista systemisellä tasolla. Perinteisessä, keskitetyssä energiantuotannossa sähköntuotanto perustuu kiinteään tai nestemäiseen polttoaineeseen, jota varastoidaan voimalaitoksen välittömässä läheisyydessä. Hajautetussa järjestelmässä sekä tuotanto, siirto, huolto että valvontatoiminta ovat nimensä mukaisesti hyvin maantieteellisesti hajallaan.

Tietoliikennejärjestelmien ja niihin liittyvien kyberriskien merkittävyys nousi esille sekä haastatteluaineistossa että kirjallisuuskatsauksessa. Digitaaliset järjestelmät, samoin kuin energiajärjestelmät, ovat monien luokitusten mukaan osa kriittistä infrastruktuuria eli perusrakenteita. (mm. CISA, 2024; EU 2022/2557) Koska esimerkiksi sähkö- ja energiajärjestelmät kehittyvät kohti entistä älykkäämpiä kokonaisuuksia (mm. Bombard ym. 2013), tietojärjestelmiin kohdistuva huomio on perusteltua, ja tämänkin tutkimuksen havainnot korostavat osaltaan niitä käsittelevän tutkimuksen merkitystä. Tämän tutkimuksen havaintojen perusteella ei kuitenkaan voida esimerkiksi arvioida, millaisia osa-alueita teemassa on tutkittu paljon, ja millaisia riittämättömästi. Näiden havaintojen ja johtopäätösten tekeminen vaatisi erillisen katsauksensa.

Jo alkuvaiheessa tämän tutkimuksen keskeisimmäksi haasteeksi tunnistettiin tasapainoilu teoreettisen ja käytännöllisen tarkastelun välillä. Samaten käytännöllisten havaintojen ja tulosten osalta jouduttiin hakemaan kompromissia sen suhteen, perehdytäänkö syvällisesti yksittäisiin teknologioihin tai teknisiin osa-alueisiin, esimerkiksi automaatiojärjestelmät ja niiden kyberhaavoittuvuudet tai tuulivoiman topologia ja sähkötekniset ominaisuudet, vai kerrytetäänkö kokonaiskuvaa kaikista näistä yleisemmällä tasolla. Kuten lukijalle tässä vaiheessa on käynyt selville, tämän tutkimuksen osalta päädyttiin kokonaisvaltaiseen tarkasteluun.

Kokonaisvaltaisen tarkastelun takia tämä tutkimus ei tarjoa uutta tieteellistä tietoa esimerkiksi kyberturvallisuuteen tai tuulivoiman sähkötekniikkaan. Tutkimus voi toisaalta tarjota tiettyihin osa-alueisiin vihkiytyneille tutkijoille näkökulmaa siitä, miten oma tutkimussuuntaus asemoituu muihin nähden. Tulevassa tutkimuksessa olisi hyödyllistä ymmärtää paremmin, mitä osa-alueita on tutkittu tähän mennessä eniten, mihin liittyy merkittävimpiä tietopuutteita, tai esimerkiksi miten eri toimintoihin liittyvät haavoittuvuudet ja uhkatekijät suhteutuvat toinen toisiinsa. Voidaanko esimerkiksi sanoa, että tietojärjestelmiin

kohdistuvat palvelunestohyökkäykset ovat tuulivoiman jatkuvuudenhallinnan kannalta merkittävämpi ongelma kuin tuuliennusteisiin liittyvät epävarmuudet? Tämä tutkimus ei ota kantaa siihen, mutta tarjoaa suuntaviivoja kiinnostaville asiakokonaisuuksille.

Toisaalta jo tämän tutkimuksen aineiston perusteella voidaan sanoa, että esimerkiksi tuuliturbiinien teknisten rakenteiden lujuus ei erittäin todennäköisesti ole järjestelmätasolla näkyvän vakavan häiriötilanteen taustalla tai syynä. Tuoreidenkin esimerkkien valossa rakenteiden pettäminen vaikuttaa olevan harvinaisuudessaan varsin satunnaista, ja johtavan lähinnä omaisuustuhoihin (ks. esim. Laakso, 2024; Mikä katkaisi Jämijärven tuulivoimalan lavan?). Kehitetyissä häiriöskenaarioissa ja ratkaisumalleissa korostuivat sen sijaan eritoten kyberuhkat ja niiden hallinta, sähköjärjestelmän resilienssiä tukevat valvonta- ja hallintatoimet sekä toisaalta alan organisaatioiden organisatoriset valmiudet kohdata häiriöitä. Etenkin havainto organisaatioiden kyvyistä kohdata ja kuvitella sekä valmiuksista torjua häiriöitä on linjassa muunkin varautumista koskevan tutkimuksen kanssa. Esimerkiksi Heino ym. (2022) korostavat, että kun jotakin suunnittelemaa tapahtuu, olisi tärkeää olla valmiina toimimaan oikein ja ottaa etäisyyttä ns. valmiiksi ohjelmoituihin toimenpiteisiin, sillä kriisissä selviäminen voi edellyttää uudenlaista ajattelua. Haasteeksi jää, että kompleksinen toimintaympäristö tekee varautumisesta vaikeaa, ja kriisien on tapana yllättää. (Heino ym. 2022)

Systeemitheorian mukaisesti uusien elementtien, yhteyksien ja solmukohdienten kehittyminen tekee järjestelmästä entistä kompleksisemmän. Edellisten sivujen havaintojen perusteella on selvää, että kriittisten perusrakenteiden systemisen muutoksen ymmärtämisessä on jo täysi työ – puhumattakaan niiden turvaamisesta. Vaikka sähköjärjestelmän luotettavuus esimerkiksi Suomessa on suorastaan erinomaisella tasolla, sähköjärjestelmän jatkuvuus ja toiminta on hyvin kompleksisten prosessien ja riippuvaisuuksien varassa (mm. Powell, 2014). Tutkimuksessa tunnistetut kolme ratkaisumallia tarjoavat pohjaa tuulivoimajärjestelmien resilienssin kehittämiseksi ja niiden kehityksen synnyttämien ilmiöiden vaikutusten hallitsemiseksi.

Erilaisten häiriöiden lisäksi muuttuvan energiajärjestelmän tulisi kyetä vastaamaan esimerkiksi lisääntyvään tuulivoimatuotantoon ilman kalliita reserviratkaisuja. Varakapasiteetin tarvetta on yleisesti pyritty vähentämään siirtoyhteyksien määrää lisäämällä (mm. Franco & Salza, 2011). Tuulivoiman sääriippuvaisen luonteen vuoksi kyky reagoida äkillisestikin muuttuvaan tuotantoon on välttämätön, jopa ilmeinen. Esimerkiksi siirtojärjestelmien ylikuormitus voi myötävaikuttaa jännitteen heittelyyn tai jopa romahtamiseen (Morison ym. 2004). Kärjistäen, ja tämän tutkimuksen havaintojenkin vahvistamana voisi sanoa, että kuormittunut sähköjärjestelmä on alttiimpi myös sellaisille häiriöille, jotka normaalisti hoidettaisiin ns. konepellin alla – ilman näkyviä vaikutuksia.

Energiamurrosta koskevassa tutkimuksessa on pohdittu vastausta kysymyksiin, mikä on mahdollista, ja miksi uusia ratkaisuja tarvitaan. Ilmiön siirryttyä visiotasolta yhä enemmän osaksi jokapäiväistä arkea, tutkimuksessakin alkavat korostua käytännölliset näkökulmat: mitä sitten, kun uusia ratkaisuja otetaan

käyttöön? Juuri tähän kysymykseen tämäkin tutkimus tarjosi näkökulmaa sekä monimutkaistuvaa maailmaa seuraavien asiantuntijoiden havaintojen, että alan viimeisimmän vertaisarvioidun tieteellisen tutkimuksen kautta. Tulevassa tutkimuksessa tulisi lisäksi huomioida tuulivoimajärjestelmien integroituminen osaksi niin sanottuja hybridijärjestelmiä. Näin toteutuessaan järjestelmiin tulee kokonaan uusi kerros tunnettua, mutta jälleen järjestelmää monimutkaistavaa teknologiaa. Toinen merkittävä tulevaisuuden kehityskulku liittyy merituulivoimaan, jota olisi perusteltua tarkastella mittakaavansa ja luonteensa vuoksi kokonaan erillisenä kysymyksenä.

6 YHTEENVETO

Tämän pro gradu-tutkielman tavoitteena oli tuottaa ymmärrystä muuttuvasta sähköjärjestelmästä etenkin tuulivoimajärjestelmiin kohdistuvan tutkimuksen kautta. Työn teoreettinen viitekehys koottiin systeemiteorian, kriittistä infrastruktuuria ja perusrakenteita koskevan tutkitun ja muun julkaistun tiedon sekä energiajärjestelmiä sekä niiden kompleksisuutta, resilienssiä ja muutosta koskevan tutkitun tiedon ympärille. Teoreettisessa viitekehyksessä kuvattiin energiajärjestelmät osana kompleksisia, adaptiivisia systeemeitä sekä kriittistä infrastruktuuria, ja pohdittiin näihin liittyviä merkityksiä.

Työllä oli kaksi pääasiallista tavoitetta. Ensimmäinen tavoite oli ymmärtää, mitä kriittisten perusrakenteiden turvaamisessa tulisi huomioida lisääntyvän tuulivoimatuotannon ja sähköjärjestelmän muutoksen myötä. Toinen tavoite oli selvittää tai kuvata, millaisia tai millaista häiriöihin johtavia ilmiöitä, rakenteita tai toimijuutta tuulivoimatuotannossa ja -järjestelmissä on sekä kuinka ne voivat ilmetä. Tutkimuksella ei otettu kantaa energiapolitiikkaan tai siihen, soveltuuko tuulivoima osaksi sähköjärjestelmää, kuinka hyväksyttävää se on tai mikä olisi hyväksyty häiriönsietoisuuden taso. Tavoitteena oli analysoida järjestelmää ja sen ominaisuuksia mahdollisimman objektiivisesti, pyrkien tarjoamaan ymmärrystä ja tukea myös käytännön tasolle.

Edellä mainittuja tavoitteita lähestyttiin konstruktiivisen tutkimustavan mukaisesti eli pyrkien luomaan sekä tosielämään että tutkittuun tietoon perustuvia ratkaisumalleja, joilla on sekä käytännöllistä että tieteellistä kontribuutiota. Tämän pro gradu-työn osalta tämä tarkoitti tuulivoimajärjestelmiin liittyvien haavoittuvuuksien sekä häiriötekijöiden tunnistamista ja näihin perustuvia ratkaisumalleja. Tuulivoimaan liittyvien häiriötekijöiden sekä yleiseen toimintaympäristöymmärrykseen perustuvan tiedon pohjalta kehitettiin lisäksi skenaarioita vakavista häiriötilanteista, minkä perusteella analysoitiin kehitettyjen ratkaisumallien toimivuutta. Tunnistetut skenaariot olivat merkittävä kyberhäiriö (S1), sähköjärjestelmän häiriö (S2) ja pirstaloitunut uhkatilanne (S3). Kehitettyjen skenaarioiden ajureina toimivat digitalisoitunut yhteiskunta (yhä enemmän kybervaikuttamiselle alttiita tietojärjestelmiä), toimijatasen riskit ja organisatorinen

resilienssi, sähköjärjestelmän muutokset, tekninen kompleksisuus ja materiaaleihin ja komponentteihin sekä huoltoon liittyvät ja toimitusketjujen haasteet.

Aineisto kerättiin kahdella menetelmällä. Pohjatiedoksi ja taustaymmärryksen parantamiseksi nykyhetkeen liittyen toteutettiin haastatteluita viidelle energia-alan tai varautumistyön asiantuntijalle. Toisena menetelmänä käytettiin vuosille 2020–2024 ajoitettua systemaattista kirjallisuuskatsausta. Kirjallisuuskatsaus nähtiin välttämättömäksi keinoksi koostaa kokonaisuymmärrys tuoreimmasta tutkimustiedosta. Katsausta varten tunnistettiin yhteensä yli 2500 tutkimusta, joista 13 päädyttiin analysoimaan tarkemmin osaksi tätä tutkimusta.

Haastatteluista sekä systemaattisesta kirjallisuuskatsauksesta kootun synteessin perusteella tunnistettiin kolme ratkaisumallia liittyen tuulivoimaan ja sen kriittisten rakenteiden turvaamiseen. Näitä olivat kyberresilienssi, sähkötekninen hallinta ja laadunvalvonta sekä organisatorinen kyvykkyys. Kyberuhkatekijöiden ja toisaalta myös sähköteknisten hallintakeinojen ja -näkökulmien nouseminen esille tutkimuksessa oli odotettua. Aineiston perusteella tuulivoiman hajautunut tuotanto on riippuvaista monenlaisten etävalvonta-, ohjaus- ja viestintäjärjestelmien jatkuvaluonteisesta toiminnasta. Tuulivoima ei myöskään ole enää marginaalinen tuotantomuoto, vaan voi vastata parhaimmillaan hyvin merkittävästi osasta kulutetusta sähköstä.

Sähköverkkoteknisten näkökulmien osalta odotettua oli, että niin haastatteluissa kuin tutkimuskirjallisuudessa korostetaan inertian vähenemistä sekä yleisesti inertiaavasteen merkitystä taajuuden ylläpidossa. Tätä tutkimusta varten toteutetussa systemaattisessa kirjallisuuskatsauksessa tunnistettiin huomattava määrä juuri kyberriskejä- tai haavoittuvuuksia tai sähköverkkoteknisiä näkökulmia käsittelevää tutkimusta, mutta nämä rajautuivat kuitenkin lopullisen analyysin ulkopuolelle, sillä ne eivät vastanneet systemaattiselle katsaukselle asetettuja kriteereitä.

Yhtäältä aineistossa korostuivat hyvin vahvasti ei-tekniset näkökulmat. Tutkimustulosten mukaan organisaatioiden rakenteeseen sekä valmiuksiin liittyvät seikat, jotka parantavat kykyä kohdata odottamattomiakin häiriöitä, voivat parhaimmillaan ehkäistä tai estää tai hillitä kaikkien kolmen skenaarion (S1-S3) vaikutuksia. Tutkimuksessa havaittiin epävarmuuksia liittyen tuulivoima-alan nykyiseen maturiteettiin: onko alalla esimerkiksi yhtä vakiintuneita riskienhallintakäytänteitä, kuin energiasektorilla yleisesti? Yhtä kaikki, tämä tutkimus korostaa erityisesti sitä, kuinka kriittistä on parantaa organisatorisia valmiuksia sen ohella, että kiinnitetään huomiota puhtaasti teknisiin näkökohtiin.

Tulevassa tutkimuksessa olisi syytä tarkastella omana erityiskysymyksenään merituulivoimaa tai ns. hybridijärjestelmiä, joissa tuulivoimajärjestelmien osaksi integroituu muitakin teknologioita, kuten aurinkovoimaa tai sähkövarastoja tai vedyntuotantoa. Myös tässä tutkimuksessa tunnistettuihin ratkaisumalleihin tulisi kuhunkin pureutua entistä syvemmälle: tämän tutkimuksen havaintojen valossa etenkin tuulivoiman varautumistoimintaa koskevaa tutkimusta on vähäisesti. Ohjenuorana on hyvä pitää kysymystä *mitä sitten?* Mitä sitten, kun uusia ratkaisuja otetaan käyttöön? Mitä sitten, kun yksi elementti häiriintyy ja putoaa pois verkostosta? Mitä sitten, kun varaosia ei saadakaan?

LÄHTEET

Julkaisut tieteellisissä aikakauslehdissä tai konferensseissa:

- Ahmad, M., A., Baryannis, G., Hill, R. (2024). Defining Complex Adaptive Systems: An Algorithmic Approach. *Systems*, 12(2), 45. 10.3390/systems12020045
- Alkhaleel, B., A. (2024). Machine learning applications in the resilience of interdependent critical infrastructure systems – A systematic literature review. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, Volume 44, 100646. 10.1016/j.ijcip.2023.100646
- Anderson, P. (1999). Complexity Theory and Organization Science. *Organization Science*, 10(3): 216-232. 10.1287/orsc.10.3.216
- Ansell, C., Sørensen, E., Torfing, J. (2021). The COVID-19 pandemic as a game changer for public administration and leadership? The need for robust governance responses to turbulent problems. *Public Management Review*, Vol. 23, No. 7, 949-960. 10.1080/14719037.2020.1820272
- Aputharajah, A., Saha, T., K. (2009). Power system blackouts – literature review. *2009 International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, 28-31 December 2009. 10.1109/ICIINFS.2009.5429818
- Bi, W., Chen, G., Zhang, K. (2022). Profit-Oriented False Data Injection Attack Against Wind Farms and Countermeasures. *Systems Journal*, Vol. 6., No. 3. 10.1109/JSYST.2021.3107910
- Blaabjerg, F., Chen, Z., Kjaer, S., B. (2004). Power Electronics as Efficient Interface in Dispersed Power Generation Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, No. 5, September 2004. 10.1109/TPEL.2004.833453
- Blaabjerg, F., Teodorescu, R., Liserre, M., Timbus, A., V. (2006). Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, No. 5, October 2006. 10.1109/TIE.2006.881997
- Bunn, D., W., Salo, A., A. (1993). Forecasting with scenarios. *European Journal of Operational Research*, Volume 68, Issue 13, 291-303. DOI: 10.1016/0377-2217(93)90186-Q
- Caro, F., D., Vaccaro, A. (2022). Review of Recent Trends in Power System Resilience-Oriented Decision-Making Methods. *2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 17-21 July 2022. 10.1109/PESGM48719.2022.9917246
- Fan, D., Breslin, D., Callahan, J., L., Iszatt-White, M. (2022). Advancing literature review methodology through rigour, generativity, scope and transparency. *International Journal of Management Reviews*, s. 1-10.

- doi.org/10.1111/ijmr.12291. Teoksessa: Vilkkä, L. (2023). *Kirjallisuuskatsaus metodina, opinnäytetyön osana ja tekstilajina*. Printon, Tallinna: Art House Oy.
- Franco, A., Salza, P. (2011). Strategies for optimal penetration of intermittent renewables in complex energy systems based on techno-operational objectives. *Renewable Energy*, 36, 743-753. 10.1016/j.renene.2010.07.022
- Geels, F. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, 1257-1274.
- Geels, F. (2011). The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 24-40.
- Halttunen, K., Slade, R., Staffel, I. (2023). Diversify or die: Strategy options for oil majors in the sustainable energy transition. *Energy Research & Social Science*, Volume 104, October 2023, 103253. DOI: 10.1016/j.erss.2023.103253
- Hanen, T., Raisio, H. (2017). Kompleksisuustieteet sotatieteellisessä tutkimuksessa – järkevä suunta vai harhapolku? *Tiede ja Ase*, 75, 100-123. <https://journal.fi/ta/article/view/67726>
- Heino, O., Anttiroiko, A-V. (2014). Enabling and Integrative Infrastructure Policy: The Role of Inverse Infrastructures in Local Infrastructure Provision with Special Reference to Finnish Water Cooperatives. *Munich Personal RePEc Archive*. MPRA Paper. <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/60276/>
- Heino, O., Heikkilä, M., Rautiainen, P. (2022). Caging identified threats – Exploring pitfalls of state preparedness imagination. *International Journal of Disaster Risk Reduction*.
- Holling, C., S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4, 1-23. 10.1146/annurev.es.04.110173.000245
- Hyvönen, J., Koivunen, T., Syri, S. (2023). Possible bottlenecks in clean energy transitions: Overview and modelled effects: Case Finland. *Journal of Cleaner Production*, Volume 410, 15 July 2023, 137317. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137317
- Jasiunas, J., Heikkinen, T., Lund, P., D., Lang-Ritter, I. (2023). Resilience of electric grid to extreme wind: Considering local details at national scale. *Reliability Engineering and System Safety*, 232. 10.1016/j.ress.2022.109070
- Khosravi, a., Olkkonen, V., Farsaei, A., Syri, S. (2020). REplacing hard coal with wind and nuclear power in Finland- impacts on electricity and district heating markets. *Energy*, Volume 203, 15 July 2020, 117884. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117884

- Kulev, N., Reuter, A., Eichhorn, O., Engler, E., Wrede, C. (2019). Non-resilient behavior of offshore wind farms due to cyber-physical attacks. *8th REA Symposium Embracing Resilience: Scaling up and Speeding up*. Kalmar, Sweden, June 24-27, 2019. <https://doi.org/10.15626/rea8.22>
- Kulev, N., Torres, F., S. (2022). Simulation of the impact of parameter manipulations due to cyber-attacks and severe electrical faults on Offshore Wind Farms. *Ocean Engineering*, 260 (2020) 111936. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111936>
- Körner, M.-F., Sedlmeir, J., Weibelzahl, M., Fridgen, G., Heine, M., Neumann, C. (2022). Systemic risks in electricity systems: A Perspective on the potential of digital technologies. *Energy Policy*, 164, 12901. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112901>
- Lansing, T., S. (2003). Complex Adaptive Systems. *Annual Review of Anthropology*, 32, 183-204. <https://www.jstor.org/stable/25064826>
- Liberati, A., Altma, D., G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P., C., Ionnidis, J., P., A., Clarke, M., Deveraux, P., J., Kleijnen, J., Moher, D. (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *Journal of Clinical Epidemiology*, 62, e1-e34. [10.1016/j.jclinepi.2009.06.006](https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2009.06.006)
- Little, R., G. (2002). Controlling Cascading Failure: Understanding The Vulnerabilities of Interconnected Infrastructures. *Journal of Urban Technology*, 9(1): 109-123. DOI:10.1080/106307302317379855
- Liu, Y., Ning, P., Reiter, M., K. (2011). False Data Injection Attacks against State Estimation in Electric Power Grids. *Transactions on Information and System Security*, Vol. 14, No. 1, Article 13. [10.1145/1952982.1952995](https://doi.org/10.1145/1952982.1952995)
- Lukka, K. (2000). The key issues of applying the constructive approach to field research. *Management Expertise for the New Millennium*, 113-128.
- Markard, J., Raven, R., Truffer, B. (2012). Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects. *Research Policy*, 41, 955-967. [10.1016/j.respol.2012.02.013](https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.02.013)
- Martin, J.-M. (1996). Energy technologies: Systemic aspects, technological trajectories, and institutional frameworks. *Technological forecasting & social change*, 53(1), 81-95. [10.1016/0040-1625\(96\)00051-0](https://doi.org/10.1016/0040-1625(96)00051-0)
- Michaux, S., Vadén, T., Korhonen, J., M., Eronen, J., T. (2023). Bottom-up estimation of the scope of tasks to completely phase out fossil fuels in Finland. *Energy Strategy Reviews*, Volume 50, November 2023, 101261. [10.1016/j.esr.2023.101261](https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101261)
- Morison, K., Wang, L., Kundur, P. (2004). Power system security assessment. *IEEE Power and Energy Magazine*, Volume 2, Issue 5. [10.1109/MPAE.2004.1338120](https://doi.org/10.1109/MPAE.2004.1338120)

- Nadeem, T., B., Siddiqui, M., Khalid, M., Asif, M. (2023). Distributed energy systems: A review of classification, technologies, applications and policies. *Energy Strategy Reviews*, 48. doi.org/10.1016/j.esr.2023.101096
- Nepal, R., Jamasb, T. (2013). Security of European electricity systems: Conceptualizing the assessment criteria and core indicators. *International Journal Of Critical Infrastructure Protection*, 6, 182-196. 10.1016/j.ijcip.2013.07.001
- Ouyang, B., Xia, Y., Wang, C., Ye, Q., Yan, Z., Tang, Q. (2018). Quantifying Importance of Edges in Networks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, Volume 65, Issue 9. 10.1109/TCSII.2018.2820090
- Page, M., J., McKenzie, J., E., Bossuyt, O., M., Boutron, I., Hoffmann, T., C., Mulrow, C., D., Shamseer, L., Tetzlaff, J., M., Akl, E., A., Brennan, S., E., Chou, R., Glanville, j., Grimshaw, J., M., Hrobjartsson, A., Lalu, M., M., Li, T., Loder, E., W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L., A., Stewart, L., A., Thomas, J., Tricco, A., C., Welch, V., A., Whiting, P., Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *PLoS Med* 18(3); e1003583. doi.org/10.1371/journal.pmed.1003583
- Petticrew, M. (2001). Systematic reviews from astronomy to zoology: myths and misconceptions. *BMJ*, 322, 98. 10.1136/bmj.322.7278.98
- Rehak, D., Senovsky, P., Hromada, M., Lovecek, T. (2018a). Complex approach to assessing resilience of critical infrastructure elements. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 25 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2019.03.003>
- Rehak, D., Senovsky, P., Slivkova, S. (2018). Resilience of Critical Infrastructure Elements and Its Main Factors. *Systems*, 6(2). 10.3390/systems6020021
- Rinaldi, S., M., Peerenboom, J., P., Kelly, T., K. (2001). Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine*, Vol 21, No. 6, 11-25. 10.1109/37.969131
- Silvast, A., Virtanen, M., J. (2013). Sähkö, katko ja kokemus. Sähkökulutuksen kaksi rationaalisuutta. *Sosiologia*, 4/2013. 358-373.
- Silvast, A., Virtanen, M., J. (2014). Keeping Systems at Work: Electricity Infrastructure from Control Rooms to Household Practices. *Science & Technology Studies*, Vol. 27 (2014) No. 2, 93-114.
- Snowden, D., J., Boone, M., E. (2007). A Leader's Framework for Decision Making. *Harvard Business Review*, November 2007. <https://hbr.org/archive-toc/BR0711>
- Summerfield-Ryan, O., Park, S. (2023). The power of wind: The global wind energy industry's successes and failures. *Ecological Economics*, Volume 210. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107841>

- Sun, Y., Tang, X. (2014). Cascading failure analysis of power flow on wind power based on complex network theory. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Volume 2, Issue 4. 10.1007/s40565-014-0088-5
- Unruh, G., C. (2000). Understanding carbon lock-in. *Energy Policy*, 28, 817-830.
- Van der Vleuten, E., Kaijser, A. (2006). Networking Europe. *History and Technology*, 21:1, 21-48. 10.1080/07341510500037495
- Varho, V., Tapio, P. (2005). Wind power in Finland up to the year 2025 – “soft” scenarios based on expert views. *Energy Policy*, Volume 33, Issue 15, October, 2005, Pages 1930-1947. DOI: 10.1016/j.enpol.2004.03.006
- Weaver, W. (1948). Science and Complexity. *American Scientist*, Vol. 36, No. 4, 536-544. <https://www.jstor.org/stable/27826254>
- Weber, G., F. (2013). Dynamic Knowledge – A Century of Evolution. *Sociology Mind*, Vol.3, No.4, 268-277. <http://dx.doi.org/10.4236/sm.2013.34036>
- Wu, K., Li, J., Zhang, B., Yu, Z., Liu, X. (2020). Preventive Dispatch Strategy Against FDIA Induced Overloads in Power Systems With High Wind Penetration. *IEEE Access*, Volume 8. 10.1109/ACCESS.2020.3038527
- Zack, M., H. (2001). If managing knowledge is the solution, then what’s the problem? *Knowledge management and business model innovation*, 16-36. ISBN 1878289985

Kirjalliset lähteet:

- Beck, U. (1986.) *Risk Society: Towards a New Modernity*. SAGE Publications.
- Booth, A., Sutton, A., Clowes, M., Martyn, St. J., Marrissa. (2022). *Systematic Approaches to a Successful Literature Review*. Los Angeles: SAGE Publications Ltd. Teoksessa: Vilkka, L. (2023). *Kirjallisuuskatsaus metodina, opinnäytetyön osana ja tekstilajina*. Printon, Tallinna: Art House Oy.
- Bouwman, I., Weijnen, M., P., C., Gheorghe, A. (2006). Infrastructures at Risk. Artikkelikirjassa *Critical Infrastructures at Risk: Securing the European Electric Power System*.
- Churchman, C., W. (1968/1979). *The Systems approach*. Dell Publishing Co., Inc.
- De Vries, L., J., De Jong, H., M., De Bruijne, M., L., C., Glavitsch, H., Knops, H., P., A. (2006). Liberalisation and Internationalisation of the European Electricity Supply System. Artikkelikirjassa *Critical Infrastructures at Risk: Securing the European Electric Power System*.
- Efron, S., E., Ravid, R. (2019). *Writing the Literature Review. A practical guide*. New York: The Guilford Press. Teoksessa: Vilkka, L. (2023). *Kirjallisuuskatsaus metodina, opinnäytetyön osana ja tekstilajina*. Printon, Tallinna: Art House Oy.
- Fink, A. (2020). *conducting Research Literature Reviews. From the Internet to Paper*. Viides painos. Thousand Oaks: Sage. Teoksessa: Vilkka, L. (2023).

- Kirjallisuuskatsaus metodina, opinnäytetyön osana ja tekstilajina*. Printon, Tallinna: Art House Oy.
- Gheorghe, A., V., Masera, M., Wijnen, M., De Vries, L. (2006a). *Critical Infrastructures at Risk*. Securing the European Electric Power System.
- Graham, S. (2010). *Disrupted Cities: When Infrastructure Fails*. Routledge.
- Hanen, T. (2017). *Yllätysten edessä. Kompleksisuusteoreettien tulkinta yllättävöiden ja dynaamisten tilanteiden johtamisesta*. Akateeminen väitöskirja. Maanpuolustuskorkeakoulu: Helsinki 2017. Julkaisusarja 1: Tutkimuksia nro 11. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-25-2870-7>
- Hughes, T., P. (2012). The Evolution of Large Technological Systems. Artikkelikirjassa *The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology*. The MIT Press.
- Kauffman, S., A. (1993). *The origins of order. Self-organization and Selection in Evolution*. Oxford University Press.
- Kuokkanen, A. (2016). *Understanding complex system change for a sustainable food system*. Doctoral Dissertation. Acta Universitatis Lappeenrantaensis 730. ISBN 978-952-335-038-0.
- Lewis, T., G. (2020). *Critical Infrastructure Protection in Homeland Security. Defending a Networked Nation*. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- Little, R., G. (2009). Managing the Risk of Cascading Failure in Complex Urban Infrastructures. Artikkelikirjassa *Disrupted Cities: When Infrastructure Fails*. Routledge.
- O'Malley (2004). *Risk, Uncertainty and Government*. The GlassHouse Press.
- Peoples, C., Vaughan-Williams, N. (2010). *Critical Security Studies – An Introduction*. Routledge.
- Perrow, C. (1984). *Normal Accidents*. Living with High-Risk Technologies. Princeton University Press.
- Popper, K. (1935). *Logik der Forschung*. Käännösversio *The Logic of Scientific Discovery* (2005). Routledge
- Powell, W., B. (2014). Energy and Uncertainty: Models and Algorithms for Complex Energy Systems. *AI Magazine*, Volume 35, Issue 3, 8-21. [10.1609/aimag.v35i3.2540](https://doi.org/10.1609/aimag.v35i3.2540)
- Pöyhönen, J. (2022). Cyber Security of an electric Power System in Critical Infrastructure. In: Lehto, M., Neittaanmäki, P. (eds) *Cyber Security. Computational Methods in Applied Sciences*, Volume 56, 217-239. [10.1007/978-3-030-91293-2_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91293-2_9)
- Silvast, A. (2013.) *Anticipating Interruptions. Security And Risk In A Liberalized Electricity Infrastructure*. Helsingin yliopisto.

- Silvast, A. (2017). *Making Electricity Resilient – Risk and Security in a Liberalized Infrastructure*. Routledge.
- Simon, H., A. (1996[1969]). *The Sciences of the Artificial*. MIT Press. ISBN10 0262193744.
- Shove, E., Trentmann, F. (toim.) (2019). *Infrastructures in Practice. The Dynamics of Demand in Networked Societies*. Routledge.
- Shove, E., Watson, M., Trentmann, F. (2019). *Infrastructures in practice. Implications for the future*. Teoksessa Shove, E., Trentmann, F. (toim.), *Infrastructures in Practice. The Dynamics of Demand in Networked Societies*. Routledge.
- Shove, E., Trentmann, F., Watson, M. (2019). The evolution of demand in networked societies. Artikkele kirjassa *Infrastructures in Practice. The Dynamics of Demand in Networked Societies*. Routledge.
- Star, S., L. (1999). The Ethnography of Infrastructure. *American Behavioral Scientist*. 43:3, 377–391.
- Tainter, J. A. (1988). *The Collapse of Complex Societies* (23. painos 2011 p.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Vilkka, H. (2023). *Kirjallisuuskatsaus metodina, opinnäytetyön osana ja tekstilajina*. Printon, Tallinna: Art House Oy.
- Williams, R. (1985). *Keywords: A Vocabulary of Culture and Society*. Oxford University Press.
- Verkkolähteet:
- Cambridge Dictionary. (2024). Cambridge University Press & Assessment. Viitattu 18.2.2024. Saatavilla: <https://dictionary.cambridge.org/>
- CISA (2024). Critical Infrastructure Sectors. Viitattu 26.2.2024. Saatavilla: <https://www.cisa.gov/topics/critical-infrastructure-security-and-resilience/critical-infrastructure-sectors#:~:text=Critical%20Infrastructure%20Sectors%201%20Chemical%20Sector%20DHS%20was,Services%20Sector%20...%205%20Government%20Facilities%20Sector%20>
- Euroopan komissio. (2023). EU wind energy. Viitattu 30.6.2024. Saatavilla: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/eu-wind-energy_en
- Fingrid Oyj (2017). Kantaverkon solmukohtaa uusimassa. Viitattu 30.12.2023. Saatavilla: <https://www.fingridlehti.fi/kantaverkon-solmukohtaa-uusimassa/>
- Fingrid Oyj (2021). Suuren sähkönjakeluhäiriön riski on Suomessa pieni, mutta valmiina pitää olla – näin Fingrid varautuu pahimman varalle. Viitattu 30.12.2023. Saatavilla: <https://www.fingridlehti.fi/suuren->

sahkonjakeluhairion-riski-on-suomessa-pieni-mutta-valmiina-pitaa-ollanain-fingrid-varautuu-pahimman-varalle

- Hagelstam, A. (2005). CIP – kriittisen infrastruktuurin turvaaminen. Käsiteanalyysi ja kansainvälinen vertailu. Huoltovarmuuskeskus. Julkaisuja 1/2005. Viitattu 4.2.2024. Saatavilla: https://www.huoltovarmuuskeskus.fi/files/019d67575f48fdb84212fd8bd9164b8ac8829ccd/cip-raportti_final.pdf
- Huoltovarmuuskeskus (2023a). Tietoa huoltovarmuudesta. Huoltovarmuus Suomessa. Viitattu 30.12.2023. Saatavilla: <https://www.huoltovarmuuskeskus.fi/tietoa-huoltovarmuudesta/huoltovarmuus-suomessa>
- Huoltovarmuuskeskus (2023b). Jatkuvuudenhallinta. Viitattu 17.2.2024. Saatavilla: <https://www.huoltovarmuuskeskus.fi/tietoa-huoltovarmuudesta/jatkuvuudenhallinta>
- IEA (2023). Energy Technology Perspectives 2023. Viitattu 14.11.2023. Saatavilla: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>
- Laakso, A. (2024). Mikä katkaisi Jämijärven tuulivoimalan lavan? Syyn selviämistä saadaan odottaa viikkoja. Yle-artikkeli. Viitattu 30.6.2024. Saatavilla: <https://yle.fi/a/74-20073614>
- Lukka, K. (2000). Konstruktiivinen tutkimusote. Artikkel Metodix- sivustolla. Viitattu 5.11.2023. Saatavilla: <https://metodix.fi/2014/05/19/lukka-konstruktiivinen-tutkimusote/>
- National Archives and Records Administration (2023). EO 13010 Critical Infrastructure Protection. Signes 07/15/1996. Viitattu 18.12.2023. <https://www.federalregister.gov/presidential-documents/executive-orders/william-j-clinton/1996>
- OED (2024). Oxford English Dictionary. Oxford University Press. Viitattu 17.2.2024. Saatavilla: https://www.oed.com/dictionary/resilience_n?tab=factsheet#25634109
- Prier, S., Strong, A., M., Welburn, J., W. (2023). Interdependence Across the National Critical Functions. Homeland Security Research Division. Viitattu 1.3.2024. Saatavilla: https://www.rand.org/pubs/working_papers/WRA210-1.html
- Scholl, E., Westphal, K. (2017). European Energy Security Reimagined. Mapping the Risks, Challenges and Opportunities of Changing Energy Geographies SWP Research Paper. Viitattu 6.2.2024. Saatavilla: https://www.swp-berlin.org/publications/products/research_papers/2017RP04_Scholl_wep.pdf
- Sisäministeriö (2023). Kansallinen riskiarvio 2023. Viitattu 17.2.2024. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-324-602-7>

The White House. (2013). Presidential Policy Directive/PPD-21. Office of the Press Secretary. Viitattu 18.12.2023. Saatavilla: https://www.cisa.gov/sites/default/files/2023-01/ppd-21-critical-infrastructure-and-resilience-508_0.pdf

Turvallisuuskomitea (2017). Kokonaisturvallisuuden sanasto. Viitattu 18.12.2023. Saatavilla: https://turvallisuuskomitea.fi/wp-content/uploads/2018/02/Kokonaisturvallisuuden_sanasto.pdf

Turvallisuuskomitea (2018). Kyberturvallisuuden sanasto. Viitattu 18.12.2023. Saatavilla: https://sanastokeskus.fi/tiedostot/pdf/Kyberturvallisuuden_sanasto.pdf?file=pdf/Kyberturvallisuuden_sanasto.pdf

Uusikylä, P., Jalonen, H., Lintinen, U., Kotiranta, S., Jaakkola, S. (2021). Julkisen sektorin systeeminen muutos: kokemuksia maailmalta. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:15. Viitattu 17.12.2024. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-127-8>

Wigell, M. Hägglund, M., Fjäder, C., Hakala, E., Ketola, J., Mikkola, H (2022). Nordic Resilience: Strengthening cooperation on security of supply and crisis preparedness. Viitattu 18.12.2023. Saatavilla: <https://www.fiia.fi/en/publication/nordic-resilience>

Lainsäädäntö ja asetukset:

Direktiivi 2011/92/EU 2018. (2011/92/EU). Viitattu 18.11.2023. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/eli/legal-content/summary/assessment-of-the-effects-of-projects-on-the-environment-eia.html>

EU 2023/2557. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2022/2557, annettu 14 päivänä joulukuuta 2022, kriittisten toimijoiden häiriönsietokyvystä ja direktiivin 2008/114/EY kumoamisesta (ETA:n kannalta merkityksellinen teksti). Viitattu 4.2.2024. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2557/oj?locale=fi>

Laki huoltovarmuuden turvaamisesta 18.12.1992/1390. Viitattu 30.12.2023. Saatavilla: <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1992/19921390>

Vamiuslaki 29.12.2011/1552. Viitattu 17.2.2024. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20111552>

Systemaattinen kirjallisuuskatsaus

- Ahmed, F., Al Kez, D., McLoone, S., Best, R., J., Cameron, C., Foley, A. (2023). Dynamic grid stability in low carbon power systems with minimum inertia. *Renewable Energy*, Volume 210, July 2023, Pages 486-506. 10.1016/j.renene.2023.03.082
- Bin Nadeem, T., Siddiqui, M., Khalid, M., Asif, M. (2023). Distributed energy systems: A review of classification, technologies, applications, and policies. *Energy Strategy Reviews*, Volume 48, July 2023, 101096. 10.1016/j.esr.2023.101096
- Deng, X., Ge, J. (2020). Global wind power development leads to high demand for neodymium praseodymium (NdPr): A scenario analysis based on market and technology development from 2019 to 2040. *Journal of Cleaner Production*, Volume 277, 20 December 220, 123299. 10.1016/j.jclepro.2020.123299
- Kumar, N., K., Gandhi, V., I., Ravi, L., Vijayakumar, V., Subramaniaswamy, V. (2020). Improving security for wind energy systems in smart grid applications using digital protection technique. *Sustainable Cities and Society*, Volume 60, September 2020, 102265. 10.1016/j.scs.2020.102265
- Liang, J., Zhang, K., Al-Durra, A., Muyeen, S., M., Zhou, D. (2022). A state-of-the-art review on wind power converter fault diagnosis. *Energy Reports*, Volume 8, November 2022, Pages 5341-5389. 10.1016/j.egyr.2022.03.178
- Lu, P., Zhang, N., Ye, L., Du, E., Kang, C. (2024). Advances in model predictive control for large-scale wind power integration in power systems. *Advances in Applied Energy*, Volume 14, July 2024, 100177. 10.1016/j.adapen.2024.100177
- Mostafa, M., A., El-Hay, E., A., Elkholy, M., M. (2023). An overview and case study of recent low voltage ride through methods for wind energy conversion system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 183, September 2023, 113521. 10.1016/j.rser.2023.113521
- Ranjan, M., Shankar, R. (2022). A literature survey on load frequency control considering renewable energy integration in power system: Recent trends and future prospects. *Journal of Energy Storage*, Volume 45, January 2022, 103717. 10.1016/j.est.2021.103717
- Ren, Z., Verma, A., S., Li, Y., Teuwen, J., J., E., Jiang, Z. (2021). Offshore wind turbine operations and maintenance: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 144, July 2021, 110886. 10.1016/j.rser.2021.110886
- Shao, H., Henriques, R., Morais, H., Tedeschi, E. (2024). Power quality monitoring in electric grid integrating offshore wind energy: A review.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 191, MArch 2024, 114094. 10.1016/j.rser.2023.114094

Teixeira, B., Brito, M., C., Mateus, A. (2024). Raw materials for the Portuguese decarbonization roadmap: The case of solar photovoltaics and wind energy. *Resources Policy*, Volume 90, March 2024, 104839. 10.1016/j.resourpol.2024.104839

Wiegner, J., F., Andreasson, L., M., Kusters, J., E., H., Nienhuis, R., M. (2024). Interdisciplinary perspectives on offshore energy system integration in the North Sea: A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 189, Part A, January 2024, 113970. 10.1016/j.rser.2023.113970

Yadav, M., Pal, N., Saini, D., K. (2023). Low voltage ride through capability for resilient electrical distribution system integrated with renewable energy resources. *Energy Reports*, Volume 9, December 2023, Pages 833-858.

LIITE 1 HAASTATTELUN OHJEKIRJA

Tässä liitteessä on kuvattu haastatteluissa haastattelijan käyttämä haastatteluiden ohjekirja. Ohjekirjaan on listattu periaatteet, joiden pohjalta haastattelut suunniteltiin, sekä kysymykset, jotka haastatteluissa esitettiin. Ohjekirja on kirjoitettu ennen haastatteluiden järjestämistä.

Yleiset periaatteet, joita noudatetaan haastatteluissa

Haastatteluissa käytetään puolistrukturoitua menetelmää. Jäljempänä esitetyt haastattelukysymykset esitetään, tarvittaessa hieman soveltaen, kaikille haastateltaville. Haastateltavan tahon mukaisesti lisäksi esitetään täydentäviä kysymyksiä käytettävissä olevan ajan puitteissa. Haastattelukysymykset toimitetaan haastateltaville tahoille etukäteen perehdyttäväksi. Haastattelut nauhoitetaan ja tarvittaessa mahdollinen litterointi toimitetaan kaikille haastateltaville, minkä jälkeen heillä on mahdollisuus esittää täydentäviä huomioita tai pyytää joitain osa-alueita poistettaviksi.

Haastattelukysymykset

Kysymykset on muotoiltu teorian, kirjoittajan taustatietämyksen sekä esimerkiksi ohjauskeskustelujen perusteella. Kysymykset on muotoiltu mahdollisimman avoimiksi ja keskustelua herättäviksi. Haastattelukysymyksillä pyrittiin valottamaan erityisesti tuulivoiman lisääntymiseen liittyviä systeemisiä vaikutuksia vakavien häiriöiden ja poikkeustilanteiden kontekstissa.

- Millainen on tehtäväsi ja toimenkuvasi ja kuinka se liittyy sähköjärjestelmään sekä tuulivoimaan? (taustatietokysymys)
- Kuinka pitkä työura energia-alalla sinulla on ollut? (taustatietokysymys)
- Kuvaile sähköjärjestelmän nykytilannetta Suomessa.
- Kuvaile tuulivoiman lisääntymisen vaikutuksia.
- Mitä epävarmuuksia tuulivoimaan mielestäsi liittyy?
- Kuvaile tuulivoimajärjestelmien rakennetta.
- Kuvaile tietämyksesi pohjalta tuulivoimayhtiöiden varautumis- ja resilienssityötä.
- Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää tuulivoimaa vakavien häiriö- ja poikkeustilanteiden kontekstissa. Mitä muuta tähän liittyen haluat vielä kertoa tai pidät olennaisena tietona?