

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LAPPEENRANTA-LAHTI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LUT

LUT School of Energy Systems

LUT Scientific and Expertise Publications

Tutkimusraportit – Research Reports

174

Otto Räisänen, Juha Haakana, Ahmed Saleem, Jukka Lasila

Roudan vaikutus sähkönjakelun ilmajohtoverkkojen vikaantumiseen ja sähköverkkoliiketoimintaan

 LUT
University

Lappeenrannan-Lahden Teknillinen Yliopisto LUT
Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

LUT Scientific and Expertise Publications
Tutkimusraportit - Research Reports 174

Roudan vaikutus sähköjakelun ilmajohtoverkkojen vikaantu- miseen ja sähköverkkoliiketoimintaan

Otto Räisänen, Juha Haakana, Ahmed Saleem, Jukka Lassila

ISBN: 978-952-412-213-9 (PDF)

ISSN-L 2243-3376

ISSN 2243-3376

Lappeenranta 2024

Alkusanat

Tämä raportti käsittelee *Roudan vaikutus sähköjakelun ilmajohtoverkkojen vikaantumiseen ja sähköverkkoliiketoimintaan* tutkimushankkeen tuloksia. Tutkimus toteutettiin LUT yliopiston sähkömarkkinalaboratorion toimesta 1.11.2023-31.10.2024. Tutkimushankkeeseen osallistui-
vat LUT-yliopistosta tutkijat TKT Otto Räisänen, TKT Juha Haakana, DI Ahmed Saleem ja Pro-
fessori Jukka Lassila.

Hankkeen rahoittivat Sähkötutkimuspooli, Sähkötekniikan ja energiatehokkuuden edistämis-
keskus STEK ry, Imatran Seudun Sähkönsiirto Oy ja Rovakaira Oy.

Projektista järjestettiin 8.2.2024 työpaja Helsingin Aviapoliksella, johon osallistui tutkijoiden ja ohjausryhmän jäsenten lisäksi verkkoyhtiöiden ja Ilmatieteenlaitoksen henkilöstöä. Työpa-
jassa käsiteltiin muun muassa käytännön kokemuksia roudan ja lumikuormien vaikutuksesta
sähköjakeluverkkoihin ja eri toimijoiden näkökulmia ilmastonmuutoksen vaikutuksesta toimi-
alalle. Tutkijat haluavat kiittää työpajaan osallistuneita henkilöitä hyvistä keskusteluista ja ide-
oista.

Tutkijat haluavat kiittää ohjausryhmää tutkimuksen asiantuntevasta ohjaamisesta sekä hyvistä
kommenteista tutkimuksen aikana.

Tiivistelmä

Roudan vaikutus sähkönjakelun ilmajohtoverkkojen vikaantumiseen ja sähköverkkoliiketoimintaan

Otto Räisänen, Juha Haakana, Ahmed Saleem, Jukka Lassila

LUT-yliopisto, Energijärjestelmien tiedekunta, Lappeenranta 2024

44 sivua, 25 kuvaa, 8 taulukkoa
Tutkimusraportit 174

Avainsanat: Sähkönjakeluverkko, sähkönjakelun luotettavuus, ilmastonmuutos, routa, lumikuorma

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin roudan vaikutusta ilmajohtoverkkojen vikaantumiseen ja sen vaikutuksia sähköverkkoliiketoimintaan. Lisäksi hankkeessa tehtiin alustava arvio lumikuormien liiketoimintavaikutuksesta. Routa vähentää merkittävästi puiden aiheuttamaa vikaantumisriskiä, koska jäätynyt maa ankkuroi puita ja estää niitä kaatumasta voimakkaiden tuulien aikana. Ilmastonmuutoksen myötä lämpenevät talvet kuitenkin vähentävät routapäivien määrää, mikä voi lisätä vikaantumisriskiä. Ilmastonmuutos vaikuttaa Suomessa roudan lisäksi myös puuston lumikuormiin, joiden on ennustettu kasvavan merkittävästi Pohjois- ja Itä-Suomessa. Nämä muutokset johtavat lisääntyneisiin sähkönjakeluverkon vikamääriin ja vikaantumiskustannuksiin sähköverkkoyhtiöille.

Ilmastonmuutoksen vaikutuksen arvioimiseksi sähkönjakeluverkojen vikaantumiseen hankkeessa kerättiin laaja tutkimusaineisto verkkoyhtiöiden toimittamasta keskeytysaineistosta ja avoimista lähteistä saatavilla olevista ympäristö- ja sää tiedoista sekä Ilmastonmuutoskenaarioista. Vikaantumiseen vaikuttavien ilmiöiden mallintamiseen hyödynnettiin geospaatialista analyysiä, monimuuttuja lineaari-regressiomallinnusta ja koneoppimismenetelmiä.

Tutkimuksen tulosten mukaan maan ollessa roudassa tuulesta aiheutuvien vikojen määrä on noin -65% – -85%, jolloin routapäivien vähetessä tulevaisuudessa todennäköisyys yksittäisille vakaville suurhäiriöille lisääntyy. Roudan vähenemisen vaikutus viankorjaus- ja keskeytyskustannuksiin on hankkeen tulosten mukaan kuitenkin maltillinen pitkällä aikavälillä, vuonna 2050 kustannukset kasvaisivat noin 2–8 % nykyisestä. Vaikutukset pysyvät maltillisina, koska routapäivien vähenemä on pieni suhteessa koko vuoden päiviin ja tuulivioista aiheutuvien kustannusten pienestä määrästä suhteessa liikevaihtoon pitkällä aikavälillä. Lumikuormien lisääntymisen vaikutus vikaantumiseen on mahdollisesti merkittävä, lisätutkimusta kuitenkin vaaditaan lumikuormien muutoksen ja vikaantumisen välisen yhteyden selvittämiseksi. Myrskyvarmuusinvestointien edetessä koko Suomessa, roudan vähenemisen vaikutus pienenee entisestään. Kuitenkin kerrannaisvaikutukset, kuten kostea maaperä ja voimakkaammat myrskytuulet syys- sekä talvikaudella voivat lisätä vikamääriä mallinnettuja tuloksia enemmän.

Abstract

Roudan vaikutus sähkönjakelun ilmajohtoverkkojen vikaantumiseen ja sähköverkkoliiketoimintaan

Otto Räisänen, Juha Haakana, Ahmed Saleem, Jukka Lassila

LUT-University, LUT School of Energy Systems, Lappeenranta 2024

44 pages, 25 figures, 8 tables

Research reports 174

Keywords: Electricity distribution, reliability, climate change, soil frost, crown snow loads

This study examined the effect of soil frost on the failure of overhead power lines and its effects on the electricity network business. In addition, the project made a preliminary assessment of the impact of crown snow loads on distribution networks. Soil frost significantly reduces the risk of tree failure because the frozen ground anchors the trees and prevents them from falling during strong winds. However, warming winters due to climate change will reduce the number of frost days, which can increase the risk of failure. In Finland, climate change affects not only frost but also snow loads on trees, which have been predicted to increase significantly in Northern and Eastern Finland. These changes lead to increased failure rates in the power distribution network and failure costs for distribution network companies.

In order to assess the impact of climate change on the failure of electricity distribution networks, the project collected extensive research data from outage databases collected by network companies and environmental and weather data as well as climate change scenarios available from open sources. Geospatial analysis, multivariate linear regression modeling and machine learning methods were used to model the phenomena affecting the overhead line fault risks.

According to the results of the study, when the soil is frozen, the number of defects caused by wind is approximately -65% – -85% lower compared to non-frozen soil conditions. As the number of frost days decreases in the future, the probability of individual serious major failures will increase. However, according to the results of the project, the effect of the reduction of soil frost on the costs caused by faults is moderate in the long term, in 2050 the costs incurred by customer interruption and fault repair would increase by approximately 2–8% from the current level. The effects will remain moderate, because the reduction in frost days is small in relation to the days of the whole year and due to the small amount of costs caused by wind faults in relation to the total turnover of the distribution network companies in the long term. The effect of increasing snow loads on the fault risk is potentially significant, however, further research is required to clarify the connection between the change in snow loads and failure. As storm safety investments progress throughout Finland, the impact of the reduction in soil frost will decrease further. However, the combined effects of multiple phenomena, such as moist soil and stronger storm winds in the autumn and winter season, can increase the number of failures more than the modeled results.

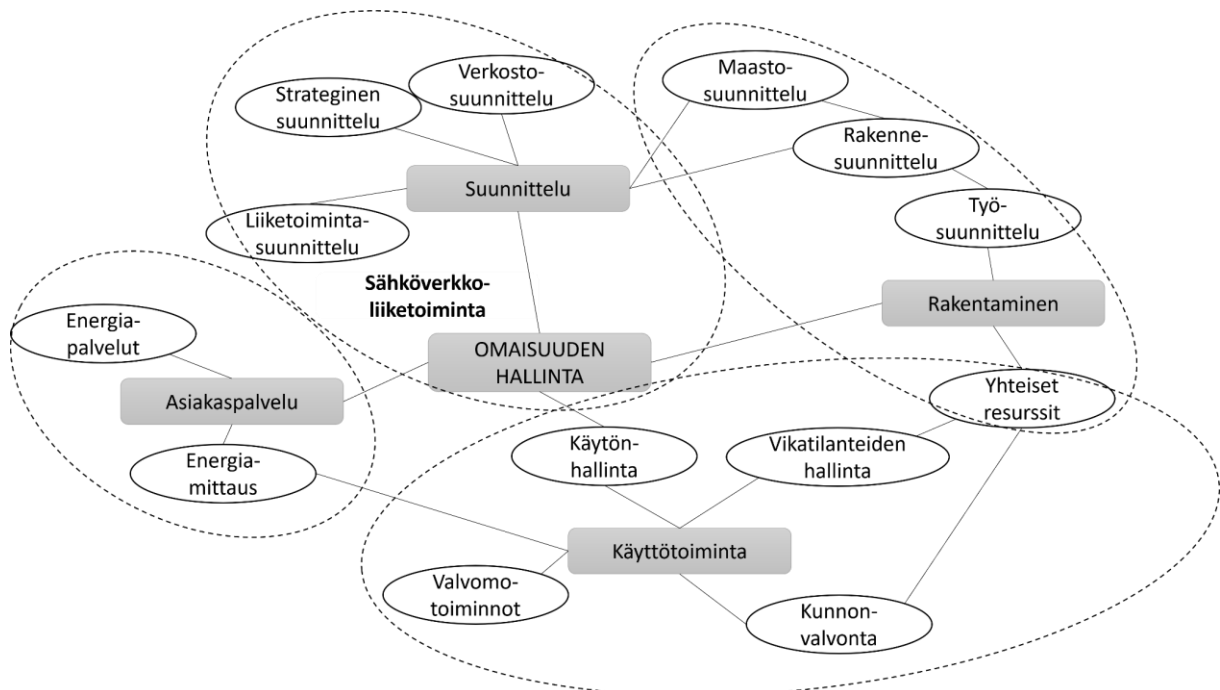
Sisällysluettelo

1	Johdanto	8
1.1	Tutkimuksen tavoitteet	10
1.2	Ilmastonmuutos.....	10
1.3	Aikaisemmat tutkimukset ilmastonmuutoksen vaikutuksesta sähköjakeluverkkoihin	13
2	Aineistot ja mallinnusmenetelmät	15
2.1	Laajat aluetarkastelut	16
2.2	Jakeluverkoissa tapahtuneiden muutosten arviointi.....	18
3	Roudan- ja lumikuormien vikaantumisvaikutuksen mallinnus	22
3.1	Mallinnus roudan vaikutuksesta sähköjakeluverkon tuulivikoihin	22
3.2	Spatiaalinen lumikuormamalli.....	23
3.2.1	Spatiaalisen lumikuormamallinnuksen tulokset.....	26
3.3	Skenaariomallinnus	27
3.3.1	Routaskenaariot.....	28
3.3.2	Lumikuormaskenaariot.....	28
3.4	Liiketoiminta-analyysit	29
4	Roudan ja lumikuormien vaikutus liiketoimintaan	30
4.1	Vaikutus vikamääriin	30

4.1.1	Routa	30
4.1.2	Lumikuormat	33
4.2	Liikevaihto-analyysit	34
4.2.1	Roudan vaikutus liikevaihtoon	35
4.2.2	Lumikuormien vaikutus liikevaihtoon	37
4.3	Laajat aluetarkastelut	40
4.4	Havaintoja ja kehittämissuhteita	42
5	Yhteenveto	43
	Lähteet	44

1 Johdanto

Luotettava sähkönjakelu ja kustannustehokas verkkoliiketoiminta perustuvat laadukkaaseen verkko-omaisuuden hallintaan. Tämä koskee niin verkoston pitkän aikavälin suunnittelua kuin verkon jokapäiväistä operointia. Sähkönjakeluala on kehittynyt voimakkaasti viime vuosikymmeninä. Liiketoimintoja on eriytetty menestyksekkäästi eri osatoimintoihin (Kuva 1). Yhteiskunnan vaatimusten kiristyessä sähköverkkojen rakentamisessa on siirrytty yhä vahvemmin säävarmisiin ratkaisuihin. Tällä on pystytty vaikuttamaan myönteisesti verkkojen suurhäiriöriskeihin ja sähkökäyttäjien kokemien sähkökatkojen määriin ja kestoihin. Vaikka verkkoja rakennetaan yhä enemmän maan alle, ilmajohtoverkot ovat kustannustehokkaana ratkaisuna jatkossakin merkittävässä roolissa haja-asutusalueiden sähkönjakelussa. Tällöin sääilmiöiden muutoksen seuraaminen ja niiden vaikutuksien ymmärtäminen on jatkossakin tärkeää sähkönjakeluverkkojen omistajille.

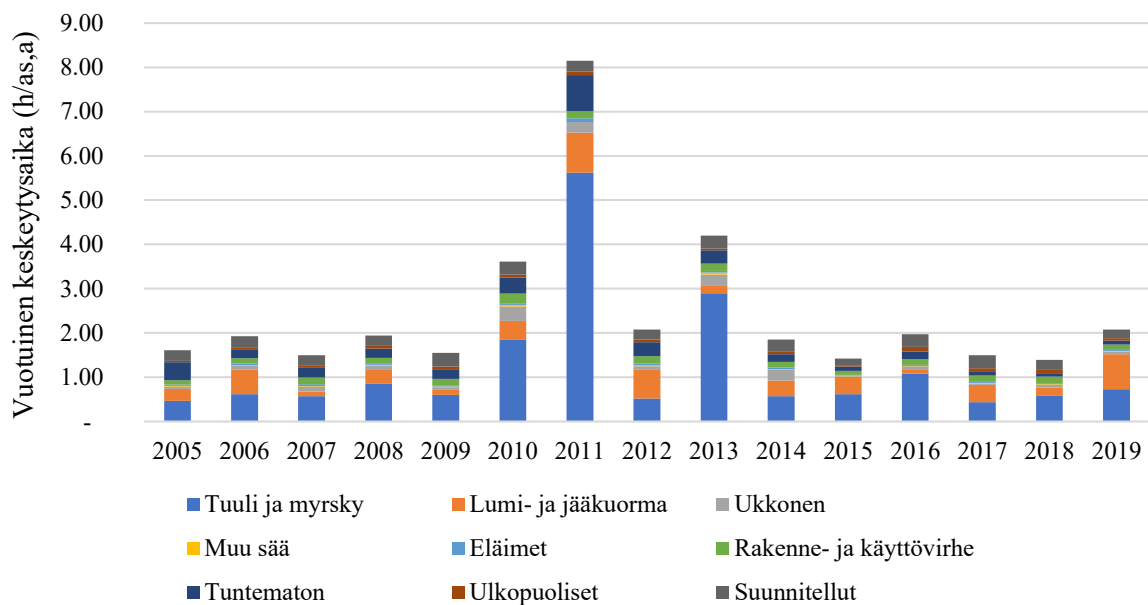


Kuva 1 Sähköverkkoliiketoiminnan eri toiminnot (mukaiillen Lakervi & Partanen, 2008).

Maan routiminen on yhteinen pohjoinen olosuhdetekijä, joka on huomioitava toimialalla riippumatta siitä, millaisia verkonkehittämistekniikoita liiketoiminnoissa sovelletaan. Routa

vaikuttaa omaisuuden hallintaan monitahoisesti. Maan ollessa tukevasti roudassa ilmajohtoja ympäröivä puusto on ankkuroitu vahvemmin maaperään, jolloin ilmajohtoverkon läheisyydessä olevan puuston kaatumisriski lumikuormien ja myrskytuulien aiheuttamana pienenee. Tärkeimmät roudan kestoon ja syvyyteen vaikuttavat tekijät ovat ilman lämpötila, maaperän tyyppi, kasvillisuus, sademäärä ja lumipeite (Iijima et al., 2010). Kylmänä vuodenaikana routa ankkuroi puut maahan, jolloin ne kestävät paremmin voimakkaita tuulenpuuskuja (Peltola et al., 1999; Saad et al., 2017; Venäläinen et al., 2020). Toisaalta routainen maaperä kaventaa maakaapelointiin soveltuvaa vuosittaista aikajaksoa. Roudan ja sen suorien sekä välillisten vaikutusten ymmärtämisellä onkin keskeinen merkitys verkkoliiketoiminnassa. Pohjoismaisissa olosuhteissa korostuu yhä lämpenevien talvien myötä maan routimisen väheneminen. Samaan aikaan puustoon kertyvien lumikuormien määrän on ennustettu kasvavan osassa maata huomattavasti, tykkylumen kertymiselle otollisten olosuhteiden yleistyessä. Alueille, joissa muutokset ovat suuria vikaantumisriski voi kasvaa merkittävästi.

Kuvassa 2 on havainnollistettu sähkökäyttäjien kokemien vikojen kokonaiskestoja vian syntytyyppien jaoteltuna. Kuvasta voidaan havaita, että suurin osa kaikesta asiakkaiden kokemasta keskeytysajasta on peräisin tuuli- ja lumikuormavioista.



Kuva 2. Sähkökäyttäjien kokemat keskeytysajat vikalajeittain Suomessa (Energiateollisuus 2019).

Roudan nykymerkitys on sähköverkkotoiminnassa kiistaton. Roudan taloudellisia vaikutuksia ei kuitenkaan tarkkaan tunneta samoin kuin ei tunneta routailmiöön liittyvien kehitysskenaarioita ja niiden merkitystä.

1.1 Tutkimuksen tavoitteet

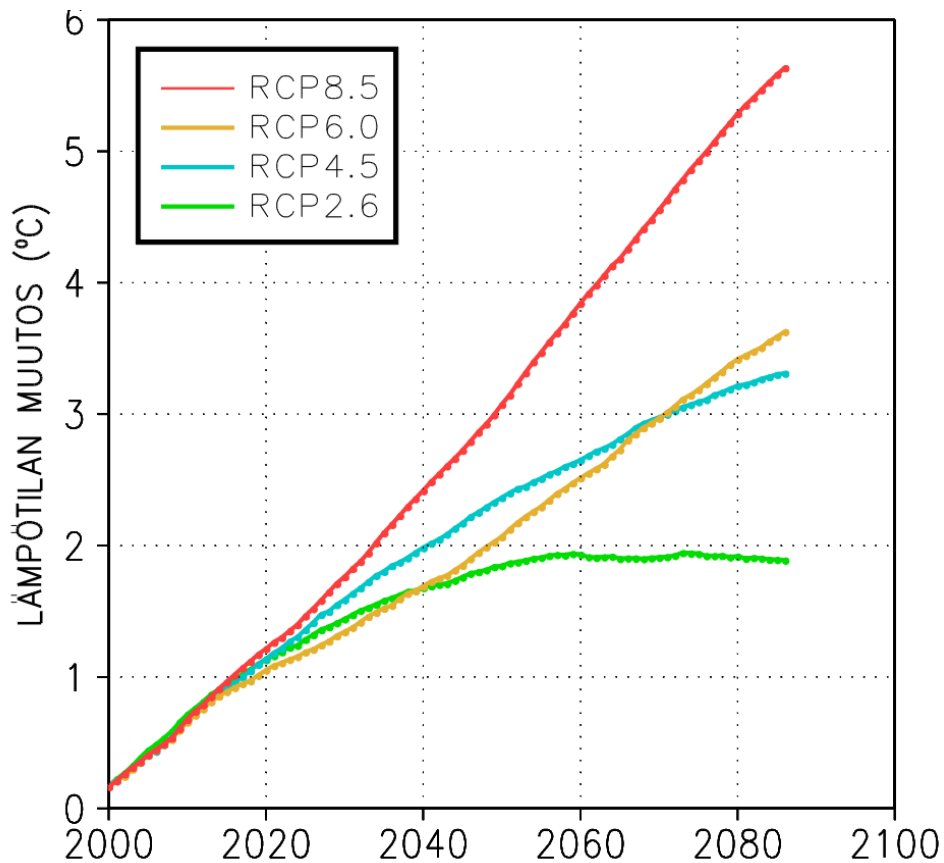
Tämän projektin tavoitteena on arvioida ilmastonmuutoksen vaikutusta sähköjakeluverkkojen vikaantumiseen tuulen sekä lumikuormien vaikutuksesta, erityisesti maaperän roudan muutoksen osalta. Hankkeessa tuotettavan tiedon avulla toimialalla ymmärretään paremmin roudan vaikutus tuulen ja lumikuormien aiheuttamien vikojen syntyyn sähköverkossa. Näin voidaan arvioida tarkemmin sähköjakelun häiriöiden vaikutuksia pitkän aikavälin suunnitteluun ja sähköjakeluverkkojen omaisuuden hallintaan sekä operatiivisen toiminnan järjestelyyn ja suunnitteluun. Tavoitteena on myös tehdä alustava tarkastelu lumikuormien muutoksen vaikutuksesta sähköjakeluverkkoihin. Tutkimuksessa hyödynnetään hankkeessa mukana olevien sähköverkkoyhtiöiden toimittamaa keskeytysaineistoa sekä avoimesti saatavilla olevaa aineistoa ympäristöolosuhteista ja ilmastonmuutoksesta. Tutkimuksen keskeisimmät tavoitteet ovat:

- Arvioida roudan vaikutusta sähköverkon tuuli- ja myrskyvikoihin
- Arvioida ilmastonmuutoksen vaikutusta roudan ja tykkylumen pitkän aikavälin vaikutuksiin sähköjakeluverkoissa
- Arvioida roudan vaikutusta sähköverkkoliiketoimintaan sekä verkostosuunnittelun että käyttötoiminnan näkökulmasta

1.2 Ilmastonmuutos

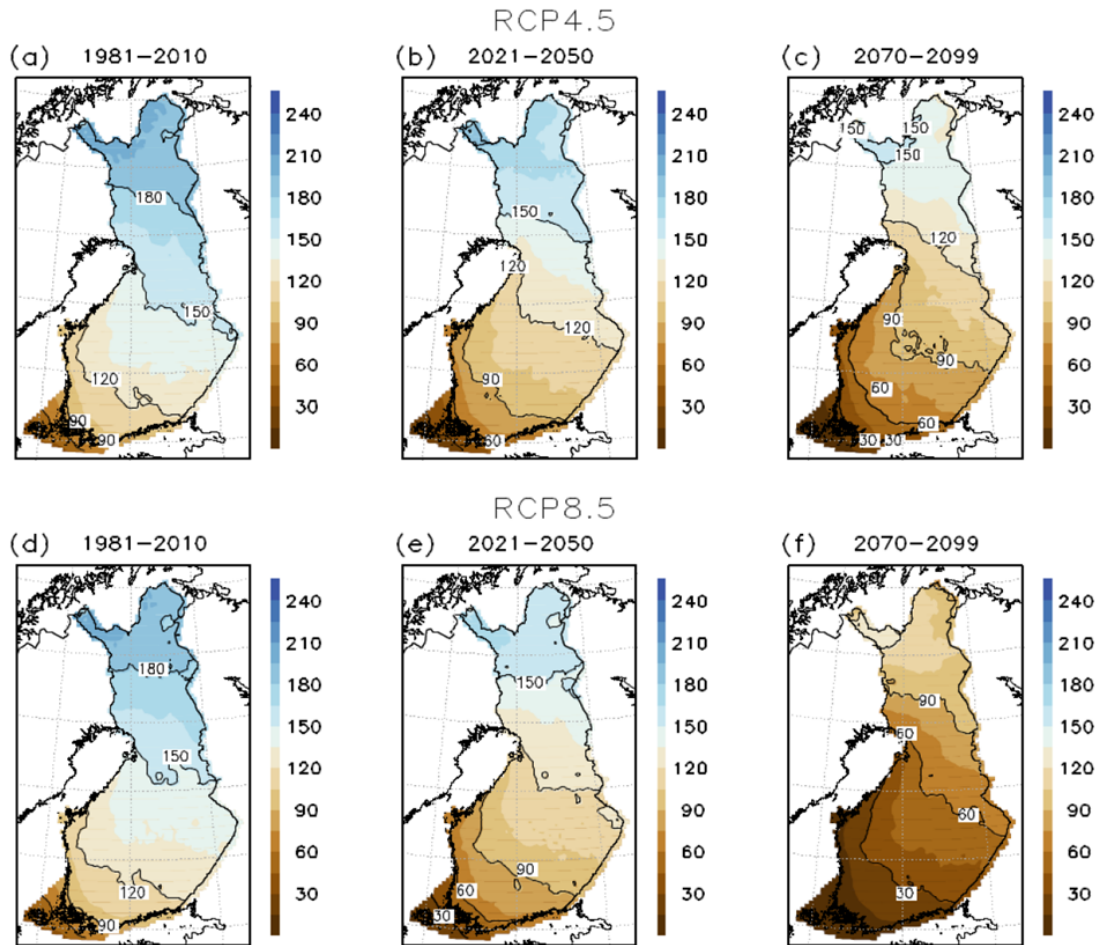
Ilmastonmuutos uhkaa nostaa maapallon keskilämpötilaa usealla asteella tämän vuosisadan aikana, Suomessa lämpeneminen on ollut 2–3 astetta nopeampaa kuin maailmanlaajuisesti keskimäärin (Rantanen ym. (2022)). On arvioitu, että lämpenemisen seurauksena Suomen talvet ovat aiempaa leudompia, jolloin alueellisissa sääolosuhteissa voi tapahtua huomattaviakin muutoksia aiempaan nähden. Tämä tarkoittaa muutoksia etenkin maaperän routimisessa ja tykkylumen kertymissä. Pohjoismaisissa olosuhteissa ilmastonmuutoksen vaikutus muihin tekijöihin, kuten tuulten voimakkuuksiin ja ukkosten ilmenemiseen, on arvioitu olevan vähäinen tai epäselvä.

Lämpenemiseen vaikuttaa se, kuinka paljon ilmakehään päästettävien kasvihuonekaasujen määrää onnistutaan rajoittamaan. Lämpenemisen skenaarioita on esitetty kuvassa 3. Kuvassa on esitetty lämpötilan muutos Suomessa vuosina 2000–2085 ilmastomuutoksen kehitysskenaarioilla RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 ja RCP8.5.



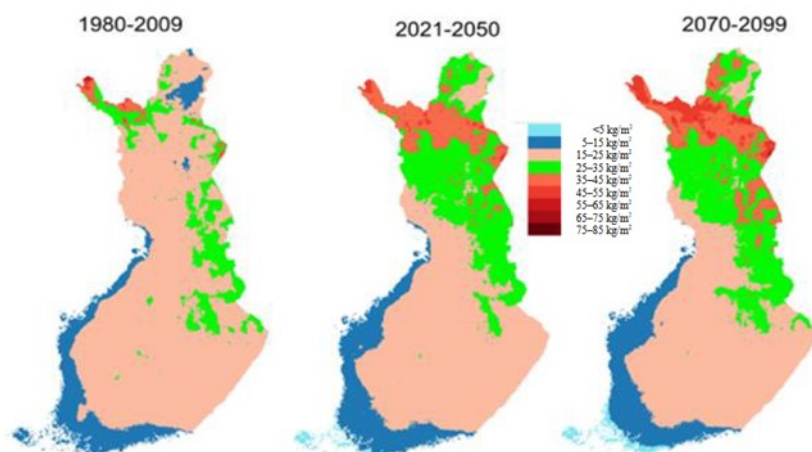
Kuva 3 Lämpötilan muutos suomessa erilaisissa ilmastoskenaarioissa (Rantanen et al. 2022).

Routapäivien määrän on lämpenemisen johdosta arvioitu vähenevän koko maassa huomattavasti ja Eteläisessä Suomessa voi ilmetä talvia, jolloin maaperä ei juurikaan jäädy (Kuva 4). Tällöin puuston kaatumisriski on huomattavasti suurempi kylmiin talviin verrattuna.



Kuva 4. Talven keskimääräinen routapäivien lukumäärä (roudan syvyys yli 20 cm) kuuden ilmastomallin tulosten pohjalta arvioituna savi- tai silttipohjaisilla kivennäismailla (1981–2010, 2021–2050 ja 2070–2099 RCP4.5- ja RCP8.5- skenaarioissa (Lehtonen et al. 2019).

Leutojen talvien lisääntymisen johdosta lumipeitteen määrän on arvioitu vähenevän koko Suomessa. Puustoon, ja osittain myös johtimiin, kertyvän tykkylumen osalta ilmastomuutoksen vaikutuksen arvioidaan kuitenkin olevan voimakas tietyillä alueilla. Tykkylumikertymän on arvioitu kasvavan voimakkaasti osassa Pohjois- ja Itä-Suomea. Tykkylumikertymää näillä alueilla lisää etenkin huurteen kertymiselle otollisten olosuhteiden yleistyminen sekä märän lumen sadannan lisääntyminen lämpimämmässä ilmastossa. Muualla maassa tykkylumikertymien on puolestaan arvioitu vähenevän ja varsinkin voimakkaan lämpenemisen RCP 8.5 skenaariossa Suomen etelä- ja lounaisosissa raskaista lumikuormista tulisi selvästi harvinaisempia. Kaikissa skenaarioissa raskaita tykkylumikertymiä voi kuitenkin ilmetä yksittäisinä vuosina myös eteläisemmässä Suomessa. Tykkylumikertymän muutos Suomessa vuosisadan loppuun mennessä on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Keskimääräinen talven suurin puiden lumikuorma kuuden ilmastomallin tulosten keskiarvona jaksoilla 1980–2009, 2021–2050 ja 2070–2099 RCP4.5-skenaarion mukaan (Lehtonen et al. 2019)

1.3 Aikaisemmat tutkimukset ilmastonmuutoksen vaikutuksesta sähköjakeluverkkoihin

Ilmastonmuutoksen vaikutuksia sähköjakeluverkoissa Suomen olosuhteissa on aikaisemmin tutkittu laajemmin Ilmatieteenlaitoksen raportissa *Suomen muuttuva ilmasto – tietoa sähkönsiirtojärjestelmän riskien arviointia varten* (Lehtonen et al., 2019), jonka päätuloksina olivat arvio ilmastonmuutoksen vaikutuksesta sähköverkkoliiketoimintaan liittyvistä sääilmiöistä. KUITTI-hankkeessa (Perrels et al., 2022), tutkittiin laajemmin ilmastonmuutosriskien suoria ja välillisiä kustannuksia Suomessa usealle eri toimialalle, sisältäen myös sähköjakelun. Molemmissa tutkimuksissa selvimpinä sähköjakeluverkkoihin ilmastoriskeinä nousivat esille roudan väheneminen ja lumikuormien kasvu. Näiden lisäksi rajuilmojen lisääntyminen RCP 8.5 skenaarioissa arvioitiin mahdolliseksi vuosisadan loppuun mennessä. Myrskyjen voimakkuuden kasvu on puolestaan arvioitu tutkimuksissa pieneksi ja vaikutusten suuruus sähköjakeluverkon häiriöihin on epävarmaa. Taulukossa 1 on esitetty KUITTI-hankkeessa havaittuja sähköjakeluverkkoihin liittyviä sääilmiöitä tarkemmin. KUITTI-hankkeessa tehtiin myös karkeat makrotaloudelliset arviot roudan ja lumikuormien vaikutuksesta häiriökustannuksiin.

Taulukko 1. Ilmastonmuutoksen vaikutus suomessa muokattu lähteestä (Perrels et al. 2022)

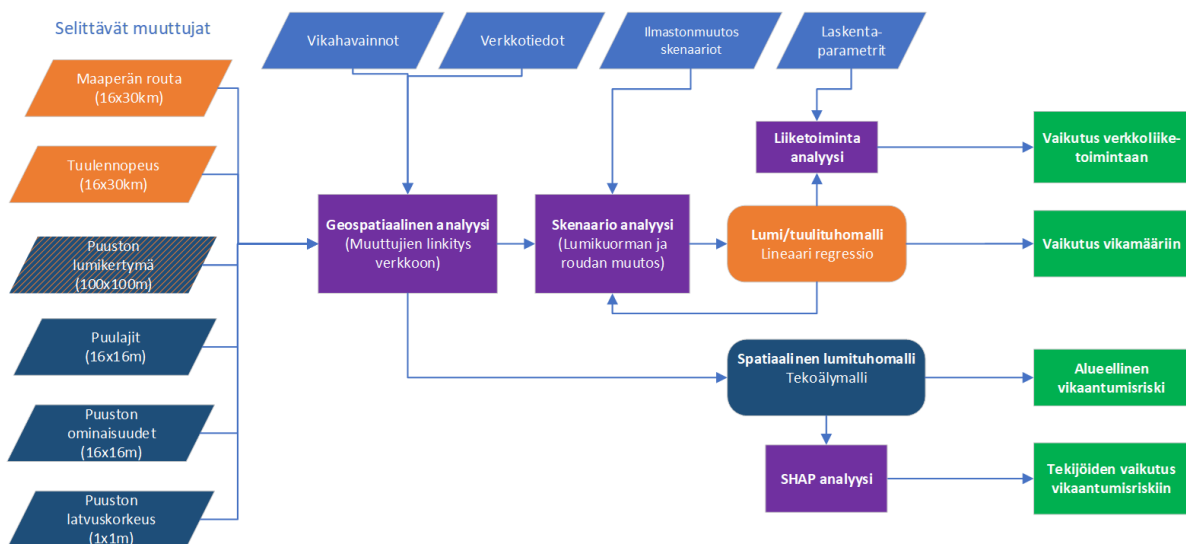
ILMIÖT	Kuvaus	Vahingot, ml. biotiset jatkoilmiöt	Ilmaston-muutoksen vaikutus
Myrskyt	Myrskyt (keskituuli yli 21 m/s) ovat matalapaineisiin liittyviä säähäiriöitä, jotka ovat yleisempiä ja voimakkaimpia talvikaudella. Kesälläkin esiintyy myrskyjä, ja vaikka ne ovat yleensä heikompia kuin talvella, ne voivat olla vaikutuksiltaan lähes yhtä merkittäviä roudan puutteen ja puiden lehtien vuoksi.	Kaatuvat puut ja niiden aiheuttamat vahingot sähköverkolle, liikenteelle, metsätaloudelle ja rakennuksille. Myrskyt altistavat metsiä myös tuholaishyönteisille.	Epävarma, ei merkittävää signaalia suuntaan tai toiseen
Rajuilma ja ukkonen	Rajuilmat ja ukkonen syntyvät ilmakehän pystysuuntaisista lämpötilaeroista sekä niistä johtuvista ilman nousuliikkeistä. Rajuilmoihin liittyy salamointia, voimakkaita tuulen puuskia, sekä syöksyvirtauksia.	Paikalliset, mutta usein mitattavat puustotuhot, sähkökatkot, liikennehäiriöt sekä salamoinnin aiheuttamat metsä- ja maastopalot	Epävarma, lämpenevä ilmasto kuitenkin tarjoaa tulevaisuudessa potentiaalain voimakkaiden ukkosten yleisty miselle.
Lumipyry	Pyryttämällä satava lumi kinosuu ja pölyyää.	Puustotuhot, sähkökatkot, liikennehäiriöt- ja onnettomuudet	Epävarma (heikko kasvusignaali); yhdistelmäriskit kasvavat mahdollisesti.
Tykkylumi ja lumikuormat	Puihin kertyvää, raskasta ja usein kosteaa lumikertymää kutsutaan tykkylumeksi. Tykyn muodostuminen vaatii usein kostean ja lauhan sään. Esimerkiksi sumupilvi edistää tykyn syntyä ja lisää lumen painoa.	Puustotuhot, kattovauriot, sähkölinjavauriot ja sähkökatkot	Lumikuormien arvioidaan kasvavan Itä- ja Pohjois-Suomessa ilmaston lämpenemisen, ilman kosteuden lisääntymisen ja lisääntyvien lumisateiden myötä. Muualla lumikuormat pienenevät.

Tässä hankkeessa hyödynnetään laajasti aikaisemmista hankkeista saatua tietoa ja osaamista. Hankkeen uutuusarvona aikaisempiin tutkimuksiin nähden on roudan vaikutuksen arviointi todellisiin ympäristötekijöihin pohjautuen (regressiomallinnus maaperän lämpötilan ja tuulen nopeuksien perusteella). Mallinnuksen pohjalta saadaan skenaariomallinnusta hyödyntämällä yksityiskohtaisemmat arviot roudan vaikutuksesta sähkönjakeluliiketoimintaan ilmaston muutoksen myötä. Lisäksi hankkeessa arvioidaan tykkylumien vaikutusta vikaantumiseen aikaisempaa tarkemmin.

2 Aineistot ja mallinnusmenetelmät

Hankkeessa hyödynnettiin laajaa verkkoyhtiöiden keräämää keskeytysaineistoa ja avoimista lähteistä saatavilla olevaa ympäristöaineistoa roudan ja lumikuormien jakeluverkon luotettavuusvaikutusten arvioimiseksi. Roudan vaikutusta vikamääriin arvioitiin hyödyntämällä sähköverkkoyhtiöiden keskeytysaineistoa ja avoimesti saatavilla olevia sää- ja maaperäaineistoja. Analyysin tuloksena saatiin yhtiökohtaiset arviot roudan vikoja vähentävän vaikutuksen suuruudesta historiallisesti. Analyysien tulokset yhdistettiin Ilmatieteen laitoksen tuottamiin arvioihin roudan muutoksesta, joka mahdollisti arviot vikamäärien lisääntymisestä tulevaisuudessa.

Lumikuormien osalta vaikutusta vikamääriin arvioitiin suoraan lumikuorman muutoskenaarioiden perusteella. Lisäksi hankkeessa tehtiin spatiaalinen lumituhomalli, jonka tuloksena saatiin paikallinen johtoalkio kohtainen arvio lumituhoriskille alttiista verkon osista. Hankkeessa tehdyt analyysit ja käytetyt aineistot on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Hankkeessa käytetty metodologia ja analyysien tulokset

Hankkeessa käytetyt aineistot on esitetty tarkemmin taulukoissa 2 ja 3. Maaperän lämpötila-aineistona ja tuulennopeusaineistona hankkeessa käytettiin ERA5-Land paikkatietokantaa, joka on European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) tutkimuslaitoksen tuottamaa (Muñoz Sabater, J. 2019). Puustoaineistona käytössä oli LUKE:n tuottama monilähteen valtakunnan metsien inventoinnin (MVMI) kartta-aineisto (Luonnonvarakeskus 2021) ja metsäkeskuksen tuottama Lidar-aineistoon perustuva latvuskorkeusmalli (Metsäkeskus 2024). Lumituhoriskiarviot perustuivat Ilmatieteen laitoksen (FMI) tuottamaan puuston

lumikuorma-aineistoon (Ilmatieteen laitos 2016). Hankkeessa käytetyt ympäristöaineistot on kuvattu tarkemmin taulukossa 2.

Taulukko 2. Hankkeessa käytetyt ympäristö- ja sääaineistot.

	Resoluutio	Tuottaja	Vuosi
Latvuskorkeus	1x1m	Metsäkeskus	Vaihtelee
Puuston lumikorma	100x100 m	FMI	2010, 2050
Tuulennopeus	30x19 km	ECMFW	2010-2023
Maaperän lämpötila	30x19 km	ECMFW	2010-2023
Maaperän routa	0.1x0.2 °	FMI	2010,2050
Puustoaineistot (ikä,laji,pituus)	16x16 m	Luke	2017,2021

Keskeytysaineistoa hankkeessa oli käytettävissä Imatran Seudun Sähköverkko Oy:n (ISSS Oy) ja Rovakaira Oy) 8–13 vuoden ajalta taulukon 3 mukaisesti. Keskeytysaineistossa oli mukana kaikkien keskeytyksien alkamis- ja päättymisajankohta, aiheuttaja ja sijainti johtolähtösolla.

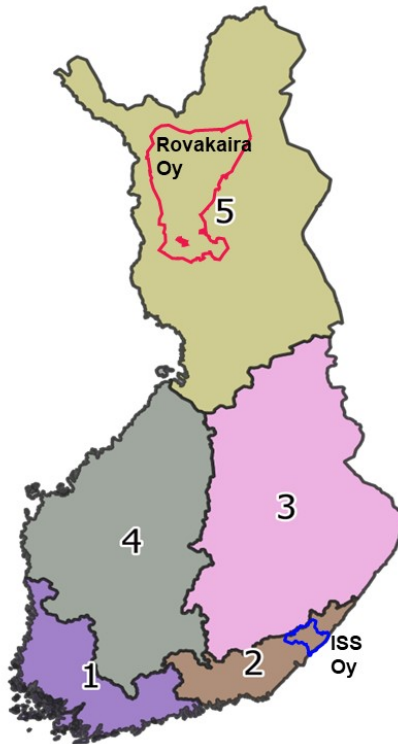
Taulukko 3. Hankkeessa käytetyt verkkoyhtiöiden aineistot.

Yhtiö	L1: Tuuliviat	L2: Lumi/jää viat	Yht. kaikki viat	Aikaväli	KJ- ilmajohtopituus (v. 2022)
ISSS Oy	490	200	1 200	2010-2023	680
Rovakaira Oy	200	300	1 600	2015-2022	3 180
Yhteensä	690	500	2800	-	3860

Taulukosta voidaan huomata, että ISSS Oy:n alueella viat ovat aiheutuneet enimmäkseen tuulesta johtuen, kun taas Rovakaira Oy:n alueella korostuvat lumi ja jää viat. Rovakaira Oy:n alueella on ollut myös merkittävämpi määrä muita vikatyyppejä tuuli ja lumi/jää vikojen lisäksi.

2.1 Laajat aluetarkastelut

Verkkoyhtiökohtaisten tarkastelujen lisäksi hankkeessa tehtiin valtakunnallisia tarkasteluja hyödyntäen tuloksia aikaisemmasta tutkimuksesta ja skaalamaalla ne tämän hankkeen aikana saatujen tulosten avulla. Valtakunnallisten tarkastelujen pohjana oli KUITTI-hankkeen pohjalta käytettävissä ollut laaja viiteen alueeseen aggregoitu verkkoyhtiöaineisto vuosilta 2008-2018. Tarkasteluissa käytetyt suuralueet ja tarkasteluverkkoyhtiöiden alueet on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Laajan aluetarkastelun aluejako ja tarkastellut verkkoyhtiöalueet

Laajaan keskeytysaineistoon sisältyi alueiden verkkoyhtiöiden kaikki vikatapahtumat lajiteltuna vikalajeittain. Aineisto kattaa noin 95% kaikista Suomessa tilastoiduista jakeluverkon keskeytyksistä. Taulukossa 4 on esitetty alueiden kokonaisvikamäärät tuuli- ja lumivioille.

Taulukko 4 Alueiden kokonaisvikamäärät 2008–2018.

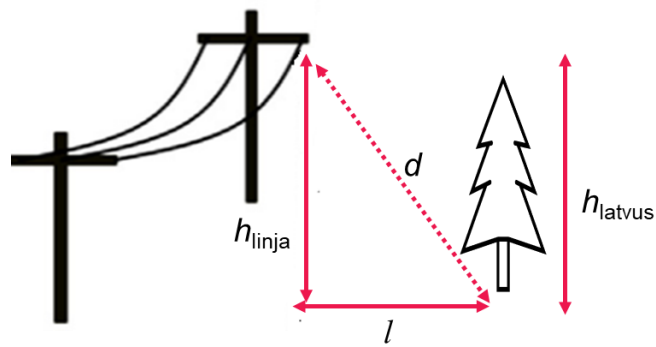
Alue	L1: Tuuliviat (kpl)	L2: Lumi/jääviat (kpl)	KJ-verkon ilmajohtopituus, v. 2019, (km)
Area 1 (SW)	23 252	3474	12 864
Area 2 (SE)	9 062	3240	8 368
Area 3 (E)	25 412	16 200	33 839
Area 4 (W)	22 881	11 900	28 838
Area 5 (N)	998	1 500	14 358
Yhteensä	81 605	36 300	98 000

2.2 Jakeluverkoissa tapahtuneiden muutosten arviointi

Toimitusvarmuusvaatimusten noudattamiseksi jakeluverkkoyhtiöt ovat tehneet huomattavia investointeja jakeluverkon säävarmuuden parantamiseksi viimeisen kymmenen vuoden aikana. Verkkoyhtiöiden keinovalikoimassa on ollut muun muassa maakaapeloinnin lisäys, ylileveät johtokadut ja vierimetsän tehostetut hoitotoimenpiteet. Jotta erilaisten ilmiöiden, kuten roudan, vaikutusta vikaantumiseen voidaan luotettavasti arvioida, on olennaista huomioida verkossa tapahtuneet muutokset tarkasteluaikavälillä.

Sääilmiölle alttiin verkon määrän muutokset voidaan ottaa yksinkertaisimmillaan huomioon käyttämällä mallinnuksessa selitettävänä muuttujana vikataajuutta eli vikojen määrää avojohtokilometriä kohden, joka voidaan laskea Energiaviraston julkaisemista teknisistä tunnusluvuista yhtiö- ja vuositasolla. Mikäli muutoksia halutaan tarkastella pienemmillä alueilla, voidaan hyödyntää maanmittauslaitoksen maastotietokannasta vektorimuotoista avojohtoverkkoaineistoa, jota on saatavilla tarkkana paikkatietona noin kymmenen vuoden ajalta (Maanmittauslaitos 2024). Tämä menetelmä ei kuitenkaan ota huomioon avojohtoverkkoon kohdistuneita toimitusvarmuusinvestointeja, kuten ylileveitä johtokatuja, jotka vähentävät merkittävästi puustosta aiheutuvia vikoja. Tämä aiheuttaa haasteita mallinnukselle etenkin Imatran Seudun Sähkönsiirto Oy:n osalta, jonka verkkoalueesta huomattavalle osalle on tehty johtokatuja levennys.

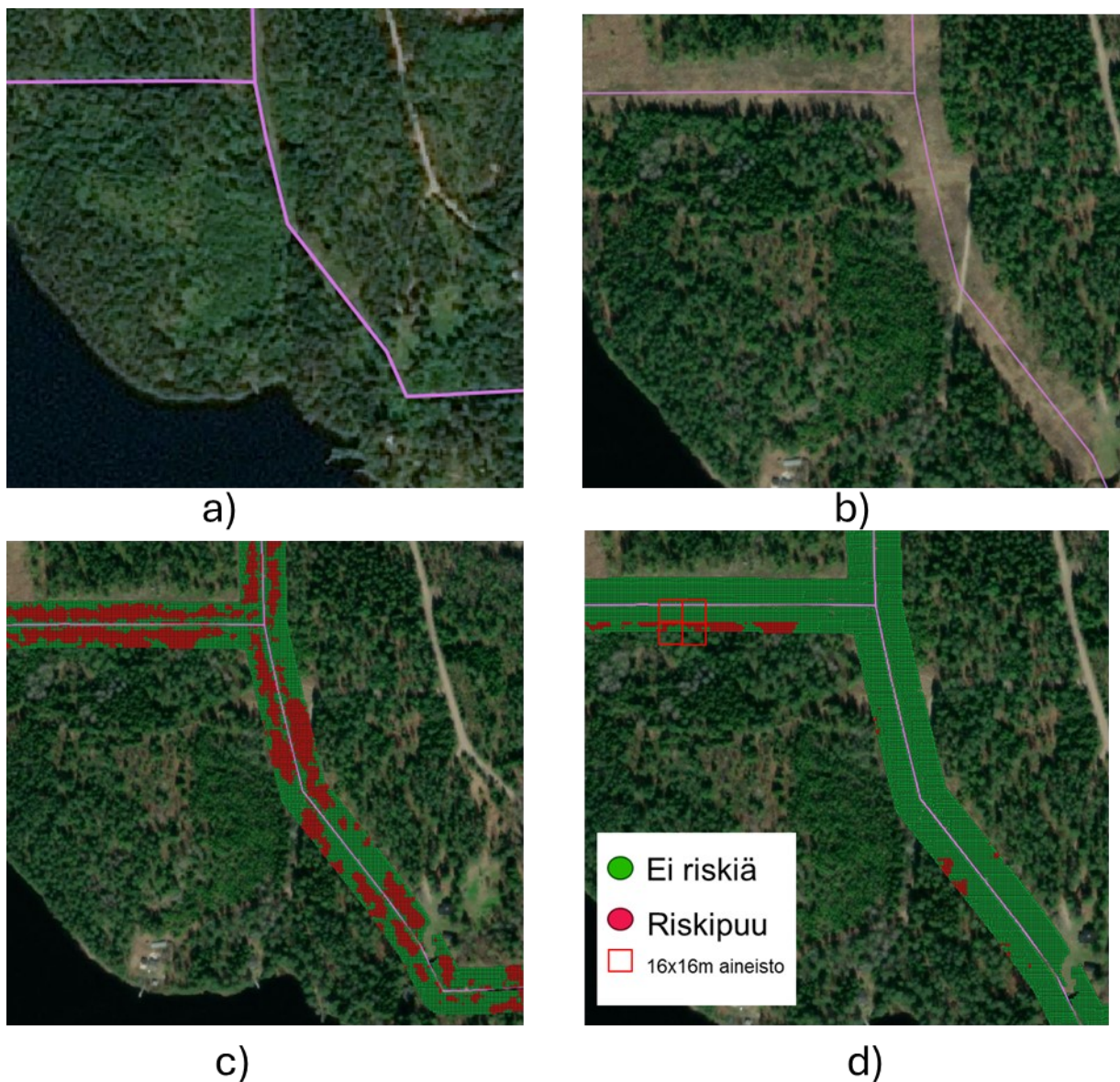
Edellä mainittujen haasteiden huomioimiseksi tässä hankkeessa hyödynnettiin laserkeilauspohjausta 1x1m resoluution latvuskorkeusaineistoa ja satelliittipohjaista 16x16m resoluution puustoaineistoa puustoriskille alttiin verkkopituuden muutosten arvoimiseksi. Kuvassa 8 on esitetty riskipuiden määrittämiseen käytetty menetelmä.



Kuva 8. Riskipuiden määrittämiseen käytetty menetelmä. h_{linja} on avojohdon korkeus, h_{latvus} on latvuskorkeus ja l on etäisyys avojohtoon.

Kuvan mukaisesti avojohdojen läheisyydessä oleva puusto määriteltiin riskipuustoksi, mikäli latvus on riittävän korkea yltämään avojohdolle (latvuksen korkeus $h_{\text{latvus}} > d$).

Tarkan latvuskorkeusaineiston avulla on mahdollista määrittää riskipuut jopa yksittäisten puiden tarkkuudella. Latvuskorkeusaineisto voi kuitenkin olla joillain alueilla usean vuoden vanhaa, jolloin aineistoa tulee päivittää. Tässä hankkeessa latvuskorkeusaineistoa päivitettiin LUKE:n 16x16m puustoaineiston avulla. Kuvassa 9 on esitetty esimerkki ISS Oy:n verkkoyhtiön alueelle tehdystä riskipuomallinnuksesta kahden eri vuoden aineistolla.



Kuva 9. Imatran seudun sähkönsiirto Oy:n alueelle tehty riskipuumallinnus. Satelliittikuva vuodelta 2016 a), ja vuodelta 2024 b), riskipuiden määrittäminen vuoden 2017 aineiston perusteella c) ja päivitetty vuoden 2021 aineistolla tehty riskipuumäärittäminen d).

Kuvassa on esitetty ISS Oy:n verkkoalueelta esimerkki alue, jossa on tehty johtokatuja leventänyt vuosien 2016 ja 2024 välillä. Riskipuiden määrittäminen on tehty latvuskorkeusaineistoa hyödyntäen kuvan 8 mukaisesti 1x1m resoluutiolla, joka mahdollistaa kuvien c) ja d) mukaiset yksittäisten riskipuiden havaitsemisen. Kuvassa d) latvuskorkeusmallin perusteella tehtyä riskipuu luokittelua on päivitetty uudemman 16x16m tarkkuudella olevan LUKE:n puustoaineiston avulla uudelleen luokittelemalla riskipuuaineistosta riskipisteet sellaisilta alueilta, joissa puusto on poistunut 16x16m aineiston mukaan. LUKE:n aineiston pienemmän resoluution takia johtokatuja rajoittavalla alueella jäi joissain tapauksissa edelleen riskipuiksi määritettyjä pisteitä, jotka

todellisuudessa oli poistettu (kuva 9 d) vasen yläkulma). Menetelmän todettiin kuitenkin tuottavan riittävän hyviä tuloksia huolimatta yksittäisistä väärinluokituksista. Esimerkkikuvasta voidaan selvästi havaita, että avojohtojen säävarmaa osuutta arvioidessa on tärkeää käyttää useamman vuoden ainestoa puustoaineistoa, jotta verkkoympäristön muutokset (hakkuut ja johdotkatujen levennykset ym.) voidaan ottaa huomioon. Tässä hankkeessa puustoaineistoa käytettiin sekä tarkassa spatiaalisessa lumikuormamallinnuksessa, että myös routa mallinnuksessa avojohtoverkon puustoriskisen osuuden määrittämiseen.

3 Roudan- ja lumikuormien vikaantumisvaikutuksen mallinnus

Roudan- ja lumikuormien vaikutuksen arvioimiseksi sähköjärjestelmän häiriöihin käytettiin monimuuttuja lineaari- regressiota. Aiemmissa tutkimuksissa kuten Haakana et al. 2024, lineaari- regression on todettu toimivan hyvin vastaavanlaisten ilmiöiden tarkastelussa. Lisäksi lineaari- regression etuna on läpinäkyvyys ja helposti tulkittavat analyysin tulokset. Tuulennopeuden ja vikamäärien eksponentiaalisen yhteyden ottamiseksi huomioon hankkeessa käytettiin yksimuuttujamallia parhaiten korreloivan tuulimuuttujan eksponentin selvittämiseksi.

3.1 Mallinnus roudan vaikutuksesta sähkönjakeluverkon tuulivikoihin

Tuulivikojen mallintamiseksi haettiin univariaattimallia hyödyntäen parhaiten korreloiva tuulimuuttuja ja tuulimuuttujan eksponentti jokaiselle tarkastelualueelle. Routamuuttujana käytettiin binääristä routapäivä muuttujaa (routapäivä jos maaperän lämpötila alle -0.5 °C 7–28 cm syvyydessä). Käytetty määritelmä valittiin vastaamaan mahdollisimman hyvin Ilmatieteen laitoksen routamallissa käytettyä luokittelua, jossa routapäiväksi on laskettu päivät, jolloin mallinnettua routaa esiintyy yli 20 cm syvyydellä. Määritelmän on myös todettu aikaisemmassa tutkimuksessa korreloivan parhaiten jakeluverkkojen vikataajuuden kanssa (Haakana et al. 2024).

Roudan ja lumikuormien vaikutus mallinnettiin hankkeessa Rovakaira Oy:n ja ISS Oy:n verkkoalueille. Lisäksi vaikutusarviot skaalattiin koko Suomen alueelle aikaisemman tutkimuksen tuloksia hyödyntäen.

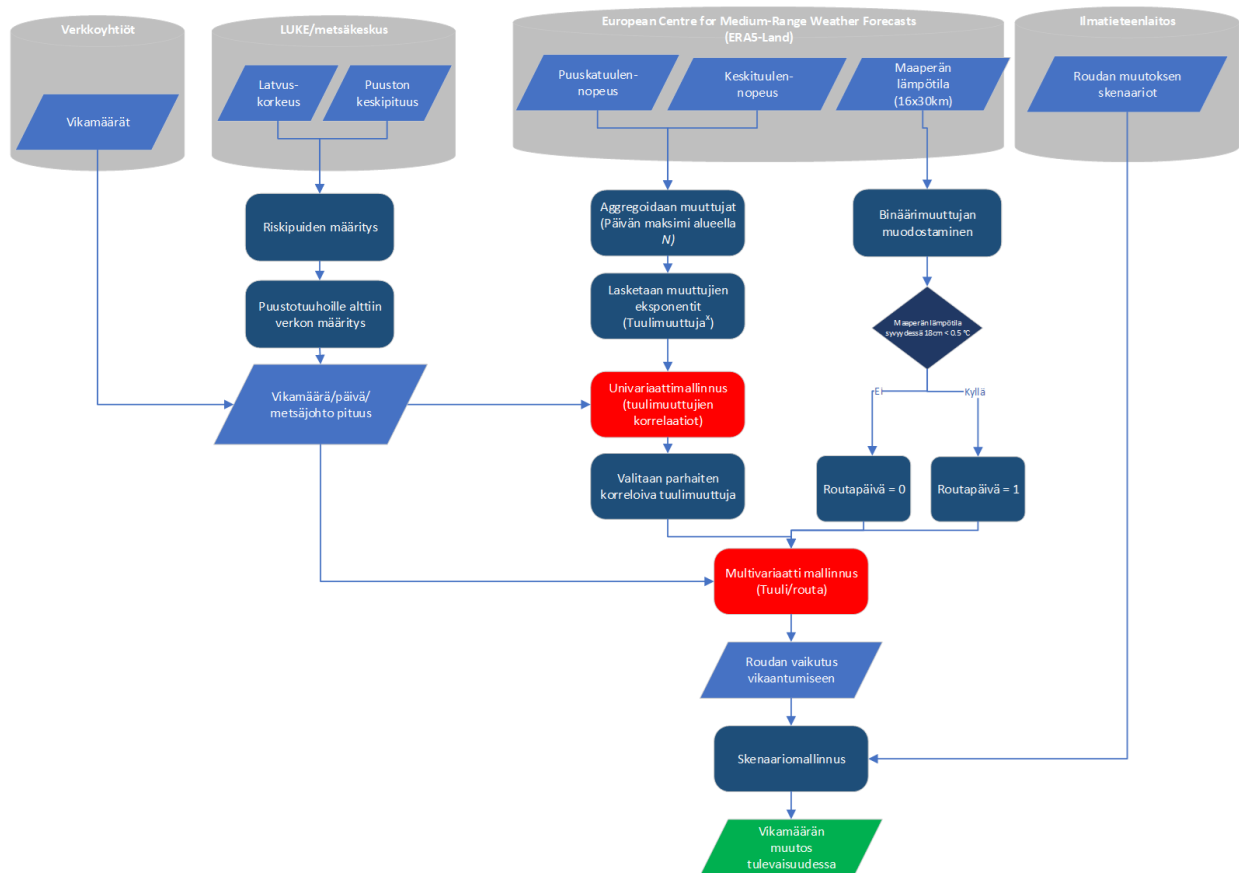
Roudan vaikutuksen mallintamiseksi käytetty monimuuttujamalli on muotoa:

$$y_{\text{vikataajuus}} = \alpha + \beta_1 * W_s^x + \beta_2 * F_{\text{bin}} * W_s^x, \quad (1)$$

jossa α on vakiotekijä, β on regressiokerroin, W_s on tuulimuuttuja, F_{bin} on roudan binäärimuuttuja eli routapäivä, ja x on parhaiten korreloiva tuulennopeuden potenssi. β_1 kerroin kuvaa tuulennopeuden suoraa vaikutusta vikataajuuteen, kun taas β_2 kerroin kuvaa roudan vaikutusta. Roudan vikamääriä vähentävä suhteellinen vaikutus maan ollessa roudassa saadaan laskettua yhtälöllä:

$$R_{\text{suht}} = \frac{\beta_2}{\beta_1}. \quad (2)$$

Roudan vaikutuksen arviointiin käytetty metodologia on esitetty tarkemmin kuvassa 10.



Kuva 10. Roudan vaikutuksen arviointiin käytetty metodologia.

3.2 Spatiaalinen lumikuormamalli

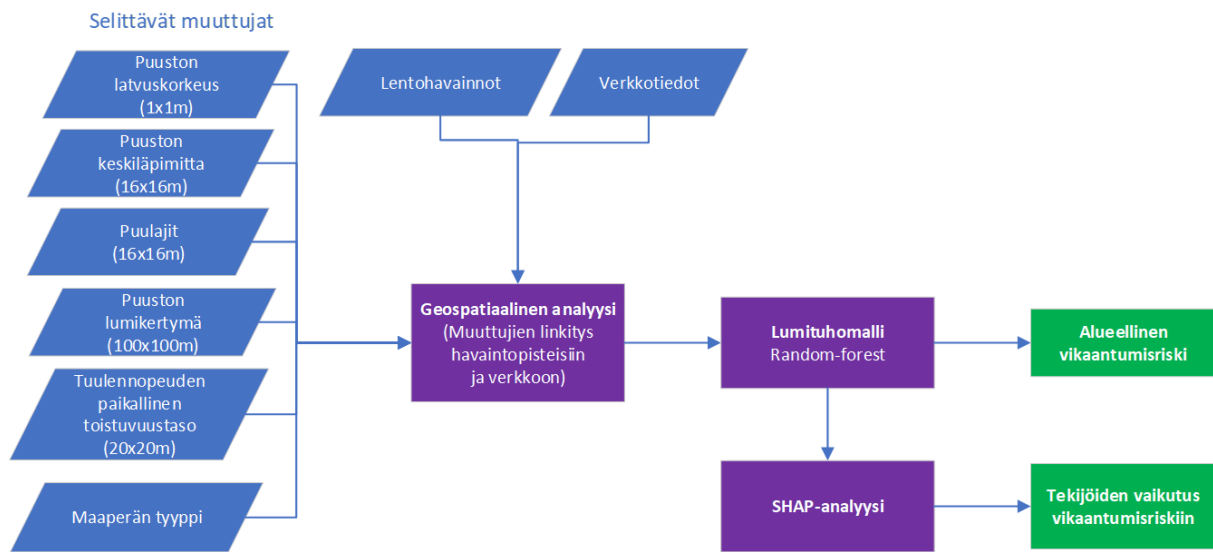
Lisääntynyt lumikuorma ja korkeampi tuulen nopeus lisäävät varren murtumisen ja juurien irtaamisen todennäköisyyttä, ja varsinkin hoitamattomat metsät ovat vaarassa, koska niissä on tiheämpiä ja korkeampia puita. Lumen kerääntyminen puiden latvuksiin, on todennäköisintä lämpötilojen ollessa noin välillä $-1 - + 2^{\circ}\text{C}$, jolloin lumi tarttuu oksiin ja johtimiin. Tämä paino aiheuttaa mekaanisen ylikuormituksen ja puun vaurioitumisen ajan myötä, jolloin puu taipuu tai katkeaa avojohtojen päälle. Lyhytaikainen tuuli tai lämpötilan muutos ei poista kerääntyneitä lunta. Vaurioita aiheuttavat lumikuormat ovat puun lajista riippuen yleensä välillä $10\text{--}40\text{ kg/m}^2$, mäntyjen on raportoitu kokeneen vaurioita pienemmillä lumikuormituksilla (noin 10 kg/m^2) verrattuna kuusen, joka kestää 20 kg/m^2 lumikuormaa ennen alkavaa vahinkoa, Koivujen osalta taipumiset ovat todennäköisiä pienilläkin lumikuormilla. (Suvanto ym., 2021). Tässä hankkeessa hyödynnettiin avoimena aineistona Ilmatieteen laitoksen tuottamaa puuston

lumikuorma aineistoa (Ilmatieteen laitos 2016), jonka mallinnuksessa on huomitu erilaisten lumityyppien kertymä ottamalla huomioon mm. sadanta, korkeus ja lämpötila.

Hankkeessa toteutettiin aikaisemmin kuvattujen verkkoyhtiö ja suuraluetason tarkastelujen lisäksi tarkka johtoalkiotason mallinnus vikaantumisriskistä lumikuormien osalta. Lumikuormamallin opetusdatana käytettiin Comtiki Oy:n FlySpect järjestelmällä tuotettua lentohavaintoaineistoa Kajave Oy:n verkkoalueelta (Comtiki Oy 2024), sekä suurta määrää avoimesti saatavilla olevaa ympäristöaineistoa.

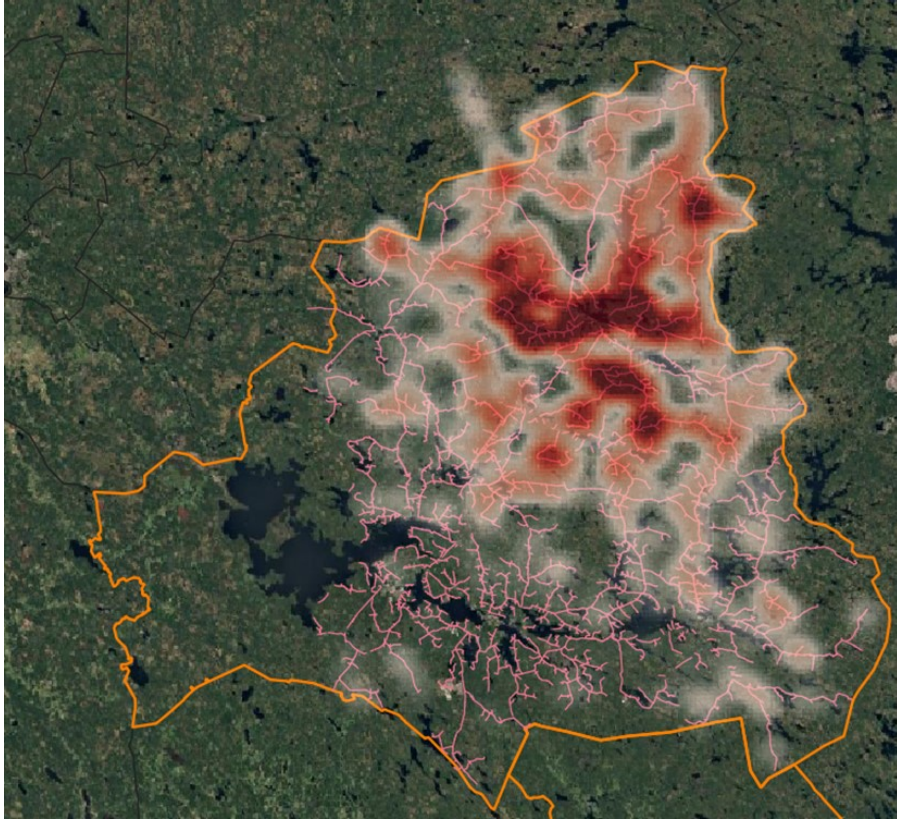
Spatiaalinen riskimallinnus toteutettiin Random Forest tekoälymallilla, joka on todettu toimivan hyvin lumikuormariskin määrittämisessä aikaisemmissa tutkimuksissa (Räisänen et al. 2023). Mallinnettu vikaantumisriski kuvaa lumituhoriskin todennäköisyyttä johtoalkiolla (100x20m). Mallin avulla arvioitiin myös eri tekijöiden vaikutusta arvioituun lumikuormariskiin. Mallin avulla ei saada suoraan määritettyä tykkylumikertymän vaikutusta vikamääriin, sillä käytettävässä aineistossa kuvaa lumikuorman keskimääräistä kertymää alueella (100x100m ruutu) historiallisesti. Vikamäärävaikutuksien arvioimiseksi spatiaalisen mallin tulokset tulisi yhdistää historialliseen päiväkohtaiseen lumikertymä aineistoon ja keskeytysaineistoon, tarkempaa lumikertymäaineistoa ei kuitenkaan ollut tässä hankkeessa käytettävissä.

Lumikuormamallinnuksessa käytettiin laajaa valikoimaa selittäviä tekijöitä, kuten puulajityyppejä, puuston keskimääräistä alueellista lumikuormakertymää ja puuston latvuskorkeutta. Käytetyt aineistot olivat avoimesti saatavilla olevia paikkatietoaineistoja. Mallin vastemuuttujana käytettiin Kajave Oy:n alueelta kerättyä lumikuormariski aineistoa. Kajave Oy:n verkkoalueelle muodostetulla mallilla mallinnettiin myös Rovakaira Oy:n ja ISS Oy:n paikallinen lumikuormariski. Kuvassa 11 on esitetty käytetty metodologia tarkemmin.



Kuva 11. Spatiaalisessa lumikuormamallinnuksessa käytetty aineisto ja metodologia.

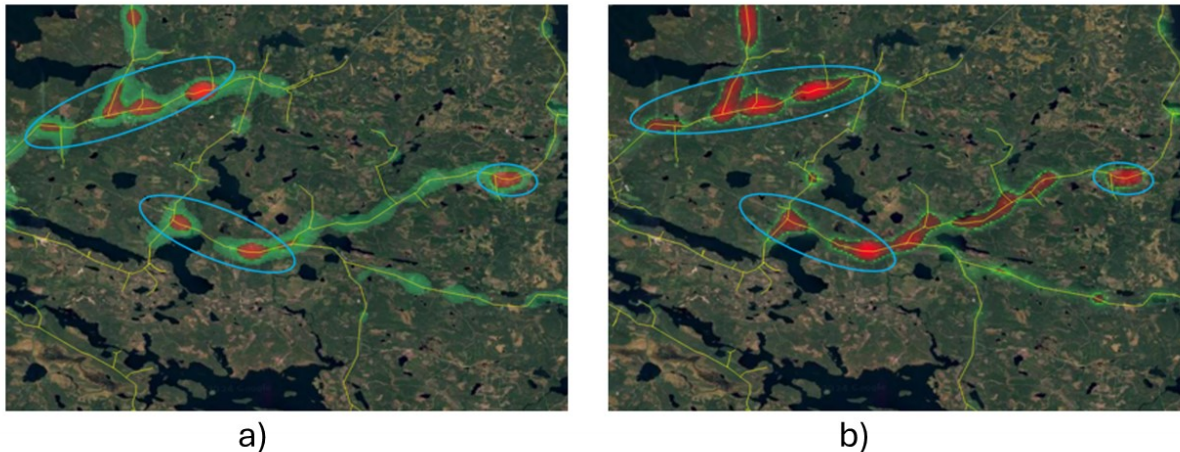
Spaatialisen lumikuormamallin opettamiseen käytettiin Kajaven alueelta vuosina 2017-2018 kerättyä lumikuormiin liittyvää lentohavaintoaineistoa. Aineisto on kerätty Comtiki Oy:n Flyspect järjestelmällä (Comtiki 2024). Aineistossa oli mukana noin 13 000 havaintopistettä, jotka oli jaettu vikahavaintoihin (puu/oksa linjassa) ja riskihavaintoihin (Vaarallinen puu/oksa). Aineiston jakaantuminen Kajave Oy:n verkkoalueella on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Lämpökartta käytetystä lentohavaintoaineistosta Kajave Oy:n verkkoalueella vuosilta 2017-2018 (Comtiki 2024).

3.2.1 Spatiaalisen lumikuormamallinnuksen tulokset

Alueellisen lumikuormariskimallinnuksen avulla saatiin määritettyä avojohtojen reunuspuihin kertyvän lumikuorman aiheuttama vikaantumisriski tarkalla resoluutiolla. Kuvassa 13 on esitetty mallin tuottamia tuloksia verrattuna havainto aineistoon esimerkialueella.



Kuva 13. Lämpökartta esimerkkialueen lentohavaintoaineiston riskihavainnoista a) ja lumikuormamallinnuksen arvioimasta riskistä b). Punaiset alueet kuvaavat suurta lumikuorma riskiä ja vihreät alueet pientä riskiä.

Kuvan lämpökarttoja vertailemalla voidaan todeta riskialueiden samankaltaisuuden olevan suuri erityisesti alueen pohjoisen osan merkityillä alueilla. Havaintopisteiden ja ennustettujen pisteiden alueiden välinen samankaltaisuus viittaa siihen, että malli kykenee löytämään melko hyvin ympäristötekijöistä selittäviä yhdistelmiä, jotka näkyvät lumikuormariskin alueellisena lisääntymisenä. Riskiä lisäävistä yksittäisistä tekijöistä tarkastelussa koroistuivat lumikuorman ja riskipuuston määrä. Puulajeista koivuvaltaiset alueet koroistuivat mallissa.

Mallin todettiin identifioivan lumikuormariskialueita kohtalaisella luotettavuudella, joskin mallin arvioima riski oli usein toteutunutta riskiä suurempi. Mallinnuksessa käytettyä menetelmää ja tuloksia on esitelty tarkemmin hankkeen yhteydessä toteutetussa diplomityössä *Methodology for fault risk level estimation of overhead lines using open data* (Saleem 2024). Kajave Oy:n alueen aineistolla opetetun mallin avulla voidaan arvioida myös muiden alueiden lumikuormariskiä, mikäli tarkastelualueen ympäristöolosuhteet eivät eroa merkittävästi.

3.3 Skenaariomallinnus

Skenaariomallinnuksessa hyödynnettiin Ilmatieteenlaitoksen tuottamia mallinnusaineistoja roudan- ja lumikuormien muutoksesta kahdessa ilmastoskenaarioissa. Skenaarioaineistot on mallinnettu jaksolle 1981–2010 säähavaintoihin pohjautuen ja jaksolle 2021–2050 viiden ilmastomallin keskiarvona RCP4.5 ja 8.5 lämpenemisskenaarioille (Lehtonen et al. 2019, Lehtonen et al. 2018). Keskimääräisten aineistojen lisäksi hankkeessa oli käytettävissä Ilmatieteen

laitoksen toimittamaa yksittäisistä ilmastomalleista tuotettua päiväkohtaista routadataa. Skenaariomallinnuksen tavoitteena oli laskea vikamäärien muutos tulevaisuudessa ottaen huomioon roudan- ja lumikuormien muutoksen. Skenaariomallinnuksen tuloksia hyödynnettiin liikevaihtoanalyseissä.

3.3.1 Routaskenaariot

Ilmatieteenlaitoksen tuottamassa routapäiväaineistossa on mallinnettu tarkasteltavan 30 vuoden jakson keskimääräinen vuosittaisten routapäivien määrä. Roudan määrittämisessä on otettu huomioon mm. maaperän tyyppi ilman lämpötila ja lumikertymä. (Lehtonen et al. 2018) Routapäivien muutoksen on laskettu erikseen kivennäis- ja turvemaille. Tässä hankkeessa roudan muutos laskettiin painotettuna keskiarvona tarkastelualueen kivennäis- ja turvemaan osuudella tai mikäli alueen tarkkaa osuutta ei ollut määritettävissä analysissä käytettiin painottamatonta keskiarvoa.

Ilmatieteenlaitoksen skenaariot yhdistettiin hankkeessa mallinnettuun roudan keskimääräiseen historialliseen vikaantumisvaikutukseen, jolloin voitiin arvioida skenaarioiden mukaisten muutosten vaikutusta tulevaisuuden vikamääriin. Roudan keskimääräisen vaikutuksen oletettiin pysyvän samana myös tulevaisuudessa.

Vikamäärien absoluuttinen muutos vuodessa L_{muutos} saadaan laskettua yhtälöllä:

$$L_{muutos} = R_{suht} \cdot \frac{d_{r,muutos}}{365} \cdot L_{1,a} \quad (3)$$

jossa R_{suht} on roudan vikamääriä vähentävä suhteellinen vaikutus routa-aikaan, $d_{r,muutos}$ on ilmaston lämpenemisskenaarioiden mukainen routapäivien muutos vuodessa ja $L_{1,a}$ on verkko-yhtiön alueella ilmenevien tuuli- ja myrskyvikojen määrä vuodessa.

3.3.2 Lumikuormaskenaariot

Ilmatieteenlaitoksen lumikuorma-aineistossa on mallinnettu tarkasteltavan 30 vuoden jakson keskimääräinen vuoden suurin puiden lumikuorma (kg/m^2). Mallinnuksessa on otettu huomioon erilaisten lumityyppien kertymä tykkylumelle otollisten olosuhteiden aikana. Kertymässä on otettu huomioon mm. korkeus merenpinnasta, lämpötila, sadanta, ilmankosteus ja tuulen nopeus. Lumikuormien osalta hankkeessa oli käytettävissä vain pitkän aikavälin keskiarvot, jolloin tykkylumen kertymän ja vikamäärien välistä tarkkaa korrelaatioita ei ollut mahdollista määrittää vastaavasti kuin roudan osalta. Tästä johtuen hankkeessa tehtiin yksinkertaistettu

oletus lumikuormien ja vikamäärien suorasta korrelaatiosta. Todellisuudessa lumikuormien ja vikamäärien välinen yhteys on todennäköisesti oletusta monimutkaisempi.

3.4 Liiketoiminta-analyysit

Vuosittainen muutos KAH-kustannuksissa saadaan yhtälöllä

$$KAH_{muutos,a} = KAH_{ave,a} \cdot \frac{L_{x,a}}{L_{yht,a}} \cdot L_{x,muutos,ave,a}, \quad (4)$$

jossa $KAH_{ave,a}$ on keskimääräinen vuosittainen KAH kustannus, $L_{x,a}$ on keskimääräinen vikamäärä vikatyypeittäin (lumikuorma tai tuuli- ja myrskyviat), $L_{x,muutos,ave,a}$ on vikatyypin vikamäärien keskimääräinen muutos ilmastonmuutosskenaarioiden mukaan. Tuulivoille $L_{x,muutos,ave,a}$ on laskettu mallinnetun roudan vaikutuksen ja routapäivienmuutosskenaarioiden avulla yhtälön 3 mukaisesti. Lumikuormien osalta $L_{x,muutos,ave,a}$ on oletettu olevan suoraan lumikuorman suhteellinen muutos ilmastonmuutosskenaarioiden mukaisesti. Vastaavasti vuosittainen muutos viankorjauskustannuksissa $K_{viankorjaus,muutos,a}$ voidaan laskea yhtälöllä

$$K_{viankorjaus,muutos,a} = K_{viankorjaus,ave,a} \cdot \frac{L_{x,a}}{L_{yht,a}} \cdot L_{x,muutos,ave,a}, \quad (5)$$

jossa $K_{viankorjaus,ave,a}$ on keskimääräinen vuosittainen viankorjauskustannus.

4 Roudan ja lumikuormien vaikutus liiketoimintaan

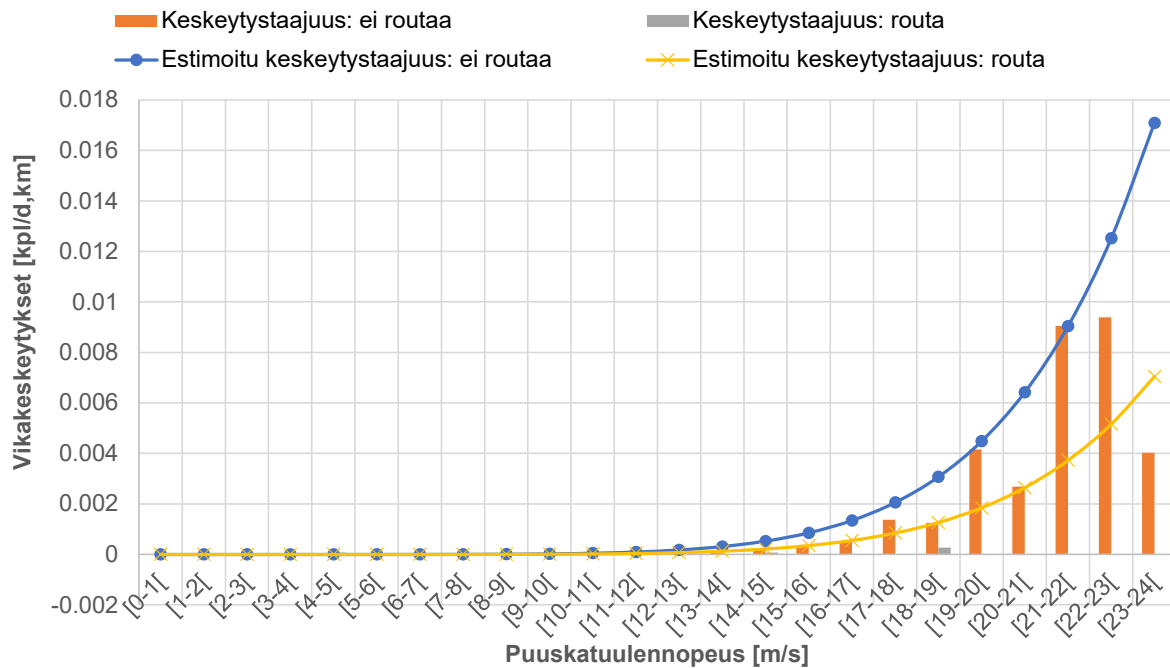
Tässä hankkeessa roudan vaikutusta vikamääriin tutkittiin Rovakaira Oy:n ja Imatran Seudun Sähköverkko Oy:n verkkoalueilla. Vaikutuksen mallintamisessa hyödynnettiin yhtiöiltä saatua keskeytysaineistoa ja avoimista lähteistä peräisin olevaa historiallista sää- ja maaperäaineistoa. Mallin selittävinä muuttujina oli routapäivät (maaperän lämpötila alle -0.5 astetta 7-28 cm syvyydessä) ja päivän maksimituulennopeus (10 minuutin keskiarvo) tai päivän suurin puuskatuulennopeus (3 sekunnin keskiarvo). Mallinnettava muuttuja oli vikakeskeytysten määrä päivässä metsässä sijaitsevaa avojohtokilometriä kohden.

4.1 Vaikutus vikamääriin

Roudan vaikutuksen vikamääriin on aikaisemmassa tutkimuksessa havaittu olevan merkittävä koko Suomessa. Vikataajuus tyypillisesti kasvaa eksponentiaalisesti tuulennopeuden ylittäessä noin 15 m/s, routa-aikaan vaikutuksen on kuitenkin havaittu olevan huomattavasti pienempi suurillakin tuulen nopeuksilla. Vaikutuksen suuruus vaihtelee kuitenkin alueittain riippuen alueen ympäristöolosuhteista ja verkkoteknisistä ratkaisuista. Tässä kappaleessa on esitetty ISS Oy:n ja Rovakaira Oy:n alueille tehdyn routamallinnuksen tulokset ja lumikuormien skenaariomalinnus.

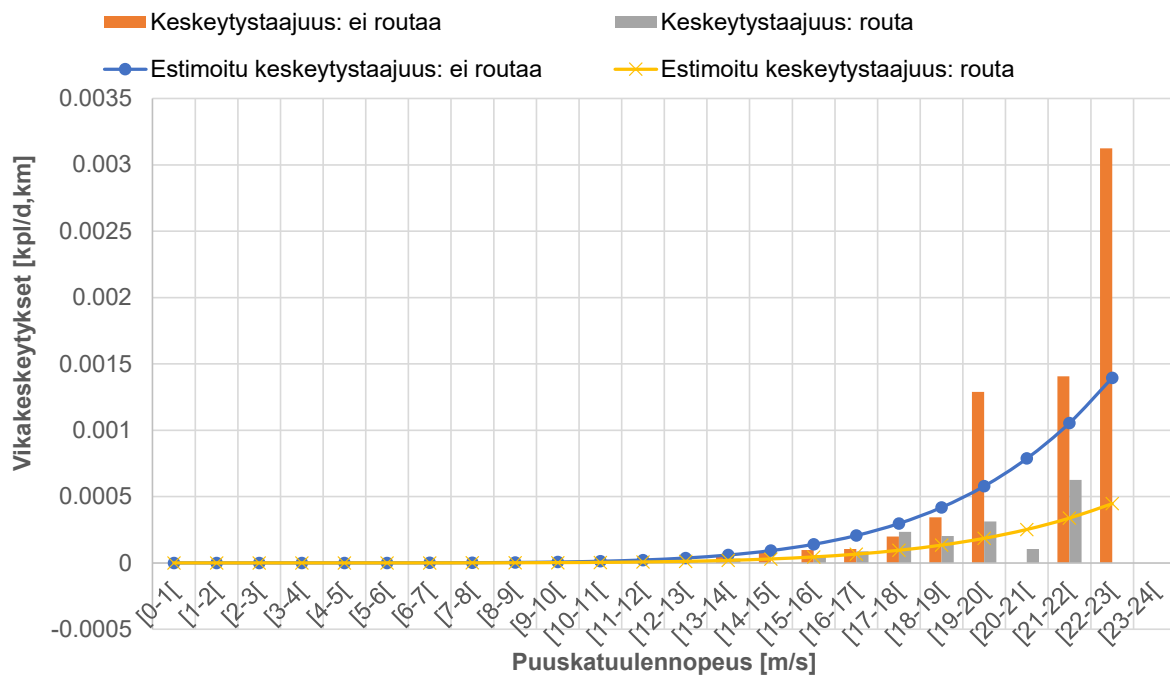
4.1.1 Routa

Kuvassa 14 on esitetty Imatran Seudun Sähkönsiirto Oy:n verkkoalueen historiallinen vikataajuus sulanmaan- ja routa-ajan osalta tuulenpuuskanopeuden funktiona. Lisäksi kuvassa on mallinnetut vikataajuudet.



Kuva 14. Sähkönjakeluverkon tuulivikojen aiheuttamat vikakeskeytykset ja niiden ennusteet roudan aikana ja sulan maan aikana eri puuskatuulen nopeuksilla Imatran Seudun Sähkönsiirto Oy:n jakeluverkossa vuosina 2008–2018.

Kuten kuvasta 14 nähdään, ISSS Oy:n verkkoalueella maan ollessa syvässä roudassa keskeytyksiä on ollut huomattavan vähän. Vikojen vähäinen määrä routa-aikaan voi johtua osittain routapäivien vähäisestä määrästä alueella, jolloin talvisia myrskytuulia ei ole juurikaan osunut tarkasteluajavälille (2010–2023). Aikavälillä on kuitenkin merkittävä määrä päiviä, jolloin päivän suurin puuskatuulennopeus on ollut yli 20 m/s myös maan ollessa roudassa, liitteessä 1 on esitetty päivien suhteellinen osuus tarkemmin. Mallinnetun roudan vaikutuksen voidaan tulosten perusteella olevan tilastollisesti merkittävä. Tulokset vastaavat laajemmalla aineistolla tehtyä tutkimusta Kaakkois-Suomen alueelle, jossa käytettävissä oli aineistoa alueen verkko-yhtiöiltä vuosilta 2008–2018 (Haakana et al. 2024).



Kuva 15. Sähkönjakeluverkon tuulivikojen aiheuttamat vikakeskeytykset ja niiden ennusteet roudan aikana ja sulan maan aikana eri puuskatuulen nopeuksilla Rovakaira Oy:n jakeluverkossa vuosina 2008–2018.

Rovakaira Oy:n alueella vikoja on ollut selvästi enemmän myös routa-aikaan, vikojen määrä verrattuna sulan maan aikaan samoilla tuulennopeuksilla on kuitenkin merkittävästi alhaisempi. Taulukossa 5 on esitetty mallinnetut roudan vikoja vähentävät vaikutukset eri tuulimuuttujilla ja alueella keskimäärin. Keskimääräiset aluevaikutukset perustuvat aikaisemmassa tutkimuksessa saatuihin mallinnustuloksiin Kaakkois- ja Pohjois-Suomen osalta. Aluemallissa tuulimuuttujana oli puuskatuulennopeus.

Taulukko 5. Roudan vaikutus vikaantumiseen tarkasteluverkkoyhtiöiden alueilla. *Alueen keskimääräinen vaikutus kuvaa ISS Oy:n tapauksessa Kaakkois-Suomen ja Rovakairan osalta Pohjois-Suomen alueelle laskettua vaikutusta.

	Vaikutus vikaantumiseen (%)			
	Tuulen keski- nopeus	Puuskatuulen- nopeus	Alueen keski- määräinen vaikutus*	Keskimäärin
ISS Oy	-59%	-74%	-85 %	-75 %
Rovakaira Oy	-31%	-68%	-80 %	-60 %

Mallinnettu roudan vaikutus vikaantumiseen on molemmilla alueilla huomattava, ISS Oy:n alueella routa-aikaan vikamäärät ovat keskimäärin 75 % ja Rovakaira Oy:n alueella 60 % pienempiä sulan maan aikaan verrattuna. Taulukossa 6 on esitetty mallien korrelaatiota ja tilastollista merkittävyyttä kuvaavat luvut.

Taulukko 6. Mallien korrelaatiokertoimet ja tilastollinen merkittävyys.

	Keskituulennopeus			Puuskatuulennopeus		
	R ²	R	p-arvo	R ²	R	p-arvo
ISS	0.48	0.68	<0.001	0.55	0.74	<0.001
Rovakaira	0.3	0.54	<0.001	0.3	0.55	<0.001

Taulukosta 6 nähdään että kummankin yhtiön osalta keskituulennopeus tuotti paremman R² – luvun selittävyysluvun, malli kykeni siis kuvaamaan suuremman osan hajonnasta. R² – luvut olivat kaikissa tapauksissa kohtalaiset ottaen huomioon, että mallissa ei ollut mukana kaikkia keskeytysmääriin vaikuttavia tekijöitä. Mallin selittävyysastetta olisi voinut kasvattaa lisäämällä malliin esimerkiksi ympäristöolosuhteita kuvaavia muuttujia kuten maaperän kosteuden. Tässä hankkeessa rajoituttiin kuitenkin selvittämään roudan vaikutusta vikamääriin. Mallit olivat tilastollisesti merkittäviä molemmilla tuulimuuttujilla, p-arvon ollessa selvästi alle yleisesti merkittävyyden raja-arvona käytetyn 0.01:n.

4.1.2 Lumikuormat

Lumikuormien muutoksen vaikutusta arvioitiin hankkeessa routaskenaarioita vastaavalla Ilmatieteenlaitoksen tuottamalla aineistolla, joka sisältää lumikuormien keskimääräiset kertymät ajanjaksolta 1981–2010 ja mallinnettuna RCP 4.5 ja RCP 8.5 skenaarioiden mukaisesti ajanjaksolle 2021–2050. Lumikuormien osalta routa-aineistoa vastaavaa päiväkohtaista historia-aineistoa ei kuitenkaan ollut hankkeessa käytettävissä. Aineiston tarkkuuteen liittyvien

rajoitusten vuoksia hankkeessa tehdyissä tarkasteluissa lumikuormien vaikutuksen vikaantumiseen yksinkertaistettiin olettamalla sen olevan suoraan lineaarisesti korreloiva, eli lumikuormista johtuvien vikamäärien suhteellisen muutoksen oletettiin olevan sama kuin lumikuorman suhteellinen muutos. Tarkempaan mallinnukseen tulisi hyödyntää päiväkohtaista lumikuormakertymää, jolloin kertymän ja vikamäärien välistä korrelaatiota voitaisiin arvioida tarkemmin. Taulukossa 7 on esitetty verkkoyhtiöiden alueella tapahtuvia muutoksia lumikuorman määrässä.

Taulukko 7. Lumikuorman muutos lämpötilaskenaarioissa eri puolella Suomea sijaitsevien verkkoyhtiöiden alueella. Hankkeen tarkasteluverkkoyhtiöt lihavoituna.

	KJ ilmajohtopituus (km)	1981-2010 (kg/m ²)	2021-2050 RCP 4.5 (kg/m ²)	2021-2050 RCP 8.5 (kg/m ²)	Muutos RCP4.5 (%)	Muutos RCP8.5 (%)
ISS Oy	653	20.4	19.3	21.0	-5 %	3 %
Rovakaira Oy	3 189	19.6	29.4	31.1	50 %	59 %
Kajave Oy	5 958	23.5	24.9	27.5	6 %	17 %
Koillis-Lapin Sähkö Oy	1882	19.2	29.2	30.3	52 %	57 %
PKS Sähkönsiirto Oy	8 531	22.5	21.0	23.2	-7 %	3 %
Savon Voima Verkko Oy	9861	22.3	21.4	23.4	-4 %	5 %
Parikkalan Valo Oy	728	20.1	18.6	20.6	-8 %	2 %
Seiverkot Oy	104	18	14.1	14.8	-20 %	-16 %
Vaasan Sähköverkko Oy	1226	11	9.1	9.6	-17 %	-12 %
Kaikki yhtiöt yhteensä	88 453	14.6	12.4	13.4	-4 %	3 %

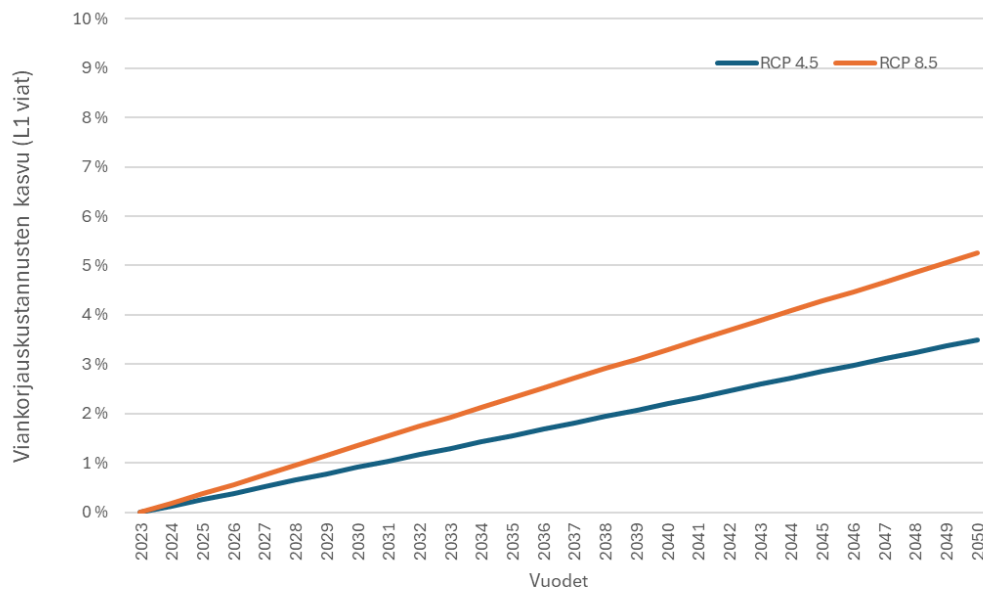
4.2 Liikevaihto-analyysit

Hankkeessa tehtiin arvio roudan ja lumikuormien vaikutuksesta sähköverkkoliiketoimintaan nykytilanteessa sekä tulevaisuudessa ilmastonmuutoksen vaikuttaessa roudan ilmenemiseen. Ilmastonmuutoksen vaikutusta sähköverkkotoimintaan arvioitiin eri lämpenemisskenaarioilla hyödyntäen hankkeessa tehtyjä malleja ja olemassa olevia Ilmatieteenlaitoksen tuottamia arvioita roudan ja lumikuormien muutoksesta Suomessa. Liikevaihtanalyysin tuloksena saatiin arviot ilmajohtoverkon viankorjauskustannusten sekä sähkönjakeluverkon KAH-kustannusten kehittymisestä vuoteen 2050 asti.

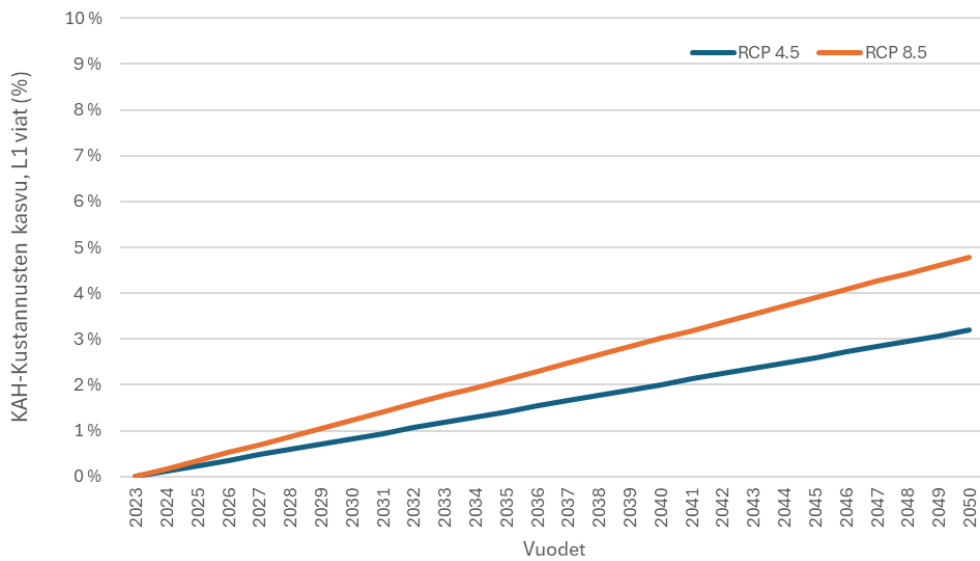
Viankorjaus- ja KAH-kustannukset (€/vika/a) arvioitiin yhtiöiden toimittamasta aineistoista jakamalla kokonaiskustannukset vikalajeittain vikamäärien suhteessa yhtälöissä 4 ja 5 esitetyllä tavalla. Todellisuudessa kustannukset vikaa kohden eivät ole samat kaikilla vikalajeilla, tässä hankkeessa ei kuitenkaan ollut saatavilla tarkempaa erittelyä kustannuksien jakaantumisesta.

4.2.1 Roudan vaikutus liikevaihtoon

Roudan vaikutus liikevaihtoon on riippuvainen pääosin alueen routapäivien vähenemisen määrästä, tuulivikojen aiheuttamien historiallisten kustannuksien suuruudesta ja roudan vikoja vähentävästä vaikutuksesta. Kuvissa 16 ja 17 on esitetty roudan muutoksen vaikutukset viankorjaus- ja KAH kustannuksiin ISS Oy:n alueella.

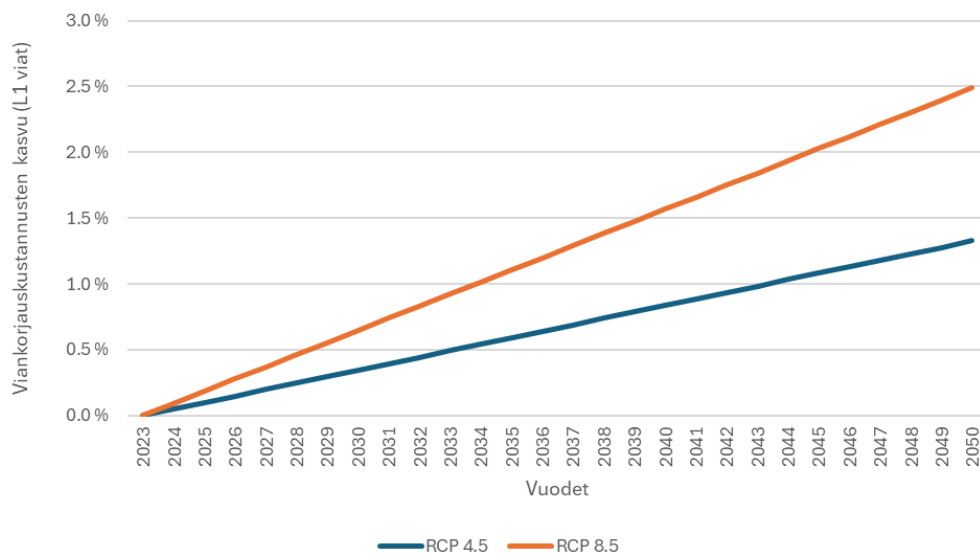


Kuva 16. Roudan muutoksen vaikutus tuulivikojen (L1) viankorjauskustannuksiin ISS Oy:n alueella.

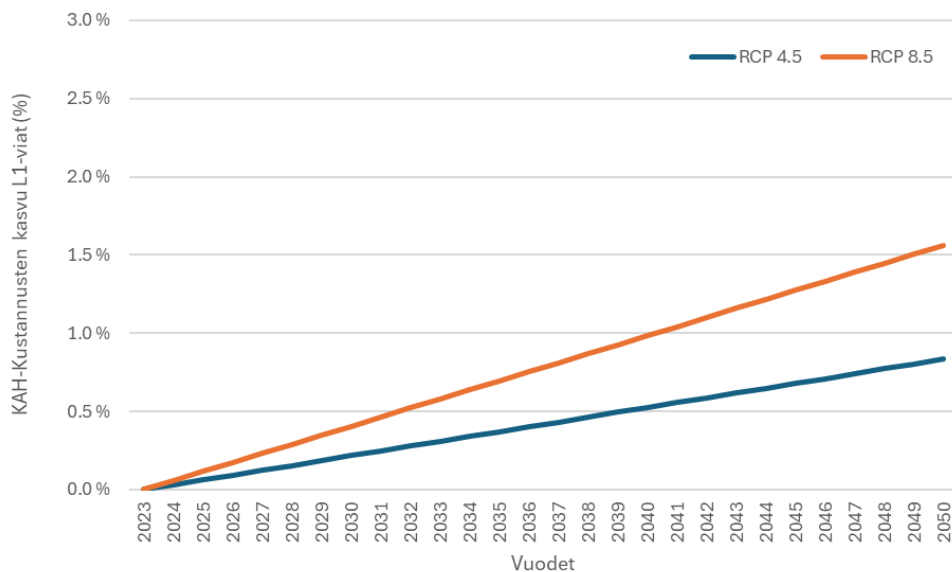


Kuva 17 Roudan muutoksen vaikutus tuulivikojen (L1) KAH-kustannuksiin ISSS Oy:n alueella.

ISSS Oy:n alueella viankorjauskustannusten arvioidaan kasvavan roudan vähenemisen vuoksi noin 3.5–5 % vuoteen 2050 mennessä ja KAH-kustannusten kasvun arvioidaan olevan noin 3–5 %. Kustannusten kasvu on kohtalainen tarkastelluissa kustannustyypeissä, mutta liikevaihtoon verrattuna pieni.



Kuva 18. Roudan muutoksen vaikutus tuulivikojen (L1) viankorjauskustannuksiin Rovakaira Oy:n alueella.



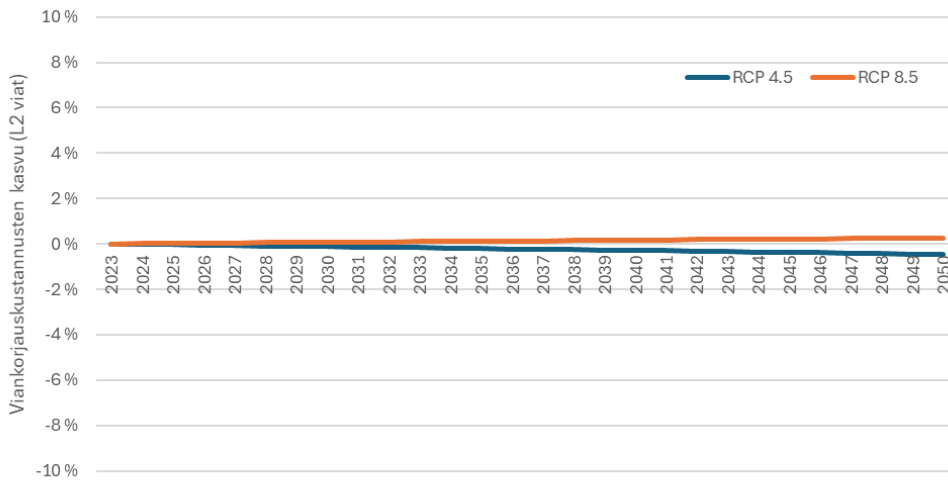
Kuva 19. Roudan muutoksen vaikutus tuulivikojen (L1) KAH-kustannuksiin Rovakaira Oy:n alueella.

Rovakaira Oy:n alueella viankorjauskustannusten arvioidaan kasvavan roudan vähenemisen vuoksi noin 1.5–2.5 % vuoteen 2050 mennessä ja KAH-kustannusten kasvun arvioidaan olevan noin 1–1.5 %. Rovakaira Oy:n osalta kustannusten kasvu on pieni, jota selittää tuulivikojen suhteellisen pieni osuus kaikista vioista. Lisäksi alueella myös roudan vikaantumista vähentävä vaikutus on muita alueita pienempi.

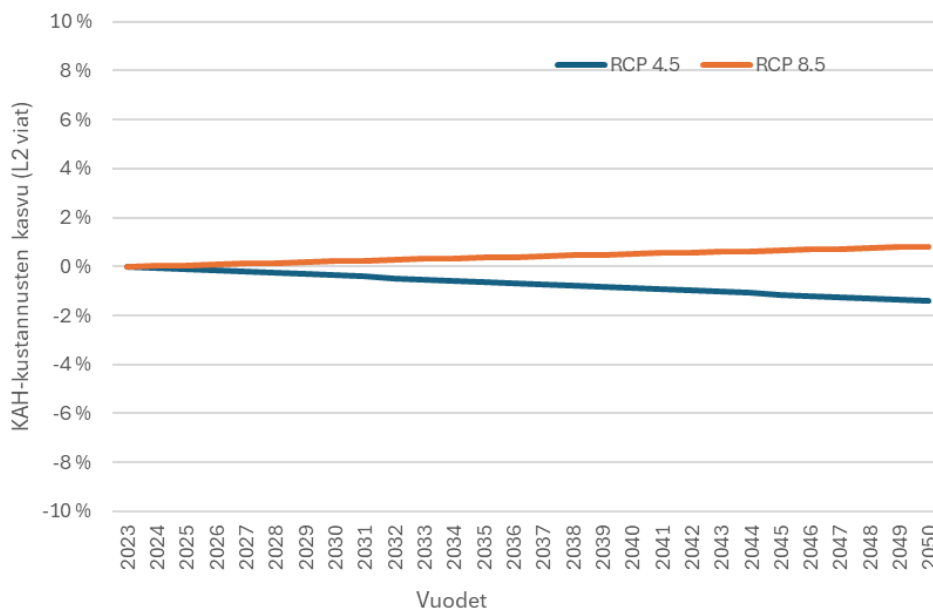
Yhteenvetona voidaan todeta, että roudan vaikutus suhteessa liikevaihtoon on tarkastelluilla alueilla pieni, siitä huolimatta, että roudan vikoja vähentävä vaikutus oli alueilla merkittävä. Tämä johtuu suurilta osin routapäivien vähenemän pienestä absoluuttisesta määrästä (noin 1–1.5 routapäivää vähemmän per vuosi) ja tuulivioista aiheutuvien kustannusten pienestä määrästä suhteessa liikevaihtoon pitkällä aikavälillä. Yksittäisinä vuosina kustannukset voivat kuitenkin olla huomattavasti suurempia myrskytuulten osuessa todennäköisemmin sulan maan aikaan.

4.2.2 Lumikuormien vaikutus liikevaihtoon

Lumikuormien liikevaihtovaikutukset arvioitiin taulukossa 7 esitettyjen lumikuormien muutosprosenttien ja verkkoyhtiöiden aineistojen avulla arvioitujen lumikuormien aiheuttamien KAH- ja viankorjauskustannusten perusteella. Kuvissa 20 ja 21 on esitetty lumikuormien muutoksen vaikutukset ISS Oy:n verkkoalueella.



Kuva 20. Lumikuorman (L2) muutoksen vaikutus Viankorjauskustannuksiin ISS Oy:n alueella.

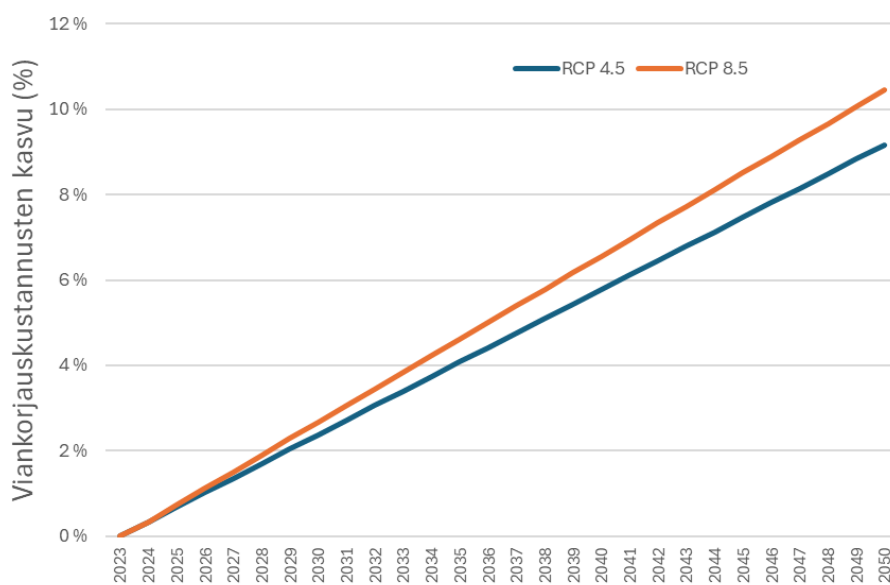


Kuva 21. Lumikuorman (L2) muutoksen vaikutus KAH-kustannuksiin ISS Oy:n alueella.

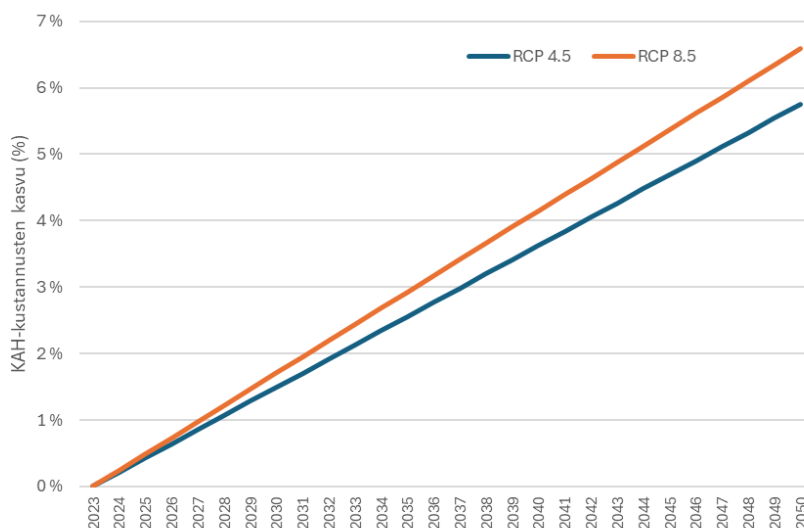
ISS Oy:n verkkoalueella lumikuormien muutos on erittäin pieni, jolloin myös liikevaihtovaikutukset jäävät merkittömiksi. RCP 4.5 skenaarioissa kustannukset voivat jopa hieman pienentyä, muutokset jäävät kuitenkin mallinnuksen vaihteluvälin sisään. Tuloksia tulkitessa on

huomioitava, että yksittäisinä vuosina voi edelleen esiintyä merkittäviäkin lumikuormia, mutta suurien lumikuormien todennäköisyys alueella ei skenaarioiden mukaan juurikaan muutu.

Kuvissa 22 ja 23 on esitetty lumikuormien muutoksen vaikutukset Rovakaira Oy:n verkkoalueella.



Kuva 22. Lumikuorman (L2) muutoksen vaikutus Viankorjauskustannuksiin Rovakaira Oy:n alueella.



Kuva 23. Lumikuorman (L2) muutoksen vaikutus KAH-kustannuksiin Rovakaira Oy:n alueella.

Rovakaira Oy:n alueella viankorjauskustannusten arvioidaan kasvavan lumikuorman kasvamisenvuoksi noin 9–10 % vuoteen 2050 mennessä ja KAH-kustannusten kasvun arvioidaan

olevan noin 6–7 %. Lumikuormien lisääntymisen arvioitu vaikutus on Rovakaira Oy:n alueella roudan vaikutusta merkittävämpi, kuitenkin edelleen liikevaihtoon suhteutettuna maltillista.

Tässä hankkeessa lumikuorman vaikutus vikamääriin oli oletettu olevan suoraan verrannollinen lumikuorman muutoksen kanssa. Todellisuudessa tutkimusten mukaan puuston kaatumistodennäköisyys kasvaa merkittävästi tietyn lumikuorman jälkeen, jolloin vaikutus vikamääriin on todennäköisesti suurempi kuin mallinnuksessa käytetyllä oletuksella.

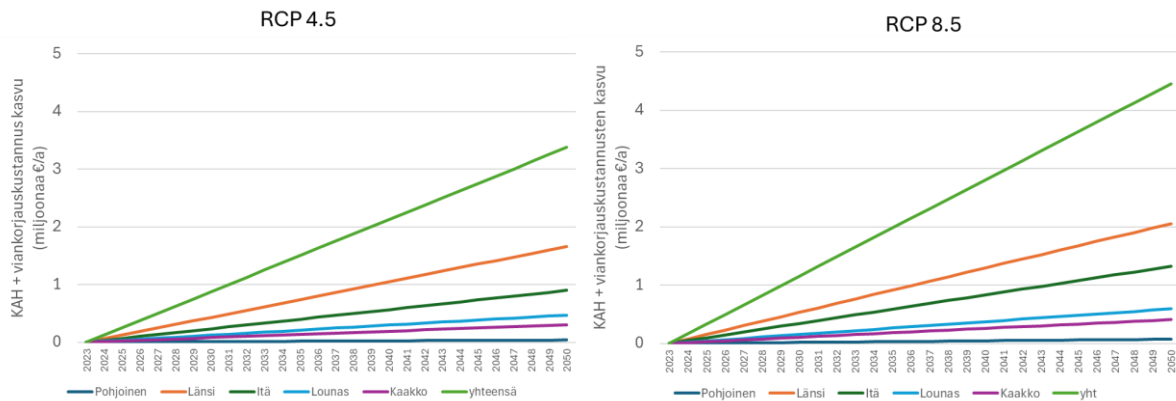
4.3 Laajat aluetarkastelut

Laajoissa aluetarkasteluissa hyödynnettiin LUT:n ja Ilmatieteenlaitoksen aikaisemmassa tutkimuksen tuloksia saatuja roudan vikoja vähentävän vaikutuksen arvioimiseksi. Tässä hankkeessa vaikutusarviot skaalattiin roudan- ja lumikuormien muutosarvioiden perusteella tulevaisuuteen 2050-luvulle asti vastaavalla tavalla kuin verkkoyhtiötarkastelujen osalta. Taulukossa 8 on esitetty alueiden roudan vaikutus historiallisesti sekä roudan muutos ja roudan vaikutus vikamääriin 2050-luvulla.

Taulukko 8. Alueiden roudan vaikutus historiallisesti sekä roudan muutos ja roudan vaikutus vikamääriin 2050-luvulla.

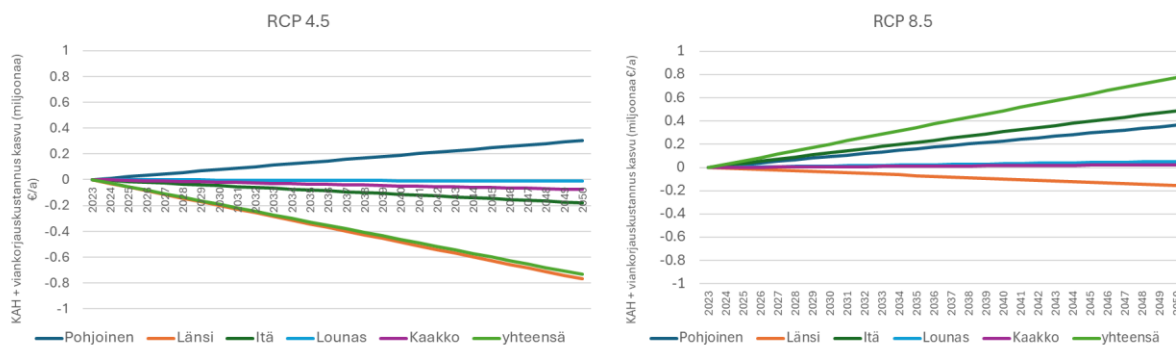
	Roudan vikoja vähentävä vaikutus		Roudan muutos (2050)			Vikamäärien muutos (2050)		
			RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5	RCP 8.5
	(%)	(%)	(päivää)	(%)	(päivää)	(%)	(%)	
Area 1(SW)	-71 %	-13 %	-20	-25 %	-37	+7%	+ 13 %	
Area 2(SE)	-83 %	-26 %	-30	-32 %	-38	+10 %	+ 12%	
Area 3(E)	-66 %	-17 %	-20	-26 %	-30	+ 8%	+ 13%	
Area 4(W)	-86 %	-28 %	-27	-39 %	-35	+ 11%	+ 13%	
Area 5(N)	-79 %	-31 %	-27	-38 %	-37	+ 9%	+ 12%	

Kuvissa 24 ja 25 on esitetty roudan muutoksen vaikutukset KAH- ja viankorjauskustannuksiin viidellä suuralueella ja Suomessa.



Kuva 24. Roudan muutoksen vaikutus RCP4.5 ja RCP8.5 skenaariossa KAH- ja viankorjauskustannuksiin viidellä suuralueella ja yhteensä Suomessa.

Koko suomen tasolla roudan vähenemisen vaikutus KAH- ja viankorjauskustannuksiin on mallinnuksen tulosten mukaan noin 3.5–4.5 M€ (6–8 %). Vaikutus on selvästi suurin Länsi-Suomessa, johtuen sekä jo valmiiksi suurista tuulivioista aiheutuvista kustannuksista, että kohtalaisen suuresta routapäivien vähenemästä varsinkin RCP8.5 skenaariossa. Pohjoisessa kasvu on lähes merkityksetöntä, roudan vaikutus vikaantumiseen on mallinnuksen samalla tasolla kuin muilla alueilla, pieni euromääräinen kasvu johtuikin enimmäkseen tilastoitujen tuulivikojen vähäisestä määrästä (pohjoisella alueella ilmenee vain noin prosentti koko suomen tuulivioista).



Kuva 25. Lumikuorman muutoksen vaikutus RCP4.5 ja RCP8.5 KAH- ja viankorjauskustannuksiin viidellä suuralueella ja yhteensä Suomessa.

Lumikuormien osalta kustannusvaikutuksissa on huomattavia eroja alueiden välillä. RCP4.5 skenaariossa Länsi-Suomessa kustannukset laskevat kohtalaisesti, Pohjois-Suomen osalta taas kustannuksen kasvavat, muilla alueilla muutos on pientä. RCP8.5 skenaariossa taas kustannukset kasvavat Pohjois-Suomen lisäksi myös Itä-Suomessa. Tuloksista huomataan, että

lumikuormamallinnus on melko herkkää lämpenemisskenaarioille. Tuloksia tulkitessa on hyvä huomioida, että alueiden sisällä lumikuormakertymät vaihtelevat huomattavasti varsinkin Pohjois- ja Itä-Suomessa. Mallinnuksessa on myös oletettu lineaarinen riippuvuus lumikuormien ja vikojen lisääntymisen välille, todellisuudessa riippuvuus on todennäköisesti enemmän eksponentiaalinen, jolloin tietyn lumikuormamäärän jälkeen vikamäärät lähtevät jyrkkään kasvuun. Mallinnus siis todennäköisesti aliarvioi kustannuksia alueilla, joissa lumikuormien kasvu on merkittävää.

4.4 Havainnot ja kehittämissuhteita

Hankkeen aikana havaittiin joitakin keskeytystilastointiin liittyviä kehityskohteita. Yksityiskohtaisemmalla ja tarkemmalla tilastoinnilla mahdollistetaan häiriöiden tarkempi jälkikäteen arviointi, jota voidaan hyödyntää jakeluverkon pitkän aikavälin kehittämisessä.

- Vikamäärät
 - Tilastoidut keskeytysmäärät eivät aina vastaa sähkönjakeluverkon vikamääriä erityisesti suurhäiriöiden aikana, jolloin yhden keskeytystapahtuman alle jää tyypillisesti useita viankorjaustoimenpiteitä vaativia kohteita. Tällöin keskeytystapahtumien lukumäärän perusteella tehty arvio vikamäärästä on tyypillisesti alakanttiin.
- Vikapaikkojen merkitseminen
 - Vian sijainti on yleensä tilastoitu vain johtolähtötarkkuudella tai arvioitu asentajan vapaamuotoisen ilmoituksen perusteella.
- Keskeytyksien kohdistaminen vikalajeittain
 - Vikojen luokittelu usein epätarkkaa esimerkiksi ukkosten aikaan kaatuneet puut on luokiteltu ukkosvicioiksi, vaikka todellinen syy on todennäköisesti ollut ukkosten aikaan esiintynyt kova tuuli. Luokittelukäytännöt myös vaihtelevat huomattavasti yhtiöiden välillä ja jopa yhtiöiden sisällä.
- Vioista aiheutuvien kustannusten kohdistaminen vikalajeittain
 - Viankorjauskustannuksia ei ole tyypillisesti jaoteltu vikalajeittain, vaan niiden tilastointi on usein yhtenä könttänä. Kustannusten pitkän aikavälin kehittymisen arviointi on tällöin haastavaa.

5 Yhteenveto

Tutkimushankkeen lopputuloksena muodostettiin sähkönjakeluverkkotoimialalle malli, joka huomioi roudan ja sen kehittymisen ja sen, miten routa vaikuttaa sähkönjakeluverkon ilmajohtojen vikaantumiseen ja liiketoimintaan. Lisäksi hankkeessa tehtiin alustava arvio lumikuormien muutoksen vaikutuksesta vikaantumisriskiin ja liikevaihtoon.

Routapäivien määrä vähenee tulevaisuudessa koko suomessa. Maan ollessa roudassa myrskyvikojen määrä on tutkimuksen mukaan merkittävästi alhaisempi kuin sulan maan aikana (-65 % – -85 %), jolloin routapäivien vähetessä todennäköisyys yksittäisille vakaville suurhäiriöille lisääntyy. Hankkeessa saatujen tulosten perusteella roudan vähenemisen vaikutus viankorjaus- ja keskeytyskustannuksiin keskimäärin on kuitenkin maltillinen, jolloin vuonna 2050 kustannusten lisääntyminen on mallinnuksen mukaan noin 2–8 %. Vaikutukset pysyvät maltillisina, koska routapäivien vähenemä on pieni suhteessa koko vuoden päiviin (vähenemä vuoteen 2050 mennessä on noin 30–40 päivää alueen mukaan) ja tuulivioista aiheutuvien kustannusten pienestä määrästä suhteessa liikevaihtoon pitkällä aikavälillä. Viankorjauskustannukset ovat myös pienentyneet myrskyvarmuusinvestointien edetessä koko Suomessa, mikä vähentää kustannusvaikutuksia. Kerrannaisvaikutukset, kuten kostea maaperä ja voimakkaamat myrskytuulet syys- sekä talvikaudella voivat kuitenkin lisätä vikamääriä mallinnettuja tuloksia enemmän. Lisäksi Pohjois-Suomessa puuston keskipituuden kasvu voi lisätä muiden tekijöiden kanssa vikaantumisriskiä merkittävästi.

Lumikuormat lisääntyvät merkittävästi Pohjois- ja Itä-Suomessa, joka voi johtaa vikamäärien huomattavaan kasvuun näillä alueilla. Muilla alueilla lumikuorma vähenee tai pysyy samana. Lumikuormien muutoksen vaikutus vikaantumiseen on mahdollisesti merkittävä, lisätutkimusta kuitenkin vaaditaan lumikuormien muutoksen ja vikaantumisen välisen yhteyden selvittämiseksi.

Hankkeen tuloksia voidaan hyödyntää sähkönjakelutoimialalla pitkän aikavälin suunnittelussa sekä laajemminkin omaisuudenhallinnassa mm. roudan pitkän aikavälin kehittymisen vaikutuksesta sähköverkon viankorjaus- sekä KAH-kustannuksiin. Lisäksi tuloksia voidaan käyttää osana operatiivista toimintaa esimerkiksi häiriöresurssien hallinnassa.

Lähteet

Comtiki Oy (2024). 'Flyspect Real-time flight inspection service', Comtiki Oy (2188658-4). Aineisto ei ole julkisesti saatavilla. <https://www.flyspect.com/>

Energiavirasto, (2023). Sähköverkkotoiminnan tekniset tunnusluvut 2023. <https://energiavirasto.fi/verkkotoiminnan-julkaisut>

Energiateollisuus: Energy distribution interruptions 2010–2019 – Energiateollisuus. 2019; https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/sahkon_keskeytystilastot_2010-2019.htm#material-view

Ilmatieteen laitos (2016). Puiden lumikuorma, 1981-2100. CSC – Tieteen tietotekniikan keskus Oy. <http://urn.fi/urn:nbn:fi:csc-kata20180329115425634000>

Haakana J, Räisänen O, Karhunen M, Lång-Ritter I, Lassila J. Impact of wind speed and soil frost on electricity distribution system reliability. *Heliyon*. 2024;10(24):e40846. doi:10.1016/J.HELIYON.2024.E40846

Lakervi, E. and Partanen, J. (2008). Sähköjaketekniikka, 3rd edn. Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto.

Lehtonen I, Ruosteenoja K, Mäkelä A. Suomen Muuttuva Ilmasto – Tietoa Sähkönsiirtojärjestelmän Riskien Arviointia Varten.; 2019. <http://hdl.handle.net/10138/301521>

Lehtonen, I., Venäläinen, A., Kämäräinen, M., Asikainen, A., Laitila, J., Anttila, P. and Peltola, H., 2018. Projected decrease in wintertime bearing capacity on different forest and soil types in Finland under warming climate. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/hess-2017-727>.

Luonnonvarakeskus, 2019 "Monilähteen valtakunnan metsien inventoinnin (MVMI) kartta-aineisto. 2021. <https://kartta.luke.fi/>

Maanmittauslaitos. (2024). Maastotietokanta 2024, GeoPackage, 1:10 000. CSC - Tieteen tietotekniikan keskus Oy. <http://urn.fi/urn:nbn:fi:att:939b5599-81bd-4def-a5bc-7589a00f51ee>

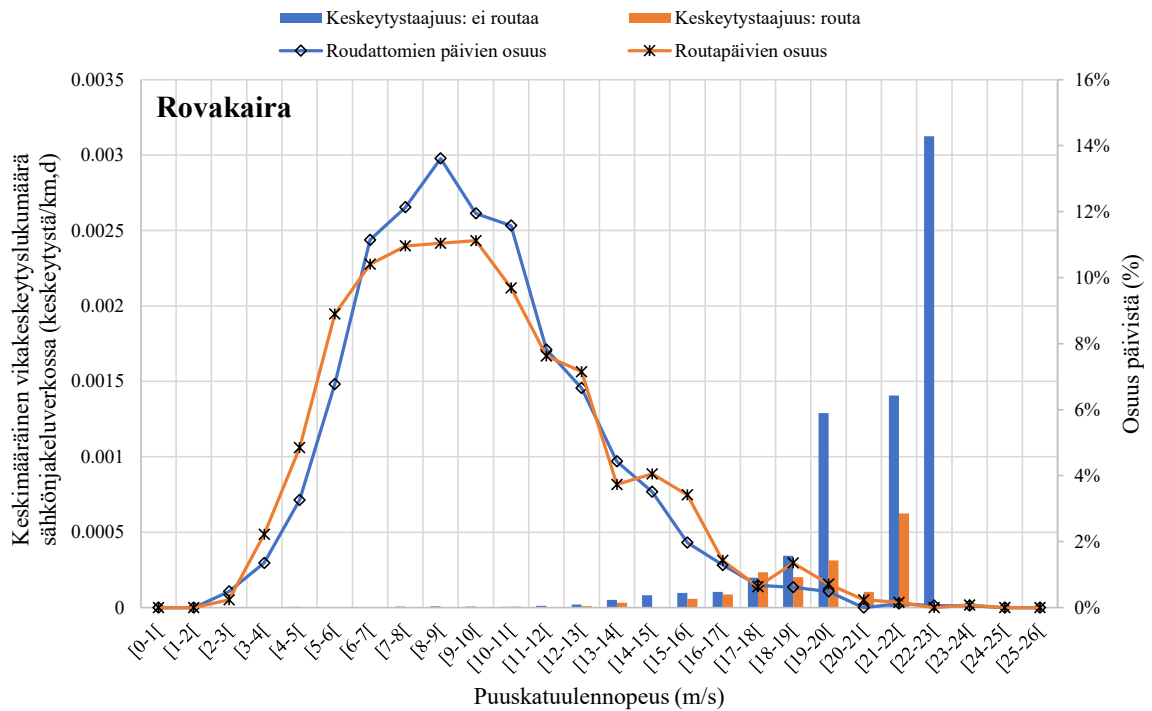
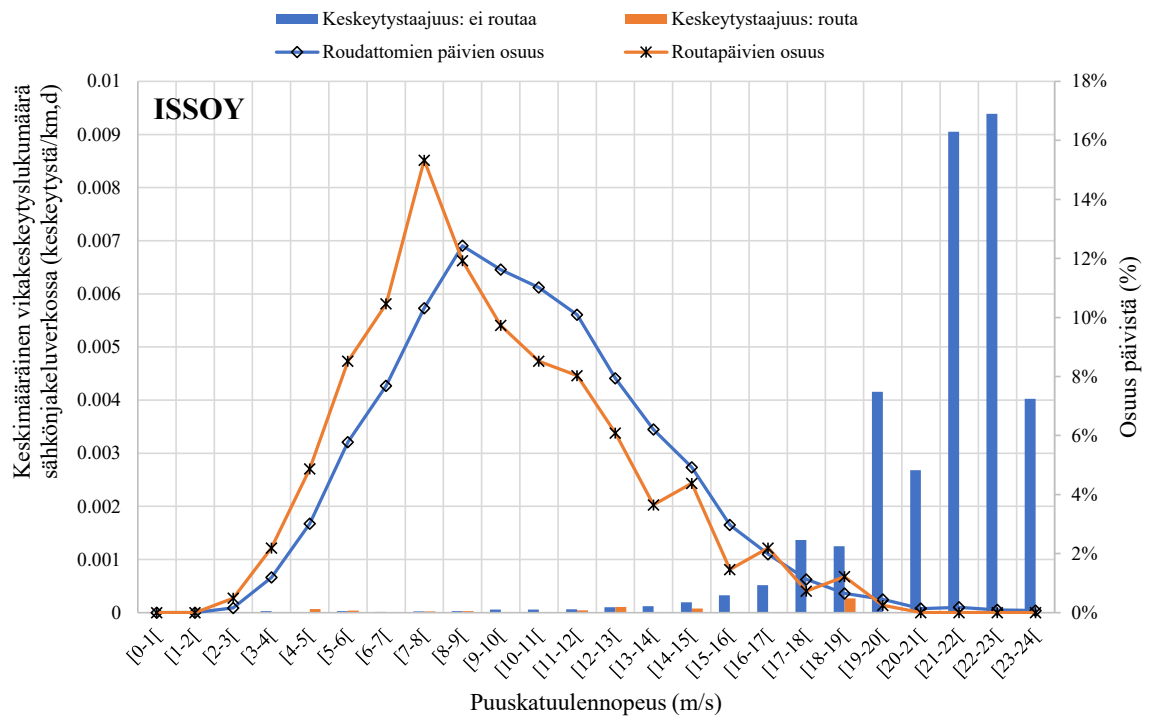
Muñoz Sabater, J. (2019): ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: [10.24381/cds.e2161bac](https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac) (Accessed on 9.10.2024)

Perrels A, Haakana J, Hakala O, Kujala S, Lång-Ritter I. Kustannusarviointi ilmastonmuutokseen liittyvästä toimimattomuudesta (KUITTI). 2022; Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan. Published online 2022.

Räisänen O, Suvanto S, Haapaniemi J, Lassila J. Crown snow load outage risk model for overhead lines. *Applied Energy*. 2023;343. doi:10.1016/j.apenergy.2023.121183

Liitteet

Liite 1 Routapäivien ja keskeytystaajuuden osuus tuulennopeusluokissa



ISBN: 978-952-412-213-9 (PDF)

ISSN-L 2243-3376

ISSN 2243-3376

Lappeenranta 2024

 LUT
University