TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Tuule suuna mõju elektrituulikutele ja ühenduskaablitele sõltuvalt elektrituulikute paigutusest tuulepargis

Hajaenergeetika õppekava

Kõrgepingetehnika õppetool

Magistritöö

Õppetooli juhataja prof Juhan Valtin

Juhendaja dots Ivo Palu

Lõpetaja Siim Koolmeister

Tallinn 2015

Autori deklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudile haridusastme lõpudiplomi taotlemiseks hajaenergeetika erialal. Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev) _____

Lõputöö kokkuvõte

Autor: Siim Koolmeister *Lõputöö liik:* magistritöö

Töö pealkiri: TUULE SUUNA MÕJU ELEKTRITUULIKUTELE JA ÜHENDUSKAABLITELE SÕLTUVALT ELEKTRITUULIKUTE PAIGUTUSEST TUULEPARGIS

Kuupäev: 27.05.2014 *61 lk*

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool
Teaduskond: Energeetikateaduskond
Instituut: Elektroenergeetika instituut
Õppetool: Kõrgepingetehnika õppetool

Töö juhendaja: Ivo Palu

Sisu kirjeldus:

Elektrituulikute poolt toodetud elektrienergia kogust võib oluliselt mõjutada elektrituulikute paigutus tuulepargis. Erinevate tuule suundade korral võivad elektrituulikud üksteist varjama hakata. Käesoleva magistritöö eesmärk oli uurida tuule suuna mõju elektrituulikute võimsusele ja kaabelliinide koormatusele sõltuvalt elektrituulikute paigutusest tuulepargis ühe Eestis asuva tuulepargi näitel.

Lähteandmetena kasutati ühe Eesti tuulepargi 2014. aasta andmeid, milleks olid tuule kiirus, tuule suund ja elektrituulikute võimsus.

Töö tulemustest selgub, et tuulepargi keskmine võimsus erineb erinevate tuule suundade korral märgatavalt. Sellega seoses on ka elektrituulikute vahelised kaabelliinid erinevalt koormatud. Lisaks erinevad elektrituulikute võimsused ja sellest tulenevalt kaabelliinide koormatused teatud tuule suundade puhul, mis on tingitud elektrituulikute paigutusest tuulepargis. Kõige vähem varjavad elektrituulikud üksteist lõuna- ja edelatuule puhul, mis on ühtlasi kõige sagedasemad ja tugevamad tuuled antud tuulepargis.

Käesoleva magistritöö tulemused viitavad elektrituulikute üksteise varjamise olemasolule selles tuulepargis.

Märksõnad: tuuleenergia, taastuvenergeetika, tuulepark, elektrituulik, tuulepargi paigutus, kaabelliinide koormatus, elektrituulikute üksteise varjamine.

Summmary of the diploma work

Author: Siim Koolmeister *Kind of the work:* Master`s thesis

Title: INFLUENCE OF THE WIND DIRECTION TO THE WIND TURBINES AND CONNECTION CABLES ACCORDING TO THE WIND FARM LAYOUT

Date: 27.05.2015 *61 pages*

University: Tallinn University of Technology
Faculty: Faculty of Power Engineering
Department: Department of Electrical Power Engineering
Chair: Chair of High Voltage Engineering

Tutor of the work: Ivo Palu

Abstract:

The amount of energy produced by the wind turbines can be significantly influenced by the layout of the wind turbines in the wind farm. In case there are different wind directions the wind turbines can start to shadow each other**.** The aim of this master's thesis was to investigate the effect of the wind direction on the capacity of wind turbines and on the load of cable lines, depending on the layout of wind turbines in the wind farm, on the example of one wind farm in Estonia.

The research used the data of an Estonian wind farm from 2014, which were namely the speed of wind, the direction of wind, and the power of the wind turbines.

The research reveals that the average capacity of a wind farm differs remarkably depending on different wind directions. Because of this also the electrical cable lines between the wind turbines are differently loaded. In addition, as the wind turbines capacities differ, also the cable lines load differs in case of certain wind directions, which is caused by the layout of wind turbines in the wind farm. The wind turbines shadow each other the least in case of southern and south-western winds, which are also the most frequent and the strongest winds in the case of the wind farm analysed in this paper.

The results of this master's thesis suggest that in the case of the wind farm that was analysed in this research the wind turbines are shadowing each other.

Key words: wind energy, renawable energy, wind farm, wind turbine, wind farm layout, cable lines utilization, wake effect.

Sisukord

Lõputöö ülesanne **6**
Eessõna **8**
Sissejuhatus **9**
1. Tuuleparkide ehitus **11**
1.1. Tuul 11
1.2. Elektrituulik 11
1.3. Tuulepark 13
1.4. Tuulepargi elektrivõrgu ühendusskeemid 14
1.5. Tuulepargi varjutuse efekt 15
1.6. Tuuleparkide kaabelliinid 18
1.7. Kaablid 19
2. Varasemad uuringud antud valdkonnas **22**
3. Tuulepargi analüüs **25**
3.1. Metoodika 25
3.2. Tuule suunad ja kiirused 27
3.3. Elektrituulikute võimsused 29
3.4. Elektrituuliku võimsuskõver 31
3.5. Tuule suundade mõju elektrituulikute võimsusele tuulepargis 32
3.6. Kaablite koormatus 40
Lõputöö kokkuvõte **51**
Kasutatud kirjandus **54**
Lisad **58**
L.1. Kaabli tehnilised parameetrid **59**
L.2. Tuulepargi kaabelliinide elektriline skeem **61**

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	**Tuule suuna mõju elektrituulikutele ja ühenduskaablitele sõltuvalt elektrituulikute paigutusest tuulepargis**
Üliõpilane:	**Siim Koolmeister, 132825AAHMM**
Lõputöö juhendaja:	**Ivo Palu**
Õppetool:	**Kõrgepingetehnika õppetool**
Õppetooli juhataja:	**Juhan Valtin**
Lõputöö esitamise tähtaeg:	**27.05.2015**

Üliõpilane (allkiri)	Juhendaja (allkiri)	Õppekavajuht (allkiri)

Teema põhjendus:

Taastuvenergeetika tõusis Eestis pildile pärast Euroopa Liiduga ühinemist. Eestis toodetakse enamus elektrienergiast põlevkivist, mis saastab keskkonda ning mille kasutus pole jätkusuutlik. Lähtuvalt Eesti klimaatilistest ja geograafilistest tingimustest on siin sobilikuks taastuvenergia allikaks tuul.

Eestis on juba arvestatav hulk elektrituulikuid ja vanemad tuulepargid on juba üle 10 aasta töötanud. Tuule suuna mõju elektrituulikute võimsusele ja kaabelliinide koormatusele tuulepargis ei ole magistritöö autori andmetel Eestis veel uuritud.

Töö eesmärk:

Töö eesmärk on uurida tuule suuna mõju elektrituulikute võimsusele ja kaabelliinide koormatusele sõltuvalt elektrituulikute paigutusest tuulepargis ühe Eestis asuva tuulepargi näitel.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Kas elektrituulikute võimsused ja kaabelliinide koormatused erinevad tuule suundade korral?
- Kui suured on elektrituulikute võimsused ja kaabelliinide koormatused erinevate tuule suundade korral?
- Kui palju elektrituulikud „varastavad“ üksteiselt võimsust erinevate tuule suundade korral?
- Milline on tuulepargi kaabelliinide ajaline kasutus erinevate koormuste korral?

Lähteandmed:

Lähteandmetena on kasutatud Nelja Energia AS tuuleparkide andmebaasist saadud andmeid, millest peamised on tuule kiirus, tuule suund, elektrituulikute võimsus ja kaablite tehnilised parameetrid.

Eessõna

Käesoleva magistritöö teema kujunes välja koostöös juhendajaga. Töö autor on tööalaselt seotud tuuleparkide käidu probleemidega ning konsulteerides juhendajaga, sai lõplik magistritöö teema valik otsustatud. Lisaks oli autoril töökoha poolne toetus ning ligipääs reaalsetele tuulepargi andmetele.

Töö autor tänab magistritöö juhendajat dotsent Ivo Palu Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika instituudist. Samuti tänab autor Nelja Energia AS tehnikadirektorit Andrus Zavadskist, kes võimaldas kasutada tuuleparkide andmeid ning teisi abivalmeid kolleege, keda tülitasin magistritööga soetud küsimustega.

Töö autori kontaktandmed:

Telefon: +372 5256750

E-post: siim.koolmeister@gmail.com

Aadress: Luite talu, Luguse küla, Käina vald, Hiiumaa

Alaline elukoht: Videviku 14-24, Tallinn

Töökoht lõputöö kirjutamise hetkel: Nelja Energia AS

Sissejuhatus

Elektrienergia on meie igapäevaelu vältimatu osa. Eestis toodetakse enamus elektrienergiast põlevkivist, mis paraku saastab keskkonda ja pole pikemas perspektiivis jätkusuutlik. Taastuvenergeetika muutus Eestis aktuaalsemaks pärast Euroopa Liiduga 2004. aastal ühinemist. Teiste taastuvenergeetika allikate seast on just tuul üheks sobilikuks elektrienergia tootmise võimaluseks Eestis.

2001. aastal jõustus Euroopa Liidus direktiiv 2001/77/EÜ, mis kohustab liikmesriike tõstma taastuvenergia osakaalu 2020. aastaks 20%-ni. 2009. aastal võeti vastu uus taastuvenergia direktiiv 2009/28/EÜ, mis kohustab Eestit tõstma 2020. aastaks taastuvate energiaallikate osakaalu kogu energia lõpptarbimises 25%-ni võrreldes referentsaastaga 2005 [1].

Eestis on juba arvestatav hulk elektrituulikuid ja vanemad tuulepargid on üle 10 aasta elektrienergiat tootnud. Eesti esimene elektrituulik paigaldati Hiiumaale Tahkuna poolsaarele 1997. aastal. Praegusel hetkel see enam elektrienergiat ei tooda [2]. Esimene kaasaegne tuulepark valmis 2002. aastal Virtsu tuulepargi näol ning üks esimesi suuremaid tuuleparke oli 2004. aastal valminud Pakri tuulepark. Seal on kokku kaheksa 2,3 MW võimsusega Nordex N-90 tüüpi elektrituulikut, mis teeb pargi koguvõimsuseks 18,4 MW [3]. Hetkel on Eesti suurim tuulepark Aulepa tuulepark, kus on kokku 16 WinWind elektrituulikut, mis on võimsusega 3 MW. Selle tuulepargi koguvõimsus on 48 MW. Tuulepargi omanik on Eesti Energia AS [2].

Kogu Eesti 2014. aasta elektrienergia kogutarbimisest moodustas taastuvenergia 14,8%, millest tuuleenergia tootis 42% [4]. Tuuleenergia 2014. aasta kogutoodang oli 576,0 GWh, mis moodustas 6% elektrienergia kogutarbimisest. 2014. aasta lõpu seisuga on Eestis kokku paigaldatud 138 elektrituulikut koguvõimsusega 302,7 MW [2]. Selle aasta maikuu seisuga on elektrituulikute arv paraku ühe 3 MW elektrituuliku võrra väiksem. Nimelt, Viru-Nigula tuulepargis süttis 8. aprillil üks elektrituulik seni veel täpselt teadmata põhjustel põlema ning selle asendamine võtab aega [3].

Elektrituulikute arv suureneb Eestis iga aastaga ning tuulepargid ja nende võimsused lähevad üha suuremaks. Eestis installeeritud tuuleparkide võimsused on kasvanud kümne aastaga ligi kümme korda [2]. Seoses tuuleparkide võimsuste suurenemisega muutuvad elektrituulikud ning nende komponendid võimsustele vastavalt suuremaks, sealhulgas ka elektrituulikute ühenduskaablite gabariidid.

Eestis on suurte elektrituulikute kõrval ka väiketuulikud rohkem levima hakanud, nende koguvõimsust on raske hinnata, sest täpne andmestik puudub [2].

Elektrituulikute paigutusest tingitud üksteise varjamisega seotud probleeme ei ole Eestis veel põhjalikult uuritud. Sellest lähtuvalt analüüsitakse käesolevas magistritöös tuulepargi elektrituulikute võimsusi ja kaabelliinide koormatusi ühe Eesti tuulepargi näitel, mis annab ülevaate, kuidas need parameetrid erinevate tuule suundade korral juba väiksema tuulepargi puhul erineda võivad.

Eestis on olemasolevad tuulepargid veel suhteliselt väikesed võrreldes muu maailmaga [5], [6]. Kui elektrituulikute arv on tuulepargis juba 100 või rohkem, siis hakkab elektrituulikute paigutus üksteise varjamise vältimiseks väga suurt rolli mängima. Elektrituulikute varjutuse efekt seisneb selles, et esimeses reas olevad elektrituulikud varjavad tagumiste elektrituulikute tuult, kuna jäävad nende varju. Sellega seoses toodavad need elektrituulikud vähem elektrienergiat kui toodaks sama hulk elektrituulikuid eraldi seistes. Samuti on elektrituulikute kaabelliinid tuuleparkide rajamisel ja hilisemal käidu perioodil tähtsad komponendid, seda eriti suurte tuuleparkide puhul [7].

Nelja Energia AS arendab hetkel Loode-Eestisse Hiiumaa rannikule Eesti esimest meretuuleparki, kuhu plaanitakse paigaldada ligikaudu 100-160 elektrituulikut [3]. Sellise suure projekti puhul võib elektrituulikute paigutus tuulepargi toodangut oluliselt mõjutada ning investeeringu tasuvusaeg võib sellega seoses pikeneda.

Esmalt on põgusalt käsitletud tuulepargi üldiseid põhimõtteid, kus eraldi alapeatükkides on kirjeldatud tuulepargi, elektrituulikute, kaablite ja tuulepargi elektrivõrgu täpsemaid detaile. Sealhulgas käsitletakse tuulepargi elektrituulikute varjamise probleemi ehk üksteiselt tuule varastamist. Järgmisena on antud magistritöös kirjeldatud varasemaid uuringuid, mis on antud valdkonnas tehtud. Andmete analüüsimise peatükis on esitatud lähteandmete põhjal erinevad kirjeldavad statistikud. Need annavad hea ülevaate elektrituulikute võimsuste erinevusest erinevate tuulesuundade korral ning kirjeldavad, kuidas elektrituulikud võivad üksteiselt tuult varastada. Lisaks on kirjeldatud tuulepargi kaabelliinide koormatust ning kaabelliinide ajalist kasutust erinevate koormuste korral.

1. Tuuleparkide ehitus

1.1. Tuul

Tuuleks nimetatakse õhu liikumist, mis on põhjustatud õhurõhu vahest erinevate punktide vahel. Õhurõhkude vahe oleneb omakorda õhutemperatuuri ebaühtlasest jaotusest. Tuult iseloomustavad parameetrid on kiirus, suund ja puhangulisus [8], [9].

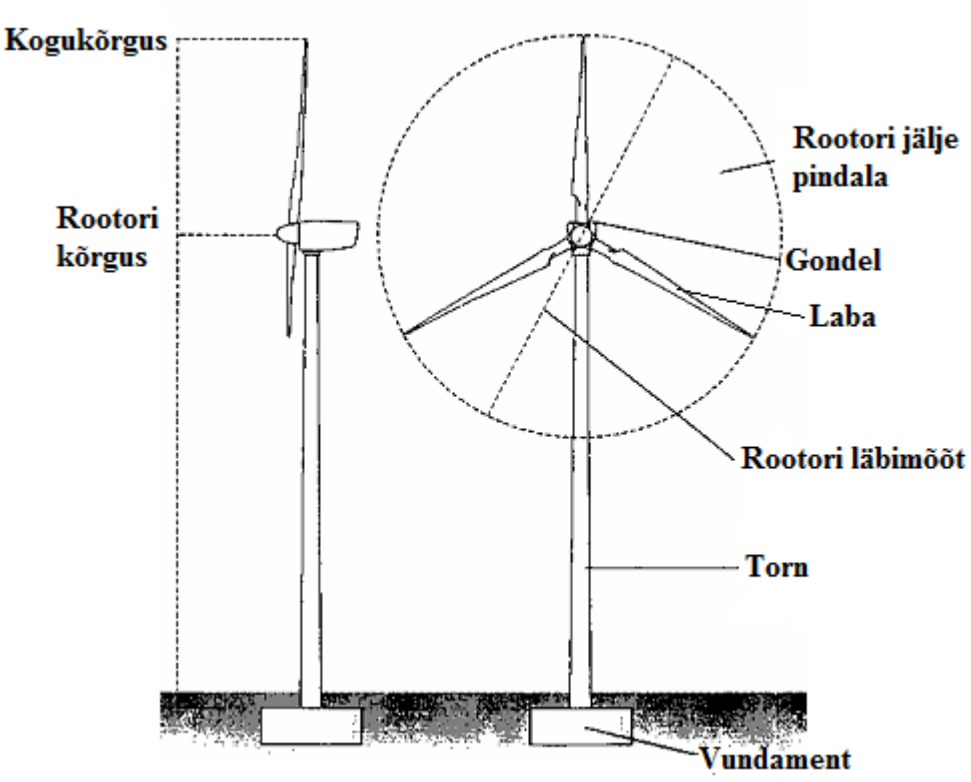
Tuule suunda ja kiirust mõjutavad erinevad takistused, mis võivad olla nii looduslikud (mäed, puud) kui tehislikud (erinevad ehitised). Tuule puhangulisuse all mõistetakse tuule suuna ja kiiruse mitte püsivust lühikese aja jooksul. Tuule puhanguid tekitavad termiline konvektsioon ja turbulents õhus. Turbulentsi olemus seisneb väikeste keeriste tekkimisega voolavas õhus, mis tekitab liikumisega tuule tekkeid ja kadumisi [10].

1.2. Elektrituulik

Elektrituulik muundab tuule kineetilise energia mehaaniliseks energiaks, mis omakorda muundatakse elektrienergiaks. Elektrituulikud on tänapäeval enamasti horisontaalse teljega, kuid on olemas ka vertikaalse teljega tuulikuid. Viimaste efektiivsus võrreldes horisontaalse teljega on madal [2]. Elektrituulikute põhilised tehnilised näitajad on: nimivõimsus, rootori diameeter, rootori kõrgus, võimsuskõver (näitab, millise tuulekiiruse juures elektrituulik tööle hakkab ja välja lülitub) [11].

Elektrituulik koosneb järgmistest põhilistest komponentidest, mis on kujutatud joonisel 1.1:

- Vundament - projekteeritakse vastavalt pinnasele;
- Mast - silindrilise kujuga. Valmistatakse metallist, betoonist või kasutatakse neid kahte materjale erinevates torni osades, mida nimetatakse hübriid mastiks. Väiksemate elektrituulikute korral kasutatakse ka sõrestikmaste;
- Rootor - koosneb rummust, võllist, enamasti kolmest labast ning labade pööramis mehhanismist;
- Gondel - toetub tornile. Seal asuvad elektrituuliku tuulde pööramise mehhanism. Sõltuvalt tootjast on seal käigukast, generaator, automaatika ja elektrisüsteem [12].



Joonis 1.1. Elektrituuliku põhilised komponendid [12]

Tuule poolt arendatav võimsus laba pöörlemistasapinnal on võrdeline tuule kiiruse kuubiga ning see arvutatakse valemi 1.1 järgi.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot Cp \tag{1.1}$$

kus P – tuule poolt arendatav võimsus, W;

ρ – õhu tihedus, ρ=1,226 kg/m^3;

A – laba pöörlemispindala, m^2;

v – tuule kiirus, m/s;

C_p – kasutegur [13].

Kasuteguri C_p maksimaalne väärtus saab olla kuni 0,59. Seda nimetatakse Betzi seaduseks, mille avastas saksa füüsik Albert Betz 1919. aastal [14]. Betzi seadus tõestab, et elektrituulik suudab tuules olevast kineetilisest energiast muundada kuni 59% mehaaniliseks energiaks. Enamasti on kasutegur 40–50% [13], [14].

1.3. Tuulepark

Elektrituulikute tuuleparke võib jagada üldistatult kaheks: maismaa- ja meretuuleparkideks. Maismaa tuulepargid asuvad üldjuhul ranniku lähedal ning meretuulepargid on paigaldatud merre, kus on tuuleressursid paremad ja ruumi rohkem.

Tuulepark on kindlale alale paigaldatud elektrituulikute grupp elektrienergia tootmiseks. Tuulepark koosneb elektrituulikutest ja sellega seotud infrastruktuurist, mille alla kuuluvad alajaam, kaabelliinid, elektrituulikute juurde viivad teed jms. Tuulepargi rajamine võimaldab optimeerida investeeringuid ja saada suuremat elektrienergia toodangut. Suuremate tuuleparkide korral on tuulepargi väljundvõimsus ühtlasem ja stabiilsem kui väiksema tuulepargi korral [15]. Samuti vähendab tuulepargi rajamine hoolduskulusid võrreldes üksikult paigaldatud elektrituulikutega [12].

Tuulepargi rajamisel tuleb arvestada järgmiste asjaoludega:

- Geograafiline asukoht: võimalikud looduslikud ja tehislikud takistused;
- Topograafilised näitajad: reljeef, teede olemasolu, juurdepääs;
- Tuule karakteristikud: tuule kiirus, tuule suund, tuule puhangulisus;
- Keskkonna näitajad: võimalikud looduskaitsealad, ohustatud loomad ja taimed, lindude ja nahkhiirte võimalikud lennukoridorid;
- Geoloogilised näitajad: maapinna ehitus, maapinna eritakistus (tähtis maanduse jaoks) ja võimalik maapinna erosioon;
- Sotsiaalsed mõjurid: inimeste arvamused, müra, visuaalne reostus, kaugus majadest, teiste kommunikatsioonide segamine;
- Maa omandiküsimused: vajalik katastriüksuste arv, vaidlused maaomanikega, võimalikud servituudid;
- Turvalisus: kui palju inimesi võib juhuslikult tuuleparki sattuda, matkarajade jms lähedus, lähimad maanteed ja asulad, lennuliikluse olemasolu ning selle turvalisuse tagamine;
- Elektrivõrguga ühendamine: olemasolevad elektrivõrgud ning nende sobivus tuulepargiga ühendamiseks, võimalikud ümberehitustööd [12].

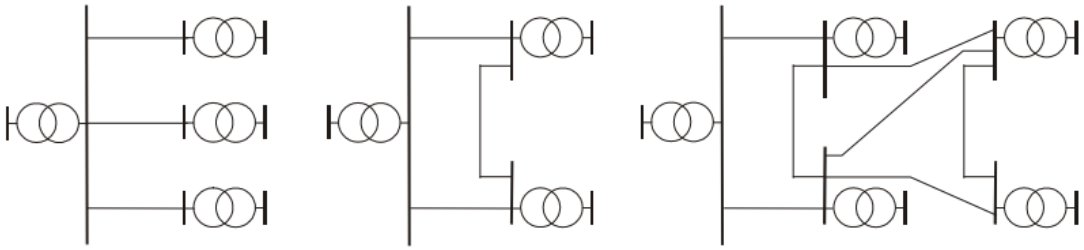
Tuuleparkide rajamisel tehakse eelnevalt põhjalikud uuringud. Tuulepargi asukoha valikul tehakse tavaliselt esmalt ühe kuni kahe aastane tuulemõõtmine [2]. Peale tuulemõõtmist tegeletakse keskkonnamõjude hindamisega ja samuti lahendatakse kogukonna vahelised küsimused. Viimastel aastatel on Eestis tekkinud tuuleparkide vastaseid, seda just eriti saartele planeeritavate projektide korral [16].

1.4. Tuulepargi elektrivõrgu ühendusskeemid

Tuuleparkide elektrivõrgus olevate seadmete ühendusskeemid ehk konfiguratsioonid võivad olla erinevad. Elektrivõrke liigitatakse nende tunnuste järgi järgmiselt:

- radiaalvõrgud;
- hargnevad radiaalvõrgud;
- ringvõrgud;
- silmusvõrgud [17].

Nende ühendusskeemide näited on esitatud Joonisel 1.2.



Joonis 1.2. Radiaalvõrk, ringvõrk ja silmusvõrk [17]

Kõigil nendel ühendusskeemidel on omad plussid ja miinused, mis on toodud tabelis 1.1. Eestis on enamus tuulepargid ehitatud radiaalvõrgu skeemi kohaselt. Enamasti on põhjuseks see, et näiteks ringvõrgu skeemi korral teeb ringtoite kaabli lisamine projekti investeeringu maksumuse kallimaks. Radiaalvõrgu kõige suurem miinus on jadamisi ühendatud elektrituulikute kaablil rikke tekkimine, mille tagajärjel jäävad rikkekohast järgnevad elektrituulikud elektrivõrgu toiteta. Samuti ei saa elektrituulikud oma toodangut võrku müüa. Eestis on tuulepargid veel suhteliselt väikesed ja kaabelliinide optimeerimist ei ole veel väga tehtud. Enamasti saab kaabelliinide rikke nädala jooksul parandatud, see sõltub täpsemast veast ja remondi jaoks vajalike materjalide olemasolust. Üldjuhul on enamus tuulepargid kindlustatud, mis vähendab omakorda majanduslikke riske suuremate rikete korral saamata jäänud toodangu eest [18].

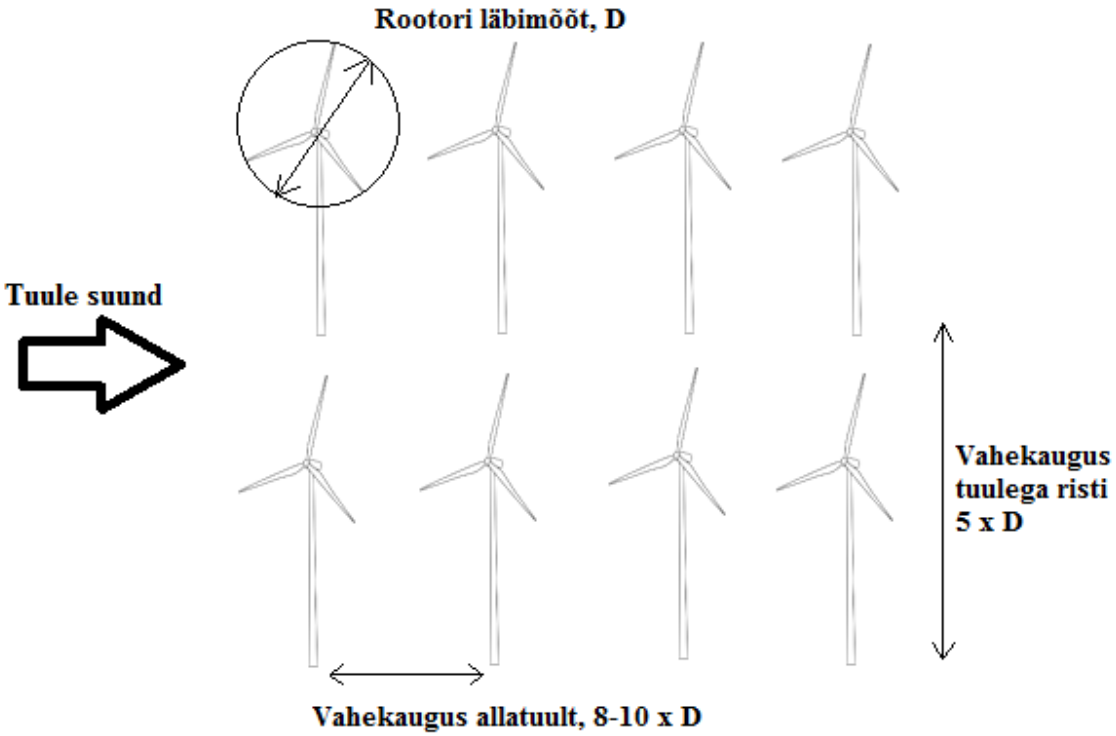
Tabel 1.1. Elektrivõrkude ühendusskeemide võrdlus [17]

Ühendusskeem	Plussid	Miinused
Radiaalvõrk	Skeem lihtne ja arusaadav Lihtne releekaitse	Elektrivarustuskindlus madal
Ringvõrk	Elektrivarustuskindlus kõrgem Pingepüsivus parem Võimsuskaod väiksemad	Käit keerukas Releekaitse keerukas
Silmusvõrk	Varustuskindlus veelgi kõrgem Pingepüsivus veelgi parem Võimsuskaod veelgi väiksemad	Käit keerukas Releekaitse keerukas ja kallis

1.5. Tuulepargi varjutuse efekt

Mitme elektrituuliku üksteisele liiga lähestikku tuulepargis paigaldamine tekitab erinevaid probleeme, milleks üheks on varjamine ehk niinimetatud varjutus efekt (varastamise efekt). Inglise keeles nimetatakse seda *wake effect* või *array effect*. Varjutuse efekti mõju on teaduslikult uuritud juba 1976. aastast [19]. Sisuliselt seisneb see selles, et üks elektrituulik või tuulepargis esimeses reas olevad elektrituulikud varjavad tagumiste elektrituulikute tuult kuna tagumised jäävad eespool asetsevate elektrituulikute varju. Sellega seoses toodavad need elektrituulikud vähem elektrienergiat kui toodaks sama hulk, mis seisaks üksteisest eraldi [12].

Joonisel 1.3 on kujutatud tuulepargi optimaalne paigutuse põhimõtteline skeem. Iga üksiku tuulegeneraatori taga on väiksem tuule kiirus kui selle ees. Sellepärast ei tooda tuulepargis elektrituulikud sama palju energiahulka kui elektrituulik üksikult sama tuule korral. Elektrituulikute omavaheline kaugus allatuult peaks olema kaheksa kuni kümme rootori diameetrit ning tuulega risti olevad elektrituulikud vähemalt viis rootori diameetrit [12]. Näiteks, kui rootori läbimõõt on 100 m, siis võiks elektrituulikute omavaheline kaugus olla ligi 1 km.



Joonis 1.3. Elektrituulikute optimaalse paigutuse põhimõtteline skeem [12]

Tuulepargi toodang võib tänu elektrituulikute varjutuse efektile väheneda 2–7%. See sõltub konkreetsest tuulepargist. Suurtes tuuleparkides võivad võimsuskaod olla tänu varjutuse efektile vahemikus 10–20% kogu väljundvõimsusest [20]. Seoses varjutuse efektiga suureneb ka elektrituulikute poolt tekitatud turbulents [21]. Turbulents mõjub elektrituulikutele koormavalt ning vähendab nende eluiga [12].

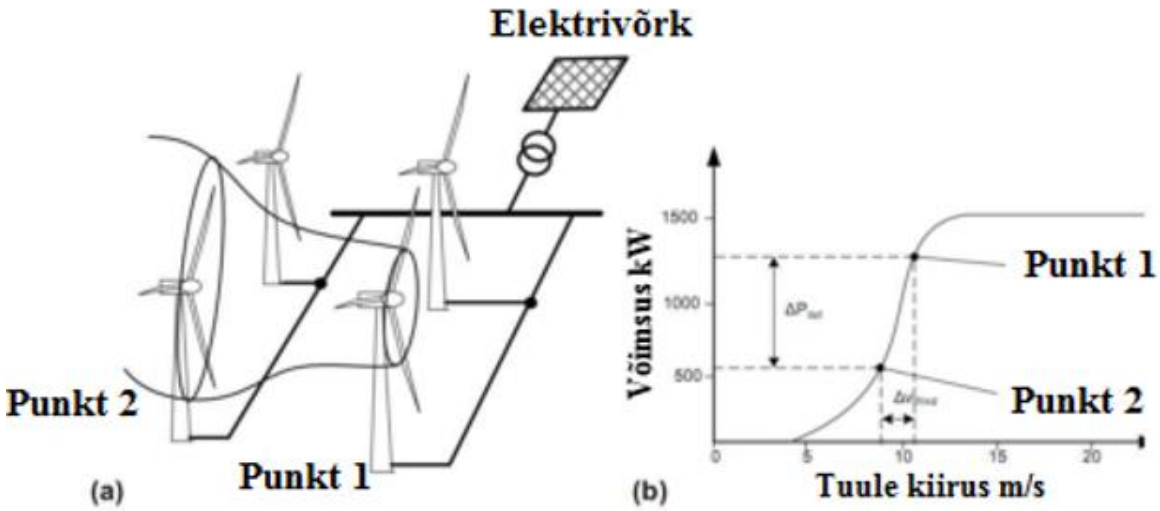
Elektrituulikute varjutuse efekti vähendamiseks ja vältimiseks peavad elektrituulikud olema üksteisest piisavalt kaugel. Uuringutega on tõestatud, et põhilised varjutuse efekti tekitajad on elektrituulikute omavaheline kaugus ja turbulentsi muutuse intensiivsus. Tavaliselt on tuuleparkide maa-alad piiratud. Elektrituulikute vahekaugustest sõltub ka ühenduskaablite pikkused ja ühtlasi läheb projekti kogumaksumus pikemate vahemaadega kallimaks. Arendajate eesmärgiks on eelkõige saada võimalikult palju elektrienergiat tootvaid elektrituulikuid võimalikult väikesel maa-alal, mis võib põhjaliku eeltöö tegemata jätmisel hiljem majanduslikult kahju tuua [12].

Elektrituulikute varjutuse efekti mõjutavad peamiselt:

- Elektrituulikute omavaheline kaugus;
- Elektrituulikute arv ja tuulepargi suurus;

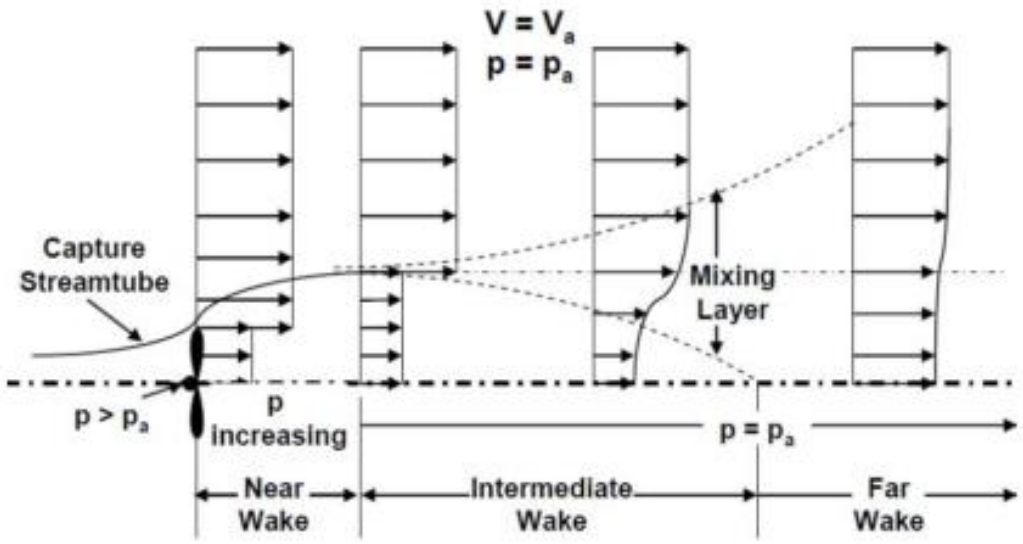
- Elektrituulikute töökarakteristikud;
- Valdavad tuule suunad;
- Turbulentsi intensiivsus [12].

Joonisel 1.4 (a) on kujutatud varjutuse efektiga seotud põhimõtteline tuule keerise levimise joonis. On näha, et tuule keeris laieneb Punkt 1 möödudes. Joonisel 1.4 (b) on kujutatud varjamise mõju elektrituuliku väljundvõimsusele. Jooniselt võib näha, et Punktis 2 on tuulekiirus madalam ja sellega elektrituuliku võimsus väiksem võrreldes tuulepargis eespool Punkt 1 oleva elektrituulikuga [7].



Joonis 1.4. Elektrituuliku varjutuse efekti mõju tuulepargi võimsusele [7]

Varjamise struktuur koosneb kolmest erinevast tsoonist: lähedal, keskel ja kaugel olev, mida kirjeldab joonis 1.5. Iga tsooni pikkus oleneb rootori läbimõõdust ja seda iseloomustavad rõhk ja tuule kiirus. Lähedal olevat varjutuse efekti iseloomustavad: kaugus umbes kaks rootori läbimõõtu, rõhk enne elektrituulikut kasvab ja langeb järsku teiselpool elektrituulikut. Keskmist varjutuse efekti iseloomustavad: kaugus umbes kaks kuni kolm rootori läbimõõtu, rõhk on võrdne ühe tuule puhangu kestel. Kaugel olev varjutuse efekti iseloomustavad: kaugus rohkem kui viis rootori läbimõõtu [7].



Joonis 1.5. Elektrituuliku varjutuse efekti erinevad tsoonid [7]

Tuuleparkide optimeerimiseks kasutatakse erinevaid arvutiprogramme, mis võtavad arvesse ka elektrituulikute varjutuse efekti. Nendest levinumad on WAsP (Wind Atlas Analysis Application Program), WindPRO, Windfarm ja ANSYS [7]. WAsP tarkvara on arendanud juba üle 25 aasta Taani Tehnikaülikool ja Risoe teaduskeskus. WAsP tarkvara eeliseks on väga põhjalik kliima parameetreid analüüsiv metoodika [22]. WindPRO tarkvara arendajaks on Taani firma EMD, mis on antud valdkonnas tegutsenud ligi 20 aastat. WindPRO koosneb erinevatest arvutamise moodulitest. WindPRO on üks levinumaid tuuleparkide planeerimise tarkvarasid maailmas, mida usaldavad erinevad pangad projektide finantseerimise jaoks [23]. Kõikide eelpool nimetatud programmidega on võimalik teha tuulepargi tootlikkuse arvutusi ja leida elektrituulikute optimaalne paigutus. Varjutuse efekti tulemuste arvutamiseks peavad olema võimalikult täpsed lähteandmed, tuule mõõtmise mast peab asuma tuulepargist kaugemal, et elektrituulikud ei hakkaks tuule mõõtmist segama. Need programmid põhinevad erinevatel varjutuse efekti arvutamise matemaatilistel mudelitel, milleks on enamasti järgmised mudelid: Lissaman, Larsen, Jensen ja Ainslie. Kui need mudelid võetakse tuulepargi rajamisel arvesse, siis tehakse arvutamisel kaks sammu. Esialgu arvutatakse varjutuse efekti intensiivsus ühe elektrituuliku näitel ning järgmisena kõikide tuulepargis olevate elektrituulikute kohta [7].

1.6. Tuuleparkide kaabelliinid

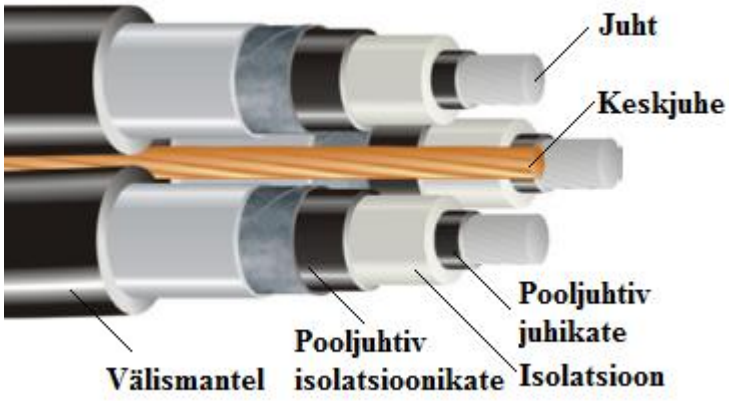
Tuulepargis kasutatakse elektrituulikute omavaheliseks ja elektrivõrguga ühendamiseks kaabelliine. Tänapäeva tuuleparkides on kasutusel keskpinge maakaabelliinid. Eesti

tuuleparkides on elektrituulikute vahelises ühenduses enamasti kasutusel 20 kV keskpinge kaablid. Kaabelliinide plussideks on võrreldes õhuliinidega: võtavad vähem ruumi, on väliste keskkonnamõjude eest kaitstud, ohutumad, töökindlamad ja kraana manööverdamine on elektrituuliku juures lihtsam [24]. Miinusteks on kõrgem hind ja kaabli rikke asukohta on keerulisem leida ning remont võtab kauem aega [17].

1.7. Kaablid

Elektrituulikute jõukaablid on juhid, mida kaitstakse mehaaniliste vigastuste, korrosiooni ja niiskuse eest kaabli mantliga, kus sees on üks või rohkem voolujuhtivast materjalist kaablisoont. Lisaks kaabli mantlile kasutatakse veel erinevaid täiendavaid kaitsekihte, mis võivad olla väga keerukad. Kaabli konstruktsioon oleneb erinevatest asjaoludest: nimipingest, kasutustingimustest, soonte arvust, materjalist ja veel teistest parameetritest [24]. Kaablis ei tohi niiskus piki- ega ristsuunas levida. Seetõttu on kaablis juhi kiudude vahel pikisuunaline ning juhtide vahel ristisuunaline veetõke. Isolatsioonimaterjaliks kasutatakse nii ekstrudeeritud polüvinüülkloriid (PVC) ja polüeteen (PE, PEX, XLPE) materjale [17].

Eesti tuuleparkides on enam kasutatavad kolmesoonelise keskjuhtmega keskpingekaablid. Kaabli tootja Draka AHXAMK-W konstruktsioon on toodud joonisel 1.6. Kolmesoonelist ümber keskjuhtme keeratud keskpinge kaablit nimetatakse ka Wiski kaabliks. See kaabel on mõeldud paigaldamiseks maa alla, kohtkindlana sise- ja välisruumides, torudesse ja riiulitele. Samuti sobib kaabel kündmise teel pinnasesse paigaldamiseks. Tegemist on alumiiniumist valmistatud ümara, keerutatud ja tihendatud veekindla kaabliga, mida ümbritseb pooljuhtiv kopolümeerkompaund [17]. Isolatsioonina kasutatakse 5,5 mm paksust polüeteeni (XLPE), mida ümbritseb täiendavalt pooljuhtiv kopolümeerkompaund. Niiskuse levimist pikisuunas tõkestab niiskuse mõjul paisuv pooljuhtiv lint ning ristsuunas metallkattega tihedalt seotud alumiiniumfooliumlint. Kaablit katab ilmastikukindel musta värvi polüeteen [25].



Joonis 1.6. Kolmesooneline keskjuhtmega Draka AHXAMK-W kaabel [17]

Kaabelliinide projekteerimisel tuleb arvestada erinevaid konkreetseid tingimusi, mis võivad kaablit mõjutama hakata. Väga oluline on kaablite jahutustingimused. Kaablite paigaldamisel kaablikraavidesse tuleb täita erinevaid tingimusi. Kaabli vigastamise vältimiseks tuleb kaablikraavi põhi täita liivapadjaga. Kaabel kaetakse omakorda liivaga ja kaabli kaitsmiseks kasutatakse erinevaid torusid, kõrisid, plaate ja renne. Samuti tuleb jälgida paigaldusel, et kaabli alla või peale ei satuks teravaid kive või teisi objekte, mis võiksid kaablit kahjustada. Oluline on kaablikraavi pinnas tihendada. Kaabli paigaldamisele kehtivad erinevad normid ja nõutav kaablikraavi sügavus sõltub kasutatavast kaabli nimipingest. Keskpinge maakaablid paigaldatakse enamasti 0,7 m sügavusele [17].

Kaablite ühendamiseks ja jätkamiseks kasutatakse jätku- ja otsamuhve. Olenevalt kaabli tüübist võivad muhvide ehitus erineda ka margist. Üldjuhul on uue kaabli standardpikkus kaablitrumlil 500 m [25], seetõttu on uut tuuleparki ilma jätkumuhvideta praktiliselt võimatu rajada. Enamasti on kaablimuhvid tuuleparkide projektidel märgitud. Kaablimuhvide ehitus erineb sõltuvalt paigaldustingimustest näiteks vees või pinnases [17].

Keskpingekaablite ristlõikepindala on enamasti vahemikus 3 × 25 mm^2 kuni 3 × 240 mm^2. Kaabli ristlõikepindala valikul tuleb eelkõige lähtuda pingekaost ja tuleb jälgida, et kaitseaparatuuri rakendusvool ei ületaks kaabli parameetrites olevaid kestvaid lubatud voole sõltuvalt paigaldustingimustest. Kaitseaparatuuri rakendusvoolu valikul tuleb lähtuda kaabli töövoolust ja vähimast kahefaasilisest ning suurimast kolmefaasilisest lühisvoolust sõltuvalt lubatud temperatuurist. Üks olulisemaid näitajaid kaabli käidu mõistes on lubatud koormusvool, mis on kaablite tehnilistes parameetrites täpsemalt määratletud [17].

Tuulepargi elektrivõrgud, mille üks osadest on kaabelliinid, moodustavad tuulepargi kogumaksumusest arvestatava osa. Maismaatuuleparkides moodustab elektrivõrkude maksumus kogu tuulepargi maksumusest kuni 15% ja meretuuleparkides võib ulatuda see kuni 30%-ni (Tabel 1.2) [26].

Tabel 1.2. Tuulepargi ehituse maksumused [26]

	Maismaatuulepark	**Meretuulepark**
Projekti kogumaksumus	800–1000 €/kW	1200–1850 €/kW
Elektrituulik	65–75%	30–50%
Vundament	5–10%	15–25%
Elektrivõrk	**10–15%**	**15–30%**
Paigaldus	0–5%	0–30%
Muud kulud	5%	8%

Kaablite valikul tuleb arvestada ka majanduslike aspektidega. Mida pikemad ja suurema ristlõikepindalaga on kaablid seda kallimaks läheb nende maksumus ning sellega seoses suureneb tuulepargi maksumus.

Kaabelliini projekti maksumuse arvutamisel tuleb arvestada järgmiste parameetritega:

- Üldine majanduslik info: kaabli ja paigalduse maksumus, kadude maksumus, diskontomäära prognoos;
- Kaabli konstruktsioon: juhtide arv kaablis, isolatsiooni tüüp, välise kaitsekihi materjal;
- Kaabli paigalduse andmed: kaablikraavi sügavus ja kaablite arv ühes kraavis ning nende vaheline kaugus
- Kaabli baasandmed: kasutatav pinge, ristlõikepindala; ennustatav eluiga, aastane koormuse juurdekasv, keskmine kaabli temperatuur, pinnase eritakistus [27].

2. Varasemad uuringud antud valdkonnas

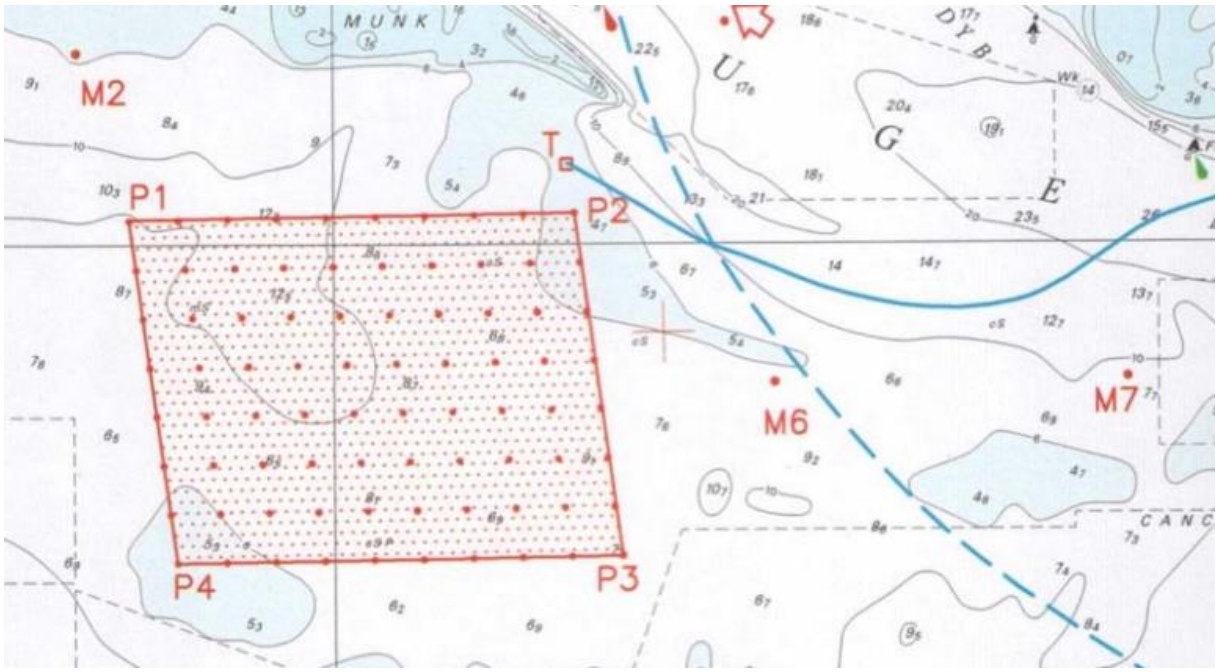
Eestis ei ole elektrituulikute üksteise varjamise kohta tuuleparkides põhjalikke uuringuid ega lõputöid veel tehtud. Küll on erinevates töödes tuulepargi rajamise, paigutuse ja muid tuulepargiga seotud küsimusi käsitletud.

Tammeti lõputöös „Eestis asuvate tuuleparkide karakteristikute võrdlus ja analüüs“ on analüüsitud erinevate Eesti tuuleparkide karakteristikuid ja parkide toodangu sõltuvust tuule suunast ja kiirusest. Töö tulemusena saadi teada, et tuule suund mõjutab tuuleparkide toodangut märgatavalt. Töö järelduses tõdeti, et kõige parema tootlikkusega päevadel puhusid valdavalt edela- ja lõunatuuled. Töö tulemusena ei leitud kindlat korrapärasust tuuleiilide levimisel üle Eesti territooriumi. Autori hinnangul oli mõnel juhul näha tuulefrondi levimist ühest tuulepargist teise, aga andmete analüüsimisel ei saadud resultatiivset tulemust [28].

Morsy magistritöös „Paldiski Wind Farm Power Losses Evaluation and Economic Consideration“ käsitletakse tuulepargi kaabelliinide rajamist. Tuulepargi elektrituulikute ja kaablite paigutust modelleeriti DIgSilent Power Factory tarkvara kasutades. Töös käsitleti erinevaid elektrituulikute ühendusskeeme ja kaablite valikut ristlõikepindala järgi. Tulemusena saadi erinevad tuulepargi paigutuse variandid ning valiti neist parim lahendus majanduslikel kaalutlustel. Töös tuli välja, et elektrituulikute omavaheline kaugus 9,5 × rootori diameeter oleks majanduslikult kadude mõttes efektiivsem kui 8 × rootori diameeter. Varasemates uuringutes on need numbrid olnud vastupidi. Projekti maksumus kallineb märgatavalt pikemate kaabelliinide ja suuremate ristlõike pindalade kasutamisel. Näiteks kõige odavam ja kallim variant erinesid üksteisest ligi 5 korda, projekti maksumused olid vastavalt 130 000 eurot ja 692 000 eurot. Kallima projekti puhul olid elektrilised kaod väiksemad ja töökindlus suurem kui odavaimal variandil [29].

Kallase magistritöös „Hiiumaa 500 MW maismaatuulepargi tehniline eskiislahendus“ on kirjeldatud ühe tuulepargi rajamisega seotuid tehnilisi aspekte. Töös selgub, et selline suur projekt oleks teoreetiliselt võimalik, aga võib tekkida rida erinevaid probleeme. Arendajad tahavad võimalikult väikesele maa alale paigutada võimalikult palju elektrituulikuid. Sellega seoses tekib aga rida tehnilisi probleeme, millest üks on elektrituulikute üksteise varjamine. Samuti tekib küsimus projekti maksumuse osas, sest seoses uute ülekandeliinide rajamisega võib see utoopiliselt kalliks minna. Töös järeldati, et mõistlik oleks rajada pigem mitu väikest tuuleparki kui üks suur [30].

Elektrituulikute üksteise varjamise kohta on tehtud palju arvutuslike mudeleid ja kirjutatud teadusartikleid. Palju on läbi viidud uuringuid ühe maailma esimese suurima Taanis asuva meretuulepargi Horns Rev 1 kohta, mis alustas tööd 2002. aastal. Kirjeldatud tuulepargis on kokku 80 Vestas V80 tüüpi 2 MW võimsusega elektrituulikut, mis teeb tuulepargi koguvõimsuseks 160 MW [31]. Meretuulepargis on üldjuhul rohkem elektrituulikuid kui maismaa tuuleparkides ning seal muutub varjamise küsimus eriti aktuaalseks. Selle tuulepargi analüüsimise eeliseks on kolm tuulepargist sõltumatud piisaval kaugusel asuvad mõõtemastid, mille asukohad on märgitud joonisel 2.1 punktidega M2, M6, M7. Mõõteseadmed asuvad mõõtemastidel erinevatel kõrgustel [31][32][33][34].



Joonis 2.1. Horns Rev I meretuulepargi asendiplaan ja mõõtemastid [32]

Detailse ülevaate tuulepargi elektrituulikute varjamise kohta andis Moskalenko jt teadusartikkel „Study of Wake Effects for Offshore Wind Farm Planning“. Esmalt on kirjeldatud elektrituulikute varjutuse efekti teooriat ning on toodud näide meretuulepargi kohta. Artiklis on toodud Taani Horns Rev I meretuulepargi varjutuse efekti modelleerimise näide. Andmed analüüsimiseks saadi tuulepargist 2 km loodes asuvast mõõtemastist ning modelleerimine tehti LENA-Tool tarkvaraga. Analüüsimise tulemusena jäid viimased elektrituulikud olenevalt tuule suunast väiksema sisend tuulekiirusega kui eespool asetsevad. Varjutuse efekt vähendas tuulepargi elektrienergia kuu toodangut 12% ning rahaliselt jäi tuulepargi omanikel saamata 652 500 eurot [7].

Horns Rev I meretuulepargi kohta tegid Porte-Agel kolleegidega uuringu „A Numerical Study of the Effects of Wind Direction on Turbine Wakes and Power Losses in a Large Wind Farm“. Uuringus kasutati erinevaid mudeleid ja simulatsioone. Kokku tehti 67 erineva tuule suunaga simulatsiooni. Uuringu tulemusena saadi teada, et tuule suunal on väga suur mõju tuulepargis tekkivatele väljundvõimsuse kadudele. Näiteks juba 10º tuule suuna muutust võis kõige halvemal juhul tuulepargi võimsust vähendada kuni 43% [35].

Elektrituulikute üksteise varjutuse efekti uurimiseks on tehtud erinevaid katsetusi laborites. Väga põhjaliku ülevaate varjutuse efekti aerodünaamikast andis Vermeeri jt koostatud teadusartikkel „Wind turbine wake aerodynamics“. Artiklis on kirjeldatud erinevaid varjamise katseid tuule tunnelite laborites aastate lõikes. Eraldi on kirjeldatud eksperimente elektrituulikute varjamisest lähedal ja kaugel asetsevate elektrituulikute korral. Töös on toodud varjutuse efekti arvutamise erinevad võimalused ja mudelite eripärad [36]. Samuti andis põhjaliku kirjanduse ülevaate varjutuse efekti aerodünaamikast Sanderse poolt kirjutatud raport „Aerodynamics of wind turbine wakes: Literature review“ [37].

Briggs kirjutas North American Windpower-i koduleheküljel avaldatud artiklis „Navigation The Complexities Of Wake Losses“ elektrituulikute varjutuse efekti üldisest mõjust tuuleenergeetika projektides. Varjamisega seotud kaod võivad olla pärast tuulepargi rajamist kõige suurematekskadudeks. Peale tuulepargi rajamist on elektrituulikute varjamisest tingitud kadusid praktiliselt võimatu kuidagi muuta. Ainuke võimalus on elektrituulikute asukohta muuta või eemaldada. Varjamisega seotud kaod on väga varieeruvad ning neid ei saa kuidagi projekti eluajaks fikseerida. Erinevate mudelite täpsust ja uuringute tulemusi ei saa veel usaldada 100%. Varjamisega seotud kadude ennustamise statistika näitab, et üldjuhul on hiljem mõõdetud kaod suuremad kui varem planeeritud mudeli korral [38].

Cheni jt artikkel „Time-Series Based Cable Selection for a Medium Voltage Wind Energy“ kirjeldab kaabelliinide valiku erinevaid kriteeriumeid. Võrreldakse kaabelliinide valikut ristlõikepindalade ja koormatuse järgi. Artiklist selgub, et kaabli ristlõikepindala ei mõjuta oluliselt kaabelliini parameetreid kui selle pikkus jääb alla 10 km. Pikemate kaabelliinide korral võib tekkida kaabelliinis liiga suur pinge tõus. Artiklis on kirjeldatud kaabli kadude arvutamist ja on erinevate tuuleparkide tehniliste andmete muutmistega arvutatud teoreetiliselt õige kaabelliinide ristlõikepindala. Näitena on toodud ühe Rootsis oleva tuulepargi andmed. Arvutuste tegemisel võeti aluseks 2007. aasta elektribörsi tunnihinnad. Artikli tulemustest tuleb välja, et kasutades ökonoomsemalt koormatuid kaableid väiksema võimaliku ristlõikepindalaga kaablite asemel, vähendab see märgatavalt kulusid [39].

3. Tuulepargi analüüs

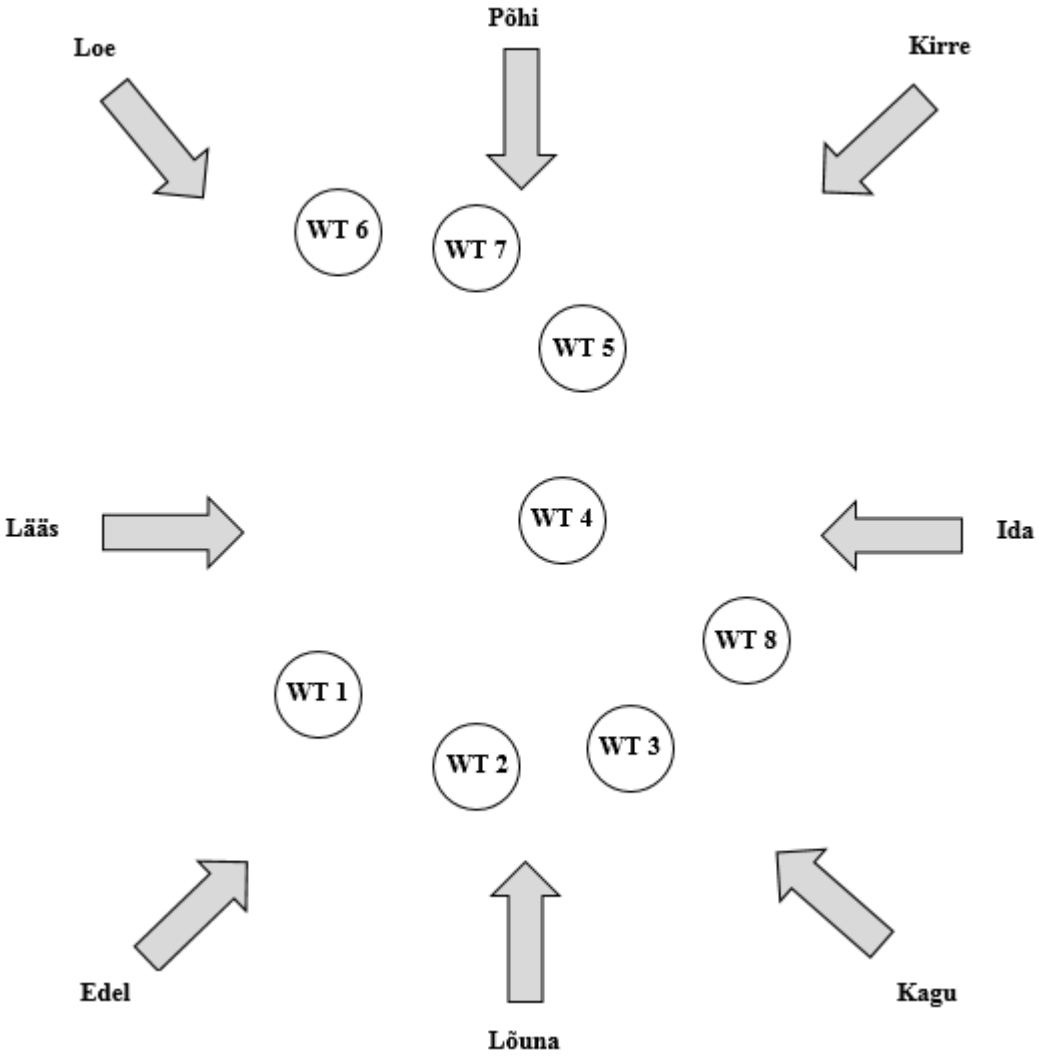
3.1. Metoodika

Magistritöö tulemuste osa põhineb ühel Eesti tuulepargi andmetel. Tuulepargis on kokku kaheksa elektrituulikut, mille paigutus on toodud joonisel 3.1. Lähteandmed saadi Nelja Energia AS kirjalikul loal tuulepargi andmebaasi päringust. Kõik töös kasutatud tuulepargi andmed hõlmavad ajavahemikku 01.01.2014 – 31.12.2014. Kirjeldava ja statistilise analüüsi teostamiseks kasutati kümne minuti keskmiste väärtuste andmeid elektrituulikute võimsuse (kW), tuulekiiruse (m/s) ja tuule suuna (º) kohta.

Kuna algandmetes olid tuule suunad esitatud kraadides 0º kuni 360º, siis grupeeriti käesoleva töö jaoks need ümber kaheksaks ilmakaareks (põhi, kirre, ida, kagu, lõuna, edel, lääs ja loe), kus iga ilmakaare keskpunktist vasakule ja paremale on 22,5º. Tuule suuna ning elektrituulikute võimsuse ja kaablite koormatuse vaheliste andmete analüüsil ei kasutatud elektrituulikute võimsuse negatiivseid väärtusi. Vastasel korral võivad elektrituulikute riketest tingitud seisakud mõjutada võimsuste tulemusi.

Parameetreid võrreldi erinevate elektrituulikute ja tuule suundade kaupa. Täpsemalt võrreldi erinevate tuule suundade korral elektrituulikute võimsust ja selle põhjal kaablite koormatusi lähtudes kaabli tootja tehnilistest parameetritest.

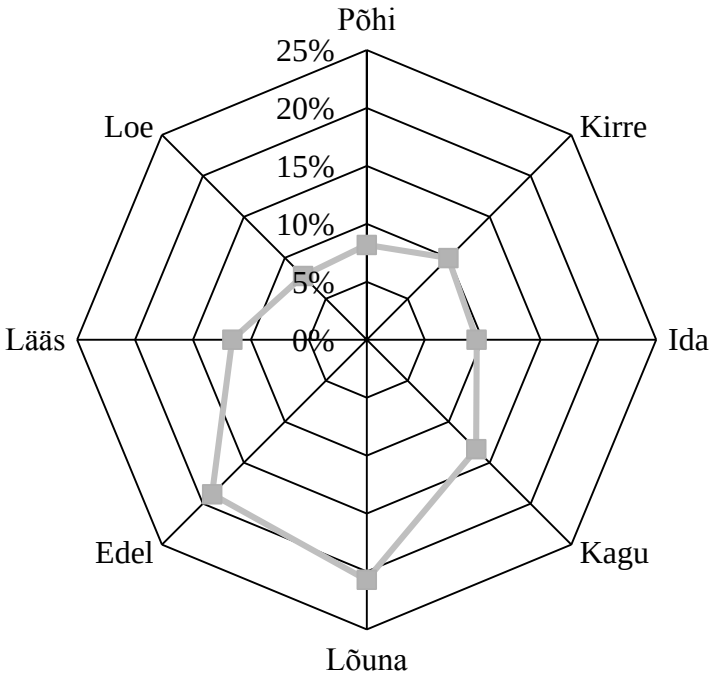
Andmete analüüsi tegemiseks on kasutatud tabelarvutusprogrammi Microsoft Excel 2013.



Joonis 3.1. Tuulepargi elektrituulikute paigutus koos tuule suundadega

3.2. Tuule suunad ja kiirused

Vaadeldava tuulepargi 2014. aasta tuule suundade täpsemaks iseloomustamiseks esitatakse need diagrammina ehk tuuleroosina (Joonis 3.2). Tuuleroos näitab erinevatest suundadest puhuvate tuule esinemissagedust protsentides. Jooniselt on näha, et 2014. aastal oli valdavaks tuuleks lõunatuul, mis puhus 20,7% kogu ajast, edela tuult oli 18,9% ja kagu tuult 13,4%. Kõige vähem puhus tuul loodest 7,9% ja põhjast 8,2%.



Joonis 3.2. Tuulepargi valdavad tuule suunad 2014. aastal

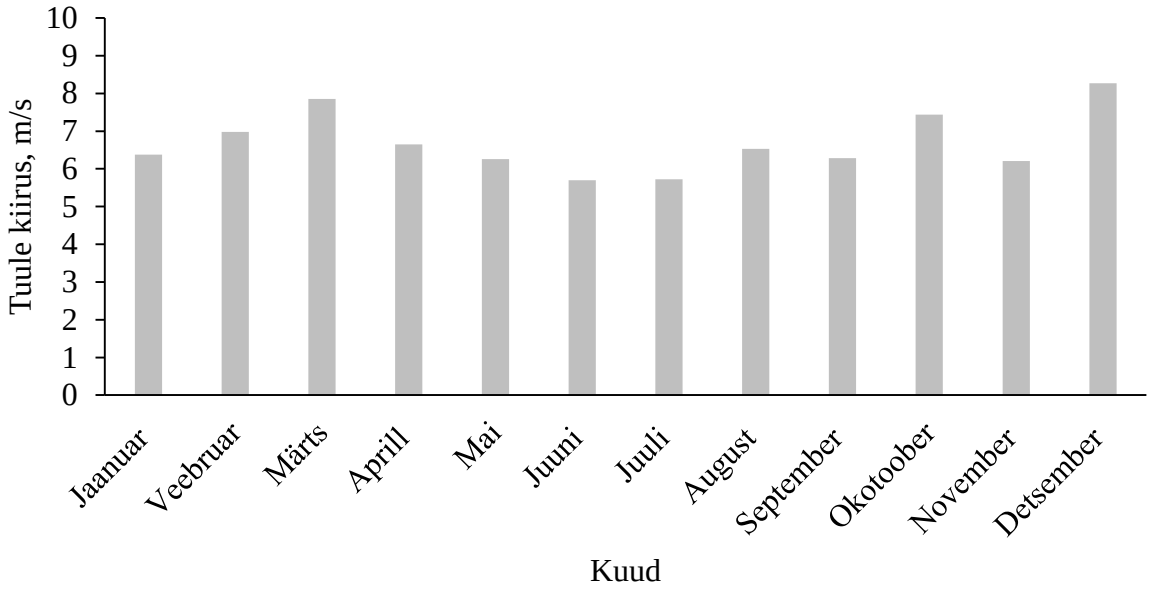
Vaadeldava tuulepargi 2014. aasta keskmine tuule kiirus oli 6,7 m/s, mis on suurem võrreldes Eesti keskmiste tuulekiirustega. Eesti aasta keskmine tuule kiirus on 4-5 m/s, rannikul ja saartel 5,5–7,0 m/s vahel ning sisemaal 3,0–3,5 m/s [40]. Tuulepargis mõõdetud maksimaalne kiirus oli 19,6 m/s. Eesti keskmised tuule kiirused on mõõdetud 10 m kõrguselt [40], aga elektrituulikutel asub anemomeeter gondli katusel. Antud tuulepargi elektrituulikute torni kõrgused on 90 m.

Nii nagu olid tuulepargi valdavateks tuule suundadeks lõuna- ja edelatuuled, puhusid samadest ilmakaartest ka kõige tugevamad tuuled (Tabel 3.1). Kõige nõrgemad tuuled puhusid ida suunast.

Tabel 3.1. Keskmised tuule kiirused, SD (standard hälve) ja maksimaalne tuule kiirus erinevate tuule suundade korral

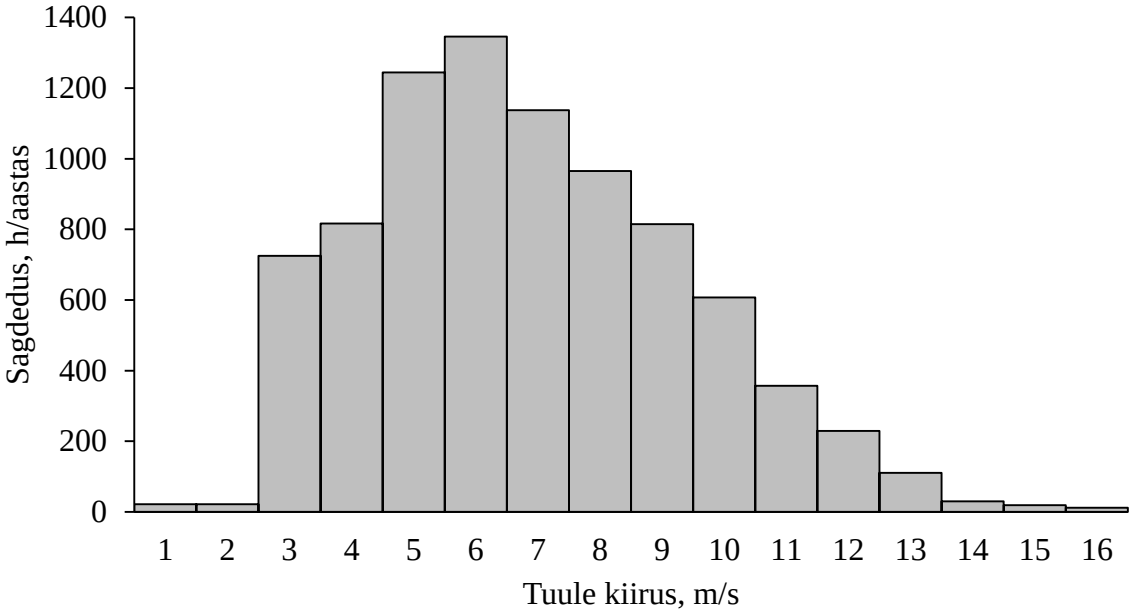
Tuule suund	Keskmine tuule kiirus	SD	Maksimaalne tuule kiirus
Põhjatuul	5,97	2,80	17,98
Kirdetuul	6,30	2,79	15,93
Idatuul	5,64	2,17	14,42
Kagutuul	6,54	2,65	18,09
Lõunatuul	7,54	2,71	18,71
Edelatuul	7,38	2,78	19,50
Läänetuul	6,50	2,69	18,73
Loodetuul	5,78	2,68	19,61

Keskmised tuule kiirused kuude lõikes on esitatud joonisel 3.3. Jooniselt on näha, et kõige tugevamad tuuled puhusid talvel ja sügisel. Kõige parema tuulega kuu oli detsember, kus keskmine tuulekiirus oli 8,3 m/s ning kõige vaiksem oli kahel suvekuul juunis ja juulis, mil keskmine tuule kiirus oli 5,7 m/s.



Joonis 3.3. Tuulepargi keskmised tuule kiirused 2014. aastal kuude lõikes

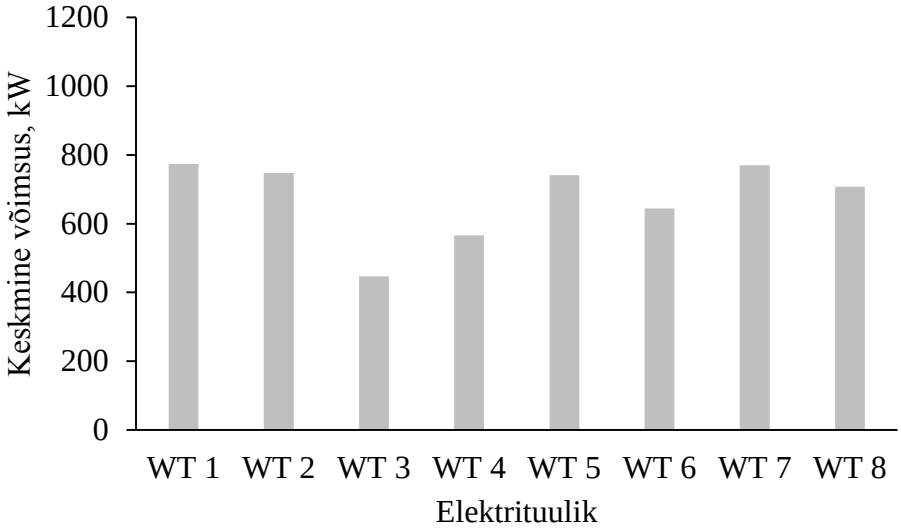
Tuulepargi tuule kiiruse sageduse jaotumine 2014 aastal tundides on kujutatud joonisel 3.4. Kõige enam puhus tuul kiirusega ligikaudu 6 m/s, vastavalt 1346 tundi, järgmisena tuul kiirusega ligikaudu 5 m/s, vastavalt 1244 tundi ja kolmas levinum tuule kiirus oli ligikaudu 7 m/s, mida esines kokku 1137 tundi. Kõige vähem esines tundide lõikes 16 m/s kiirusega tuult. Tuule kiiruseid vahemikus 0–5 m/s esines aastas 29%, 5–10 m/s 58%, 10–15 m/s 13% ja 15–20 m/s 0,3%.



Joonis 3.4. Tuule kiiruse sageduse jaotumine

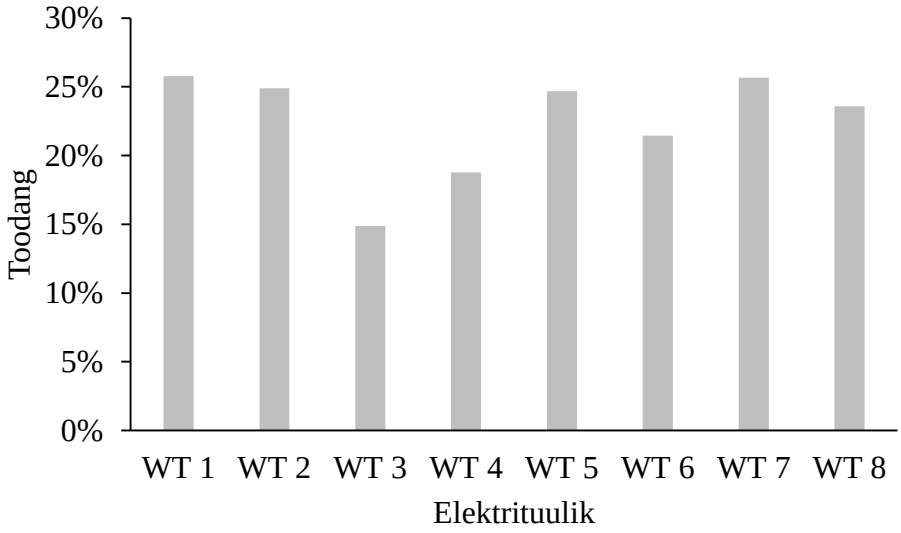
3.3. Elektrituulikute võimsused

Tuulepargi aasta keskmine võimsus oli 674,7 kW (mediaan 372,0 kW), mis on tehasepoolsest teoreetilisest maksimaalsest võimalikust 3000 kW-st 22,5%. Elektrituuliku WT 7 (*wind turbine*) maksimaalne võimsus 2014. aastal oli aga 3129,8 kW. Jooniselt 3.5 on näha, et kõige suuremad keskmised võimsused olid elektrituulikutel WT 1, WT 2, WT 5 ja WT 7. Nende aastane keskmine võimsus oli suurem kogu tuulepargi aastasest keskmisest võimsusest. WT 3 ja WT 4 keskmised võimsused võivad olla väiksemad tänu mõnda aega kestnud rikete tõttu, kui elektrituulik ei töötanud. Erinevused elektrituulikute võimsustes võivad tulla seoses võimsuse piiramisega, mida tehakse tavaliselt mõne vea avastamisel. Võimsuse piiramise mõte on vähendada komponentide elektrilist ja mehaanilist koormust, kuni remondini. Piiramist teostatakse ka peale mõne suurema detaili vahetamist, et veenduda, kas kõik toimib korrektselt. Alles pärast seda saab piirangud maha võtta. Üldjuhul planeeritakse erinevad remondid ja hooldused nõrgema tuulega kuudele, tavaliselt suvekuudele. Tingitult võimsuse piirangutest elektrituulikutes, annab aastane võimsus täpsema ülevaate, kui palju üksik elektrituulik töötas, kui lühema perioodi peale tehtud kokkuvõte.



Joonis 3.5. Elektrituulikute keskmised võimsused

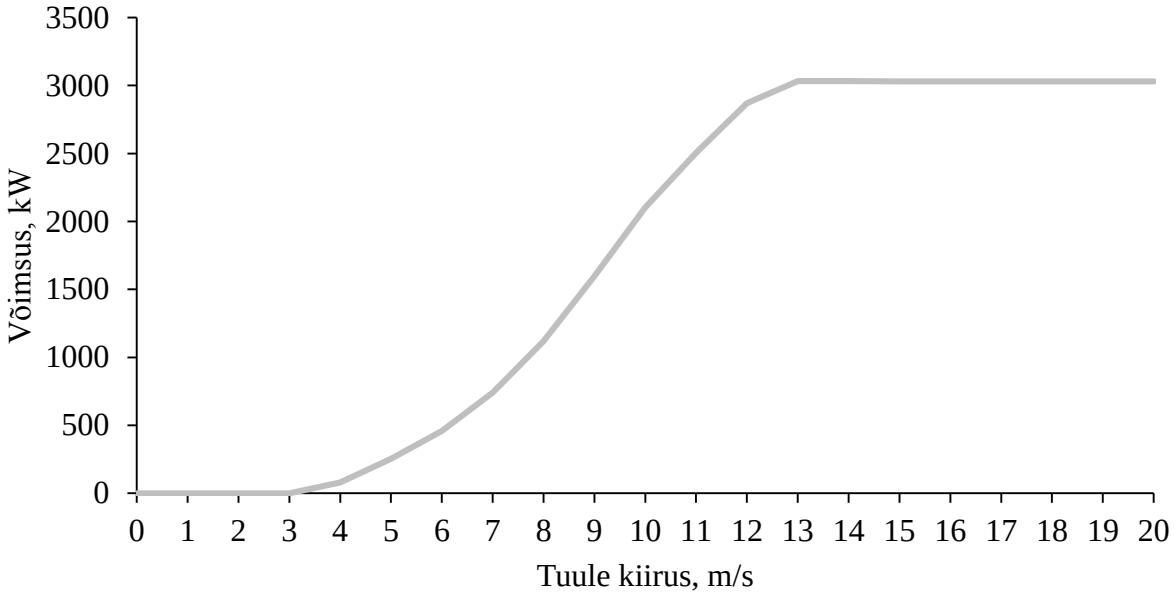
Tuulepargi 2014. aasta keskmised elektrituulikute kasutustegurid (*capacity factor*) on esitatud joonisel 3.6. Tuulepargi keskmine kasutustegur oli 22,5%. Jooniselt on näha, et nende elektrituulikute, mille keskmised võimsused olid (Joonis 3.5) aastas suurimad, on ka aastased kasutustegurid kõige suuremad. Kõige suurem kasutustegur oli elektrituulikutel WT 1 25,8% ja WT 7 25,7%. Kõige kehvema kasutusteguriga olid WT 3 14,9% ja WT 4 18,8%, mis seisid tõenäoliselt erinevate rikete ja remondi tõttu kauem, kui teised elektrituulikud.



Joonis 3.6. Elektrituulikute aastased kasutustegurid

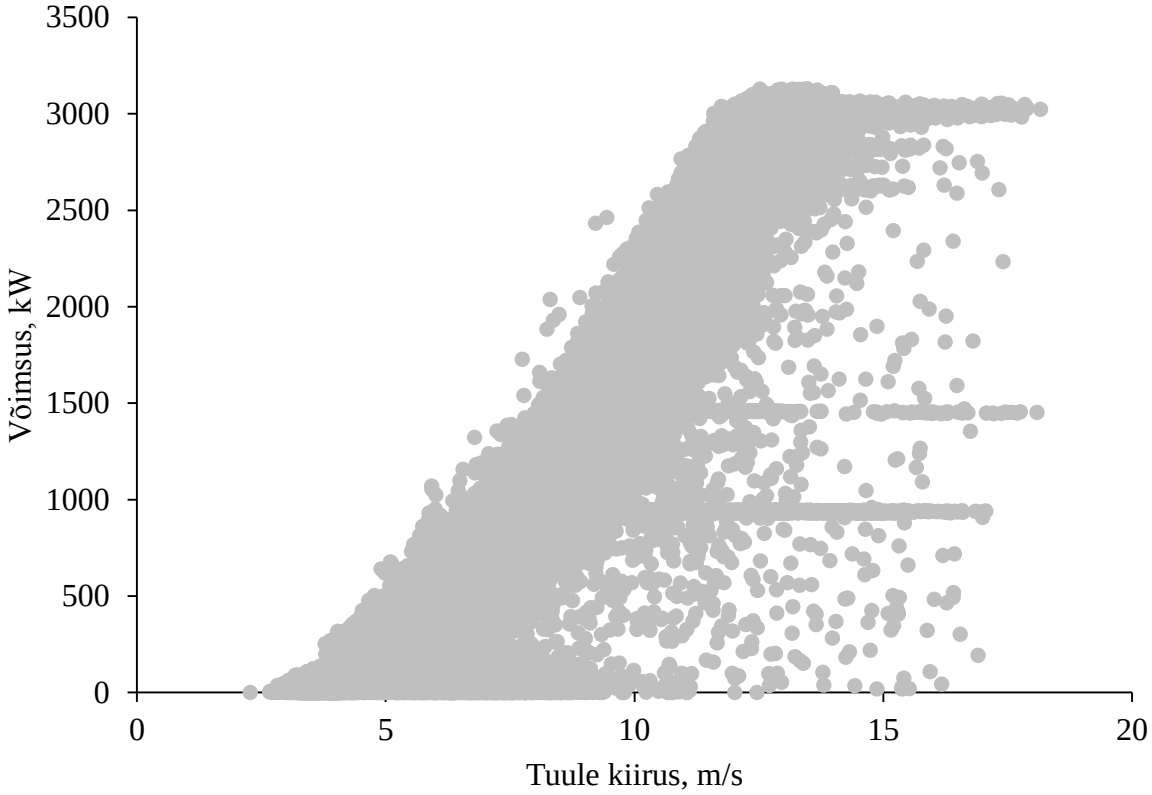
3.4. Elektrituuliku võimsuskõver

Joonisel 3.7 on kujutatud tehaseandmete järgi tuulepargis olevate elektrituulikute võimsuskõver. Võimsuskõver näitab tuule kiiruse ja arendatava võimsuse suhet. Graafikult on näha et antud tüüpi elektrituulikud hakkavad tööle alates tuule kiiruselt 4 m/s ja saavutavad maksimaalse võimsuse tuule kiirusel 12,5 m/s. Elektrituulik lülitatakse välja, kui tuule kiiruse väärtus on üle 20 m/s [41].



Joonis 3.7. Elektrituuliku võimsuskõver [41]

Kogu tuulepargi aastane reaalne võimsuskõver sarnaneb tehasepoolse võimsuskõveraga (Joonis 3.8). Joonisel on hästi välja joonistatud punktid, mille alusel võib välja lugeda, millise võimsuse juures on osadele elektrituulikutele piirangud peale pandud. Näiteks on mõned elektrituulikud töötanud mõnda aega võimsusel 1000 kW ja 1500 kW, kuigi tuulekiirus oleks võimaldanud suuremat võimsust.



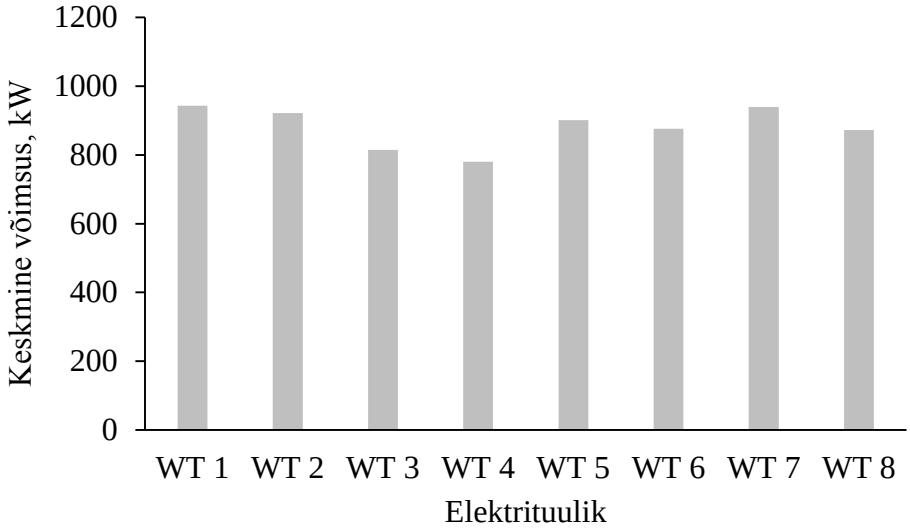
Joonis 3.8. Käesoleva tuulepargi võimsuskõver 2014 aasta andmetega

3.5. Tuule suundade mõju elektrituulikute võimsusele tuulepargis

Tuulepargi aasta keskmine võimsus positiivsete väärtuste korral oli 885,8 kW (mediaan 660,7), mis on tehasepoolsest teoreetilisest maksimaalsest võimalikust 3000 kW-st 29,5%. Keskmise võimsuse arvutamisel ei ole arvesse võetud negatiivseid väärtusi, näiteks kui elektrituuliku omatarve oli suurem toodetavast elektrienergiast ning vajaminev elektrienergia ostetakse elektrivõrgust elektrituuliku rikke tõttu. Elektrituulikute keskmine omatarve oli 20,8 kW.

Tuulepargi 2014. aasta keskmine tuule kiirus positiivsete võimsuse väärtuste korras oli 7,4 m/s. Kuna tuulepargi elektrituulikute negatiivsed võimsused ei ole tingitud ainult riketest, vaid ka tuule puudumisest, siis sellest tingitult on ka keskmine tuule kiirus võimsuse positiivsete väärtuste korral suurem kui kõikide võimsuse andmete korral. Tuule puudumise korral võib elektrituulik kulutada elektrienergiat näiteks kütmiseks või jahutamiseks.

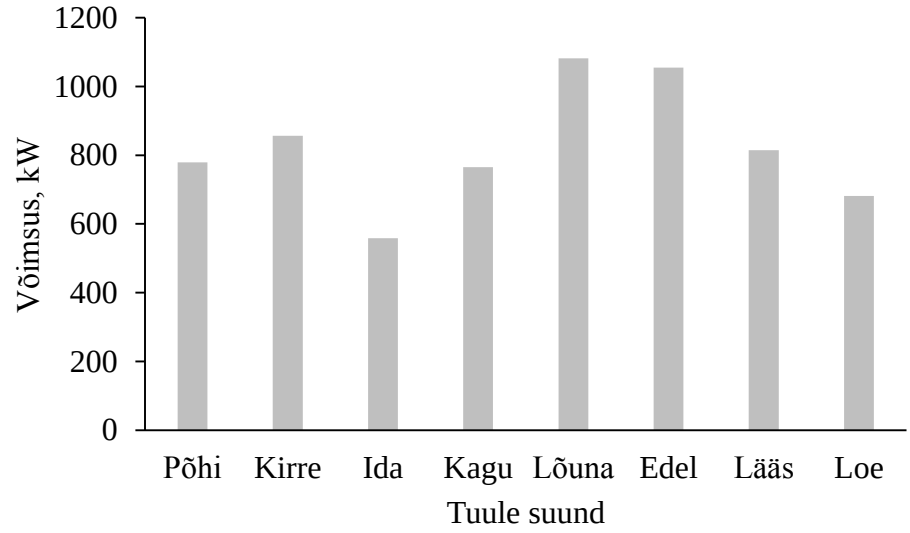
Kui võrrelda elektrituulikute kõikide andmete keskmisi võimsusi positiivsete võimsuse andmete keskmistega (Joonis 3.9), võib märgata, et viimase puhul on võimsuste erinevus erinevate elektrituulikute vahel tunduvalt väiksem. See ongi ilmselt tingitud sellest, et kõikide andmete keskmised võimsused võtavad arvesse elektrituulikute seisakuid.



Joonis 3.9. Elektrituulikute keskmised võimsused positiivsete väärtuste korral

Elektrituulikute võimsused sõltuvad lisaks tuule kiirusest ka tuule suunast, seoses võimaliku varjutuse efektiga. Jooniste 3.1 ja 3.9 põhjal võib oletada, et WT 4 keskmine võimsus on madalam võrreldes teiste elektrituulikutega, kuna see asub tuulepargi keskel ja võib jääda varju. WT 1-l ja WT 2-l ei ole jällegi lõunast ja edelast (peamised tuule suunad) puhuvate tuulte korral mingeid takistusi ning sellest tingitult võivad nende aastased keskmised võimsused olla ka ühed suuremad.

Tuulepargi elektrituulikute keskmised võimsused erinevate tuule suundade korral on esitatud joonisel 3.10. Sellelt on selgelt välja loetav see, et idatuule korral on võimsused väiksemad, kuna idatuult puhus aasta jooksul vähe ja tuuled olid kõige nõrgemad (Joonis 3.2 ja Tabel 3.1).

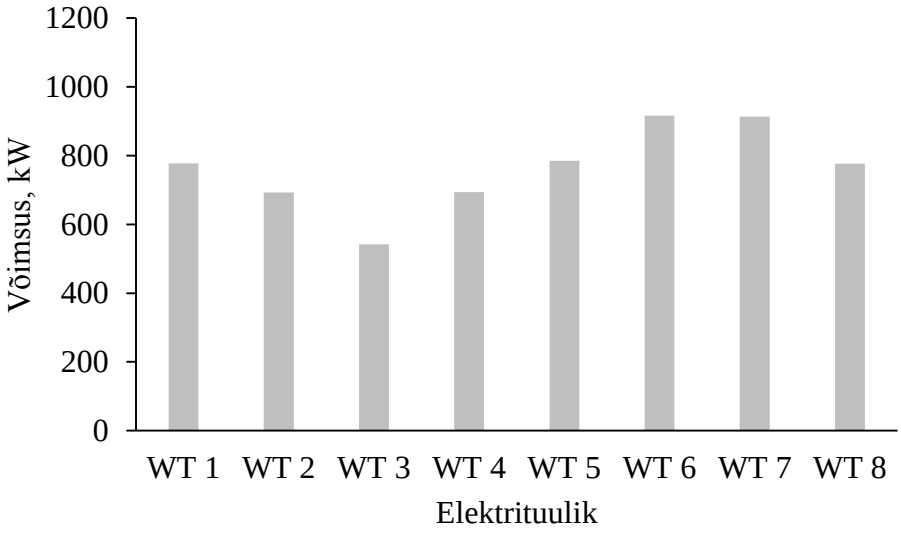


Joonis 3.10. Elektrituulikute keskmised võimsused erinevate tuule suundade korral

Erinevate tuule suundade korral võiks juba enne elektrituulikute võimsuste analüüsimist tuulepargi paigutuse (Joonis 3.1) järgi oletada, mis elektrituulik võiks teisi elektrituulikuid varjama hakata. Järgnevalt on kirjeldatud elektrituulikute võimsusi erinevate tuule suundade korral 2014. aasta andmete põhjal. Graafikud annavad ülevaate, kui palju erinevad elektrituulikute võimsused erinevate tuule suundade korral ning saab teha üldistavaid järeldusi varjutuse efekti kohta. Saamaks parem ülevaade, on otstarbekas vaadata elektrituulikute aasta keskmiste võimsuste jooniseid erinevate tuule suundade korral paralleelsel joonisega 3.1.

Põhjatuul

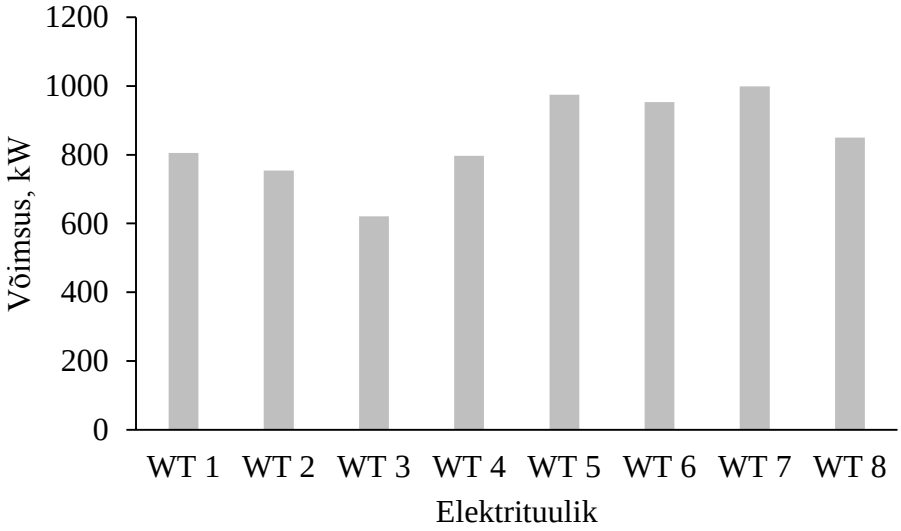
Joonisel 3.11 on kujutatud erinevate elektrituulikute aastased keskmised võimsused põhjatuule korral. On näha, et elektrituulikute aastased keskmised võimsused erinevad. Joonise põhjal võib oletada, et WT 4 jääb WT 5 varju. WT 3 jääb omakorda nende kahe elektrituuliku varju. WT 6 ja WT 7 on tuulepargis kõige põhja poolsemad ning nende kahe elektrituuliku võimsused on põhjatuule korral kõige suuremad võrreldes teistega.



Joonis 3.11. Elektrituulikute aasta keskmised võimsused põhjatuule korral

Kirdetuul

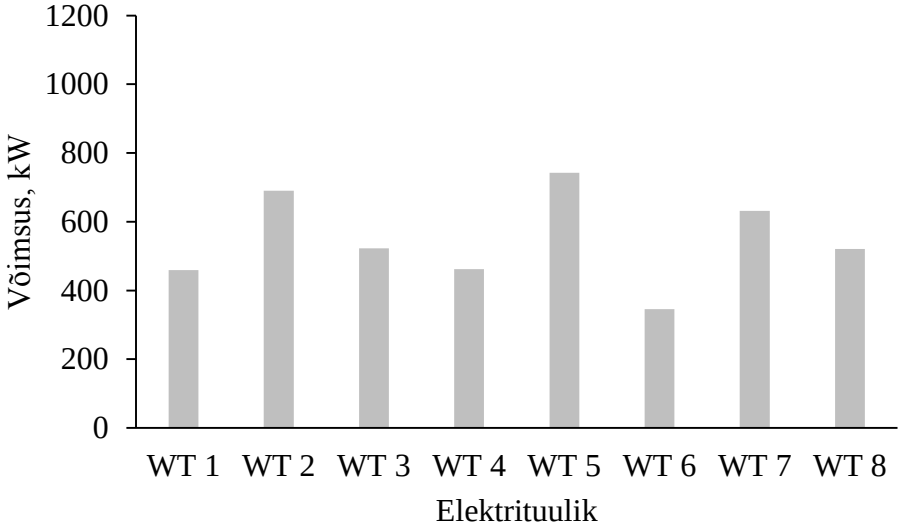
Kirdest puhuva tuule korral on jooniselt 3.12 hästi näha, kuidas tuulepargi seespool asuvate elektrituulikute WT 1, WT 2 ja WT 3 keskmised võimsused on tunduvalt madalamad kui kirdetuulele avatud elektrituulikud WT 5, WT 6 ja WT 7.



Joonis 3.12. Elektrituulikute aasta keskmised võimsused kirdetuule korral

Idatuul

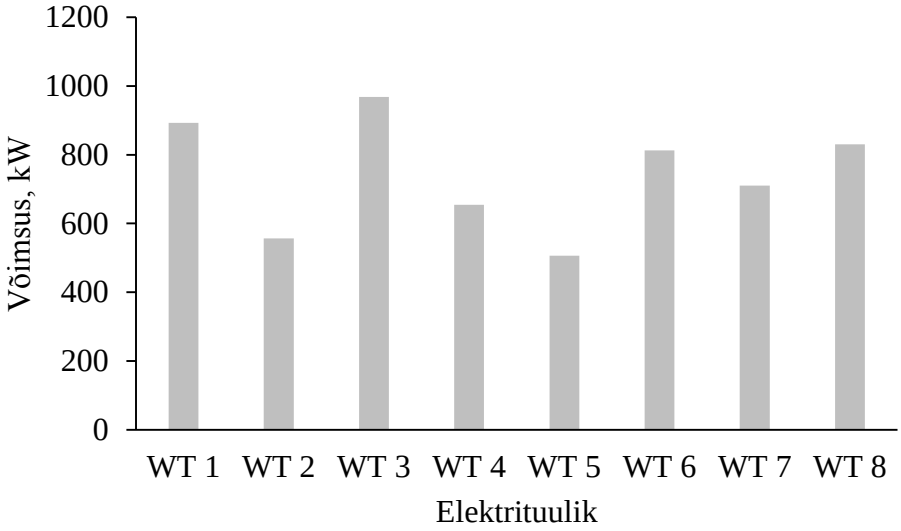
Idatuule korral on suurima võimsusega elektrituulikud WT 2, WT 5 ja WT 7 (Joonis 3.13). WT 6 jääb WT 7 varju, sama võib öelda WT 1 kohta, mis jääb WT 2 varju. WT 6 võimsus on idatuule korral kõige väiksem.



Joonis 3.13. Elektrituulikute aasta keskmised võimsused idatuule korral

Kagutuul

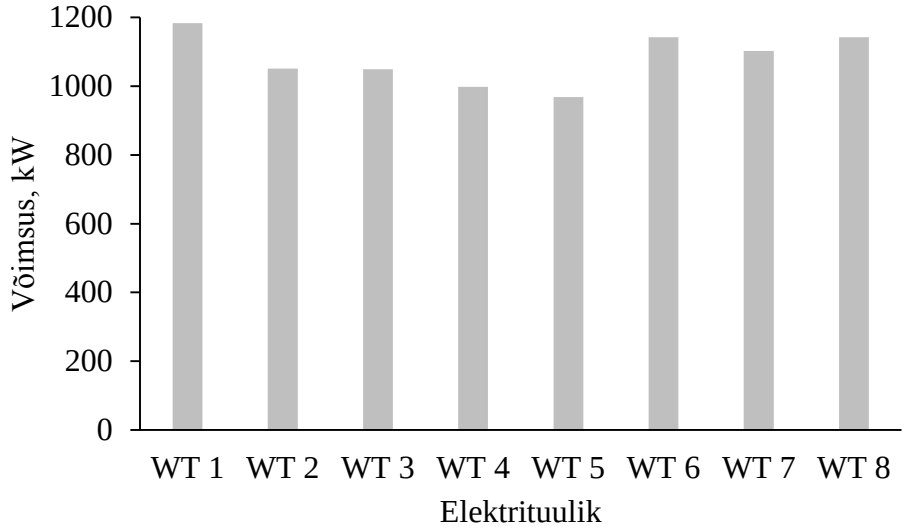
WT 1, WT 3 ja WT 8 võimsused on kõige suuremad kagutuule korral. WT 4 ja WT 5 jäävad kagutuule korral ilmselt WT 3 ja WT 8 varju ning nende keskmised võimsused on madalamad (Joonis 3.14).



Joonis 3.14. Elektrituulikute aasta keskmised võimsused kagutuule korral

Lõunatuul

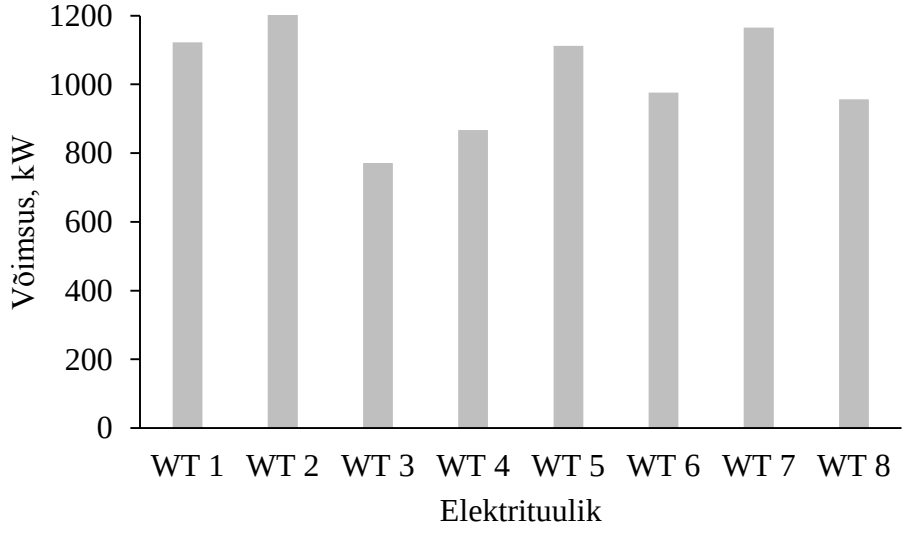
Lõunatuule korral on elektrituulikute keskmised võimsused kõige vähem varieeruvad (Joonis 3.15). 2014 aasta tuuleroosilt (Joonis 3.2) võib näha, et kõige rohkem puhusid tuuled lõunast, mis võib ühtlaste võimsuste põhjuseks olla. Lisaks puhusid lõunast ka kõige tugevamad tuuled (Tabel 3.1). Samas on lõunatuule korral elektrituulikute WT 4 ja WT 5 keskmised võimsused veidi väiksemad teiste elektrituulikute keskmistest võimsustest ning see võib olla tingitud WT 4 ja WT 5 asetusest tuulepargi keskel, kus võib esineda varjutuse efekt.



Joonis 3.15. Elektrituulikute aasta keskmised võimsused lõunatuule korral

Edelatuul

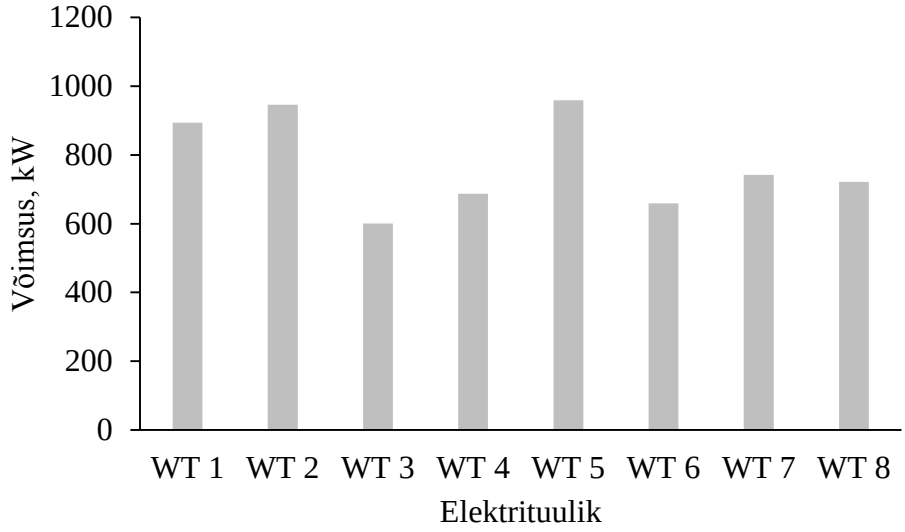
Edelatuule korral on tuulepargis edelas asuvatele elektrituulikutel WT 1 ja WT 2 kõige suuremad võimsused. Keskmised võimsused on ka elektrituulikutel WT 5 ja WT 7 suuremad võrreldes ülejäänud elektrituulikutega (Joonis 3.16).



Joonis 3.16. Elektrituulikute aasta keskmised võimsused edelatuule korral

Läänetuul

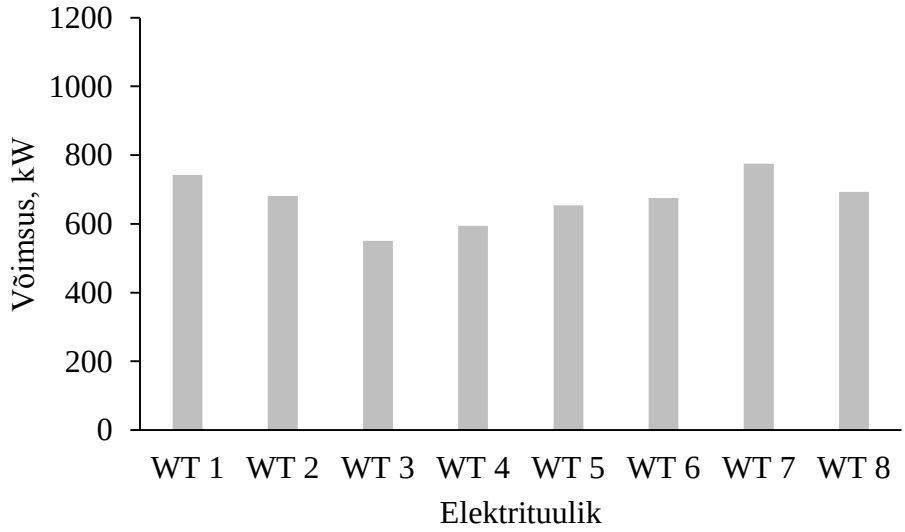
Läänetuule korral on kõige parema koha peal elektrituulikud WT 1, WT 2 ja WT 5 (Joonis 3.17). WT 3 on kõige väiksema võimsusega, kuna võib jääda WT 1 ja WT 2 varju.



Joonis 3.17. Elektrituulikute aasta keskmised võimsused läänetuule korral

Loodetuul

Loodetuule korral on keskmised võimsused sarnased. Kõige väiksem võimsus on WT 3 elektrituulikul, mis asub loodest puhuva tuule korral tuulepargis kõige kaugemal. Kõige suurem võimsus on elektrituulikutel WT 1 ja WT 7 (Joonis 3.18).



Joonis 3.18 Elektrituulikute aasta keskmised võimsused loodetuule korral

Tabelis 3.2 on esitatud elektrituulikute keskmised võimsused teatud tuule suuna korral elektrituuliku keskmisest võimsusest protsendina. Ka selle alusel saab teha järeldusi varjutuse efekti kohta. Põhjatuule korral on WT 3 keskmine võimsus palju madalam, kui sama elektrituuliku üldine keskmine võimsus. WT 3 asub põhja poolt vaadatuna tuulepargi kaugemas

otsas teiste elektrituulikute taga. WT 6 keskmine võimsus põhjatuule korral on vastupidiselt suurem, kui sama elektrituuliku üldine keskmine ning antud elektrituulik on ka kõige põhjapoolsem.

Idatuule korral on kõikide elektrituulikute keskmised võimsused madalamad nende üldisest keskmisest võimsusest. Kõige suurem erinevus on WT 1 ja WT 6 puhul, mis võivad idatuule korral jääda teiste tuulikute varju. Kõige väiksem erinevus on WT 5 puhul, millel puuduvad idapoolsed takistused.

WT 5 keskmine võimsus on aga kagutuule korral palju madalam, kui tema üldine keskmine võimsus. WT 3 keskmine võimsus on kagutuule korral suurem, kui tema üldine keskmine võimsus. Esimese elektrituuliku puhul tekitavad teised elektrituulikud varjutuse efekti, teisel aga takistused puuduvad.

Lõunatuule puhul ületavad kõikide elektrituulikute keskmised võimsuse nende elektrituulikute üldisi keskmisi võimsusi. Varjutus efekt mõjutab kõige enam WT 5 elektrituulikut. Edelatuulega on vaid WT 3 keskmine võimsus madalam kui sama elektrituuliku üldine keskmine võimsus.

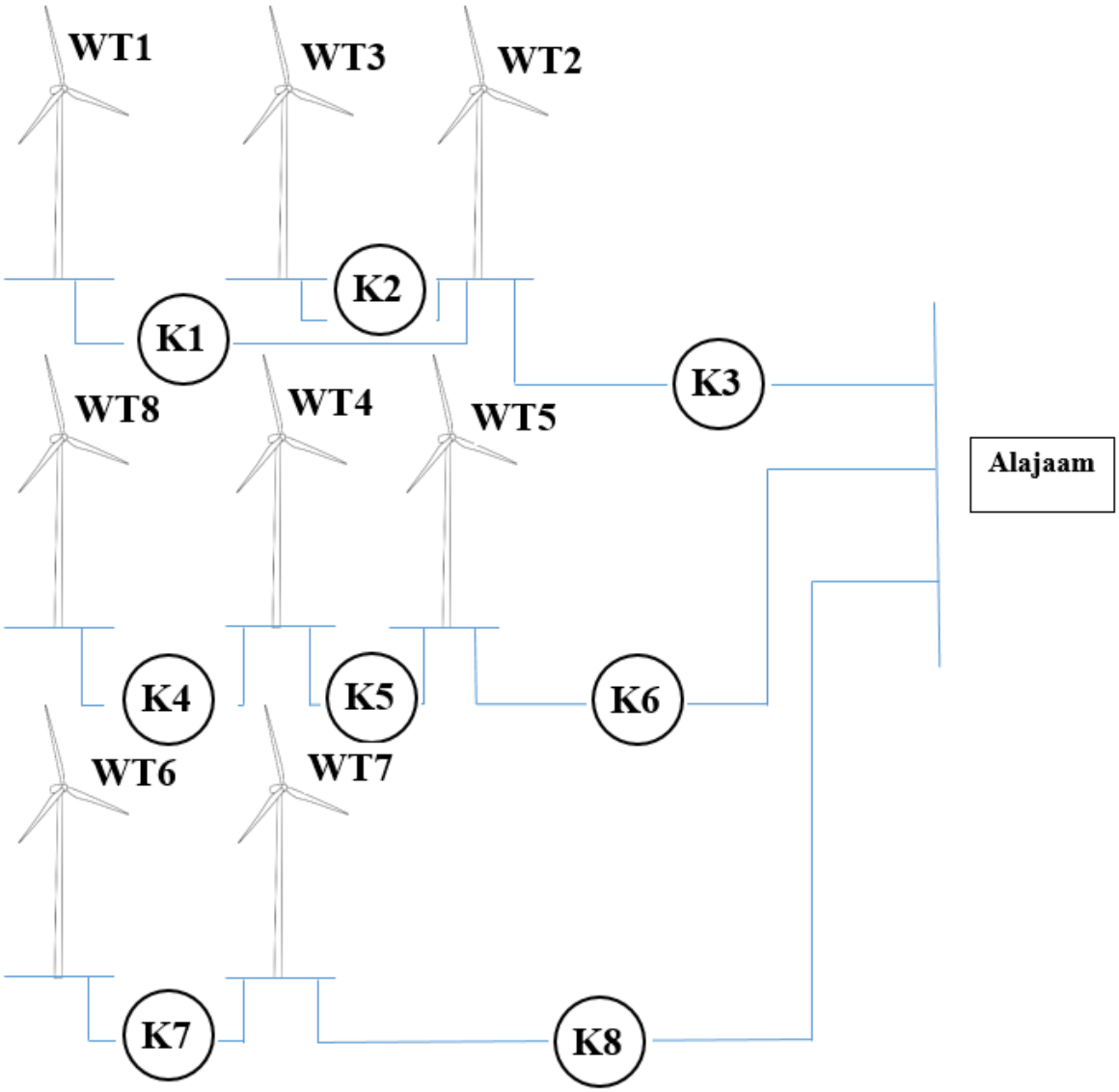
Nii lääne- kui ka loodetuule korral on WT 3 keskmine võimsus palju madalam, kui sama elektrituuliku üldine keskmine võimsus.

Tabel 3.2. Elektrituulikute keskmiste võimsused protsentidena erinevate tuule suundade korral

Elektri-tuulik	**Põhja-tuul**	**Kirde-tuul**	**Ida-tuul**	**Kagu-tuul**	**Lõuna-tuul**	**Edela-tuul**	**Lääne-tuul**	**Loode-tuul**
WT 1	82%	85%	49%	95%	126%	119%	95%	79%
WT 2	75%	82%	75%	60%	114%	134%	103%	74%
WT 3	67%	76%	64%	119%	129%	95%	74%	68%
WT 4	89%	102%	59%	84%	128%	111%	88%	76%
WT 5	87%	108%	82%	56%	107%	123%	106%	73%
WT 6	105%	109%	39%	93%	130%	111%	75%	77%
WT 7	97%	106%	67%	76%	117%	124%	79%	82%
WT 8	89%	97%	60%	95%	131%	110%	83%	79%

3.6. Kaablite koormatus

Elektrituulikute ühenduskaablite pikkused on kokku 10 445 meetrit kuni alajaamani. Tuulepargis kasutatakse keskpinge maakaablit Draka AHXAMK-W 20 kV kahe erineva ristlõikepindalaga, mille täpsemad spetsifikatsioonid on toodud lisas L.1. Kasutusel on 3 × 120 mm^2 ja 3 × 240 mm^2 ristlõikepindalaga ühenduskaablid. 3 × 120 mm^2 kaablite pikkus on kokku 2327 meetrit ja 3 × 240 mm^2 8118 meetrit. Tuulepargi kaabelliinide elektriline skeem on esitatud lisas L.2. Tuulepargi kaabelliinide paigutuse põhimõtteline skeem on Joonisel 3.19 ning kaabelliinide andmed on kirjeldatud tabelis 3.2. Tuulepargis on kokku kaheksa erinevate elektrituulikutega ühendatud kaabelliini lõiku, mis on nimetatud K1–K8.



Joonis 3.19. Tuulepargi kaabelliini põhimõtteline skeem

Tabel 3.3. Elektrituulikute kaabelliinide detailid

Punkt	Ristlõikepindala, mm^2	Pikkus, m	Ühendatud elektrituulikutega
K1	3 × 120	567	WT1
K2	3 × 120	538	WT3
K3	3 × 240	3222	WT1+WT3+WT2
K4	3 × 120	793	WT8
K5	3 × 240	1036	WT8+WT4
K6	3 × 240	1824	WT8+WT4+WT5
K7	3 × 120	429	WT6
K8	3 × 240	2036	WT6+WT7

Valemi 3.1 abil saab arvutada võimsuse. Selle valemi alusel saab tuletada valemi 3.2. Elektrituulikute võimsuste andmete põhjal saab valemi 3.2 abil arvutada kaablit läbivate voolude väärtused. Kaabli maksimaalselt lubatava voolu väärtused on võetud Draka keskpinge kaabli AHXAMK-W tootekataloogist, mis on esitatud tabelis 3.4. 3 × 120 mm^2 ristlõikepindalaga kaabli teoreetiline maksimaalne lubatud vool pinnasesse paigaldades elektrijuhi temperatuuril 65° C on 265 A ning 3 × 240 mm^2 kaablil on antud väärtus 385 A. Maksimaalselt lubatud voolud kehtivad järgmistel tingimustel: maksimaalne elektrijuhi temperatuur 90° C, pinnase temperatuur 15° C, õhutemperatuur 25° C, maapinna termiline takistus 1,0°K m/W, paigaldussügavus 0,65 m, sagedus 50 Hz [25].

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot cos\varphi \tag{3.1}$$

kus P – võimsus, kW;

U – pinge, V;

I – vool, A;

cosφ – võimsustegur.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot cos\varphi} \tag{3.2}$$

kus I – vool, A;

P – võimsus, kW;

U – pinge, V;

cosφ – võimsustegur.

Tabel 3.4. Kaablite maksimaalsed lubatud voolud [25]

Juhtmete arv x ristlõike pindala, mm²	**Lubatav vool pinnases juhi temperatuuril 65°C, A**
3 × 50AL+35CU	155
3 × 70AL+35CU	200
3 × 95AL+35CU	235
3 × 120AL+35CU	265
3 × 150AL+35CU	300
3 × 185AL+35CU	330
3 × 240AL+35CU	385
3 × 300AL+70CU	435

Tuulepargi ühe elektrituuliku maksimaalne võimsus on 3000 kW. Sellest tulenevalt on voolu suuruseks elektrituuliku ühenduskaablis 86,6 A (Valem 3.3).

$$I = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 1} = 86{,}6\ A \tag{3.3}$$

Selle arvutuse järgi võiks kasutada ühe elektrituuliku alajaamaga ühendamiseks kaablit ristlõikepindalaga 3 × 50 mm², mille maksimaalne lubatud vool on 155 A. Tuulepargis on elektrituulikud omavahel radiaalliini skeemi kohaselt ühendatud, mida on täpsemalt kirjeldatud eespool olevas peatükis 1.4. Ükski elektrituulik ei ole tuulepargis alajaamaga ühendatud üksiku liinina. Kui ühes harus on mitu elektrituulikut, siis nende võimsused summeeruvad.

Kaabelliini kaod sõltuvad oluliselt kaabli ristlõikepindala valikust. Näiteks, vale ristlõikepindala valikul võib kaabel olla koormatud 100% või rohkem ja seetõttu tekib palju rohkem kadusid kui väiksema koormatuse puhul.

Tabelis 3.5 on toodud tuulepargi ühenduskaablite teoreetiline maksimaalne võimsus ning võrdluseks on toodud, kui palju olid tegelikud 2014. aasta keskmised võimsused. Tabelis on esitatud kaablite kasutamine maksimaalsest võimsusest protsentides. Aastane keskmine võimsus kaabelliinidel jääb 15–26% vahele.

Tabelis 3.6 on esitatud kaabelliinide maksimaalselt lubatud voolud. Selle järgi on näha, et kõik kaablid on valitud piisava varuga.

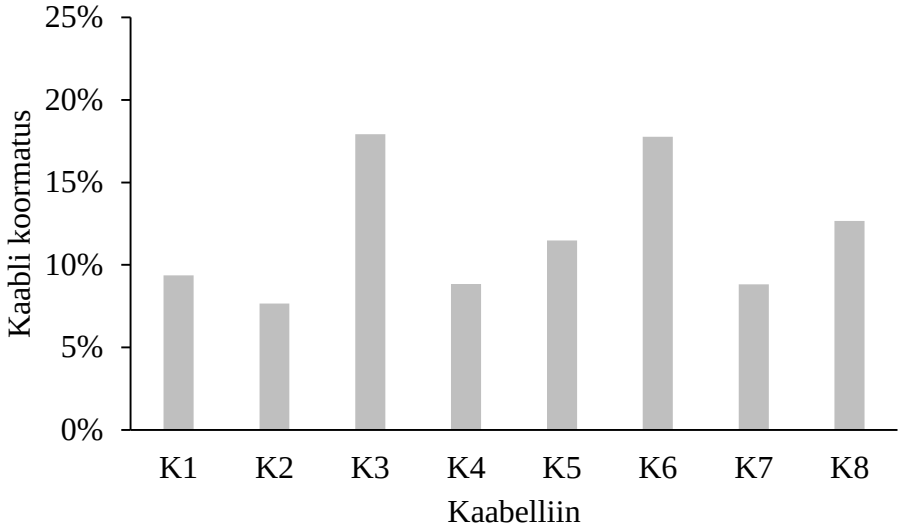
Tabel 3.5. Kaabelliinide võimsused

Punkt	Teoreetiline maksimaalne võimsus, kW	Maksimaalne reaalne võimsus, kW	Keskmine võimsus aastas, kW	Protsentuaalne kasutamine maksimaalsest võimsusest
K1	3000	3043,1	859,8	28,7%
K2	3000	3026,3	703,2	23,4%
K3	9000	8915,7	2389,4	26,5%
K4	3000	3091,4	811,5	27,0%
K5	6000	5912,4	1531,0	25,5%
K6	9000	7989,7	2368,5	26,3%
K7	3000	3068,1	810,3	27,0%
K8	6000	6106,7	1690,1	28,2%

Tabel 3.6. Kaabelliinide maksimaalsed võimalikud voolud

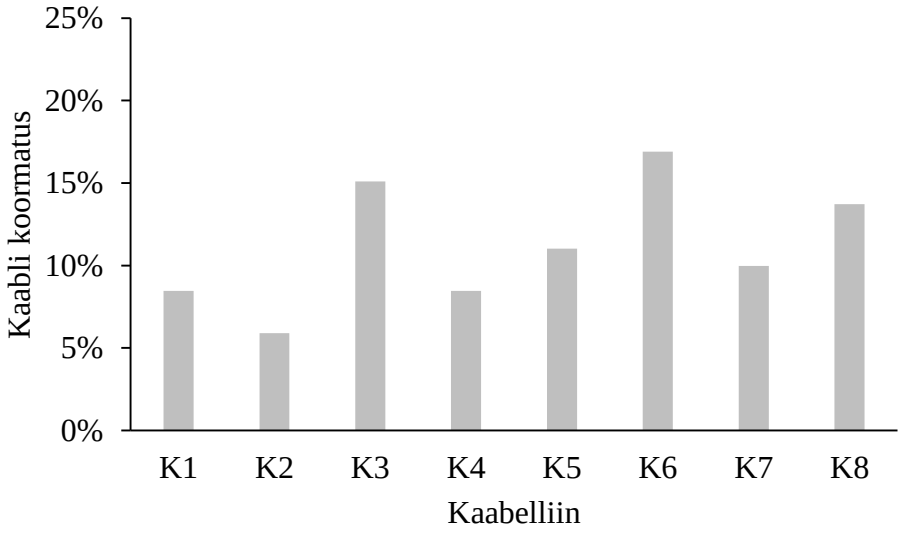
Punkt	Maksimaalne võimalik vool, A	Kaabli lubatud maksimaalne vool, A	Reaalne maksimaalne vool, A
K1	86,6	265	87,8
K2	86,6	265	87,4
K3	259,8	385	257,4
K4	86,6	265	89,2
K5	173,2	385	170,7
K6	259,8	385	230,6
K7	86,6	265	88,6
K8	173,2	385	176,3

Erinevate ühenduskaablite koormatuse võrdlemisel tuleb arvesse võtta, millise ristlõikepindalaga kaablid on kasutusel ja kui mitme elektrituuliku poolt toodetud võimsus seda ühenduskaablit läbib. Omavahel on võrreldavad ühenduskaablid K1, K2, K4 ja K7, mida läbivad ühe elektrituuliku poolt toodetud võimsus. K5 ja K8 ühenduskaablite ristlõikepindala on 3×240 mm^2 ja neid läbivad kahe elektrituuliku poolt toodetud võimsused. Kolme elektrituuliku poolt toodetud võimsused läbivad ühenduskaableid K3 ja K6. Viimased ongi kõige paremini koormatud ühenduskaablid. Joonisel 3.20 on toodud kogu tuulepargi kaabelliinide keskmine koormatus ning joonistel 3.21–3.28 on toodud tuulepargi kaabelliinide keskmised koormatused ilmakaarte lõikes. Ühenduskaablid on keskmiselt koormatud 4%-st idatuule korral kuni 25%-ni lõunatuule korral.

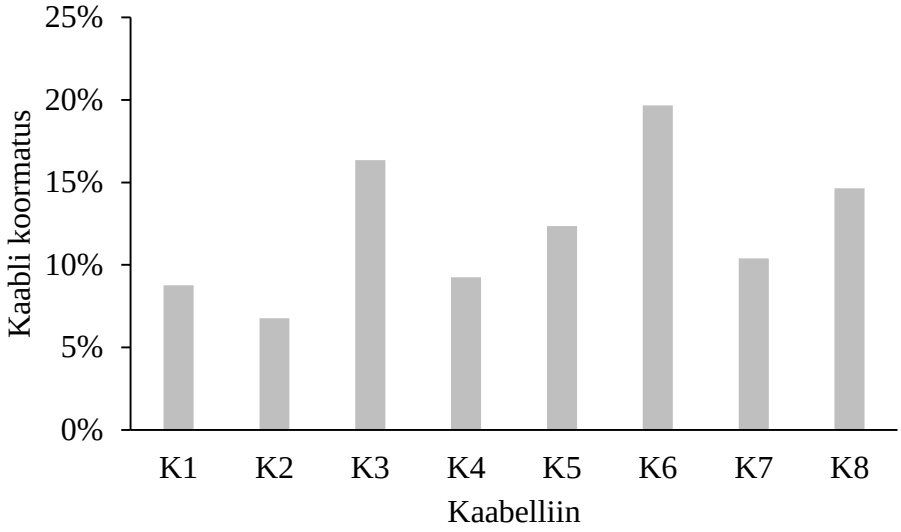


Joonis 3.20. Tuulepargi kaabelliinide aastane keskmine koormatus

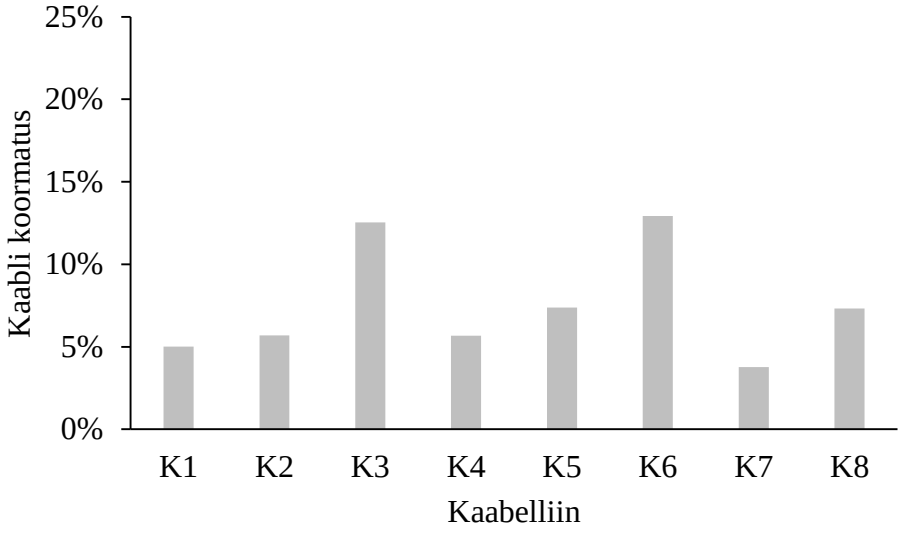
Nende ühenduskaablite, mida läbivad ühe elektrituuliku poolt toodetud võimsused, mustrid seoses tuulesuunaga on sarnased elektrituulikute keskmiste võimsustega. Lisaks on need ühenduskaablid kõige vähem koormatud. 3 × 240 mm^2 ristlõikepindalaga kaabelliine läbivad nii kahe kui ka kolme elektrituuliku poolt toodetud võimsus. Joonistelt on näha, et need ühenduskaablid, mida läbivad kolme elektrituuliku poolt toodetud võimsus on tunduvalt paremini koormatud, kui need, mida läbivad kahe elektrituuliku poolt toodetud võimsus.



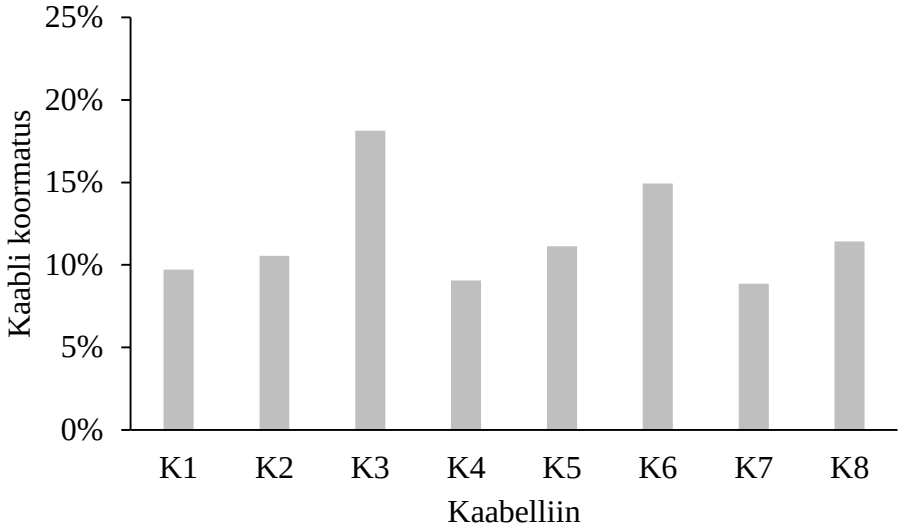
Joonis 3.21. Tuulepargi kaabelliinide aastane keskmine koormatus põhjatuule korral



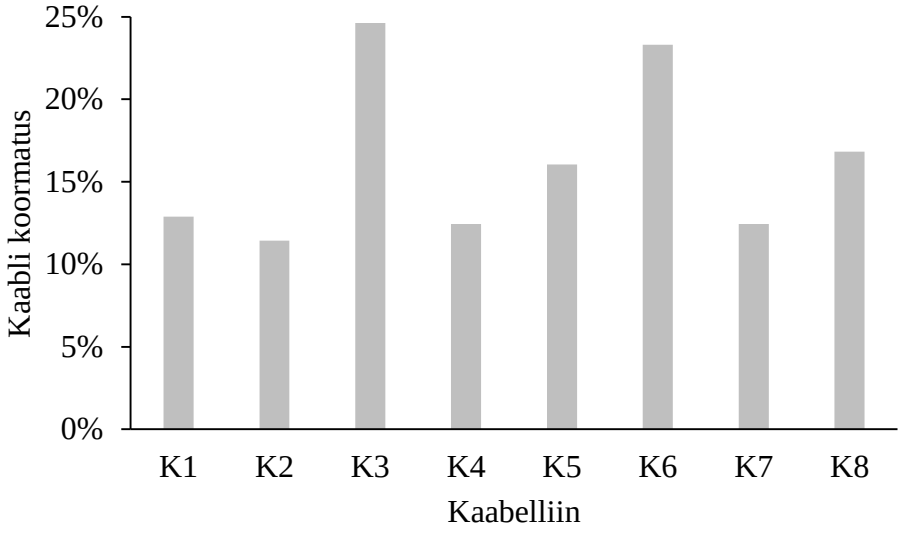
Joonis 3.22. Tuulepargi kaabelliinide aastane keskmine koormatus kirdetuule korral



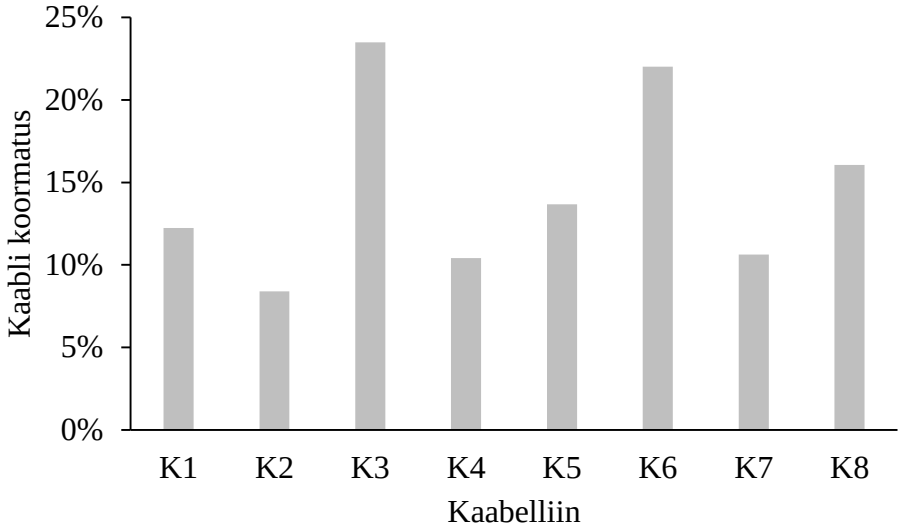
Joonis 3.23. Tuulepargi kaabelliinide aastane keskmine koormatus idatuule korral



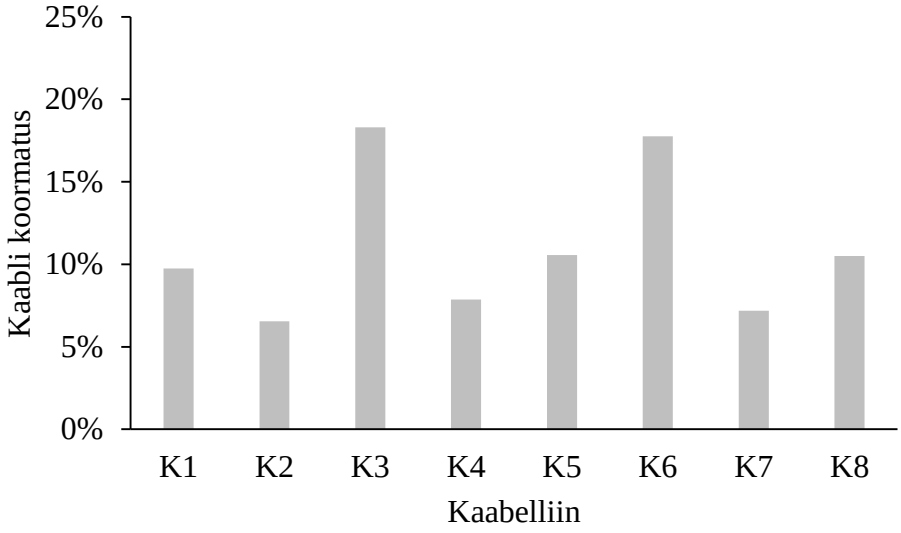
Joonis 3.24. Tuulepargi kaabelliinide aastane keskmine koormatus kagutuule korral



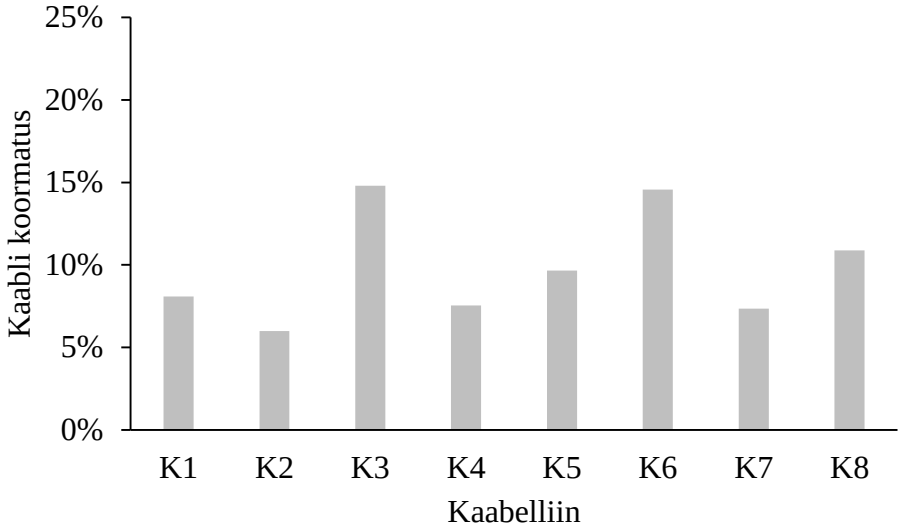
Joonis 3.25. Tuulepargi kaabelliinide aastane keskmine koormatus lõunatuule korral



Joonis 3.26. Tuulepargi kaabelliinide aastane keskmine koormatus edelatuule korral

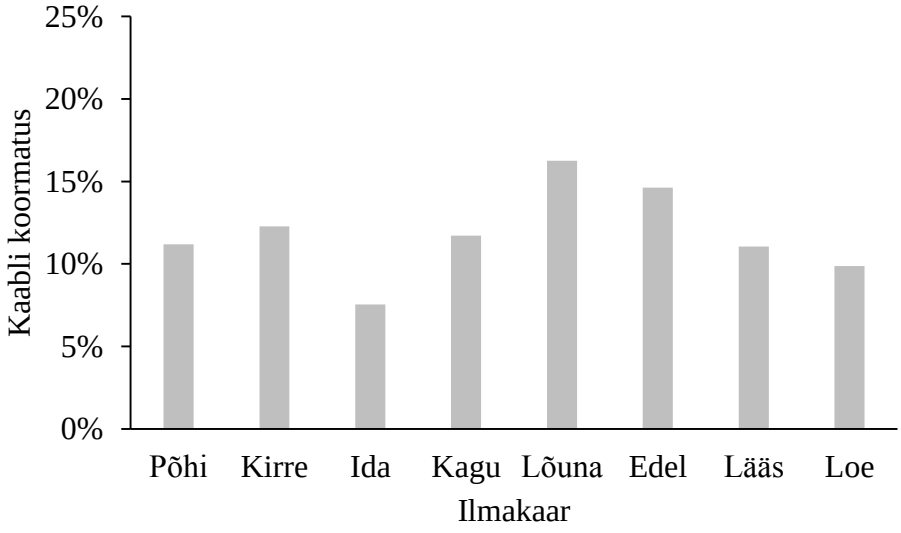


Joonis 3.27. Tuulepargi kaabelliinide aastane keskmine koormatus läänetuule korral



Joonis 3.28. Tuulepargi kaabelliinide aastane keskmine koormatus loodetuule korral

Tuulepargi kaabelliinide aastane keskmine koormatus erinevate tuule suundade korral on jällegi tulenevalt elektrituulikute keskmisest võimsusest erinevate tuule suundade korral suurem lõuna- ja edelatuule puhul (Joonis 3.29).



Joonis 3.29. Tuulepargi kaabelliinide aastane keskmine koormatus erinevate tuule suundade korral

Kaabelliinid töötasid 2014. aastal kokku keskmiselt 7085 tundi. Kaabelliine läbis peamiselt vool tugevusega 0–30 A. Ristlõikepindalaga 3 × 120 mm^2 ühenduskaableid läbis vool tugevusega 60–90 A keskmiselt 616 tundi. Ristlõikepindalaga 3 × 240 mm^2 ühenduskaableid läbis vool tugevusega 150–180 A keskmiselt 173 tundi. Vool vahemikus 240–270 A läbis ühenduskaableid aasta jooksul keskmiselt 70 tundi. Kaabelliine läbivad tugevamad voolud jällegi lõuna- ja

edelatuule korral. Tuulepargi kaabelliinide aastased koormuse kestvused tundides ilmakaarte lõikes on toodud tabelis 3.7.

Tabel 3.7. Tuulepargi kaabelliinide aastased koormuse kestvused tundides sõltuvalt tuule suunast

Vool, A	Põhja-tuul, h	Kirde-tuul, h	Ida-tuul, h	Kagu-tuul, h	Lõuna-tuul, h	Edela-tuul, h	Lääne-tuul, h	Loode-tuul, h	Kokku, h (%)
K1									
0–30	399	477	579	656	803	802	548	413	4677 (63,2)
30–60	96	141	63	220	610	449	219	80	1878 (25,3)
60–90	69	65	6	84	272	247	70	42	855 (11,5)
Kokku	564	683	648	960	1685	1498	837	535	7410
K2									
0–30	262	301	428	571	865	767	475	303	3972 (80,2)
30–60	8	35	32	50	285	171	31	22	634 (12,8)
60–90	3	17	3	20	176	114	10	4	347 (7,0)
Kokku	273	353	463	641	1326	1052	516	329	4953
K3									
0–30	311	348	391	388	432	372	397	274	2913 (38,3)
30–60	78	139	177	203	271	309	147	105	1429 (18,8)
60–90	60	76	80	158	265	243	116	53	1051 (13,8)
90–120	40	75	28	85	269	178	86	43	804 (10,5)
120–150	45	33	9	70	177	145	55	24	558 (7,3)
150–180	28	13	8	38	141	108	21	24	381 (5,0)
180–210	7	23	4	22	96	95	24	13	284 (3,7)
210–240	1	10	-	11	37	40	4	-	103 (1,4)
240–270	-	-	-	6	47	32	3	-	88 (1,2)
Kokku	570	717	1417	981	1735	1522	853	536	7611
K4									
0–30	386	487	608	677	845	888	619	410	4920 (66,7)
30–60	109	151	76	194	635	391	159	79	1794 (24,3)
60–90	51	74	10	65	219	170	40	35	664 (9,0)
Kokku	546	712	694	936	1699	1449	818	524	7378
K5									
0–30	352	363	455	505	558	588	483	340	3644 (48,6)
30–60	80	141	181	213	397	392	181	95	1680 (22,4)
60–90	46	113	35	145	366	269	136	42	1152 (15,4)
90–120	37	59	19	79	238	150	35	26	643 (8,6)
120–150	33	28	7	7	108	58	5	17	263 (3,5)
150–180	7	13	-	3	51	30	2	3	109 (1,5)
Kokku	555	717	697	952	1718	1487	842	523	7491
K6									
0–30	280	301	331	365	449	383	344	298	2751 (36,4)
30–60	98	124	180	218	274	328	181	89	1492 (19,7)
60–90	38	67	111	131	253	238	120	43	1001 (13,3)
90–120	42	67	45	91	250	177	83	31	786 (10,4)
120–150	33	59	13	76	203	148	66	19	617 (8,2)
150–180	24	55	12	36	132	102	45	24	430 (5,7)
180–210	24	24	8	37	97	75	3	13	281 (3,7)
210–240	24	22	1	5	44	33	3	8	140 (1,9)
240–270	3	1	-	-	26	21	1	-	52 (0,7)
Kokku	566	720	701	959	1728	1505	846	525	7550
K7									
0–30	388	409	546	598	713	742	577	419	4392 (65,6)
30–60	107	168	58	166	578	388	168	70	1703 (25,4)
60–90	61	103	16	25	176	162	15	40	598 (9,0)
Kokku	556	680	620	789	1467	1292	760	529	6693

Tabel 3.7. Tuulepargi kaabelliinide aastased koormuse kestvused tundides sõltuvalt tuule suunast (jätk)

Vool, A	Põhja-tuul, h	Kirde-tuul, h	Ida-tuul, h	Kagu-tuul, h	Lõuna-tuul, h	Edela-tuul, h	Lääne-tuul, h	Loode-tuul, h	Kokku, h (%)
K8									
0–30	320	351	441	556	603	471	443	308	3493 (46,0)
30–60	90	107	154	191	377	409	221	124	1673 (22,0)
60–90	42	95	57	128	340	320	138	59	1179 (15,5)
90–120	57	71	19	41	212	150	43	20	613 (8,1)
120–150	36	53	12	24	139	97	8	33	402 (5,3)
150–180	34	48	3	5	57	71	4	14	236 (3,1)
Kokku	579	725	686	945	1728	1518	857	558	7596

Lõputöö kokkuvõte

Tuuleenergeetika areng on Eestis jätkuvalt kasvavas trendis nii uute tuuleparkide rajamise kui ka kodutarbijate näol. Eesti asub geograafiliselt soodsas kohas, kus puhuvad elektrienergia tootmiseks piisavalt tugevad tuuled. Meil on pikk rannajoon ning meres leiab sobilikke kohti tuuleparkide rajamiseks. Selline energia tootmise viis on keskkonnasõbralikum võrreldes fossiilsete kütuste kasutamisega.

Käesoleva magistritöö ülesanne oli analüüsida ühe Eestis asuva tuulepargi tuule suuna mõju elektrituulikute võimsusele ja ühenduskaablite koormatusele sõltuvalt elektrituulikute paigutusest. Selleks analüüsiti ühe Eesti tuulepargi 2014. aasta tuule suuna, tuule kiiruse ja elektrituuliku võimsuse andmeid.

Tuulepargis on kokku kaheksa elektrituulikut ning nende ühendamiseks on kasutatud AHXAMK-W 20 kV keskpinge maakaablit. Elektrituulikute kaabelliinid on ühendatud radiaalvõrgu skeemi kohaselt. Kasutatud on kahe erineva ristelõikepindalaga kaablit: 3 × 120 mm^2 pikkusega kokku 2327 m ja 3 × 240 mm^2 pikkusega kokku 8188 m. Varasemates töödes on välja toodud, et tuulepargis ei ole mõistlik kasutada liiga palju erinevate ristlõikepindaladega kaableid [42].

Vaadeldavas tuulepargis olid valdavateks tuule suundadeks lõuna- ja edelatuuled. Sarnane tulemus on saadud ka varasemalt 2009. aastal tehtud Eesti tuuleparke analüüsivas töös [28]. Nende tuulte korral olid ka elektrituulikute keskmised võimsused kõige suuremad. Neid tulemusi saab arvestada, kui plaanitakse rajada uus tuulepark samasse piirkonda. Samas tehakse tavaliselt uue tuulepargi rajamisel erinevad mõõtmised, nende seas tuule suund ja kiirus.

Kogu tuulepargi kõige suuremad keskmised võimsused esinesid lõuna- ja edelatuulega ning kõige väiksemad keskmised võimsused olid ida- ja loodetuulega. Lõuna- ja idatuulte keskmise võimsuste vahe oli 523 kW. Kui võrrelda seda arvu tuulepargi aastase keskmise võimsusega (886 kW), on see vahe väga suur.

Magistritöö analüüsi tulemustest saab järeldada, et tuule suunad mõjutavad elektrituulikute võimsust. On näha, et osade tuule suundade korral on tuule puhumise suunast eespool asetsevatel elektrituulikute võimsused suuremad võrreldes tagumiste elektrituulikutega. Võib järeldada, et see on tingitud elektrituulikute üksteise varjutuse efektist. Näiteks oli elektrituuliku WT 3 võimsused teiste elektrituulikutega võrreldes tunduvalt väiksemad edela-, lääne-, loode ja põhjatuulte korral, kuna asub tuulepargi kagupool ja nimetatud tuulte korral tekib varjutuse efekt

teiste elektrituulikute poolt. WT 6 võimsused on vastupidiselt ühed suuremad võrreldes teiste elektrituulikutega põhja-, kirde-, lõuna- ja edelatuule korral. Nendel puhkudel puuduvad takistused teiste elektrituulikute näol. Idatuule korral on samal elektrituulikul aga kõige madalam võimsus, kuna jääb WT 7 varju.

Varjutusee efekt mõjutab otseselt elektrituulikute ja sealt edasi tuulepargi toodangut ning see omakorda tuulepargi omanike majanduslikke tulemusi.

Elektrituulikute üksteise varjamisega seotud probleeme on pärast tuulepargi rajamist praktiliselt võimatu muuta. Ainuke võimalus on elektrituulikud teisaldada uude sobivamasse asukohta. Tuuleparkide rajamiseks eraldatavad maa-alad on üldiselt piiratud ning maksimaalse toodangu huvides tuleb leida kompromiss elektrituulikute arvu ja asukoha suhtes. Teinekord on võib-olla kasulikum paigaldada üks elektrituulik tuuleparki rohkem, kuigi on teada, et see võib hakata teist elektrituulikut varjama. Varjutuse efekt ei pruugi mõjutada elektrituuliku toodangut palju, kui see on tingitud tuule suunast, mida esineb aasta lõikes kõige harvem.

Kuna käesolevas töös analüüsitud tuulepargi võimsused erinevad kõige vähem lõuna- ja edelatuule korral, siis võib eeldada, et selle tuulepargi rajamisel võeti arvesse fakti, et edela- ja lõunatuuled on aastas kõige sagedasemad ja kõige tugevamad. Nende tuulte korral esineb elektrituulikute varjamist üsna vähesel määral.

Elektrituulikute kaabelliine läbivad koormused sõltuvad otseselt elektrituulikute poolt genereeritavast võimsusest. Kaabelliinide koormatused sõltuvad seega ka tuule suundadest ning mitme ja milliste elektrituulikutega kaabelliin on ühendatud. Kuna elektrituulikute võimsused erinesid erinevate tuule suundade korra, siis sellest tulenevalt erinesid ka kaabelliinide koormatused. Lisaks olenes kaabelliinide koormatus kaabli tehnilistest parameetritest ja sellest, mitu elektrituulikut oli ühendatud antud kaabelliiniga.

Kaabelliinide kaod on seda väiksemad, mida vähem nad koormatud on [27]. Magistritöös analüüsitava tuulepargi kaabelliinide aastane keskmine koormatus maksimaalsest lubatavast voolust kaablites oli 12%. Kaabelliinid olid ühes aastas ajaliselt koormatud keskmiselt 7085 tundi. Ajaliselt läbis kaabelliine rohkem väiksemad voolud vahemikus 0–30 A. Selles vahemikus vool läbis kaabelliine keskmiselt 3845 tundi. Tulenevalt lõuna- ja edelatuulte sagedusest ja kiirusest, läbis kaabelliine suurem vool just nende ilmakaartega. Näiteks läbis lõunatuule korral 3×120 mm^2 ristelõikepindalaga kaablit vool vahemikus 60–90 A keskmiselt 210 tundi aastas.

Töö nõrkused

Käesoleva töö üldistatavust võib vähendada tõsiasi, et töö oli pigem kirjeldav ja ei kasutatud statistilisi mudeleid. Töös ei analüüsitud kuidas muutub tuule kiirus tuulepargi piires ja kuidas see omakorda mõjutab elektrituulikute võimsust. Üheks miinuseks oli tuulepargi analüüsi juures elektrituulikute rikete ja võimsuspiirangute mitte arvestamine. Nende kohta puudusid töö autoril täpsed andmed. Lisaks ei arvestatud magistritöös elektrituulikute omavahelisi kaugusi ja kaabelliinide pikkuseid.

Töö tugevused

Lõputöö plussideks oli detailsete ühe aasta tuulepargi lähteandmete olemasolu. See võimaldas esitada kirjeldavaid statistikuid erinevate ilmakaarte ja elektrituulikute lõikes. Detailselt kirjeldati elektrituulikute kaabelliinide ajalist kasutamist.

Ettepanekud edasisteks uuringuteks

Magistritöö autori hinnangul saaks varjutuse efekti mõju Eesti tuuleparkides täpsemalt ja põhjalikumalt edasi uurida tuulepargi läheduses paigaldatavate mõõteseadmete andmete põhjal. Kaablite koormatuse täpsemaks analüüsiks võiks arvesse võtta kaabelliinides tekkivaid kadusid. Huvitav oleks võrrelda ka erinevaid varjamise arvutusmudeleid ja tuuleparkide modelleerimise tarkvarasid olemasolevate tuuleparkide andmete põhjal.

Kasutatud kirjandus

[1] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium. "Eesti taastuvenergia tegevuskava aastani 2020". [Võrgumaterjal].
Kättesaadav: https://www.mkm.ee/sites/default/files/taastuvenergia_tegevuskava.pdf. [Kasutatud: 24.03.2015].

[2] Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon. [Võrgumaterjal].
Kättesaadav: http://www.tuuleenergia.ee/. [Kasutatud: 25.03.2015].

[3] Nelja Energia AS. [Võrgumaterjal].
Kättesaadav: http://www.4energia.ee/. [Kasutatud: 14.04.2015].

[4] Elering AS. "Eleringi Infokeskus". [Võrgumaterjal.
Kättesaadav: http://elering.ee/taastuvenergia-moodustas-2014-aastal-148-protsenti-elektri-kogutarbimisest/. [Kasutatud: 17.04.2015].

[5] The European Wind Energy Association. "Wind in Power 2014 statistics". [Võrgumaterjal].
Kättesaadav: http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-Annual-Statistics-2014.pdf. [Kasutatud: 02.05.2015].

[6] World Wind Energy Association. "Statistics". [Võrgumaterjal].
Kättesaadav: http://www.wwindea.org/information-2/information/. [Kasutatud: 26.04.2015].

[7] N. Moskalenko, K. Rudion, A. Orths. "Study of wake effects for offshore wind farm planning". Mod Electr Power Syst. 1–7. 2010.

[8] K. Põiklik. Üld- ja agrometeoroloogia. Tallinn: Eesti Raamat. 1964.

[9] M. Jürissaar. Meteoroloogia. Tartu: Eesti Lennuakadeemia. 2011.

[10] H. Tooming. Rakendusmeteoroloogia Loengukonspekt. Tallinn: Siseakadeemia kirjastus. 2011.

[11] T. Wizelius. Sissejuhatus Tuuleenergeetikasse. Vicby: Gotland University. 2003.

[12] J. Manwell, J. McGowan, A. Rogers. Wind Energy Explained Theory, Design and Application. Amherst: University of Massachusetts. 2002.

[13] V. Vares. Energiatehnika. Tallinn: TTÜ Kirjastus. 2011.

[14] Danish Wind Industry Association. "Windpower Wiki". [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://windpower.org/en/knowledge/windpower_wiki.html. [Kasutatud: 03.03.2015].

[15] T. Ackermann. Wind Power in Power Systems, Second Edition. Chichester: AJohn Wiley & Sons. 2012.

[16] Eesti Päevaleht. "Hiiu tuulepargi vastased lõid arendaja tagasi". [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://epl.delfi.ee/news/eesti/hiiu-tuulepargi-vastased-loid-arendaja-tagasi?id=51162238. [Kasutatud 15.04.2015].

[17] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt, et al. Jaotusvõrgud. Tallinn: TTÜ Kirjastus. 2007.

[18] "Konsultatsioon Nelja Energia AS tootmisjuhiga". [04.2014].

[19] DA. Spera. "Wind turbine tecnology: fundamental concepts of wind turbine". New York: Asme Press. 1994.

[20] RJ. Barthelmie, S. Frandsen, O. Rathmann, jt. "Flow and wakes in large wind farms in complex terrain and offshore". Eur Wind Energy. 10, 2008.

[21] TUDelft. "Wind Energy Online Reader". [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://mstudioblackboard.tudelft.nl/duwind/Wind energy online reader/index.htm. [Kasutatud: 11.04.2015].

[22] WAsP 11. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://www.wasp.dk/Software/WAsP. [Kasutatud: 05.04.2015].

[23] EMD International A/S. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://www.emd.dk/windpro/. [Kasutatud: 01.04.2015].

[24] E. Tiigimägi, Elektrivõrgud. Tallinn: TTÜ Loengukonspekt. 2004.

[25] Prysmian Group. "Draka 20 kV jõukaabli tootekataloog". [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://draka.ee/public/product/AHXAMK-W_12-20%2824%29kV_EST.pdf. [Kasutatud: 15.03.2015].

[26] M. Junginger, A. Faaij, "Cost reduction prospects for the offshore wind energy sector". Proc Eur Wind Energy Conf Exhib. 1–12. 2003.

[27] GJ. Anders, M. Vainberg, DJ. Horrocks, et al. "Parameters affecting economic selection of cable sizes". Trans Power Deliv. 1661–1667. 1993.

[28] K. Tammet. "Eestis asuvate tuuleparkide karakteristikute võrdlus ja analüüs". Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. 2009.

[29] A.A.A. Morsy. "Paldiski Wind Farm Power Losses and Economic Consideration". Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. 2014.

[30] E. Kallas. "Hiiumaa 500 MW maismaatuulepargi tehniline eskiislahendus". Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. 2009.

[31] Horns Rev 1 meretuulepark. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://www.hornsrev.dk/en. [Kasutatud: 25.04.2015].

[32] M. Méchali, R. Barthelmie, S. Frandsen, et al. "Wake effects at Horns Rev and their influence on energy production Data“ 2006.

[33] RJ. Barthelmie, NSF. Cbet. "Wakes in large wind farms Wind farm issues Wind-turbine interactions: wakes Observations from Horns Rev and Nysted". 1–9. 2010.

[34] CB. Hasager, a Peña, T. Mikkelsen, M.et al. "12MW Horns Rev experiment". Roskilde: Technical University of Denmark. 2007.

[35] F. Porté-Agel, YT. Wu, CH. Chen. "A Numerical Study of the Effects of Wind Direction on Turbine Wakes and Power Losses in a Large Wind Farm". Energies. 5297–5313. 2013.

[36] LJ. Vermeer, JN. Sørensen, A. Crespo "Wind turbine wake aerodynamics". Prog Aerosp Sci. 467–510. 2003.

[37] B. Sanderse. "Aerodynamics of wind turbine wakes: Literature review". 1–46. 2009.

[38] K. Brigss. "Navigation The Complexities Of Wake Losses“, North American Windpower". [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://www.nawindpower.com/issues/NAW1304/FEAT_07_Navigating_The.html. [Kasutatud: 13.04.2015].

[39] P. Chen, T. Thiringer. "Time-series based cable selection for a medium voltage wind energy network". Trans Sustain Energy. 465–473. 2012.

[40] A. Kull. "Eesti Tuuleatlas". Tartu: Tartu Ülikool. 1996.

[41] WWD-3 Detailed technical specification. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://www.ecosource-energy.bg/uploads/Technical_Specification_WWD3.pdf. [Kasutatud: 08.04.2015].

[42] W. Dilling, B. Goltz, J. Hermanson, et al. "Design and Application of Cables and Overhead Lines in Wind Power Plants". Design. 1–6, 2010.

Lisad

1. L.1 Kaabli tehnilised parameetrid

2. L.2. Tuulepargi kaabelliinide elektriline skeem

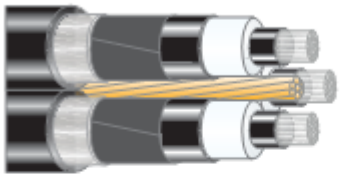
L.1. Kaabli tehnilised parameetrid

Prysmian Group

PRYSMIAN Draka

Power cables 24 kV

AHXAMK-W 12/20(24) kV



Application fields
AHXAMK-W (Wiski™) is a assembled from 3-single core cables wrapped around a compact copper conductor. Each cable is radial and longitudinal water sealed. For fixed outdoor installation, can be ploughed down.

Alternative designation
FI-N2OXA4EC-AR

Standard
CENELEC HD 620 Part 10 Section F

Fire propagation class
No requirement

Temperature range
In continuous operation
max. conductor temp 90 °C.
Lowest cable temperature during installation: -20 °C below 0 °C special precaution shall be taken.

Material declaration
AHXAMK-W

Impulse voltage
125 kV

Bending radius
At fixed mounting: 10 x D
At pulling-in: 15 x D
At ploughing-down: 8 x D

Design

Conductor:	Stranded, round and compacted aluminium acc. to IEC 60228 class 2, longitudinal water sealed
Conductor screen:	Extruded
Insulation:	XLPE, min thickness = 4,85 mm
Insulation screen:	Extruded bonded
Longitudinal water sealing:	Semi conducting water blocking tape
Radial water sealing:	Aluminium-PE laminate, bonded to sheath
Sheath:	PE, black
Centre conductor:	Stranded, round and compacted copper acc. to IEC 60228 class 2
Laying up:	Three cores are laid up together around the centre conductor
Marking e.g.:	AHXAMK-W 12/20 kV 3x95Al+35Cu DRAKA "Date and time", 1 core is metre marked

Number of cores x cross-section of conductor mm²	Diameter over insulation mm	Single cable diameter (approx.) mm	Complete cable diameter (approx.) mm	Weight (approx.) kg/km	Standard delivery length m	Standard drum size	Article-number
3x50AL+35CU	19,5	28,0	62,5	2330	500	K24	**20118180**
3x70AL+35CU	21,1	29,5	65,5	2655	500	K24	**20102203**
3x95AL+35CU	22,8	31,5	69,5	3030	500	K24	**20102204**
3x120AL+35CU	24,1	32,5	72,0	3330	500	K26	**20078168**
3x150AL+35CU	25,7	34,0	75,0	3725	500	K26	**20102205**
3x185AL+35CU	27,4	36,0	79,0	4210	500	K26	**20102206**
3x240AL+35CU	29,6	38,5	83,5	4845	500	K28	**20078171**
3x300AL+35CU	32,1	41,5	92,0	6115	500	K28	**20102207**

Prysmian Group. We reserve the right to change as a result of product development and/or changes in standard.

AHXAMK-W 12/20(24) kV Cont

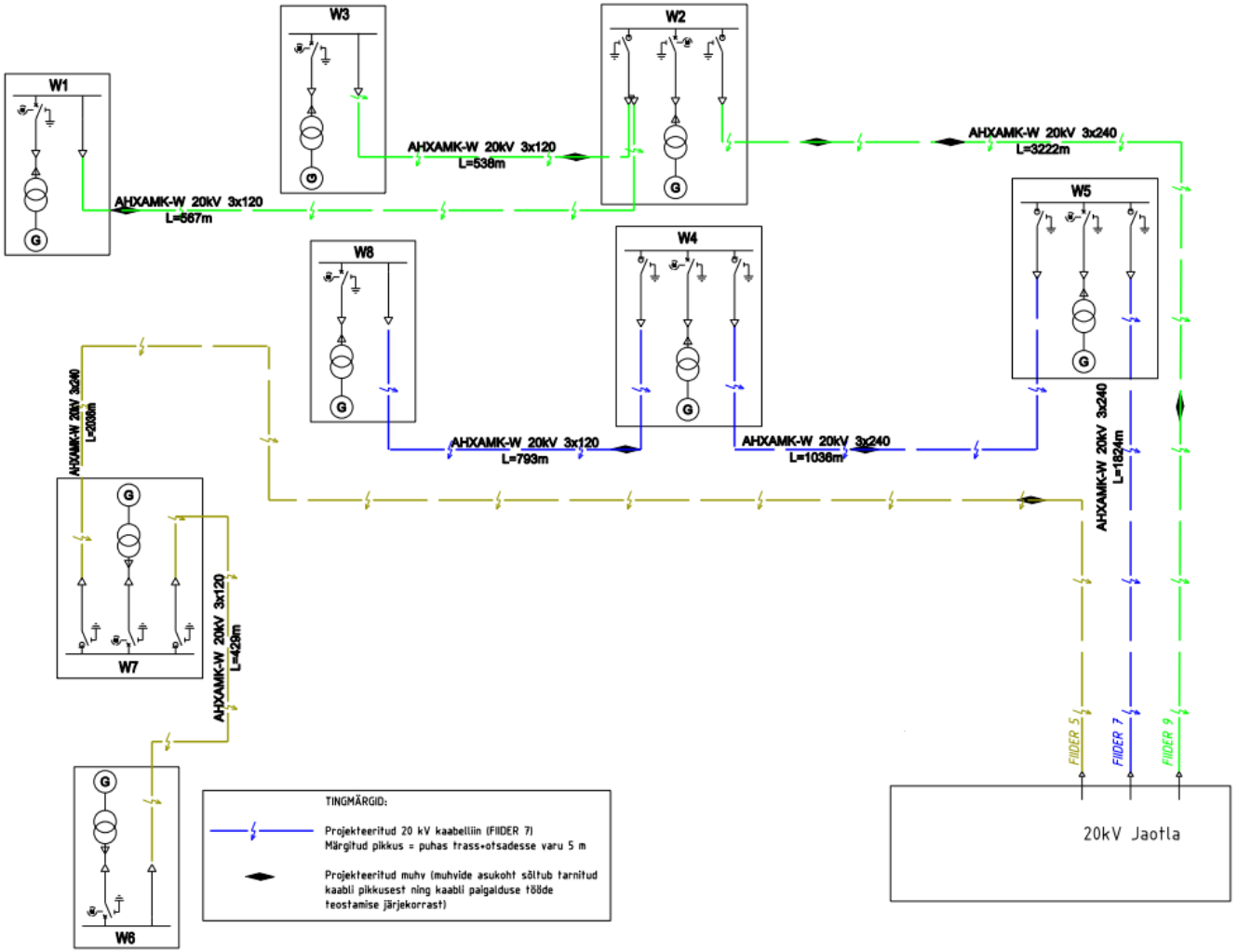
Electrical data at +20 °C

Number of cores x cross-section of conductor mm²	Conductor resistance Ω/km	Centre conductor resistance Ω/km	Inductans mH/km	Reactance Ω/km	Capacitans µF/km	Charging current/phase A/km	Earth fault current A/km
3x50AL+35CU	0,641	0,524	0,44	0,14	0,17	0,6	1,9
3x70AL+35CU	0,443	0,524	0,41	0,13	0,19	0,7	2,1
3x95AL+35CU	0,320	0,524	0,39	0,12	0,21	0,8	2,4
3x120AL+35CU	0,253	0,524	0,38	0,12	0,23	0,9	2,6
3x150AL+35CU	0,206	0,524	0,37	0,12	0,25	0,9	2,8
3x185AL+35CU	0,164	0,524	0,35	0,11	0,27	1,0	3,1
3x240AL+35CU	0,125	0,524	0,34	0,11	0,30	1,2	3,7
3x300AL+70CU	0,100	0,268	0,33	0,10	0,33	1,4	4,2

Electrical data

Number of cores x cross-section of conductor mm²	Current rating at core temp. 65 °C in ground* A	Current rating at core temp. 65 °C in air* A	Current rating at core temp. 90 °C in air* A	Max. short-circuit current on the conductor during 1 s at initial temp. 65 °C kA	Max. short-circuit current on the conductor during 1 s at initial temp. 90 °C kA
3x50AL+35CU	155	160	195	5,2	4,7
3x70AL+35CU	200	190	235	7,2	6,6
3x95AL+35CU	235	230	280	9,9	8,9
3x120AL+35CU	265	265	325	12,4	11,3
3x150AL+35CU	300	300	370	15,6	14,2
3x185AL+35CU	330	345	425	19,2	17,5
3x240AL+35CU	385	400	490	25,0	22,7
3x300AL+70CU	435	460	565	31,2	28,3

*Trefoil with screen grounded in both ends.
Nominal values unless otherwise specified.

Conditions
The ratings are based on the following conditions
- maximum conductor temperature 90 °C
- ground temperature 15 °C
- air temperature 25 °C
- thermal resistivity of soil 1,0 °K m/W
- depth of burial 0,65 m
- frequency 50 Hz

L.2. Tuulepargi kaabelliinide elektriline skeem