EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

**Valmar Puusepp**

# EESTI TUULEKIIRUSTE STATISTILINE ANALÜÜS

Statistical Analysis for Winds in Estonia

Magistritöö
Energiakasutuse õppekava

Juhendaja: professor Andres Annuk

Tartu 2017

www.emu.ee

Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

| | | | |
|---|---|---|---|
| Eesti Maaülikool<br><br>Kreutzwaldi 1, Tartu 51014 | | Magistritöö lühikokkuvõte | |
| Autor: Valmar Puusepp | | Õppekava: Energiakasutus | |
| Pealkiri: *Eesti tuulekiiruste statistiline analüüs | | | |
| Lehekülgi: 78 | Jooniseid: 74 | Tabeleid: 9 | Lisasid: 1 |
| Osakond: Energeetika<br>Uurimisvaldkond: 4. Loodusteadused ja tehnika, 4.17. Energeetikaalased uuringud,<br>CERCS: T140 Energeetika<br>Juhendaja(d): Andres Annuk<br>Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2017 | | | |

Tänapäeva elektrienergia varude täitmisel on osa täita ka taastuvenergial, millest üks osa on tuuleenergia. Üha enam inimesi püstitab endale tuuleturbiine, kuid tihti seda juhuslikku kohta, kus arvatakse tuult piisavalt puhuvat, kuid hiljem selgub, et valitud koht ei täida ootusi. Enne tuuleturbiini püstitamist on soovituslik teostada aastane tuule mõõtmine välja valitud asukohas, kuid tänapäeva moodsa tehnika rentimine maksab palju. Odavama tehnoloogia kasutusele võtuks on antud uurimistöös katsetatud tehnoloogiat, mida kasutatakse meteoroloogiajaamades. Tuule kiiruseid on mõõdetud neljas meteoroloogijaamas ja nendele tehtud statistiline analüüs, mille järgi on välja arvutatud tuuleturbiini teoreetiline elektrienergia toodang ja maksimaal võimsuse kasutustegur, kui püstitada sinna tuuleturbiinid. Lisaks on töösse valitud kaks asukohta, kuhu on rajatud tuulepargid, et võrrelda saadud tulemusi. Tulemused näitavad, et meteoroloogiajaamas kasutatavaid seadmeid on võimalik kasutada ka tuule kiiruse mõõtmiseks kohtades, kuhu soovitakse püstitada väiksemaid tuuleturbiine ja enne seda soovitakse teostada tuule monitooring..

Märksõnad: Tuule kiirus, tootmine, maksimaal võimsuse kasutustegur, tuuleturbiin, võimsuskõver

www.emu.ee

Eesti Maaülikool

Estonian University of Life Sciences

| | | | |
|---|---|---|---|
| Estonian University of Life Sciences<br>Kreutzwaldi 1, Tartu 51014 | | Abstract of Master's Thesis | |
| Author: Valmar Puusepp | | Speciality: Energiakasutus | |
| Title: Statistical Analysis for Winds in Estonia | | | |
| Pages: 78 | Figures: 74 | Tables: 9 | Appendixes: 1 |
| Department:Energeetika<br>Field of research: 4. Natural Sciences and Engineering, 4.17. Energetic Research,<br>CERCS: T140 Energy research<br>Supervisors: Andres Annuk<br>Place and date: Tartu 2017 | | | |

Renewable energy, part of which is wind energy, is also part of today's energy supply. More and more people are setting up wind turbines, but often on the random spot where the wind is thought to blow sufficiently, but later it turns out that the chosen place does not meet the expectations. Before wind turbine erection, it is recommended to conduct an annual wind measurement at a selected location, but renting modern equipment costs a lot. Cheaper technology is the technology tested in this research, which is used in meteorological stations. Wind speeds have been measured in four meteorological stations and the theoretical productivity calculated by them, when wind turbines were erected. In addition, two locations have been selected for the construction of wind farms in order to compare the results. The results show that the equipment used at the meteorological station can also be used to measure the wind speed, which proves that similar technology could also be used to determine the position of smaller wind turbines.

Keywords: Wind speed, productivity, production, wind turbine, power curve

# SISUKORD


**SISSEJUHATUS** ... 7
**1. TUULEENERGEETIKA** ... 9
**1.1. Tuuleenergeetika ajalugu** ... 9
**1.2. Taastuvenergeetika eesmärgid Euroopa Liidus** ... 14
**1.3. Peamised taastuvenergia allikad Euroopa Liidus** ... 15
**1.4. Tuuleenergia hetkeseis ja tuleviku väljavaated** ... 16
**1.5. Euroopa maismaa ja merepealse tuulte potentsiaal** ... 17
**2. METOODIKA** ... 19
**2.1. Katsemetoodika** ... 19
**2.2. Arvutusmetoodika** ... 20
**3. TUULEKIIRUSTE STATISTILINE ANALÜÜS** ... 24
**3.1. Mõõdetud tulemused** ... 24
**3.1.1. Asukoht A** ... 24
**3.1.2. Asukoht B** ... 25
**3.1.3. Pakri** ... 26
**3.1.4. Tartu-Tõravere** ... 28
**3.1.5. Tiirikoja** ... 29
**3.1.6. Virtsu** ... 30
**3.2. Tuule kiiruse muutused aastaaegade, kuude ja nädalate kaupa** ... 31
**3.2.1. Asukoht A** ... 31
**3.2.2. Asukoht B** ... 33
**3.2.3. Pakri** ... 36
**3.2.4. Tartu-Tõravere** ... 37
**3.2.5. Tiirikoja** ... 40
**3.2.6. Virtsu** ... 42
**4. ARVUTUSED** ... 45
**4.1. Elektrienergia tootang ja maksimaal võimsuse kasutustegur** ... 45
**4.1.1. Asukoht A** ... 45
**4.1.2. Asukoht B** ... 49
**4.1.3. Pakri** ... 52
**4.1.4. Tartu-Tõravere** ... 56
**4.1.5. Tiirikoja** ... 60
**4.1.6. Virtsu** ... 64
**5. ARUTELU** ... 68
**5.1. Kokkuvõte tulemustest** ... 68
**5.2. Järeldused** ... 70
**5.2.1. Asukoht A** ... 70
**5.2.2. Asukoht B** ... 71
**5.2.3. Pakri** ... 71
**5.2.4. Tartu-Tõravere** ... 71
**5.2.5. Tiirikoja** ... 71
**5.2.6. Virtsu** ... 71

**KOKKUVÕTE** ..... 73
**SUMMARY** ..... 75
**LISAD**..... 77
**LIHTLITSENTS**……..78

# LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

| | |
|---|---|
| $A$ | ühe aasta pikkus, päeva. |
| $d$ | ööpäeva pikkus, h; |
| $P_a$ | aastane maksimaal võimsuse kasutustegur, %; |
| $P_1$ | aasta jooksul toodetud elektrienergia hulk, kWh; |
| $P_2$ | maksimaalne elektrienergia hulk, mis on toodetud ühe aasta jooksul, kWh. |
| $P_p$ | päeva keskmine tuuleturbiini elektritoodang, kW; |
| $P_t$ | tuuleturbiini väljundvõimsus, kW; |
| $S$ | tuuleturbiini toodetud elektrienergia maksumus, €; |
| $S_b$ | 12 kuu keskmine börsihind, senti/kWh; |
| $S_t$ | taastuvenergia toetus, senti/kWh. |
| $v$ | tuule kiirus, mille mõõtmispunkt on vaja leida maapinnast, m/s; |
| $v_{ref}$ | tuule kiirus, mis on teada, m/s; |
| $z$ | mõõtepunkti kõrgus tuule kiirus leidmiseks, m; |
| $z_0$ | takistustegur; |
| $z_{ref}$ | mõõdetud tuule kiiruse punkti kõrgus maapinnast, m. |

# SISSEJUHATUS

Globaalse inimkonna populatsiooni kasvuga suureneb vajadus elektrienergia järgi. Selle tootmiseks kasutatavad põhilised kütused on nafta, kivisüsi ning maagaas. Nende kütuste põlemisel tekib kasvuhoonegaas, mis satub atmosfääri ja võib põhjustada globaalse soojenemise. Nende gaaside vähendamiseks on koostatud erinevaid protokolle, mis muudavad keskkonna nõuded üha karmimaks ja sellest tingituna otsitakse elektrienergia tootmiseks puhtamaid viise nagu näiteks tuuleenergia genereerimine [1].

Tuule kasutamisele võtmist, kui mehaanilise energiana, arvatakse pärinevat iidsest Babüloni ajastust 17 sajandit e.m.a., kui seda kasutati vee pumpamiseks, et niisutada teraviljapõlde. Selleks kasutati vertikaalse asetusega tuuleveskeid. Euroopas hakati tuuleveskeid laialdasemalt kasutama 13. sajandil, kui inglased ja prantslased kasutasid seda teravilja jahvatamiseks. Erinevalt babüloonlastest kasutati siin horisontaalse asetusega veski tiivikuid, mille vundament ja põhi olid ehitatud nii, et neid sai vajadusel tuule suunda keerata [1].

Tuule elektrienergia generaatorite ajastu algas 19. sajandi lõpus, kui esimene moderne tuulegeneraator valmistati 1890. aastal Taanis. 20. sajandi alguses lisati generaatori kiiruse suurendamiseks käigukast ning hakati arendama labade aerodünaamikat [1].

Tuuleenergia kättesaamiseks on vaja püstitada tuuleturbiine aladele, kus ei jääks tuulikule ette ei looduslikud ega inimese poolt rajatud objektid. See garanteerib tuule mõjutamata liikumise suuna ehk siis ei teki tuule keeriseid ega turbulentse, mis mõjutavad tuuleturbiini elektrienergia tootmist. Sellest tulenevalt soovivad inimesed püstitada tuuleturbiine sinna, kus need tegurid ei segaks elektrienergia tootmist. Uurimistöö autor on kokku puutunud inimestega, kes on rajanud väiksemaid tuuleturbiini asukohta, kus tundub olema piisavalt tugev tuul, et toota piisavas koguses tuuleenergiat, kuid hiljem on tunnistanud, et siiski on asukoht osutunud valeks. Samas on inimesed tunnistanud, et oleks võinud teostada mingil perioodil tuule kiiruste mõõtmisi, kuid seadmete rentimine on kallis. Sellest tekkis uurimistöö autoril huvi välja uurida, kas on olemas odavamaid lahendusi selle probleemi lahendamiseks ja esimene mõte tekkis tuuleturbiinide maksimaal võimsuse kasutustegur välja arvutada meteoroloogiajaamades mõõdetud tuulte kiiruste järgi. Meteoroloogiajaamades kasutatakse kaussanemomeetrit, mis mõõdavad tuule kiirust 10 m kõrguselt maapinnast. Kui saadud tulemused tõestavad selle kasulikkust, siis oleks võimalik seda tehnoloogiat proovida ka asukohas, kuhu inimesel oleks soov tuuleturbiin püstitada. Uurimistöös on teostatud tuulekiiruste statistiline analüüs neljas erinevas Eesti meteoroloogiajaamas, kus on mõõdetud tuule kiirust ühe aasta jooksul. Tulemusi analüüsides on välja arvutatud teoreetiline tuuleturbiini toodang ja maksimaal võimsuse kasutustegur. Samuti on autor lisanud uurimistöösse kaks asukohta, kuhu on rajatud tuulepark, kus on teostatud tuule kiiruse mõõtmine 100 meetri kõrguselt. Kuna tuule kiiruseid on mõõdetud kahel erineval kõrgusel on töös kasutatud valemit, mis transponeerib punktis vaadeldavat tuule kiirust soovitud punkti. Kahel erineval kõrgusel mõõdetud tuule kiirus, millest on välja arvutatud tuuleturbiini elektrienergia tootmine ja selle maksimaal võimsuse kasutustegur, annab kokkuvõtteks parema ülevaate, kas meteoroloogiajaamas kasutatav tehnoloogia annab oodatud tulemuse. Tuuleturbiinid on välja valitud tuule kiiruse

mõõtmiseks kasutatava tehnoloogia kõrguse järgi maapinna suhtes. Samuti on huvitav teada, mis ajaga tasuks ära tuuleturbiini püstitamine nendesse asukohtadesse.

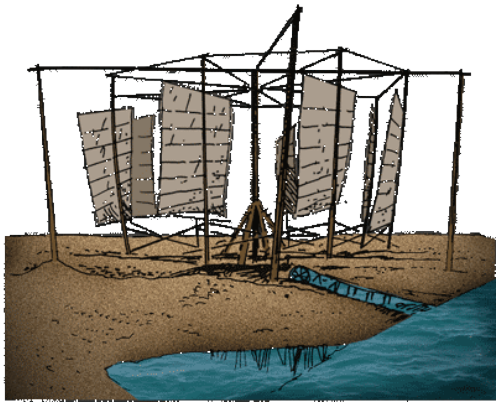
# 1. TUULEENERGEETIKA

## 1.1. Tuuleenergeetika ajalugu

Tuult kui energiat hakkasid egiptlased kasutama 3500 aastat e.m.a. Nad leiutasid purjed, mis püüdsid tuult, mida kasutati laevade ja paatide liigutamiseks mööda Niiluse jõge [4]. Hiljem kasutati tuult ära mehaanilise energiana tuulikuid vilja jahvatamiseks ja vee pumpamiseks [1].

Ei ole täpselt teada, kuid arvatakse, et 17 sajandit e.m.a hakkasid babüloonlased tuult püüdma vertikaalteljega tuulikutega, et põlde niisutada. Teised arvavad, et alles 4 sajandit e.m.a hakati tuulikuid kasutama vee pumpamiseks maapõuest, kuid selleks puuduvad ajaloolised tõendid nende väidete kinnitamiseks [1].

Esimesed dokumenteeritud lahendused tuulikute kohta pärinevad 200 aastat e.m.a. Pärslased kasutasid neid vilja jahvatamiseks (Joonis 1.1), ning nende tiivad olid vertikaalses asendis ja valmistatud puidust või kimpu pandud pilliroost. Need tuulikud olid tavaliselt 5-9 meetrit kõrged [1].



**Joonis1.1.** Pärslaste tuuleveski

947. aastal kasutati tuulikuid hoopis kummalisel viisil. Tuulises ja liivases provintsis Seistanis, kus tänapäeval asub Iraan, kasutati tuulikud liivatormide kaitseks. Asukohas, kus liivatormid võivad matta enda alla nii linnu kui ka külasid, ehitati tuulikud majade peale ümber linna asuvate liivaluidetest kõrgendikele (Joonis 1.2). Need püüdsid lendava liiva kinni. Et kogunenud liiv laiali saada, avati alumisel osal uksed, mis tekitasid keerise ülaosasse ja see kandis üleliigse liiva ühtlaselt ümbritsevasse keskkonda tagasi [6].

**Joonis 1.2.** Liiva püüdev turbiin [6]

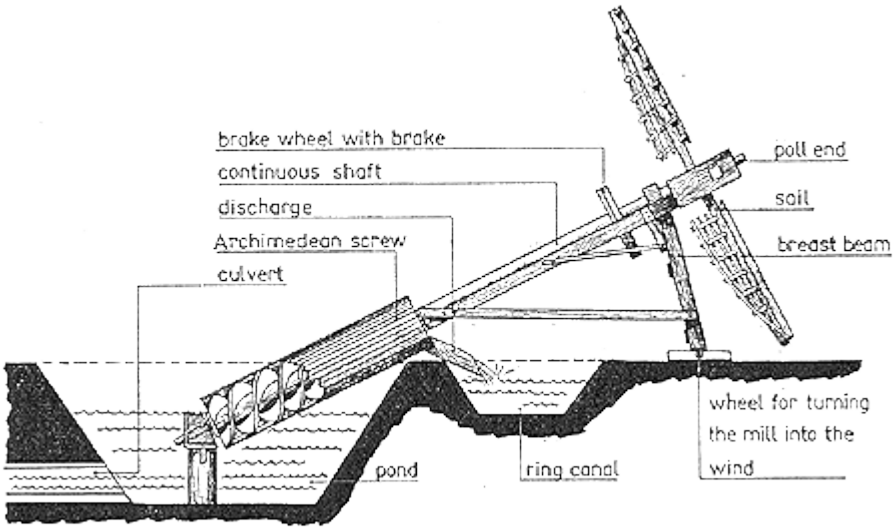
1283. aastal kirjutas ajaloolane AL Qazwini samast tuuleturbiini arendusest, mille eesmärk oli jäänud samaks, kuid juurde oli arendatud funktsioonid nii teravilja jahvatamiseks kui ka vee pumpamiseks [6].

Esimene horisontaalteljega tuuleveski kirjeldus on jäädvustatud 1300. aastal ajaloolase Al Damashqi poolt. Ta kirjeldab tuulikut, mida saab keerata tuule suunas, mis asub mäe või künka tipus või kindluse tornis. Tuulikveski koosneb kahest osast, kus ülemisel osal on labad, mis panevad alumisel osal olevast kahest veskikivist ühe keerlema [6].

Euroopasse jõudsid tuulik Islami kultuurist läbi Maroko. Euroopas hakati tuulikuid laialdasemalt kasutama 12. sajandil. Prantslased võtsid selle kasutusele 1105 ning inglased 1191. aastal. Erinevalt pärslaste vertikaalsest tiibade asetusest kasutasid eurooplased horisontaalse teljega tuulikuid ja see oli ehitatud ümarale vundamendile. Tuulikuid kasutati vee pumpamiseks Hollandi jõgedest ja selle transportimiseks Prantsusmaale põldude niisutamiseks [4]. Tuulikut sai keerata vastavalt tuule suunale ning tugevate tuulte puhul keerati veski tuule suunaga risti [1].

12. ja 15. sajandi vahel levis tuulikute kasutamine üle Euroopa laiali. Tuulikutest sai energia allikas teravilja jahvatamisel, vee pumpamiseks, paberi tootmiseks, õli pressimiseks seemnetest ja saekaatris puude saagimiseks. Hollandis kasutati tuulikuid jõgede ja järvede kuivendamiseks, et kasutatav maapind ei jääks veel alla. 1600. aastaks oli seal 2000 vett pumpavat tuulikut. [6].

Selle aja tuulikute kujundaja oli hollandlane Jan Adriaenszoon, keda nimetati ka tuulikute pioneeriks. Ta arendas välja erinevaid tüüpe tuulikuid nagu Tjasker tüüpi vee pumpamiseks (Joonis 3) ja Smock tüüpi tuuleveski vilja jahvatamiseks (Joonis 1.4) [4].




**Joonis 1.3.** Tjasker tüüpi tuulik

**Joonis 1.4.** Smock tüüpi veski.

Tjasker tüüpi tuulikutele järgnes vett pumpavad tuulikuid (Joonis 1.5), mida peetakse kõige kasulikumaks viisiks tuuleenergia muundamisel. Sellise labade ehitusega tuulikut hakati kasutama 19. sajandi keskpaigas ja neid kasutati vee pumpamiseks paari meetri sügavustest kaevudest. Labad on valmistatud metallist ning 1850 kuni 1930 paigaldati neid ainuüksi Ameerikas umbes 6 miljonit [4].

**Joonis 1..5.** Vett pumpav tuulik

Tuulegeneraatorite ajastu algas 20-nda sajandi künnisel. Esimene moderne tuulegeneraator, mis oli spetsiaalselt elektri toomiseks mõeldud, valmistati Šotimaal 1887. aasta juulis, kui seda kasutati akude laadimiseks, et need valgustaksid James Blythi kodu. Mõned kuud hiljem kasutas selle idee ära ameeriklane Charles F. Brush, kes ehitas esimese automatiseeritud tuulegeneraatori, mis toodaks elektrit. Sellel ajal peeti sellist viisi elektri tootmist väga ebaefektiivseks, välja arvatud hõredalt asustatud aladel [4].

Tuulikute arendamine jätkus ja 1900 oli Taani püstitatud 2500 tuulikut, mille otstarve oli teravilja jahvatamine, vee pumpamine ja elektri tootmine. Sellel ajal olid kõrgeimad tuuleturbiinide tornid 24 meetri kõrgused, mille rootori külge oli kinnitatud 4 laba ja mille diameeter oli 23 meetrit. 1908. aastaks oli Ameerikas püstitatud 72 tuuleturbiini, mille koguvõimsus oli 25 MW. Esimeseks maailmasõjaks oli Ameerikasse paigaldatud sada tuhat tuuleturbiini [1].

1931 ehitati Ameerikas Yeltal tuuleturbiin, mis viis modernsete tuulikute arendamiseni. Sellesse oli paigaldatud 100 kW generaator, torni kõrgus oli 30 meetrit ja oli ühendatud kohalikku 6,3 kV elektrivõrku. Selle tuuliku maksimaal võimsuse kasutustegur oli 32 %, mis on ligilähedane tänapäeva tuulegeneraatoritega saavutatule[4]. Samal ajal püstitati Venemaale Kaspia mere ranniku äärde samuti 100 kW võimsusega tuulegeneraator, mis kahe aastaga suutis toota enam kui 20000 kW elektrienergiat [1].

Esimene 1 MW tuuleturbiin püstitati 1941 Vermonti, mille töötas välja Palmer C. Putman. Torni kõrgus oli 34 meetrit ja rootori diameeter 53 meetrit. See tuulik oli suureks läbimurdeks labade keeramisel. Kuid peale 1100 tundi töötamist läks see katki ja II Maailmasõjast tingitud ressursside puuduse tõttu seda ära ei parandatud[1].

1956. aastal arendas taanlane Johannes Juul välja 200 kW kolme labaga tuuleturbiini, millele oli külge arendatud aerodünaamiline hädapidurduse süsteem, mida kasutatakse veel paljudes tänapäeva tuuleturbiinides [5]. Tuuleturbiin töötas 1967. aastani ja 1970 see renoveeriti NASA palvel [5].

Tuulegeneraatorite intensiivne arendustöö kestis kuni 1940. aastani. Selleks ajaks oli välja töötatud odavamad ja töökindlamad vedelkütuse generaatorid, mis olid neli kuni viis korda odavamad. 1973. aastal tekkinud kütusekriisi ajal olid teadlased, insenerid ja poliitikud siiski sunnitud vaatama ka alternatiivse elektrienergia allika poole, kuna vedelkütuse ressursid saavad ühel päeval otsa ja tuumaenergia ei ole ohutu. Projekti eesmärk oli suur, millesse kaasas Ameerika valitsus ka NASA, mis juhtis suurte tuuleturbiinude arendustööd. Katsetati kolmeteist mitme megavatilist tuuleturbiini, mille tehnoloogiaid kasutatakse veel tänapäeval [5].

1980. aastal rajati Ameerikasse Uus Hampshiri 20 tuuleturbiiniga maailma esimene tuulepark. Tuulepark iseenesest oli läbikukkumine, kuna turbiinid ei olnud töökindlad ja tuuleressursside ennustus oli ülehinnatud [5].

1981. aastal ehitas NASA kahe labaga 7,5 MW Mod-2 (Joonis 1.6) ja 1987. aastal 3,2 MW Mod-5B, mis purustasid rekordeid labade diameetriga ja väljundvõimsustega [5].

**Joonis 1.6.** MOD-2 tuulegeneraator.

1991 rajati Taani esimene merepealne tuulepark mille koguvõimsus oli 11,45 MW. Samal aastal rajati Suurbritanniasse esimene kaldapealne tuulepark, kus oli 10 tuuleturbiini ja mis kattis 2700 majapidamise elektrienergia vajaduse [5].

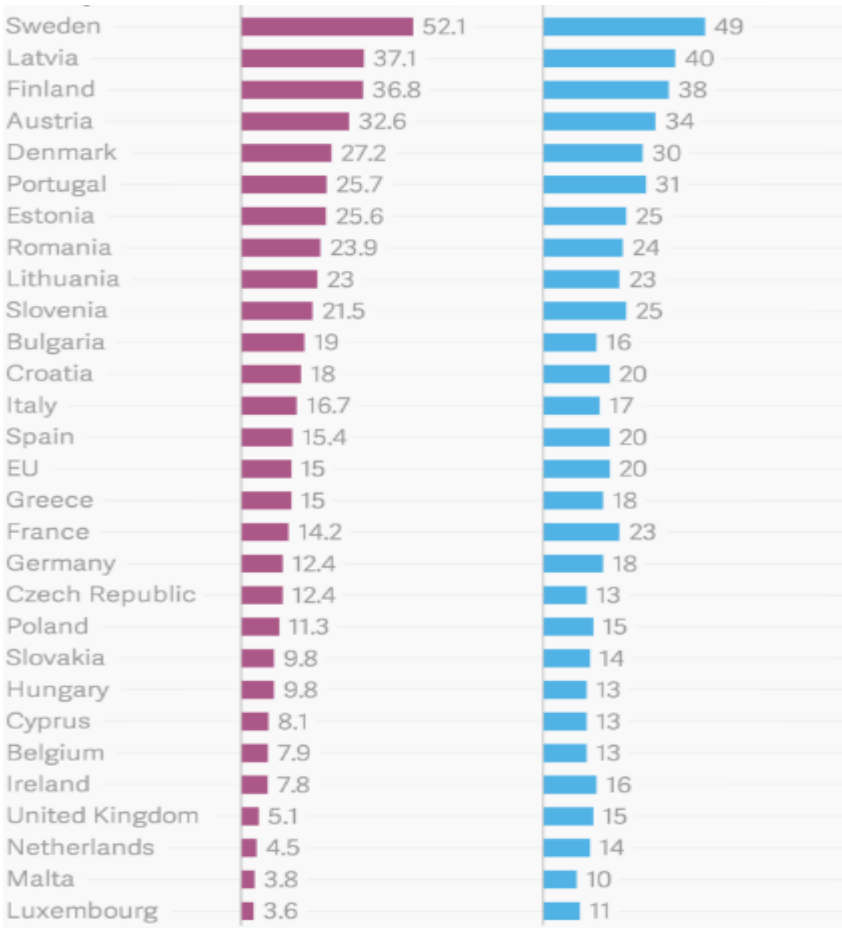
20. sajandi alguses hakati arendama labade aerodünaamikat ja kergemaid rootoreid, mis suurendas seadmete efektiivsust. 1910. aastaks oli Taanis paigaldatud paarsada tuulikut, mille elektrienergiat kasutati maakohtades [5].

## 1.2. Taastuvenergeetika eesmärgid Euroopa Liidus

Taastuvenergia moodustas 2014. aastal 12,5% kogutarbimisest Euroopa Liidus. Taastuvenergia tähtsus kogutarbimisest oli suhteliselt kõrge Portugalis (25,0%), Taanis (26,2%), Soomes (29,4%), Austrias (30,0%), Rootsis (35,8%), Lätis (36,2%), Norras (44,8%) ja Islandil (86,3%) [9].

Euroopa Liit on saavutamas oma eesmärki täita elektrienergia vajadusest 2020. aastaks 20% taastuvenergiaga. Kuid Euroopa Liidu riigid peavad jätkama oma pingutusi, et täita oma taastuvenergia eesmärgid. Suurenenud taastuvenergia kasutamine on lahutamatu Euroopa Liidu Energia Liidu strateegiast, mis toob kasu keskkonnale, tarbijatele, parandab Euroopa energiajulgeolekut ja Euroopa majandusele tervikuna [7].

Taastuvenergia direktiivis sätestatud individuaalse taastuvenergia eesmärgiks kõigis Euroopa Liidu riikides on võtta kasutusse rohkem taastuvenergiat. Kui need individuaalsed eesmärgid täita, siis Euroopa Liidus on võimalik saavutada oma 2020. aasta eesmärk, mis näeb ette, et 20% tarbitavast elektrienergiat tuleb taastuvenergiast. Aastal 2015 on selle eesmärgi ületanud 25 Euroopa Liidu riiki 28-st, seal hulgas ka Eesti (Joonis 1.7). 2030. aastaks on sama eesmärk vähemalt 27% täita taastuvenergiaga. „Clean Energy for All Europeans“ pakett, mis avaldati 30. november 2016, sisaldab ettepanekut üle vaadata Taastuvenergia direktiivi, mis kohustab Euroopa Liidu riike täitma seda eesmärki ühiselt ja kuluefektiivselt [7].




**Joonis 1.7.** Taastuvenergia eesmärgid Euroopa Liidus, punasega on tähistatud saavutatud tulemus ja sinisega on tähistatud eesmärk [8]

Taastuvenergia on üliioluline Euroopa energiajulgeolekule: selle eelistamine fossiilsetele kütustele hoidis 2015. aastal hinnanguliselt kokku 16 miljardit eurot terves Euroopa Liidus ja prognooside kohaselt 58 miljardit eurot 2030. aastal. Taastuvenergia on ka võti süsinikgaaside vabale Euroopa majandusele, ning aastal 2015 on selle kasutamine vähendanud ELi kasvuhoonegaaside heitkoguseid 436 MtCO2, mille kogus on samaväärne Itaalia emisiooniga. Taastuvenergia osakaalu suurendamisega on Euroopa Liit saavutamas oma kohustust, mis määrati 2016. aasta Pariisis kliimamuutuste konverentsil, et aidata kaasa piirata ülemaailmset temperatuuri tõusu vaid kuni 1,5 ° C. Taastuvenergia mängib olulist rolli et, Euroopa Liit oleks ülemaailmne liider innovatsioonis: Euroopa Liidu riigid omavad 30% patentidest taastuvenergia maailmas [7].

Euroopa Liidu jõupingutused, et edendada taastuvaenergeetikat on alandanud ka kulusid. Mitmed taastuvenergia tehnoloogiad on muutunud kulude poolest konkurentsivõimeliseks ja võib mõnel juhul olla isegi odavamad kui fossiilkütustel baseeruvad. Taastuvenergia sektor mängib võtmerolli Euroopa Liidu majanduses, mille käive oli 2014. aastal umbes 144 miljardit eurot ja annab rohkem kui miljonile inimesele tööd. [7]

## 1.3. Peamised taastuvenergia allikad Euroopa Liidus

2014. aastal Euroopa Liidus toodetud elektrienergiast 25,4 % moodustab taastuvenergia, mis on võrdne 196 miljoni tonni naftast saadava energia kogusega. Euroopa Liidus on

taastuvenergiast toodetud elektrienergia kogus suurenenud 2004. aastast kuni 2014. aastani 73,1% [9].

Taastuvenergia liikide hulgast on kõige olulisem allikas Euroopa Liidus elektrienergia tootmisel tahketel biokütustel ja taastuvenergia jäätmetel, mis on napilt alla kahe kolmandiku kogu taastuvenergia toodangust 63,1%. Hüdroenergia on teine kõige olulisem taastuvenergia allikas moodustades kogu taastuvenergia kogusest 16,5%, millele järgneb tuuleenergia 11,1%. Kuigi tuule ja päikeseenergia osakaal kogu toodangust on väike, siis nendesse investeerimine on üha suurenev trend [9].

Suurimad taastuvenergia tootjad Euroopa Liidus 2014. aastal olid Saksamaa, mille osakaal on 18,4%, Itaalia 12,1% ja Prantsusmaa 10,7%, Hispaania 9,2% ja Rootsi 8,5%. Erinevatel riikidel on taastuvenergia tootmiseks erinevad võimalused. Näiteks Maltal rohkem kui neli viiendikku toodetud taastuvenergiast (80,3%) ja ligikaudu kaks kolmandikku, mis on toodetud Küprosel (66,7%) oli toodetud päikeseenergiat. Seevastu lähedal või üle kolmandiku taastuvenergiast mägistes riikides nagu Rootsi, Horvaatia, Austria ja Sloveenia oli toodetud hüdroenergiaga. Hüdroenergia moodustas rohkem kui kolmandiku taastuvenergia toodangust endises Jugoslaavia Makedoonia Vabariigis, Serbia ja Montengros, Albaanias, ning 90,1% taastuvast elektrienergiast moodustas hüdroenergia Norras. Rohkem kui viiendiku (22,1%) taastuvenergia toodangust moodustas Itaalias maasoojus, kus on aktiivne vulkaaniline olukord. Tuuleenergia osakaal oli eriti kõrge Iirimaal (51,8%) ja moodustab ka lähedal või üle veerandi taastuvenergiast Hispaanias, Ühendkuningriigis ja Taanis [9].

Taastuvenergia osakaal Maltal kasvas keskmiselt 41,3% aastas 2004. aastast ja 2014. aastani, kuigi absoluutne tootmise tase jäi kaugelt väikseimaks Euroopa Liidu riikidest samal perioodil. Iga-aastaselt suurenes taastuvenergia osakaal keskmiselt üle 10,0 % Belgia (14,2% aastas), Ühendkuningriigis (12,7%) ja Iirimaal (11,7%), samal ajal suurenes see osakaal alla 3,0% Prantsusmaal, Rumeenias, Lätis, Taanis, Rootsis, Horvaatias ja Soomes [9].

## 1.4. Tuuleenergia hetkeseis ja tuleviku väljavaated

Ülemaailmselt kokku lepitud eesmärgiga vähendada kasvuhoonegaaside heitkoguseid ning tagada vajaminev elektrienergia arengumaades, on tehtud jõupingutusi, et täiendada meie elektrienergia vajadusi taastuvenergiaga. Paljud riigid on formuleerinud poliitilise raamistiku, mis tagavad, et taastuvenergial oleks tulevikus suurem roll elektrienergia stsenaariumis. Tuulel, mis on efektiivne taastuva elektrienergia allikas, saab olema suur roll selle eesmärgi saavutamisel [1].

Tuuleenergia on arenenud pika tee viimase kahekümne aasta jooksul. Võrreldes kahe aastakümne taguse ajaga suudab üks kaasaegne tuulik aastas toota 180 korda rohkem elektrienergiat ja vähemalt poole väiksema kuluga [10]. Tuuleenergia tehnoloogiasektor on suurenev tootmisharu ning seega on muutumas ka selle profiil. Suurenev trend taastuvaenergia järgi on suurendanud vajadust vähendada kulusid tuulest saadud

elektrienergiale. Samuti on tuuleenergia tööstuses võetud eesmärgiks arendada suuremaid masinad, mille tootmine ja ehitamine muudaks kättesaadava elektrienergia odavamaks. Väljundvõimsusega 3 MW ja suuremaid tuuleenergiat püüdev tehnoloogia kasvab jõudsalt, mitu tootjat on välja arendanud tuuleturbiinid võimsusega 5 MW. Suurema võimsusega masinatel on kasvanud ka rootori läbimõõt, mis ulatuvad juba 125 meetrini ning iga laba kaalub umbes 19 tonni [1]. Üha enam investeeritakse avamere tuulikutesse ning mitmeid ambitsioonikaid projekte ja arendustöid on algatatud.

Vastavalt uuringutele, katab tuulest saadud elektrienergia 3,7% ülemaailmsest elektrienergia vajadusest. 1994. aastal oli paigaldatud kogu võimsusega 1683 MW tuulegeneraatoreid Euroopa Liidus. 2015. aasta lõpuks oli installeeritud võimsus tõusnud 80 korda ja umbes 135 GW, mis tootis umbes 10.4% Euroopa elektritarbimisest. Siiski Euroopa tuuleenergia potentsiaal on palju suurem [10].

## 1.5. Euroopa maismaa ja merepealse tuulte potentsiaal

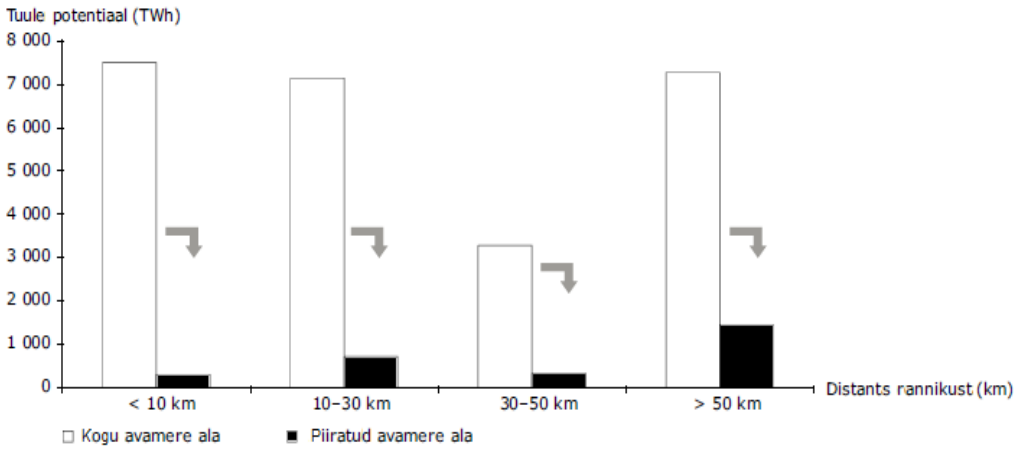
Taastuvenergia kasutamine viib lähemale Euroopa liidus seatud keskkonna ja poliitiliste eesmärkidele, kaasaarvatud kohustusele vähendada kasvuhoonegaaside vähendamist ja tagada elektrienergia vajadus [2].

Euroopa liidus, 1997. aastal tehtud plaani järgi, seati eesmärgiks 2010. aastal kasutavast kogu elektrienergiast võiks 12% tulla taastuvast energiaallikatest. Aastaks 2006 oli 9,3% sellest eesmärgist saavutatud ja 2008 seati 2020. aasta eesmärgiks 20% [2].

2015. aasta seisuga saavutati tuulenergia osakaal 3,7 % t ning seda soovitakse tõsta kuni 12%ni. 2020 seisuga oli tuulegeneraatoreid ehitatud koguvõimsusega 80 GW, millest 3,5 GW olid avamere tuulepargid, kuid 2020 aasta plaan on rajada 180 GW, millest 35 GW on avamere tuulepargid [2].

Tuuleenergia tootmise miinimum nõudeks arvestatakse tuule minimaalseks keskmiseks kiiruseks 4 m/s. Kui Euroopas välja jätta alasid, kuhu tuuleparke ei tohi rajada, siis oleks kasulikku maapinda 86,3 %. Neid piiranguid mitte arvestada, siis oleks oleks maismaa tuuleenergia potentsiaal 39000 TWh [2].

Merepealsete tuuleparkide rajamine riikides nagu Suurbritannia ja Holland rannikust lähemale kui 22 km on keelatud. Põhjuseks on toodud merevaate rikkumine tuulegeneraatorite poolt. Paljudes riikides on selleks määratud 10 km. Samuti peab nende rajamisel arvestama laeva teedega, sõjaliste kaitsealadega, nafta ja gaasi uurimis- ja puurimisaladega ning samuti turismialadega.. Kui arvestada 0-10 km rannikust, siis alasid, kuhu saab tuuleparke rajada on 4% rannikualadest ning alad kaugusel sisemaa poole rannikust 10-50 km, siis 10%. Alad, mis jäävad üle 50 km rannikust on vähem kasutatavad eelpool mainitud tegevuste jaoks, ning sellest saaks kasutada 25% kogu alast. Kui neid piiranguid mitte arvestada, siis oleks merepealse tuulte potentsiaal 30000 TWh, kui arvestada, siis kukub see näitaja 3500 TWh-ni. Joonisel 1.8. on välja toodud Euroopa tuuleenergia potentsiaal kogu- ja piiratud avamere alal [2].




**Joonis 1.8.** Tuuleenergia potentsiaal kogu- ja piiratud avamere alal

Eeldatav elektrienergia vajadus Euroopas aastal 2020 on 5100 TWh, ning avamere tuulepargid suudaksid katta sellest 68%.

# 2. METOODIKA

## 2.1. Katsemetoodika

Uurimistöös on kasutatud aasta jooksul mõõdetud tuule kiirused erinevates asukohtades Eestis ning mõõtmised on teostatud kõrgustel 100 m ja 10 m. Kõrgustel 100 m maapinnast on kasutatud tuule mõõtmiseks ultraheli anemomeetrit, mis asub tuuleturbiini katusel. Kõrgusel 10 meetrit on kasutatud kaussanemomeetrit, mis asuvad meteoroloogiajaamades. Mõõtmised on teostatud kuues erinevas asukohas Eestis, millest neli asuvad rannikualadel, üks Peipsi järve ligidal ja üks mereäärest kaugemal maismaal. Rannikualal kahes asukohas on mõõtmised teostatud 100 m kõrguselt ja ülejäänud asukohtades 10 m kõrguselt.

100 m kõrgusel on mõõtmised teostanud tuuleturbiini küljes olev ultraheli anemomeeter, mis on toodud joonisel 3.1. Ultraheli anemomeeter mõõdab aega, mis kulub ultraheliimpulsi jõudmiseks ühest andurist teise. Andureid on neljas suunas ja asetsevad paaridena üksteise poole. Levimise aeg sõltub helikiirusest ja nii arvutab seade välja tuule suuna ja kiiruse, ning annab tagasisidet tuulikule. Näiteks, kui puhub põhjatuul, siis impulsi levimise aeg on väiksem põhjast lõunasee kui lõunast põhja. Samas kui impulsi levimise kiirus läänest itta ja idast läände on sama. Nii kalkuleerib ja määrab suuna ultraheli anemomeeter [11].

**Joonis 2.1.** Ultraheli anemomeeter.

Ultraheli anemomeetriga on mõõtmised teostatud asukohtades A, mis asub mere äärest 3,4 km kaugusel ja asukohas B, mis asub merest 1 km kaugusel.

Tuule kiirused 10 m kõrguselt on mõõdetud kaussanemomeetriga meteoroloogiajaamades, mis asuvad Virtsus, Parkil, Tiirikojal ja Tartu-Tõraveres. Kaussanemomeeter mõõdab tuule kiirust olenemata tuule suunast, mille kausikujulised labad on kinnitatud horisontaalsete pulkade külge ja need omakorda on kinnitatud vertikaalsele võllile, mis on näha joonisel 3.2.

**Joonis 2.2.** Kaussaneomeeter.

Saadud tuule kiiruse mõõtmise tulemused on salvestatud tunnipõhiselt, mis omakorda on arvutatud päeva keskmiseks tuulekiiruseks.

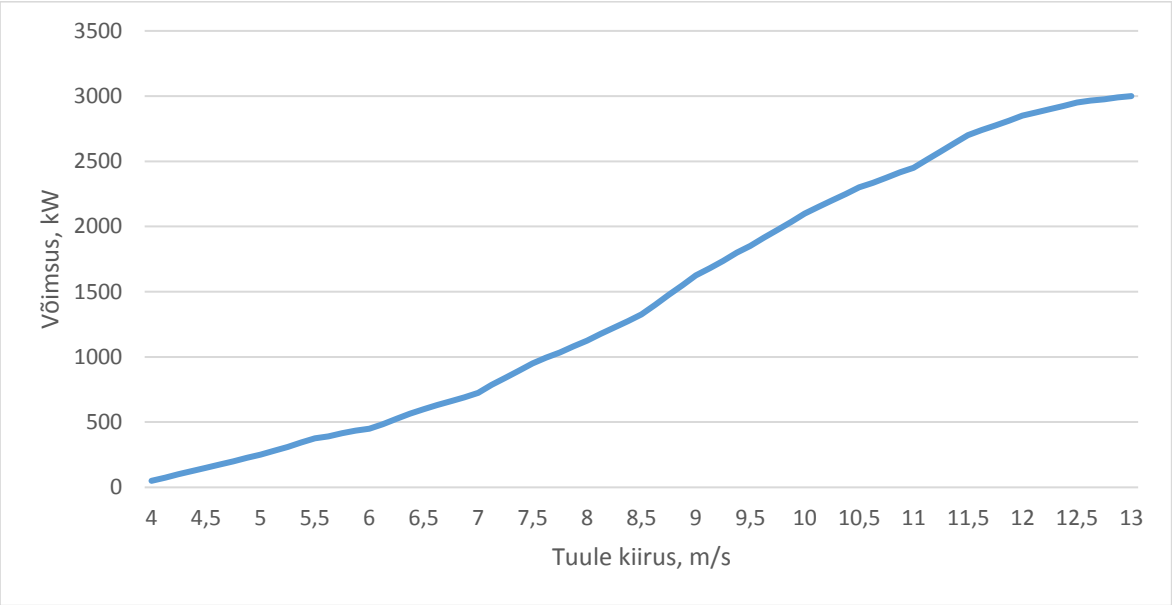
## 2.2. Arvutusmetoodika

Tuuleturbiini püstitamisel on tähtis asukoht, kuhu see püstitatakse. Asukoha tähtsuse määrab selles punktis puhuvad tuuled, mis panevad tuuleturbiini rootori pöörlema ja mida suurem on tuule kiirus, seda suurema kiiruse see saavutab. Rootori kiirusest oleneb, kui suure kiiruse tuuleturbiinis olev generaator saavutab ja mida suurem on kiirus, seda suurem on ka hetkvõimsus.

Kui tuule kiiruse mõõtmine on teostatud ja tuulekiirustest tehtud statistiline analüüs, siis on võimalik kogutud andmetega välja arvutada tuuleturbiini teoreetiline toodetud elektrienergia ja maksimaal võimsuse kasutustegur, mis tuuleenergeetika arendajat kõige enam huvitab. Tootmine tähendab seda, kui palju elektrienergiat tuuleturbiin suudab toota ning maksimaal võimsuse kasutustegur seda, et kui tuuleturbiin toodab maksimaalselt 100 kW tunnis, siis kui palju see tegelikult toodetud elektrienergiat välja annab. Sellest vahest arvutataksegi välja maksimaal võimsuse kasutustegur. Tuuleturbiinide tootjad on välja andnud nn. pakett tuulikute võimsuskõvera, mis näitab seda, kui palju elektrienergiat suudab tuuleturbiin teatud tuule kiirusel toota.

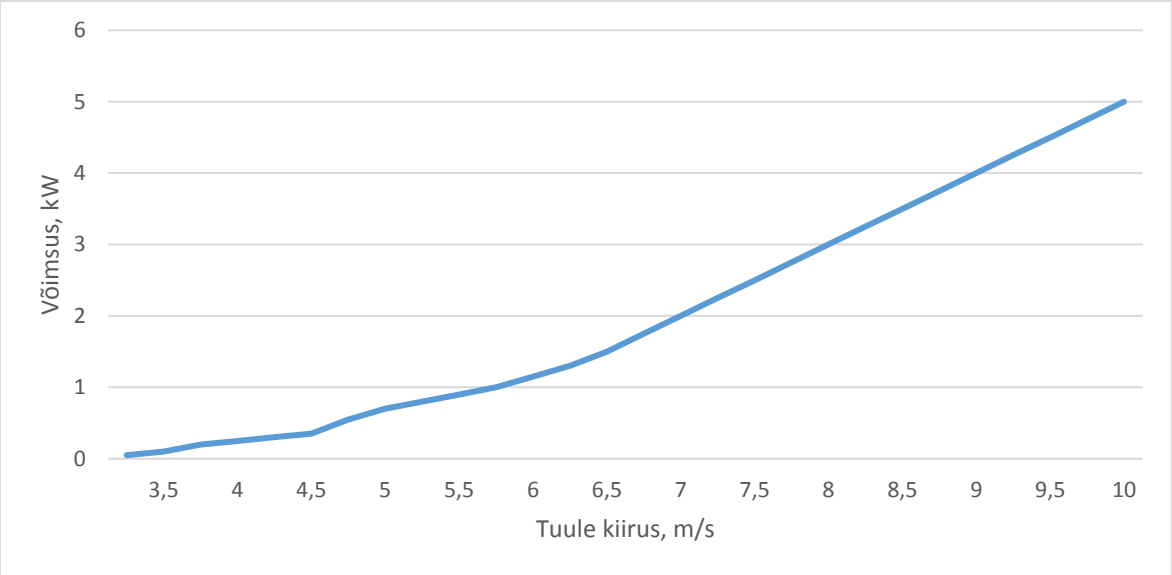
Antud uurimustöö üheks eesmärkgiks on teha Eesti tuulekiiruste statistiline analüüs, ning nende järgi välja arvutada tuuleturbiini teoreetiline elektrienergia toodang ja maksimaal

võimsuse kasutustegur kuues välja valitud asukohas, kasutades kahte tüüpi tuuleturbiini. Mõõdetud tuule kiirused on teostatud 100 m ja 10 m kõrguselt, millest lähtudes on autor välja valinud tuulikud, mille rootor asub nendel kõrgustel. Tuuleturbiiniks, mille rootori kõrgus maapinnas on 100 m, on uurimistöö autor välja valinud WinWind tuuleturbiini WWD-3-100 ja 10 m maapinnast on NE-5k tuuleturbiin. WinWind tuuleturbiini väljundvõimsus on 3 MW (joonis 4.1) ja NE-5k väljundvõimsus on 5 kW (joonis 4.2)




**Joonis 2.1.** WinWind WWD-3-100 võimsuskõver [13]

Jooniselt 2.1 on näha, et WinWind WWD-3-100 tuuleturbiin hakkab tootma elektrienergiat, kui tuule kiirus on tõusnud 4 m/s. Alates 13 m/s saavutab tuuleturbiin oma nimivõimsuse.




**Joonis 2.2.** NE-5k võimsuskõver [14]

Jooniselt 2.2 on näha, et NE-5k tuuleturbiin hakkab tootma elektrienergiat, kui tuule kiirus on tõusnud 3,1 m/s. Alates 10 m/s saavutab tuuleturbiin oma maksimaalse võimsuse.

Kui on teostatud tuule kiiruste mõõtmine ja on teada tuuleturbiini võimsuskõver, siis on võimalik välja arvutada tootmine ja maksimaal võimsuse kasutustegur. Kasutades joonisel 2.1 ja 4.2 esitatud võimsuskõveraid on võimalik välja arvutada teoreetiline tuuleturbiini maksimaal võimsuse kasutustegur kasutades järgmist valemit:

$$P_a = \frac{P_1}{P_2} * 100, \tag{1}$$

kus $P_a$ on aastane maksimaal võimsuse kasutustegur, %;
$P_1$ aasta jooksul toodetud elektrienergia hulk, kWh;
$P_2$ maksimaalne elektrienergia hulk, mis on toodetud ühe aasta jooksul, kWh.

Aasta jooksul toodetud elektrienergia hulk on välja arvutatud kasutades järgmist valemit:

$$P_1 = P_p * d * A, \tag{2}$$

kus $P_p$ on päeva keskmine tuuleturbiini elektrienergia toodang, kW;
$d$ ööpäeva pikkus, h;
$A$ ühe aasta pikkus.

Maksimaalselt toodetud elektrienergia hulk, ühe aasta jooksul on välja arvutatud kasutades järgmist valemit:

$$P_2 = P_t * h * A, \tag{3}$$

kus $P_t$ on tuuleturbiini nimiväljundvõimsus, kW;

Uurimistöö üheks eesmärgiks on võrrelda valitud asukohtades välja arvutatud tootmist ja maksimaal võimsuse kasutustegurit. Tuule kiiruse mõõtmised on teostatud kahel erineval kõrgusel, seega mõõdetud punktide alusel on vaja leida teoreetiline tuule kiirus mõnes teises punktis. Selleks on vaja mõõdetud punkt transponeerida vaadeldavasse punkti. Selleks on uurimistöös kasutatud valemit, millega on võimalik välja arvutada tuule kiirus, vajalikul kõrgusel, milles on arvestatud ümbruskonna tingimusi nagu mets, maastik, asustus jne. Selles valemis on toodud allpool: [15]:

$$v = v_{ref} \ln(z/z_0) / \ln(z_{ref}/z_0), \tag{4}$$

kus $v$ on tuule kiirus kõrgusel maapinnast, m/s;
$v_{ref}$ tuule kiirus, mis on teada, m/s;
$ln$ logaritmi funktsioon;

| | |
|---|---|
| $z$ | mõõtepunkti kõrgus tuule kiirus leidmiseks, m; |
| $z_0$ | takistustegur; |
| $z_{ref}$ | kõrgus, millelt on mõõdetud tuule kiiruse , m. |

Kui vajalikud mõõtmised ja arvutused on teostatud, on võimalik nende alusel võrrelda saadud tulemusi ja välja selgitada, kas on võimalik kasutada sarnast tuule kiiruse tehnoloogiat, mida kasutatakse meteoroloogiajaamades 10 meetri kõrgusel, et enne tuuleturbiini püstitamist selles asukohas teostada tuule kiiruse mõõtmine.

# 3. TUULEKIIRUSTE STATISTILINE ANALÜÜS

## 3.1. Mõõdetud tulemused

Antud uurimistöös on mõõdetud kuues asukohas tuule kiirust aastaringselt, ning neljas meteoroloogiajaamas on see toestatud 10 m kõrgusel ja mõõtetulemuste salvestamise sagedus iga tunni keskmine. 100 m kõrgusel tuuleturbiinis on tuule kiiruse mõõtmise salvestamise sagedus iga 10 minuti keskmine. Saadud tulemused on arvutatud päeva keskmisteks.

### 3.1.1. Asukoht A

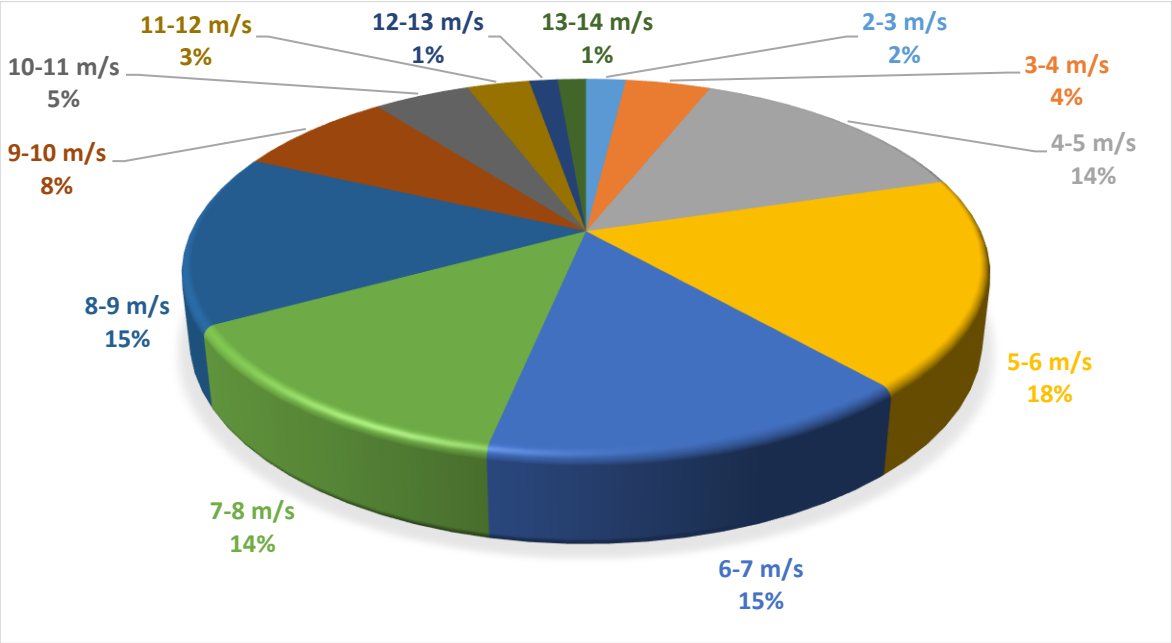
Tabelisse 3.1. on kantud vahemikud, kus on kirjeldatud tuule kiiruseid, kui palju on miski vahemik aasta jooksul esinenud. Tuule kiirused on mõõdetud 3,4 km merest ja 100 m kõrguselt maapinnast tuuleturbiini katuselt.

**Tabel 3.1.** Tuule kiiruse mõõtmine 100 meetri kõrguselt maapinnast

| Tuule kiiruse esinemise vahemik, m/s | Esinemissagedus, päeva |
|---|---|
| 2-3 | 7 |
| 3-4 | 15 |
| 4-5 | 52 |
| 5-6 | 66 |
| 6-7 | 54 |
| 7-8 | 50 |
| 8-9 | 54 |
| 9-10 | 28 |
| 10-11 | 17 |
| 11-12 | 11 |
| 12-13 | 5 |
| 13-14 | 5 |
| 14-15 | 1 |

Kui vaadelda päevade kaupa, siis tabelist 3.1 on näha, et kõige rohkem puhub tuul vahemikus 5-6 m/s, kui seda juhtub aastas 66. päeval. Kõrgusel 100 m on päevane keskmine tuule kiirus pidevalt üle 2 m/s ja tuuliseima päeva keskmine on kuni 15 m/s.

Joonisele 3.1 on kantud tuule esinemise vahemiku osakaal ühe aasta jooksul, mis annab parema ülevaate esinemise sagedusest.




**Joonis 3.1.** Tuule kiiruse esinemise sageduse osakaal asukohas A ühe aasta jooksul

Jooniselt 3.1 on näha, et enim esineb tuult vahemikus 4-10 m/s, mille osakaal moodustab 84%. Tabelist 3.1. on päeva tugevaim keskmine tuule kiirus vahemikus 14-15 m/s, siis see joonisel 3.1. ei kajastu kuna selle osakaal on alla 1 %.

### 3.1.2. Asukoht B

Tabelisse 3.2. on kantud vahemikud, kus on kirjeldatud tuule kiiruseid, kui palju on miski vahemik aasta jooksul esinenud. Tulemused on salvestatud 1 km merest ja100 m kõrguselt maapinnast tuuleturbiini katuselt.

**Tabel 3.2.** Tuule kiiruse mõõtmine 100 meetri kõrguselt maapinnast

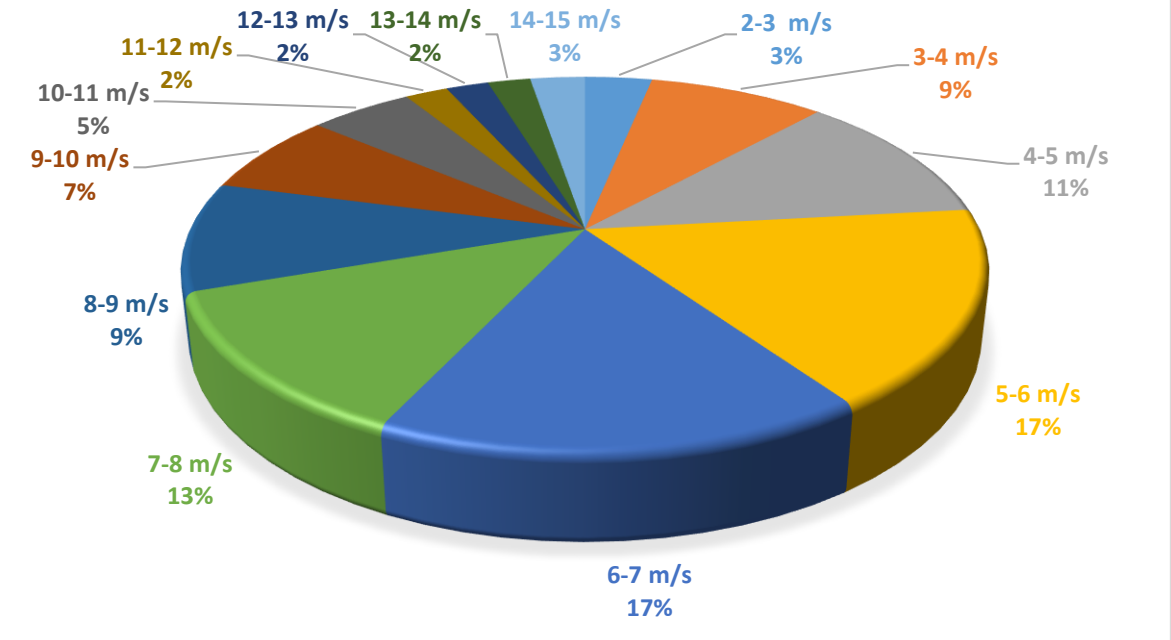
| Tuule kiiruse esinemise vahemik, m/s | Esinemine aastas, päeva |
|---|---|
| 2-3 | 11 |
| 3-4 | 29 |
| 4-5 | 39 |
| 5-6 | 58 |
| 6-7 | 57 |
| 7-8 | 43 |
| 8-9 | 32 |
| 9-10 | 24 |
| 10-11 | 17 |
| 11-12 | 7 |
| 12-13 | 7 |
| 13-14 | 7 |

**Tabeli 3.2.** jätk

| | |
|---|---|
| 14-15 | 9 |
| 15-16 | 1 |
| 16-17 | 1 |
| 17-18 | 1 |

Kui vaadelda päevade kaupa, siis tabelist 3.2 on näha, et kõige rohkem puhub tuul vahemikus 5-7 m/s., kui seda juhtub 115 päeval aastas. Kõrgusel 100 m on päevane keskmine tuule kiirus pidevalt üle 2 m/s ja tugevaim päeva keskmine on kuni 18 m/s.

Joonisele 3.2 on kantud tuule esinemise vahemiku osakaal ühe aasta jooksul, mis annab parema ülevaate keskmisest tuule kiirusest.




**Joonis 3.2.** Tuule kiiruse esinemise sageduse osakaal asukohas B ühe aasta jooksul

Jooniselt 3.2 on näha, et enim esineb tuult vahemikus 3-10 m/s, mille osakaal moodustab 82%. Tabelist 3.2 on tugevaim päeva keskmine tuule kiirus vahemikus 15-18 m/s, siis see joonisel 3.2 ei kajastu kuna nende vahemike osakaal on alla 1 %.

### 3.1.3. Pakri

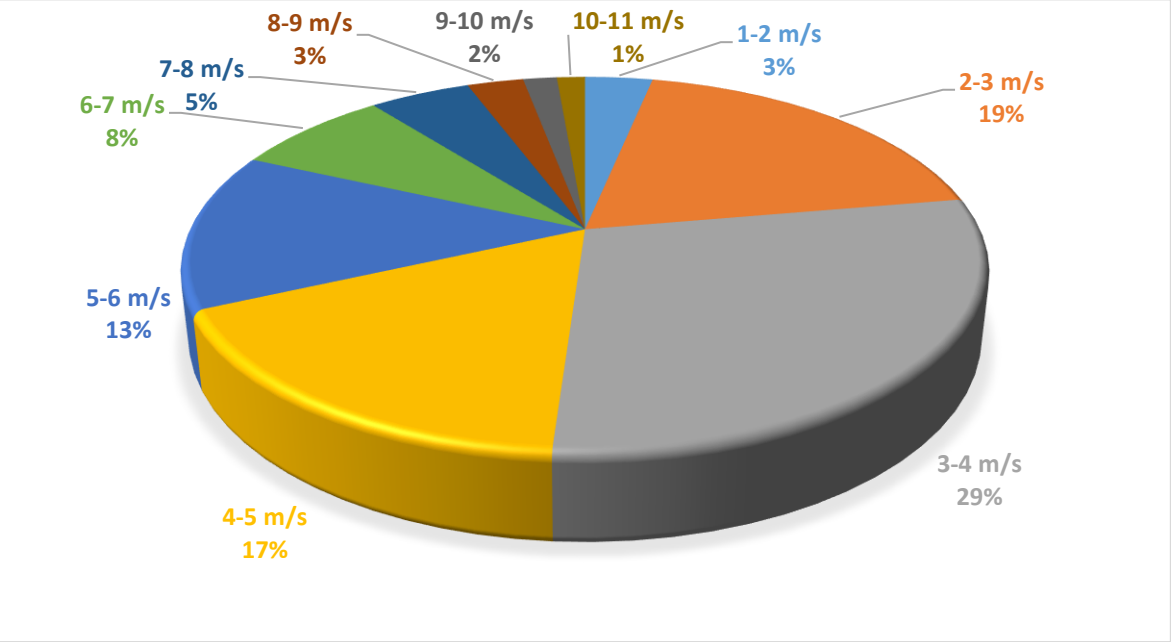
Tabelisse 3.3. on kantud vahemikud, kus on kirjeldatud tuule kiiruseid, kui palju on miski aasta jooksul esinenud. Tulemused on salvestatud 10 m kõrguselt maapinnast.

**Tabel 3.3.** Tuule kiiruse mõõtmine 10 meetri kõrguselt maapinnast

| Tuule kiiruse esinemise vahemik, m/s | Esinemine aastas, päeva |
|---|---|
| 1-2 | 12 |
| 2-3 | 70 |
| 3-4 | 106 |
| 4-5 | 63 |
| 5-6 | 50 |
| 6-7 | 28 |
| 7-8 | 18 |
| 8-9 | 10 |
| 9-10 | 6 |
| 10-11 | 5 |

Kui vaadelda päevade kaupa, siis tabelist 3.3 on näha, et kõige rohkem puhub tuul vahemikus 3-4 m/s, kui seda juhtub 106 päeval aastas. Võrreldes asukoha A ja B on keskmine tuule kiirus märgatavalt kahanenud. Põhjuseks võib nimetada 10 m kõrgusel mõõdetavat kiirust, kus see ongi madalam. Pakri meteoroloogiajaam asub merele lähedal ning tabelist on näha, et ka sellisel kõrgusel on päeva keskmine tuule kiirus alates 1 m/s ja tugevaim päeva keskmine tuule kiirus on kuni 11 m/s.

Joonisele 3.3 on kantud tuule esinemise vahemiku osakaal ühe aasta jooksul, mis annab parema ülevaate keskmisest tuule kiirusest.




**Joonis 3.3.** Tuule kiiruse esinemise sageduse osakaal Pakris ühe aasta jooksul

Jooniselt 3.3 on näha, et tuule keskmine kiirus jääb aastas vahemikku 2-7 m/s, mille osakaal moodustab 86%.

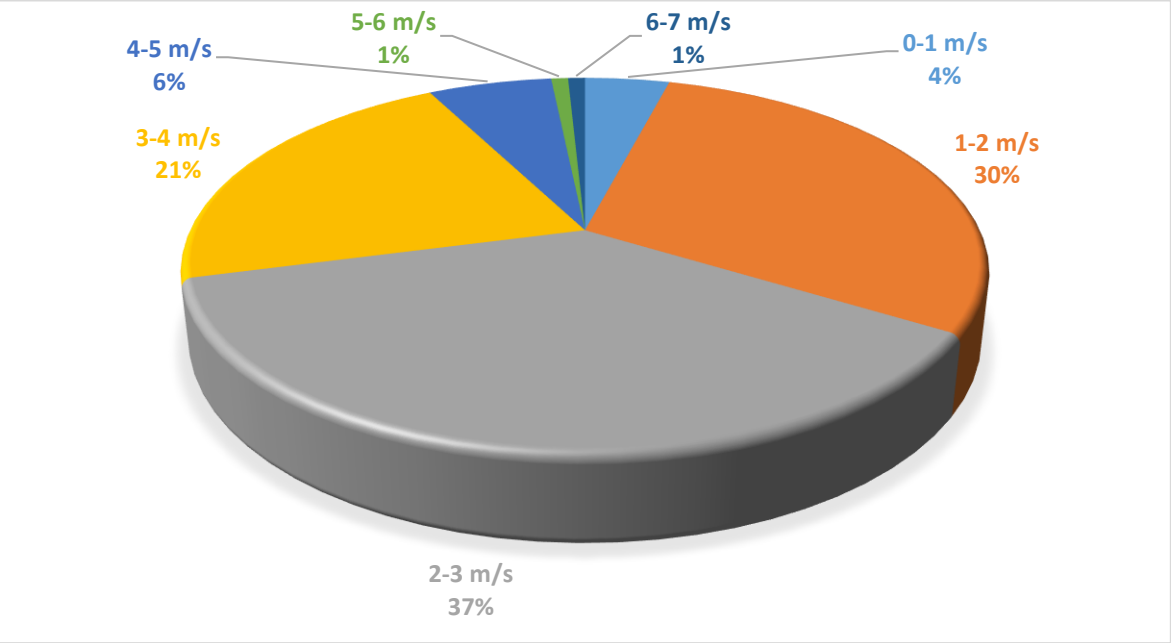
### 3.1.4. Tartu-Tõravere

Tabelisse 3.4. on kantud vahemikud, kus on kirjeldatud tuule kiiruseid, kui palju on miski aasta jooksul esinenud. Tuule kiirused on salvestatud 10m kõrguselt maapinnast.

**Tabel 3.4.** Tuule kiiruse mõõtmine 10 meetri kõrguselt maapinnast

| Tuule kiiruse esinemise vahemik, m/s | Esinemine aastas, päeva |
|---|---|
| 0-1 | 15 |
| 1-2 | 109 |
| 2-3 | 137 |
| 3-4 | 79 |
| 4-5 | 22 |
| 5-6 | 3 |
| 6-7 | 3 |

Kui vaadelda päevade kaupa, siis tabelist 3.4 on näha, et kõige rohkem puhub tuul vahemikus 2-3 m/s, kui seda juhtub 137 päeval aastas. Võrreldes Pakriga asub Tart-Tõravere meteoroloogiajaam sisemaal ja tuule kiirus on madal, ning mõõtmise asukohas on päevi, kus tuulekiirus jääb alla 1 m/s. Tugevaimad tuuled puhuvad kuni 7 m/s.




**Joonis 3.4.** Tuule kiiruse esinemise sageduse osakaal Tartu-Tõravetel ühe aasta jooksul

Jooniselt 3.4 on näha, et tuul puhub enim vahemikus 1-4 m/s, mille osakaal on aastas 88%. Tugevaim tuul puhub vahemikus 5-7 m/s, kuid esineb aastas vähem, kui tuulevaikseid päevi.

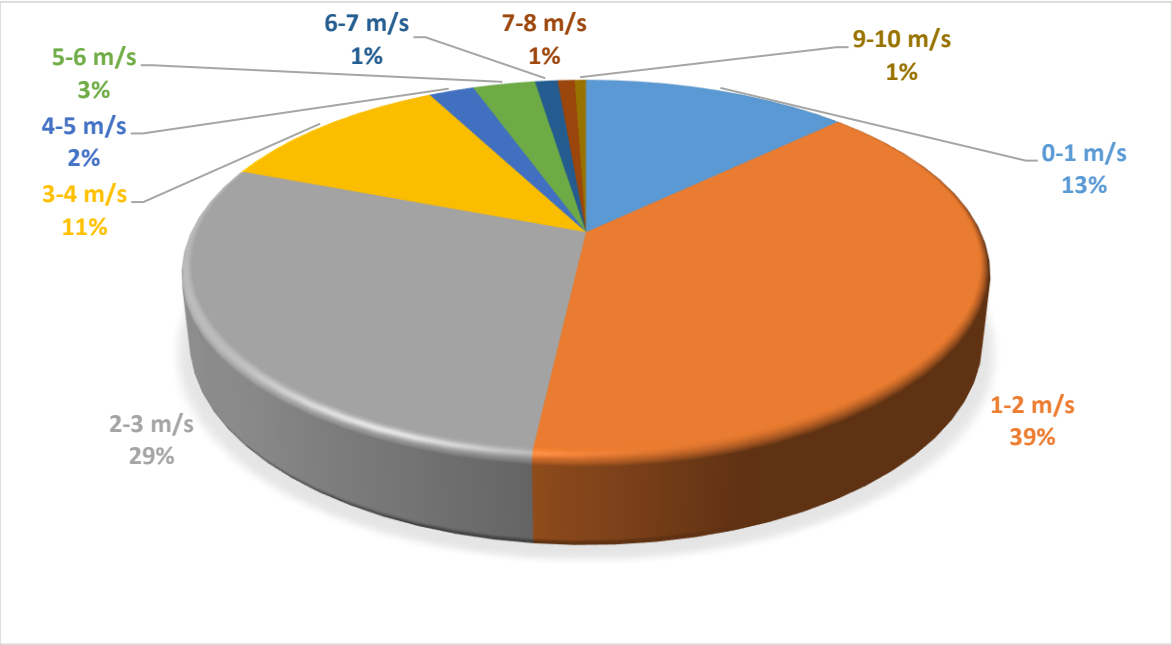
### 3.1.5. Tiirikoja

Tabelisse 3.5. on kantud vahemikud, kus on kirjeldatud tuule kiiruseid, kui palju on miski aasta jooksul esinenud. Tulemused on salvestatud 10 m kõrguselt maapinnast.

**Tabel 3.5.** Tuule kiiruse mõõtmine 10 meetri kõrguselt maapinnast

| Tuule kiiruse esinemise vahemik, m/s | Esinemine aastas, päeva |
|---|---|
| 0-1 | 47 |
| 1-2 | 142 |
| 2-3 | 106 |
| 3-4 | 42 |
| 4-5 | 8 |
| 5-6 | 11 |
| 6-7 | 4 |
| 7-8 | 3 |
| 8-9 | 1 |
| 9-10 | 2 |
| 10-11 | 1 |

Tiirikoja asub Peipsi järve ääres ja tugevam tuul esineb rohkem, kui Tartu-Tõraveres. Samas on tabelist 3.5 näha, et Tiirikojas puhub tuult enim vahemikus 1-2 m/s, mis on madalam, kui Tartu-Tõraveres, kuigi Tiirikojas on salvestatud suuremaid tuule kiiruseid. Tugevaim keskmine päevane tuule kiirus on olnud kuni 11 m/s.




**Joonis 3.5.** Tuule kiiruse esinemise sageduse osakaal Tiirikoja ühe aasta jooksul

Jooniselt 3.5 ei kajastu tuule kiiruste vahemik 8-9 m/s ja 10-11 m/s kuna nende vahemike osakaal on alla 1 %. Jooniselt on näha, et tuul puhub enim vahemikus 0-4 m/s, mille osakaal on aastas 92%.

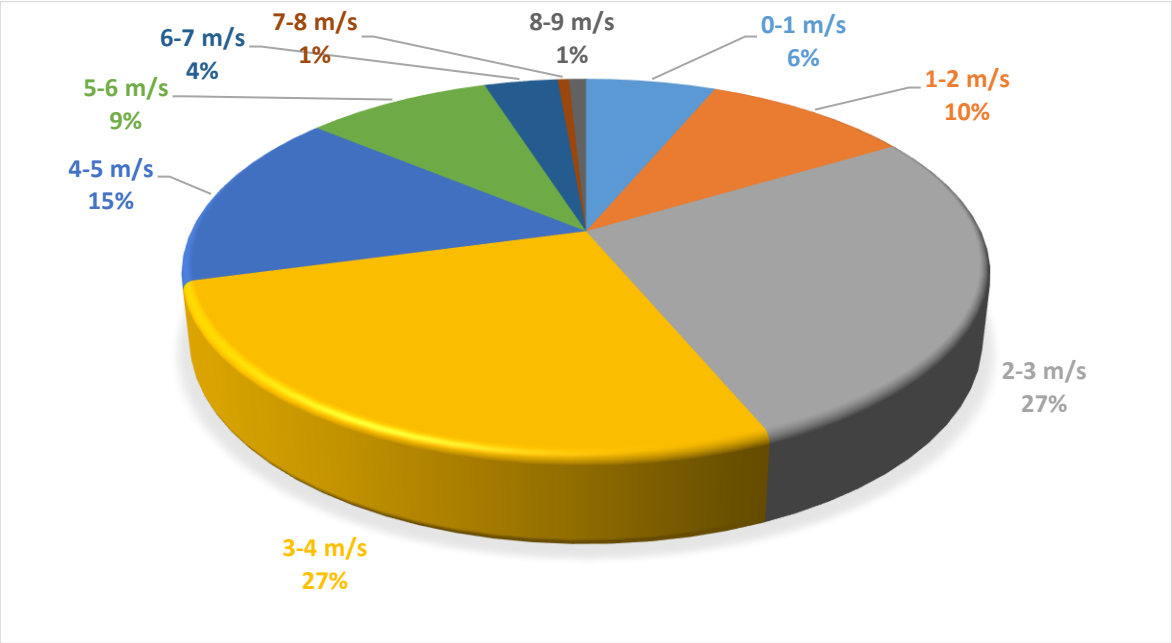
### 3.1.6. Virtsu

Tabelisse 3.6. on kantud vahemikud, kus on kirjeldatud tuule kiiruseid, kui palju on miski aasta jooksul esinenud. Tulemused on salvestatud 10 m kõrguselt maapinnast tuuleturbiini katuselt.

**Tabel 3.6.** Tuule kiiruse mõõtmine 10 meetri kõrguselt maapinnast

| Tuule kiiruse esinemise vahemik, m/s | Esinemine aastas, päeva |
|---|---|
| 0-1 | 23 |
| 1-2 | 37 |
| 2-3 | 100 |
| 3-4 | 99 |
| 4-5 | 56 |
| 5-6 | 33 |
| 6-7 | 13 |
| 7-8 | 2 |
| 8-9 | 3 |
| 9-10 | 1 |

Tabelist 3.4 on näha, et Virtsus puhub tuult enim vahemikus 2-4 m/s. Virtsu meteoroloogiajaam asub merele lähedal ja tugevamaid tuule esineb rohkem, kui sisemaa jaamades. Samas esineb antud asukohas tuule kiirust, mis jääb alla 1 m/s. Tugevaim tuule kiirus on olnud kuni 10 m/s.



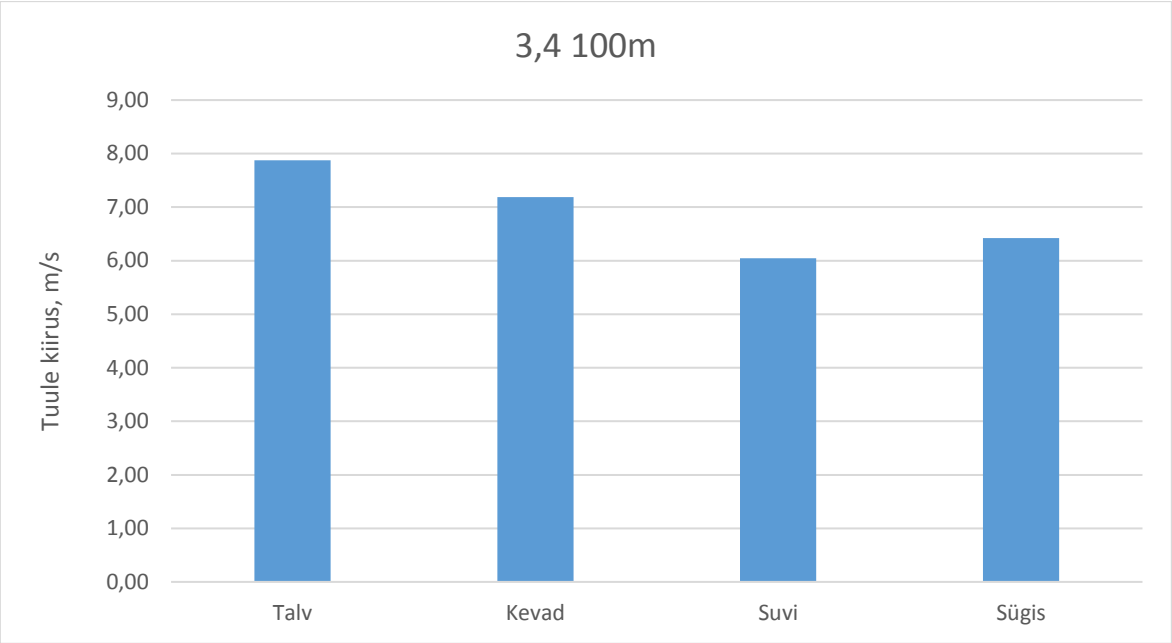

**Joonis 3.6.** Tuule kiiruse esinemise sageduse osakaal Virtsus ühe aasta jooksul

Jooniselt 3.6 ei kajastu tuule kiiruse vahemik 9-10 m/s kuna selle vahemike osakaal on alla 1%. Jooniselt on näha, et tuul puhub enim vahemikus 1-6 m/s, mille osakaal on aastas 88%.

## 3.2. Tuule kiiruse muutused aastaaegade, kuude ja nädalate kaupa

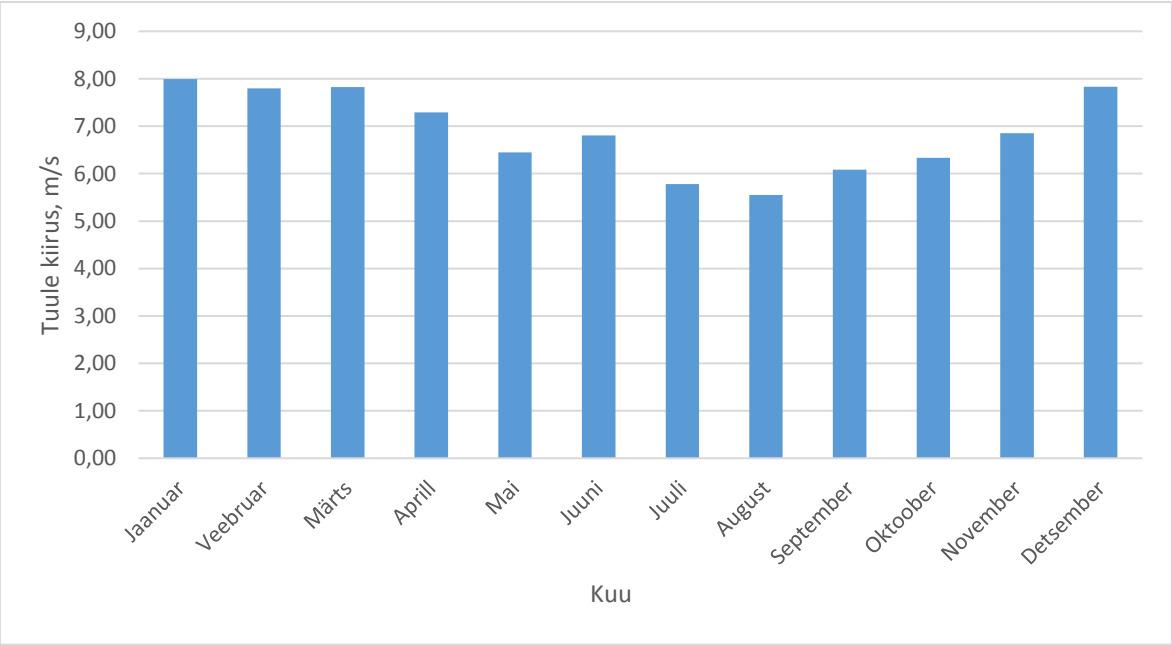
### 3.2.1. Asukoht A

Antud asukohata on uurimistöös nimetatud asukohas A, kuna täpset asukohta ei ole lubatud avalikustada. Tuule kiiruse mõõtmised on teostatud 100 m kõrguselt maapinnast.Aastane tuule kiiruse mõõtmine asukohas A näitab seda, et talvisel perioodil on tuule keskmine kiirus 7,88 m/s. Suvisel perioodil on tuule kiirus madalaim, olles keskmiselt 6,05 m/s. Kevadel on tuule keskmine kiirus natuke kõrgem, kui mõõdeti selleks 7,19 m/s. Aasta keskmiseks tuule kiiruseks on 6,65 m/s ning jooniselt on näha, et talvisel ja sügisesel perioodil on see üle keskmise. Arvutatud tulemused on katud joonisele 3.7.




**Joonis 3.7.** Asukohas A mõõdetud tuulekiirused aastaaegade kaupa

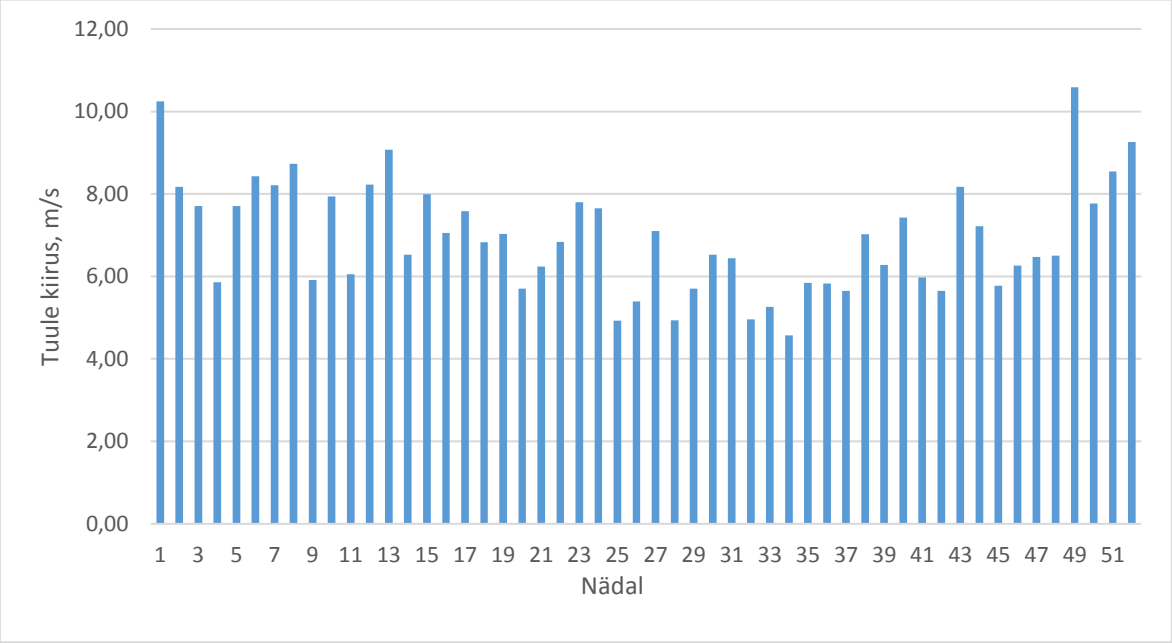
Paremaks ülevaateks on joonisele 3.8 kantud keskmised tuule kiirused kuude kaupa. Jooniselt on näha, et aasta madalaim keskmine tuule kiirus on augustis, kus on mõõdetud keskmiseks kiiruseks 5,55 m/s. Aasta kõrgeim tuule kiirus on mõõdetud jaanuaris, kus mõõdeti keskmiseks kiiruseks 8 m/s. Samuti puhuvad tugevad tuuled ka veebruaris, märtsis ja detsembris.




**Joonis 3.8.** Asukohas A mõõdetud tuulekiirused kuude kaupa

Joonisele 3.9 on kantud tuule keskmine kiirus mõõdetud perioodil nädalate kaupa. Jooniselt on näha, et tuule keskmine kiirus nädalast nädalasse on kõikuv. Aastaaegade kaupa on kõrgeim tuul 49. nädalal , kui tuule keskmine kiirus on 10,58 m/s. Nagu jooniselt näha,

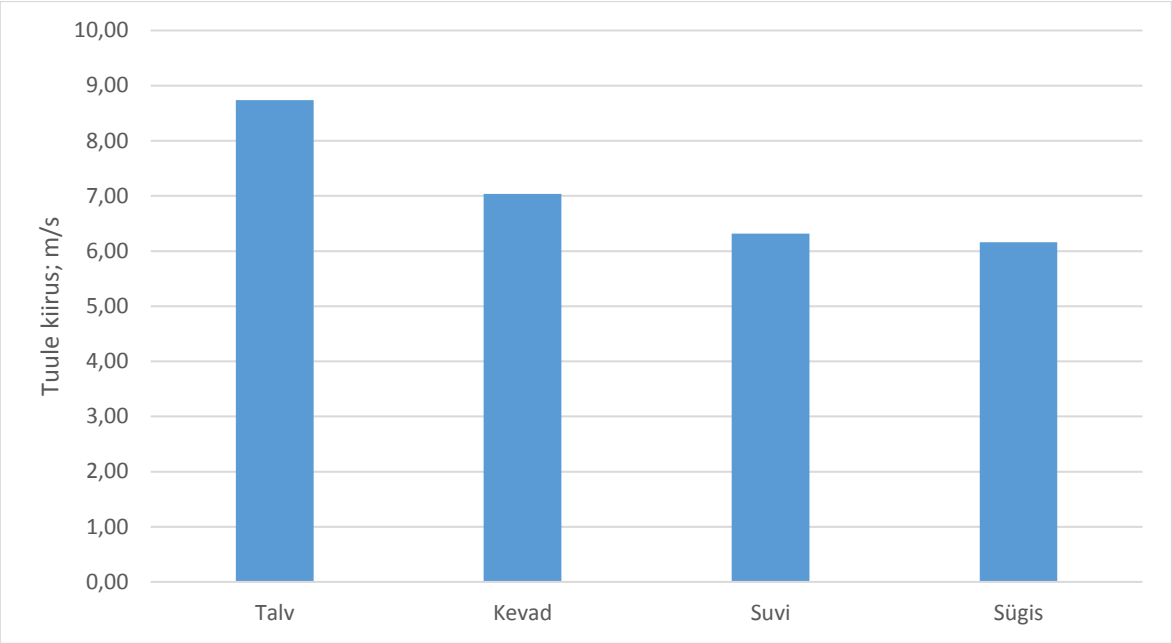
jäävad suurimad tuule puhangud talvisesse perioodi, mida tõestab ka joonis 3.7. aasta madalaim tuul on 34. nädalal, kui tuule keskmine kiirus on 4,57 m/s.




**Joonis 3.9.** Asukohas A mõõdetud tuulekiirused nädalate kaupa

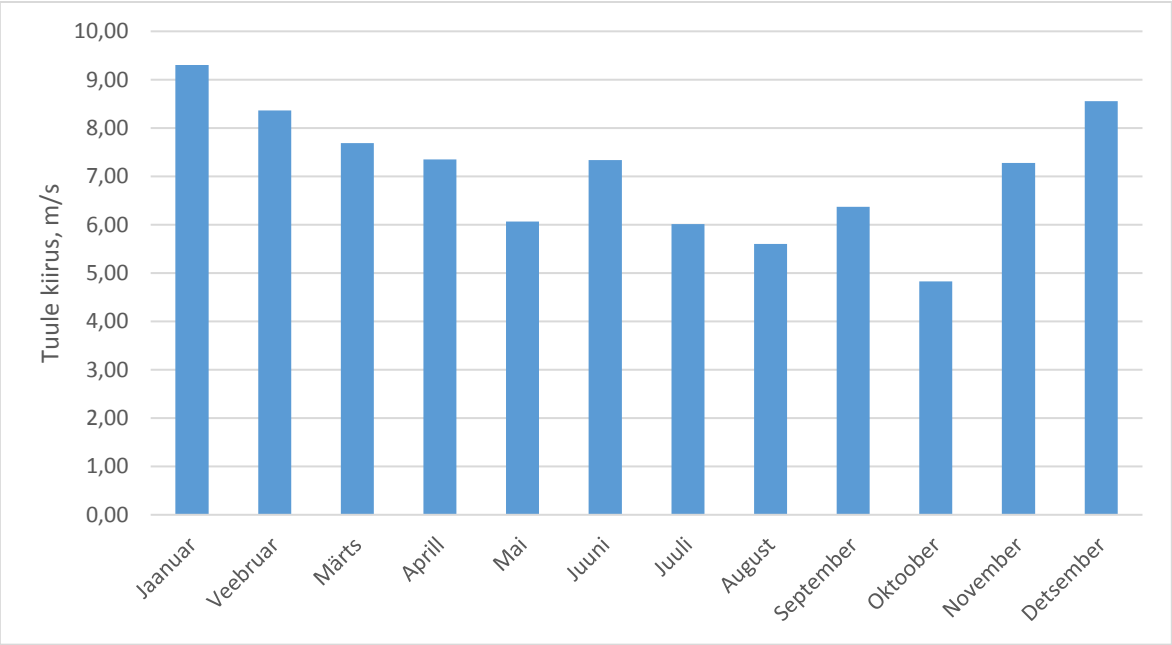
### 3.2.2. Asukoht B

Antud asukohata on uurimistöös nimetatud asukohas B, kuna täpset asukohta ei ole lubatud avalikustada. Tuule kiiruse mõõtmised on teostatud 100 m kõrguselt maapinnast. Aastane tuule kiiruse mõõtmine asukohas B näitab seda, et talvisel perioodil on tuule keskmine kiirus 8,74 m/s. Jooniselt 3.10 on näha ,et sügisel on aastaaegade kaupa arvestades tuult kõige vähem, olles keskmiselt 6,16 m/s. Aasta keskmiseks tuule kiiruseks on 7,14 m/s ja ainult talvisel perioodil on tuule kiirus üle selle.




**Joonis 3.10.** Asukohas B mõõdetud tuulekiirused aastaaegade kaupa

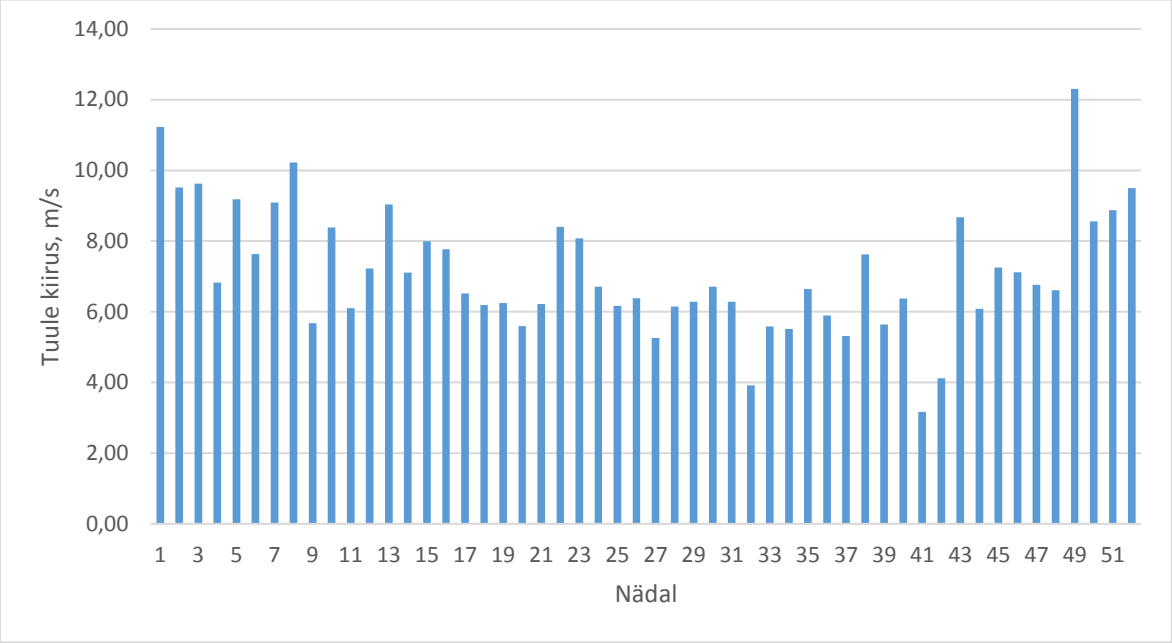
Paremaks ülevaateks on joonisele 3.11 kantud keskmised tuule kiirused kuude kaupa. Jooniselt on näha, et aasta madalaim keskmine tuule kiirus on oktoobris, kus on mõõdetud keskmiseks kiiruseks 4,83 m/s. Aasta kõrgeim tuule kiirus on mõõdetud jaanuaris, kus mõõdeti keskmiseks kiiruseks 9,3 m/s. Samuti puhuvad tugevad tuuled ka märtsis ja detsembris.




**Joonis 3.11.** Asukohas B mõõdetud tuulekiirused kuude kaupa

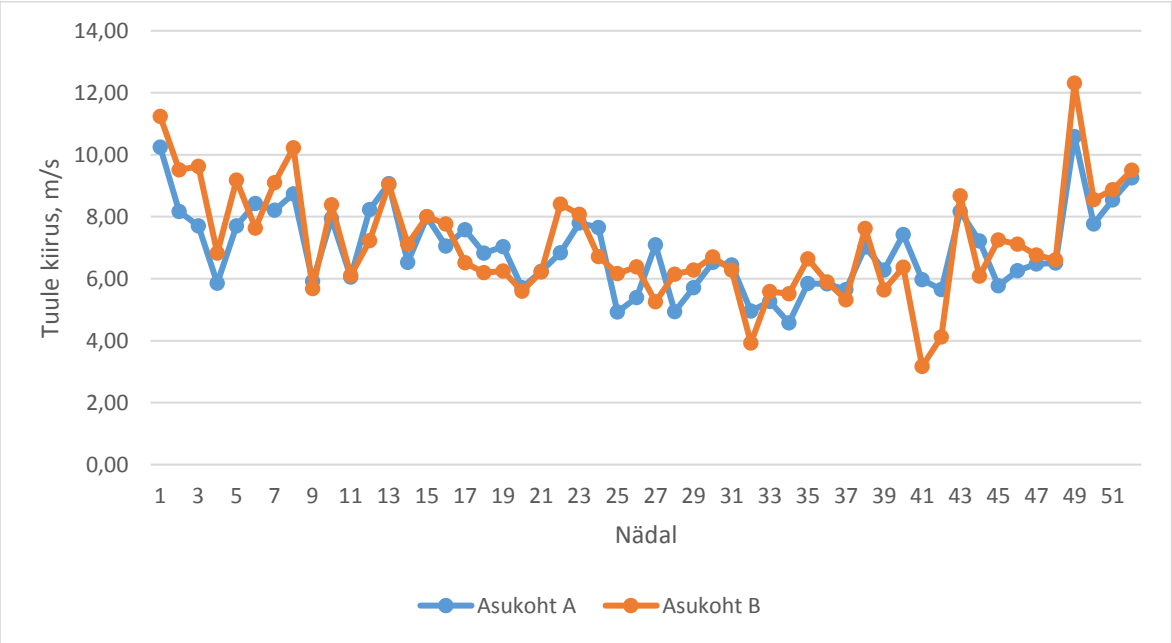
Joonisele 3.12 on kantud tuule keskmine kiirus mõõdetud perioodil nädalate kaupa. Jooniselt on näha, et tuule keskmine kiirus nädalast nädalasse on kõikuv. Aastaaedage kaupa on kõrgeim tuul 49. nädalal , kui tuule keskmine kiirus on 12,31 m/s. Jooniselt näha, jäävad

suurimad tuule puhangud talvisesse perioodi. Aasta madalaim tuul on 41. nädalal, kui tuule keskmine kiirus on 3,17 m/s.




**Joonis 3.12.** Asukohas B mõõdetud tuulekiirused nädalate kaupa

Kui kõrvutada mõlema asukoha nädalate keskmise tuulekiiruse graafikud (joonis 3.13), siis on näha, et asukohas B on tuule kiirus pidevalt kõrgem. Samas on madalaim nädala keskmine tuule kiirus mõõdetus asukohas B.

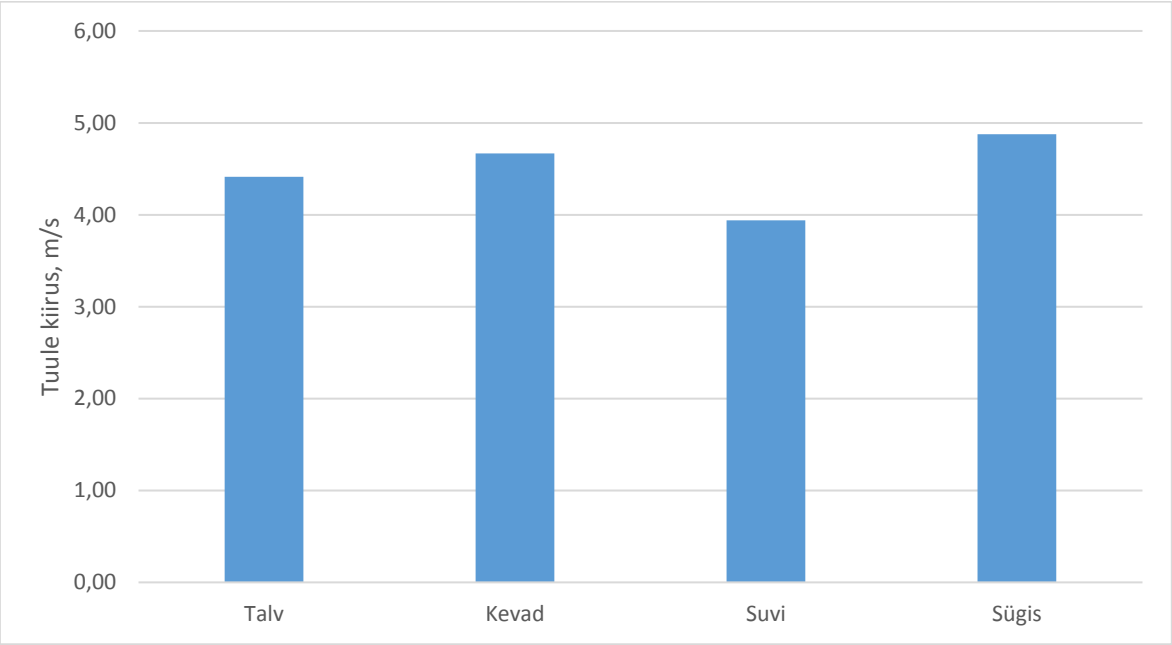



**Joonis 3.13.** Asukohas A ja B mõõdetud tuulekiirused nädalate kaupa

See, et asukohas A on madalam tuule kiirus on seletatav sellega, et see asub mere äärest kaugemal sisemaa poole ning ees on rohkem tuult takistavaid objekte, kui asukohas B.

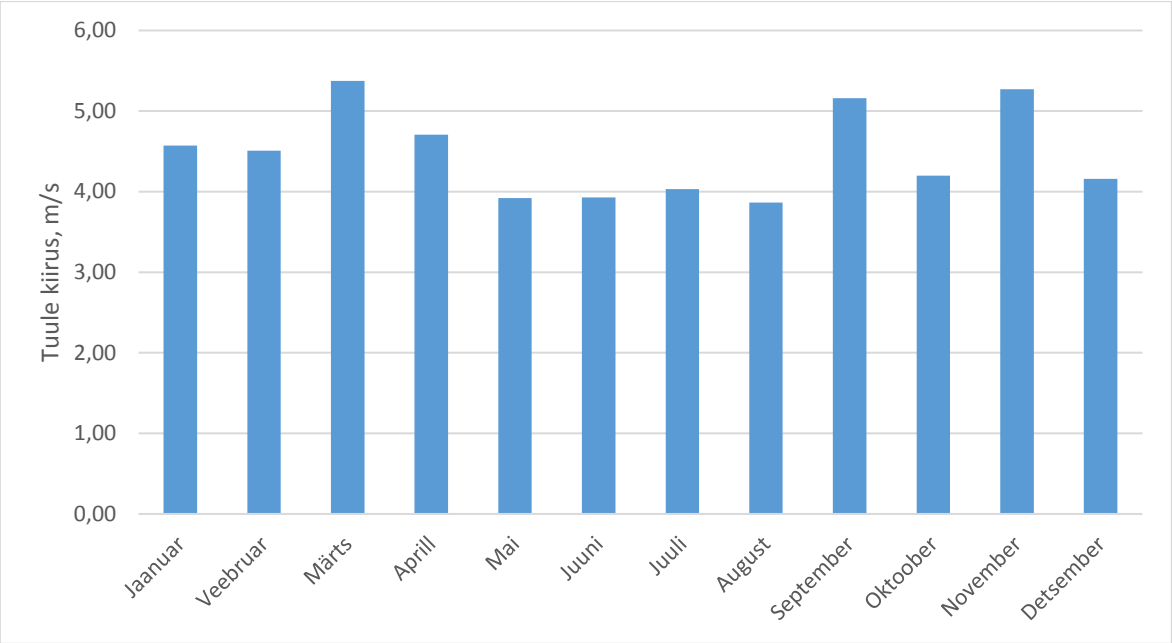
### 3.2.3. Pakri

Aastane tuule kiiruse mõõtmine Pakril näitab seda, et sügisel on tuule kiirus kõrgeim, olles keskmiselt 4,88 m/. Madalaim on tuule kiirus suvisel perioodil, olles keskmiselt 3,94 m/s. Jooniselt 3.13 on näha, et olenevalt aastaajast on keskmise tuule kiiruse erinevus siiski suhteliselt väike. Aasta keskmiseks tuule kiiruseks on 4,5 m/s ja kevadel kui ka sügisel on see kõrgem. Mõõtmised on teostatud 10 m kõrguselt maapinnast.



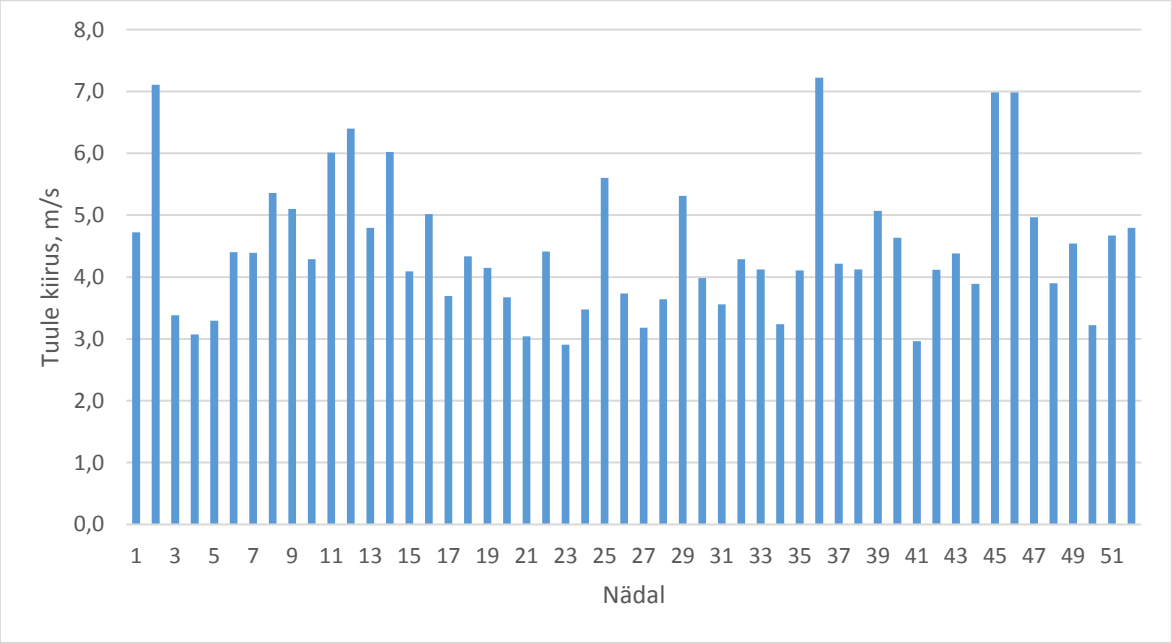

**Joonis 3.13.** Pakri meteoroloogiajaamas mõõdetud tuulekiirused aastaaegade kaupa

Paremaks ülevaateks on joonisele 3.14 kantud keskmised tuule kiirused kuude kaupa. Jooniselt on näha, et alates maist kuni augustini puhub ühtlaselt madal keskmine tuul. Aasta madalaim keskmine tuule kiirus on siiski augustis, kus on mõõdetud keskmiseks kiiruseks 3,89 m/s. Aasta kõrgeim tuule kiirus on mõõdetud märtsis, kus mõõdeti keskmiseks kiiruseks 5,37 m/s. Samuti puhuvad tugevad tuuled ka septembris ja novembris.




**Joonis 3.14.** Pakri meteoroloogiajaamas mõõdetud tuulekiirused kuude kaupa

Joonisele 3.15 on kantud tuule keskmine kiirus mõõdetud perioodil nädalate kaupa. Jooniselt on näha, et madalamal kõrgustel on tuul kiirus väiksem ja kõikuvam, kui 100m kõrgusel. Aasta kõrgeim tuul on 36 nädalal, kui mõõdeti keskmiseks tuule kiiruseks 7,3 m/s. See nädal on septembris, mis jääb sügisesse aega.

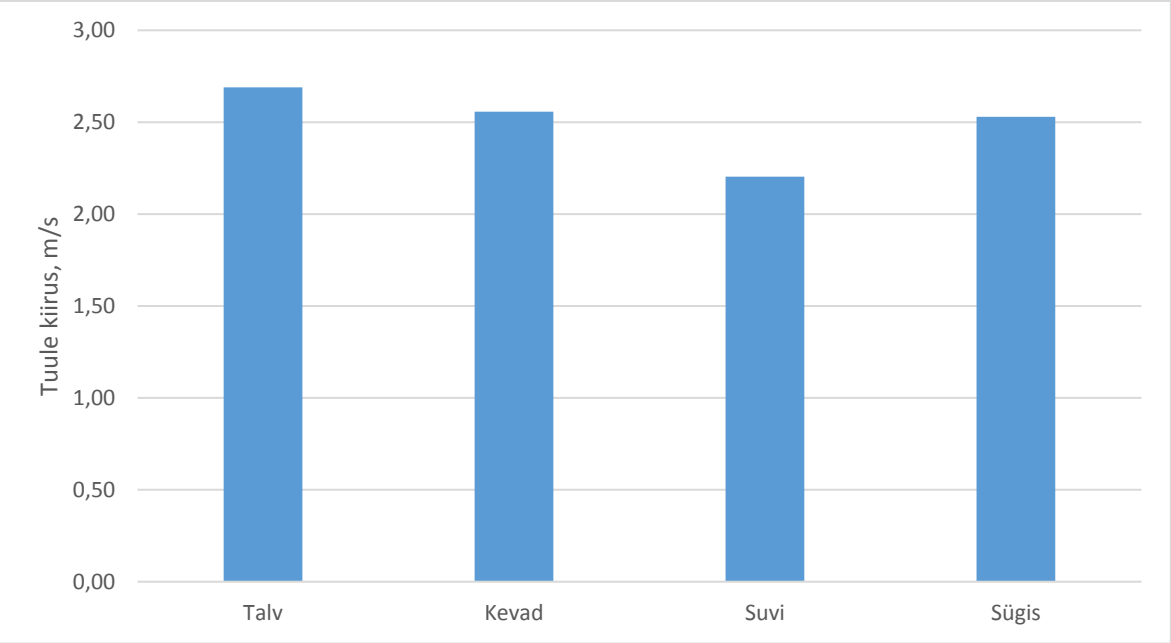



**Joonis 3.15.** Pakri meteoroloogiajaamas mõõdetud tuulekiirused nädalate kaupa

Jooniselt 3.15 on näha, et madalaim tuule keskmine kiirus on mõõdetud 23. nädalal, kui mõõdeti 2,9 m/s.

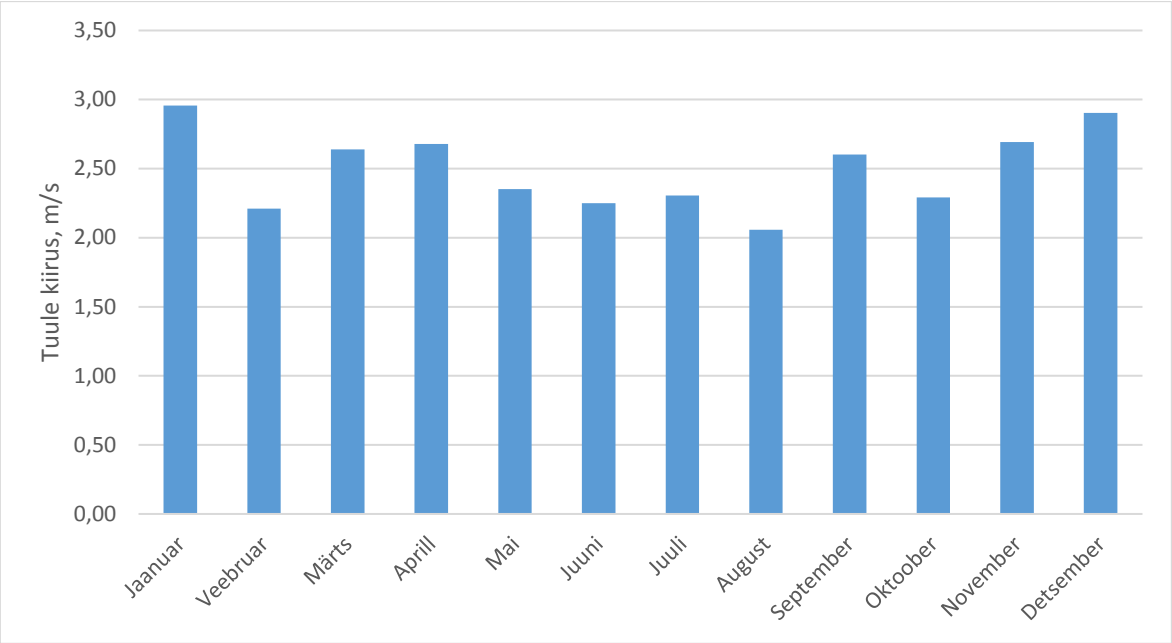
### 3.2.4. Tartu-Tõravere

Aastane tuule kiiruse mõõtmine Tartu-Tõraveres näitab seda, et tuule kiirus talvisel perioodil on kõrgeim, olles keskmiselt 2,69 m/s. Jooniselt 3.16 on näha, et olenevalt aastaajast on keskmise tuule kiiruse erinevus siiski suhteliselt väike jäädes vahemikku 2,2 kuni 2,69 m/s. Aasta keskmiseks tuule kiiruseks on 2,5 m/s ja ainult suvisel perioodil on see madalam, mis näitab seda, et aastaringselt puhub Tartu-Tõravere meteoroloogijaamas stabiilselt ühtlane ja madal tuul. Mõõtmised on teostatud 10 m kõrguselt maapinnast.



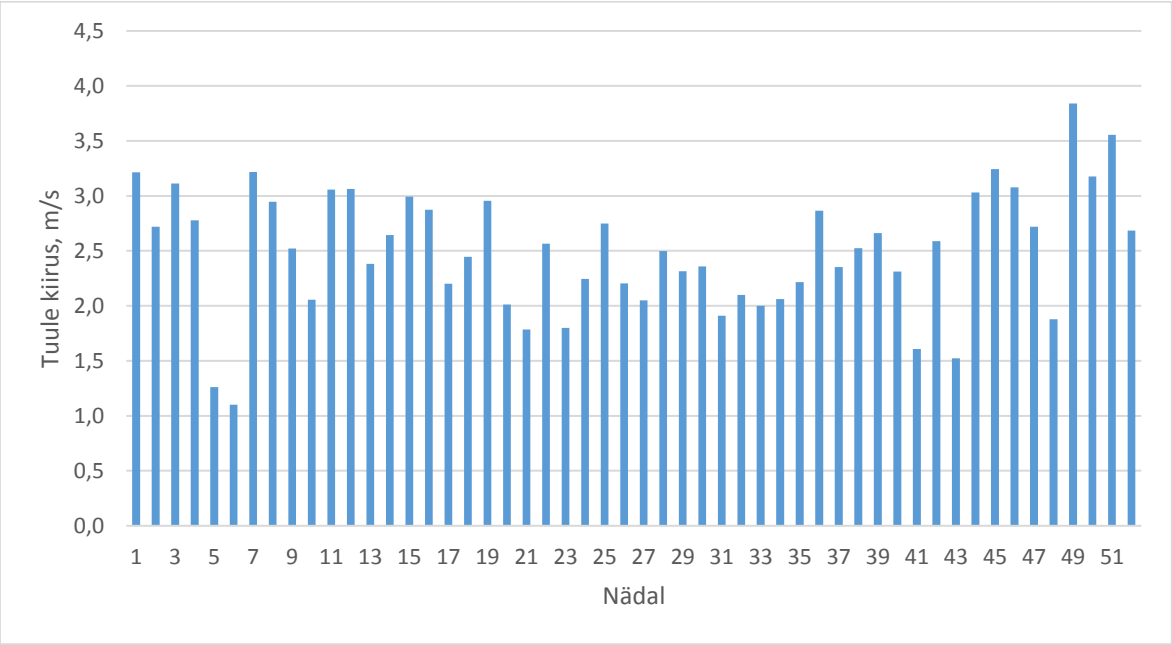

**Joonis 3.16.** Tartu-Tõravere meteoroloogiajaamas mõõdetud tuulekiirused aastaaegade kaupa

Paremaks ülevaateks on joonisele 3.17 kantud keskmised tuule kiirused kuude kaupa. Jooniselt on näha, et augustis on Tartu-Tõravere meteoroloogiajaamas madalaim tuule kiirus, olles keskmiselt 2,06 m/s. Aasta kõrgeim tuule kiirus on mõõdetud jaanuaris, kus mõõdeti keskmiseks kiiruseks 2,96 m/s. Samuti on kõrgem tuule keskmine kiirus detsembris, kus mõõdeti 2,9 m/s.




**Joonis 3.17.** Tartu-Tõravere meteoroloogiajaamas mõõdetud tuulekiirused kuude kaupa

Joonisele 3.18 on kantud tuule keskmine kiirus mõõdetud perioodil nädalate kaupa. Aasta kõrgeim tuul on 49 nädalal, kui mõõdeti keskmiseks tuule kiiruseks 3,8 m/s. Madalaim tuule kiirus on 6. nädalal, olles keskmiseks 1,1 m/s.

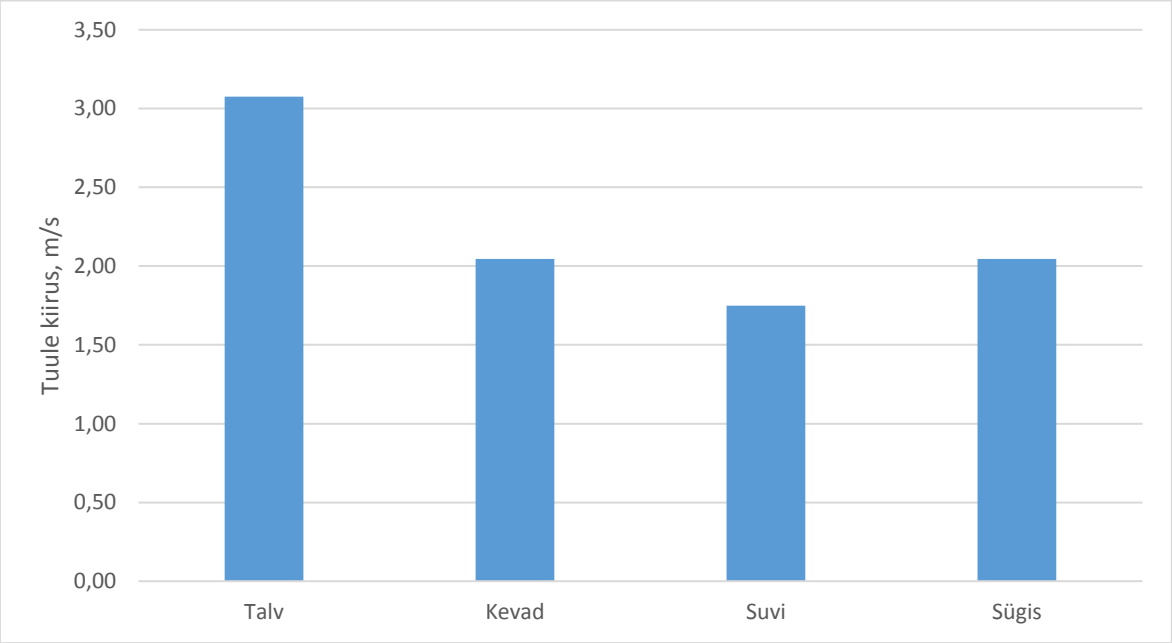



**Joonis 3.18.** Tartu-Tõravere meteoroloogiajaamas mõõdetud tuulekiirused nädalate kaupa

Tartu-Tõravere meteoroloogiajaamas on salvestatud nii madalaim ja kõrgeim tuule keskmine kiirus talvisel perioodil.

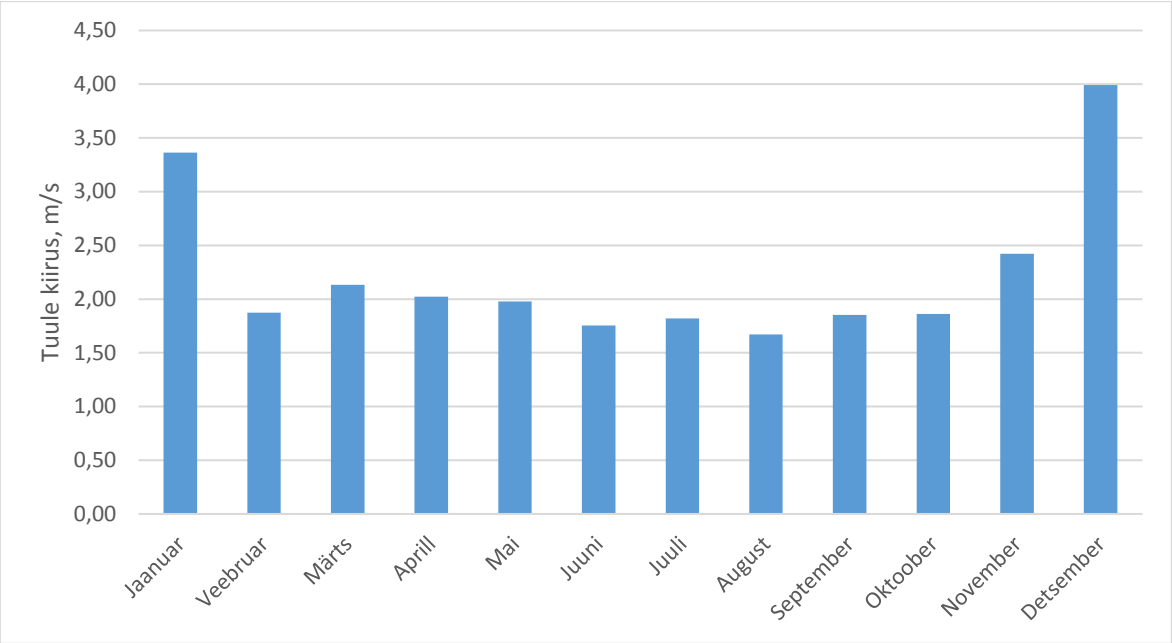
### 3.2.5. Tiirikoja

Aastane tuule kiiruse mõõtmine Tiirikoja meteoroloogiajaamas näitab seda, et tuule kiirus talvisel perioodil on kõrgeim, olles keskmiselt 3,08 m/s. Jooniselt 3.19 on näha, et aasta madalaimad tuul puhub suvisel perioodil, olles keskmiselt 1,75 m/s. Aasta keskmiseks tuule kiiruseks on 2,2 m/s ja ainult talvel on see kõrgem. Mõõtmised on teostatud 10 m kõrguselt maapinnast.



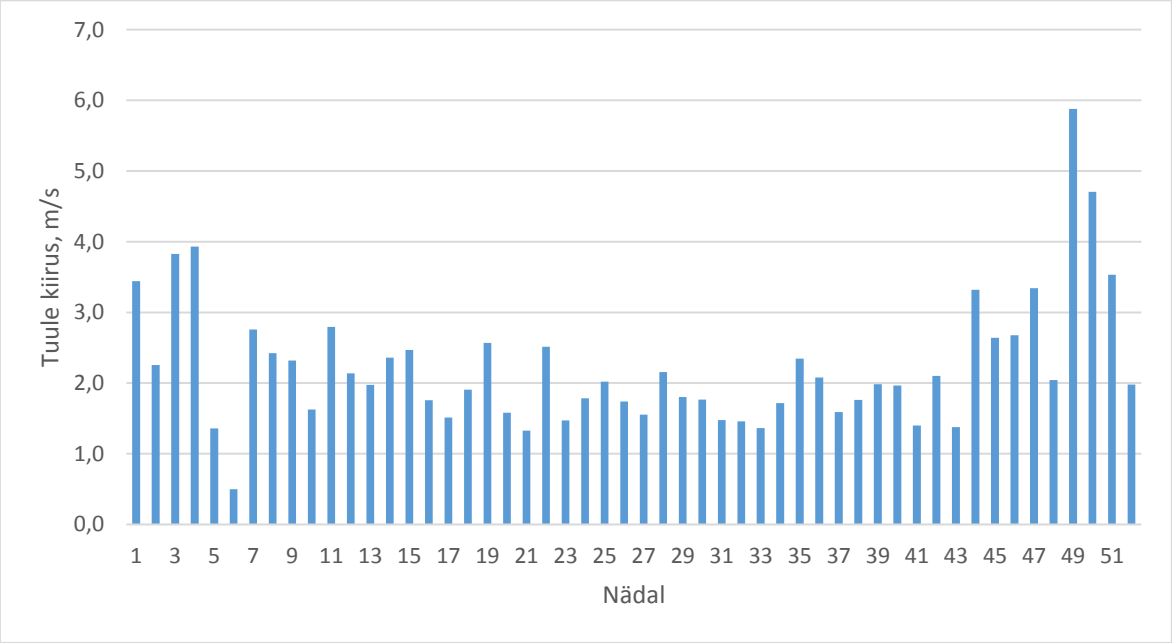

**Joonis 3.19.** Tiirikoja meteoroloogiajaamas mõõdetud tuulekiirused aastaaegade kaupa

Paremaks ülevaateks on joonisele 3.20 kantud keskmised tuule kiirused kuude kaupa. Jooniselt on näha, et augustis on Tiirikoja meteoroloogiajaamas madalaim tuule kiirus, olles keskmiselt 1,67 m/s, samas perioodil veebruarist kuni oktoobrini puhub pidevalt madal tuul kiirusega 1,67 kuni 2,13 m/s. Aasta kõrgeim tuule kiirus on mõõdetud detsembris, kus mõõdeti keskmiseks kiiruseks 3,99 m/s.




**Joonis 3.20.** Tiirikoja meteoroloogiajaamas mõõdetud tuulekiirused kuude kaupa

Joonisele 3.21 on kantud tuule keskmine kiirus mõõdetud perioodil nädalate kaupa. Aasta kõrgeim tuul on 49 nädalal, kui mõõdeti keskmiseks tuule kiiruseks 5,9 m/s. Madalaim tuule kiirus on 6. nädalal, olles keskmiseks 0,5 m/s.

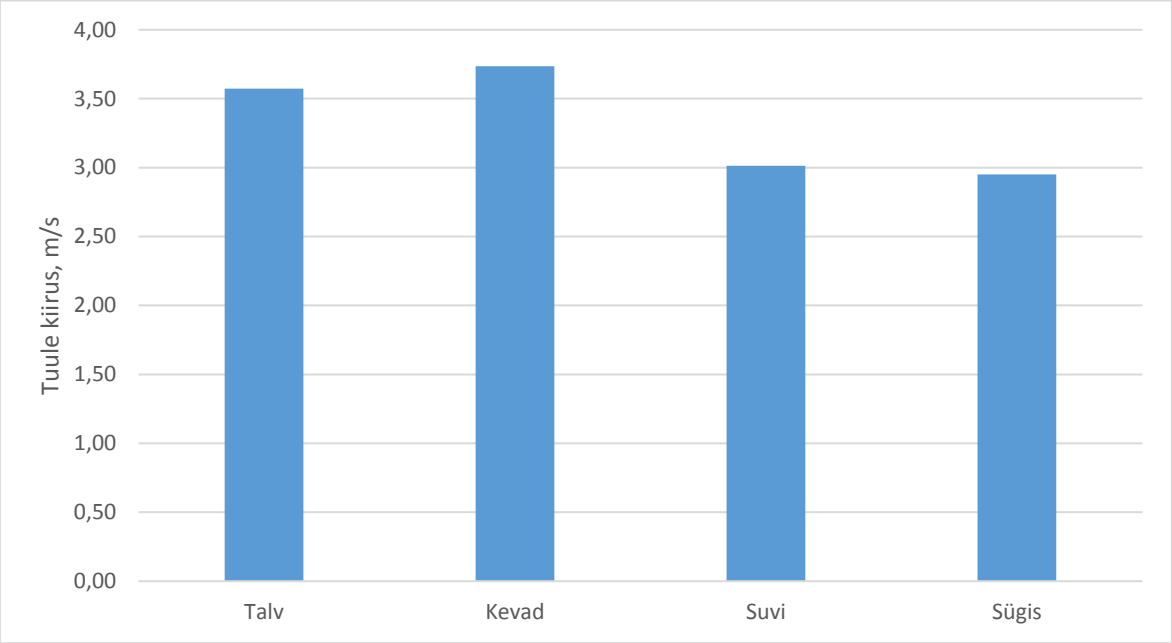



**Joonis 3.21.** Tiirikoja meteoroloogiajaamas mõõdetud tuulekiirused nädalate kaupa

Tiirikoja meteoroloogiajaamas on salvestatud nii madalaim ja kõrgeim tuule keskmine kiirus talvisel perioodil.

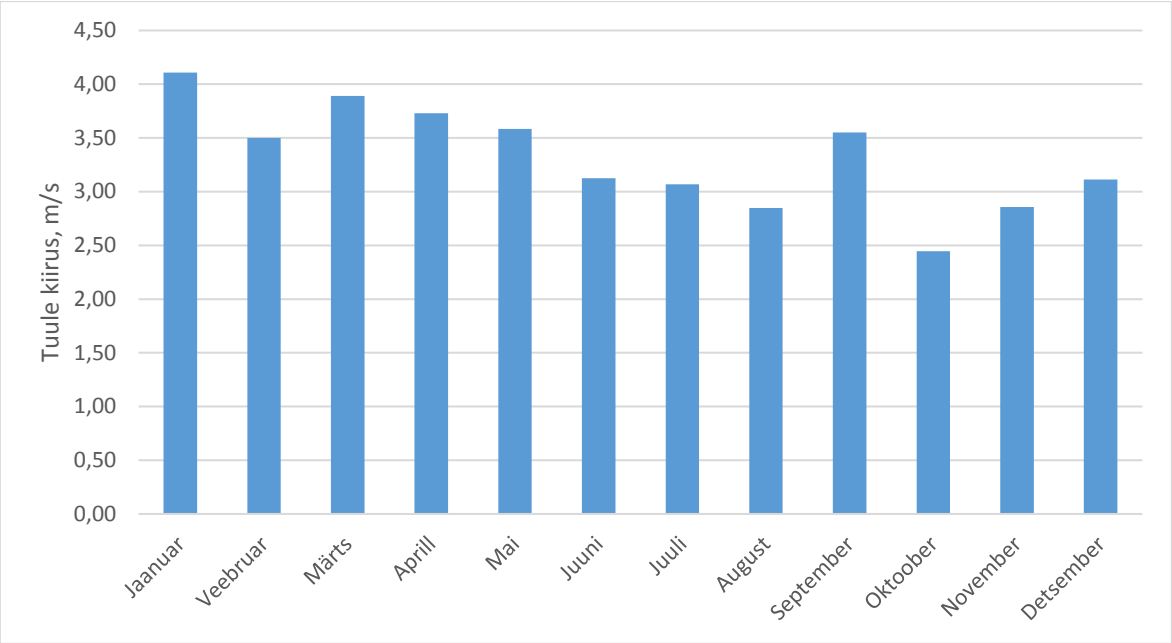
### 3.2.6. Virtsu

Aastane tuule kiiruse mõõtmine Virtsu meteoroloogiajaamas näitab seda, et tuule kiirus kevadisel perioodil on kõrgeim, olles keskmiselt 3,73 m/s. Jooniselt 3.22 on näha, et aasta madalaimad tuul puhub sügisel, olles keskmiselt 2,95 m/s. Aasta keskmiseks tuule kiiruseks on 3,4 m/s ja talvisel, kui ka kevadisel perioodil on tuul sellest kõrgem. Mõõtmised on teostatud 10 m kõrguselt maapinnast.



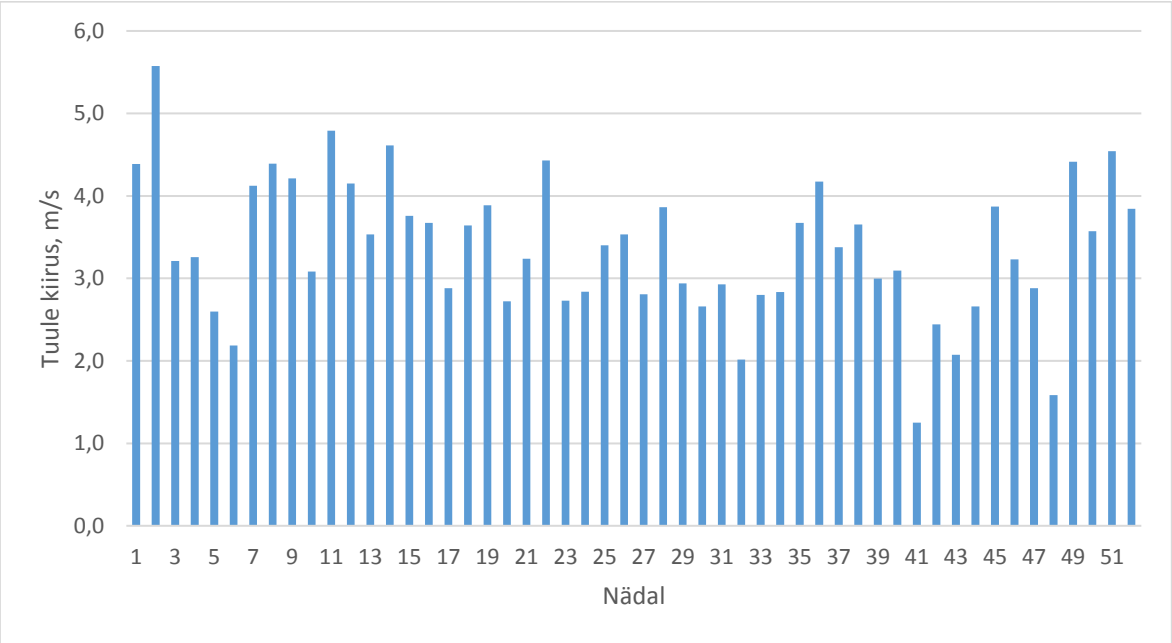

**Joonis 3.22.** Virtsu meteoroloogiajaamas mõõdetud tuulekiirused aastaaegade kaupa

Paremaks ülevaateks on joonisele 3.23 kantud keskmised tuule kiirused kuude kaupa. Jooniselt on näha, et oktoobris on Virtsu meteoroloogiajaamas madalaim tuule kiirus, olles keskmiselt 2,45 m/s. Aasta kõrgeim tuule kiirus on mõõdetud jaanuaris, kus mõõdeti keskmiseks kiiruseks 4,11 m/s.



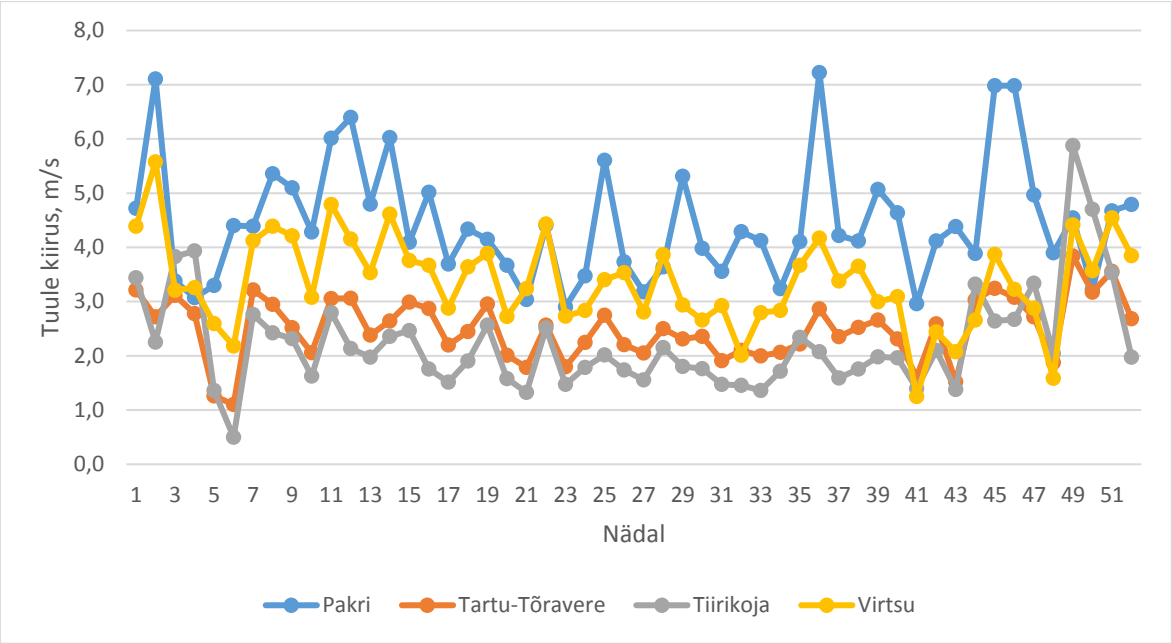

**Joonis 3.23.** Virtsu meteoroloogiajaamas mõõdetud tuulekiirused kuude kaupa

Joonisele 3.24 on kantud tuule keskmine kiirus mõõdetud perioodil nädalate kaupa. Aasta kõrgeim tuul on 2 nädalal, kui mõõdeti keskmiseks tuule kiiruseks 5,6 m/s. Madalaim tuule kiirus on 41. nädalal, olles keskmiseks 1,2 m/s.




**Joonis 3.24.** Virtsu meteoroloogiajaamas mõõdetud tuulekiirused nädalate kaupa

Nagu ka teistes meteoroloogiajaamades on ka Virtsus mõõdetud tuul aastaaegade kaupa väga kõikuv.




**Joonis 3.25.** Neljas meteoroloogiajaamas mõõdetud tuulekiirused nädalate kaupa

Jooniselt 3.25 on näha, et Pakri ja Virtsu meteoroloogiajaamades on salvestatud kõrgem tuule kiirus kui Tartu-Tõravere ja Tiirikojal. Samas asuvad esimesed kaks mere äärel alal ja teised kaugemal sisemaal. Kui võrrelda 10 meetri kõrgusel ja 100 meetri kõrgusel mõõdetud tuule keskmiseid kiiruseid, siis on näha, et kõrgemal puhuvad tugevamad tuuled (Tabel 3.7).

**Tabel 3.7.** Kuues asukohas mõõdetud aasta keskmine tuule kiirus

| Asukoht | Aasta keskmine tuule kiirus, m/s |
|---|---|
| Asukoht A | 7,96 |
| Asukoht B | 8,97 |
| Pakri | 4,5 |
| Tartu-Tõravere | 2,5 |
| Tiirikoja | 2,2 |
| Virtsu | 3,4 |

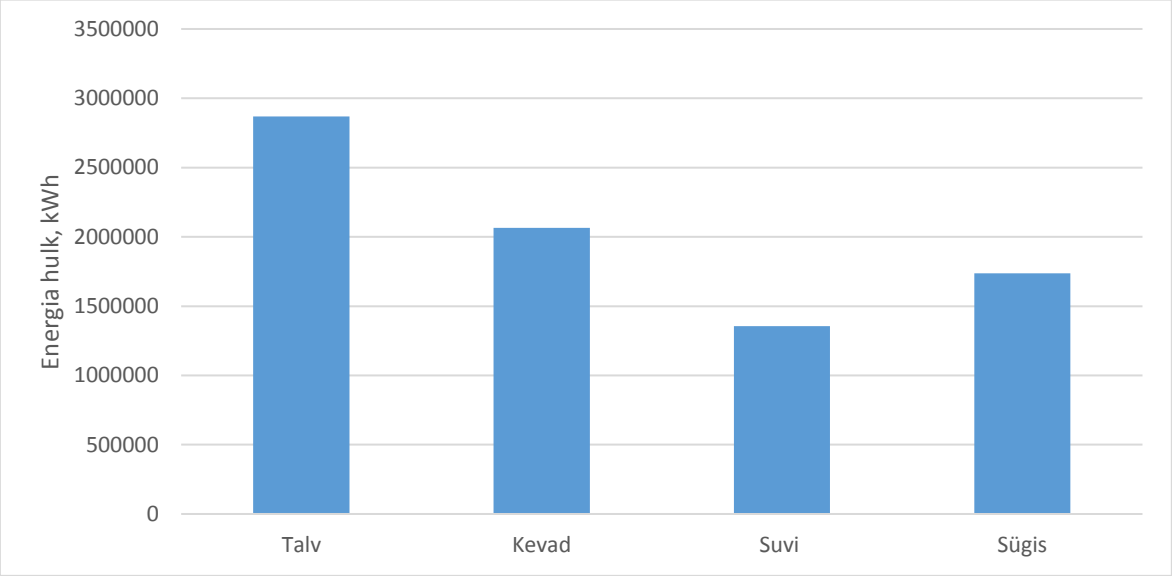
Asukohta A ja B saab pigem võrrelda Pakri ja Virtsu meteoroloogiajaamas mõõdetud tuule kiirusega, sest need asuvad merele lähemal. On näha, et 90 meetrit on siiski suur vahe, kus madalamatel kõrgustel segavad tuule kulgemist looduslikud ja inimese poolt loodud objektid.

# 4. ARVUTUSED

## 4.1. Elektrienergia tootang ja maksimaal võimsuse kasutustegur

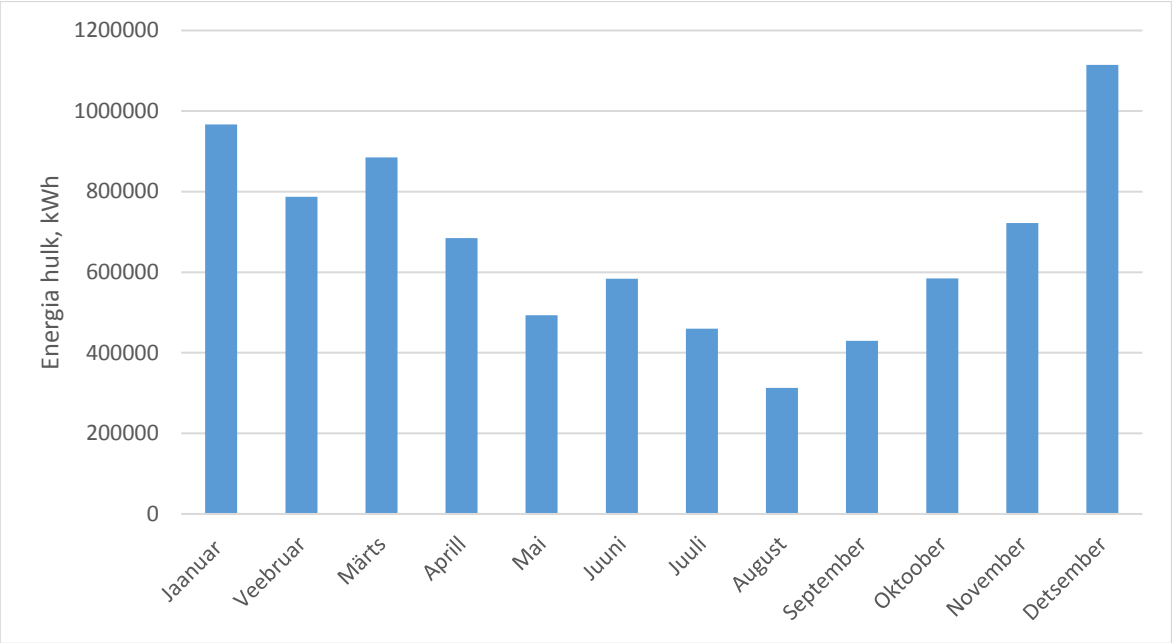
### 4.1.1. Asukoht A

Tuuleenergia tootmise graafik on sarnane keskmise tuule kiiruse graafikuga (joonis 3.7). Talvisesse perioodi jäävad kuud nagu detsember, jaanuar ja veebruar. Kevadisse perioodi jäävab märtsi-, aprill- ja maikuu. Suvisesse perioodi jääb juuni-, juuli- ja augustikuu. Sügisesse perioodi jääb september-, oktoober- ja novembrikuu. Mida tugevam on tuul seda suurem on tuulegeneraatori toodetud elektrienergia hulk. Jooniselt 4.3 on näha, et suurim oleks tuuliku WinWind WWD-3-100 tootmine talvisel perioodil ja selle aja jooksul oleks tuuleturbiin tootnud 2868 MWh elektrienergiat. Tuuliku maksimaal võimsuse kasutustegur sellel perioodil oleks 44,26 %. Talvisest perioodist alates oleks maksimaal võimsuse kasutustegur langevas trendis, mis alates suvest hakkab uuesti tõusma. Aasta madalaim tootmine oleks suvisel perioodil, kui tuuleturbiin toodaks 1356 MWh elektrienergiat ja saades maksimaal võimsuse kasutusteguriks 20,47 %.



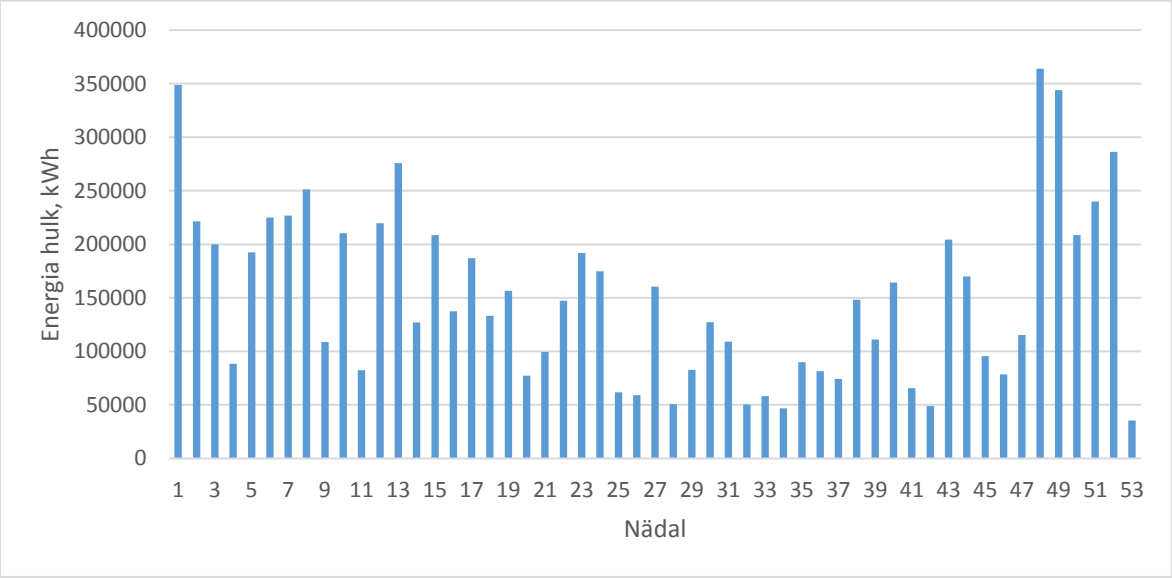

**Joonis 4.3.** WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine asukohas A aastaaegade kaupa

Nagu jooniselt 4.3 näha oleks maksimaal võimsuse kasutustegur suvisel perioodil madalaim ja seda on ka näha jooniselt 4.4, kus augustis on tuul madalaim ja tuulik toodaks elektrienergiat 312,48 MWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 14 %. Peale augustit hakkaks maksimaal võimsuse kasutustegur taas tõusma ja detsembris oleks tuuleturbiini tootmine suurim, kui see toodaks elektrienergiat 1114,32 MWh ja seda 49,92 % maksimaalsest elektrienergia hulgast.




**Joonis 4.4.** WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine asukohas A kuude kaupa

Joonisel 4.5 on välja toodud nädalas toodetud teoreetiline elektrienergia hulk, millelt on näha, et tootmine oleks nädalast nädalasse väga kõikuv. Jooniselt on näha, et suurim maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 48. nädalal, kui see oleks 72,2 % tuuliku maksimaalsest toodetud elektrienergia hulgast. Madalaim oleks maksimaal võimsuse kasutustegur 34. nädalal, kui see oleks 9,31 %.

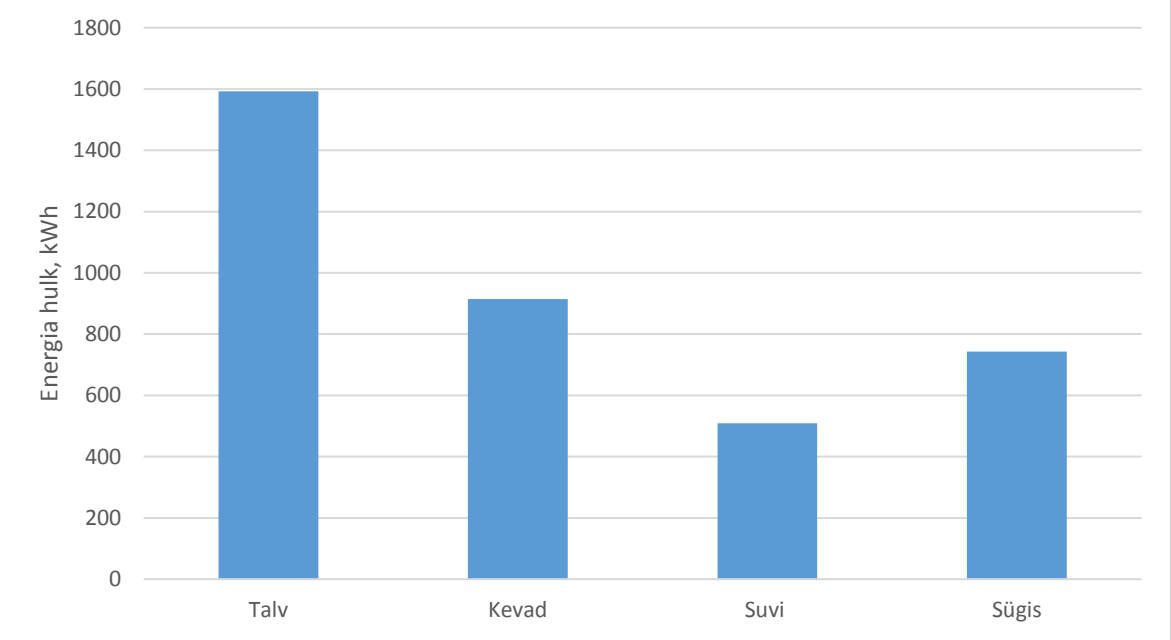



**Joonis 4.5.** WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine asukohas A nädalate kaupa

53. nädalal on arvestatud kahte päeva ja sellel ajal oleks maksimaal võimsuse kasutustegur 24,75 %.

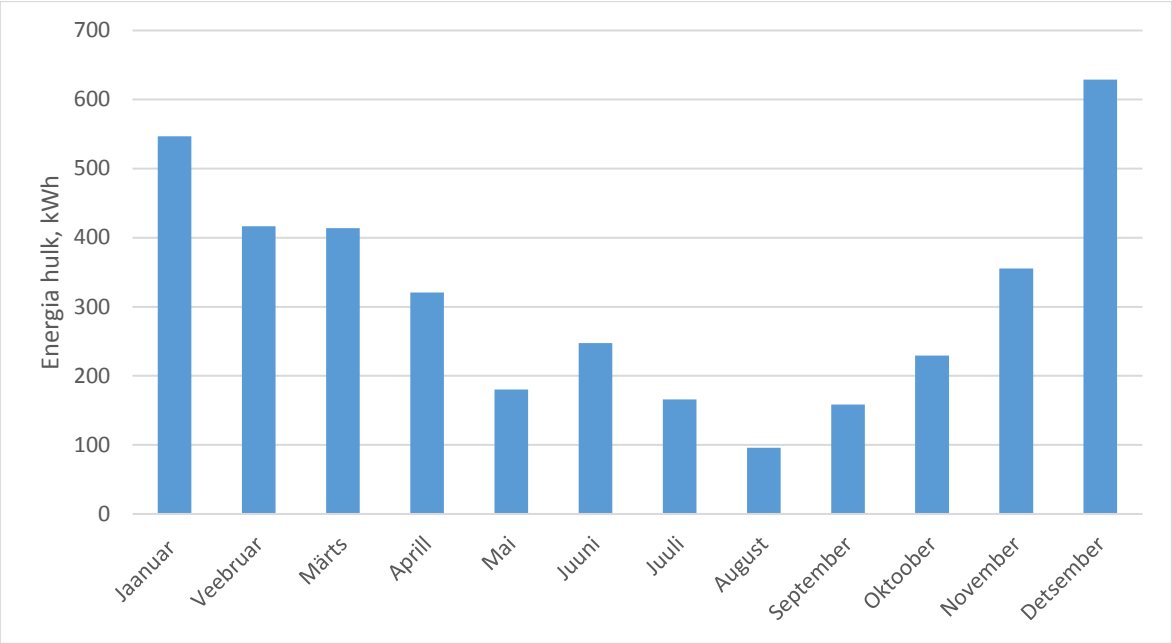
Kui kasutada tuulekalkulaatorit on võimalik välja arvutada samas asukohas 10 m kõrgusel olev tuule kiirus. Seda kasutades on võimalik välja arvutada 5 kW tuuleturbiini NE-5k maksimaal võimsuse kasutustegur.

Joonisele 4.6 on kantud tuuleturbiini NE-5k elektrienergia tootmine aastaaegade kaupa. Jooniselt on näha, et enim toodaks tuuleturbiin talvisel perioodil, kui toodetud elektrienergia hulk oleks 1592,16 kWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 14,74 %. Suvisel perioodil oleks tootmine madalaim, kui tuuleturbiin toodaks elektrienergiat 508,8 kWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 4,61 %.



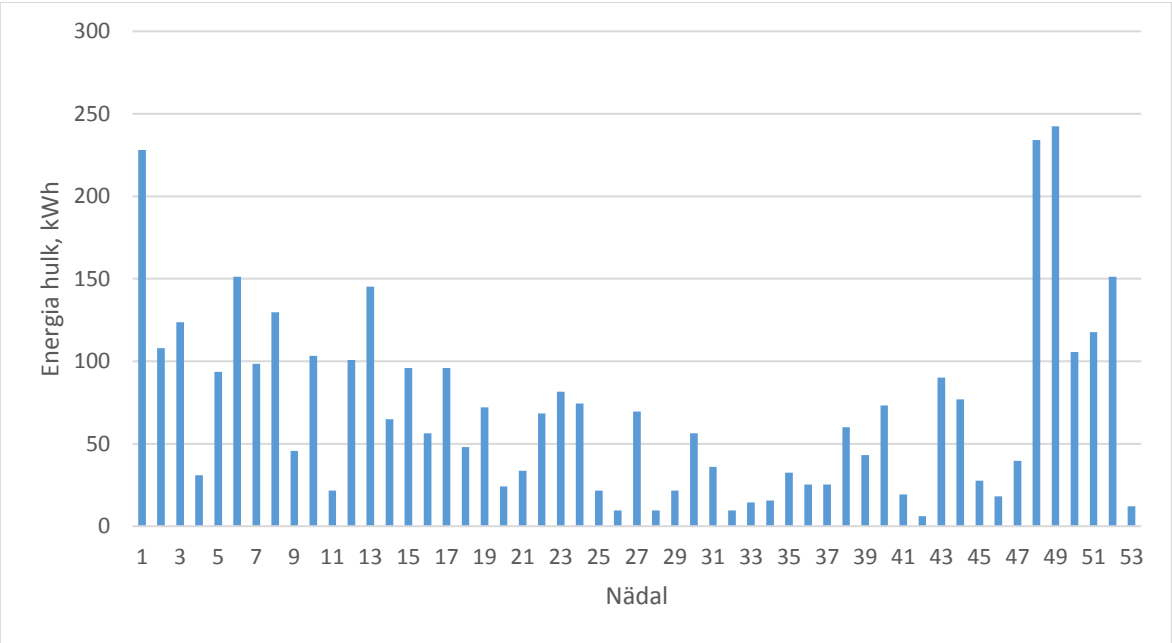

**Joonis 4.6.** NE-5k elektrienergia tootmine asukohas A aastaaegade kaupa

Jooniselt 4.7 on näha, et augustis on tuul madalaim ja tuulik toodaks elektrienergiat 96 kWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 2,47 %. Peale augustit hakkab maksimaal võimsuse kasutustegur taas tõusma ja detsembris oleks tuuleturbiini elektrienergia hulk suurim, kui see toodaks 628,8 MWh elektrienergiat ja maksimaal võimsuse kasutustegur on 16,9 % maksimaalselt toodetavast elektrienergia hulgast




**Joonis 4.7.** NE-5k elektrienergia tootmine asukohas A kuude kaupa

Joonisel 4.8 on välja toodud nädalas toodetud elektrienergia hulk ja jooniselt on näha, et suurim maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 49. nädalal, kui see oli 28,8 %. Madalaim oleks tootmine 26. ja 28 nädalal, kui tuuleturbiin tootis 10 kWh elektrienergiat ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks nendel nädalatel 1,19 %.

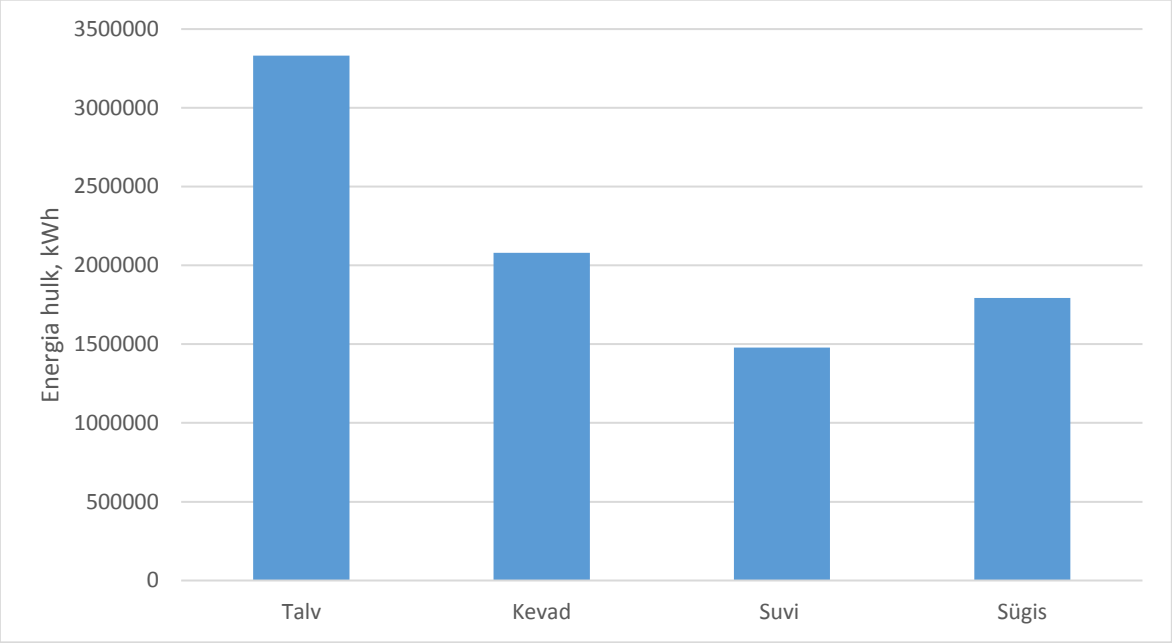



**Joonis 4.8.** NE-5k elektrienergia tootmine asukohas A nädalate kaupa

26. ja 28. nädalal toodetud elektrienergia hulk oleks väiksem ka 53. nädalal toodetud elektrienergiast, kuigi see nädal kestis sellel aastal kaks päeva.

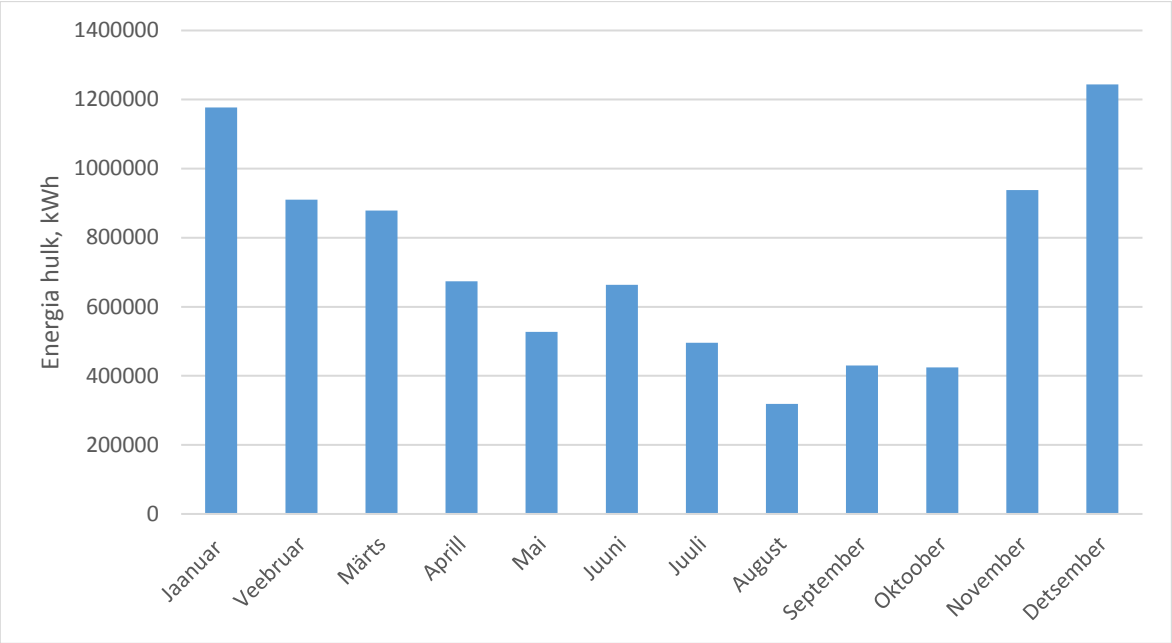
### 4.1.2. Asukoht B

Jooniselt 4.9 on näha, et suurim oleks tuuliku WinWind WWD-3-100 tootmine talvisel perioodil, mis aja jooksul oleks tuuleturbiin tootnud 3330,96 MWh elektrienergiat. Tuuleturbiini maksimaal võimsuse kasutustegur sellel perioodil oleks 51,4 %. Talvisest perioodis alates oleks maksimaal võimsuse kasutustegur langevas trendis, mis alates suvest hakkab uuesti tõusma. Aasta madalaim toodang oleks suvel, kui tuuleturbiin toodaks 1478,52 MWh elektrienergiat ja saades maksimaal võimsuse kasutusteguriks 22,32 %.



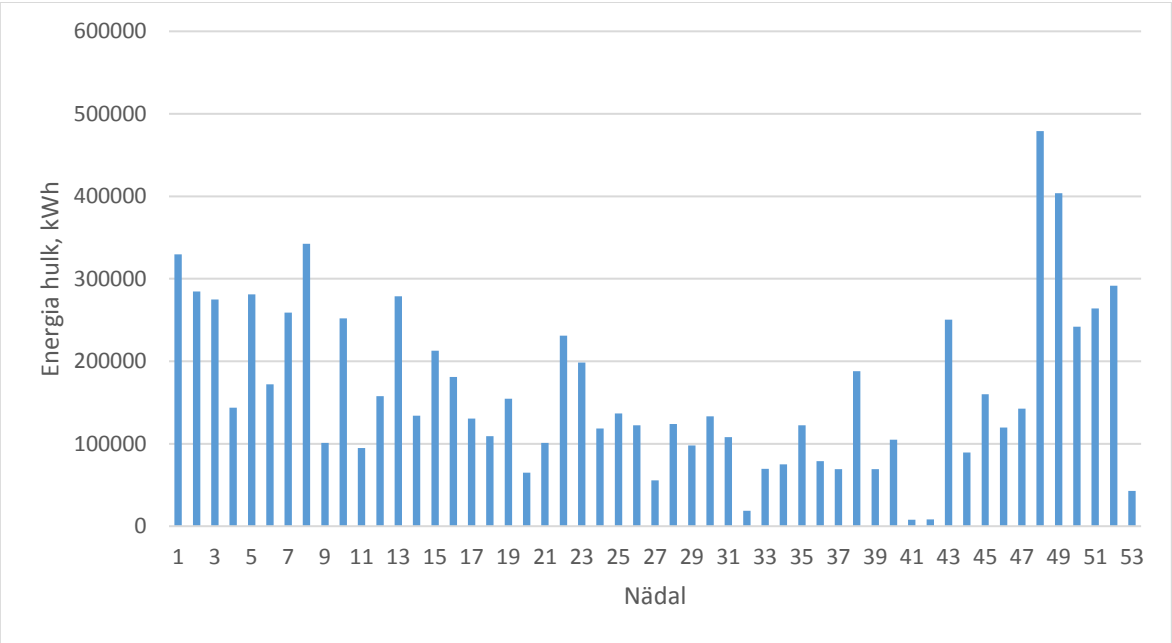

**Joonis 4.9.** WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine asukohas B aastaaegade kaupa

Nagu jooniselt 4.9 näha oleks maksimaal võimsuse kasutustegur suvisel perioodil madalaim ja seda on ka näha jooniselt 4.10, kus augustis on tuul madalaim ja tuuleturbiin toodaks elektrienergiat 318,72 MWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 14,27 %. Peale augustit hakkaks maksimaal võimsuse kasutustegur taas tõusma ja detsembris oleks tuuliku toodang suurim, kui toodaks elektrienergiat 1243,8 MWh ja saades maksimaal võimsuse kasutusteguriks 55,73 %.




**Joonis 4.10.** WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine asukohas B kuude kaupa

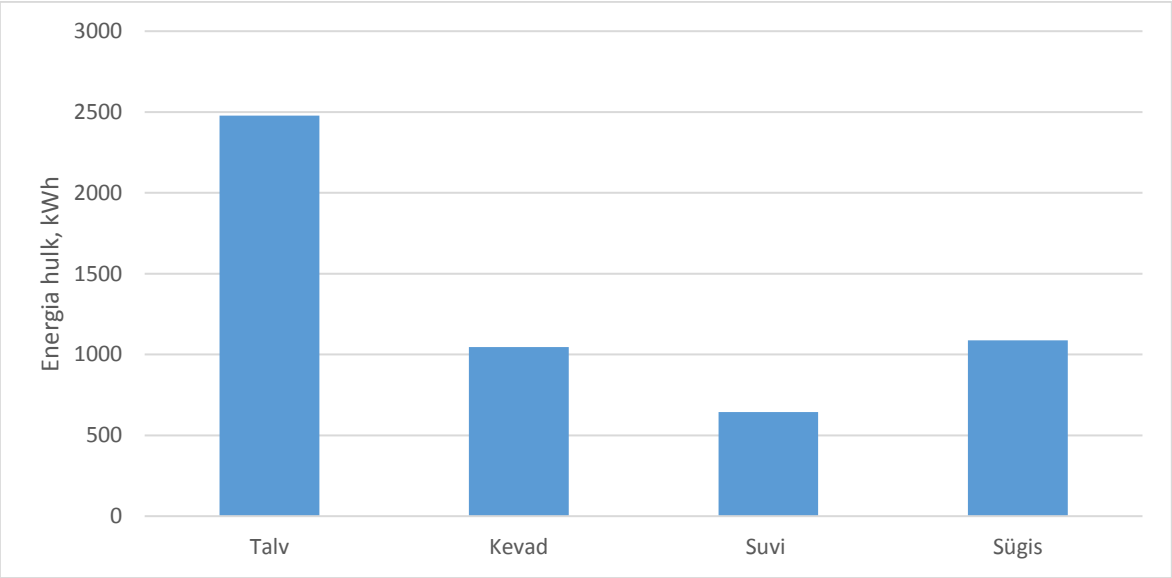
Joonisel 4.11 on välja toodud nädalas toodetud elektrienergia hulk, millelt on näha, et tootmine oleks nädalast nädalasse väga kõikuv. Jooniselt on näha, et suurim maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 48. nädalal, kui see oli 95 %. Madalaim oleks maksimaal võimsuse kasutustegur 41. nädalal, kui see oleks 1,54 %.




**Joonis 4.11.** WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine asukohas B nädalate kaupa

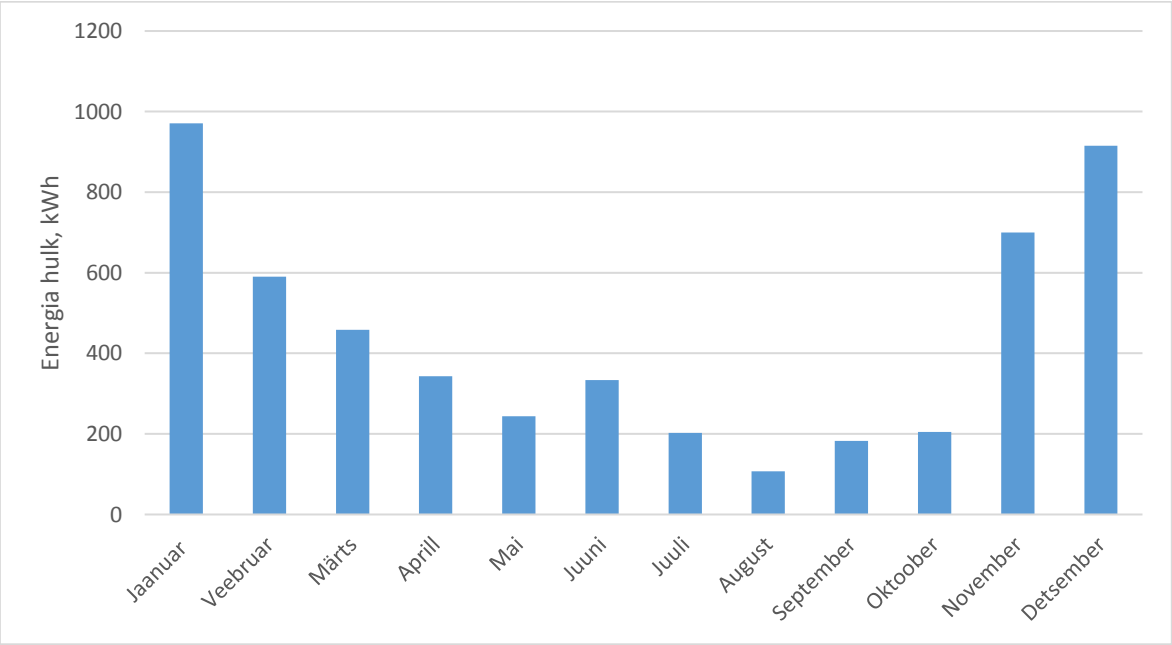
53. nädalal on arvestatud kahte päeva ja sellel ajal oleks maksimaal võimsuse kasutustegur 29.58 %.

Joonisele 4.12 on kantud tuuleturbiini NE-5k elektrienergia tootmine aasta aegade kaupa. Jooniselt on näha, et enim oleks tuuleturbiin tootnud talvisel perioodil, kui toodetud elektrienergia hulk oleks 2476,8 kWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur on 22,93 %. Suvisel perioodil oleks tootmine madalaim, kui elektrienergia hulk oleks 643,32 kWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur 5,96 %.



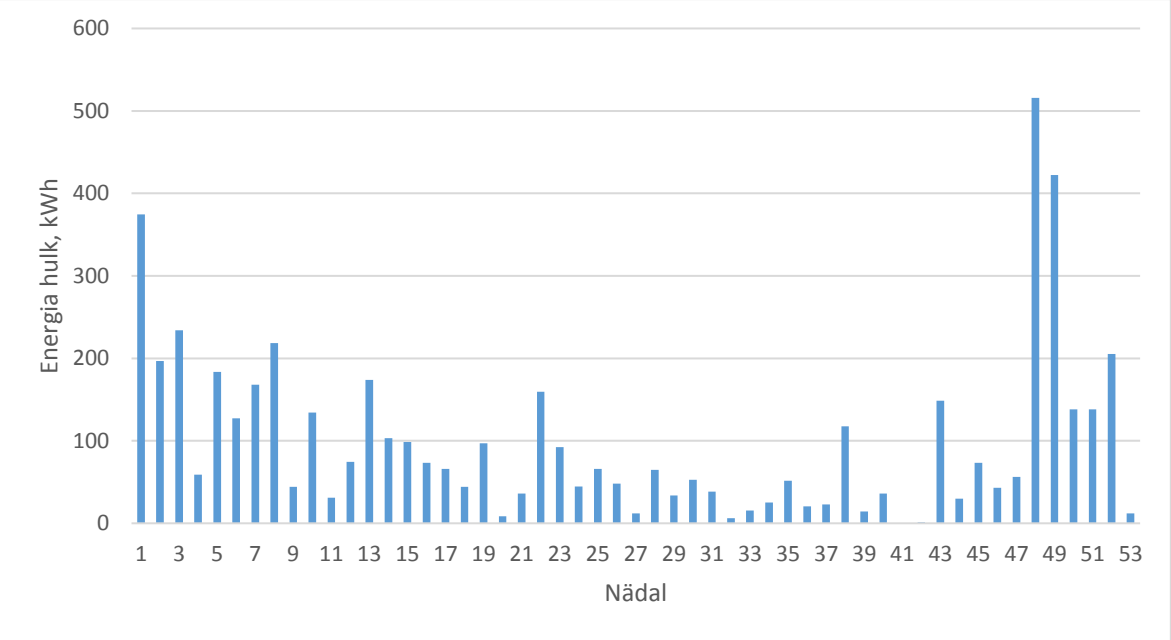

**Joonis 4.12.** NE-5k elektrienergia tootmine asukohas B aastaaegade kaupa

Jooniselt 4.13 on näha, et augustis on tuul madalaim ja tuuleturbiin toodaks elektrienergiat 106,8 kWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 2,87 %. Aasta suurim toodang oleks jaanuaris, kui tuuleturbiin toodaks 970,8 MWh elektrienergiat ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 26,1%.



**Joonis 4.13.** NE-5k elektrienergia tootmine asukohas B kuude kaupa

Joonisel 4.14 on välja toodud nädalas toodetud elektrienergia hulk ja jooniselt on näha, et suurim maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 48. nädalal, kui see oleks 61,43 %.

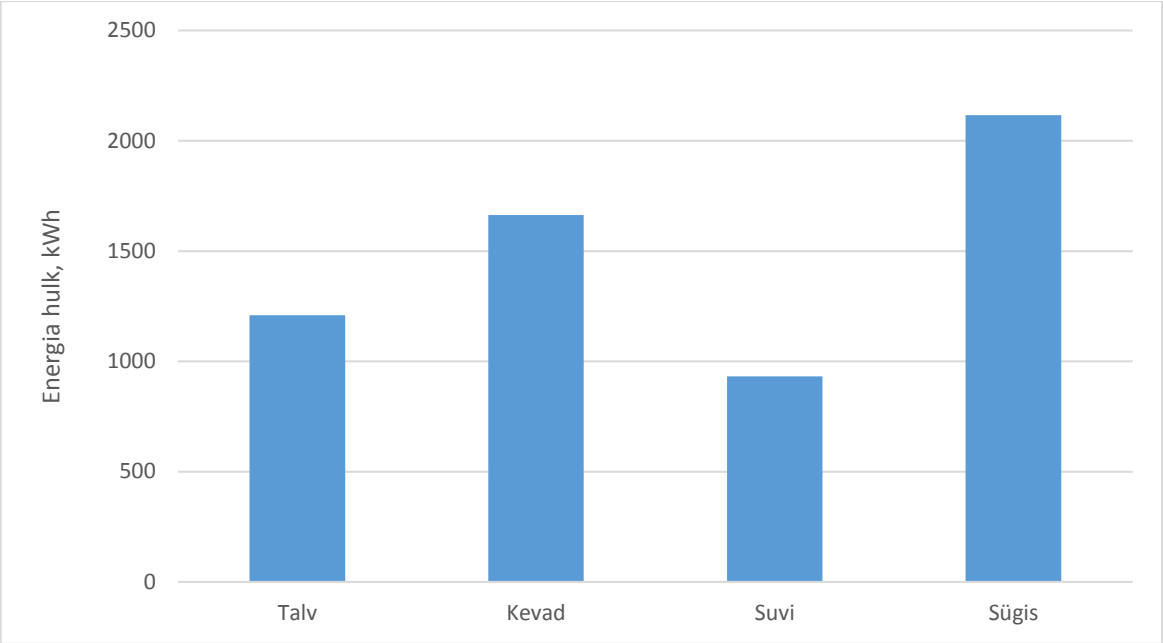



**Joonis 4.14.** NE-5k elektrienergia tootmine asukohas B nädalate kaupa

Madalaim oleks maksimaal võimsuse kasutustegur 41 nädalal, kui tuule kiirus oli nädala jooksul nii madal, et tuuleturbiin ei tootnud elektrienergiat.

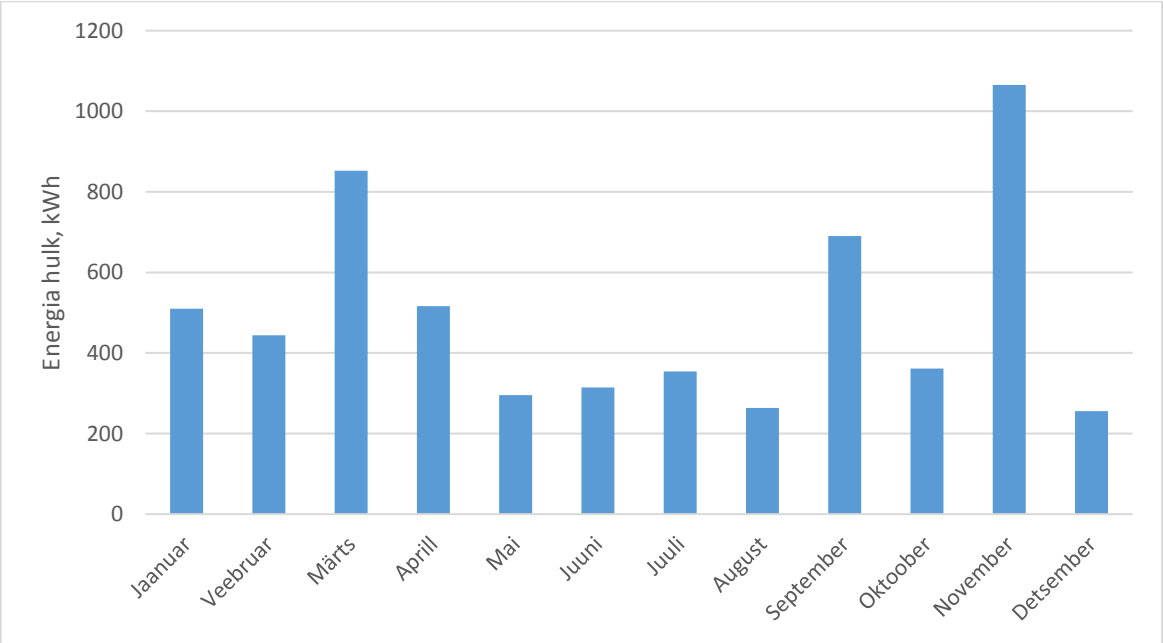
### 4.1.3. Pakri

Jooniselt 4.15 on näha, et Pakril oleks suurim tootmine sügisel (September, Oktoober, November), kui tuuleturbiin NE-5k toodaks 2116,8 kWh elektrienergiat. Tuuliku maksimaal võimsuse kasutustegur sellel perioodil oleks 19,6 %. Aasta madalaim tootmine oleks suvel, kui tuuleturbiin toodaks 932,4 kWh elektrienergiat ja saades maksimaal võimsuse kasutusteguriks 8,44 %.




**Joonis 4.15.** NE-5k elektrienergia tootmine Pakril aastaaegade kaupa

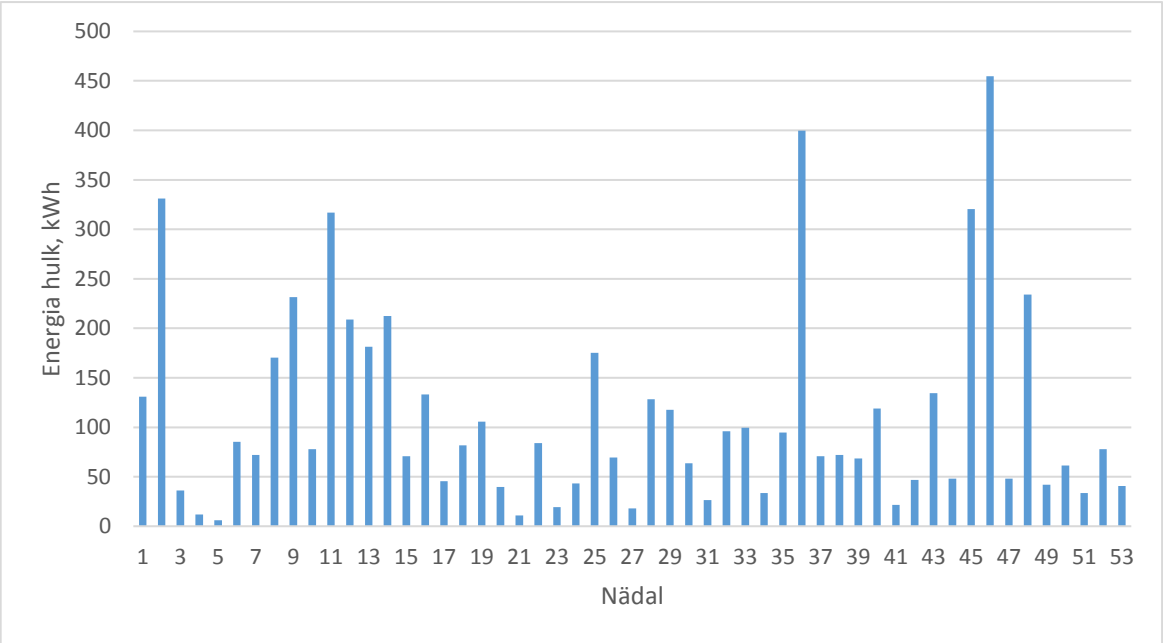
Detsembris on Pakril tuul madalaim ja tuuleturbiin toodaks elektrienergiat 255,6 kWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 6,87 %. Aasta sees oleks suurim tootmine novembris, kui tuuleturbiin toodaks 1065,6 kWh elektrienergiat, ning sellisel juhul oleks maksimaal võimsuse kasutustegur 28,64 %.




**Joonis 4.16.** NE-5k elektrienergia tootmine Pakril kuude kaupa

Joonisel 4.17 on välja toodud nädalas toodetud elektrienergia hulk, millelt on näha, et tootmine oleks nädalast nädalasse väga kõikuv. Jooniselt on näha, et suurim maksimaal

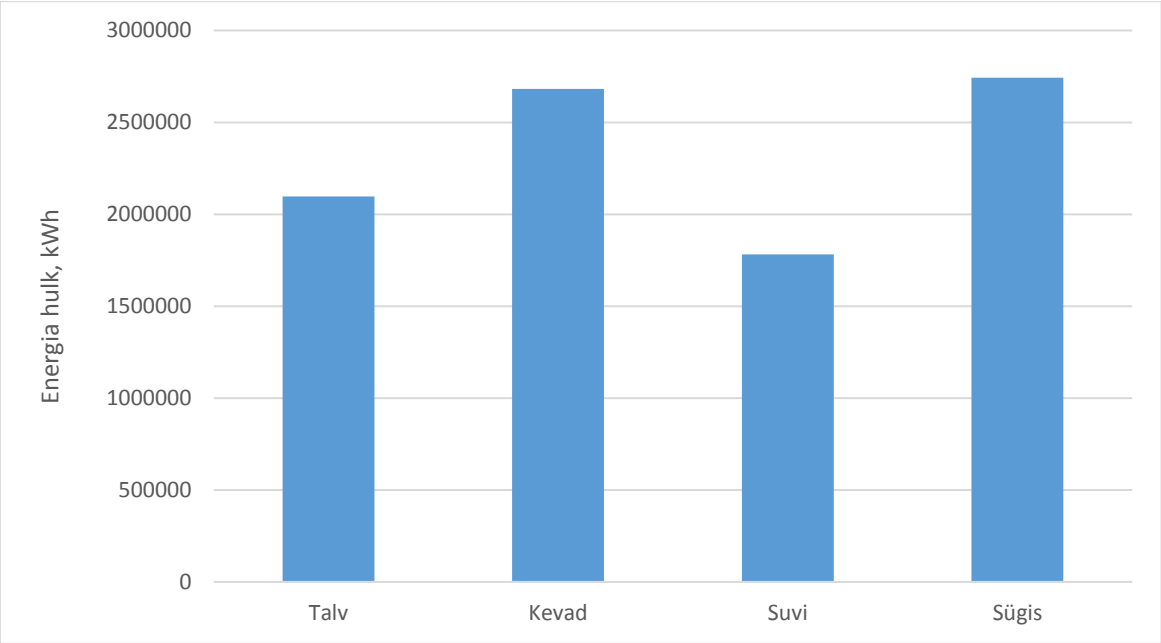
võimsuse kasutustegur oleks 46. nädalal, kui see oleks 54,17 % ja toodetud elektrienergia hulk oleks 455 kWh. Madalaim oleks tootmine 5. nädalal, kui toodetud elektrienergia hulk oleks 6 kWh ja tuuliku maksimaal võimsuse kasutustegur vaid 0,59 %.




**Joonis 4.17.** NE-5k elektrienergia tootmine Pakril nädalate kaupa

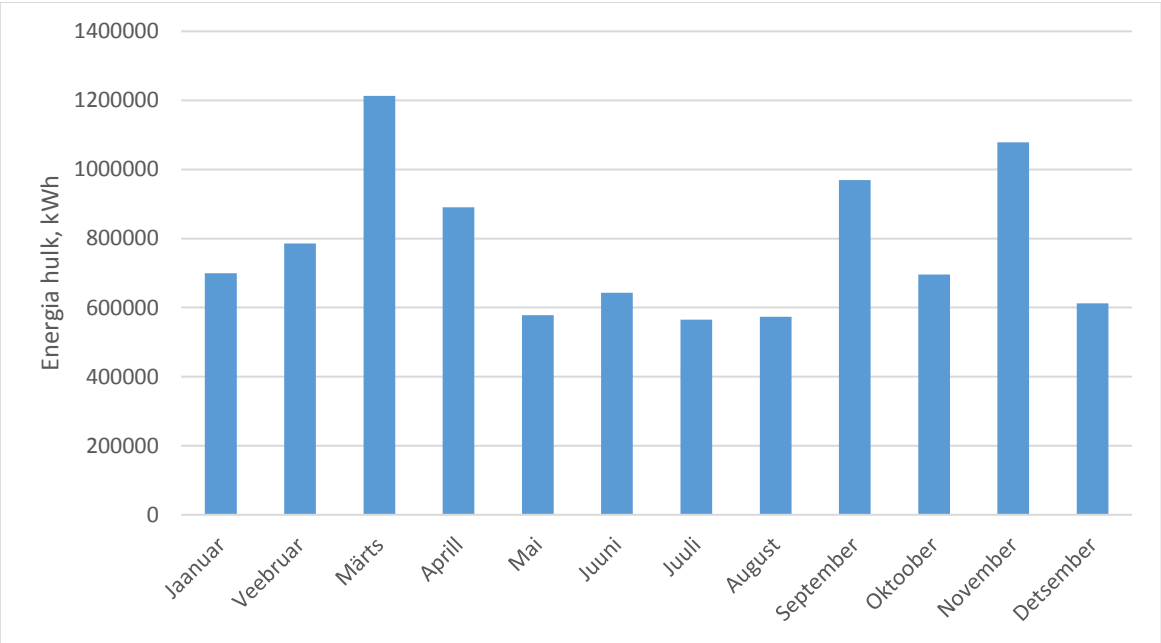
Kui kasutada tuulekalkulaatorit on võimalik välja arvutada samas asukohas 100 m kõrgusel olev tuule kiirus. Seda kasutades on võimalik välja arvutada 3 MW tuuleturbiini WinWind WWD-3-100 maksimaal võimsuse kasutustegur.

Joonisele 4.18 on kantud tuuleturbiini WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine aasta aegade kaupa. Jooniselt on näha, et enim toodaks tuuleturbiin talvisel perioodil, kui toodetud elektrienergia hulk oleks 2743,56 MWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 42,34 %. Suvisel perioodil oleks tootmine madalaim, kui elektrienergia hulk oli 1781,88 MWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur 27,5 %.



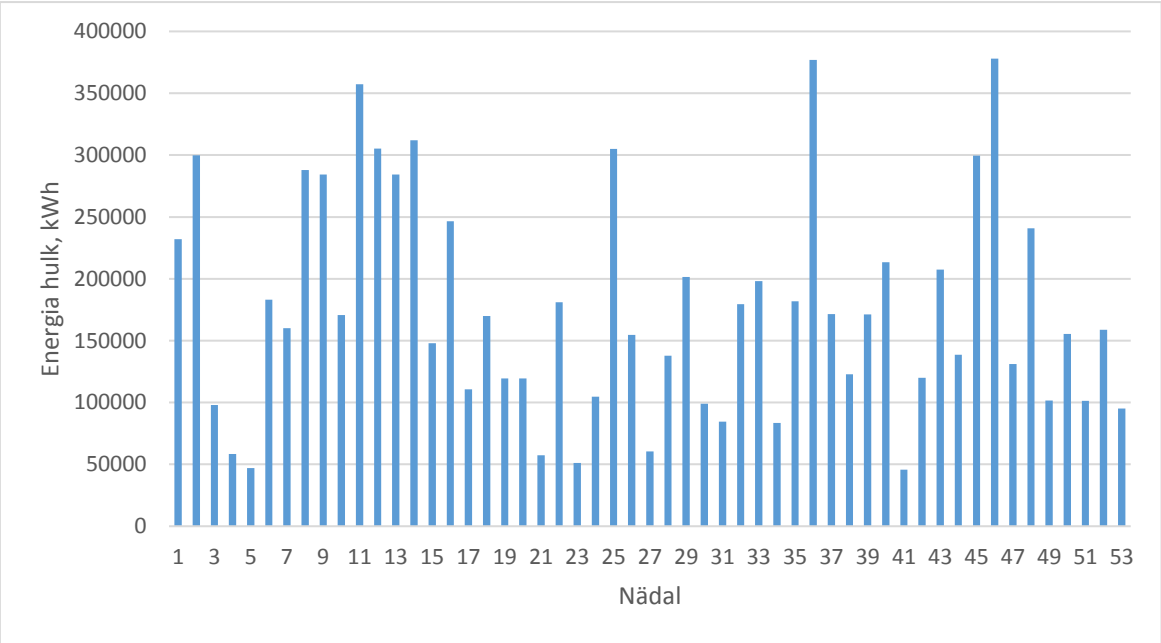

**Joonis 4.18.** WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine Pakril aastaaegade kaupa

Jooniselt 4.19 on näha, et juulis on tuul madalaim ja tuuleturbiin toodaks elektrienergiat 565,08 MWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 25,31 %. Aasta suurim tootmine oleks märtsis, kui tuuleturbiin toodaks 1212,72 MWh elektrienergiat ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 54,3%.




**Joonis 4.19.** WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine Pakril kuude kaupa

Joonisel 4.20 on välja toodud nädalas toodetud elektrienergia hulk ja jooniselt on näha, et suurim maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 46. nädalal, kui see oleks 75 % ja toodetud elektrienergia hulk oleks 378 MWh.

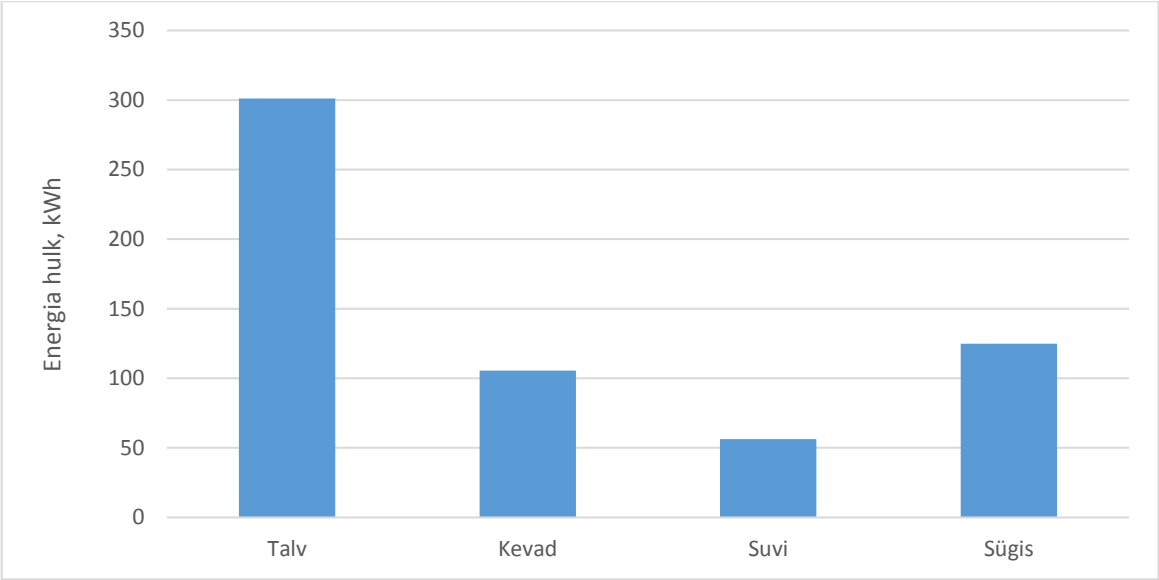



**Joonis 4.20.** WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine Pakril nädalate kaupa

Madalaim oleks maksimaal võimsuse kasutustegur 41 nädalal, kui tuuleturbiini maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 9,5 % ja toodaks selle ajaga 45,6 MWh elektrienergiat.

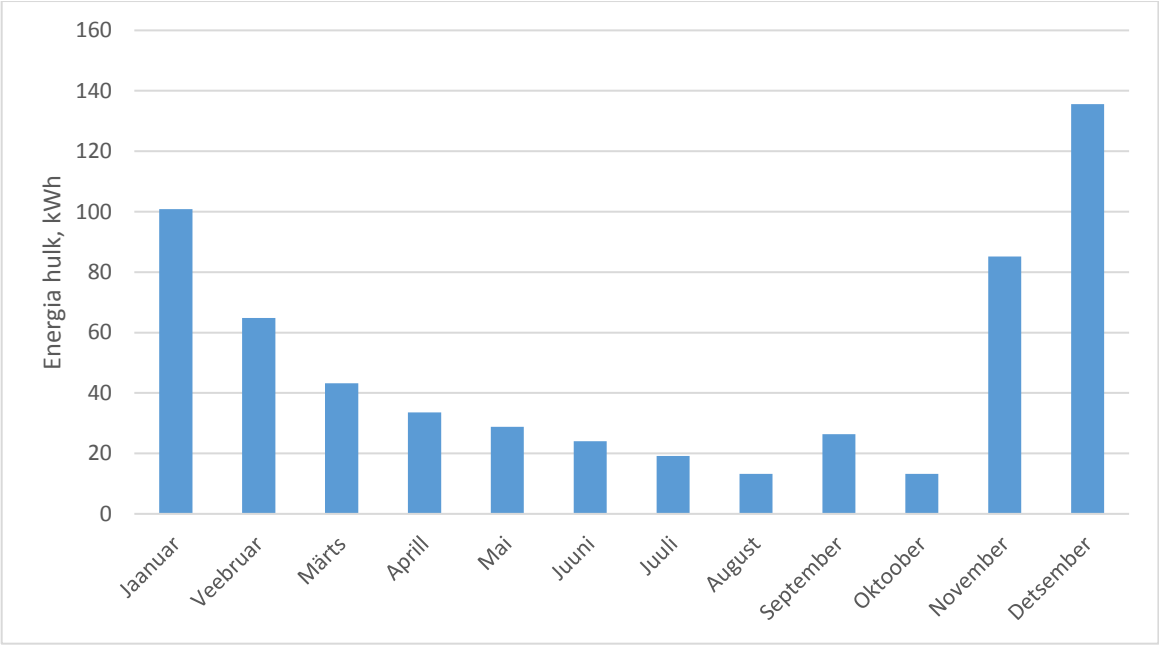
### 4.1.4. Tartu-Tõravere

Jooniselt 4.21 on näha, et Tartu-Tõraveres oleks suurim tootmine talvisel perioodil, kui tuuleturbiin NE-5k toodaks 301,2 kWh elektrienergiat. Tuuliku maksimaal võimsuse kasutustegur sellel perioodil oleks 2,78 %. Aasta madalaim tootmine oleks suvel, kui tuuleturbiin toodaks 56,4 kWh elektrienergiat ja saades maksimaal võimsuse kasutusteguriks vaid 0,52 %.




**Joonis 4.21.** NE-5k elektrienergia tootmine Tartu-Tõraveres aasta aegade kaupa

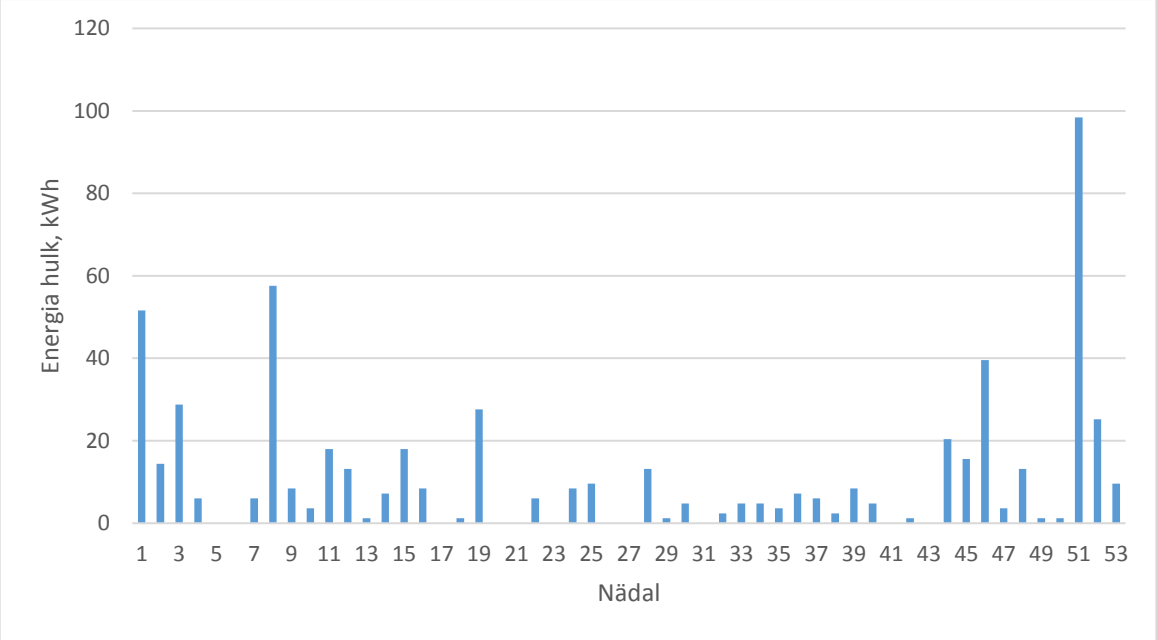
Nagu jooniselt 4.21 näha oleks tootmine suvisel perioodil madalaim ja seda on ka näha jooniselt 4.22, kus augustis on tuul madalaim ja tuulik toodaks elektrienergiat 13,2 kWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 0,35 %. Aasta sees oleks suurim tootmine detsembris, kui toodetud elektrienergia hulk oleks 135,6 kWh ja sellisel juhul oleks maksimaal võimsuse kasutustegur 3,64 %.




**Joonis 4.22.** NE-5k elektrienergia tootmine Tartu-Tõraveres kuude kaupa

Joonisel 4.23 on välja toodud nädalas toodetud elektrienergia hulk. Jooniselt on näha, et suurim maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 51. nädalal, kui see oleks 11,66 % ja toodetud elektrienergia hulk oleks 98 kWh. Tartu-Tõravere meteoroloogiajaam asub sellise

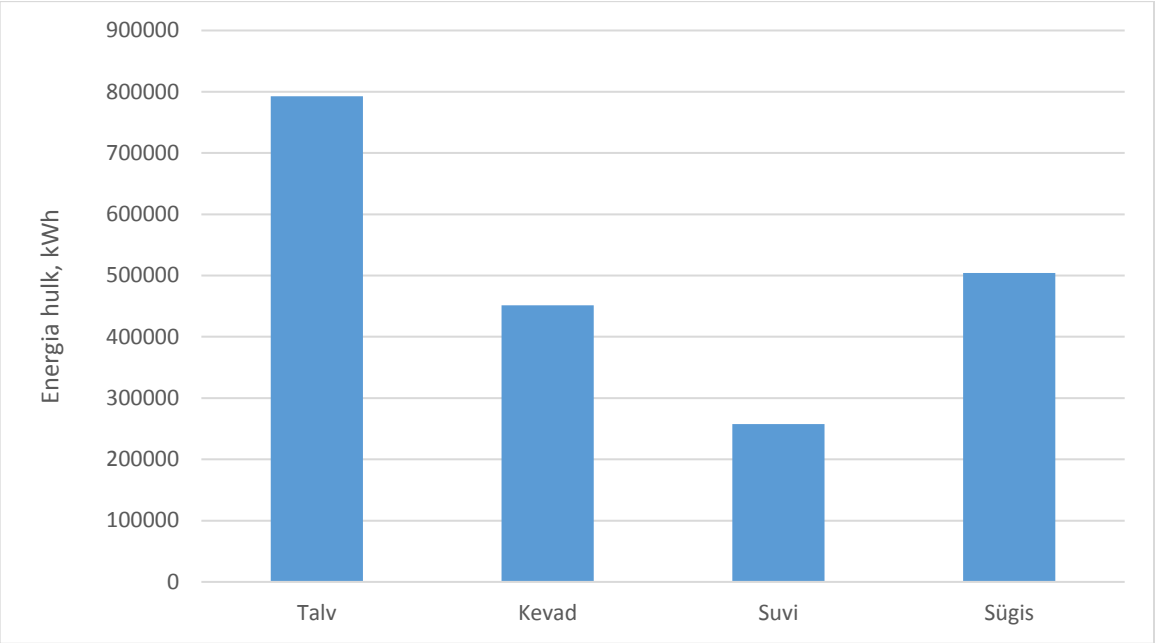
koha peal, kus on ümber ringi asula, mets ja lisaks kaugel rannikualast, siis on tuulevaikseid nädalaid palju, ning tihti puhub selline tuul, et tuuleturbiin 10 meetri kõrgusel ei hakka elektrienergiat tootma.




**Joonis 4.23.** NE-5k elektrienergia tootmine Tartu-Tõraveres nädalate kaupa

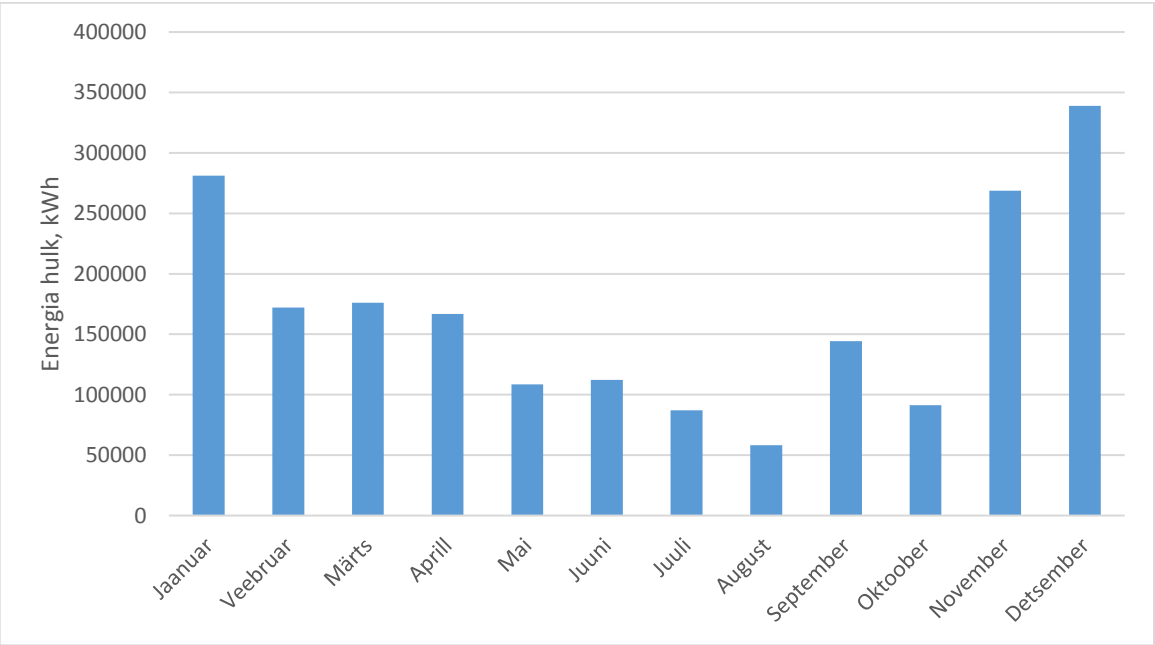
Kui kasutada tuulekalkulaatorit on võimalik välja arvutada samas asukohas 100 m kõrgusel olev tuule kiirus. Seda kasutades on võimalik välja arvutada 3 MW tuuleturbiini WinWind WWD-3-100 maksimaal võimsuse kasutustegur.

Joonisele 4.24 on kantud tuuleturbiini WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine aasta aegade kaupa. Jooniselt on näha, et enim toodaks tuuleturbiin talvisel perioodil, kui toodetud elektrienergia hulk oleks 792,48 MWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 12,22 %. Suvisel perioodil oleks tootmine madalaim, kui elektrienergia hulk oleks 257,52 MWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur 3,89 %.



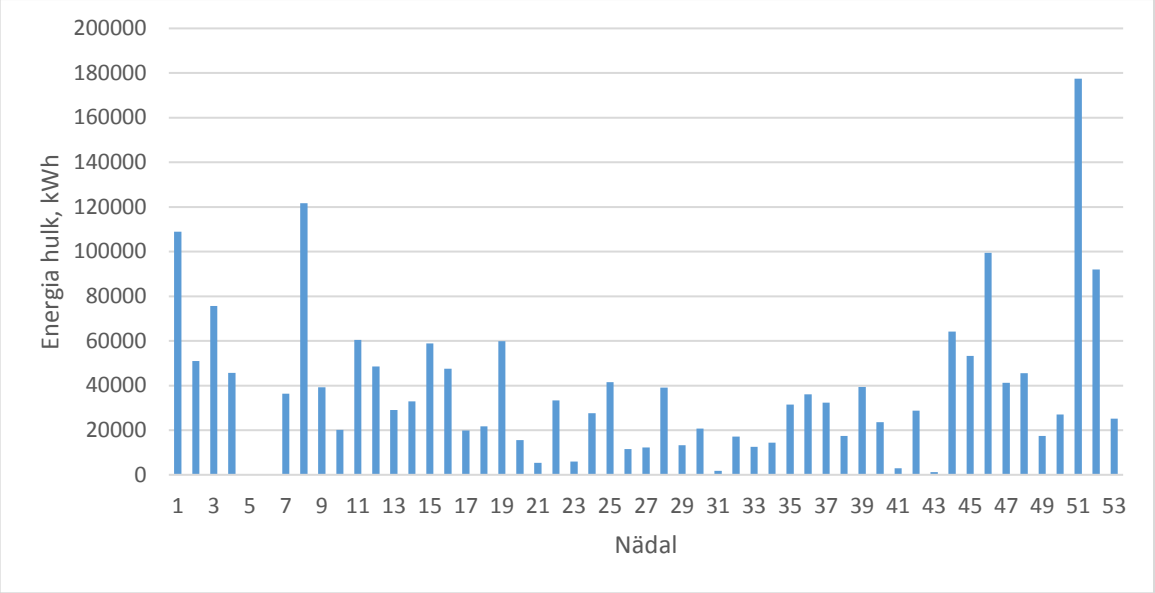

**Joonis 4.24.** WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine Tartu-Tõraveres aastaaegade kaupa

Jooniselt 4.25 on näha, et augustis oleks tootmine madalaim ja tuuleturbiin toodaks elektrienergiat 58,32 MWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 2,61 %. Aasta suurim tootmine oleks detsembris, kui tuuleturbiin toodaks 339 MWh elektrienergiat ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 15,19 %.




**Joonis 4.25.** WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine Tartu-Tõraveres kuude kaupa

Joonisel 4.26 on välja toodud nädalas toodetud elektrienergia hulk ja jooniselt on näha, et suurim maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 51. nädalal, kui see oleks 35,2 % ja toodetud elektrienergia hulk oleks 177,48 MWh.

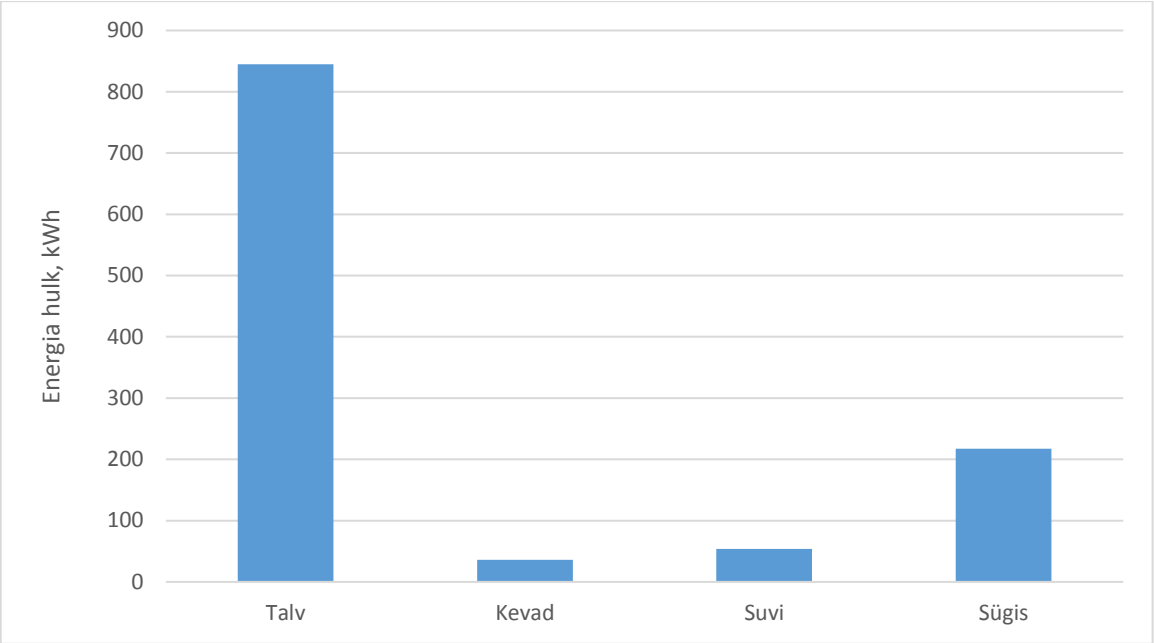



**Joonis 4.26.** WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine Tartu-Tõraveres nädalate kaupa

Nagu 10 meetri kõrgusel, siis ka 100 meetri kõrguselt leidub Tartu-Tõravere meteoroloogiajaamas nädalaid, kus tuul on nii madal, et tuuleturbiin ei hakka elektrienergiat tootma.

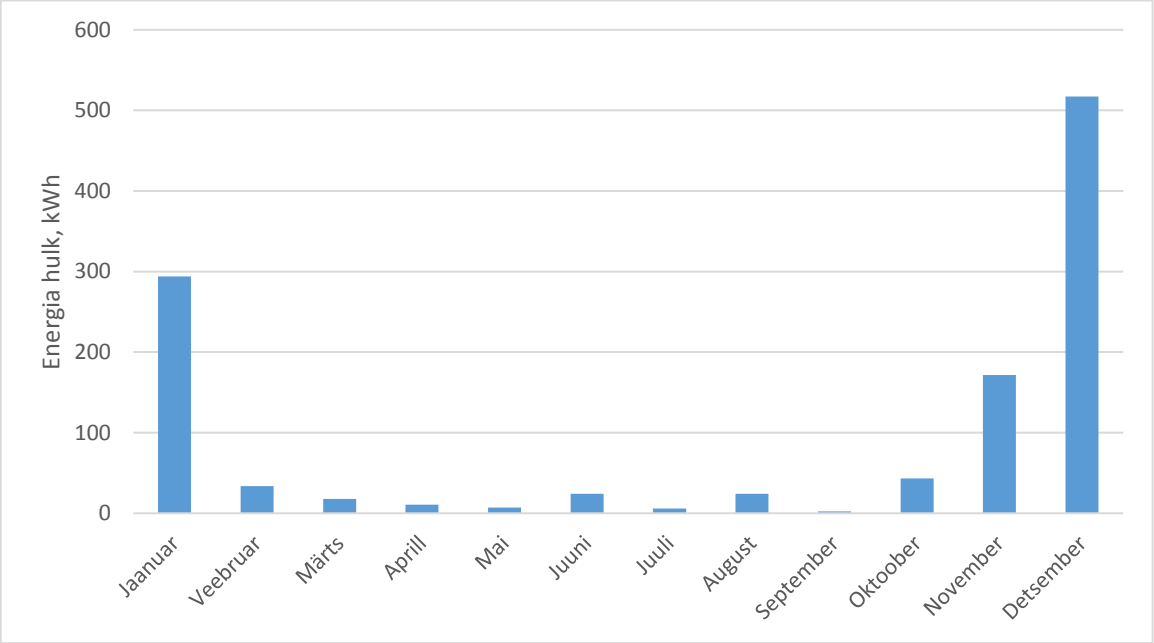
### 4.1.5. Tiirikoja

Jooniselt 4.27 on näha, et Tiirikojas oleks suurim tootmine talvisel perioodil, kui tuuleturbiin NE-5k toodaks 844,8 kWh elektrienergiat. Tuuliku maksimaal võimsuse kasutustegur sellel perioodil oli 7,82 %. Aasta madalaim tootmine oleks kevadel, kui tuuleturbiin toodaks 36 kWh elektrienergiat ja saades maksimaal võimsuse kasutusteguriks vaid 0,32 %.



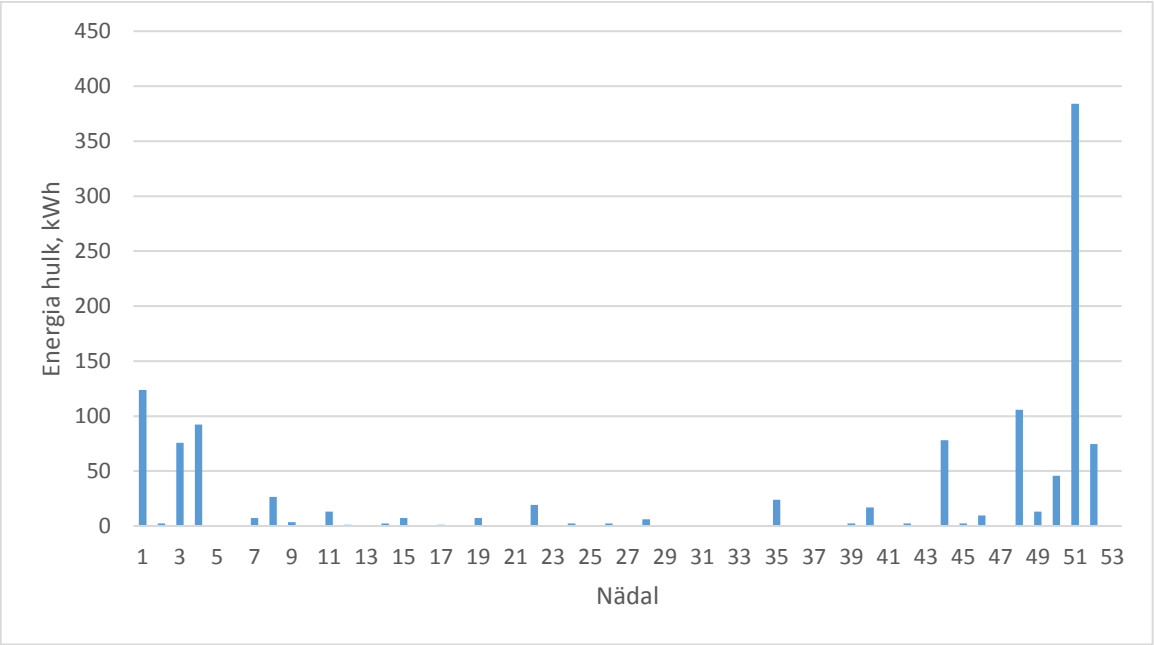

**Joonis 4.27.** NE-5k elektrienergia tootmine Tiirikojas aastaaegade kaupa

Jooniselt 4.28 on näha, et alates veebruarist kuni oktoobrini oleks Tiirikojas maksimaal võimsuse kasutustegur suhteliselt madal. Aasta madalaim tootmine oleks septembris, kus tuuleturbiin toodaks 2,4 kWh elektrienergiat ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks kõigest 0,07 %. Samas aasta kõrgeim tootmine oleks detsembris, kui tuuleturbiin toodaks 517,2 kWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur selle juures oleks 13,9 %, mis on väga arvestatav näitaja.




**Joonis 4.28.** NE-5k elektrienergia tootmine Tiirikojas kuude kaupa

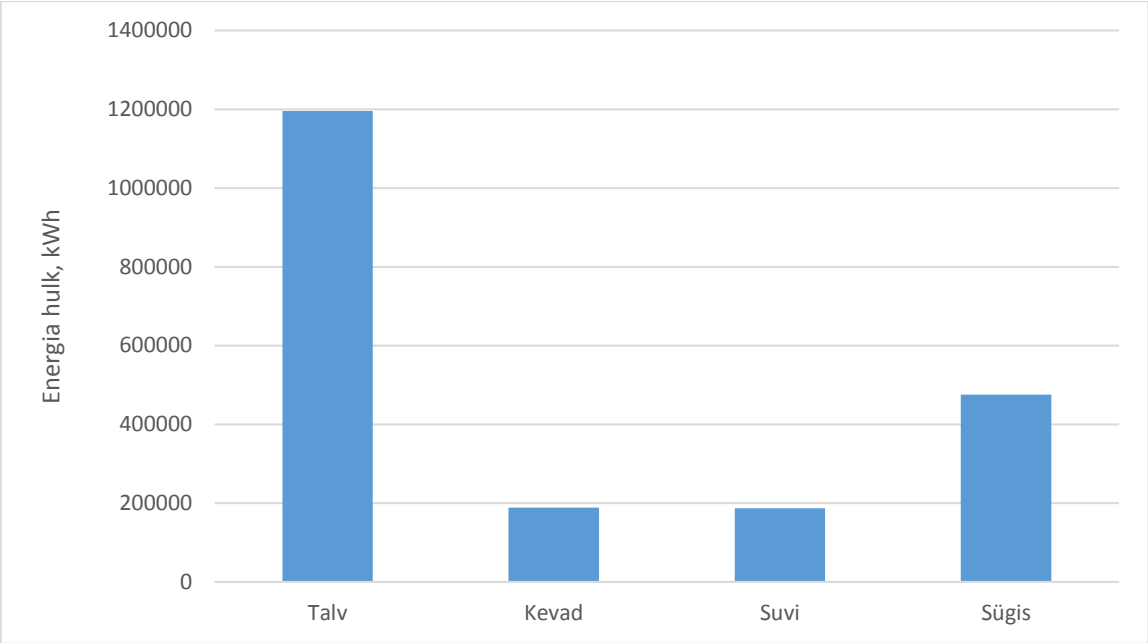
Tiirikoja asub Peipsi järve ääres, kuid siiski on näha, et sellel alal oleks maksimaal võimsuse kasutustegur väga madal, kuna tuule kiirus on väike ja tuuleturbiinide tootmine ei näitaks soovitut tulemust. Samas on erandiks üks nädal, milleks on 51. nädalal, kui maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 45,71 % ja toodetud elektrienergia hulk oleks 384 kWh (Joonis 4.29).




**Joonis 4.29.** NE-5k elektrienergia tootmine Tiirikojas nädalate kaupa

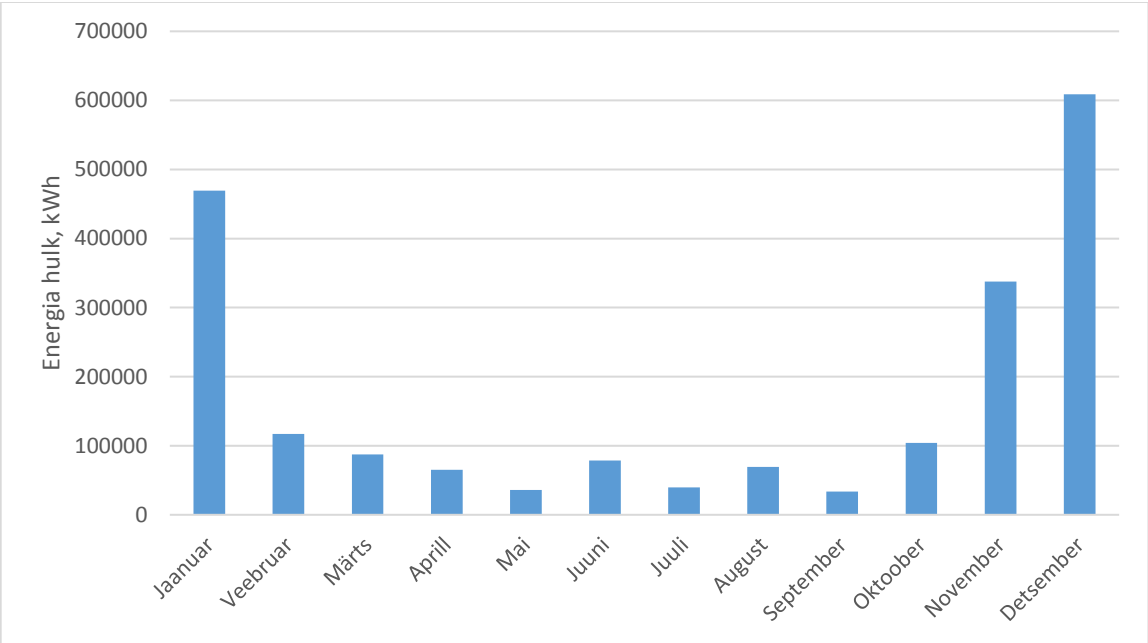
Kui kasutada tuulekalkulaatorit on võimalik välja arvutada samas asukohas 100 m kõrgusel olev tuule kiirus. Seda kasutades on võimalik välja arvutada 3 MW tuuleturbiini WinWind WWD-3-100 maksimaal võimsuse kasutustegur.

Joonisele 4.30 on kantud tuuleturbiini WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine aasta aegade kaupa. Jooniselt on näha, et enim toodaks tuuleturbiin talvisel perioodil, kui toodetud elektrienergia hulk oleks 1195,2 MWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 18,44 %. Suvisel perioodil oleks tootmine madalaim, kui elektrienergia hulk oli 187,2 MWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur 2,82 %.



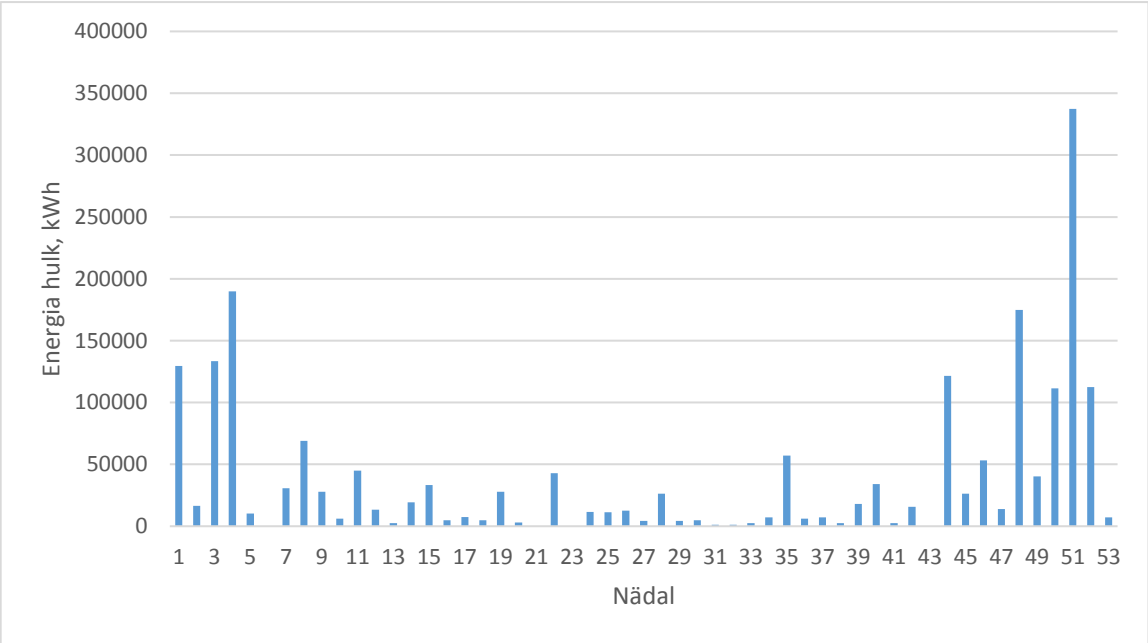

**Joonis 4.30.** WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine Tiirikojas aastaaegade kaupa

Jooniselt 4.31 on näha, et septembris oleks tootmine madalaim ja tuulik toodaks elektrienergiat 33,6 MWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 1,61 %. Aasta suurim tootmine oleks detsembris, kui tuuleturbiin toodaks 608,64 MWh elektrienergiat ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 27,27 %.




**Joonis 4.31.** WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine Tiirikojas kuude kaupa

Joonisel 4.32 on välja toodud nädalas toodetud elektrienergia hulk ja jooniselt on näha, et suurim maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 51. nädalal, kui see oleks 66,93 %, kui toodetud elektrienergia hulk oleks 337,32 MWh.

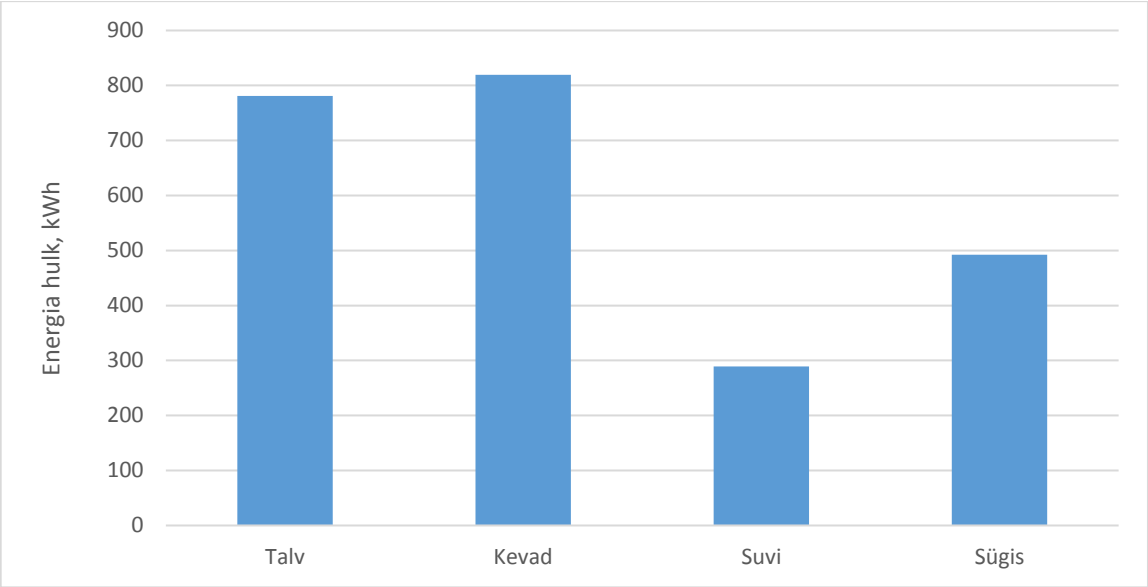



**Joonis 4.32.** WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine Tiirikojas nädalate kaupa

Nagu 10 meetri kõrgusel, siis ka 100 meetri kõrguselt leidub Tiirikojas meteoroloogiajaamas nädalaid, kus tuul on nii madal, et tuuleturbiin ei hakka elektrienergiat tootma.

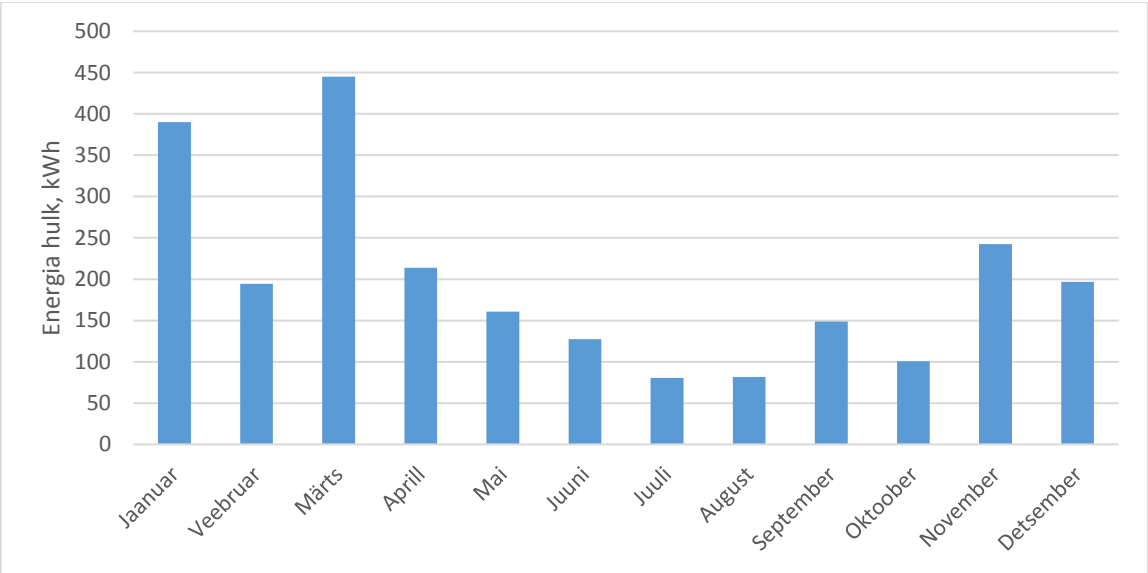
### 4.1.6. Virtsu

Jooniselt 4.33 on näha, et Virtsus oleks suurim tootmine kevadisel perioodil (Märts, Aprill, Mai), kui tuuleturbiin NE-5k toodaks 819,6 kWh elektrienergiat. Tuuleturbiini maksimaal võimsuse kasutustegur sellel perioodil oleks 7,42 %. Aasta madalaim tootmine oleks suvel, kui tuuleturbiin toodaks 289,2 kWh elektrienergiat ja saades maksimaal võimsuse kasutusteguriks 2,62 %.



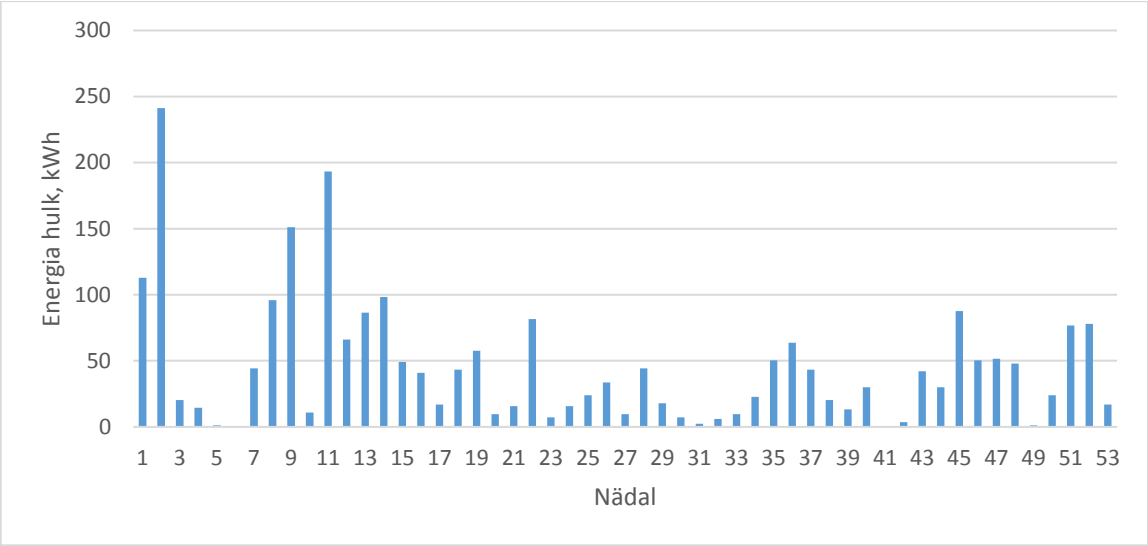

**Joonis 4.33.** NE-5k elektrienergia tootmine Virtsus aasta aegadeaegade kaupa

Jooniselt 4.34 on näha, et märtsis oleks tuuleturbiini tootmine aasta suurim, kui see toodaks 445,2 kWh elektrienergiat ja mille maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 11,97 %. Aasta madalaim kuu oleks juulis, kui toodang oleks 80,4 kWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur 2,16 %.




**Joonis 4.34.** NE-5k elektrienergia tootmine Virtsus kuude kaupa

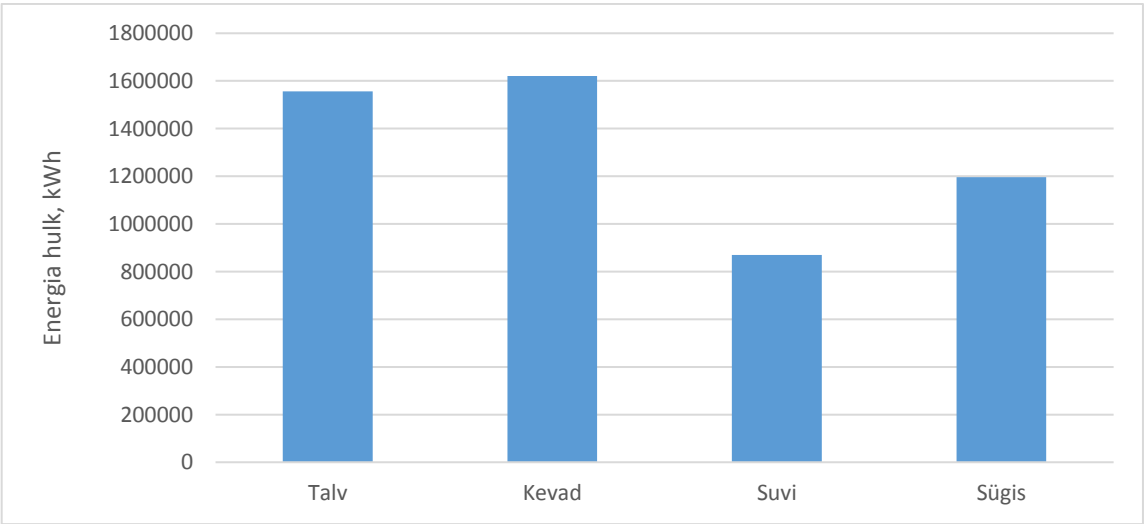
Suurim tuuleenergia toodang oleks 2. nädalal, kui tuuleturbiin suudaks toota 241 kWh elektrienergiat ja mille maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 28,69 %. Kuigi Virtsu asub mere ääres, siis 6. ja 41. nädalal on tuul seal nii madal, et tuuleturbiin NE-5k ei hakka elektrienergiat tootma.




**Joonis 4.35.** NE-5k elektrienergia tootmine Virtsus nädalate kaupa

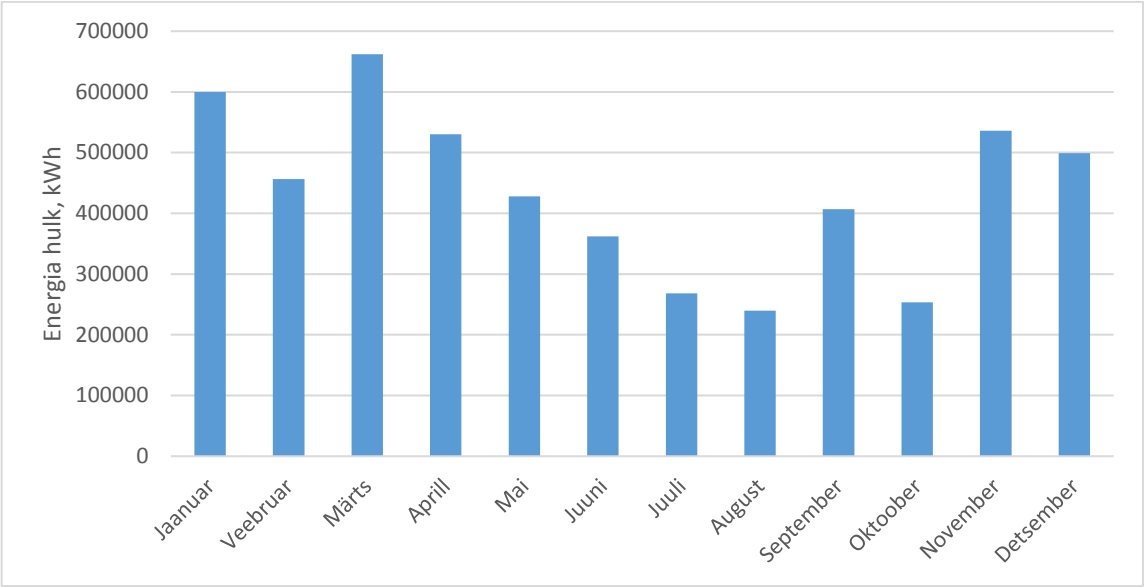
Kui kasutada tuulekalkulaatorit on võimalik välja arvutada samas asukohas 100 m kõrgusel olev tuule kiirus. Seda kasutades on võimalik välja arvutada 3 MW tuuleturbiini WinWind WWD-3-100 maksimaal võimsuse kasutustegur.

Joonisele 4.36 on kantud tuuleturbiini WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine aasta aegade kaupa. Jooniselt on näha, et enim toodaks tuuleturbiin kevadisel perioodil, kui toodetud elektrienergia hulk oleks 1620,12 MWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur on 25 %. Suvisel perioodil on tootmine madalaim, kui elektrienergia hulk oleks 870,12 MWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur 13,14 %.



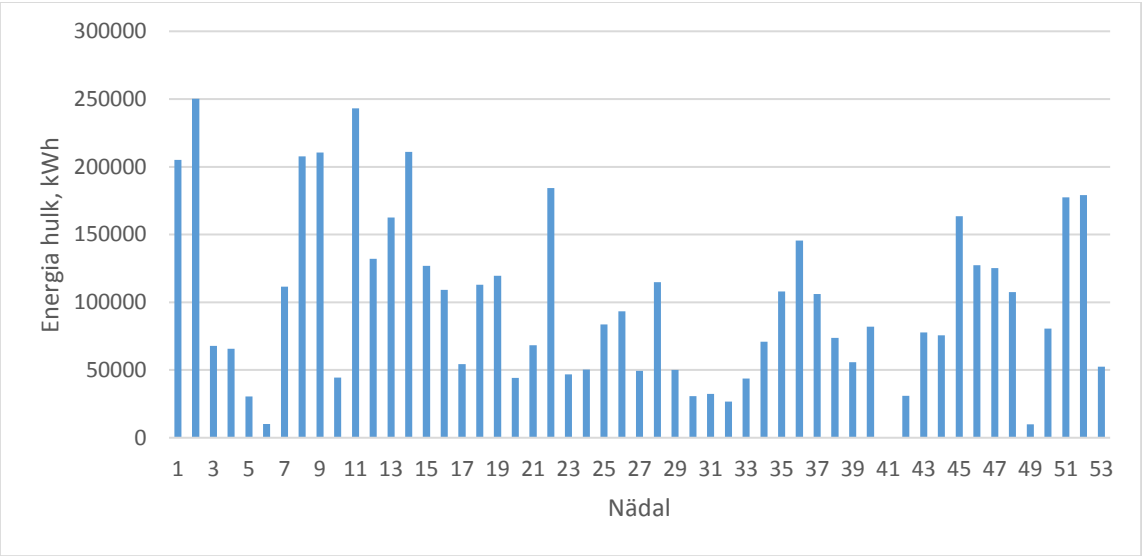

**Joonis 4.36.** WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine Virtsus aastaaegade kaupa

Jooniselt 4.37 on näha, et augustis oleks tootmine madalaim ja tuulik toodaks elektrienergiat 239,88 MWh ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 10,75 %. Aasta suurim tootmine oleks märtsis, kui tuuleturbiin toodaks 662,16 MWh elektrienergiat ja maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 29,67 %.




**Joonis 4.37.** WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine Virtsus kuude kaupa

Joonisel 4.38 on välja toodud nädalas toodetud elektrienergia hulk ja jooniselt on näha, et suurim maksimaal võimsuse kasutustegur oleks 2. nädalal, kui see oleks 49,64 %, kui toodetud elektrienergia hulk oleks 250,2 MWh.




**Joonis 4.38.** WinWind WWD-3-100 elektrienergia tootmine Virtsus nädalate kaupa

Nagu 10 meetri kõrgusel, siis ka 100 meetri kõrguselt leidub Virtsu meteoroloogiajaamas nädalaid, kus tuul on nii madal, et tuuleturbiin ei hakkaks elektrienergiat tootma.

# 5. ARUTELU

## 5.1. Kokkuvõte tulemustest

Eesti tuulekiirustest tehtud statistilisest analüüsist selgub, et rannikualadel nagu asukohtades A, B, Pakris ja Virtsus on tuul tugevam, kui Tarvtu-Tõraveres ja Tiirikojas. Heaks võrdluseks on ka see, kui vastava valemi abil välja arvutada tuule kiirused samadel kõrgustel. Kui tuulest saadava elektrienergia tootjad räägivad, et WinWind WWD-3-100 aastane maksimaal võimsuse kasutustegur võiks olla vähemalt üle 30 % tuuleturbiini maksimaalsest nimivõimsusest ja NE-5k toodang alates 8 %, siis see osakaal asukohtade suhtes jagunes võrdselt (tabel 5.1). Asukohas A, B ja Pakril oleks mõlema tuuliku puhul see eesmärk saavutatud, kus asukohas A oleks maksimaal võimsuse kasutustegur NE-5k puhul 8,58 % ja WWD-3-100 puhul 30,53 %. Asukohas B oleks maksimaal võimsuse kasutustegur vastavalt 11,99 % ja 33,04 %. Pakril oleks maksimaal võimsuse kasutustegur vastavalt 13,52 % ja 35,4 %. Tartu-Tõraveres ja Tiirikojal jäävad need numbrid kaugele soovitud tulemusest. Tartu-Tõraveres oleks Tuuleturbiini NE-5k maksimaal võimsuse kasutustegur 1,34 ja WWD-3-100 maksimaal võimsuse kasutustegur 7,73 %, kui Tiirkikojal on maksimaal võimsuse kasutustegur vastavalt 2,63 % ja 7,78 %. Virtsus arvutatud maksimaal võimsuse kasutustegur ei küündinud samuti soovitud tulemuseni, kuigi võrreldes Tartu-Tõravere ja Tiirikojaga oleks maksimaal võimsuse kasutustegur märgatavalt suurem, vastavalt 5,44 % ja 19,95 %. Kui vaadata joonist 4.31, siis sealt on näha, et Tiirikojas on 51. nädalal nii suur tuul, et tuulikud suudaksid toota kolmandiku aastasest toodangust, siis sellist nähtust teistes asukohtades ei kohta.

**Tabel 5.1.** Aastane elektrienergia toodang ja tuulikute maksimaal võimsuse kasutustegur

| | | **Tuuleturbiin** | |
|---|---|---|---|
| | | NE-5k | WinWind WWd-3-100 |
| Asukoht A | Aastane toodang, kWh | 3758,16 | 8024520 |
| | Maksimaalne elektrienergia hulk, kWh | 43800 | 26280000 |
| | Maksimaal võimsuse kasutustegur, % | 8,58 | 30,53 |
| Asukoht B | Aastane toodang, kWh | 5252,52 | 8681640 |
| | Maksimaalne elektrienergia hulk, kWh | 43800 | 26280000 |
| | Maksimaal võimsuse kasutustegur, % | 11,99 | 33,04 |

**Tabeli 5.1.** jätk

| | | | |
|---|---|---|---|
| Pakri | Aastane toodang, kWh | 5922 | 9304200 |
| | Maksimaalne elektrienergia hulk, kWh | 43800 | 26280000 |
| | Maksimaal võimsuse kasutustegur, % | 13,52 | 35,4 |
| Tartu-Tõravere | Aastane toodang, kWh | 588 | 2005560 |
| | Maksimaalne elektrienergia hulk, kWh | 43800 | 26280000 |
| | Maksimaal võimsuse kasutustegur, % | 1,34 | 7,63 |
| Tiirikoja | Aastane toodang, kWh | 1152 | 2046480 |
| | Maksimaalne elektrienergia hulk, kWh | 43800 | 26280000 |
| | Maksimaal võimsuse kasutustegur, % | 2,63 | 7,78 |
| Virtsu | Aastane toodang, kWh | 2382 | 5242440 |
| | Maksimaalne elektrienergia hulk, kWh | 43800 | 26280000 |
| | Maksimaal võimsuse kasutustegur, % | 5,44 | 19,95 |

Tuuleturbiinide toodang on sõltuv tuule kiirusest ja seda on näha ka joonistelt, mis on esitatud uurimistöö neljandas osas.

Kui arvestada viimase 12 kuu keskmist elektrienergia börsihinda, mis on 3,82 senti/kWh [16] ja arvestades veel taastuvenergia toetusega, mis on 5,37 senti kWh [17], siis saaks välja arvutada tuulikute tasuvusaja. Tasuvusaja järgi saaks teha järeldused, kuhu oleks sobilik tuulikut püstitada ja kuhu mitte. Tuuleturbiini tootja WinWind on lubanud enda tootele elueaks 20 aastat. Ne-5k kohta sellised tootjapoolsed lubadused puuduvad, kuid uurimistöö

autor arvestab sellele tuulikule samapikka eluiga. Tuuleturbiini aastane tasuvus on välja arvutatud järgmise valemiga:

$$S = P_1(S_b + S_t), \tag{3}$$

kus $S$ on tuuleturbiini toodetud elektrienergia maksumus, €;

$S_b$ 12 kuu keskmine börsihind, senti/kWh;

$S_t$ taastuvenergia toetus, senti/kWh.

Saadud tulemused on kantud tabelisse 5.2.

**Tabel 5.2.** Tuuleturbiini NE-5k ja WinWind WWD-3-100 toodetud elektrienergia maksumus

| | **Tuuleturbiin** | |
|---|---|---|
| | NE-5k | WinWind WWd-3-100 |
| | Summa, € | |
| Asukoht A | 345 | 737453 |
| Asukoht B | 483 | 797843 |
| Pakri | 544 | 855056 |
| Tartu-Tõravere | 54 | 184311 |
| Tiirikoja | 106 | 188072 |
| Virtsu | 219 | 481780 |

Samuti on tuuleturbiinil hoolduskulud, kuid selle kohta on raske kalkulatsioone teha ja seda autor selles uurimistöös ei käsitle ja seda arvutustes ei arvestata.

## 5.2. Järeldused

Asukohad A ja B on tuuleturbiini püstitamise jaoks hoolikalt välja valitud kohad, kus need toodavad aastaringselt elektrienergiat. Pakri, Tartu-Tõravere, Tiirikoja ja Virtsu on töösse välja valitud asukohad, kus asuvad meteoroloogiajaamad ja mõõdetud tuule kiiruse järgi välja arvutatud kahe erineva tuuleturbiini teoreetiline maksimaal võimsuse kasutustegur aasta jooksul. Kui arvestada seda, et WinWind WWD-3-100 tuuleturbiini hind on ligilähedale 3 miljonit eurot ja NE-5k hind maksimaalselt 1940 eurot [19], siis nende hinnasiltide järgi on võimalik välja arvutada tasuvusaeg.

### 5.2.1. Asukoht A

Antud asukohas tasuks tuuleturbiin NE-5k ennast ära 6 aastaga ja WinWind WWD-3-100 4,1 aastaga. Kindlasti need tasuvusajad pikenevad selle tõttu, et antud arvutustesse ei ole

arvestatud tuuleturbiinide hooldusega kaasnevaid kulusid. Asukoht, kuhu on rajatud tuulepark, tõestab seda, et sellesse kohta on sobilik tuuleturbiin püstitada, tasudes ära kulud ja kindlasti tekitada ka tulu.

### 5.2.2. Asukoht B

Antud asukohas tasuks tuuleturbiin NE-5k ennast ära 4 aastaga ja WinWind WWD-3-100 3,8 aastaga. Kindlasti need tasuvusajad pikenevad selle tõttu, et antud arvutustesse ei ole arvestatud tuuleturbiinide hooldusega kaasnevaid kulusid. Asukoht, kuhu on rajatud tuulepark, tõestab seda, et sellesse kohta on sobilik tuuleturbiin püstitada, tasudes ära kulud ja kindlasti tekitada ka tulu.

### 5.2.3. Pakri

Asukohtadesse A ja B on rajatud tuulepargid, siis Pakris on töö jaoks vajalikud andmed mõõdetud meteoroloogiajaamas. Kogutud, töödeldud ja arvutatud andmed tõestavad seda, et Pakri on väga hea asukoht tuuliku püstitamiseks, olles tuule kiiruse ja välja arvutatud maksimaal võimsuse kasutusteguri poolest kõige tulusam asukoht, uurimistöös käsitlevatest punktidest. Tuuleturbiin NE-5k tasuks ennast ära 3,5 aastaga ja WinWind WWD-3-100 tasuvusaeg oleks samuti 3,5 aastat.

### 5.2.4. Tartu-Tõravere

Tartu-Tõravere on antud töös käsitletutest asukohtades kõige kehvema tuule kiirusega punkt, kus aastane tuuleenergia toodang jääb väga madalaks mõlema tuuleturbiini suhtes. Tuuleturbiin NE-5k tasuvusaeg oleks 35,9 aastat ja WinWind WWD-3-100 tasuks ennast ära 16,3 aastat. WinWind tuuleturbiini tasuvusaeg jääks tootja poolt antud eluaja sisse, kuid kui arvestada juurde ka hoolduskulud, siis on suur tõenäosus, et püstitamise ja hoolduse kulud saab vaevalt nulli. Väiksemat tuuleturbiini NE-5k püstitamine sellesse asukohta ei ole mõistlik.

### 5.2.5. Tiirikoja

Tiirikoja meteoroloogiajaam asub Peipsi järve ääres ja ootused seal puhuvatest tuultest oli uurimustöö autoril suuremad, kui tegelikkus näitas. Siiski on seal tuuleturbiini püstitamiseks paremad eeldused, kui Tartu-Tõraveres. Tuuleturbiin NE-5k tasuvusaeg oleks 18,3 aastat ja WinWind WD-3-100 tasuks ennast ära 16 aastaga. Samuti ei oleks nendesse asukohtadesse otstarbekas tuuleturbiini püstitada.

### 5.2.6. Virtsu

Virtsu meteoroloogjaam asub rannikuäärsel alal, kus puhuvad üle keskmise tugevamad tuuled. Samas jäi tuule kiirus uurimustöö autorile oodatust madalamaks, sest tegu on siiski rannikuäärse alaga. Siiski on tegu alaga, kus tuuleturbiini NE-5k tasuvusaeg oleks 8,9 aastat

ja WinWind-WWD-3-100 tasuks ennast ära 6,2 aastaga. See näitab, et tegemist on alaga, kuhu on otstarbekas tuuleturbiin püstitada.

# KOKKUVÕTE

Uurimistöö eesmärgiks oli teha Eesti tuulekiiruste statistiline analüüs, mille tulemusel on võimalik välja selgitada, kas on võimalik kasutada meteoroloogjaamadest saadud tuulekiiruse andmeid, et välja arvutada tuuleturbiini elektrienergia toodang ja maksimaal võimsuse kasutustegur. Saadud tulemuste põhjal on võimalik välja selgitada, kas meteoroloogiajaamades kasutatav tuule kiiruse mõõtmise seadmetega on võimalik määrata tuuleturbiini püstitamiseks sobiv asukoht. Töös jälgitud nelja jaama andmete põhjal selgus, et Pakrile ja Virtsu, kus mõlemal juhul on tegemist rannikuäärse alaga, et nendesse asukohtadesse on otstarbekas paigaldada väiketuulik NE-5k, kui ka suurem tuulik WinWind WWD-3-100. Pakril oleks maksimaal võimsuse kasutustegur vastavalt 13,52 % ja 35,4 %, kus nende tuuleturbiinide tasuvusaeg oleks mõlemal juhul 3,5 aastat. Virtsu maksimaal võimsuse kasutustegur oleks Pakriga võrreldes väiksem, kui tuuleturbiinide maksimaal võimsuse kasutustegur oleks vastavalt 5,44 % ja 19,95 %. Kuigi maksimaal võimsuse kasutustegur ei vasta soovitud ootustele on tasuvusaeg siiski suhteliselt lühike, vastavalt 8,9 ja 6,2 aastat. Kaks järgmist jälgitavat asukohta asuvad sisemaal, millest üks asub Tartu-Tõraveres ja teine Peipsi järve ääres Tiirikojal. Saadud tulemused tõestasid seda, et sisemaal on tuule keskmine kiirus ikkagi madal ja tuuleturbiine ei ole otstarbekas nendesse asukohtadesse rajada. Tartu-Tõraveres oleks tuuleturbiini NE-5k maksimaal võimsuse kasutustegur 1,34 % ja WinWind WWD-3-100 7,73 %, ning tasuvusajaga vastavalt 35,9 ja 16,3 aastat. Tiirikojal oleks tuuleturbiinide maksimaal võimsuse kasutustegur vastavalt 2,67 % ja 7,78 %, ning nende tuuleturbiinide püstitamine tasuks ära 18,3 ja 16 aasta pärast. Kui arvutustesse lisada hoolduskulud, mida on raske ette ennustada, siis viimases kahes asukohas ei ole otstarbekas tuuleturbiine püstitada.

Uurimistöösse on lisatud kaks asukohta, mille tuule mõõtmised on teostatud 100 meetri kõrgusel tuuleturbiini katusel. Need kaks asukohta sai lisatud võrdluseks, et võrrelda reaalseid 100 meetri kõrgusel mõõdetud tuule kiiruseid, välja arvutatud kiirustega. Kuna meteoroloogjaamades on tuule kiiruse mõõtmised tehtud 10 meetri kõrguselt, siis on vaja kasutada valemit, millega saab need kiirused välja arvutada 100 meetri kõrgusele. Samuti on huvitav teada, kui suur oleks maksimaal võimsuse kasutustegur, kui sinna püstitada 10 m kõrgune NE-5k tuuleturbiin. Asukoht A ja B asuvad vastavalt 3,5 ja 1 km kaugusel rannikualast. Asukohas A on kogutud andmete põhjal välja arvutatud tuuleturbiinid NE-5k ja WinWind WWD-3-100 toolikused, mis on vastavalt 8,58 % ja 30,53 %. See koht on hoolikalt välja valitud asukoht, kuhu on rajatud tuulepark ja tehtud arvutused tõestavad, et tuuleturbiinide tasuvusaeg on vastavalt 6 aastat ja 4,1 aastat. Asukohas B on tuuleturbiinide maksimaal võimsuse kasutustegur vastavalt 11,99 % ja 33,04 %, ning tasuvusaeg 4 ja 3,8 aastat.

Kui võrrelda saadud tulemusi, siis tunduvad arvutused olevat tõesed, mis tõestab seda, et meteoroloogiajaamades kasutusel oleva tehnoloogiaga oleks võimalik teostada tuule kiiruse mõõtmisi välja valitud asukohas. Kuna antud uurimistöö maht on suur, siis oleks soovituslik tulevikus katsetada meteoroloogiajaamas kasutusel olevat tehnoloogiat, püstitades see asukohta, kuhu soovitakse püstitada üksik tuulik, kus soovitakse teostada ka tuule mõõtmine.

# KASUTATUD KIRJANDUS


1. **Mathew, S**. (2006)“Wind energy fundamentals, resource analysis and economics”, Berlin: Springer-Verlag. 246 lk.
2. “Europe's onshore and offshore wind energy potential” (2009). European Environment Agency. [*on-line*] https://www.eea.europa.eu/publications/europes-onshore-and-offshore-wind-energy-potential (27.10.2016).
3. **Kraemer, S**. (2015). 100% renewable global energy plan. [*e-ajakiri*] http://earthtechling.com/2015/12/100-renewable-global-energy-plan/ [10.12.2016].
4. **Bracken Meyers, C**. (2013). Wind turbine history. [*on-line*] http://centurionenergy.net/wind-tu rbine-history (11.11.2016).
5. **Nixon, N**. (2008). The history of wind power. [*e-ajakiri*] https://www.theguardian.com/environment/2008/oct/17/wind-power-renewable-energy (10.11.2016).
6. **Ragheb, M**. (2014). Wind generators history. [*e-ajakiri*] http://mragheb.com/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Wind%20Generators%20History.pdf (11.11.2016)
7. European Commission. (2017). [*On-line]* ] https://ec.europa.eu/energy/en/news/eu-well-way-meeting-2020-renewable-energy-target (1.03.2017).
8. **Werber, C**. (2015). Three European countries have already hit their 2020 renewable energy goals. [*e-ajakiri*] http://otecorporation.com/tempote/2015/03/10/three-european-countries-have-already-hit-their-2020-renewable-energy-goals/ (12.11.2016).
9. Eurostat. (2016). Renewable energy statistics. [*On-line*] http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics (12.11.2016).
10. TPWind Advisory Council of the European Wind Energy Technology Platform. (2006). Wind Energy: A vision for Europe in 2030. [*On-line*] http://www.windplatform.eu/ fileadmin/ ewetp_docs/Structure/061003Vision_final.pdf (19.12.2016).
11. Gill instruments. How do Gill Ultrasonic Anemometers work?. [*On-line*] http://gillinstruments.com/products/anemometer/principleofoperation2.html (19.12.2016).
12. Grill instruments. Heated aneometer. [*On-line*] http://gillinstruments.com/products/anemometer/windobserver-90.html (19.12.2016).
13. WinWind WWD-3-100 power curve drawing. The wind power. [*on-line*] http://www.thewindpower.net/turbine_en_65_winwind_wwd-3-100.php (29.03.2017).
14. NE-5k power curve drawing. Alibaba [*on-line*]. https://naier.en.alibaba.com/product/ 60454673467-804189659/5KW_Wind_Turbine_Generator_for_Wind_and_Solar_Power_ for_Houses_eolic_generator.html ( 29.03.2017).
15. Wind speed calculator. Danis wind industry association [*On-line*] http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wres/ %20calculat.htm (27.03.2017).
16. 220 energia. Tänane börsihind. [*On-line*] http://220energia.ee/koduklient/tanane-borsihind/ (27.07.2017).
17. Elering. Taastuvenergia toetused. [*On-line*] https://elering.ee/taastuvenergia-toetus (27.07.2017).

# STATISTICAL ANALYSIS FOR WINDS IN ESTONIA

## SUMMARY

The aim of the research was to carry out a statistical analysis of the wind speeds in Estonia, which could determine if it is possible to use wind speed data from meteorological stations in order to calculate wind turbine electric power output and maximal utilization of power. Based on the results obtained, it can be determined whether wind speed measurement equipment used in meteorological stations can determine the appropriate location for the wind turbine. Based on the data of the four stations monitored by the work, it turned out that Pakri and Virtsu, both of which are coastal areas, suggest that it is expedient to install small-scale NE-5k in these locations and WinWind WWD-3-100 larger windmill. The substrate would have a maximum utilization factor of 13.52% and 35.4% respectively, with a payback period of these wind turbines in both cases of 3.5 years. The maximum power utilization factor for wind turbines would be lower compared to Pakr when the maximum utilization of wind turbines was 5.44% and 19.95%, respectively. Although the maximum power utilization factor does not meet the desired expectations, the payback period is relatively short, respectively, at 8.9 and 6.2 years. The two following trails are located inland, one of which is located in Tartu-Tõravere and the other by Lake Peipsi at Tiirikoja. The results showed that the average wind speed in the inland is still low and wind turbines are not practical in these locations. In Tartu-Tõravere, the maximum power utilization factor for the wind turbine NE-5k would be 1.34% and WinWind WWD-3-100 7.73%, with a payback period of 35.9 and 16.3 years, respectively. The wind turbines would have a maximum utilization factor of 2.67% and 7.78% respectively, and the wind turbines would be erected 18.3 and 16 years later. If maintenance costs are included in the calculations, which are difficult to predict, then in the last two locations it is not feasible to erect wind turbines.

The research has included two locations where wind measurements are made at a height of 100 meters above the wind turbine roof. These two locations were added as a comparison to compare actual wind speeds measured at 100 meters, calculated at speeds. Since meteorological stations have wind speed measurements made at a height of 10 meters, it is necessary to use a formula that can be calculated at 100 meters. It is also interesting to know how much the maximum utilization of power would be if a 10-meter NE-5k wind turbine was erected there. Locations A and B are located 3.5 and 1 km from the coast, respectively. At location A, wind turbines NE-5k and WinWind WWD-3-100, calculated on the basis of collected data, are 8.58% and 30.53% respectively. This place is a carefully selected location where a wind farm is built and the calculations made show that wind turbines have a payback period of 6 years and 4.1 years respectively. At location B, wind turbines have a maximum power utilization rate of 11.99% and 33.04% respectively, and payback times of 4 and 3.8 years.

When comparing the results obtained, the calculations appear to be true, which proves that the technology used in meteorological stations would be able to perform wind speed

measurements at the selected location. Since the scope of this research is large, it would be advisable to test the technology used at the meteorological station in the future, setting up a site where a single wind turbine is to be erected, where it is also desired to measure the wind.

# LISAD

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Valmar Puusepp,
sünniaeg 13.04.1988,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö
Eesti tuulekiiruste statistiline analüüs, mille juhendaja on Andres Annuk,
1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(*allkiri*)

Tartu, _____
(*kuupäev*)

---

**Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

_____ _____
(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)