

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Loodusteaduskond

Meresüsteemide instituut

**ERINEVATEL KÕRGUSTEL MÕÕDETUD
TUULE PARAMETRID VAINDLOO SAARE
NÄITEL**

Magistritöö

Tuuli Jurtom

Juhendaja: Prof. Sirje Keevallik

Tallinn

2017

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus ning kinnitan, et esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Kinnitan, et antud töö koostamisel olen kõikide teiste autorite seisukohtadele, probleemipüstitustele, kogutud arvandmetele jmt viidanud.

Tuuli Jurtom

(allkiri ja kuupäev)

Juhendaja: *Sirje Keevallik*

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

(allkiri ja kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees:

Lubatud kaitsmisele

.....

(nimi, allkiri, kuupäev)

SISUKORD

RESÜMEE	5
ABSTRACT	7
SISSEJUHATUS	9
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	10
1.1 Tuule tekkimise põhjused	10
1.2 Atmosfääri stratifikatsioon.....	11
1.3 Tuule suuna ja kiiruse mõõtmine	12
1.4 Vaindloo saar	14
1.5 Tuulekliima iseloomustus Soome lahel ja Vaindloo saarel	16
2. MATERJAL JA METOODIKA	19
2.1 WXT520 tehnilised andmed	19
2.2 WMT702 tehnilised andmed.....	20
2.3 Automaatjaamade iseloomustus.....	21
2.4 Tuule suuna ja kiiruse keskmistamine	22
2.5 Tuuleandmete registreerimine.....	24
2.6 Automaatjaamade asukohad.....	25
2.7 Andmed	27
2.8 Kõrguse korrektsiooni arvutamine.....	28
3. TULEMUSED	30
3.1 Tuule keskmise kiiruse võrdlus rumbides.....	30

3.2 Korreleeruvus 10 ja 31,5 meetri tuulte vahel.....	32
3.3 Kõrguse korrektsioon.....	35
3.4 Kõrguse korrektsiooni koefitsiendi seos atmosfääri stratifikatsiooniga	37
3.5 Võrdlus kõrguse korrektsiooni valemitega	39
4. ARUTELU	43
KOKKUVÕTE.....	46
SUMMARY	47
KASUTATUD ALLIKAD	48
Lisa 1. Hajuvusdiagrammid aastaegade kaupa rumbis E.....	52
Lisa 2. Hajuvusdiagrammid aastaegade kaupa rumbis SE.....	54
Lisa 3. Hajuvusdiagrammid aastaegade kaupa rumbis W.....	56
Lisa 4. Hajuvusdiagrammid aastaegade kaupa rumbis NW.....	58
Lisa 5. UK Met Office kõrguse korrektsioonid maismaa kohal	60
Lisa 6. UK Met Office kõrguse korrektsioonid mere kohal.....	61
Lisa 7. Kõrguse korrektsioonid Läänemere põhjaosas	62

RESÜMEE

Erinevatel kõrgustel mõõdetud tuule parameetrid Vaindloo saare näitel

Magistritöö

Tuuli Jurtom

Märksõnad: tuule suund, tuule kiirus, Vaindloo, automaatjaam WMT702, automaatjaam WXT520, kõrguse korrektsioonid, atmosfääri stratifikatsioon.

Käesoleva magistritöö eesmärk on uurida kahel kõrgusel mõõdetud tuule parameetrite vahekorda perioodil 2013 – 2016 Vaindloo saare näitel. Saarel teostab tuule suuna ja kiiruse mõõtmist 10 meetri kõrgusel Riigi Ilmateenistus ja 31,5 meetri kõrgusel Tallinna Tehnikaülikooli meresüsteemide instituut. Töös on kahel kõrgusel saadud tuule kiirused jaotatud ülemise tuule suuna järgi kaheksasse rumbi. Töö tulemustes selgus, et poolte rumbide puhul on tuule kiiruse andmed ebausaldusväärsed ning seetõttu on analüüs tehtud vaid rumbidele E, SE, W ja NW. Tuule kiiruse vahekordade analüüsi tulemusena saadi eeskiri, kuidas taandada 31,5 meetri tuule kiiruse andmed 10 meetri kõrgusele. Eeskirjaks on kõrguse korrektsiooni koefitsiendid, mis saadi iga uuritava rumbi ning ka aastaegade kaupa. Kuna kõrguse korrektsioonid erinesid aastaegade kaupa, siis sai luua seose maapinnalähedase õhukihi stratifikatsiooniga, võttes aluseks Pakri poolsaarel mõõdetud vee- ja õhutemperatuuri ning tuule andmeid.

Uurimaks magistritöö käigus saadud kõrguse korrektsiooni koefitsientide usaldusväärsust, on neid väärtusi võrreldud varasemalt Läänemere põhjaosas tehtud uuringu käigus saadud kõrguse korrektsioonidega ning need ühilduvad väga hästi ida- ja kagutuulte puhul külmal aastaajal, kui õhk on märgatavalt külmem kui vesi. Samuti on tehtud võrdlus kahe kõrguse korrektsiooni arvutamise valemiga ning ka

nende puhul nii kõrguse korrektsioonide koefitsientide kui ka valemite abil arvatud tuule kiiruse ja mõõdetud tuule kiiruse kokkulangevus on väga hea. Käesoleva töö eeliseks varasemate ees on kõrguse korrektsioonide sidumine tuule suuna ja erinevate aastaegade.

ABSTRACT

Wind parameters at different heights on the example of the Vaindloo island

Master's Thesis

Tuuli Jurtom

Keywords: wind direction, wind speed, Vaindloo Island, Vaisala weather transmitter WMT702, Vaisala weather transmitter WXT520, height correction, atmosphere stratification.

The aim of this master's thesis is to examine wind parameters at two different heights during a period of 2013 – 2016 on the example of Vaindloo Island. On the island, the wind speed and direction measurements at 10 meters are carried out by the Estonian Weather Service and measurements at 31,5 meters are carried out by Tallinn University of Technology Department of Marine Systems. The wind speed data from these two altitudes are divided into 8 rhumbs according to wind direction on the upper level. The results shows that the wind speed values of four rhumbs are unreliable and therefore, the rest of the analysis has been carried out only for the rhumbs E, SE, W and NW. As a result of analysing wind speed at different heights, a regulation, how to withdraw wind speed at the altitude of 31, 5 meters to the altitude of 10 meters, was created. This regulation represents height corrections, which were obtained for each of the rhumbs as well as for different seasons. Because of the height corrections differed by seasons, the link between height corrections and atmosphere stratification was made. The reference was based on the air and sea temperature and wind measurements data from Pakri peninsula.

In order to examine the reliability of the height corrections, the comparison between an eariler study, where height corrections were obtained for different parts of the

northern Baltic Sea, was made. The result shows that these height corrections matched well for the E and SE winds in winter when the air is colder than the water. Comparison between two height correction formulas was made and height corrections as well as calculated wind speed and measured wind speed match also well. The advantage of the current work is that it is possible to relate height corrections to the wind direction and season.

SISSEJUHATUS

Maailma Meteoroloogiaorganisatsiooni (WMO) nõuded näevad ette, et tuule kiirust ja suunda mõõdetaks võimalikult avatud meteoroloogiajaama väljakul 10 meetri kõrgusel (WMO 2006). Lähtudes WMO nõuetest, tegeleb Eestis meteoroloogiliste vaatlusandmete kogumisega Keskkonnaagentuuri alla kuuluv Riigi Ilmateenistus, Eesti kuulub WMO-sse alates 1992. aastast (Juust 2016). Sageli on aga võimalik mingi paiga jaoks saada tuuleandmeid kõrgemal, olgu tegemist numbrilise prognoosi mudeliga või mõõtmistega tuletornis. Tuule mõõtmisi mere kohal teostatakse tavaliselt kõrgusel, mis erineb suuresti WMO standardkõrgusest (Observer's 2000). Kõrgemal saadud mõõtmistulemused pole aga võrreldavad 10 meetri standardkõrgusel mõõdetud tuule andmetega, sest on ju teada, et tuule kiirus on seda suurem, mida kõrgemal mõõtja asub (Tammets 2012). Et niimoodi saadud andmeid võrrelda standardtingimustes registreeritud andmetega, on vaja algoritmi, mille abil need taandada 10 meetri kõrgusele.

Vaindloo saare näol on tegemist Eesti põhjapoolseima saarega, mis asub Soome lahe idaosas (Ratas *et al.* 1999). Saarel teostatakse alates aastast 2013 tuule suuna ja kiiruse mõõtmisi kahel kõrgusel, nii WMO standardkõrgusel 10 meetril kui ka 31,5 meetri kõrgusel. Tulenevalt sellest on käesoleva magistritöö eesmärk uurida 10 meetri ja 31,5 meetri kõrgusel mõõdetud tuule parameetrite vahekorda.

Magistritöös on kasutatud aastate 2013 – 2016 tuule suuna ja kiiruse andmeid. 10 meetri kõrguse andmed on saadud päringu kaudu Riigi Ilmateenistusel, kes mõõdab tuule suunda ja kiirust automaatjaamaga WMT702. 31,5 meetri andmed pärinevad Tallinna Tehnikaülikooli meresüsteemide instituudilt, kes teostab tuule mõõtmisi automaatjaamaga WXT520.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1 Tuule tekkimise põhjused

Tuuleks nimetatakse horisontaalset õhu liikumist maapinna suhtes (Mander *et al.* 2014). Õhumasse panevad liikuma järgmised jõud: gradientjõud, Coriolisi jõud, hõõrdumisjõud (Jürissaar 2011). Maakera ebaühtlase soojenemise ja jahtumise tagajärjel kujunevad välja õhurõhu erinevused ehk õhurõhu gradient, mille tagajärjel hakkab õhk liikuma ja tekib tuul (Tarand *et al.* 2013). Mida suurem on õhurõhu gradient ehk õhurõhu erinevus kahe naaberalal vahel, seda tugevam on tuul. Gradientjõud on suunatud kõrgema rõhuga alalt madalama rõhuga alale suunas (Holton 2004).

Kui õhu liikumine on gradientjõu toimel alanud, siis hakkavad liikumisele mõjuma ka teised jõud. Need on Coriolisi jõud ja hõõrdumisjõud (Jürissaar 2011). Maa pöörlemise tõttu mõjutab tuule suunda Coriolisi jõud, mis kallutab liikuvat õhku kõrvale gradientjõu mõjumise suunast. Coriolisi jõud kujutab enesest inertsjõudu, mis tekib keha liikumisel pöörlevas taustsüsteemis. Iga objekt või vedelik, mis liigub horisontaalselt põhjapoolkeral, kaldub oma liikumise suunast paremale. Lõunapoolkeral liikuv keha kaldub vasakule (Holton 2004). Coriolisi jõud on maksimaalne poolustel ning puudub ekvaatoril (Jürissaar 2011).

Hõõrdumisjõud on oma suunalt vastupidine õhu liikumise suunaga ja püüab liikumist peatada (Jürissaar 2011). Mida väiksem see on, seda tugevam tuul puhub. Väga tugevate tuuletakistuste korral võib tuule kiirus väheneda nullini. Tuuletakistused mõjutavad ka tuule suunda, tekitades erineva suurusega õhukeeriseid. Olukorras, kus tuule takistus on väike, näiteks mere kohal, puhub tuul enam-vähem risti isobaaridega, nii et madalama rõhuga alale jääb õhu liikumise suunast vasakule. Mida

suuremaks läheb aluspinna takistus, seda rohkem pöörduv õhuvool oma esialgsest suunast vasemale, madalama õhurõhuga ala suunas. See tuulenihe võib olla maksimaalselt kuni 30 kraadi (Tarand *et al.* 2013).

1.2 Atmosfääri stratifikatsioon

Maapinnalähedases õhukihis kasvab tuule kiirus üldiselt kõrgusega logaritmiliselt (Ohvril 2004). Kuid tuule kiiruse muutust kõrgusega mõjutab nii hõõrdejõud kui ka maapinnalähedase õhukihi stabiilsus ehk õhu-vee vastastikune mõju ranniku ja avamere vahel, mille põhjustajaks on muutuv hooajaline vee- ja õhutemperatuuride erinevus (Launiainen, Saarinen 1982). Veetemperatuuri muutused käivad üldiselt kaasas õhutemperatuuri aastaringsete muutustega, kuid teatud väikese viivitusega. Selle põhjuseks on vee ja õhu erinev soojusmahtuvus (Keevallik 2013). Seda, kuidas temperatuur muutub atmosfääris kõrgusega, nimetatakse stratifikatsiooniks ning atmosfäär võib olla üldjoontes stabiilne, ebastabiilne või neutraalne (Holton 2004).

Kevadel, mil tuuled puhuvad mandrilt merele, on mere kohale liikuva õhu temperatuur kõrgem kui veepinna temperatuur (Keevallik 2013). Siis on tegemist stabiilse stratifikatsiooniga. Stabiilse stratifikatsiooni puhul on vertikaalne õhu segunemine takistunud ning tuule kiirus muutub kõrgusega kiiresti (Newman, Klein 2014). Läänemere põhjaosas tehtud uuringute järgi on aluspinna lähedane õhukiht kõige stabiilsem kevadel ja suve alguses, siis on ka maapinnalähedane tuule kiirus kõige madalam (Niros *et al.* 2002).

Sügisest muutub olukord vastupidiseks, kuna vesi jahtub aeglasemalt kui õhk ning veepinna temperatuur on kõrgem kui õhutemperatuur. Siis on tegemist ebastabiilse stratifikatsiooniga (Keevallik, Soomere 2010). Avamerel võib veepinna temperatuur püsida madalam kui õhutemperatuur augustini. Rannikualadel veepind soojeneb kiiresti ning samas ka jahtub maha palju kiiremini kui avamerel. Seetõttu võib atmosfääri maapinnalähedane kiht rannikul muutuda ebastabiilseks juba varasuvel

(Launiainen, Saarinen 1982). Ebastabiilse stratifikatsiooni korral on õhu vertikaalne segunemine soodustunud ning tuule kiirus muutub kõrgusega vähem (Newman, Klein 2014).

Neutraalse stratifikatsiooni korral kasvab tuule kiirus kõrgusega logaritmiliselt ning õhu- ja veepinna temperatuuri erinevus on väike (Launiainen, Laurila 1984). Sellises olukorras temperatuur kõrgusega üldiselt ei muutu või kahaneb kõrgusega aeglasemalt kui adiabaatilises atmosfääris (Holton 2004). Neutraalne stratifikatsioon tekib täispilves tuulise ilma korral, mil pilved takistavad nii maapinna jahtumist kui kuumenemist, tuul aga soodustab temperatuurianomaaliate segunemist (Ohvril 2004).

1.3 Tuule suuna ja kiiruse mõõtmine

Tuule iseloomustamiseks kasutatakse kiirust (tugevust) ja suunda. Tuule kiirust väljendatakse vahemaana, mille õhk läbib teatud ajaühikus, tavaliselt meeter sekundis (m/s) või sõlmedes (0,515 m/s). Tuule kiiruse visuaalsel hindamisel kasutatakse ka Beauforti skaalat (Kull 2005). Eristatakse keskmist tuule kiirust, mis on 10 minuti keskmine, ja puhangulist tuule kiirust, mis on vaid hetkeline (Tarand *et al.* 2013).

Tuule suund meteoroloogias on suund, kust tuul puhub. Suundi eristatakse kas ilmakaarte järgi või nurgakraadides kellaosuti liikumise suunas (Kull 2005). Igapäevases elus määratakse tuule suunda rumbides (ilmakaarte järgi). Kasutatakse 4, 8 või 16-rumbilist skaalat (Jürissaar 2011). Sellest ajast aga, kui võeti kasutusele automaatsed tuulemõõtjad, on tuule suunda määratud kraadides. Selle kohaselt vastab idatuulele tuule suund 90 kraadi, lõunatuulele 180 kraadi, läänetuulele 270 kraadi ja põhjatuulele 360 kraadi (Tarand *et al.* 2013).

Tuule suunda ja kiirust määratakse kõige sagedamini tuulelippude, anemomeetrite või anemograafide abil (Tarand *et al.* 2014). Esimeste meteoroloogiajaamade

vaatlejad, kellel puudusid vahendid tuule kiiruse mõõtmiseks, hindasid tuule kiirust neljaastmelise skaala alusel: nõrk, keskmine, kõva tuul ja torm. Meremehed määrasid tuule tugevust selle järgi, milliste purjedega tuli sõita. 1806. aastal koostas inglise admiral F. Beaufort tuule tugevuse täpsemaks hindamiseks vastava skaala (Tõllasepp 1960), mis hindab tuule mõju ümbritsevatele objektidele (Kull 2005). Beaufort jagas skaala 12 osaks ehk pallideks (0 – tuulevaikus) (Kallis 2006).

Instrumentaalsed tuule mõõtmised Eestis algasid 20. sajandi esimesel poolel (Keevallik *et al.* 2007). Kuni 1970-ndateni olid kasutusel Vene–Šveitsi meteoroloogi Wildi konstrueeritud tuulelipud, mille abil määrati keskmine tuule kiirus täpsusega 1 m/s. Tuulelipu kõrgus oli enamikus jaamades 13 m (Kallis *et al.* 2014). Tuule suuna määramiseks oli tuulelipu mastil rumbiline jaotus ning kiiruse mõõtmiseks jaotustega poolkaar. Poolkaare kohal liikus metallplaat, mille kaal oli 200 g või 800 g. Vastavalt plaadi raskusele oli tegemist kas kerge või raske plaadiga tuulelipuga. Kui tuul oli nõrk, tehti vaatlused kerge plaadiga tuulelipu järgi. Kui tuule kiirused olid suuremad (üle 14-15 m/s), kasutati vaatluste jaoks raske plaadiga tuulelippu. Tuule kiirus määrati plaadi asendi järgi poolkaare kohal (Jürissaar 2011). Keskmine tuule kiirus ja suund määrati visuaalsel vaatlusel 2 minuti jooksul. Tuule suuna määramiseks kasutati 8 või 16 rumbilist skaalat, täpsusega vastavalt 45° või 22,5° (Keevallik *et al.* 2007).

70-ndatel aastatel tulid kasutusele anemorumbomeetrid M-63M-1 (ja tema modifikatsioonid), mis võimaldasid keskmise tuule kiiruse automaatset mõõtmist ja maksimaalse kiiruse fikseerimist (Riigi Ilmateenistus *s.a.*). Anemorumbomeeter on kombinatsioon elektrilisest anemomeetrist, mis mõõdab keskmist tuule kiirust 10 minutilise intervalliga, ja tuulelipust (Keevallik *et al.* 2006), mille puhul vaatleja jälgis 2 minuti jooksul tuule suunda näitava noole kõikumist, määrates selle keskmise asendi 5° täpsusega (Žukova 2006). Erinevates Eesti vaatlusjaamades võeti anemorumbomeetrid kasutusele erinevatel aegadel, kuid tuulelipud kerge ja raske plaadiga jäid peaaegu kõikide jaamade vaatlusväljakutele abivahendiks juhuks, kui

M-63M-1 ei olnud võimalik kasutada kas elektrihäire või tehnilise rikke tõttu (Riigi Ilmateenistus *s.a*).

21. sajandi alguses hakati Eestis Ilmateenistuse ilmajaamades tuult mõõtma Soome Väisälä firma automaatilmajaamadega MILOS 520, mis on varustatud WAA151 anemomeetri ja WAV151 tuulelipuga. Tuule kiirust ja suunda mõõdeti iga sekundi tagant (Keevallik *et al.* 2007). Paljudes vaatlusjaamades on kasutusel ka akustiline tuulesensor WMT700, mis koosneb kolmest signaali saatvast ja vastu võtvast ultrahelimuundurist, töötleb mõõtesignaali ning muudab selle tuule kiiruse ja suuna näitajateks (Keskkonnaagentuur 2015).

Iga meteoparameetri mõõtmiseks on WMO välja töötanud kindla metoodika selleks, et kõik registreeritavad andmed oleksid omavahel nii ajas kui ka ruumis võrreldavad (Keevallik 2008). Vastavalt WMO reeglitele, mõõdetakse Riigi Ilmateenistusele kuuluvates meteoroloogiajaamades tuule kiirust ja suunda 10 meetri kõrgusel. Tuule suunda ja kiirust esitatakse 10 minuti keskmisena. Määratakse ka tuule maksimaalne puhanguiline kiirus sellel ajavahemikul (WMO 2006). Riigi Ilmateenistuse meteoroloogilisse seirevõrku kuuluvad 14 meteoroloogiajaama ja 16 rannikujaama (Keskkonnaagentuur 2017). Lisaks on Eesti rannikul ja väikesaartel arvukalt eri valduses olevaid automaatjaamu, mis mõõdavad tuule kiirust 20-50 meetri kõrgusel (Tammets 2012).

1.4 Vaindloo saar

Vaindloo (59°49′ N, 26°21′ E.) on Eesti Vabariigi põhjapoolseim saar ning asub Soome lahe idaosas, Kunda sadamast 25 km kaugusel (Joonis 1) (Ratas *et al.* 1999). Riigi territoriaalveed lõpevad saarest vaid 8 meremiili kaugusel ja Soome mandriosast on saareni 53 km (Keskpaik *et al.* 2009). Saare pindala on 6,24 hektarit (Loopmann, 1996). Vaindloo saar on edela-kirde sihiline 0,5 km pikkune rannavallidega moreenseljakk, kus kasvab üksikuid madalaid puid ja põõsaid

(Keskpaik *et al.* 2009). Saar on avatud kõikidele tuule suundadele ning tuule omadusi ei mõjuta maismaa (Keevallik, Soomere 2010).

1994. aastast asub Vaindlool Eesti piirivalve 50 meetri kõrgune vaatluspost koos radarijaamaga ja neile voolu andva tuulegeneraatoriga. 1871. aastast asub ka Vaindlool malmist 17 meetri kõrgune tuletorn. Tuletornikompleksi kuuluvad veel 19. sajandist pärit ait, kelder, kaevumaja, majakavahi elamu, petrooleumiait (Pinn *et al.* 2012).

Vaindloo tuletorni juures algasid süstemaatilised meteoroloogilised vaatlused juba 1898. aastal, kestes vaheaegadega kuni 1941. aastani. Ilmavaatlused Vaindlool nii nagu teistelgi Eesti saartel ja rannikul teenisid eelkõige laevaliiklust. Vaindloo vaatlusjaamas registreeriti õhutemperatuuri, sademeid, tuule suunda ja kiirust, lumikatte paksust ning määrati udupäevade arvu. Meteoroloogiliste vaatlustega taasalustati Eesti Vabariigi piirivalvurite poolt 1997. aastal, mil iga kolme tunni järel (8 vaatlust ööpäevas) laekusid sünoptikutele andmed tuule suuna ja kiiruse ning õhutemperatuuri kohta (Ratas *et al.* 1999). 2012. aastal automatiseeriti Vaindloo rannikujaam Riigi Ilmateensistuse poolt (tollase nimega Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut) ning sellest ajast saadik mõõdetakse automaatjaamas vaid tuule suunda ja kiirust 10 meetri kõrgusel (Riigi Ilmateenistus *s.a*). Lisaks asub Vaindloo saarel ka Tallinna Tehnikaülikooli meresüsteemide instituudi automaatne ilmajaam, mis on kinnitatud 31,5 meetri kõrgusele piirivalve radarimasti külge (Kõuts 2017).



Joonis 1. Vaindloo saare asukoht (Maa-amet, 2017)

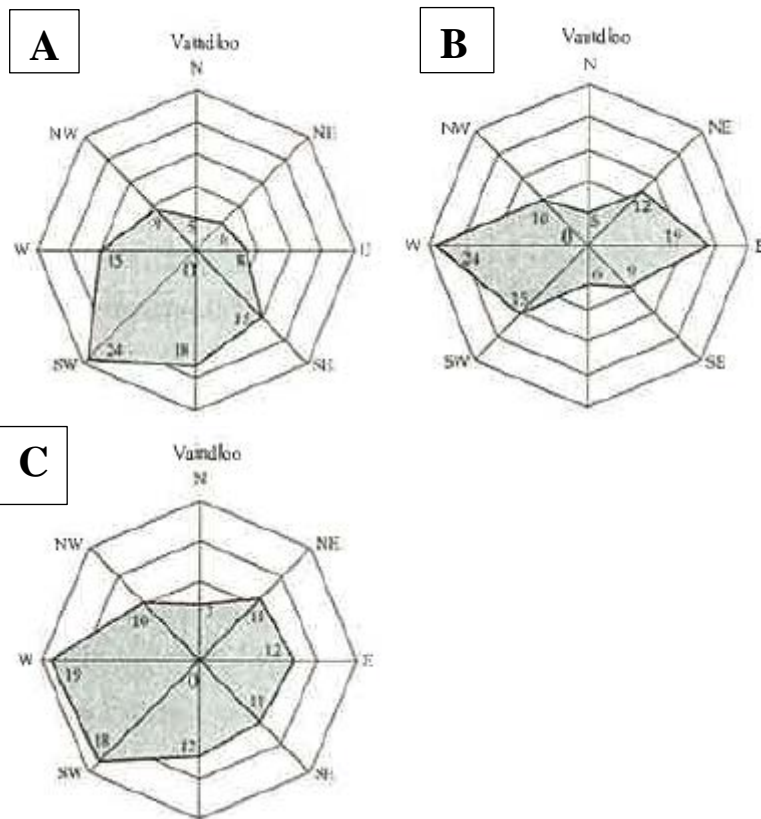
1.5 Tuulekliima iseloomustus Soome lahel ja Vaindloo saarel

Õhuringlus ehk atmosfääri üldine tsirkulatsioon on Põhja-Euroopas intensiivne, põhjustades erinevate omadustega õhumasside kiire vaheldumise ja ilmastiku suure muutlikkuse (Tarand *et al.* 2013). Läänemere ja ka Soome lahe tuulekliimat kujundavad põhjoontes parasvöötmele omane läänevool, madalrõhusüsteem Islandi kohal, kõrgrõhusüsteem Assoori saarte lähistel ning ka kontinentaalne Siberi kõrgrõhuala (BACC 2008). Vastavalt nendele on Läänemere piirkonnas valitsevateks tuulteks edelatuuled (Keevallik 2011). Edelatuuled domineerivad külmal aastaajal novembrist märtsini, mil Islandi madalrõhkkonna mõju on suurim. Märtsist Islandi madalrõhkkond kaotab oma mõju, Assoori kõrgrõhkkonna mõju suureneb (BACC 2008) ning Läänemerele saavad valitsevaks nõrgad põhja- ja kirdetuuled (Soomere, Keevallik 2003). Sellele üldskeemile lisanduvad tugevad regionaalsed mõjud, eriti Läänemere sopiline kuju ning mere ja maa vaheldumine. Nii näiteks puhuvad

Läänemere keskosas suurima sagedusega küll edelatuuled, ent sekundaarse maksimumi moodustavad põhjatuuled (Soomere, Keevallik 2001).

Soome lahel domineerivad edela- ja põhjatuuled, peegeldades üldist atmosfääri tsirkulatsiooni Läänemerel. Sügisel ja talvel domineerivad tugevad edelatuuled, kuid ka tuuled teistest ilmakaartest esinevad sagedasti (Launiainen, Laurila 1984). Suvel saavad domineerivaks piki lahte puhuvad lääne- ja idatuuled (Soomere, Keevallik 2003). Mööda Soome lahte itta liikudes väheneb nii põhja- kui idatuulte osakaal. Kagutuuled on kogu lahe ulatuses suhteliselt harvad ja nõrgad (Keevallik 2011). Läänemere keskosas ja Soome lahe suudmes on tuule kiirus keskmiselt 7,2 m/s. Soome lahes see veidi väheneb ja lahe idaosas on keskmine tuule kiirus 6,2 m/s (Keevallik 2008).

Vaindloo saare tuulekliimat on kirjeldatud uurimuses „Vaindloo saare loodusest“ (Ratas *et al.* 1999) ning kliimaatiliste iseärasuste iseloomustamiseks on kasutatud Vaindloo meteoroloogiajaama paljuaastaseid keskmisi näitajaid. Aastaringselt valitsevateks tuulteks on lääne- ja edelatuuled, keskmised korduvused vastavalt 18% ja 19% (Joonis 2-C). Talvel esinevad kõige sagedamini edelatuuled (24%) (Joonis 2-A), suvel aga lääne-, edela- ja idatuuled ehk tuuled (Joonis 2-B), mis puhuvad piki Soome lahte. Keskmine aastane tuule kiirus Vaindlool on 5,5 m/s (Tabel 1). Suuremad tuule kiirused esinevad oktoobrist jaanuarini (6,5-6,8 m/s) ning nõrgemad tuuled varasuvel maist juulini (3,9 m/s).



Joonis 2. Tuulte suundade sagedus Vaindlool. A-talvel (jaanuar); B-suvel (juuli); C-aasta keskmine (Ratas *et al.* 1999)

Tabel 1. Tuule keskmine kiirus (m/s) Vaindloo saarel kuude lõikes (Ratas *et al.* 1999)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Aasta keskmine
6.5	6.2	5.5	4.2	3.9	3.9	3.9	5.0	5.9	6.5	6.7	6.8	5.5

2. MATERJAL JA METOODIKA

Käesoleva magistritöö analüüsi tarbeks on kasutatud aastate 2013 – 2016 tuule kiiruse ja suuna andmeid, mis on mõõdetud 10 meetri kõrgusel ja 31,5 meetri kõrgusel Vaindloo saarel. 10 meetri kõrguse andmed pärinevad Riigi Ilmateenistusest, mis mõõdab tuule suunda ja kiirust automaatjaamaga Vaisala WMT702 (Keskkonnaagentuur 2014). 31,5 meetri kõrgusel asub Tallinna Tehnikaülikooli meresüsteemide instituudile kuuluv automaatjaam Vaisala MXT520 (Kõuts 2017).

2.1 WXT520 tehnilised andmed

Vaisala WXT520 (Pilt 1) mõõdab Vaindloo saarel lisaks tuule suunale ja kiirusele ka õhutemperatuuri, õhuniiskust, õhurõhku ja sademeid 31,5 meetri kõrgusel (<http://online.msi.ttu.ee/vaindloo/#>). Tuule kiirust mõõdetakse täpsusega $\pm 0,3$ m/s, kui tuule kiirus on 0...35 m/s ning täpsusega $\pm 0,5$ m/s, kui tuule kiirus on 35...60 m/s. Tuule suund on väljendatud kraadides ($^{\circ}$), täpsusega $\pm 3^{\circ}$. Põhjasuund on esitatud kui 0° , ida 90° , lõuna 180° ja lääts 270° . Tuule suunda ei määrata, kui tuule kiirus on alla 0,05 m/s. Sellisel juhul jääb kehtima viimane tuule suuna väljund kuni tuule kiirus suureneb 0,05 m/s ja üle selle. Mõõdetavateks parameetriteks on keskmine, minimaalne ja maksimaalne tuule suund ja kiirus (Vaisala 2012).



Pilt 1. Vaisala MXT520 automaatjaam (Vaisala 2012)

2.2 WMT702 tehnilised andmed

Vaindloo rannikujaam kuulub Riigi Ilmateenistuse meteoroloogiliste rannikujaamade hulka. Rannikujaamas mõõdetakse vaid tuule suunda ja kiirust sensoriga WMT702 (Pilt 2) WMO reeglite kohaselt 10 meetri kõrgusel (Keskkonnaagentuur 2014). Vaisala WMT702 automaatjaama tehniliste andmete kirjeldamiseks on kasutatud Vaisala WMT700 kasutusjuhendit, kuna WMT702 on üks kolmest WMT700 seeria sensorist. Sensor mõõdab tuule kiirust kuni 65 m/s täpsusega $\pm 0,1$ m/s. Tuule kiirust hakatakse mõõtma alates 0,1 m/s. Mõõdetavateks parameetriteks on tuule suuna ja kiiruse hetkväärtus, maksimum, miinimum, keskmine, lisaks tuule kiiruse puhangulisus ja tuulevaikus. Tuule suunda väljendatakse kraadides ($^{\circ}$), täpsusega $\pm 2^{\circ}$. Tuule suunda ei määrata, kui tuule kiirus on alla 0,1 m/s (Vaisala 2013).



Pilt 2. Vaisala WMT702 automaatjaam (Vaisala 2013)

2.3 Automaatjaamade iseloomustus

WMT702 ja WXT520 automaatjaamad töötavad ühesugusel põhimõttel. WINDCAP tehnoloogial põhinevad automaatjaamad kasutavad tuule suuna ja kiiruse kindlaks tegemisel ultraheli. Sensori horisontaalsele alusele on kinnitatud kolm ühtlase vahega ultraheli andurit. Tuule suund ja kiirus määratakse ajaga, mis kulub ultraheli läbimiseks ühest andurist teise. Ultraheli läbimiseks kulunud aeg ühest sensorist teise sõltub tuule kiirusest ning seda mõõdetakse kahes suunas, vastas- ja pärisuunas (Joonis 3) (Vaisala 2012). Kahe anduri vahelise tuule kiiruse arvutamisel kasutatakse järgmist valemit:

$$V_w = 0.5 * L * (1/t_f - 1/t_r), \quad (1)$$

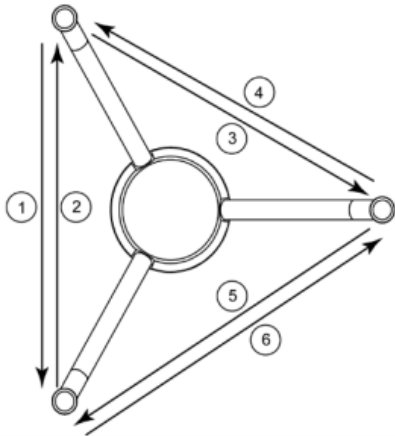
kus V_w = tuule kiirus;

L = kahe anduri vaheline kaugus;

t_f = läbimise aeg pärisuunas;

t_r = läbimise aeg vastassuunas.

V_w arvutatakse kõigi kolme anduri vahe jaoks mõlemas suunas. Sellest piisab, et arvutada tuule kiirus WS ja suund WD (Vaisala 2013).



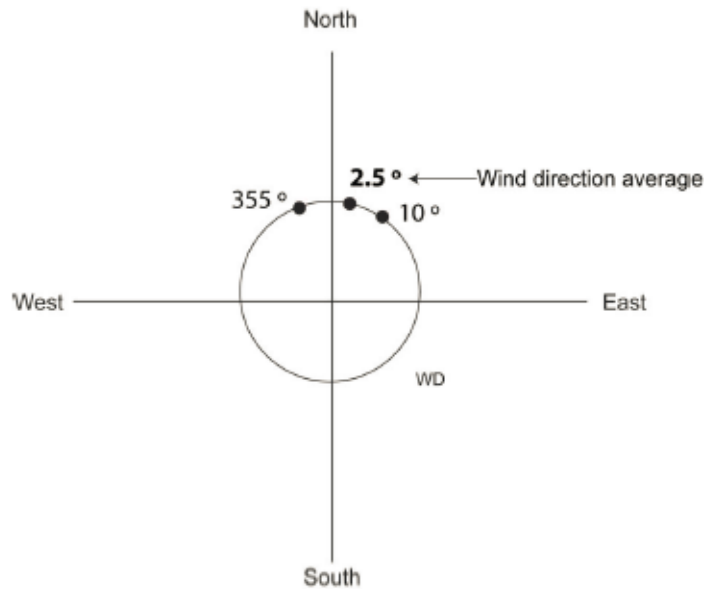
Joonis 3. Mõõtmiste teed andurite vahel päri- ja vastassuunas (Vaisala 2012)

2.4 Tuule suuna ja kiiruse keskmistamine

Lisaks tuule suuna ja kiiruse hetkandmetele on vajalik teada ka nende keskmisi väärtusi. Seetõttu sisaldavad tuule mõõtmise instrumendid ka andmete töötlemise ja salvestamise süsteeme (WMO 2006). Automaatjaam Vaisala MXT520 kasutab tuule suuna ja kiiruse keskmiste väärtuse saamiseks skalaari aritmeetilist keskmist, mille puhul liidetakse kõik väärtused üle keskmistamise aja ja jagatakse summa mõõtmiste arvuga. Keskmistamise aega saab valida 1-3600 sekundini 1 sekundilise sammuga (Vaisala 2012).

Skalaari keskmistamisel tekib probleem põhjasuuna (360° või 0°) lähedaste suundade keskmistamisega, kuna tuule suund on täisringsüsteem 0° -st kuni 360° -ni. Selle lahendamiseks on tuule suund muudetud lineaarseks süsteemiks ning põhjasuund 360° on võrduma pandud 0° -ga. Näiteks kui tuule suuna väärtused on 355° ja 10° (Joonis 4), siis keskmise saamiseks liidetakse need väärtused omavahel

$(355^\circ + 10^\circ = 365^\circ)$ ning tulemus muudetakse automaatselt 5° -ks ja võetakse sellest keskmine väärtus ehk $2,5^\circ$ (Vaisala 2013).



Joonis 4. Näide tuule suuna keskmistamisest. (Vaisala 2013)

WMT702 kasutab tuule suuna ja kiiruse keskmistamiseks kas skalaari või vektori keskmistamist. Kasutaja saab ise valida, kumba kasutada. Vektori keskmistamisel konverteerib sensor tuule suuna (WD) ja kiiruse (WS) ortogonaalseteks koordinaatideks, et saada tuule x- ja y-komponendid. Esimene ehk x-komponent on paralleelne N-S suunaga ning arvutamiseks kasutatakse valemit 2. Teine ehk y-komponent on paralleelne W-E suunaga ning arvutamisel kasutatakse valemit 3 (Vaisala 2013).

$$x = WS \times \cos(WD) \quad (2)$$

$$y = WS \times \sin(WD) \quad (3)$$

Vektori keskmistamisel liidetakse x- ja y-komponendid üle keskmistamise aja. Seejärel konverteerib sensor keskmise x-komponendi ja keskmise y-komponendi

polaarkoordinaatideks, mis tagastab keskmise tuule suuna kraadides (°) ja keskmise tuule kiiruse valitud ühikutes (m/s, kt, mph, km/h). Keskmistamise aega saab valida 0,25 sekundist 60 minutini (Vaisala 2013).

2.5 Tuuleandmete registreerimine

Riigi Ilmateenistuse automaatjaamad kasutavad Oracle'i andmebaasil põhineva ja Tšehhi Vabariigis arendatud andmetöötlussüsteemi CLIDATA, mis kogub automaatjaamadest saabuvald andmeid, samuti manuaalselt mõõdetud ja sisestatud andmeid (Tammets 2016). Automaatjaama tuuleandurid fikseerivad nii tuule suuna kui kiiruse 1-sekundilise intervalliga. Tuule suuna ja kiiruse hetkväärtused salvestatakse 10-sekundilise intervalliga. Tuuleandmete keskmised ja ekstreemsed väärtused arvutatakse vastavalt kasutaja poolt ette antud konfiguratsioonile. Riigi Ilmateenistusele kuuluv automaatjaam WMT702 on konfigureeritud selliselt, et tuuleandmete keskmised ja ekstreemumid arvutatakse 2 minuti, 10 minuti, 1 tunni ja 3 tunni jaoks. Automaatjaam WMT702 teostab vajalikud keskmistamised ja kvaliteedi kontrolli (Vaisala 2013). Töödeldud andmed saadetakse läbi GSM võrgu Riigi Ilmateenistuse andmekeskusesse iga tunni tagant ning neid säilitatakse CLIDATA andmebaasis (Žukova 2006).

Automaatjaam WXT520 on ühendatud andmelogeriga, mis kogub jaamast meteoandmeid ning teeb vajalikud keskmistamised ja andmete kontrolli. Kogutud ja töödeldud andmed saadetakse läbi GPRS modemi SMS-ina Tallinna Tehnikaülikooli meresüsteemide instituudi serverisse. Iga sõnum, mis on saadetud läbi GPRS-i, sisaldab saatja aadressi ehk modemi seerianumbrit, vastuvõtva modemi seerianumbrit, aega ja automaatjaamas mõõdetud meteoandmete parameetreid (Käärmann *et al.*). Andmed ilmuvad reaalajas instituudi veebilehele (on-line.msi.ttu.ee) viimase 5 minuti keskmisena (Joonis 5) ning registreeritakse ka 10, 15, 30, 1 või 3 tunni keskmised andmed (<http://on-line.msi.ttu.ee/vaindloo/#>).

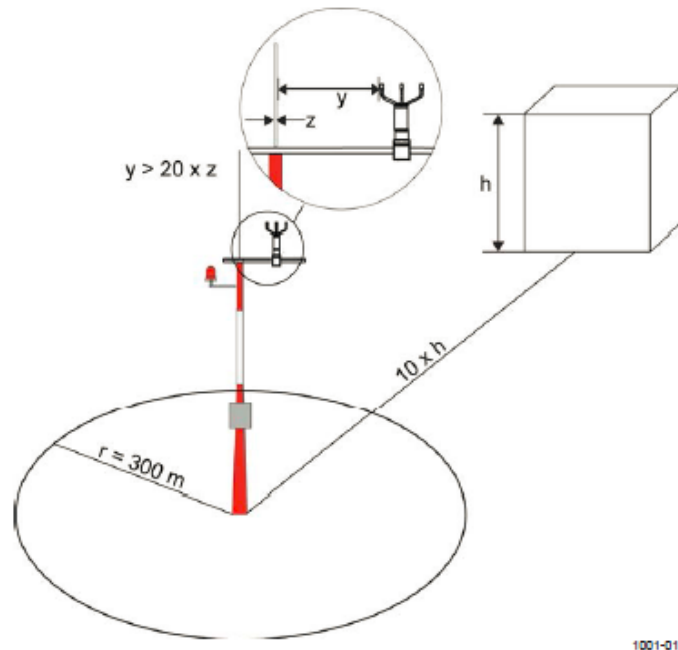
Time (local)	Latitude	Longitude	Wind direction [deg]	Wind speed [m/s]	Wind gust [m/s]	Air temp [°C]	Humidity [%]	Air pressure [mbar]	Rain accumulation [mm]	Rain duration [s]	Rain intensity [mm]
01.01.2016 00:00	59° 49.626'	26° 21.5984'	135	6.6	10.1	-4.9	77.9	1032.5	0.0	0.0	0.0
01.01.2016 00:05	59° 49.64'	26° 21.6025'	145	6.4	9.3	-5.1	77.6	1032.5	0.0	0.0	0.0
01.01.2016 00:10	59° 49.643'	26° 21.6001'	136	7.2	11.8	-4.8	80.0	1032.4	0.0	0.0	0.0
01.01.2016 00:15	59° 49.623'	26° 21.6006'	141	6.9	10.3	-4.9	79.6	1032.5	0.0	0.0	0.0
01.01.2016 00:20	59° 49.632'	26° 21.6028'	123	9.8	12.9	-5	79.1	1032.2	0.0	0.0	0.0
01.01.2016 00:25	59° 49.657'	26° 21.6034'	129	9.0	13.0	-5	78.7	1032.4	0.0	0.0	0.0
01.01.2016 00:30	59° 49.656'	26° 21.6063'	126	8.5	10.0	-5	80.7	1032.1	0.0	0.0	0.0
01.01.2016 00:35	59° 49.646'	26° 21.6039'	120	9.5	12.1	-4.9	82.2	1032.1	0.0	0.0	0.0
01.01.2016 00:40	59° 49.651'	26° 21.6066'	129	9.3	12.3	-5	80.7	1032.5	0.0	0.0	0.0
01.01.2016 00:45	59° 49.664'	26° 21.6056'	140	6.8	10.2	-5	81.1	1032.5	0.0	0.0	0.0
01.01.2016 00:50	59° 49.617'	26° 21.6044'	138	6.9	10.4	-5	82.6	1032.3	0.0	0.0	0.0
01.01.2016 00:55	59° 49.647'	26° 21.5992'	123	9.5	12.2	-5.1	82.0	1032.4	0.0	0.0	0.0
01.01.2016 01:00	59° 49.633'	26° 21.602'	133	8.6	12.7	-5.1	82.0	1032.6	0.0	0.0	0.0

Joonis 5. Reaalajas ilmuvad 5 minuti keskmised meteoandmed Vaindlool (<http://online.msi.ttu.ee/vaindloo/#>)

2.6 Automaatjaamade asukohad

Sobiliku automaatjaama asukohta valik on oluline, et saada ümbritsevatele oludele vastavaid usaldusväärseid andmeid. Automaatjaamad peavad olema paigutatud nii, et läheduses olevad objektid ei takistaks vaba õhu liikumist (Vaisala 2013). Tuuleandurid ei tohi olla paigutatud ehitiste või muude objektide kõrvale, mis võivad mõjutada õhuvoolu liikumist (Žukova 2006).

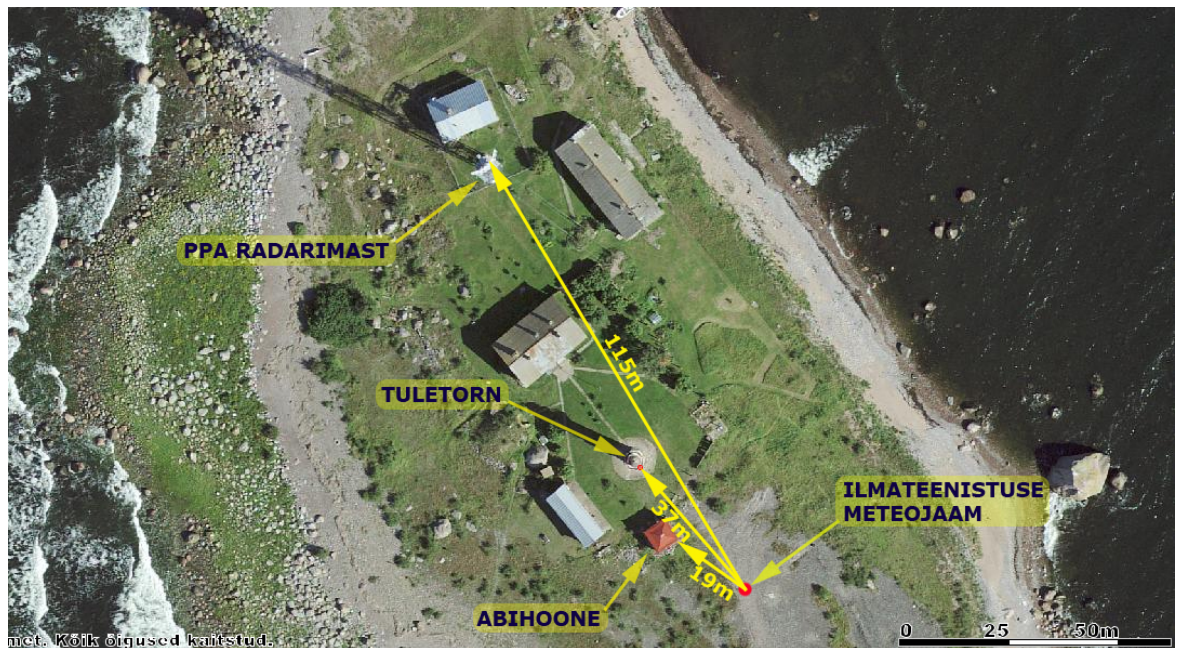
Automaatjaamade kasutusjuhendites (Vaisala 2012 ja Vaisala 2013) on kirjeldatud automaatjaamade kõige sobilikumat asukohta. Automaatjaamad võiksid olla paigutatud kõrgemale kui ükski teine objekt 300 meetri raadiuses. Üldiselt on nii, et objekt kõrgusega (h) ei mõjuta olulisel määral tuule mõõtmist, kui see objekt asub vähemalt 10-kordse kõrguse (10xh) kaugusel tuuleandurist. Ehk minimaalne vahemaa tuuleanduri ja takistava objekti vahel peab olema 10 korda suurem kui takistava objekti enda kõrgus. Kui automaatjaam paigutatakse risti mastiga, siis vahemaa automaatjaama ja masti vahel (y) peaks olema enam kui 20x vertikaalse masti läbimõõdust (z) (Joonis 6).



Joonis 6. Soovitatav masti paigaldamise joonis (Vaisala 2013)

Kuna Vaindloo saar on vaid ligi 600 meetri pikkune ja 200 meetri laiune, siis kahe meteoroloogiajaama paigutamine vastavalt automaatjaama juhenditele on küllaltki keeruline. Joonisel 7 on näha kahe automaatjaama asukoht üksteise suhtes Vaindloo saarel. Meresüsteemide instituudi automaatjaam WXT520 asub 50 meetri kõrguse Politsei- ja Piirivalveameti (PPA) radarimasti küljes 31,5 meetri kõrgusel. Automaatjaam on paigutatud risti radarimastiga ning asub mastist ligi 1 meetri kaugusel. Radarimast koos automaatjaamaga asub saare põhjapoolses osas.

Ilmateenistuse automaatjaam WMT702 asub saare lõunapoolses osas 10 meetri kõrguse masti otsas. Automaatjaam WMT702 asub Vaindloo tuletornist 37 meetri kaugusel. Tuletorn on ligi 7 meetrit kõrgem kui Ilmateenistuse meteojaam ning võib olla potentsiaalseks tuuletakistuseks loode suunast. 19 meetri kaugusel asuv abihoone on paari meetri kõrgune ega ole tuuletakistuseks.



Joonis 7. Automaatjaamade asukohad (koostaja: Kaimo Vahter)

2.7 Andmed

Analüüsi tarbeks on valitud nelja aasta pikkune periood vahemikus 01.01.2013 kuni 31.12.2016. 31,5 meetri tuuleandmed on saadud Tallinna Tehnikaülikooli meresüsteemide instituudi veebiportaalist, kuhu laekuvad reaajas Vaindloo tuule suuna ja kiiruse andmed. 10 meetri tuuleandmed saadi päringu kaudu Riigi Ilmateenistuselt.

Järgnevalt on kirjeldatud andmete analüüsi etappe, selleks et 10 ja 31,5 meetri tuuleandmed oleksid omavahel võrreldavad. Kogu analüüs on viidud läbi tabelitöötlusprogrammiga *MS Excel*.

Riigi Ilmateenistuse igatunnised 10 meetri tuuleandmed saabusid autorile keskmistatud kujul. Automaatjaam WMT702 kasutab tuule suuna ja kiiruse keskmistamiseks kas skalaari või vektori keskmistamist, vastavalt kasutaja poolt valitud konfiguratsioonile (v.t peatükk 2.4), kuid Riigi Ilmateenitusest ei osata vastata, kumba meetodit nemad kasutavad. Kuna magistritöö eesmärk on uurida 10

meetri ja 31,5 meetri tuule kiiruse vahekordi, siis on oluline, et mõlema kõrguse keskmistamise meetodid oleksid samasugused. Seetõttu jäeti saadud tunniandmete võrdlemine kõrvale.

Eeldusel, et 10 minuti andmete puhul pole keskmistamise viisil nii suurt tähtsust nagu tunniandmete puhul, telliti Riigi Ilmateenistusest uued andmed. Need kujutavad endast tuule kiiruse keskmist ja tuule valdavast suundast 10 minuti jooksul enne täistundi. Vastavalt töödeldi ka 31,5 meetri kõrgusel mõõdetud tuuleandmeid, võttes kaks viimast 5 minuti keskmist enne täistundi ja arvutades neist keskmise.

Põhjasuuna keskmistamise probleemi lahendamiseks on kasutatud peatükis 2.4 kirjeldatud meetodit. Andmetöötluse käigus on välja filtreeritud 31,5 meetri andmetest tuule suunad ja kiirused, mis on esitatud nullina. Need nullid tähistavad andmete puudumist. Mõõtmisi nii 10 meetri kõrgusel kui ka 31,5 meetri kõrgusel arvestati GMT järgi. Seega polnud järgmise etapi läbimisega – tuule suuna ja kiiruse korrastatud ja keskmistatud andmetest samaaegsete mõõtmiste paaride kokkupanek – mingeid probleeme. Et andmetöötlust kiirendada, on võetud 10 ja 31,5 meetri 10 minuti valdava tuule suuna ja keskmised kiiruse väärtused ning aritmeetilise keskmise kaudu arvutatud neist viimase täistunni keskmised kiirused ja valdavad suunad.

2.8 Kõrguse korrektsiooni arvutamine

Eri kõrgustel saadud mõõtmistulemused pole võrreldavad, sest tuule kiirus on üldiselt seda suurem, mida kõrgemal mõõtja asub. Seepärast tuleb võrdlemiseks kõik andmed taandada 10 meetri kõrgusele. Järgnevalt on kirjeldatud Suurbritannia Met Office poolt soovitatavaid kõrguse korrektsiooni valemeid:

$$V_h/V_{10} = 0.233 + 0.656 \log_{10}(h + 4.75); \quad (4)$$

kus V_h = tuule kiirus kõrgusel h;

V_{10} = tuule kiirus 10 meetri kõrgusel.

Valem 4 kujutab endast kõrguse korrektsiooni arvutamise valemit maismaa kohal (Observer's 2000). Sama valemit kasutatakse ka Eestis taandamaks erinevatel kõrgustel mõõdetud tuule kiirused 10 meetri kõrgusele (Keevallik 2017).

$$V_h/V_{10} = (h/10)^b ; \quad (5)$$

kus $b = 0,13$.

Valemit 5 kasutatakse kõrguse korrektsiooni arvutamiseks mere kohal. Valemis indeks b on rahvusvaheliselt kokkulepitud suurus (Observer's 2000). Mõlemaid valemeid on kasutatud tulemuste osas, võrdlemaks mõõdetud tuule kiiruse andmeid valemiga arvutatud tuule kiirusega Vaindlool. Valemitega arvutatud kõrguse korrektsioonid erinevatel kõrgustel on esitatud lisades (Lisa 5 ja Lisa 6).

3. TULEMUSED

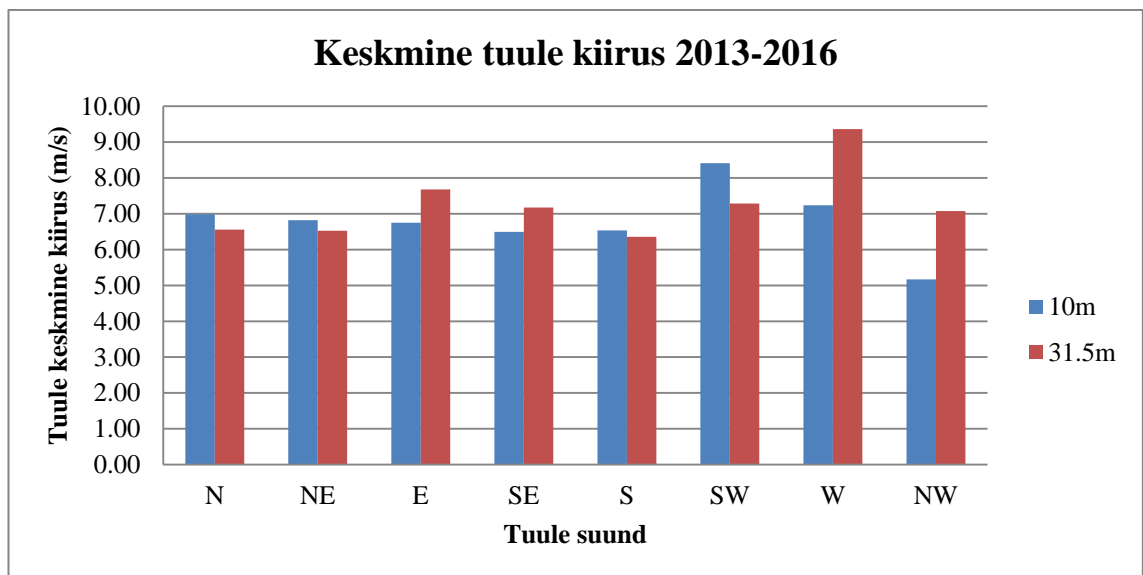
3.1 Tuule keskmise kiiruse võrdlus rumbides

Selleks, et uurida ülemiste (31,5 meetri) ja alumiste (10 meetri) tuulte vahet, on samaaegsete mõõtmiste paarid jaotatud ülemiste tuulte järgi rumbidesse. Jaotus on tehtud ülemise tuule kiiruste andmete järgi, et saada eeskiri, kuidas 31,5 meetri andmed taandada 10 meetri kõrgusele. 10 meetri igatunniseid mõõtmisi analüüsi perioodil oli kokku 34 127. Kordi, mil tuule suuna ja/või kiiruse andmed puudusid oli nelja aastase perioodi jooksul kokku 937. Igatunniseid mõõtmisi 31,5 meetril oli kokku 32 463. Kordi, mil tuule suuna ja/või kiiruse andmed puudusid oli kokku 2601. Samaaegsete mõõtmiste igatunniseid paare uuritava perioodil oli kokku 31 442. Käesolevas töös on kasutatud 8 rumbi süsteemi. Tabelis 2 on esitatud rumbide nimetused ja kraadivahemikud.

Tabel 2. Tuule suuna registreerimiseks kasutatavad rumbid ja kraadivahemikud (Наставление ... 1985)

Rumb	Kraadivahemik
N	338° - 22°
NE	23° - 67°
E	68° - 112°
SE	113° - 157°
S	158° - 202°
SW	203° - 247°
W	248° - 292°
NW	293° - 337°

Jaotatud tuulepaaride keskmist kiirust on 10 ja 31,5 meetri kõrgusel omavahel võrreldud igas rumbis. Oodatav tulemus oli, et keskmine tuule kiirus 31,5 meetri kõrgusel on suurem kui 10 meetri kõrgusel, kuna on üldteada, et tuule kiirus kasvab kõrgusega. Tulemused on esitatud joonisel 8, milles on näha, et suundadel E, SE, W ja NW on tuule keskmine kiirus 31,5 meetri kõrgusel tõepoolest suurem kui 10 meetri kõrgusel. Kuid suundade N, NE, S, SW puhul on olukord vastupidine, keskmine tuule kiirus perioodil 2013-2016 on 10 meetri kõrgusel suurem kui 31,5 meetri kõrgusel.



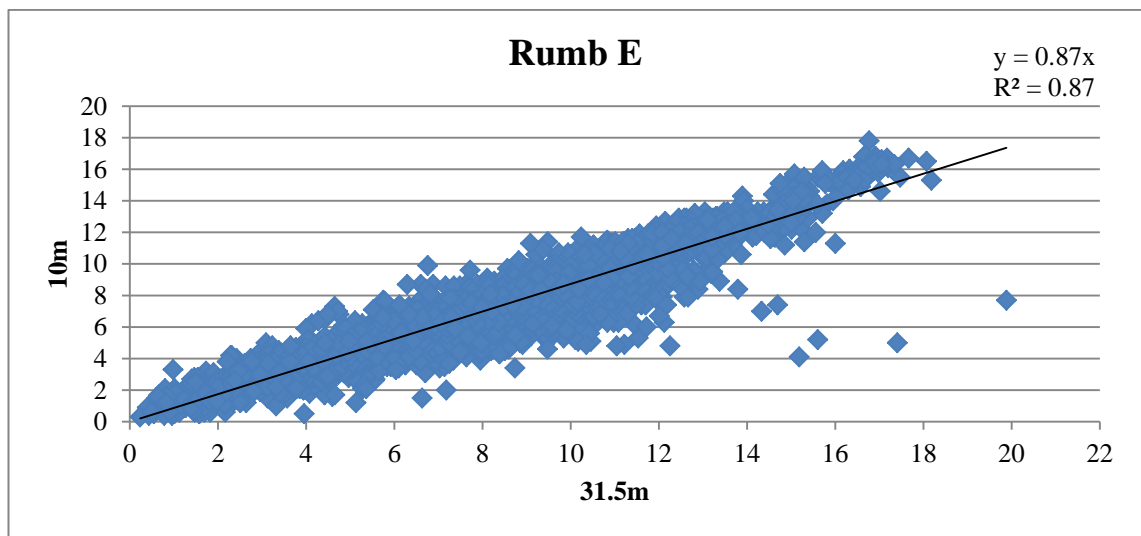
Joonis 8. Keskmine tuule kiiruse võrdlus rumbide järgi

Suunal N on tuule keskmine kiirus 10 meetri kõrgusel 0,43 m/s ,suunal NE 0,3 m/s suurem, suunal S 0,18 m/s suurem ning suunal SW 1,13 m/s suurem kui 31,5 meetri kõrgusel. Selgus, et automaatjaama WXT520 kõrgusele radarimasti külge on peale automaatjaama paigutatust ilmunud objekt, mis pidurdab tuule kiirust. Jooniselt 8 on näha, et rumbi SW puhul on tuule keskmise kiiruse erinevus alumiste ja ülemiste tuulte vahel suurim, siis ilmselt on otseselt takistatud just SW tuuled. Kuid tõenäoliselt ei ole takistus täpselt SW suunas, kuna takistatud on veidi ka S tuuled. Ka S ja SW-le otse vastassuunas puhuvad tuuled (rumbid N ja NE) on kergelt

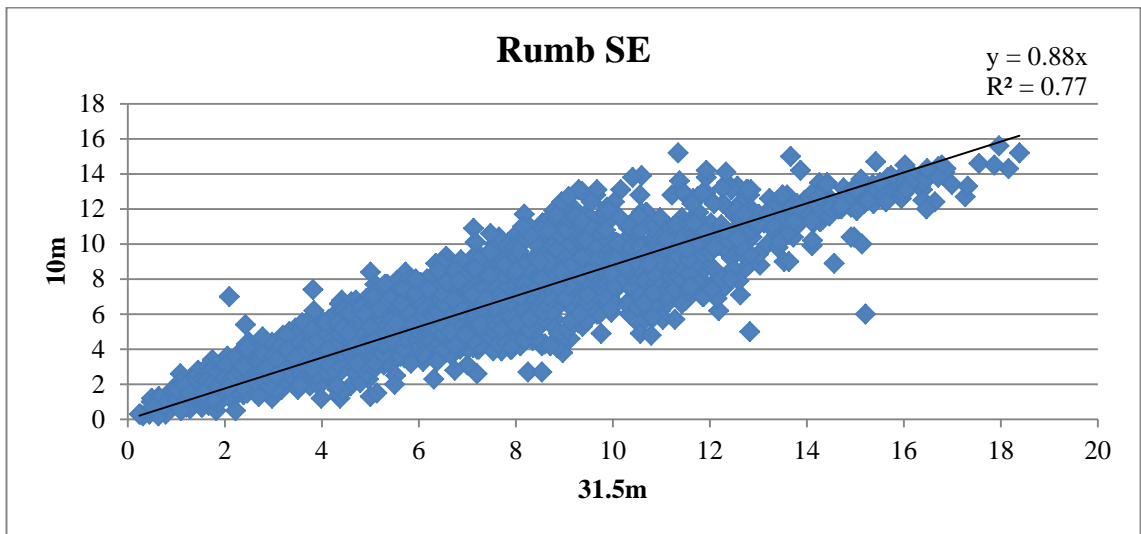
takistatud, kuna takistus nende rumbide puhul jääb otse ette. Järgneval 10 m ja 31,5 m tuule suuna ja kiiruse vahel on need suunad välja jäetud, sest andmed on ebausaldusväärsed ning edasine analüüs on tehtud vaid rumbidele E, SE, W ja NW.

3.2 Korreleeruvus 10 ja 31,5 meetri tuulte vahel

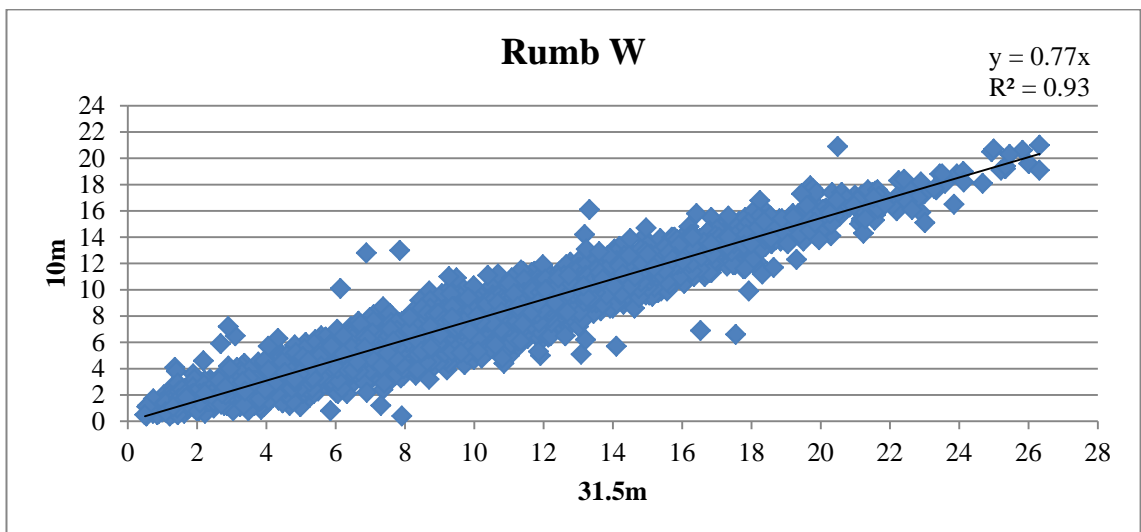
Uurimaks tuule kiiruse korreleeruvust ülemiste ja alumiste tuulte vahel, on koostatud hajuvusdiagrammid suundadele E, SE, W ja NW. Hajuvusdiagrammidele on lisatud lineaarne regressioonisirge, regressioonisirge võrrand $y=ax$ ning lineaarne korrelatsioonikordaja R^2 . Järgnevatel joonistel (Joonised 9-12) on esitatud iga uuritava rumbi hajuvusdiagrammid.



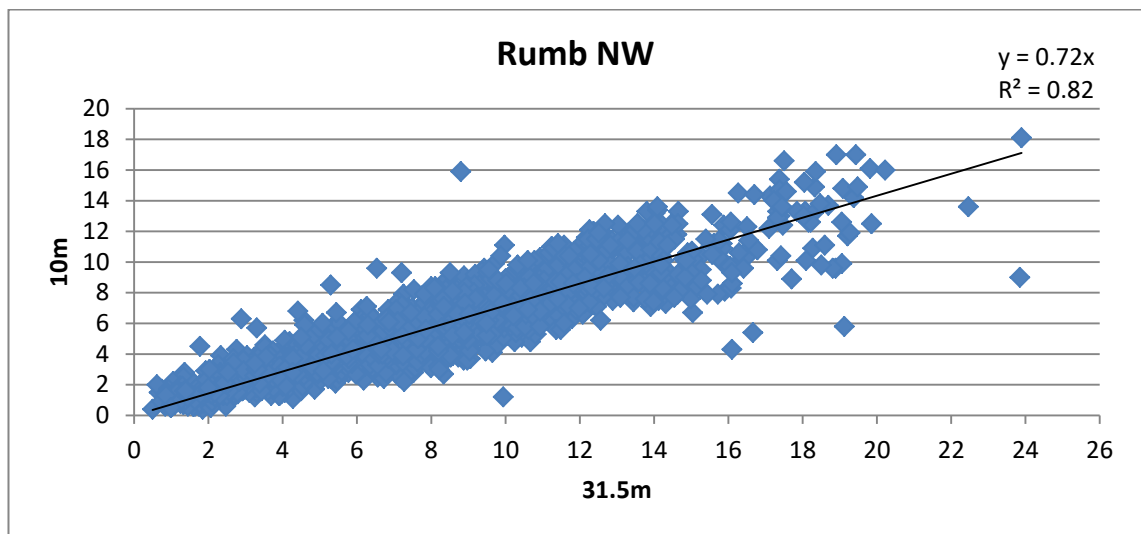
Joonis 9. Rumbi E hajuvusdiagramm



Joonis 10. Rumbi SE hajuvusdiagramm



Joonis 11. Rumbi W hajuvusdiagramm



Joonis 12. Rumbi NW hajuvusdiagramm

Kõikide rumbide korrelatsioonikoefitsientide (R^2) võrdluses selgub, et paremini korreleeruvad rumbide W ja E ülemised ja alumised tuuled. Rumbi W korrelatsioonikoefitsient on võrreldes teiste rumbidega kõige parem, selle väärtus on 0,93. Kõige halvemini korreleeruvad rumbi SE tuuled, korrelatsioonikoefitsiendi väärtus on 0,77. Rumbide E ja NW puhul on korrelatsioonikoefitsient vastavalt 0,87 ja 0,82.

Tabelis 3 on esitatud uuritavate rumbide tuule keskmised kiirused üleval ja all ning mõõtmiste arv 4 aastase perioodi jooksul. Rumbide W ja E puhul on tegemist piki Soome lahte puhuvate tuultega ning tuule keskmine kiirus nii üleval kui ka all on nende rumbide puhul suurem kui rumbide SE ja NW puhul. Rumbi W puhul on tuule keskmine kiirus mõlemal kõrgusel suurim ning ka mõõtmiste arv on suurim. Suurem mõõtmiste arv ning tugevam keskmine kiirus piki Soome lahte puhuvate tuulte puhul annavad kokku stabiilsema statistika.

Tabel 3. Tuule keskmine kiirus (2013-2016) 10 ja 31,5 meetri kõrgusel 4 rumbis, meetrites sekundis ning mõõtmiste arv igas rumbis

	31,5m	10m	Mõõtmiste arv
Rumb E	7.7	6.7	3332
Rumb SE	7.2	6.5	2632
Rumb W	9.4	7.2	6135
Rumb NW	7.1	5.2	2272

3.3 Kõrguse korrektsioon

Selleks, et saada eeskiri, kuidas 31,5 meetri tuule kiirus taandada 10 meetri kõrgusele, on kasutatud regressioonisirge võrrandit $y=ax+b$. Vabaliige b ehk *intercept* on valitud nulliks. See tähendab, et sirge tõus algab nullist, sest on loogiline eeldada kui tuule kiirus üleval on null, siis ei saa see allpool olla suurem. Võrrandis tähistab y tuule kiirust 10 meetri kõrgusel ja x tuule kiirust 31,5 meetri kõrgusel ning a on kõrguse korrektsiooni koefitsient, millega tuleb läbi korrutada kiirus kõrgusel 31,5 meetrit, et saada kiirus 10 meetri kõrgusel. Kõrguse korrektsiooni koefitsiendid on iga rumbi jaoks arvutatud eraldi ning tähistavad iga rumbi keskmist (Tabel 4).

Rumbide E ja SE kõrguse korrektsiooni koefitsient a väärtus on suurem kui rumbide W ja NW puhul. See tähendab, et rumbide E ja SE puhul on tuule kiiruse erinevus üleval ja all väiksem kui rumbide W ja NW puhul. Rumbi NW puhul on koefitsiendi väärtus aga kõige väiksem ehk tuule kiiruse erinevus üleval ja all võrreldes teiste uuritavate rumbidega on suurim.

Tabel 4. Kõrguse korrektisioon a igas uuritavas rumbis

	Kõrguse korrektisioon a
Rumb E	0.87
Rumb SE	0.88
Rumb W	0.77
Rumb NW	0.72

Kuna igale tuulepaarile vastab kindel kuupäev, siis on arvutatud kõrguse korrektisiooni koefitsiendi väärtus ka aastaegade kaupa ning tulemused on esitatud tabelis 5. Tabelis tähistab talvekuid DJV (detsember, jaanuar, veebruar), kevadkuid MAM (märts, aprill, mai), suvekuid JJA (juuni, juuli, august) ja sügiskuid SON (september, oktoober, november).

Tabel 5. Kõrguse korrektisiooni koefitsient a väärtused aastaegade kaupa

	Rumb E	Rumb SE	Rumb W	Rumb NW
DJV	0.93	0.94	0.78	0.73
MAM	0.81	0.78	0.72	0.67
JJA	0.83	0.83	0.79	0.72
SON	0.94	0.91	0.80	0.72

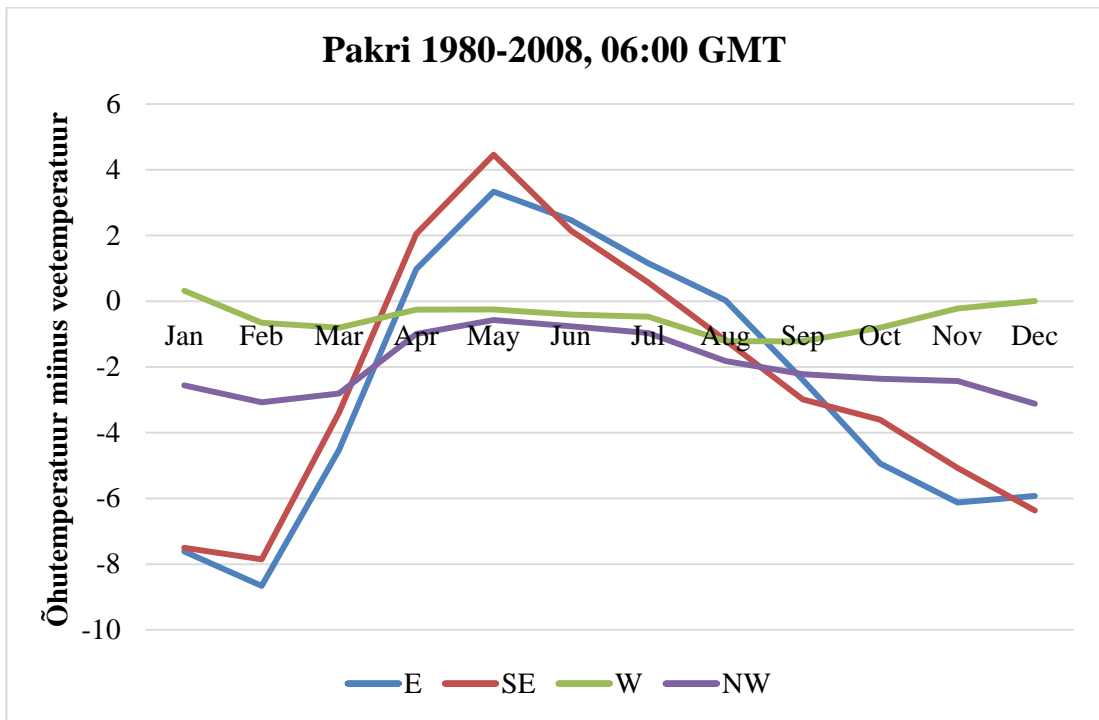
Rumbide E ja SE puhul eristuvad suured koefitsiendi väärtused talvel ja sügisel ning väiksemad koefitsiendi väärtused kevadel ja suvel. See tähendab, et nende rumbide puhul on talvel ja sügisel tuule kiiruste erinevus 10 meetri ja 31,5 meetri vahel väga väike. Kevadel ja suvel on kiiruste erinevus aga suurem, eriti just kevadkuudel.

Rumbi E suurim koefitsiendi väärtus esines oktoobris (0,96) ja vähim juunis (0,76). Rumbi SE suurim väärtus detsembris (1,00) ja vähim mais (0,69).

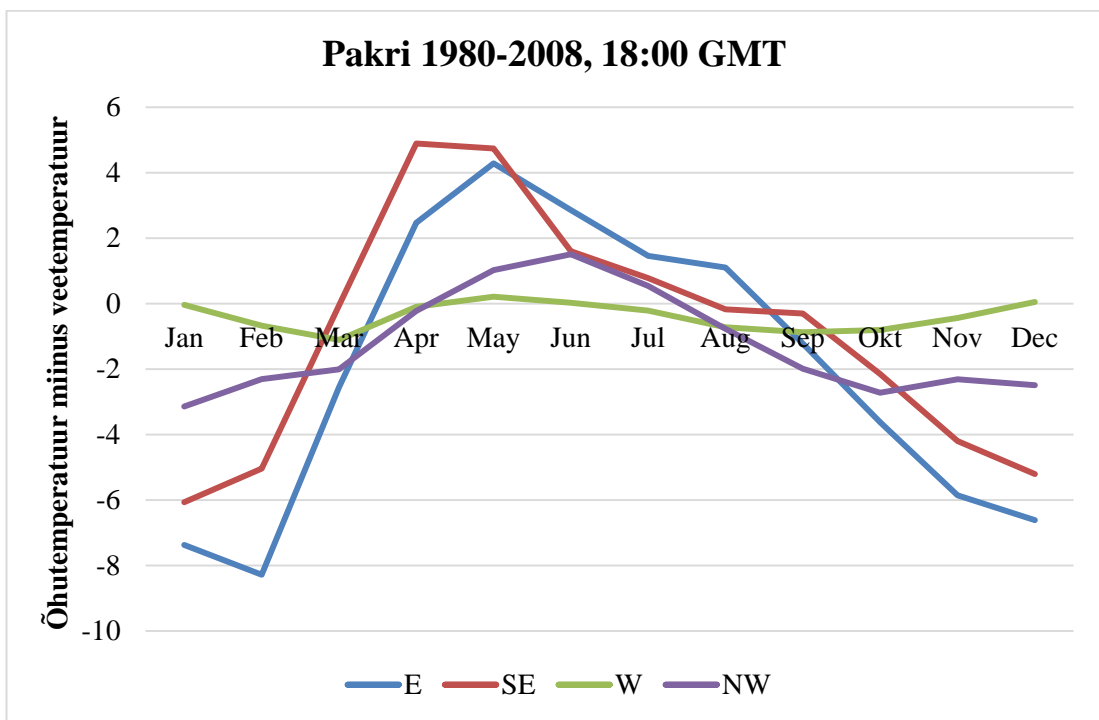
Rumbide W ja NW puhul on kõrguse korrektsiooni koefitsientide väärtused aga kõikidel aastaegadel suhteliselt väikesed, kõige väiksemad just kevadkuudel. Rumbi W suurim kõrguse korrektsiooni koefitsiendi väärtus esines augustis ja septembris (0,81) ning vähim mais (0,70). Rumbi NW koefitsientide väärtused võrreldes teiste rumbidega olid kõige väiksemad, kõrgeim väärtus esines novembris ja jaanuaris (0,76) ning madalaim aprillis (0,64). Kõikide aastaegade hajuvusdiagrammid rumbide kaupa on esitatud lisades (Lisa 1-4).

3.4 Kõrguse korrektsiooni koefitsiendi seos atmosfääri stratifikatsiooniga

Kuna eelmises peatükis saadud kõrguse korrektsiooni koefitsientide väärtused erinesid nii rumbide kui ka aastaegade kaupa, siis järgnevalt on seostatud neid koefitsiendi väärtusi atmosfääri stratifikatsiooniga. On teada, et õhu- ja veetemperatuuri erinevused ja atmosfääri stabiilsus on tihedalt omavahel seotud. Kuid Vaindloo saarel ei mõõdeta veetemperatuuri ning õhutemperatuuri mõõdetakse vaid 31,5 meetri kõrgusel. Atmosfääri stratifikatsiooniga seoste loomiseks on seetõttu võetud Vaindloo saarele lähim jaam, mis mõõdab nii vee- kui ka õhutemperatuuri, Pakri jaam. Kasutatud on Pakri õhu- ja veetemperatuuri ning tuule andmeid aastast 1980-2008. Andmed on saadud päringu kaudu Keskkonnaagentuurist. Pakri andmete puhul on tuuled jaotatud rumbidesse 10 meetri kõrgusel mõõdetud tuulte järgi. Veetemperatuuri on mõõdetud 30 cm sügavusel. Õhu- ja veetemperatuuri erinevused igas kuus ja igas uuritavas rumbis on kujutatud joonisel 13 hommikusel ajal (06:00 GMT) ja joonisel 14 õhtusel ajal (18:00 GMT).



Joonis 13. Temperatuuri erinevused Pakri jaamas igas uuritavas rumbis (06:00 GMT)



Joonis 14. Temperatuuri erinevused Pakri jaamas igas uuritavas rumbis (18:00 GMT)

Joonistelt on näha, et õhu- ja veetemperatuuri erinevus sõltub lisaks aastaajale ka tuule suunast ja kellaajast. Temperatuuride erinevused on nii hommikul kui ka õhtusel ajal suured rumbide E ja SE puhul. Rumbi E puhul on õhutemperatuur kõrgem kui veetemperatuur aprillist augustini. Septembrist märtsini on aga veetemperatuur kõrgem. Rumbi SE puhul on õhutemperatuur kõrgem kui veetemperatuur aprillist juulini ning augustist märtsini on õhutemperatuur madalam kui veetemperatuur. Kuna E ja SE tuuled puhuvad mandri poolt ja toovad kevadel ja suvel sooja õhu jahedama mere kohale, siis on atmosfääri vertikaalne segunemine takistunud ning tegemist on stabiilse stratifikatsiooniga. Sügisel ja talvel on aga olukord vastupidine, külm õhk liigub soojema mere kohale, atmosfääri vertikaalne segunemine on soodustatud ning tegemist on ebastabiilse stratifikatsiooniga.

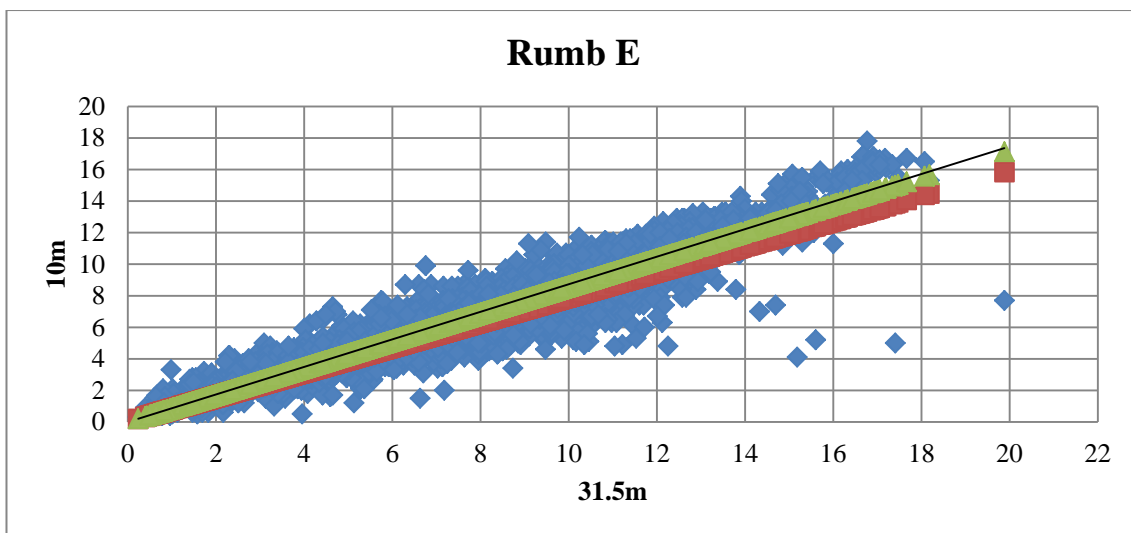
Rumbi W puhul on vesi ja õhk aastaringselt praktiliselt sama temperatuuriga. Et adiabaatilises staatilises atmosfääris on temperatuur 30 m kõrgusel vaid 0,3 kraadi madalam kui aluspinnal, siis võib rumbi W puhul lugeda atmosfääri neutraalseks.

Rumbi NW puhul on talvel ja sügisel õhk paar kraadi külmem kui vesi, järelkult on stratifikatsioon pigem nõrgalt ebastabiilne kui neutraalne. Suvel on vesi ja õhk hommikuti samal temperatuuril ja stratifikatsioon neutraalne, aga õhtuks tõuseb õhutemperatuur kõrgemale ja stratifikatsioon on nõrgalt stabiilne.

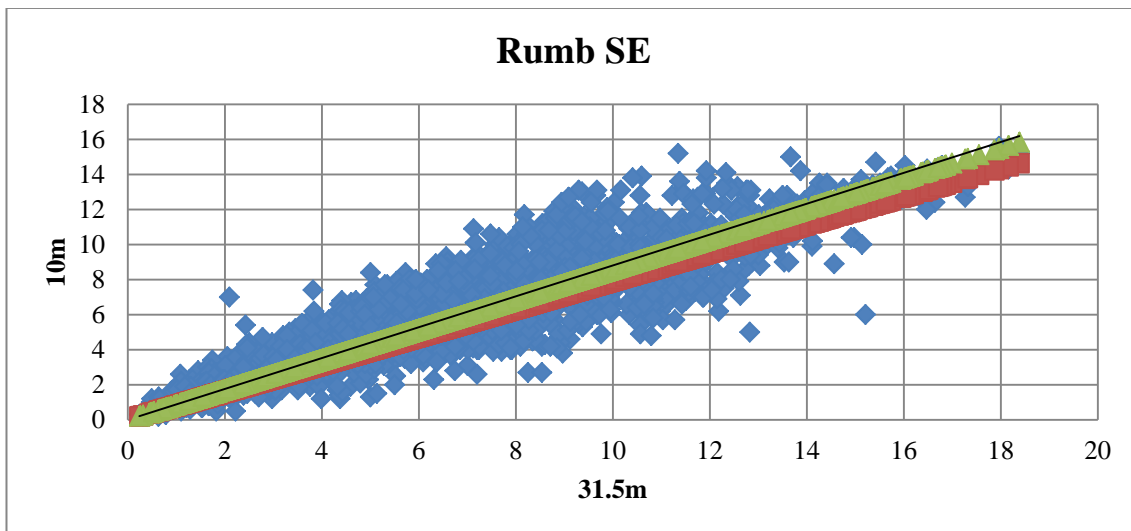
3.5 Võrdlus kõrguse korrektsiooni valemitega

On teada, et kõrguse korrektsiooni arvutamiseks on olemas mitmeid valemeid. Järgnevalt on uuritud, kui täpselt korreleeruvad valemitega arvutatud tuule andmed päris andmetega. Selleks on võetud kaks kõrguse korrektsiooni arvutamise valemit, mis pärinevad UK Met Office'lt (valemid 4 ja 5, ptk 2.8). Valem 4 on kõrguse korrektsiooni arvutamise valem maismaa kohal ja valem 5 mere kohal. Mõlema valemiga on arvutatud 31,5 meetri Vaindloo tuule kiiruse andmetest tuule kiirus 10 meetri kõrgusel ning koostatud hajuvusdiagrammid (Joonised 15-18) iga uuritava

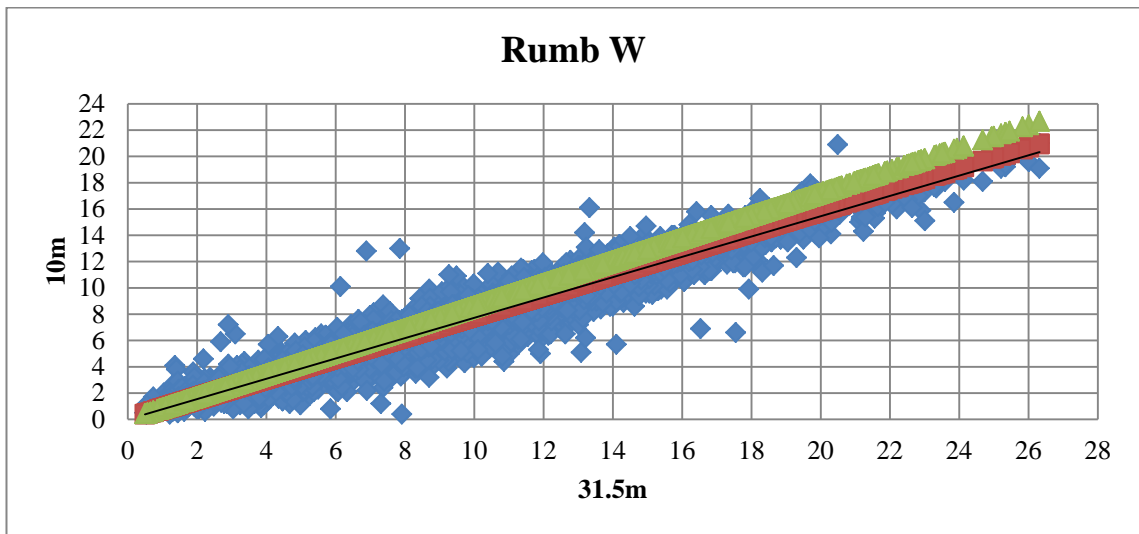
rumbi jaoks. Joonistel tähistab punane valemiga 4 ning roheline valemiga 5 arvutatud tuule kiirust 10 meetri kõrgusel. Valemitega arvutatud tuule kiirust on võrreldud hajuvusdiagrammidel Vaandloo tuule kiiruse mõõtmisandmetega (tähistatud joonistel sinisega, must joon tähistab mõõtmisandmete regressioonisirget).



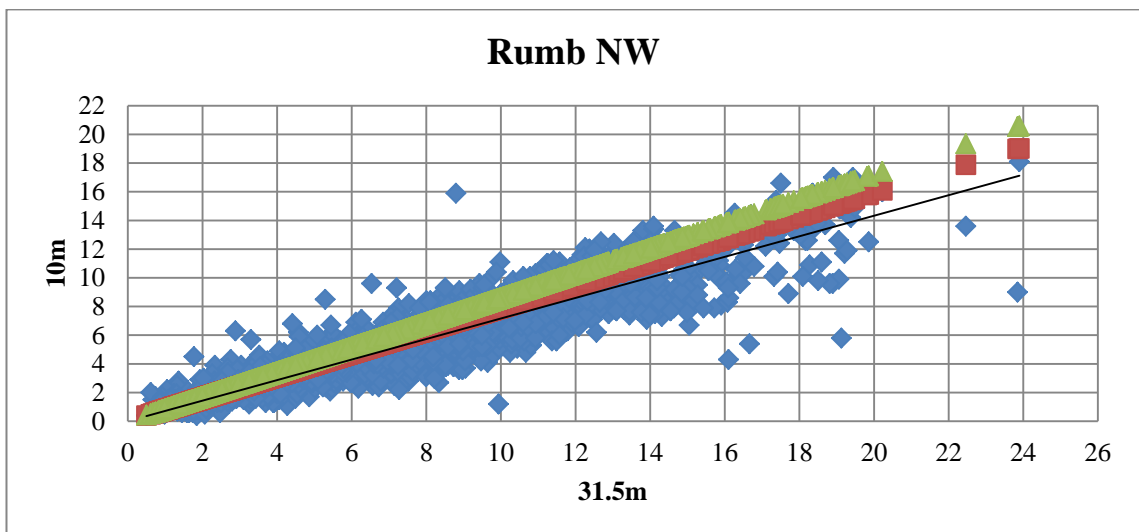
Joonis 15. Rumbi E valemitega arvutatud andmete ja mõõtmisandmete korreleeruvus



Joonis 16. Rumbi SE valemitega arvutatud andmete ja mõõtmisandmete korreleeruvus



Joonis 17. Rumbi W valemitega arvatud andmete ja mõõtmisandmete korreleeruvus



Joonis 18. Rumbi NW valemitega arvatud andmete ja mõõtmisandmete korreleeruvus

Joonistelt on näha, et üldiselt korreleeruvad valemiga arvatud 10 meetri tuule kiiruse väärtused hästi mõõtmisandmetega. Rumbide E, SE ja W puhul langeb mõõtmisandmete regressioonisirge üsna täpselt kokku valemitega. Rumbi NW puhul on hajuvus mõõtmisandmete ja arvatud andmete vahel suurim. Rumbide E ja SE puhul on korreleeruvus parim valemiga 5 (mere kohal) arvatud andmetega. Nende kahe rumbi puhul mõlemad valemid veidi alahindavad tuule kiirust 10 meetril

võrrelduna mõõdetud tuule kiirusega 10 meetri kõrgusel. Rumbi W ja NW puhul on aga korreleeruvus parim valemiga 4 (maismaa kohal) arvutatud andmetega ning üldiselt mõlemad valemid veidi ülehindavad tuule kiirust 10 meetri kõrgusel võrrelduna mõõdetud tuule kiirusega. Tabelis 6 on esitatud mõõtmisandmete keskmised tuule kiirused 10 meetri kõrgusel ning valemitega arvutatud tuule keskmised kiirused 10 meetri kõrgusel.

Tabel 6. Tuule keskmised kiirused (m/s)

	Rumb E	Rumb SE	Rumb W	Rumb NW
Mõõtmisandmete keskmine tuule kiirus 10 meetri kõrgusel	6.8	6.5	7.2	5.2
Valemiga 4 arvutatud keskmine tuule kiirus 10 meetri kõrgusel	6.1	5.7	7.5	5.6
Valemiga 5 arvutatud keskmine tuule kiirus 10 meetri kõrgusel	6.6	6.2	8.1	6.1

4. ARUTELU

Magistritöö tulemustes saadi 10 meetri ja 31,5 meetri kõrgusel mõõdetud tuule parameetrite vahekorra uurimisel eeskiri, mille abil taandada 31,5 meetri tuule kiirus 10 meetri kõrgusele. Eeskiri kujutab endast kõrguse korrektsiooni koefitsiente, mis on saadud eraldi rumbide E, SE, W ja NW jaoks ja lisaks veel ka aastaegade kaupa. Kuna kõrguse korrektsiooni väärtused erinesid aastaegade kaupa, siis sai seostada iga koefitsiendi väärtust atmosfääri stratifikatsiooniga.

Varasemalt on arvatud kõrguse korrektsioonid Läänemere põhjaosa erinevate punktide kohta atmosfääri erinevate stratifikatsioonide korral (Launiainen ja Laurila, 1984). Lisas 7 on esitatud Launiainen ja Laurila poolt arvatud kõrguse korrektsiooni väärtused kõikides uuritud punktides. Tabelis 7 on sellest uuringust välja selekteeritud kaks punkti, kus tuule suuna ja kiiruse mõõtmine toimus kõrgusel, mis on sarnane käesolevas töös Vaindloo saare 31,5 meetri kõrgusega. Nendeks kohtadeks on Kalbådagrund, kus mõõdetakse tuult 32 meetri kõrgusel, ja Bogskär, kus toimub mõõtmine 31 meetri kõrgusel. Nende kahe punkti kõrguse korrektsioone erineva atmosfääri stratifikatsiooni korral on võrreldud käesolevas töös saadud kõrguse korrektsiooni väärtustega. Neutraalse stratifikatsiooni korral on Launiainen ja Laurila saanud korrektsioonid vastavalt tuule logaritmilisele profiilile. Ebastabiilne tähistab olukorda, mil õhutemperatuur on 3°C jahedam kui veepinna temperatuur. Stabiilne tähistab olukorda, mil õhutemperatuur on 3°C soojem kui veepinna temperatuur (Launiainen, Laurila 1984).

Tabel 7. Kõrguse korrektsioonid (Launiainen, Laurila 1984)

		Neutraalne	Ebastabiilne	Stabiilne
	z/m	u_{10}/u_z	u_{10}/u_z	u_{10}/u_z
Kalbådagrund	32	0.91	0.94	0.71
Bogskär	31	0.91	0.94	0.72

Launiainen ja Laurila (1984) töös selgus, et 31-32 meetri andmete taandamiseks 10 meetri kõrgusele peaks Läänemere põhjaosas kasutama neutraalse stratifikatsiooni korral kõrguse korrektsiooni väärtust 0,91, ebastabiilse stratifikatsiooni korral 0,94 ja stabiilse stratifikatsiooni korral 0,71 (0,72 Bogskäri näitel). Magistritöö tulemustest selgus, et rumbide E ja SE puhul oli talvel ja sügisel tegemist tugevalt ebastabiilse stratifikatsiooniga ning kõrguse korrektsioonid jäid vahemikku 0,91-0,94. Saadud kõrguse korrektsioonid ühilduvad väga hästi Launiainen ja Laurila poolt saadud väärtustega. Kevadel ja suvel oli Vaindlool tegemist stabiilse stratifikatsiooniga ning kõrguse korrektsiooni koefitsientide väärtused jäid vahemikku 0,78-0,83, mis on mõnevõrra suuremad kui tabelis 7. Seda saab seletada asjaoluga, et stabiilsuse määramine on käesolevas töös ja Launiainen ja Laurila töös erinev. Nimelt ulatub õhu- ja veetemperatuuri vahe Pakril suvel üle 3 kraadi vaid aprillis ja mais, mistõttu atmosfäär teistel soojadel aastaaja kuudel klassifitseerub Launiainen ja Laurila järgi neutraalseks.

Rumbide W ja NW puhul võib atmosfääri Launiainen ja Laurila järgi klassifitseerida neutraalseks aastaringselt kuid oodatavad kõrguse korrektsiooni väärtused peaksid olema sel juhul 0,91 ringis. Käesolevas uurimuses jäävad nad aga rumbi W puhul vahemikku 0,72-0,80 ning rumbi NW puhul vahemikku 0,67-0,73. Need koefitsiendid vastavad pigem stabiilsele stratifikatsioonile, kuid töö tulemustest selgus, et rumb W vastab aastaringselt neutraalsele stratifikatsioonile. Rumb NW vastab talvel ja sügisel nõrgalt ebastabiilsele, kevadel ja suvel neutraalsele/nõrgalt

stabiilsele stratifikatsioonile (hommikul/õhtul). Põhjuseks ikka jälle erinevus stratifikatsiooni hindamisel.

Ka UK Met Office'i käsiraamat (2000) annab kõrguse korrektsiooni väärtused taandamiseks 30 meetri tuuled 10 meetri kõrgusele nii maismaa kui ka mere kohal. Maismaa kohal on kõrguse korrektsiooni koefitsiendi väärtus 0,81 (Lisa 5) ja mere kohal 0,87 (Lisa 6). Magistritöö tulemustest selgus, et rumbid E ja SE korreleerusid paremini kõrguse korrektsiooni arvutamise valemiga mere kohal ning nende rumbide puhul on keskmised kõrguse korrektsiooni koefitsiendi väärtused vastavalt 0,87 ja 0,88. Järelikult Met Office'i kõrguse korrektsiooni koefitsient ja magistritöö käigus saadud koefitsiendid ühilduvad rumbide E ja SE puhul väga hästi.

Rumbid W ja NW korreleeruvad aga paremini maismaa valemiga ning nende rumbide puhul on keskmised kõrguse korrektsiooni koefitsiendi vastavalt 0,77 ja 0,72. Järelikult rumbi W puhul Met Office'i kõrguse korrektsiooni koefitsient ja magistritöö käigus saadud koefitsient ühilduvad taaskord hästi. Rumbi NW puhul on koefitsiendi väärtus aga veidi madalam, kuid töö tulemustest selgus ka see, et rumbi NW puhul on korreleeruvus valemiga kõige halvem.

KOKKUVÕTE

Antud magistritöö eesmärgiks oli uurida erinevatel kõrgustel mõõdetud tuule parameetrite vahetada Vaindloo saare näitel. Selle käigus saadi eeskiri taandamiseks kõrgemal ehk 31,5 meetri kõrgusel mõõdetud tuule kiirused 10 meetri kõrgusele.

Töö käigus aga ilmnisid mitmed asjaolud, mille põhjal saab järeldada, et meteoroloogilised andmed ei pruugi sageli olla usaldusväärsed. Seda saab väita antud magistritöö puhul kahel põhjusel. Esiteks, Riigi Ilmateenistusest ei osata vastata, kuidas automaatjaam WMT702 keskmistab tuule suuna ja kiiruse andmeid. Teiseks selgus magistritöö andmete töötlemise käigus, et automaatjaama WXT520 kõrgusele radarimasti külge on paigutatud suurem objekt, mis on tuule kiiruse otseseks pidurdajaks ning muutes tuule kiiruse andmed ebausaldusväärseks. Tulenevalt sellest, annab magistritöö autor soovitus paigaldada 31,5 meetri kõrgusel olev automaatjaam ümber. Hoolimata nendest tagasilöökidest oli võimalik saada eeskiri, kuidas taandada 31,5 meetri kõrgusel mõõdetud tuule kiiruse andmed 10 meetri kõrgusele, kuid seda ainult rumbide E, SE, W ja NW puhul.

Võrdluses varasemalt saadud uuringutega Läänemere põhjaosa kohta selgus, et magistritöö käigus saadud kõrguse korrektsiooni koefitsiendid on üsna sarnased nende koefitsientidega juhul, kui atmosfääri stratifikatsiooni hinnatakse mõlema töö puhul ühtmoodi. Võrdlus UK Met Office'i eeskirjadega tuule kiiruse taandamiseks ühelt kõrguselt teisele andis idee, et E ja SE tuultele sobib paremini mere kohal ning W ja NW tuultele maa kohal kasutatav kõrguse korrektsiooni valem.

Magistritöö käigus saadud eeskirja eelis seisneb selles, et kõrguse korrektsiooni koefitsiendid on saadud eri ilmakaarest puhuvatele tuultele ja aastaegade kaupa.

SUMMARY

The aim of this study is to examine wind parameters measured at different heights on the example of Vaindloo Island. As a result, a regulation how to reduce wind speed at the altitude of 31, 5 meters to the altitude of 10 meters, was created.

During the analysis of current master's thesis, several factors revealed that meteorological data are often not reliable. This can be claimed for two reasons. Firstly, the Estonian National Weather Service do not know, how the automatic weather transmitter WMT702 averages the wind speed and direction data. Secondly, processing of the data revealed that a bigger object at the altitude of automatic weather transmitter WXT520 is slowing down the wind speed in certain directions making the wind speed data unreliable. Due to this fact, the author gives a recommendation to relocate automatic weather transmitter WXT520. Despite these drawbacks, a regulation, which represent height corrections, was created but only for the rhumbs E, SE, W and NW. Height corrections for different seasons were obtained as well.

Comparing height corrections with the earlier study, the values matches very well in case the E and SE winds in winter when the atmosphere is unstable. Differences in the other cases were evidently caused by differences in the estimation of atmospheric stratification. Comparison with the UK Met Office formula for deriving wind speed at one level to that on the other level led to the idea that for E and SE winds the formula for the sea and for the W and NW winds the formula for the lane is suitable.

The advantage of the present work is that the height correction values are obtained for different wind directions and different seasons.

KASUTATUD ALLIKAD

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, часть 1. Ленинград, Гидрометеиздат, 1985

BACC 2008. *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Berlin, Heidelberg: Springer

Holton, J.R. 2004. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Elsevier Academic Press.

Juust, E. 2016. Summaarse kiirguse hindmaine satelliitidelt Eesti alade jaoks. Magistritöö. Meresüsteemide Instituut, Tallinna Tehnikaülikool.

Jürissaar, M. 2011. *Meteoroloogia*. Tartu: Eesti Lennumeteoroloogia.

Kallis, A., Loodla, K., Tillmann, E., Krabbi, M., Pärj, R., Vint, K., Jõeveer, A., Juust, E. 2015. *Eesti meteoroloogia aastaraamat 2014* (online). Tallinn: Keskkonnaagentuur. http://www.ilmateenistus.ee/wp-content/uploads/2016/02/aastaraamat_2014.pdf (21.03.2017)

Keevallik, S. 2008. Meretuulte neli tunnust. *Tallinna Tehnikaülikooli Aastaraamat 2007*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 79-83.

Keevallik, S. 2011. Tuulevälja muutumine Läänemere kirdeosas viimase poolsajandi jooksul. Tarmo Soomere, Tiina Nõges (Toim.). Teadusmõte Eestis (VII). Meri. Järved. Rannik (49–58). Eesti Teaduste Akadeemia.

Keevallik, S. 2013. Annual variation of air-water temperature difference at three Estonian coastal stations. *Estonian Journal of Engineering*, 19,4,329-335.

- Keevallik, S., Soomere, T., Pärj, R., Žukova, V. 2007. Outlook for wind measurement at Estonian automatic weather stations. *Estonian Academi of Sciences*, 13, 234-251.
- Keskpaik, A., Pank, M., Salong, H. 2009. *Eesti väikesaared*. Koolibri. Tallinn
- Kull, A. 2005. Tuuled ja tuuleenergeetika võimalused Eestis. *Universum valguses ja vihmas*. Vesimann, U, Veskimäe, R (toim.). Tallinn. OÜ REVES GRUPP, 217-228.
- Kõuts, T. 2017. Suuline allikas. Tallinn, 16.02.2017.
- Käärmann, L. Usk, A. Lepp, A. Pikpoom, T. 2013. Development of technologies for hydro-meteorological and forecast models data acquisition. *EfficienSea: Efficient, Safe and Sustainable Traffic at Sea*.
- Launiainen, J. ja Laurila, T. 1984. Marine wind characteristics at Finnish automatic marine weather stations in the northern Baltic Sea. *Finnish Marine Research*, 250, 52-86.
- Launiainen, J., Saarinen, J. 1982. Examples of comparison of wind and air-sea interaction characteristics on the open sea and in the coastal area of the Gulf of Finland. *Geophysica*, 19, 33-46
- Loopmann, A. 1996. *Eesti meresaarte nimestik*. Tallinn: Keskkonnaministeeriumi Info- ja Tehnokeskus.
- Mander, Ü., Liiber, Ü. 2014. *Üldmaateadus: õpik kõrgkoolidele*. Tartu: Tartu Ülikool.
- Newman, J.F., Klein, P.M. 2014. The Impact of Atmosphere Stability on the Accuracy of Wind speed Extrapolation Methods. *Resources*, 3, 81-105.

Niros, A. Vihma, T. Launiainen, J. 2002. Marine Meteorological conditions and Air-Sea Exchange Processes Over the Northern Baltic Sea in 1990s. *Geophysica*, 38(1-2), 59-87.

Observer's Handbook, 2000. UK Met Office.

Ohvril, H. 2004. Atmosfääri- ja merefüüsika alused. Loengukonspekt I osa. Tartu: Tartu Ülikool, Keskkonnafüüsika osakond.

Ratas, U., Ravis, R., Jõgi, J., Orviku, K. 1999. *Vaindloo Saare loodusest 1: maastikuline iseloomustus*. Eesti Geograafia Seltsi aastaraamat. Tallinn: Eesti Teadus Akadeemia Kirjastus, 103-118.

Riigi Ilmateenistus (online). Vaindloo rannikujaam.
<http://www.ilmateenistus.ee/ilmateenistus/vaatlusvork/vaindloo-rannikujaam/>
(06.04.2017)

Soomere, T. and Keevallik, S. 2001. Anisotropy of moderate and strong winds in the Baltic Proper, *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, **7**, 35–49.

Soomere, T. and Keevallik, S. 2003. Directional and extreme wind properties in the Gulf of Finland. *Estonian Acad. Sci. Eng.*, **9**, 73-90.

Soomere, T. and Keevallik, S. 2010. Towards quantifying variations in wind parameters across the Gulf of Finland. *Estonian Journal of Earth Sciences*. **4**, 288-297.

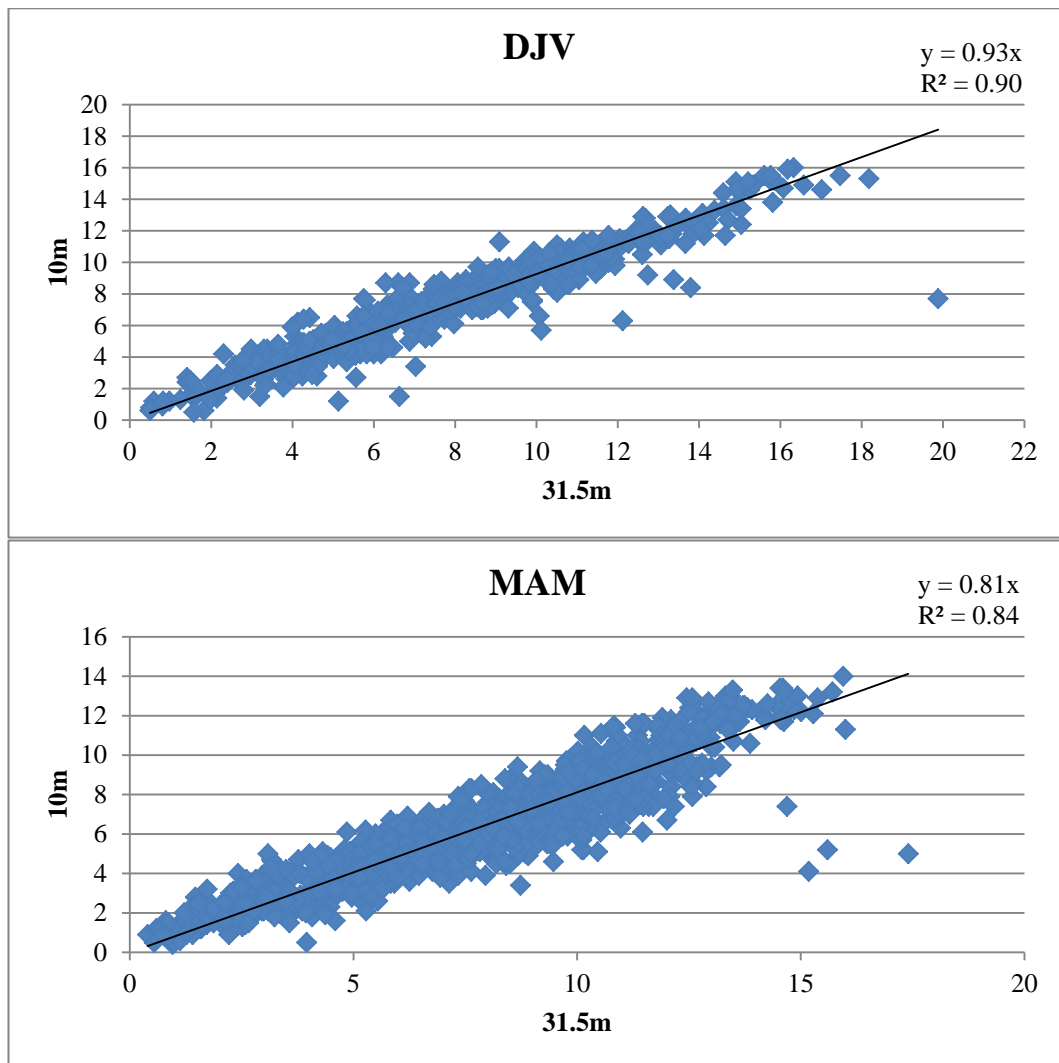
Žukova, V. 2006. Tuule suuna ja kiiruse ajaline muutlikkus automaatjaamade andmel. Diplomitöö. Hüdrometeoroloogia õppetool, Eesti Mereakadeemia.

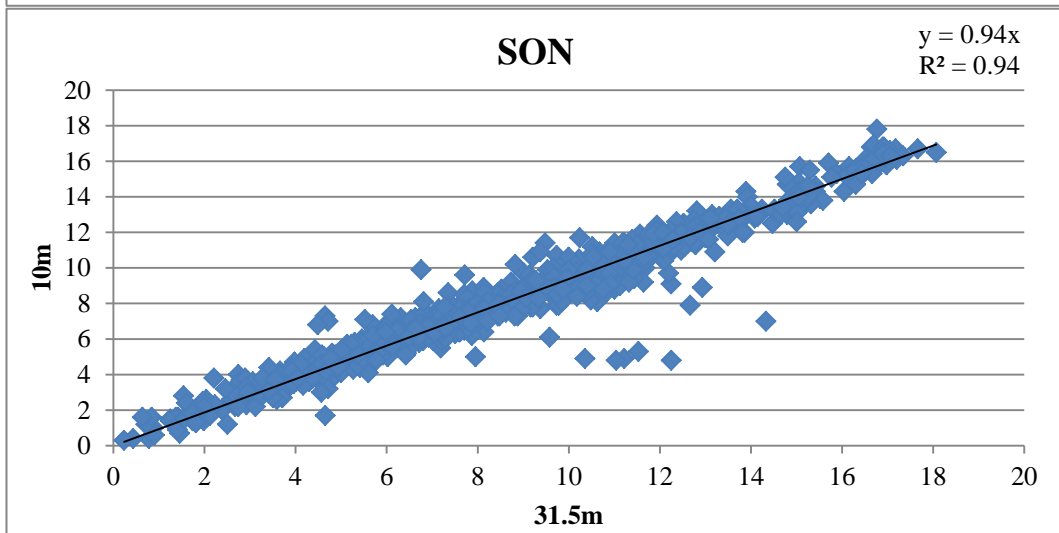
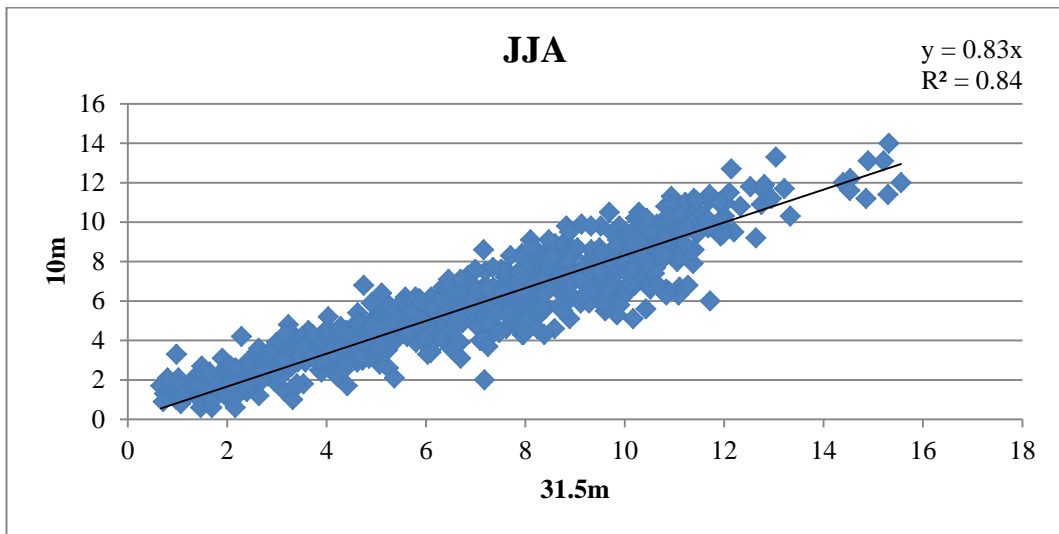
Tammets, T. 2008. Eesti ilma riskid. Tallinn: Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut.

- Tammets, T. 2016. Eesti meteoroloogilise digitaalse andmebaasi ja andmetöötluse ajaloost. *Publicationes Geophysicales Universitatis Tartuensis*, 51, 61-71.
- Tarand, A., Jaagus, J., Kallis, A. 2013. *Eesti kliima minevikus ja tänapäeval*. Tartu Ülikooli Kirjastus.
- Tõllassepp, A. 1960. *Meteoroloogia kõigile*. Tallinn: Eesti Riiklik Kirjastus.
- Vahter, K. 2017. Suuline allikas. Tallinn, 10.04.2017.
- Vaisala User guide. 2011. *Vaisala WINDCAP Ultraconic Wind Sensor Series WMT700* (online). Helsinki: Vaisala Oyj. http://wiki.lbto.org/pub/Instrumentation/WeatherSystem/WMT700_Users_Guide_M211095EN-C.pdf (21.03.2017)
- Vaisala User guide. 2012. *Vaisala Weather transmitter MXT520* (online). Helsinki: Vaisala Oyj. <http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/M210906EN-C.pdf> (21.03.2017)
- WMO Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. 2006. 7th ed. WMO-No. 8. Geneva.
- Keevallik, S. 2017. Suuline allikas. Tallinn. 05.05.2017

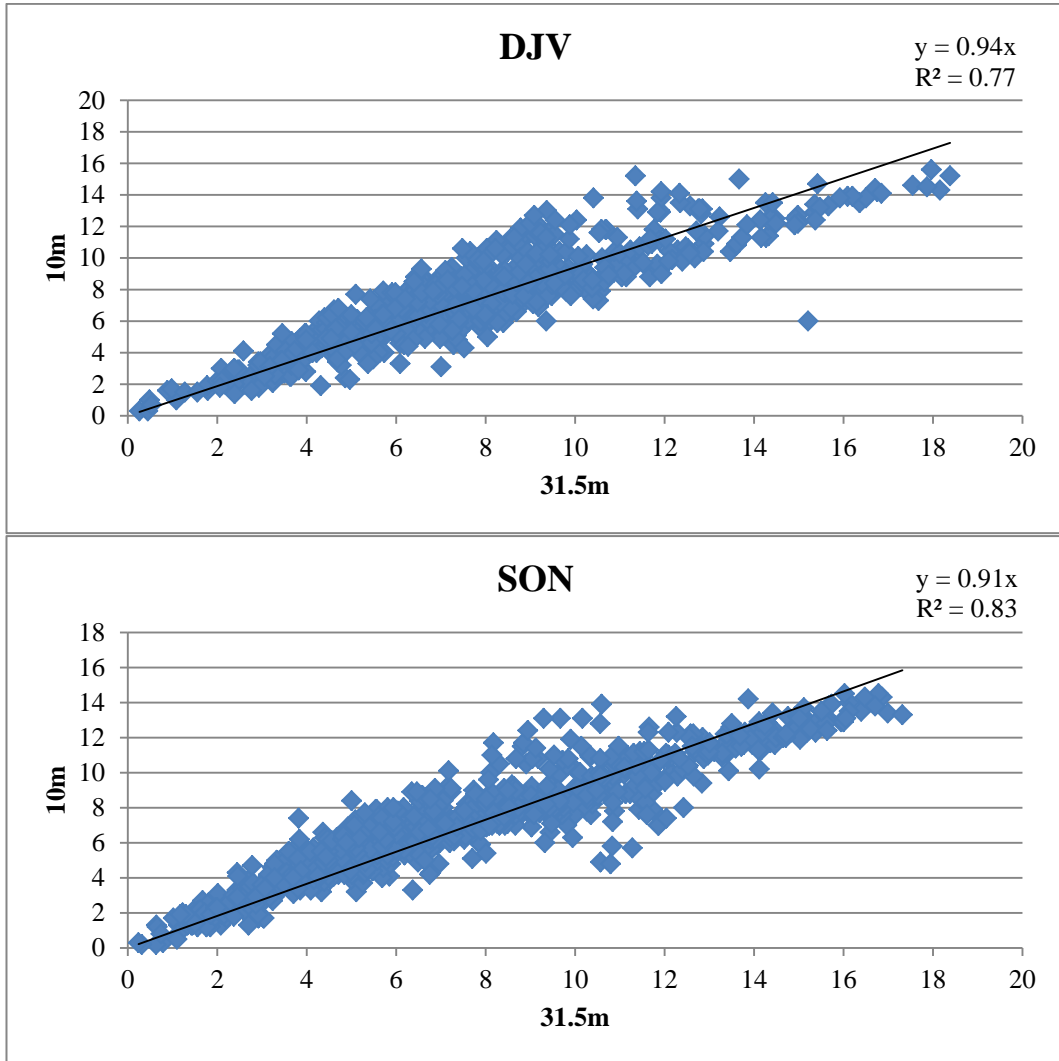
LISAD

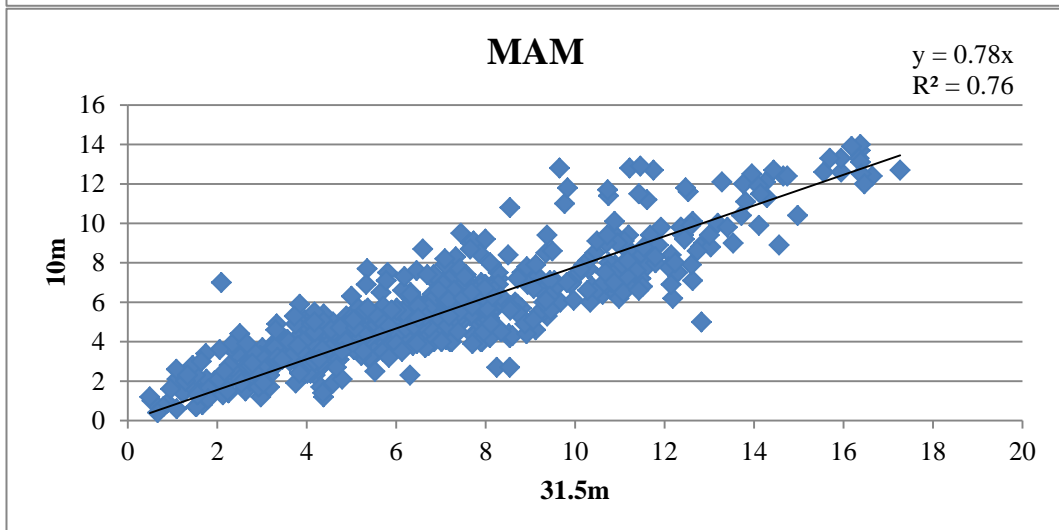
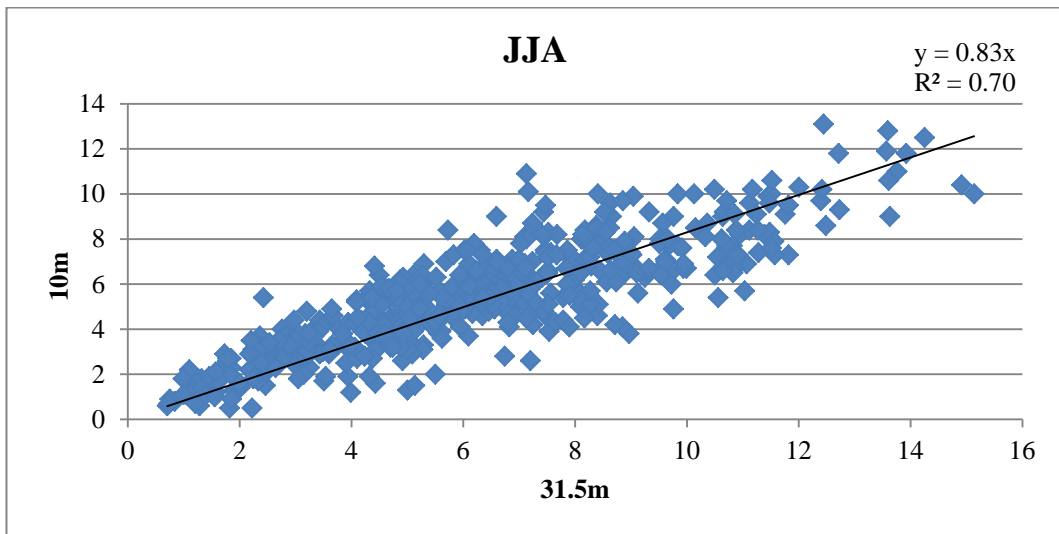
Lisa 1. Hajuvusdiagrammid aastaaegade kaupa rumbis E



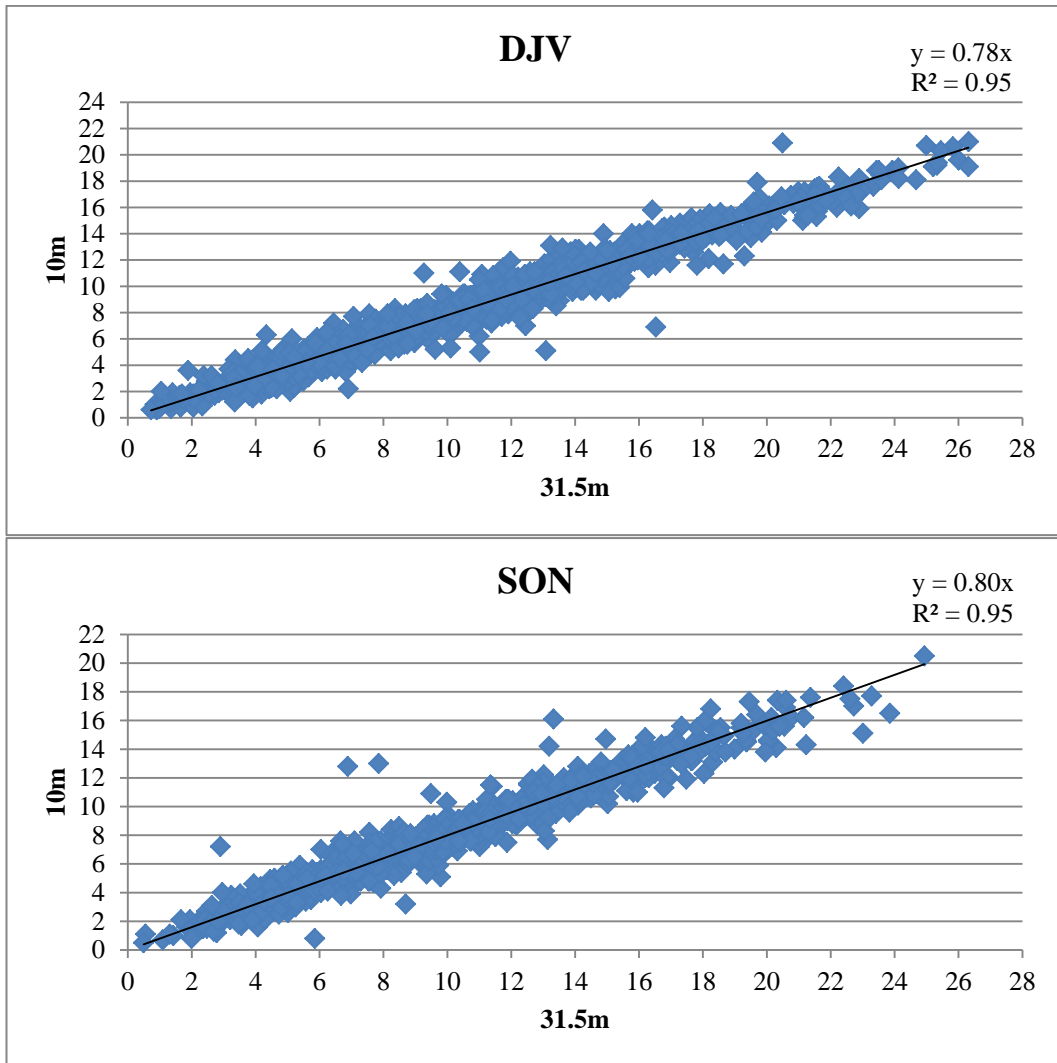


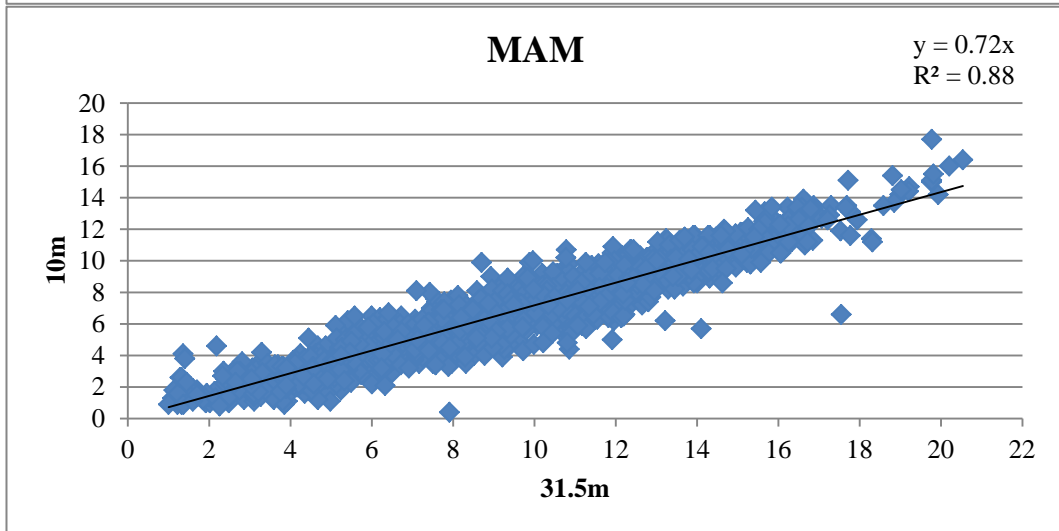
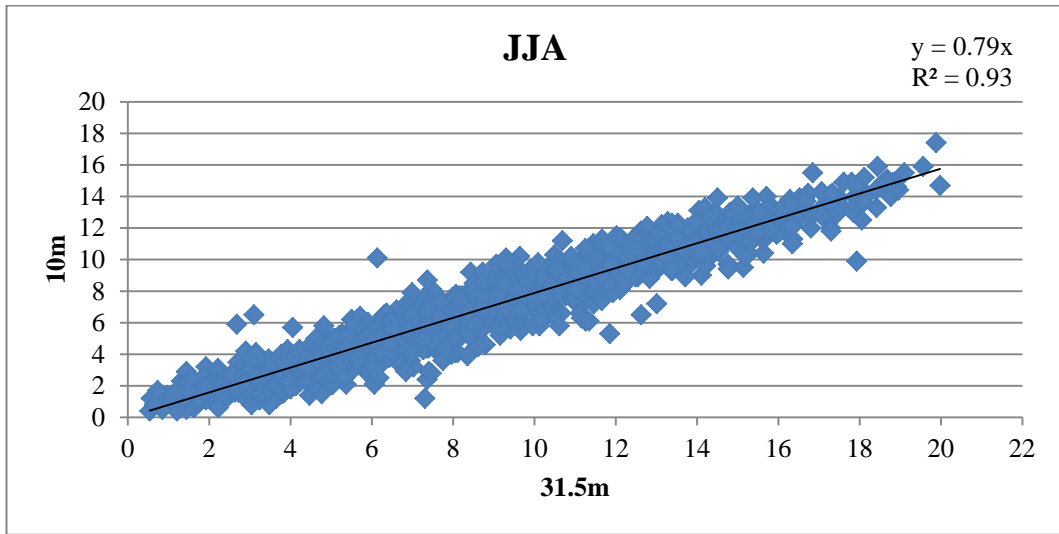
Lisa 2. Hajuvusdiagrammid aastaegade kaupa rumbis SE



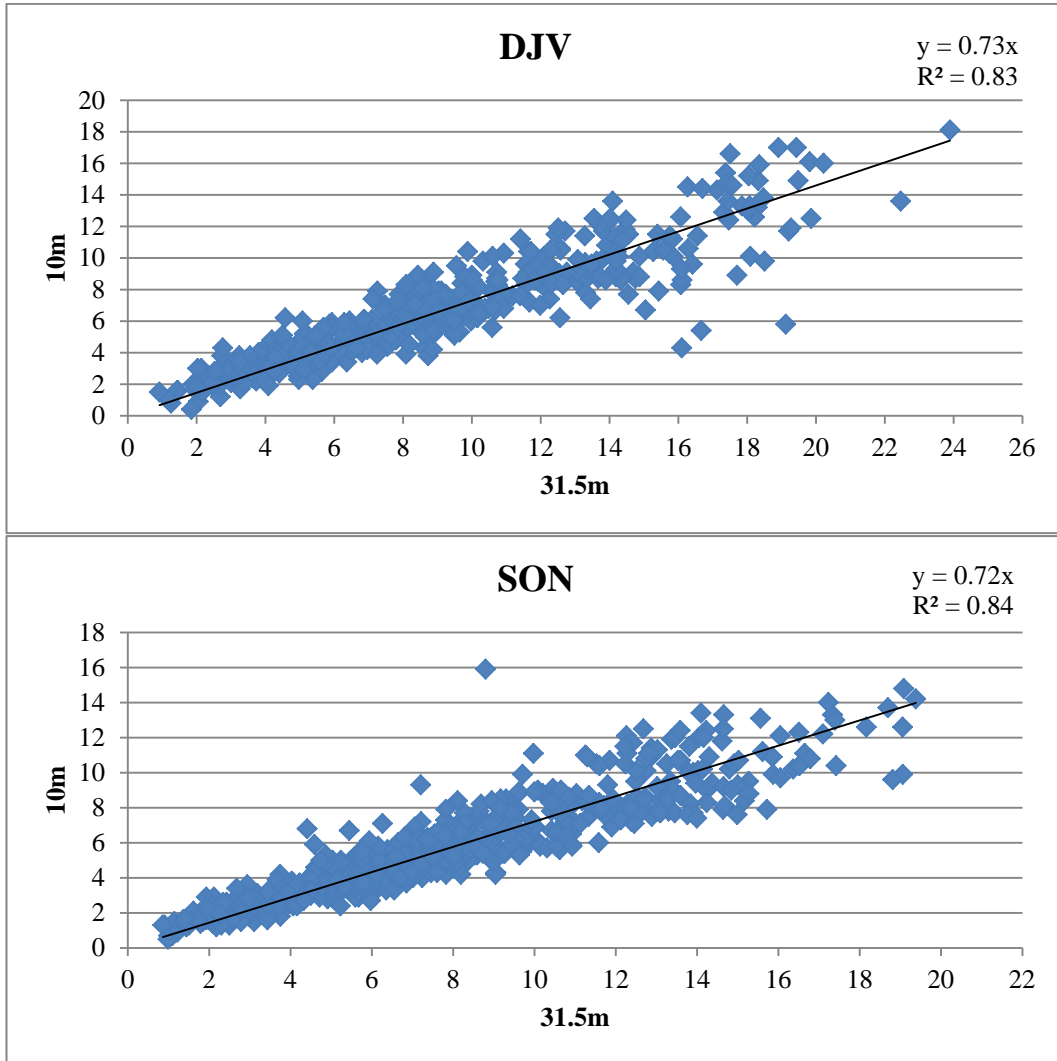


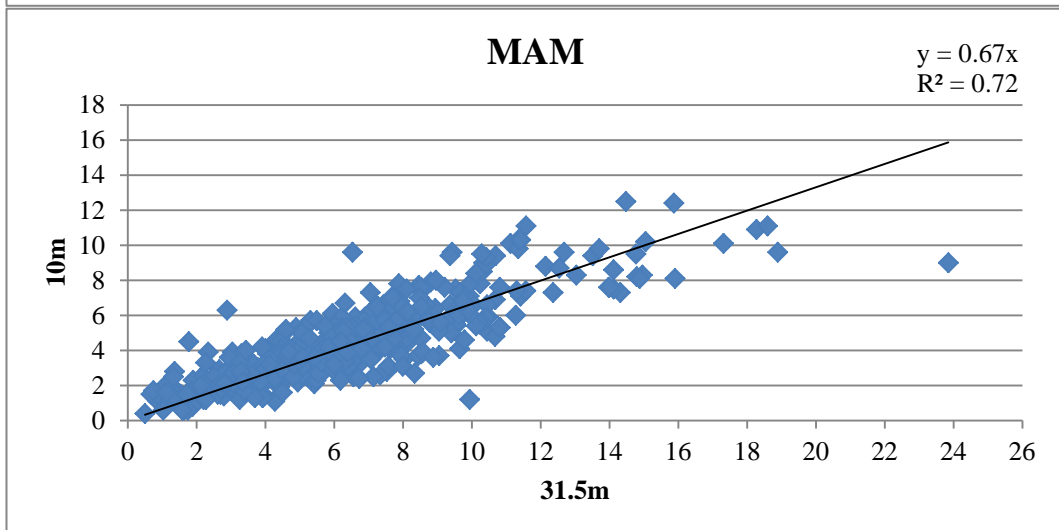
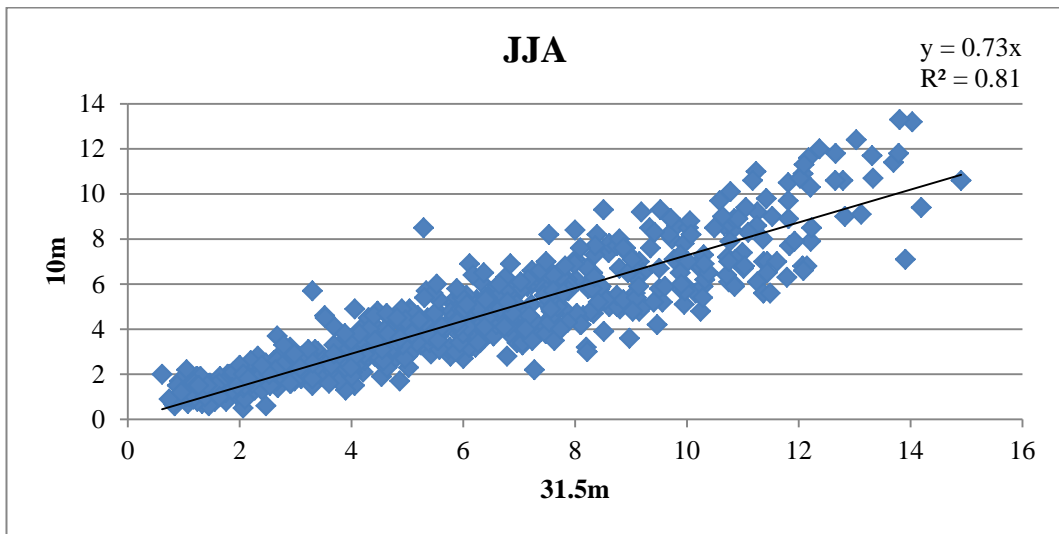
Lisa 3. Hajuvusdiagrammid aastaegade kaupa rumbis W





Lisa 4. Hajuvusdiagrammid aastaegade kaupa rumbis NW





Lisa 5. UK Met Office kõrguse korrektsioonid maismaa kohal

UK Met Office soovib kasutada kõrguse korrektsiooni arvutamiseks maismaa kohal valemit $V_h/V_{10} = 0.233 + 0.656 \log_{10}(h + 4.75)$.

Kõrgus meetrites	Kõrguse taandamiseks 10 meetri kõrgusele
1	1.37
2	1.28
3	1.22
4	1.18
5	1.14
10	1.00
15	0.93
20	0.87
25	0.83
30	0.81
40	0.76
50	0.73

Lisa 6. UK Met Office kõrguse korrektsioonid mere kohal

UK Met Office soovib kasutada kõrguse korrektsiooni arvutamiseks mere kohal valemit $V_h/V_{10} = (h/10)^b$.

Kõrgus meetrites	Kõrguse korrektsioon taandamiseks 10 meetri kõrgusele
10	1.00
20	0.91
30	0.87
40	0.83
50	0.81
60	0.79
70	0.78
80	0.76
90	0.75
100	0.74

Lisa 7. Kõrguse korrektsioonid Läänemere põhjaosas

Kõrguse korrektsioonid hindamaks tuule kiirust 10 meetri kõrgusel kasutades Läänemere automaatjaamade tuule kiiruse andmeid. Neutraalse stratifikatsiooni korral korrektsioonid vastavalt tuule logaritmilisele profiilile. Ebastabiilne tähistab olukorda, mil õhutemperatuur on 3°C jahedam kui veepinna temperatuur ja tuule kiirus automaatjaama kõrgusel on ligikaudu 7 m/s. Stabiilne tähistab olukorda, mil õhutemperatuur on 3°C soojem kui veepinna temperatuur.

		Neutraalne	Ebastabiilne	Stabiilne
Automaatjaam	z/m	u_{10}/u_z	u_{10}/u_z	u_{10}/u_z
Kemi	25	0.92	0.95	0.79
Ulkokalla	16	0.96	0.97	0.90
Märket	21	0.93	0.96	0.83
Kalbadagrund	32	0.91	0.94	0.71
Rauma	24	0.92	0.95	0.80
Bogskär	31	0.91	0.94	0.72