**TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL**
Mehaanikateaduskond
Soojustehnika instituut
Soojusenergeetika õppetool

Ando Leppiman

# TUULEGENERAATORITE ELEKTRI SOBIVUSEST EESTI ELEKTRISÜSTEEMI

Bakalaureuseõppe lõputöö

| | |
|---|---|
| Instituudi direktor: | prof. Aadu Paist |
| Juhendaja: | prof. Aadu Paist |
| Kaasjuhendaja: | D. Sc. Teolan Tomson |
| Üliõpilane: | |

Tallinn 2002

Olen koostanud bakalaureusetöö teemal “Tuuleenergiast toodetud elektri sobivusest Eesti elektrisüsteemi” iseseisvalt. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

Autor: A. Leppiman ……..
Üliõpilase kood: 970175 AAS

Töö vastab kehtivatele nõuetele.

Juhendaja: A. Paist ……..

Kaitsmisele lubatud “ “ …….. 2002 a.

Kaitsekomisjoni esimees ……..

# TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
## SOOJUSTEHNIKA INSTITUUT

K I N N I T A N

_____
(instituudi direktor)

____ _____ 2002

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Mehaanikateaduskonna üli?pilasele:

Ando Leppiman
Õppuri kood 970175

1 Lõputöö teema:

Tuulegeneraatorite elektri sobivusest Eesti elektrisüsteemi

(eesti keeles)

Estonian Electricity System Co-operation with Modern Windmills Electricity

(inglise keeles)

Lõputöö kood _MSE 34 LT_____

Alus: õpikonnas viseeritud kaitsmistaotlus

2 Lõputöö teema kehtivusaeg kaitsmiseks kuni _____

3 Lähteandmed:

Lähteandmetena kasutada Eestis teostatud tuulemõõtmisandmeid (sealhulgas Eesti Meteoroloogia- ja HüdroloogiaInstituudi andmeid). Lähteandmed (välja arvatud tuule kiiruse kohta) kogub lõputöö koostaja ise.

4 Seletuskirja sisu:

1. Sissejuhatus
2. Mõisted

3. Tuuleenergia
4. Tuuleuuringud Eestis
5. Tuule dünaamika ja selle koostöö elektrijaamadega
6. Tuuleenergeetika majanduslikkus
7. Järeldused tehtud tööst ja ettepanekud edasiseks
8. Kasutatud kirjandus ja esitatud andmete algallikad
9. Eesti- ja võõrkeelne resümee

5 Graafilise materjali loetelu:

Graafiline osa puudub

6 Lõputöö konsultandid:

| Lõputöö osa nimetus | Konsultandi nimi | Konsultandi allkiri, kuupäev | Diplomandi allkiri |
|---|---|---|---|
| | | | |
| | | | |
| | | | |

7 Lõputöö ülesande väljaandmise kuupäev _____

Juhendaja: Aadu Paist _____
(nimi, allkiri)

Ülesande vastu võtnud: _____
(diplomandi allkiri)

SISUKORD

**1 EESSÕNA ..... 10**

**2 SISSEJUHATUS ..... 11**

**3 MÕISTED ..... 14**

3.1 TAASTUV- JA ALTERNATIIVENERGIA ..... 14
3.2 TAASTUVENERGIA ALLIKAD ..... 16
3.3 PÄIKESEENERGIA ..... 16
3.4 KYOTO PROTOKOLL JA TAASTUVENERGIAT SOOSIVAD MUDELID ..... 18
3.5 FOSSIILSETE KÜTUSTE VARUD ..... 20

**4 TUULEENERGIA ..... 20**

4.1 PÄIKESEENERGIA MUUNDUMINE TUULE KINEETILISEKS ENERGIAKS ..... 20
4.2 TUULE KIIRUS SÕLTUVANA MAASTIKU ISELOOMUST ..... 22
4.3 TUULE KINEETILISE ENERGIA MUUNDAMINE MEHHAANILISEKS JA ELEKTRIENERGIAKS ..... 24
4.4 MAAILMA TUULEPOTENTSIAAL ..... 28
4.5 EESTI TUULEPOTENTSIAAL ..... 29

**5 TUULEUURINGUD EESTIS ..... 30**

**6 TUULE DÜNAAMIKA JA SELLE KOOSTÖÖ ELEKTRIJAAMADEGA ..... 33**

6.1 TUULEST TOODETUD ELEKTRI SOBIVUSEST EESTI ELEKTRISÜSTEEMI ..... 33
6.2 ELEKTRIJAAMA PLOKI REAGEERIMISKIIRUS ..... 37
6.3 EESTI ENERGIASÜSTEMI DÜNAAMILISED OMADUSED ..... 40
6.4 TUULE DÜNAAMIKA UURINGUD ..... 41
6.5 TUULE KIIRUSE JA ELEKTRIENERGIA TARBIMISE OMAVAHELISED SEOSED ..... 47

**7 TUULEENERGEETIKA MAJANDUSLIKKUS ..... 60**

7.1 TUULEENERGIA HIND ..... 61
7.2 ELEKTRIENERGIA TOOTMISKULUD ERINEVATE TOOTMIS-TEHNOLOOGIATE KASUTAMISEL ..... 62
7.3 TUULEST TOODETUD ELEKTRI MÜÜGIHIND LÄHTUVALT EESTI VABARIIGI ÕIGUSAKTIDEST ..... 68
7.4 MAAILMAS INSTALLEERITUD ELEKTRITUULIKUTE VÕIMSUS ..... 71

**8 JÄRELDUSED TEHTUD TÖÖST JA ETTEPANEKUD EDASISEKS ..... 72**

8.1 JÄRELDUSED TUULE DÜNAAMIKA ÜLEVAATELE JA KORRELATSIOONIARVUTUSTE TULEMUSTE KOHTA 73
8.2 JÄRELDUSED TUULEENERGIA MAJANDUSLIKKUSEST EESTI VABARIIGI TINGIMUSTES ..... 74
8.3 ETTEPANEKUD EDASISEKS ..... 75

**9 KASUTATUD KIRJANDUS JA ESITATUD ANDMETE ALGALLIKAD ..... 77**

**10 LISAD ..... 79**

10.1 LISA 1. SAASTETASUD EESTI VABARIIGIS ..... 79
10.2 LISA 2. ENERGIASEADUSE ALTERNATIIVSELT TOODETUD ELEKTRIENERGIA OSTUKOHUSTUS ..... 80
10.3 LISA 3. ELEKTRITURU SEADUSEELNÕU SÄTTED TAASTUVENERGIALE ..... 81

JOONISED

JOONIS 1. PÕLEVATE TAASTUVENERGIAALLIKATE KINNINE RING LOODUSES ..... 15
JOONIS 2. FOSSIILSETE KÜTUSTE TINGLIKULT KINNINE RING LOODUSES ..... 15
JOONIS 3. PÄIKESEENERGIA MUUNDAMISE ASTMED ..... 17
JOONIS 4. TUULE LIIKUMISE SUUND ERINEVATEL KÕRGUSTEL MAAPINNAST ..... 21
JOONIS 5. TUULE KIIRUSE JA RISTLÕIKE SUHE ENNE JA PÄRAST TUULEGENERAATORIT ..... 25
JOONIS 6. TUULE VÕIMSUS PINNAÜHIKU KOHTA SÕLTUVANA TUULE KIIRUSEST ..... 27
JOONIS 7. VÕIMSUSKÕVER 100 KW VÕIMSUSEGA TUULEGENERAATORILE ..... 27

JOONIS 8. ENERGIATIHEDUS 30 MEETRI KÕRGUSEL ..... 30
JOONIS 9. TUULE KESKMINE KIIRUS 10 MEETRI KÕRGUSEL ..... 31
JOONIS 10. EESTIS INSTALLEERITUD TUULE KIIRUSE MÕÕTURID ..... 31
JOONIS 11. TURBIINI SEISKAMISE JA KÄIVITAMISE AJASKAALA [14] ..... 37
JOONIS 12. 200 MW-SE PLOKI KASUTEGUR NORMATIIVSETE KARAKETRISTIKUTE ALUSEL [15] ..... 39
JOONIS 13. EESTI ENERGIA KOORMUSGRAAFIK AASTAIL 1997-1999 ..... 40
JOONIS 14. ÖÖPÄEVASE PERIOODILISE KOMPONENDI ARVUTAMISEL KASUTATUD TUULE KIIRUSE MÕÕTMISE ASUKOHAD ..... 42
JOONIS 15. TUULE KESKMINE KIIRUS KUUDE LÕIKES LÄÄNE-EESTI RANNIKUL ..... 43
JOONIS 16. ERINEVATE ASUKOHTADE TUULE KIIRUSTE NORMALISEERITUD AUTOKORRELATSIOONI-FUNKTSIOONID ..... 44
JOONIS 17. NORMALISEERITUD AUTOKORRELATSIOONIFUNKTSIOON HARKUS SUVEL ..... 44
JOONIS 18. NORMALISEERITUD AUTOKORRELATSIOONIFUNKTSIOON HARKUS TALVEL ..... 45
JOONIS 19. KESKMINE PÄEVA TUULE KIIRUS KURESSAARES SUVEL (S) JA TALVEL (T) ..... 45
JOONIS 20. TUULE DÜNAAMIKA VAATLEMISEL HAJUTATULT ALUSEKS VÕETUD TUULE MÕÕTMISE ANDMED ..... 46
JOONIS 21. TUULE KIIRUS JÕHVIS 1998 A. NOVEMBRIS ..... 48
JOONIS 22. ARVUTATUD TUULE KIIRUSE NORMALISEERITUD AUTOKORRELATSIOONIFUNKTSIOONIGA JÕHVIS 1998 A. NOVEMBRIS ..... 48
JOONIS 23. TUULE KIIRUS TALLINNAS 1998 A. NOVEMBRIS ..... 49
JOONIS 24. ARVUTATUD TUULE KIIRUSE NORMALISEERITUD AUTOKORRELATSIOONIFUNKTSIOONIGA TALLINNAS 1998 A. NOVEMBRIS ..... 49
JOONIS 25. ELEKTRI NETOTARBIMINE EESTIS 1998 A. NOVEMBRIS ..... 50
JOONIS 26. ARVUTATUD EESTI ELEKTRI NETOTARBIMISE NORMALISEERITUD AUTOKORRELATSIOONIFUNKTSIOONIGA EESTIS 1998 A. NOVEMBRIS ..... 50
JOONIS 27. ELEKTRI NETOTARBIMISE KORRELATSIOON TALLINNA TUULEGA 1998 A. NOVEMBRIS ..... 51
JOONIS 28. ELEKTRI NETOTARBIMISE KORRELATSIOON JÕHVI TUULEGA 1998 A. NOVEMBRIS ..... 51
JOONIS 29. TUULE KIIRUS JÕHVIS 1998 A. DETSEMBRIS ..... 52
JOONIS 30. ARVUTATUD TUULE KIIRUSE NORMALISEERITUD AUTOKORRELATSIOONIFUNKTSIOONIGA JÕHVIS 1998 A. DETSEMBRIS ..... 52
JOONIS 31. TUULE KIIRUS TALLINNAS 1998 A. DETSEMBRIS ..... 53
JOONIS 32. ARVUTATUD TUULE KIIRUSE NORMALISEERITUD AUTOKORRELATSIOONIFUNKTSIOONIGA TALLINNAS 1998 A. DETSEMBRIS ..... 53
JOONIS 33. ELEKTRI NETOTARBIMINE EESTIS 1998 A. DETSEMBRIS ..... 54
JOONIS 34. ARVUTATUD EESTI ELEKTRI NETOTARBIMINE NORMALISEERITUD AUTOKORRELATSIOONIFUNKTSIOONIGA EESTIS 1998 A. DETSEMBRIS ..... 54
JOONIS 35. ELEKTRI NETOTARBIMISE KORRELATSIOON TALLINNA TUULEGA 1998 A. DETSEMBRIS ..... 55
JOONIS 36. ELEKTRI NETOTARBIMISE KORRELATSIOON JÕHVI TUULEGA 1998 A. DETSEMBRIS ..... 55
JOONIS 37. TUULE KIIRUS JÕHVIS 1999 A. JAANUARIS ..... 56
JOONIS 38. ARVUTATUD TUULE KIIRUSE NORMALISEERITUD AUTOKORRELATSIOONIFUNKTSIOONIGA JÕHVIS 1999 A. JAANUARIS ..... 56
JOONIS 39. TUULE KIIRUS TALLINNAS 1999 A. JAANUARIS ..... 57
JOONIS 40. ARVUTATUD TUULE KIIRUSE NORMALISEERITUD AUTOKORRELATSIOONIFUNKTSIOONIGA TALLINNAS 1999 A. JAANUARIS ..... 57
JOONIS 41. ELEKTRI NETOTARBIMINE EESTIS 1999 A. JAANUARIS ..... 58
JOONIS 42. ARVUTATUD EESTI ELEKTRI NETOTARBIMISE NORMALISEERITUD AUTOKORRELATSIOONIFUNKTSIOONIGA EESTIS 1999 A. JAANUARIS ..... 58
JOONIS 43. ELEKTRI NETOTARBIMISE KORRELATSIOON TALLINNA TUULEGA 1999 A. JAANUARIS ..... 59
JOONIS 44. ELEKTRI NETOTARBIMISE KORRELATSIOON JÕHVI TUULEGA 1999 A. JAANUARIS ..... 59

TABELID

TABEL I. KAREDUSKÕRGUSE KLASSID ..... 23
TABEL II. ERINEVATE TAASTUVATE ENERGIAALLIKATE TEOREETILINE POTENTSIAAL EESTIS [10]..... 30
TABEL III. TUULE KIIRUSE MÕÕTMISE ASUPAIKADE KOORDINAADID JA KÕRGUSED MAAPINNAST ..... 32
TABEL IV. AUTOMATISEERITUD TUULE KIIRUSE MÕÕTMISE SEADMETE ASUKOHAD JA KÕRGUSED..... 32
TABEL V. TUULE KIIRUSE KORRELATSIOON ELEKTRIENERGIA TARBIMISSE [%/(M/S)]60
TABEL VI. POTENTSIAALSED ENERGIA TOOTMISKULUD (ENERGIA HIND JAAMA LATTIDEL, ILMA MAKSUDETA) [22]. ..... 66
TABEL VII. ELEKTRIENERGIA ARVESTUSLIKUD TOOTMISKULUD UUTES ROOTSI ELEKTRIJAAMADES [23] ..... 67
TABEL VIII. ELEKTRIENERGIA VÕIMALIKUD TOOTMISKULUD ERINEVATE TOOTMISTEHNOLOOGIATE KASUTAMISEL [24]..... 67
TABEL IX. ELEKTRI PÕHITARIIF KODUTARBIJATELE JA TUULEELEKTRI MÜÜGIHIND . 70
TABEL X. MAAILMAS INSTALLEERITUD ELEKTRITUULIKUTE VÕIMSUS 2001 A. LÕPU SEISUGA [25] ..... 72

**Tallinna Tehnikaülikool** **Lõputöö kokkuvõte**

*Autor:* **Ando Leppiman** *Lõputöö kood:* **MSE34LT**

*Töö pealkiri*:

**TUULEGENERAATORITE ELEKTRI SOBIVUSEST EESTI ELEKTRISÜSTEEMI**

*Kuupäev:* **23.05.2002** *82 lk*

*Teaduskond:* **Mehaanika**
*Instituut:* **Soojustehnika**
*Õppetool:* **Soojusenergeetika**

*Töö juhendaja(d):* **Prof. Aadu Paist**
*Töö konsultant (konsultandid):* **D. Sc. Teolan Tomson**

*Sisu kirjeldus:*
Käesoleva töö eesmärgiks on anda ülevaade tuulegeneraatorite poolt toodetava elektri kasutusvõimaluste kohta Eesti elektrisüsteemis. Põhjalikumalt on peatutud tuule dünaamika aspektidel ja otsitud korrelatsiooni tuule kiiruse ja elektrienergia tarbimise vahel. Korrelatsiooni olemasolu või mitte olemasolu on tänini käsitlemata teema ja omab tähtsust ühe komponendina elektrijaama(de) võimsusreservi tagamisel tuulegeneraatorite elektrilise võimsuse pulsatsioonide katmiseks.
Töös selgitatakse erinevaid tuuleenergiat käsitlevaid aspekte alates taastuvate energiaallikate vaatlemisest ja lõpetades spetsiifilisemate tuuleenergeetika teemadega, sealhulgas tuule dünaamika ja selle koostöö elektrijaamadega ning tuuleenergeetika majanduslikkus.
Käesolevas bakalaureusetöös on vaadeldud ja analüüsitud erinevate antud valdkonna spetsialistide artikleid, ettekandeid jms. Välja on toodud samuti mitmeid võrdlustabeleid. Üritatud on vaadelda tulevikku ja hinnatud tuuleenergia majanduslikkust ja tema võimalikku kohta tuleviku energiasüsteemis lähtudes uue Energiaturu seaduseelnõu tähenduses.
Töö praktilise osa moodustavad korrelatsiooniarvutused tuule kiiruse ja elektrienergia tarbimise vahel. Saadud tulemust on analüüsitud ja leitud selle mõju energiasüsteemile.

*Märksõnad:*
Taastuvenergia, tuuleenergia, tuule potentsiaal, tuuleuuringud, tuule dünaamika, Eesti elektrisüsteemi dünaamika, tuule kiiruse korrelatsioon elektrienergia tarbimisega, tuuleenergeetika majanduslikkus, tuulegeneraatorite elektri hind Eestis.

**Tallinn Technical University** **Summary of the diploma work**

*Author:* **Ando Leppiman** *Code of the work:* **MSE34LT**

*Title*:

**ESTONIAN ELECTRICITY SYSTEM CO-OPERATION WITH MODERN WINDMILLS ELECTRICITY**

*Date:* **23.05.2002** *82 pages*

*Faculty:* Mechanical Engineering
*Department:* Thermal Engineering
*Chair:* Thermal Energy Engineering

*Tutor(s) of the work:* Prof. Aadu Paist
*Consultant(s):* D. Sc. Teolan Tomson

*Abstract:*
The main target of the bacelor work is to give an overview about the usage of modern windmills in Estonian electricity system. More deeply is analysed the wind dynamic aspects and find out the correlation between electricity demand and wind speed. The topic about the correlation between these is still non-treated and has an importance like one component that should be included to calculate the reserve in power stations to cover the oscillation of wind power.
In bachelor work are concerned different kind of aspects about wind energy started from renewable energies and lasted with the more specific topics like wind dynamics, the co-operation of wind and electricity system as well as the economics of wind energy.
In writing there is analysed and examined the articles, reports etc. of the main specialists of wind energy in Estonia. There is many comparative statements. One of the goals is look to the future and estimate the economics of wind energy in Estonia according the new draft of Estonian Energy Market Law.
The practical part of the bachelor work are the correlatsion calculations between the consumption of electricity and wind speed. There are analyses about the correlation as well as the effect to the Estonian electricity system.

*Key words:*
Renewable energy, wind energy, potential of the wind, wind research, wind dynamics, dynamics of an Estonian electricity system , wind speed correlation with the consumption of electrical energy, economics of wind energy, price of wind power in Estonia.

# 1 Eessõna

Käesoleva lõputöö teema valikul olid abiks hr. Teolan Tomson Eesti Energeetikainstituudist, hr. Vello Selg ja hr. Aadu Paist Tallinna Tehikaülikooli Soojustehnika Instituudist ning hr. Jaan Tepp Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioonist, samuti ajendas autorit antud teemaga tegelema isiklik huvi.

Konsultatsioonide andmise eest tahab autor tänada Eesti Energeetikainstituudi Alternatiivenergeetika laboratooriumi juhatajat ja teaduste doktorit hr. Teolan Tomsonit, Tallinna Tehnikaülikooli Soojustehnika Instituudi teadurit hr. Vello Selga, TTÜ Soojustehnika Instituudi professorit hr. Andres Siirdet, TTÜ Soojustehnika Instituudi professorit hr. Aadu Paisti, Narva Elektrijaamade Tootmisosakonna inseneri hr. Pavel Ruseljuki, Narva Elektrijaamade Keskkonnaosakonna juhatajat hr. Arvo Tordikut, Eesti Tuuleenergia Assotsiatsiooni tegevjuhti hr. Jaan Teppi ja Eesti Vabariigi Majandusministeeriumi Energeetikaosakonda.

# 2 Sissejuhatus

Kogu inimtegevus on kaudselt ja otseselt seotud energia ja selle tarbimisega. Jättes kõrvale vegeteerimiseks tarbitava energia, langeb ülejäänu peamiselt inimese heaolu tarbeks (loomulikult mitte ainult – soojust näiteks vajatakse ka vegeteerimiseks). Heaoluks on inimesed elektrit tarbinud juba sajandeid, kuid kuni ülemöödunud sajandi keskpaigani peamiselt primitiivsel viisil. Kasutati vee voolu energiat, päikeseenergiat, tuult ja loomulikult biomassi ja fossiilseid kütuseid termilise energia kandjatena. Alates 19. sajandist on tänu teaduse hüppelisele arengule inimkonnal kasutada kunstlikult muundatud elekter, millest on 21. sajandiks saanud peamine energiaallikas. Elektrienergia tootmiseks muundamise läbi on kuni tänaseni kasutusel peamiselt fossiilset päritolu kütused, mis on tekkinud samuti tänu päikeseenergiale elusloodusе tulemusena. Fotosünteesi, sette- ja geoloogiliste protsesside tulemusena on maakoores tekkinud orgaaniliste kütuste (kivisüsi, pruunsüsi, nafta, põlevkivi, maagaas, turvas) ja radioaktiivsete ainete maardlad. Nende orgaaniliste ja mitteorgaaniliste kütuste tekkeprotsessi mõõdetakse miljonite aastatega. Siit ka põhjus, miks neid nimetatakse mittetaastuvateks energiaallikateks.

Kujunemas on olukord, kus inimkond suudab praktiliselt kahe sajandiga “ära kulutada” mittetaasuvate kütuste varud, mille moodustumine on toimunud sadade tuhandete sajandite jooksul. Seejuures toimub varude kasutamine äärmiselt ebaefektiivsel viisil – enamus neist lõpetab oma eksisteerimise põlemise läbi. Mittetaastuvate kütuste varude hindamisel pole ühest lõplikku seisukohta, erinevad eksperdid pakuvad erinevaid numbreid. Siiski tuleb nentida, et praeguse energiatarbimise kasvu juures jäävad kõik prognoosid suurusjärku $10^2$. Seetõttu on otstarbekas mõtelda tulevikule juba täna, et mitte seista ühel hetkel “lõhkise küna ees”.

Kasutusel on fraas: “Kes ei mäleta minevikku, sellel pole ka tulevikku”. Seega tuleks heita pilk tagasi ja alustada elektritootmist eeldusel, et meil ei ole mittetaastuvaid energiaallikaid. Teisisõnu oleks kasutada kõik see, millest on juttu järgnevates peatükkides.

Eestis on elektrit toodetud alates 19. sajandi lõpust. Peamiseks energiakandjaks on läbi aastate olnud fossiilsed kütused ja peamiselt põlevkivi. Massiline, kogu riiki hõlmav elektritootmine algas Narva elektrijaamade ehitamisega – Balti EJ aastal 1956

ja Eesti EJ aastatel 1964 – 1973. Seoses Eesti kuulumisega Nõukogude Liitu toetus Eesti energiasüsteem kõrgelt subsideeritud, tervet omaaegset NSV Liitu hõlmavale ühtsele energiasüsteemile. Taasiseseisvumise ja turumajandusele ülemineku tõttu kadus Eestil see “eelis”. Kütuste, sealhulgas Venemaalt ostetavate hinnad on maailmaturu tasemel. Kuna Eesti elektrienergia tootmine baseerub suurel määral kohalikul maavaral põlevkivil, mille ressurssi hinnatakse veel umbkaudu 100 aastale, on elektritootmine Eestis kindlustatud. Seetõttu on riigikaitselisest eesmärgist lähtuvalt säilitatud ka sõltumatus imporditavast energiast ning lahendatud energia varustuskindluse probleem.

Eesti on üks osa kogu maailma hõlmavast ühiskonnast ja peab arvestama teiste arvamuste, ettepanekute ja nõudmistega. Eesti ambitsioon on olla osa arenenud riikide kogukonnast, Euroopa Liidust ja NATOst. Et oma eesmärki täita, peab omaks võtma teatud käitumisreeglid, mis on saavutatud tänu arvukatele ja põhjendatud diskussioonidele. Teine heaolu saavutamise aspekt on omaenda ühiskonna elukeskkonna muutmine elamis- ja keskkonnasõbralikuks.

Et neist kahest eeldusest energiatootmisel kinni pidada, tuleb ka Eestil koos kõikide huvigruppide ja institutsioonidega pöörata pilk tulevikku, sealhulgas mõelda tulevikule globaalselt ja tegutseda selle nimel lokaalselt.

Eestis toodetakse elektrienergiat praegu ja kindlasti ka tulevikus põlevkivi baasil. Tehnoloogiate täiustumise korral võiksid põlevkivi kasutavad soojuselektrijaamad töötada küttepindade ja atmosfääri saastumise ning õhku paisatava $CO_2$ hulga suhtes optimaalsetel, hästi väljareguleeritud baaskoormuse reþiimidel, mis on viidud vastavusse rahvusvaheliste lepete normidega. Tipp- ja pooltippkoormuse katmine võiks toimuda hüdroenergia baasil ja põlevkiviõlil (või maagaasil) töötava(te) väiksemate elektrijaamade suuremas elektrijaamas spetsiaalse kombineeritud tsükliga energiaploki abil. Taastuvatest energiaallikatest elektrienergia tootmises langeb põhirõhk kindlasti tuuleenergiale kui praeguse aja kõige konkurentsivõimelisemale taastuvenergiaallikatest elektrienergia tootmisviisile.

Eestis on tuuleenergia kasutamisest elektrienergia saamiseks räägitud kaua ja tehtud mitmeid katseid seda arendada. Kahjuks on erinevatel poliitilistel, tehnilistel ja majanduslikel põhjustel Eestis vaid üks reaalselt töötav võrguga ühendatud tuulegeneraator Tahkuna poolsaarel Hiiumaal, seegi mitte just tehnika viimane sõna. Kuid oma positiivne külg ka sellel. Tuulegeneraatorite tehnoloogia areneb praktiliselt võrdse kiirusega arvutitehnoloogiaga ja seega ei ole Eestil probleeme, millega

seisavad silmitsi taanlased ja saksalsed – vanad tuulikud reinstalleeritakse ja uued pannakse nende asemele.

Üheks tuuleenergia arengut pidurdavaks jõuks Eestis on kartus tuuleenergia sobimatusest Eesti energiasüsteemi ja põlevkivielektrijaamadega. Kuna tuuleenergia ei ole ühtlane (tuul puhub pulsatsioonidega), siis saadav elektrienergia (võimsus) vajab tasakaalustamist. Eesti hetkesituatsioonis, kus Narva elektrijaamas ei ole plokkide renoveerimist alustatud ning puuduvad teised kiiresti reageerivad elektrijaamad, on praktiliselt ainus viis tuuleenergia "silumiseks" Narva elektrijaamade kuum reserv (pöörlev reserv). Käesolev uurimus sisaldabki analüüsi, kas ja kuidas mõjutab tuuleenergia Eesti energiasüsteemi tööd. Samas on vaadeldud tuuleenergiat erinevatest lähtepunktidest ja toodud välja erinevate energiaallikate (kaasa arvatud tuuleenergia) algallikad.

Käesolevas bakalaureusetöös on spetsiifiliselt uuritud tuule kiiruse ja elektrienergia tarbimise vahelist korrelatsiooni. Uurimusvaldkond on tähtis, kuna tuulegeneraatorite poolt toodetava elektri võimsuse kõikumise tasandamiseks kasutatava pöörleva reservi arvutamisel tuleb tagada kõikide parameetrite analüüs. Tuule kiiruse ja elektrienergia tarbimise vahelise korrelatsiooni olemasolu korral võib see parameeter üsna oluliselt mõjutada tuulikute võimsuse kõikumise tasakaalustamiseks töös hoitava pöörleva reservi tööd.

Vaatluse alla tuleb käesolevas bakalaureusetöös aspekt, et tuule võimsuse pulsatsioonide kompenseerimine Narva Elektrijaamade kuuma reservi arvel võib kaotada peatselt mõtte. Nimelt näeb uus, lähiajal riigikokku jõudev elektrituru seaduse eelnõu ette bilansi tagamise bilansivastutaja poolt. Kuna Narva Elekrijaamadest ostetava bilansielektri hind kujuneks märgatavalt kõrgemaks muudest alternatiividest, hakkab reaalsuses tuule võimsuse pulsatsioone kompenseerima hoopiski importelekter. See vähendab koormust Narva Elektrijaamade töös, vähendades koormust pöörleval reservil, mis omakorda vähendab elektrijaamade saasteemissioone. Uue elektrituru seaduse jõustumine peaks toimuma 2004. aasta alguses.

# 3 Mõisted

## 3.1 Taastuv- ja alternatiivenergia

Tihti aetakse segamini kaks mõistet: alternatiiv- ja taastuvenergia. Alustuseks tuleks määratleda, mida saab nimetada taastuvenergiaks ja mis on paljuräägitud alternatiivenergia.

Olgu märgitud, et taastuvenergia saab liigitada alternatiivenergia alla.

Alternatiivse energia mõiste selgitamiseks vaatleme näiteks olukorda, kus kivisöel töötanud veesoojenduskatel on ümber ehitatud maagaasile ja saavutatud niimoodi suurem efektiivsus (kasutegur) ning seejuures suurendatud hüdrokarbonaatide suhet H/C 1-lt 4-le. Sel juhul oleme süsinikurikka kütuse asemel kasutusele võtnud süsinikuvaese kütuse.

Taastuvenergiast saaksime selle näite puhul rääkida juhul, kui ehitaksime oma veesoojenduskatla ümber näiteks biogaasi küttele, biomassist toodetud vedelküttele, puidujäätmete küttele või siis muule analoogsele.

Seega võiksid määratlused olla järgnevad:

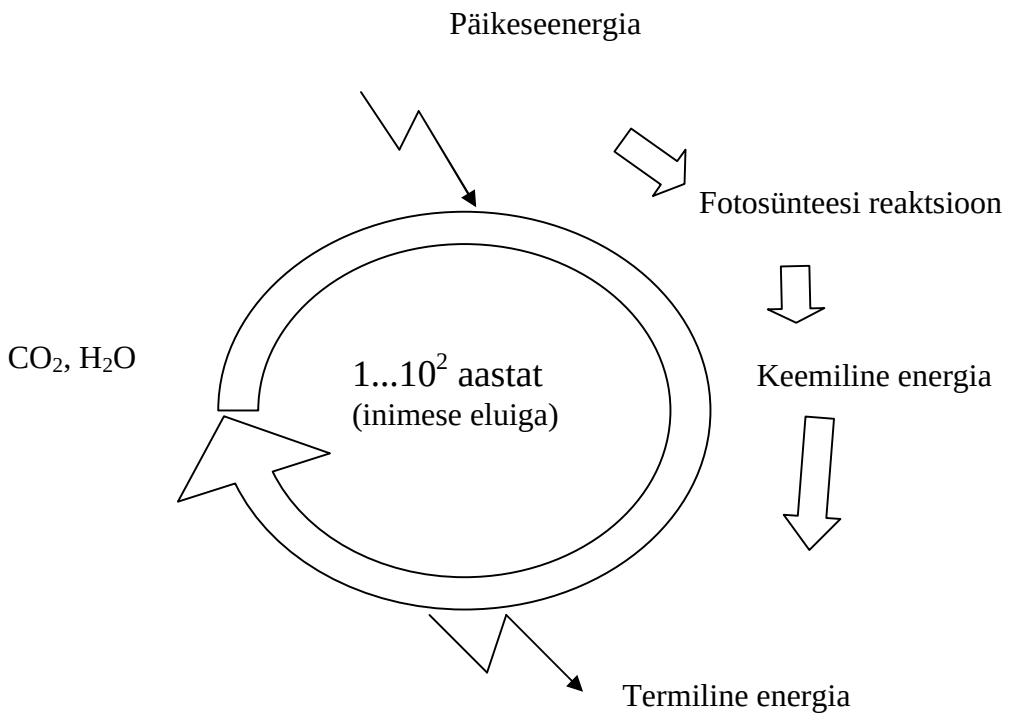
- Taastuvenergiaallikaks nimetatakse energiaallikat, mille taastumise aeg looduses jääb inimese eluea piiridesse (umbkaudu $10^2$ aastat);
- Alternatiivseks energiaallikaks nimetatakse energiaallikat, mis on kasutusele võetud paremaks ja efektiivsemaks kütuse keemilise energia muundamiseks – tegu on alternatiiviga konventsionaalsele energiaallikale.

Taastuvenergiaallikaid iseloomustatakse tihti ka kinnise ringina looduses, graafiliselt on see kujutatud joonisel 1.

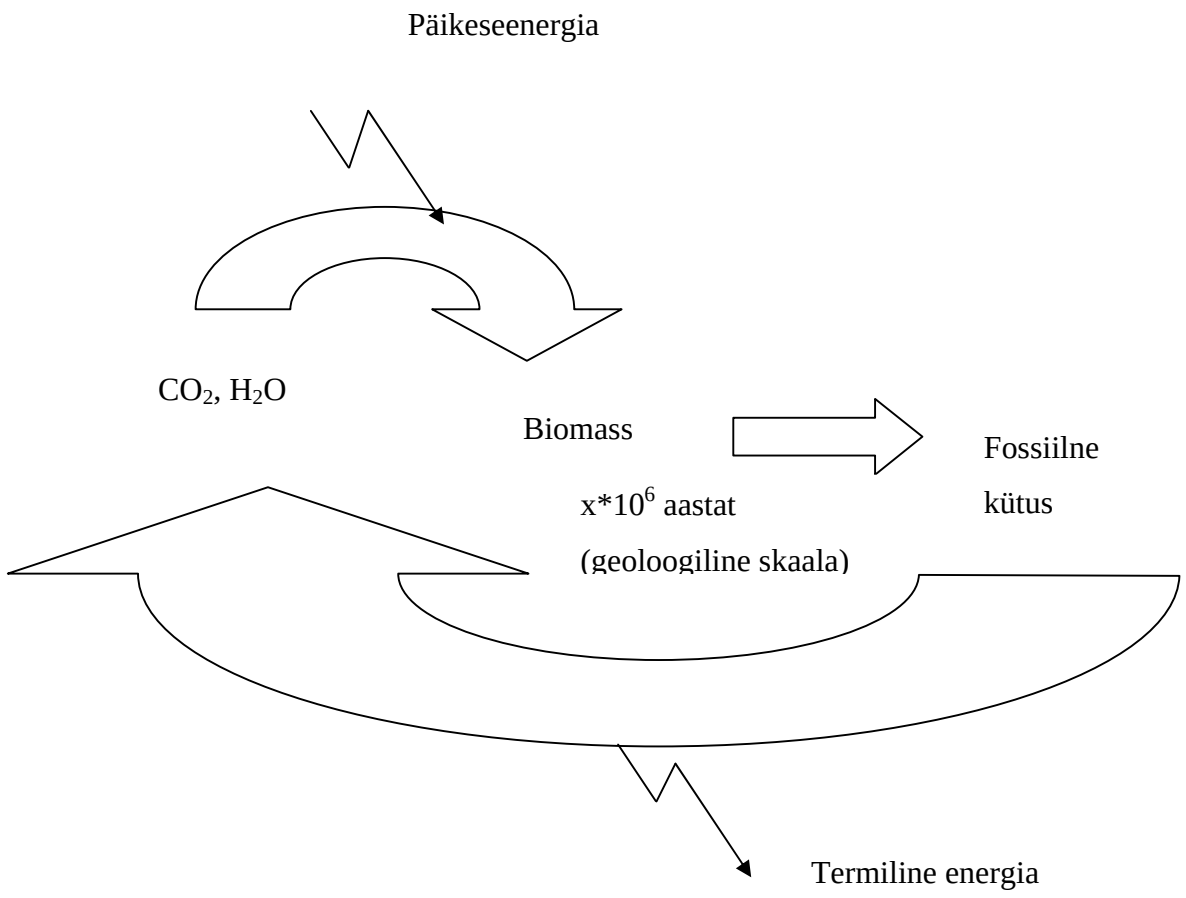
Joonis 1. kehtib vaid põlevate taastuvenergiaallikate (biokütuste) kohta. Tuuleenergia ja otsese päikeseenergia kasutamise korral on toimuvad reaktsioonid ja muundamisprotsessid teistsuguse iseloomuga.

Fossiilsete kütuste puhul on tegemist samuti (tinglikult) kinnise ringiga looduses, kuid lisandub muundumine biomassist fossiilseks kütuseks. Fossiilsete kütuste taastumise aeg looduses on suurusjärgus $10^6$ aastat ja neid iseloomustab joonis 2.

*Märkus*: Aeg, mis kulub süsihappegaasi ja vee/veeauru muundamiseks päikeseenergia abil biomassiks, on vaadeldav taas inimese eluea suurusjärgus $10^2$. Seevastu aeg, mis kulub biomassi muundumiseks fossiilseteks kütuseteks, on mitu suurusjärku suurem.




**Joonis 1. Põlevate taastuvenergiaallikate kinnine ring looduses**

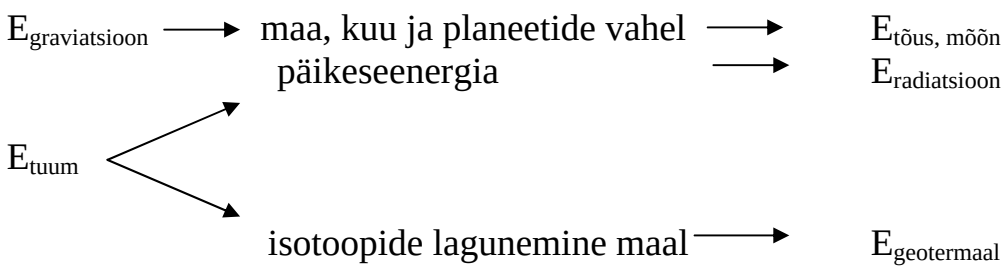



**Joonis 2. Fossiilsete kütuste tinglikult kinnine ring looduses**

## 3.2 Taastuvenergia allikad

Esmaseid algallikaid saab välja tuua kaks:

- gravitatsioonienergia;
- looduslik tuumaenergia:
  - radiatsioonienergia;
  - geotermaalenergia.




Teoreetiline potentsiaal lähtudes taastuvenergiaallikatest neile kolmele allikale on järgnev [1]:

- Päikeseenergia($E_{radiatsioon}$) – ca. 15 000 * WED;
- Geotermaalenergia($E_{geotermaal}$) – ca. 1,5 * WED;
- Gravitatsiooni energia($E_{gravitatsioon}$) – ca. 0,15 * WED.

*Märkus:* WED – World Energy Demand (Maailma energiavajadus), antud juhul arvestatakse selleks 500 EJ/aastas=500*$10^{18}$ J/aastas.

Kõik eespool toodud suurused on empiirilised, kuid suurusjärkude võrdlemise tulemusena avaldub kõige suurema potentsiaaliga energia.

Enim tähelepanu tuleks seega pöörata taastuvenergia puhul just päikeseenergiale.

## 3.3 Päikeseenergia

Kuna päikese tuumaenergia on looduslik, inimtegevusest sõltumatu nähtus, pole edaspidi tema “tuuma” päritolu enam rõhutatud.

Päikeseenergia muundumine erinevateks tehnoloogilisteks energialiikideks toimub järgnevatel viisidel:

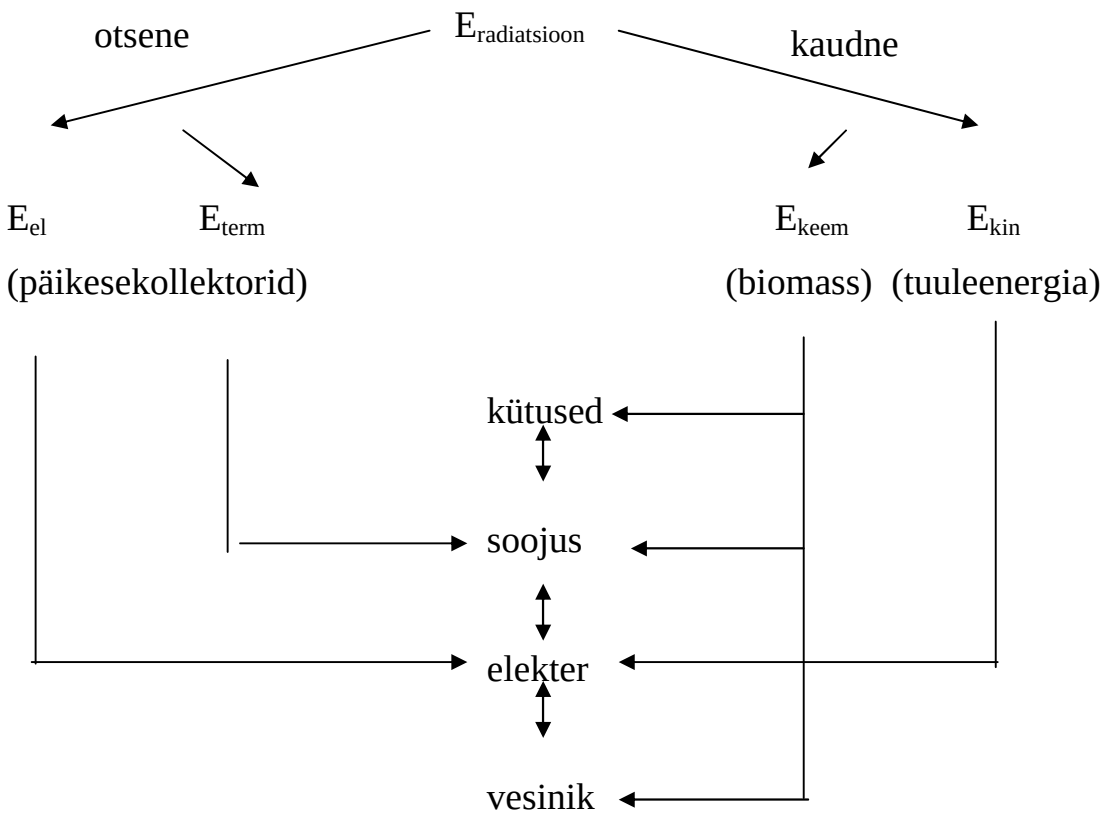
- otseselt:

- elektrienergia (päikesekollektorid elektri tootmiseks);
- termiline energia (päikesekollektorid sooja (sooja vee) tootmiseks).

- kaudselt:
  - kineetiline energia (tuuleenergia);

  keemiline energia (biomass).

Päikeseenergia muundamise astmeid iseloomustab joonis 3.:




**Joonis 3. Päikeseenergia muundamise astmed**

Otseselt kasutatakse päikeseenergiat päikesekollektorites (nii sooja vee kui elektrienergia saamiseks).

Päikeseenergia muundumist biomassiks võib vaadelda kui kaudset protsessi, kuna päikeseenergia salvestatakse elusloodusses (flora ja fauna). Teisisõnu, päikeseenergia on elusloodusse kasvu eelduseks.

Tuuleenergiat ja tema muundumisprotsesse käsitletakse edaspidi.

Joonisel 3. toodust nähtub, et kõige huvipakkuvamaks võib osutuda biomass. Teiste energiamuundamisliikide puhul saame vaid spetsiifilise produkti, biomassi kasutamise korral on võimalik saada kõiki praegusel ajal huvipakkuvaid energialiike, sealhulgas

vesinikku, mis on eeldatavasti selle sajandi esimese poole kõige huvipakkuvam “uus” kütus.

*Märkus:* ulmekirjanduses (J. Verne. “Saladuslik saar”) esitati vesinikuenergeetika idee juba 19. sajandil, kuid reaalne tehnoloogia pole siiani seda masstootmisesse suutnud viia.

## 3.4 Kyoto protokoll ja taastuvenergiat soosivad mudelid

Maailmas on tänaseks tehtud mitmeid kasvuhoonegaaside (sealhulgas süsinikdioksiidi kui suurima saastaja) vähendamise plaane. 1997. aasta septembri alguses toimus Kyotos kolmas ÜRO kliimamuutuste raamkonverents. Konverentsil sõlmiti raamkonventsioon ehk nn. Kyoto protokoll, kus osalusriigid leppisid kokku vähendada kasvuhoonegaaside emissiooni ümbritsevasse õhku. Baasaastaks valiti aasta 1990. Kyoto protokolli lisas B on toodud heitkoguste tase aastateks 2008-2012 protsentuaalselt võrrelduna baasaastaga. [2]

Kyoto protokollis võetud kohustused on kõige sobivamad täitmiseks turumajandusele üleminevates riikides (mille hulka kuulub ka Eesti). Seoses majanduse ümberstruktureerimise ja ekspordi vähenemisega (sealhulgas elektritootmise kolmekordse vähenemisega) on Eesti omale võetud kohustuse mitmekordselt täitnud. 1990. aastal oli Eesti kasvuhoonegaaside emissioon ümbritsevasse õhku 37,172 $MtCO_2$ ekvivalenti. 1999. aastaks oli kasvuhoonegaaside emissioon alanenud 11,553 $MtCO_2$ aastas. Seega on Eesti alandanud kahjulike heitmete emissiooni Kyoto protokolli alusel kohustuseks võetud 8 protsendi asemel 68,92 protsenti. [3]

Maailmas on palju heaoluriike, kus kasvuhoonegaaside vähendamine on kallis (Rootsis on peamised saasteainete emiteerijad transport ja tööstus – elektritootmine toimub tuuma- ja hüdrojaamades). Teisalt. Ida-Euroopa riikides on emissioonide ülejääk, mis vajaks realiseerimist (kuigi seda defineeritakse kui “kuuma õhku”, sest reaalselt pole tehnoloogiaid uuendatud ega investeeringuid tehtud).

Ühelt poolt ostjate ja teisalt müüjate huvist lähtuvalt on leitud Kyoto protokollis toodud kohustuste täitmiseks moodus kasvuhoonegaaside kaubanduse näol. Reaalselt pole turg veel käivitunud, kuid erinevaid mudeleid kasvuhoonegaasidega kauplemiseks luuakse.

Loomulikult ei tähenda kasvuhoonegaaside vabade emissioonidega kauplemine otsest emissioonide vähendamist, lihtsalt need kantakse ühe riigi arvelt teisele. Teine aspekt – kuhu paigutatakse kasvuhoonegaaside müügist saadav tulu. Kuna kasvuhoonegaaside turustajateks on hetkel üleminekumajandusega riigid, siis oleks kõige otstarbekam paigutada saadav tulu edasisele kasvuhoonegaaside vähendamisele. Üks mudel, mis on otseselt seotud ka kasvuhoonegaaside vähendamisega, on nn ühisrakendus (Joint Implementation). Ühisrakenduse korral kantakse reaalselt ärahoitud emissiooni ühikud üle doonorriigile. Vastuvõtja riik saab ühisrakendusprojektide abil uuel tehnoloogial põhineva või renoveeritud süsteemi.

Kasvuhoonegaaside emisiooni reaalseks ärahoidmiseks on välja pakutud rida stsenaariume [1].

- Omaenda käitumise ja energiatarbimise muutmine – väheneb energiatarve ja seega ka $CO_2$ tootmine;
- Ratsionaalne energia kasutamine – oskusteave ja uued tehnoloogiad kasuteguri suurendamiseks, paremate isolatsioonimaterjalide kasutamine;
- Asendamine:
  - Süsinikuvaesed kütused süsinikurikaste asemele;
  - Süsinikuvabad kütused – tänapäeva arengust lähtudes tuleb vaatluse alla vesinik. Probleem seisneb vesiniku puhul selles, et valdav enamus praegu toodetavast vesinikust on muundatud maagaasist (metaanist) ja seega ei saa seda nimetada süsinikuvabaks kütuseks. Süsinikuvabast vesinikust saab rääkida juhul, kui toodame elektrienergiat taastuvate energiaallikate baasil ja elektrienergia ülejäägi korral toodame veest elektrolüüsi teel vesinikku ja hapnikku. Praeguste tehnoloogiate juures on siiski veest vesiniku tootmiseks vajaminev elektrienergia hulk kolm korda suurem kui hiljem vesinikust kütuseelemendis muundamise teel saadav elektrienergia. Seetõttu on eespool kasutatud sõna “ülejääk”;
  - Taastuvad energiaallikad:

    põlevad - tinglikult süsinikuvabad (biomass sisaldab süsinikku, kuid juba eespool vaadeldud kinnise ringi tõttu looduses on ta taastuv energiaallikas);

mittepõlevad – tuuleenergia, päikeseenergia (kogutuna päikesekollektorite poolt), hüdroenergia.

- Uued tehnoloogiad – raske vee ja tritiumi isotoopide liikumise energia, tuumaenergia.

## 3.5 Fossiilsete kütuste varud

Hinnangud fossiilsete ja tuumakütuste varudele on erinevate dekaadide jooksul muutunud ja seoses järjest uute leiupaikadega ka mõnevõrra pikenenud. Siiski on ühene arvamus, et kui energiatarbimine jätkub tõusvas joones ja tänast tehnikat kasutades, on kõik tänapäeval kütustena tuntud maavarad lähema saja aasta jooksul ammendunud. Seega ei ole inimkonnale antud just palju aega leidmaks uusi lahendusi ja tehnoloogiaid maailma energiatarbe rahuldamiseks. Kõige keerulisemaks osutub arvatavasti probleem transpordimajanduses, sest vedelkütuse hinnad kasvavad seoses leiukohtade paiknemisega järjest sügavamal merede ja ookeanide põhjas. Arvatavasti hinnad jäävadki kasvama ning teatud piirist alates pole enam nafta puurimisel ja töötlemisel mõtet. Pealegi on nafta tagavarasid ennustatud ajaliselt kõige lühemaks võrreldes söe ja gaasiga. Tuleb mängu vesinik, mis oma tulevikuväljavaadetelt omabki vast kõige suuremat kandepinda transpordis.

# 4 Tuuleenergia

## 4.1 Päikeseenergia muundumine tuule kineetiliseks energiaks

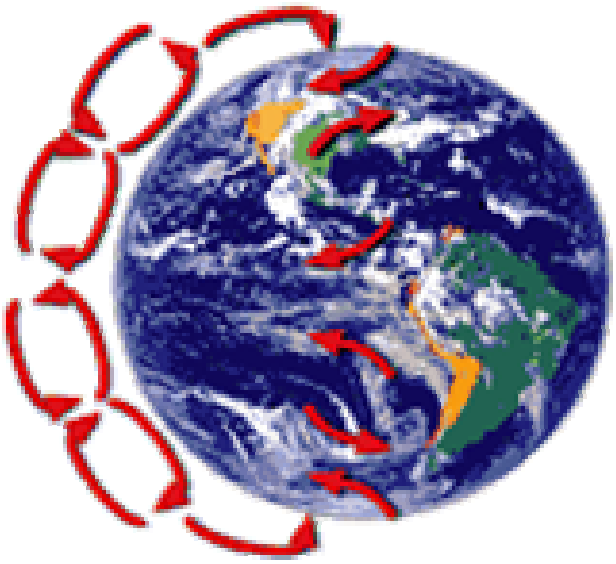
Maale jõudev päikeseenergia on ligikaudu võrdne 100 000 000 000 000=$10^{14}$ kWh energiaga tunnis [4].

1– 2% Maale jõudvast päikeseenergiast muundub tuuleenergiaks. Muundumisprotsess toimub tänu temperatuurierinevustele maapinnal. Päike soendab rohkem ekvaatori lähedal asuvaid ja vähem pooluste lähedal asuvaid regioone. Maapinnas ja meredes akumuleerunud soojus soendab õhku ning seoses akumuleerunud soojuse erinevustega tekivad õhutemperatuuride erinevused. Soe õhk on kergem kui külm ja seetõttu tõuseb ta ekvaatori lähedastest piirkondadest üles umbes 10 km kõrgusele

ning suundub kas põhja või lõunasse. Maakera pöörlemise tõttu ümber oma telje hakkab õhumass liikuma. Seega on tuule ehk õhurõhkude erinevuse tekkel kaks põhjust:

- Õhutemperatuuride erinevus;
- Maa pöörlemine ümber oma telje.

Näivat väändejõudu, mis tekib maakera pöörlemisel, nimetatakse tuntud prantsuse matemaatiku Gustave Gaspard Coriolis'e (1792-1843) järgi coriolis'e jõuks.



**Joonis 4. Tuule liikumise suund erinevatel kõrgustel maapinnast**

*Märkus:* Joonis 4. näitab, millistes kihtides toimub tuule liikumine põhja ja lõunasse. Tuul tõuseb üles ekvaatori lähedal ning liigub põhja ja lõunasse ülemistes atmosfäärikihtides. 30. laiuskraadi juures mõlemal pool ekvaatorit paneb coriolis'e jõud tänu suurele rõhkude erinevusele õhu palju kiiemini liikuma ja sellel laiuskraadil hakkab õhk taas vajuma alla.

Kuna tuul tõuseb üles ekvaatoril, siis maapinna lähedal on madala rõhu piirkond, mis "tõmbab ligi" tuuli põhjast ja lõunast. Poolustel on tänu õhu jahenemisele taas kõrgrõhkkond.

Coriolis'e jõust lähtuvalt on valdavad tuulesuunad vastavalt laiuskraadidele järgnevad:

| Laiuskraad | 90-60?N | 60-30?N | 30-0?N | 0-30?S | 30-60?S | 60-90?S |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tuule suund | NE | SW | NE | SE | NW | SE |

*Märkus:* Valdavad tuule suunad on tähtsad tuulegeneraatorite installeerimise puhul. Selle järgi määratakse tuuliku 0? suund. Loomulikult mängivad valdava tuule suuna puhul rolli kohalikud takistused ja muud mõjurid, seega tuleks valdav tuule suund määrata siiski mõõtmistulemuste alusel.

Joonisel 4. on tuuled maakeral näidatud karikatuuris. Tegelikkuses on maad ümbritsev troposfäär ainult 11 km õhuke ehk 1/1200 Maa diameetrist ja seal on 75% kogu Maad ümbritsevast õhust. Enamjaolt troposfääris leiab aset kasvuhooneefekt, mistõttu on see 11 km piirkond, mida peaksime hoidma ja mitte saastama.

Tuuled saab jaotada järgnevalt:

- geostroofne (tsüklonaalne) tuul;
- kohalikud tuuled:
  - meretuul – maapind soeneb kiiremini kui meri (veekogu), päeval on õhk mere kohal külmem kui maapinna kohal. Maapinnalt tõuseb õhk ülemistesse kihtidesse ja suundub mere (veekogu) poole, tekitades maapinna lähedal madalrõhkkonna, kuhu tinglikult imetakse õhku merelt;
  - maatuul – vastupidine olukord tekib öösel, kuna maapind jahtub kiiremini kui meri (vesi). Seoses väiksemate temperatuurierinevustega on maatuul väiksema kiirusega kui meretuul;
  - mägede tuul – päeval soojendab päike orud kiiremini üles kui ümbritseva maapinna ja seetõttu tõuseb soe õhk üles. Külmemad õhumassid imetakse orgu mööda mäekülgi. Juhul kui on tegemist mäeahelikuga, võib tekkida olukord, kus tuul hakkab liikuma piki orgu – tekib nn tuulekanal.

Nimetatud kohalikud tuuled on Eestis tuuleenergeetika seisukohalt kasutamiskõlbmatud. Peamine tuuleenergia tuulikutele on pärit tsüklonaalsest tegevusest.

## 4.2 Tuule kiirus sõltuvana maastiku iseloomust

Järgnev ülevaade on tehtud õppematerjali [1] alusel.

Maapinnal on tuule kiirus 0 m/s. Mida suurem on kõrgus maapinnast, seda suurem on tuule kiirus. Tuule kiiruse kasv ei ole lineaarne kõrgusega maapinnast, vaid sõltub maastiku iseloomust. Viimast iseloomustab astendaja ?:

$$V(z)=V_r(z/z_r)^{?},\ m/s \qquad (3.2.1.)$$

Valemis on $z$ kõrgus maapinnast ja $V_r$ teadaolev tuulekiirus kõrgusel $z_r$. Kui soovime arvutada tuule kiirust 40 m kõrgusel ja arvestame, et tuule kiirus 10 m kõrgusel on 5 m/s ning ?=0,1 saame, et $V(z)=5(40/10)^{0,1}=5,74$ m/s

On olemas ka täpsem valem:

$$V(z)/V(z_r)=ln(z/z_0)/ln(z_r/z_0) \qquad (3.2.2.)$$

Siin on $z_0$ kareduskõrgus (roughness length), mis määratakse vastavalt ümbruskonna takistustele.

Kareduskõrguse klassid on toodud tabelis I. [4]

**Tabel I. Kareduskõrguse klassid**

| Maastiku tüüp | Kareduse klass | Kareduskõrgus $z_0$, m | Energiaindeks, protsentides | Astendaja ? |
|---|---|---|---|---|
| Veekogu | **0** | **0,0002** | **100** | **0,01** |
| Avatud tasane maa, ilma maastiku ebatasasusteta | **0,5** | **0,0024** | **73** | |
| Avatud tasane maa (põllumaa), väikesed maastiku ebatasasused | **1** | **0,03** | **52** | **0,12** |
| Põllumaa koos mõnede majade ja 8 meetrit kõrge hekiga umbes 1250 meetri kaugusel | **1,5** | **0,055** | **45** | |
| Põllumaa mõnede majade ja 8 meetrit kõrge hekiga umbes 500 meetri kaugusel | **2** | **0,1** | **39** | **0,16** |
| Põllumaa paljude majadega, või 8 meetri kõrgune hekk umbes 250 meetri kaugusel | **2,5** | **0,2** | **31** | |
| Külad, väikesed linnad, põllumaa koos metsa ja väga ebatasase maastikuga | **3** | **0,4** | **24** | **0,28** |
| Suuremad linnad kõrgete majadega | **3,5** | **0,8** | **18** | |
| Väga suured linnad koos pilvelõhkujatega | **4,0** | **1,6** | **13** | |

Tuuliku (tuulikute pargi) projekteerimisel tuleb määrata kareduse klassid. Selleks jagatakse tuuliku ümber jääv maa-ala 12 sektoriks ja määratakse iga sektori kareduse klass. Visuaalne määramine toimub kuni 2 km ulatuses ja edasine määramine kuni 20 kilomeetrini (viimase puhul kasutatakse detailset kaarti).

Kareduse klasside määramine on subjektiivne, kuid nendega arvestamine aitab vähendada riske.

## 4.3 Tuule kineetilise energia muundamine mehhaaniliseks ja elektrienergiaks

Järgnev ülevaade on tehtud raamatu [5] alusel.

Tuuliku ülesanne on tuule kineetilise energia muundamine:

- elektrienergiaks;
- mehhaaniliseks energiaks (vee pumpamine);
- soojus- ehk termiliseks energiaks.

Käesolevas töös käsitletakse tuuleenergia muundamist elektrienergiaks.

Tuule kineetiline energia muundatakse esmalt tänu tuuliku labadele mehhaaniliseks energiaks (pöördemomendiks). Pöördemoment kantakse võlli abil üle käigukastile (osadel mudelitel pole käigukasti) ja sealt edasi generaatorile.

Tuulelt tuuliku labadele üle kantav energiahulk sõltub:

- tuule kiirusest;
- rootori (tiibade) pindalast;
- õhu tihedusest.

*Õhu tihedus* - liikuva keha (antud juhul õhu molekulide) kineetiline energia on proportsionaalne keha massiga (kaaluga). Seega sõltub õhu kineetiline energia samuti õhu massist ehk tihedusest (mass ruumalaühiku kohta). Mida "raskem" (tihedam) on õhk, seda rohkem energiat saab tuuleturbiin.

Normaalne õhu tihedus 15 ?C juures on 1,226 kg/m$^3$, kuid tihedus väheneb veidi niiskuse suurenedes. Õhu tihedus on sõltuvuses õhu temperatuurist (temperatuuri kasvades õhu tihedus väheneb) ja vähesel määral õhurõhust (mägedes on õhurõhk madalam ja õhk seega hõredam).

*Rootori pindala* – Rootori läbimõõt määrab, kui palju on tuuleturbiin suuteline tuule kineetilisest energiast vastu võtma. Näiteks tavapärastel tuulikutel võimsusega 600 kW on rootori diameeter 43-44 meetrit. Seega hõlmab rootor pinda 1500 m$^2$ (ringi pindala on $?(½d)^2$).

Rootori pindala on piltlikult tuuliku tiiva otsa poolt joonistatud ringi pindala.

Tuule võimsuse arvutamiseks peame kasutama kineetilise energia arvutusvalemit:

$$E = ½V^2, \text{ m}^2/(\text{s}^2*\text{kg}) \qquad (3.3.1.)$$

Õhu massivoog:

$G = ?AV$, kg/s (3.3.2.)

Tuule võimsus:

$W= (?AV)* ½V^2=½?AV^3$, W=J/s (3.3.3.)

Antud valemeis on *?* tihedus (kg/m$^3$), *V* tuule kiirus (m/s) ja *A* rootori pindala m$^2$.

Õhu tihedus on leitav valemist:

$?=?_0(288B/760T)$, kg/m$^3$ (3.3.4.)

$?_0$=1.226 kg/m$^3$ – õhu tihedus normaaltingimustel (temperatuuril 15 ?C=288 K ja rõhul 760 mm Hg). Valemis on *T* ja *B* vastavad hetkelised näidud (nii temperatuur kui rõhk on sõltuvad kõrgusest merepinnast).

Lihtsustatuna saab võtta tavalise keskmise tiheduse merepinnal, ?=1,2 kg/m$^3$. Järelikult saame tuule võimsuse arvutuseks valemi

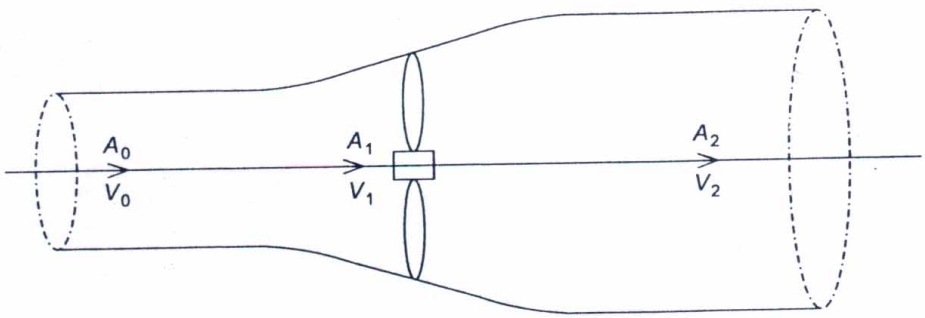
$W = 0,6V^3$, W/m$^2$ (3.3.5.)

Reaalselt pole kogu tuule kineetilist energiat võimalik muundada mehhaaniliseks energiaks. Teoreetiline maksimum on piiratud Betz'i limiidiga, mis on 59 %.

Tuuliku installeerimisel tuleb arvestada kõikvõimalike kadudega, seega tegelikkuses on võimalik muundada tuule kineetilisest energiast elektrienergiaks umbes 30 – 40%.

Betz'i limiidi ehk teoreetilise maksimumi arvutuseks tuleb vaadelda tuulegeneraatorit (Joonis 5.), kus:

- tuule kiirus enne tuulikut on $V_0$ ja massivoo ristlõige $A_0$;
- tuule kiirus tuuliku labade vahel $V_1$ ja massivoo ristlõige $A_1$;
- tuule kiirus pärast tuulikut $V_2$ ja massivoo ristlõige $A_2$.




**Joonis 5. Tuule kiiruse ja ristlõike suhe enne ja pärast tuulegeneraatorit**

*Märkus:* Pärast tuulikut on massivoo ristlõige suurem ja tuule kiirus väiksem kui enne, kuna osa energiast kasutatakse ära.

Massivoog on sama kõikidele ristlõigetele:

$m=?A_0V_0= ?A_1V_1= ?A_2V_2$, kg/s (3.3.6.)

Jõud $F$ , mis mõjub rootorile:

$F=m(V_0-V_2)$, N (3.3.7.)

Võimsus $W$ avaldub kineetilise energia valemi kaudu:

$W=m(½V_0^2-½V_2^2)$, W (3.3.8.)

Rootoril avaldub töö kiirusel $V_1$:

$W=FV_1$, W (3.3.9.)

Asendades valemid (3.3.7.) ja (3.3.8.) valemisse (3.3.9.) saame:

$V_1=½(V_0+V_2)$, m/s (3.3.10.)

Arvutuste lihtsustamiseks kasutame suurust:

$b=V_2/V_0$ (3.3.11.)

Kasutades võrdusi (3.3.9.), (3.3.8.) ja (3.3.6.) saame:

$F/A_1=½?V_0^2(1-b^2)$, N/m$^2$ ja $W/A_1=½?V_0^3*½(1-b^2)(1+b)$, W/m$^2$

(3.3.12.)

Koefitsient $C_p$ on defineeritud kui energia osa, mis suudetakse muundada mehhaaniliseks energiaks tuulegeneraatori poolt kogu tuuleenergiast, mis voolab läbi rootori pindala, kui turbiini seal poleks.

$C_p=W/W_1$ (3.3.13.)

Maksimaalne energia, mis voolab läbi rootori pinna, kui seal pole takistusi:

$W_1=½?A_1V_0^3$, W (3.3.14.)

Seega:

$C_p=½(1-b^2)(1+b)$ (3.3.15.)

**Kui b=1/3 siis $C_p$=16/27 ehk umbes 59%.**

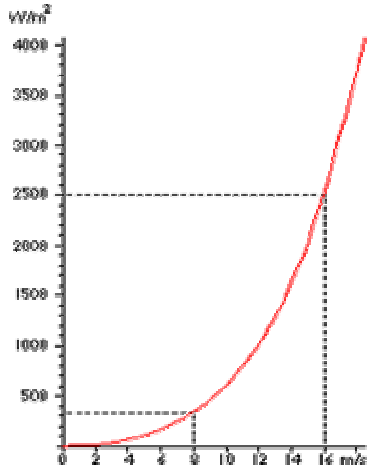
Betz'i limiit on välja töötatud 1919. a. ja sobib kõikidele tuuleturbiini tüüpidele.

Peamised kaod tuuleturbiinidel tuuleenergia vastuvõtmisel on viskoosne pidurdumine tiibade pinnal, pööriste tekkimine (turbulentsid) ja võimsuskaod ülekandes ning elektrigeneraatoris.

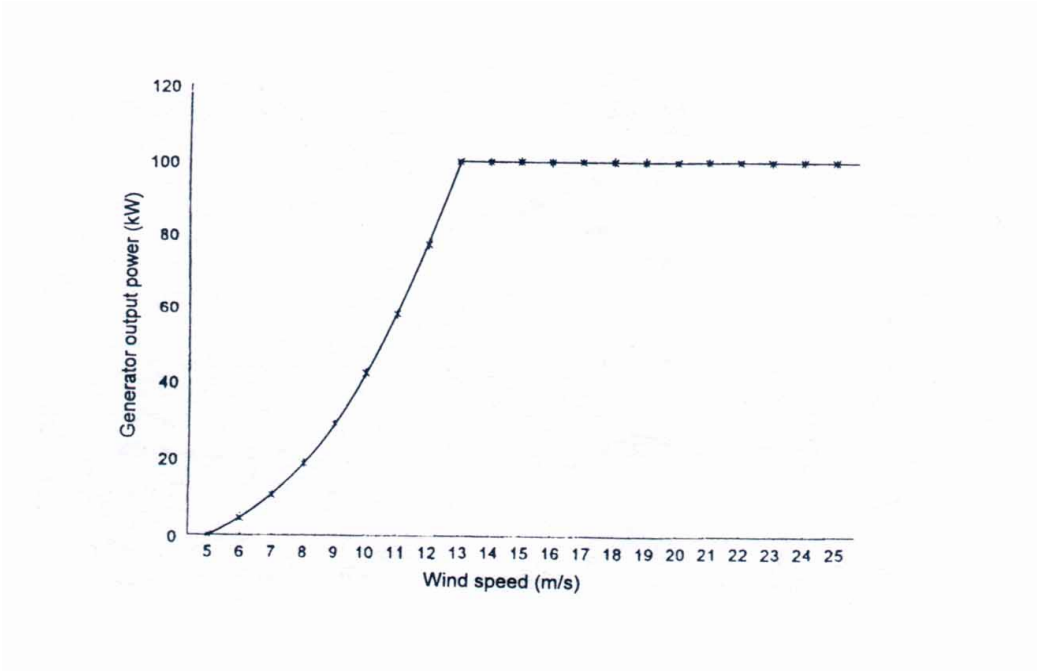
Joonisel 6. toodud võimsus pinnaühiku kohta, mis on tuule kiiruse astmefunktsioon.

Järelikult tuule kiirusel 8 m/s saab ruutmeetrilt veidi üle 310 W. Reaalselt tuleb arvestada eespool kirjeldatud $C_p$ väärtustega, ülevaate saamiseks reaalsetest võimsustest tuleb kasutada valemit:

$W=C_p*½?A_1V_0^3$, W (3.3.16.)




**Joonis 6. Tuule võimsus pinnaühiku kohta sõltuvana tuule kiirusest**




**Joonis 7. Võimsuskõver 100 kW võimsusega tuulegeneraatorile**

Joonisel 7. toodud graafikult on näha, et generaator lülitatakse tööle tuule kiirusel 5 m/s. Enne seda on tuule kiirus sedavõrd madal, et elektrienergia tootmine ei tasu end ära. Siiski on olemas tuulikuid, mis lülitatakse tööle 2 m/s juures (see pannakse paika tehases tellija poolt, arvestades paigutamiskoha iseärasusi).

Antud juhul on tuuliku nominaalseks võimsuseks 100 kW. Reaalsetel tuulikutel piirab regulaator teatud tuule kiirusest alates võimsuse edasise kasvu ja sellepärast on graafiku “lõpp” horisontaalne.

Horisontaalset võimsuse joont hoitakse kõige paremini “pitch control”-meetodi abil – tuuliku tiivad on mootoriga pööratavad – mida suurem on tuule kiirus, seda rohkem neid tuulest välja pööratakse.

100 kW on tootja poolt valitud optimaalne võimsus, millele vastavalt valitakse tuuliku labad, tehakse tugevusarvutused jne.

Üldiselt lülitatakse tuulik 25 m/s juures välja, kuna vastasel korral võivad tekkida mehhaanilised purunemised.

Joonis 7. näitab, et kui räägitakse tuulikust võimsusega x, siis mõeldakse selle all nominaalvõimsust. Kuna nominaalvõimsus saavutatakse tuulegeneraatorite puhul tuule kiirustel vahemikus 12 – 16 m/s, siis enamuse ajast töötab tuulik osalisel koormusel.

*Märkus:* näiteks Eesti rannikualadel on keskmine tuulekiirus kuni 8 m/s (50 m kõrgusel), seega eespool toodud graafiku alusel toodab tuulegeneraator 20 kW, mis on 20% nominaalvõimsusest.

## 4.4 Maailma tuulepotentsiaal

Ülevaade maailma tuulepotentsiaalist on tehtud DWIA [4] materjalide alusel.

Et vaadelda maailma tuulepotentsiaali, tuleb teada maailma keskmist tuule kiirust. Neid tuule kiirusi on mõõdetud ja publitseeritud erinevate riikide ja regioonide tuuleatlastes. Maailma Energeetikanõukogu 1994. aasta andmeil on 10 meetri kõrgusel 27%-l maapinnast tuule kiirus suurem kui 5,1 m/s. Kuid ainult 4% sellest on potentsiaalselt võimalik katta tuulegeneraatoritega (mittesobiv maa, linnad, põldude ja muu maakasutus).

Eeldades tootlikkust 8 $MW/km^2$ ja võimsuskoefitsenti 23 %, saame, et tuulest toodetav elektrienergia kogus võiks teoreetiliselt olla 20000 TWh aastas (võrdluseks – näiteks 1987. a. oli kogu maakera summaarne elektrienergia toodang 10500 TWh ja Eesti aastane elektrienergia toodang on praegu umbkaudu 8…9 TWh).

Seega, tuulepotentsiaal on tohutu, arvestades, et see arvutus oli tehtud vaid suurte tuuleturbiinide kohta, jättes välja praegu suuresti hoogu koguva “offshore” ehk siis merre paigaldatavate tuuleparkide potentsiaali ja väikeste, näiteks vee pumpamiseks mõeldud seadmete potentsiaali.

Maailmas kasutusel olevate tuuleelektrijaamade koguvõimsus oli 2001. a. juunikuu lõpu seisuga 19 212 MW, millest 3/4 on installeeritud Euroopa Liidus. Eeldades selle installeeritud võimsuse 23%-list kasutamist, saame välja arvutada aastatoodangu:
19212*0,23*24*365=38708337,6 MWh=38,71 TWh.
Siit võib vaid järeldada, et arenguruumi tuuleenergiale veel on, sest praegusel juhul on ära kasutatud vaid 38,71/20000=0,0019 ehk siis vaid ligilähedaselt 2% võimalikust.

## 4.5 Eesti tuulepotentsiaal

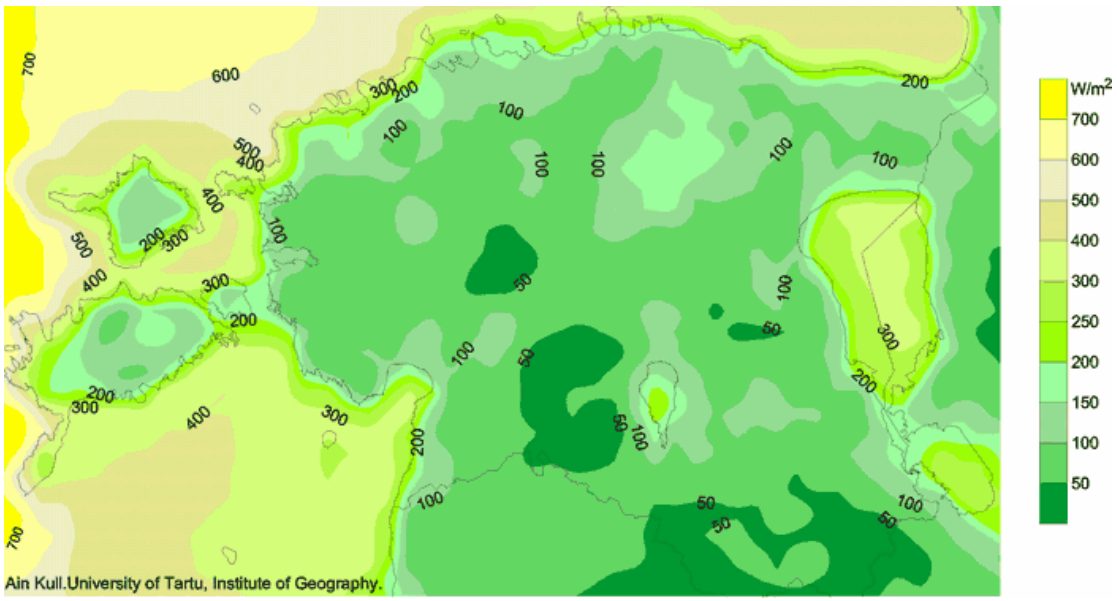
Järgnev ülevaade on koostatud Hr. Vello Selja teadustöö [6] baasil.
Eestis on teoreetiliselt kasutatavaks tuule energeetiliseks potentsiaaliks umbes 7 TWh aastas. Selle arvestamise aluseks on piirkonnad, kus tuule keskmine kiirus on 5 m/s või rohkem. Ilmselgelt on kasutatav tuuleressurss väiksem, kuna tuleb arvestada nii tehniliste, majanduslike, maakasutuse, maastikuesteetika, visuaalsete ja paljude teiste aspektidega. Hr. Ain Kulli uuringud [8] antud valdkonnas on näidanud, et umbkaudu 25%-le saarte ja rannikualade territooriumist ei tekiks tuulikute installeerimisega probleeme, 60% aladest tuleks leida kompromisslahendused üldplaneeringu osas ning 15% aladest on tuulikute püstitamiseks sobimatud (kaitsealad, asulad, linnad). Ainuüksi nendel aladel, kus puuduvad igasugused piirangud tuulikute püstitamiseks ning madala toodetava elektrienergia omahinna saavutamiseks kehtestatud piiranguga aasta keskmise tuule kiiruse osas vähemalt 6 m/s, on võimalik konfliktivabalt toota Lääne-Eesti saarestikus umbes 150 GWh aastas, Lääne-Eesti mandri rannikualadel umbes 150 GWh aastas ning Põhja-Eestis umbes 100 GWh aastas elektrienergiat. Kokku 400 GWh elektrit aastas ehk umbkaudu 5% Eesti toodangust.
Kokkuvõttes võib öelda, et Eestis on sobivaid piirkondi ja väga häid tingimusi tuuleparkide rajamiseks enam kui vaja praegusest elektrienergia tarbimisest 10% tootmiseks [9].
Hr. Indrek Aarna pakub teiste seas Eestis installeeritud tuule võimsuseks 560 MW ja toodanguks sellest 1,28 TWh (tabel II.)

**Tabel II. Erinevate taastuvate energiaallikate teoreetiline potentsiaal Eestis [10]**

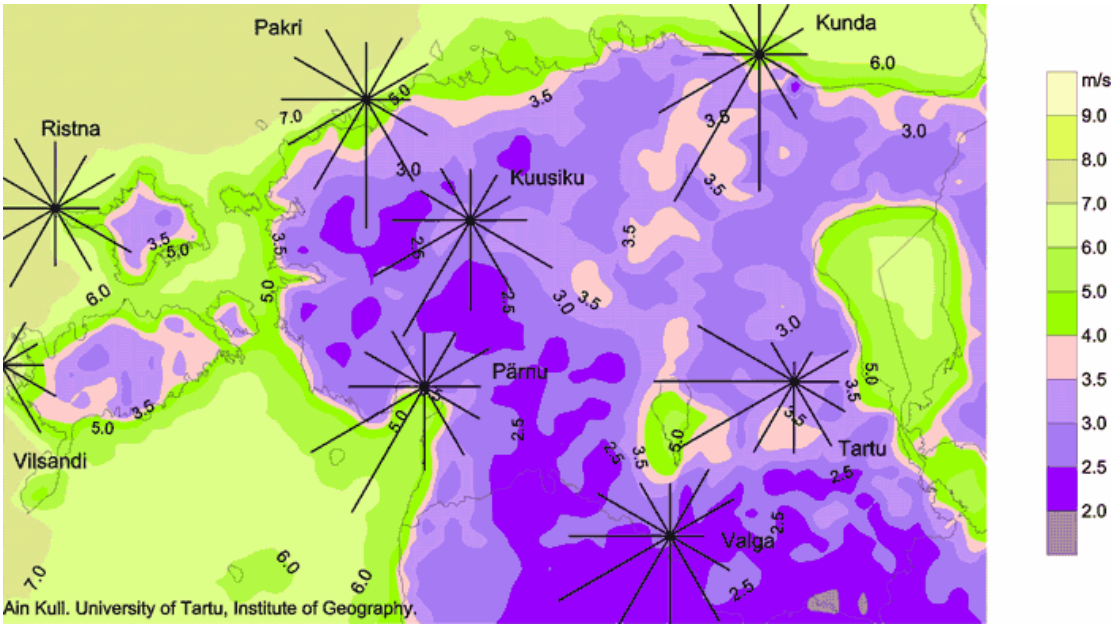
| | **Tootmisvõimsus** | **Aastane elektrienergia toodang** | **Tootmishind EEK (Euro)/kWh** |
|---|---|---|---|
| Koostootmisjaamade potentsiaal:<br>- biomass<br><br>- maagaas<br><br>- jäätmed | 105 MW | 0,75 TWh | <br>0,65-1<br>(0,041-0,064)<br>0,45<br>(0,029)<br>1-1,5<br>(0,064-0,096) |
| Tuuleenergia potentsiaal | 560 MW | 1,28 TWh | 0,8-1,5<br>(0,051-0,096) |
| Hüdroenergia potentsiaal | 40 MW | 0,3 TWh | 0,6-1,1<br>(0,038-0,07) |
| Päikeseenergia potentsiaal | ~500 MW | 0,2 TWh | 5-10<br>(0,32-0,64) |
| Kokku | **1205 MW** | **2,53 TWh** | |

# 5 Tuuleuuringud Eestis

Eestis on Tartu Ülikooli Geograafia Instituudi [7] poolt koostatud Eesti Metroloogia ja Hüdroloogia Instituudi tuulemõõteseadmete andmete alusel tuuleatlas. Paljuski võib selle tõepärasuses tänu tuulemõõtseadmete asukohale ja kõrgusele maapinnast (10 meetrit) kahelda, kuid suurtes piirides annab ta ülevaate Eesti tuuleressursist.

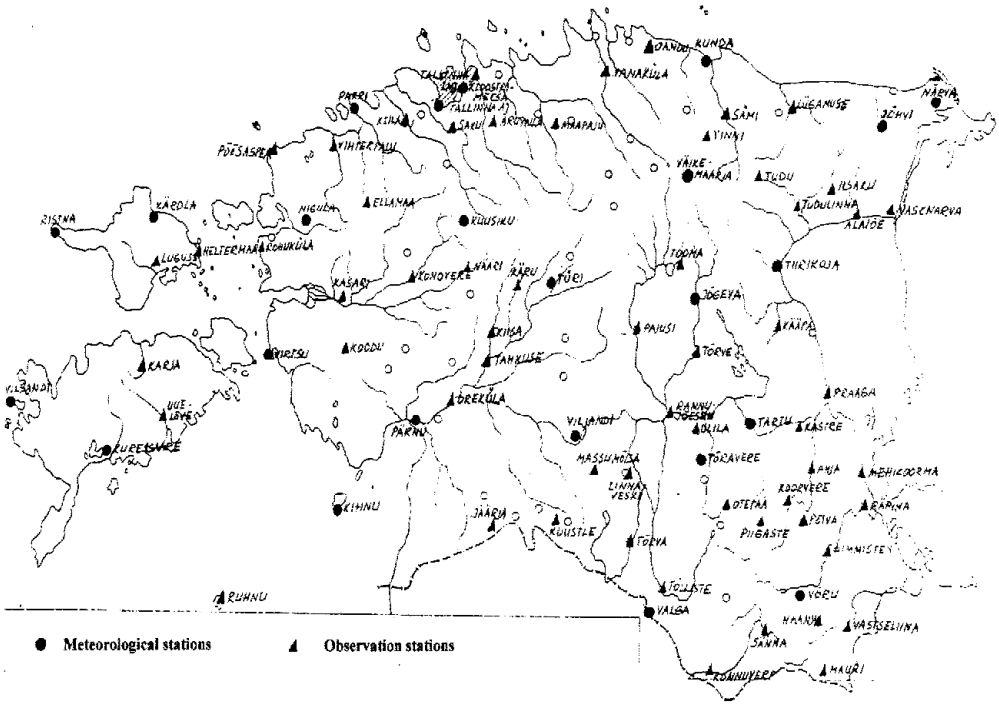



**Joonis 8. Energiatihedus 30 meetri kõrgusel**




**Joonis 9. Tuule keskmine kiirus 10 meetri kõrgusel**

Järgnev ülevaade on koostatud UNDP uurimusest võetud materjalide [11] alusel. Eestis installeeritud tuule kiiruse mõõturid on toodud joonisel 10. ja nende täpsed koordinaadid ja kõrgused maapinnast tabelis III.




**Joonis 10. Eestis installeeritud tuule kiiruse mõõturid**

**Tabel III. Tuule kiiruse mõõtmise asupaikade koordinaadid ja kõrgused maapinnast**

| Jrk. Nr. | Asukoht | N | E | Kõrgus |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Kunda | 59,31 | 26,33 | 10 |
| 2 | Pakri | 59,21 | 24,03 | 10 |
| 3 | Harku | 59,24 | 24,36 | 10 |
| 4 | Narva | 59,23 | 28,10 | 10 |
| 5 | Jõhvi | 59,20 | 27,23 | 10 |
| 6 | Väike-Maarja | 59,08 | 26,14 | 10 |
| 7 | Kärdla | 59,00 | 22,49 | 10 |
| 8 | Nigula | 58,57 | 23,59 | 10 |
| 9 | Ristna | 58,55 | 22,04 | 13 |
| 10 | Kuusiku | 58,58 | 24,44 | 10 |
| 11 | Tütikoja | 58,52 | 26,57 | 10 |
| 12 | Türi | 58,49 | 25,25 | 10 |
| 13 | Jõgeva | 58,45 | 26,25 | 10 |
| 14 | Virtsu | 58,34 | 23,31 | 10 |
| 15 | Vilsandi | 58,23 | 21,49 | 10 |
| 16 | Pärnu | 58,22 | 24,30 | 10 |
| 17 | Viljandi | 58,22 | 25,35 | 10 |
| 18 | Tartu | 58,18 | 26,44 | 10 |
| 19 | Kuressaare | 58,14 | 22,30 | 10 |
| 20 | Kihnu | 58,03 | 23,58 | 13 |
| 21 | Võru | 57,51 | 27,01 | 10 |
| 22 | Valga | 57,47 | 26,02 | 10 |
| 23 | Tõravere | 58,16 | 26,28 | 10 |
| 24 | Tallinn | 59,25 | 24,48 | 10 |
| 25 | Ruhnu | 57,47 | 23,16 | 10 |
| 26 | Sõrve | 57,55 | 22,03 | 13 |

Suuremas osas tabelis III. toodud asukohtades mõõdetakse tuule kiirust anemorumbomeetriga M-63M-1 (endise NSVL toodang). Väidetavaks täpsuseks sellel on 0,5 m/s.

Peale loetletud asukohtade teostatakse tuule kiiruse mõõtmisi uuemate, kalibreeritud ja automatiseeritud anemomeetritega mitmetes paikades Eestimaal. Nende asukohti ja kõrgusi iseloomustab kuni 1995 aasta keskpaigani paigaldatud seadmete osas tabel IV.

**Tabel IV. Automatiseeritud tuule kiiruse mõõtmise seadmete asukohad ja kõrgused**

| Jrk. Nr. | Asukoht | N | E | Kõrgus |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Prangli | 59,58 | 24,58 | 15 (17) |
| 2 | Hiiumaa | 59,02 | 22,28 | 10, 18 (11, 19) |
| 3 | Osmussaar | 59,18 | 23,22 | 38 (45) |
| 4 | Vormsi | 59,02 | 23,12 | 10, 20, 27 (17, 27, 34) |
| 5 | Harilaid | 58,58 | 23,05 | 20, 35, 50 (22, 37, 52) |

Tuule staatiliste uuringutega ehk kiiruse uuringutega on tegeletud pärast Eesti taasiseseisvumist aktiivselt ja selles vallas saavutatud märkimisväärne edu. Aastaks

2002 installeeritud automaatsete tuulemõõtmise seadmete alusel on võimalik koostada juba praktiliselt Eesti tuuleatlas.

# 6 Tuule dünaamika ja selle koostöö elektrijaamadega

## 6.1 Tuulest toodetud elektri sobivusest Eesti elektrisüsteemi

Eestis algas arutelu tuuleenergia kasutuselevõtu üle 1980-ndate aastate keskpaigas. Esmalt suhtuti tuulikutesse emotsionaalsest tasandist lähtuvalt ja nende koostöös elektrivõrguga ei osatud arvestada tuulegeneraatorite eripära.

Tuuleelektrijaamade kasutatavuse seisukohalt on tähtis saadava (elektri)energia kvaliteet. Üldiselt on kvaliteedi kriteeriumideks elektri pinge ja sagedus ning nende muutumise ulatus ja iseloom. Tuulegeneraatorite puhul tõuseb aga esikohale igapäevases elus vähem märgatav kvaliteedinäitaja – varustuskindlus. Tuulegeneraator ei saa toota tuulest tänapäevastele kvaliteedinormidele vastavat elektrienergiat autonoomselt. Tuulegeneraatorite eripära on seotud nende poolt arendatava võimsuse kiire ja sagedase muutumisega, kuna tuulevoo võimsus sõltub tuule kiirusest kolmandas astmes ja tuul ei ole püsiv. Järelikult vajavad tuulegeneraatorid enda kõrvale teist ja suhteliselt kiire võimsuse muutumise kiirusega elektritootmise seadet.

Elektritarbimine ja selle muutused riigis on suhteliselt hästi ennustatavad. Elektrisüsteemi dispetõer hakkab tavaliselt juba nädal varem ette valmistama mingi päeva talitust – prognoosib koormust, kontrollib elektrijaamade plokkide valmisolekut, optimeerib koormuse jagunemise elektrijaamade ja jaama plokkide vahel. Ettevalmistuse eesmärk on tagada elektrivarustuse kindlus vähimate rahaliste kulutustega (väikseim kütusekulu ja väikseim saasteemissioon).

Hr. Rein Oidram Tallinna Tehnikaülikoolist on väitnud oma artiklis [12], et vastupidiselt elektrienergia tarbimisele ei ole tuulikute poolt toodetav elektrienergia ilmumine elektrivõrku ennustatav piisava täpsusega ilmse viitega ilmaprognoosidele (prognoositakse tuult kiirusega 5 – 10 m/s).

Saab väita ka vastupidist. Tuule kiirused on suurtes piirides ennustatavad pikemas perspektiivis ja vajaliku täpsusega elektrisüsteemi dispetõerile edastamiseks. Tuule kiirus on uuemate ja moodsamate seadmetega (Zephir Project Previento CFD HIRLAM Power Forecast Methods) ennustatav 36 tunni ulatuses täpsusega 10%. See

on elektrisüsteemi dispetõeri jaoks piisav ennustustäpsus. Kui elektritarbimise koormusgraafikuid tehakse pikemas perpektiivis, saab tuule kiiruse anda ette väiksema täpsusklassiga ning vahetult enne iga päeva koormusgraafiku koostamist täpsustada tuule kiirus ja sellest toodetav elektrienergia hulk.
Seega, tuulegeneraatorite poolt toodetav elektrienergia on ennustatav ja elektrisüsteemi dispetõer saab temale edastatud andmed võtta aluseks koormusgraafikute koostamisel.

Eesti on oma pindalalt ja suuresti tuuletingimustelt sarnane Taaniga. Taani omakorda on tuuleenrgeetika asutamise üks suurtest pioneeridest.
Taanis on 2001. aasta lõpu seisuga installeeritud tuulikuid koguvõimsusega 2566 MW.
Tuulegeneraatorite ühendamisel ühtsesse elektrisüsteemi peavad süsteemi ülejäänud elektritootjad muutma oma võimsust tuulikute võimsusele vastassuunas. Tuulikute suure installeeritud hulga juures peab olema teiste elektrijaamade reguleerimisulatus suur ja reguleerimine toimuma suhteliselt kiiresti. Soojuselektrijaamu on paraku sellisteks toiminguteks raske kohandada. Seetõttu kasutatakse tuulikute võimsusamplituudide muutumise kompenseerimiseks peamiselt hüdroelektrijaamu. Taani näiteks on mitme merekaabli kaudu ühendatud Norra (toodab kuni 99% elektrist hüdroenergiast) ja Rootsiga (toodab kuni 48% elektrist hüdroenergiast), mille abil tasakaalustatakse tuuleenergiast tulenevad pulsatsioonid. Seeläbi on vähendatud koormust Taani soojuselektrijaamadele. Merekaablit Norrasse läbi Põhjamere kavandab ka Saksamaa.
Eesti kavandab samuti merekaablit Soomega, mille ühe kasutusalana võiks vaadelda hüdroenergia ostmist Rootsist ja Norrast, katmaks tuuleenergia muutusi.
Eesti eripära seisneb selles, et suurem osa meil tarbitavast elektrist toodetakse soojuselektrijaamades. Võimalus kasutada hüdroelektrijaamu praktiliselt puudub (kogu teoreetiline hüdroenergia võimsus on arvatud olevat umbkaudu 30 – 40 MW). Ainuke kiiremalt võimsust muuta suutev elektrijaam on Iru Soojuselektrijaam.
Seega, kui vaadelda Eesti elektrisüsteemi isoleerituna teistest riikidest, jäävad ainsaks tuulegeneraatorite võimsuste kõikumise reguleerijateks soojuselektrijaamad. Eestis asuvad soojuselektrijaamad on ehitatud katmaks peale Eesti ka Loode-Venemaa elektritarbimist. Põhiliselt koosnevad nad 200 MW-test energiaplokkidest (kaks katelt, üks turbiin ja üks generaator). Nende katta on praegu Eesti elektritarbimine,

mis suvise koormusmiinimumi ajal on umbes 500 MW ja talvise maksimumi ajal umbes 1800 MW.

Kuna Eestis kasutatakse kütusena põlevkivi tolmpõletamist, siis kulub katelde sissekütmiseks külmast reservist 14-16 tundi, mis ilmselgelt ei sobi tuuleenergia võimsuse muutuse katmiseks. Seega tuleb hoida töös kuuma ehk pöörlevat reservi. Kui suur peab olema pöörlev reserv, et katta tuulikute võimsuse kõikumised? Teadaolevalt on juhukoormuste ruutkeskmiste hälvete orienteeruv väärtus suviti umbes 50 MW ja talveperioodil umbes 80 MW. Jämedalt saab sama suuruseni kasvatada ka tuulejaamade võimsused.

Eestiga suhteliselt sarnane on oma energiasüsteemi ülesehituselt Iirimaa (peale selle seob meid ühesuguse maavara – turba – omamine ja põletamine). Iirimaa elektrisüsteem baseerub samuti kui Eestilgi inertsetel soojuselektrijaamadel. Neilgi tuleb kasutada tuulikute poolt toodetava elektri võimsuse kõikumise tagamiseks pöörlevat reservi. Belfast'i ülikooli teadlased Shashi Persuaud, Brendan Fox ja Damian Flynn tegelevad vastavate uuringutega. Nende ettekannet [13] järgnevalt analüüsitud ongi.

Ettekandes vaadeldakse energiasüsteemi, mille elektriline võimsus on umbes 2050 MW ja tarbimine on kõikuv, suvise miinimumi ajal umbes 450 MW ja talvise maksimumi ajal 1650 MW. Seega, tegemist Eestile väga sarnase situatsiooniga. Standardne kõrvalekalle oli 32,7 MW. Oma uurimuses analüüsisid nad statistiliselt 5 MW-ste tuuleparkide poolt poole tunni tagant väljastatavat võimsust.

Tuule võimsuse muutuste ja elektrisüsteemi standardse kõrvalekalde vastandamise tulemused arvutati kuni 600 MW tuulegeneraatorite installeritud võimsuseni. Tulemus oli vastu ootusi hea: leiti, et tuule võimsuse kõikumine on väike, võrreldes tarbimise kõikumisega. Kuni 600 MW installeeritud võimsuseni ei ole iirlaste nägemuses vaja rakendada tööle suuremat hulka pöörlevat reservi

Hr. Rein Oidram on sidunud tuuleenergia suuresti kasvuhoonegaaside emissiooniga, väites, et tuulikute ainsaks eesmärgiks Eestis saab olla põlevkivi tarbimise ja kasvuhoonegaaside emissiooni vähendamine. Põhjusena on välja toodud Eesti kolmekordne (tegelikkuses isegi suurem) võimsusvaru. Vaatluse alla võiks siiski võtta ka mõned muud aspektid. Tuuleenergia on üsna tänuväärne oma paindlikkuse poolest, me saame neid vajadusel installeerida Lääne-Eestisse ja seeläbi katta suurema osa võrgukadudest.

Antud situatsioonis on Eesti Energia võtnud selge suunise renoveerida kaks energiaplokki elektrilise võimsusega kokku 400 MW. Seda tuleb teha, kuna vastasel korral jääb Euroopa Liidu keskkonnanõudmiste tõttu Eestis elektrilisest võimsusest väheks (vanu renoveerimata katlaid saab käitada vaid teatud töötunnid aastas, et mitte põhjustada lubatust suuremaid saasteemissioone). Kui Eestis elektritarbimine tõuseb, mis on vägagi tõenäoline (Eestis on väga soodne pinnas erinevate tööstuste tekkeks), tuleb arvatavasti elektrilisest võimsusest puudu ka eespool mainitud kahe energiaploki renoveerimise korral. Seega tuleb ikkagi otsida põlevkivile alternatiivseid meetodeid elektrienergia tootmiseks ja miks mitte leida seda tuulest. Seda enam, et tuuleenergia on heaks vahendiks taastuvenergia osakaalu suurenemisel elektrienergia tootmises, mis on paratamatult vajalik Euroopa Liiduga liitumisel.

Tuuleenergia võimsusmuutuste kompenseerimiseks on olemas käesoleva kirjutise autori poolne idee, mis on küll utoopiline ja leiab kindlasti palju vastuargument. See on energia salvestamine. Idee seisneb selles, et tuulegeneraatorid panna tööle koostöös kütuseelementidega, mis on kiire reageerimisega ning tarbivad kütusena teist taastuvaist vahendeist pärit kütust – vesinikku. Nimelt saab leida optimaalse reþiimi, kus tuuliku poolt toodetav ülejääk kasutatakse ära veest elektrolüüsi teel vesiniku tootmiseks ja seesama vesinik kasutatakse hiljem tuulest toodetud elektri pulsatsioonide katmiseks. Idee on lihtne, seda enam et meil on nii tuult kui vett! Kriitiliselt ideed hinnates tekitab esimese küsimusena selle majanduslikkus.
Saksamaa 2000. aasta andmeil kulus veest elektrolüüseri abil vesiniku ja hapniku saamiseks kolm korda rohkem energiat kui saadakse energiat vesiniku ja hapniku kui kütuste muundamisel kütuseelemendi abil elektrienergiaks. Omajagu energiat kulub ka lisaks vesiniku säilitamisele. Seega on tegu tänapäeva tähenduses väga ebarentaabli protsessiga. Teise ja positiivsema külje pealt lähenedes tuleb siiski tõdeda, et vesinik on hea energiasäilitaja. Teda saab kasutada praktiliselt kõikides energiamuundamis protsessides. Teisisõnu sobib ta asendama praktiliselt kõiki kütuseliike (tahket, vedelat, gaasilist, tuuma-?!). Tehnoloogiate arenedes ja energiaülejääkide korral on vesinik heaks alternatiiviks.

Tuulikute abil Eestis kasvuhoonegaaside emissiooni vähendamist lähemalt uuritud ei ole. Küll aga on hr. Rein Oidram toonud välja aspektid, millega tuleb arvestada.

Küsimus on, kas tuuleenergia kasutamine Eestis alandab kasvuhoonegaaside emissiooni või hoopiski tõstab seda.

## 6.2 Elektrijaama ploki reageerimiskiirus

Elektrijaama plokk koosneb erinevatest seadmetest ja abiseadmetest. Peamised seadmed plokis on katel, auruturbiin ja turbogeneraator. On võimalikud erinevad variandid, kus kahe katla külge on ühendatud üks turbiinseade koos generaatoriga.

Narva elekrijaamades on välja ehitatud süsteem, kus just nimelt kahe katlaga on ühendatud turbiinseade ja turbogeneraator. Erinevatel ploki osadel on erinevad regeerimiskiirused.

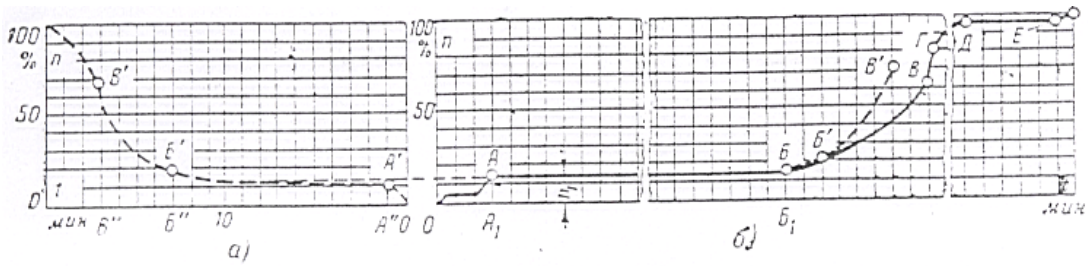
Kui vaadeldakse ploki reageerimiskiirust, siis põlevkivikatelde puhul on reaalselt vaatluse all katla reagerimiskiirus, turbiinseadme reageerimiskiirus on oluliselt suurem, rääkimata turbogeneraatorist.

Seisvast külmast olukorrast käivitub plokk 12…14 tundi. See hõlmab sissekütmist ja koormuse järkjärgulist suurendamist.

Kui plokk töötab ühe katlaga ehk turbiinseade töötab 50%-lise koormusega, siis teise katla käivitamine ehk koormuse suurendamine 100%-ni võtab aega 5…8 tundi.

Kui plokk töötab, on tema manööverdusvõime võimsusega ülespoole 7 MW/min ja alla koormamine 10 MW/min. Viimane käib pöörleva ehk kuuma reservi kohta.

Turbiini puhul on käivitamise ja seiskamise ajaline skaala esitatud joonisel 11.




**Joonis 11. Turbiini seiskamise ja käivitamise ajaskaala [14]**

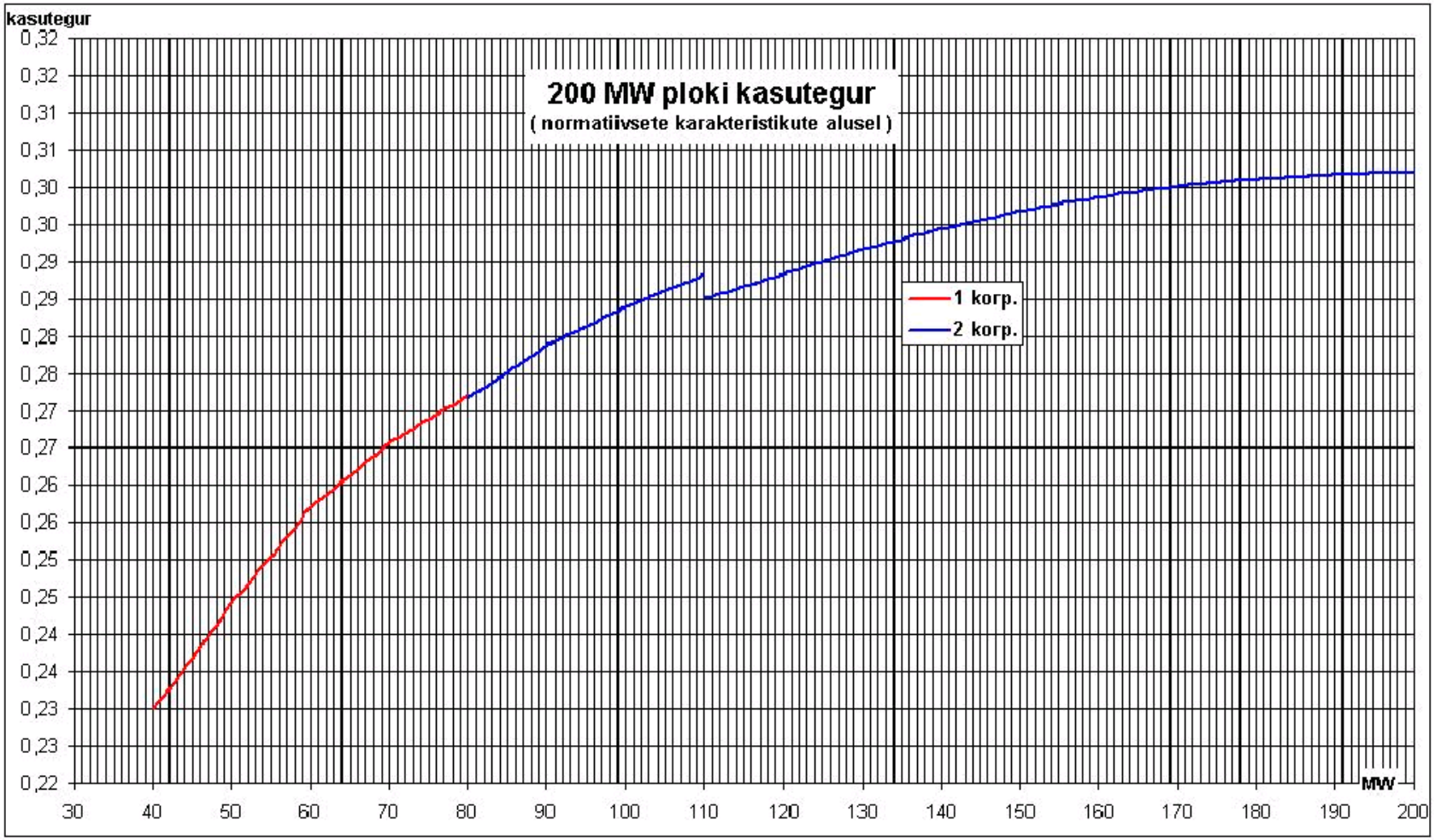
Turbiini seiskamine võtab aega umbes 20 minutit, turbiini käivitamine külmast olekust 80 minutit ning soojast (kui turbiin on seisnud umbes 3 tundi) olekust 30 minutit.

Turbogeneraatori reageerimiskiirused on avaldatavad sekundites, seega ei oma nad ploki reageerimiskiiruse seisukohalt tähtsust.

Seega on ploki reageerimiskiiruse seisukohalt määravaks katla reageerimiskiirus.

Ploki kasutegur on otseselt sõltuv katla koormamisest. Joonis 12. iseloomustab seda sõltuvust. Töötamisel pöörleva reservi tingimustes 50 MW ja 80 MW saame kasutegurid vastavalt ~25 % ja ~27 %. 200 MW-se ploki maksimaalne kasutegur nominaalkoormusel töötamisel on ~30 %.

Elektrisüsteemi dispetõer koostab koormusgraafiku tundide lõikes. Samuti saab tuule kiirust ennustada tunni kaupa. Kui suurte tuuleturbiinide puhul on lisaks tuule jõule tegemist ka seadme oma inertsiga, siis väikesed tuule kiiruse muutused ei avalda lühikese ajaperioodi vältel väljastatavale võimsusele mõju. Tuul on samuti üsna ühtlase muutumiskiirusega (Eesti kontekstis vaadeldes). Seega piisab, kui elektrisüsteemi dispetõerile antakse tuulikute poolt väljastatav võimsus tundide lõikes. Seda muidugi eeldusel, et tuule kiirust on ette ennustatud piisava täpsusega (eespool kirjeldatud seadmed).




**Joonis 12. 200 MW-se ploki kasutegur normatiivsete karaketristikute alusel [15]**

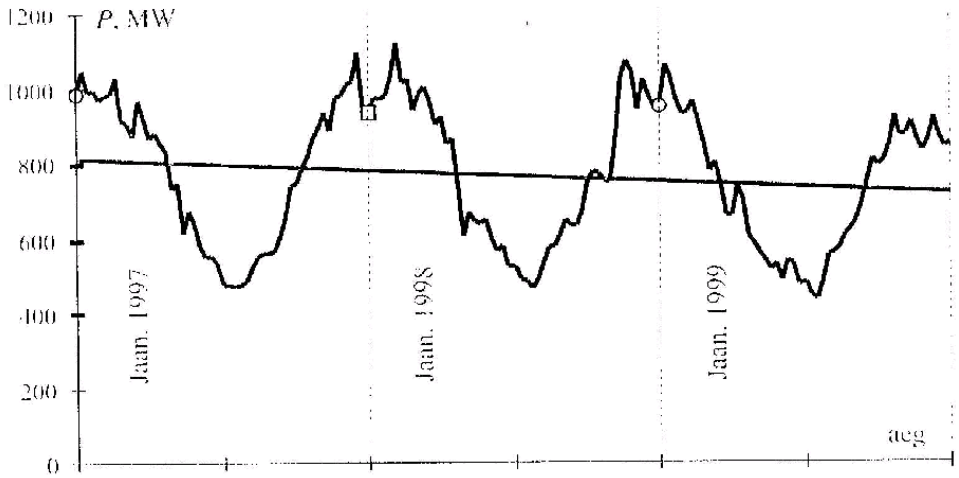
## 6.3 Eesti energiasüstemi dünaamilised omadused

Eesti energiasüsteemi dünaamilised omadused on määrava mõjuga kuuma reservi töös hoidmisele. Dünaamiliste omaduste all mõeldakse energiasüsteemi hetkvõimsuste nii perioodilisi kui juhuslikke muutusi. Perioodiliste muutuste ennustamine on võimalik, juhuslike hetkvõimsuste muutused on problemaatilisemad. Teema käsitlus antud kirjutises on tehtud Teolan Tomsoni artikli [16] alusel.

Energiasüsteemi koormusel on kolm perioodilist komponenti:

- Aastase perioodiga komponent;
- Nädalase perioodiga komponent;
- Ööpäevase perioodiga komponent.

Aastase perioodiga komponent on põhjustatud klimaatilistest oludest ning inimtegurist (suvised puhkused). Nädalase perioodiga komponent on tingitud inimtegurist (puhkepäevad) ja ööpäevane komponent on tingitud looduslikest ning ka inimlikest teguritest (päevavalgus, töö- ja puhkeaeg). Eesti elektrisüsteemi koormusgraafik 1997. – 1999. aasta kohta on toodud joonisel 13.




**Joonis 13. Eesti Energia koormusgraafik aastail 1997-1999**

Toodud koormusgraafikult nähtub, et tegemist on süsteemi suure alakoormusega. Keskmine koormus on vaid 23% ja vaadeldava perioodi maksimaalne hetkeline koormus 40% installeeritud (umbes 3300 MW) võimsusest. Talve- ja suveperioodi

koormuste erinevus on kuni 2 korda ning üldine koormuse languse trend umbes 3% aastas.

Eesti energiasüsteemi koormuse vaatlemise juures on huvipakkuvaimaks juhuslik komponent. Juhusliku komponendi osa on antud töös vastavalt kuudele november 1998 kuni jaanuar 1999 toodud joonistel 25., 33. ja 41. Juhusliku komponendi autokorrelatsioonifunktsioon samadele perioodidele on joonistel 26., 34. ja 42. Juhusliku komponendi saamiseks on elimineeritud perioodiline komponent järgneval viisil: iga päeva andmereast on lahutatud vastava kellaaja keskmistatud koormus. Keskmistatud päevagraafiku suhtes on iga päeva konkreetne koormusgraafik juhuslik signaal ning seega on jäägi autokorrelatsioonifunktsioon ligilähedane ideaalse juhusliku signaali eksponentsiaalsele sõltuvusele.

Teolan Tomsoni artikli alusel on juhukoormuste ruutkeskmiste hälvete orienteeruv väärtus suviti umbes 50 MW ja talveperioodil umbes 80 MW.

## 6.4 Tuule dünaamika uuringud

Eestis on tuule dünaamika temaatikat vaadeldud vähe. Peamiseks pioneeriks antud valdkonna käsitlemisel on Teolan Tomson. Tema artiklite [17], [18], [19], [20] põhjal on valminud ka järgnev ülevaade.

Tuule dünaamika käsitlemine on vajalik, kui vaadeldakse tuulikute koostööd energiasüsteemiga. Tuule dünaamikat saab hinnata vaid juhul, kui tuule mõõtmisi tehakse pidevalt ja ühesuguse ning piisavalt lühikese ajaintervalli tagant. Tänapäevaste tuulemõõduseadmetega (anemomeetritega) mõõtes fikseeritakse tuule kiirus iga 10 minuti tagant, siiani Eestis installeeritud ja ilmavaatluse eesmärgil töötavate seadmete intervall oli 3 tundi. Seega, et teostada adekvaatseid tuule dünaamika uuringuid, on parem kasutada sagedamini andmeid fikseerivat seadet.

Peamine eesmärk sellisel vaatlemisel on leida konkreetsele piirkonnale tuule kiiruse perioodiline komponent, et suurtes piirides näha ette tuule kiiruse muutusi.

Teolan Tomsoni poolt läbi viidud uuringud on tehtud joonisel 14. toodud tuulemõõdu seadmetega, nendeks on:

- Harilaiul (HRL) ja Kihnus (KHN) asuvad automaatjaamad, mis fikseerivad tuule kiiruse iga 10 minuti järel (kõrgused tuule mõõtmiseks 10 ja 30 m);

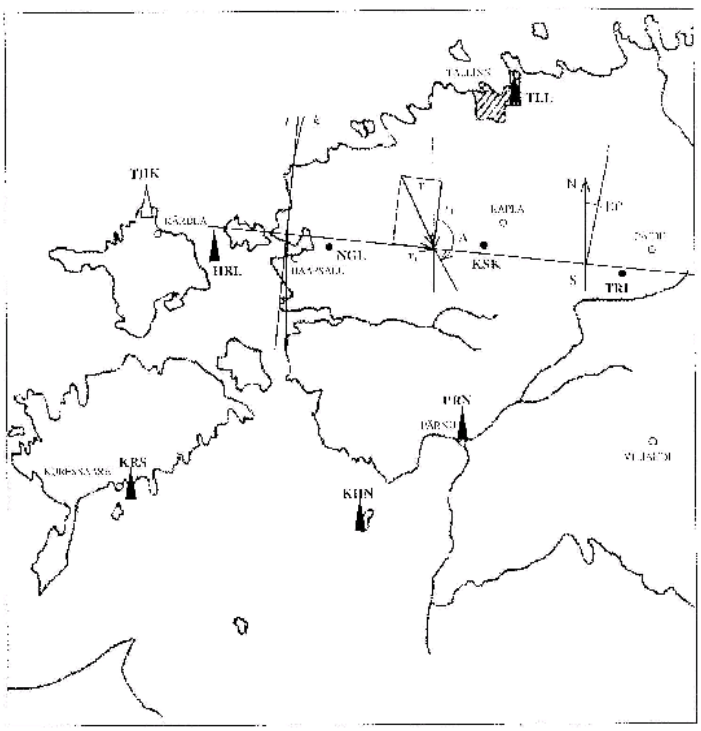
- Kuressaare (KRS), Pärnu (PRN) ja Tallinna (TLL) lennujaamade anemomeetrid, mille fikseerimissagedus on 30 min (kõrgus tuule mõõtmiseks on 10 m);
- Nigula (NGL), Kuusiku (KSK) ja Türi (TRI) meteoroloogia jaamad, nende mõõteintervall on 3 tundi;
- Joonisel on toodud samuti ainukese Eesti tuulegeneraatori asukoht, Tahkuna THK) poolsaar Hiiumaal.

Teolan Tomsoni uurimusest tuleneb, et perioodilise komponendi kui ühe tähtsaima tuule dünaamilise osa leidmiseks ööpäevase perioodi vältel on meteoroloogiajaamade ajaintervall 3 tundi piisav analüüside tegemiseks. Kahjuks ei ole see piisav, leidmaks teisi dünaamilisi komponente.

Tuulel on kaks tähtsat perioodilist komponenti:

- aastane perioodiline komponent;
- ööpäevane perioodiline komponent.

Ööpäevast perioodilist komponenti (käsitletud siiani briisinähtusena) on siiani uuritud vaid kvalitatiivselt. Andmeid on kogutud vaid kõrgrõhkkonna oludes, kui tsüklonaalne tuul ei ole segavaks faktoriks perioodilisele tuulele (peamiselt briisile).



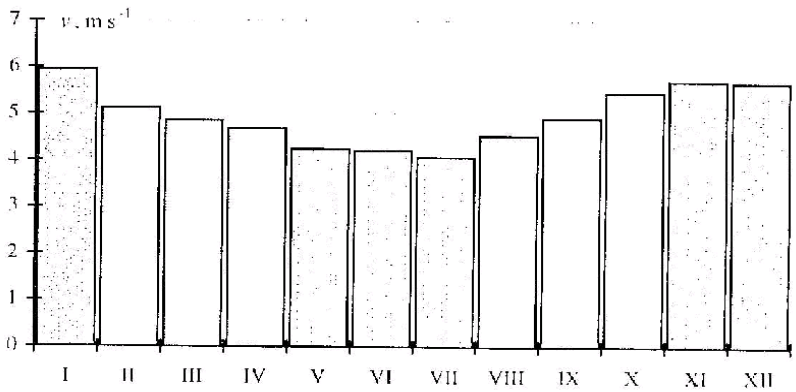

**Joonis 14. Ööpäevase perioodilise komponendi arvutamisel kasutatud tuule kiiruse mõõtmise asukohad**

Peamiseks järelduseks on siiani olnud, et suvine briis on kahesuunaline ja seda esineb suhteliselt kitsal rannaribal (umbes 20 km laiuselt).

Käesolevas uurimuses on käsitletud ööpäevast perioodilist komponenti kvantitatiivselt. Korrelatsioonianalüüs on tehtud, vaadeldes tuule kiirust kui püsivat juhuslikku suurust. Aastane tuulte perioodilisus on välja filtreeritud. Joonisel 16. on toodud erinevate asukohtade tuule mõõtmise andmed esitatuna normaliseeritud autokorrelatsioonifunktsioonina. Toodud joonisel on näha, et perioodiline komponent on täielikult puudu merel (Harilaiu anemomeeter – umbes 40 km eemal rannikust), teised kolm välja toodud tuule mõõtmise asupaika näitavad perioodilist komponenti.

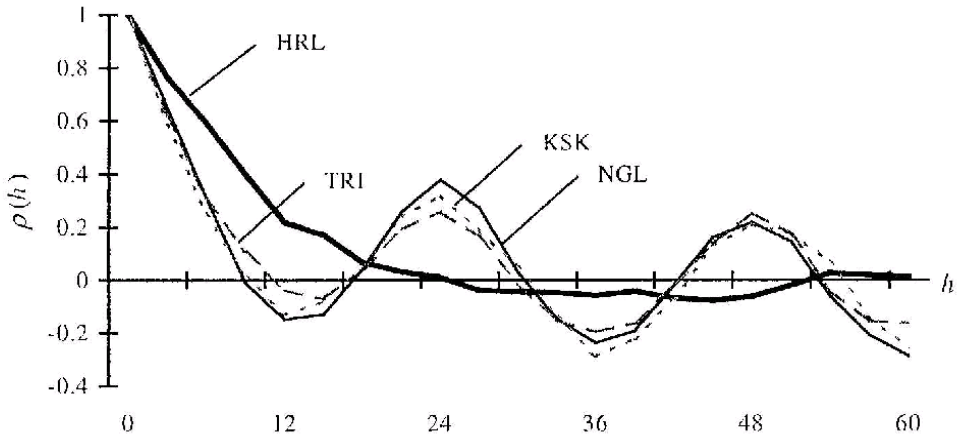
Üldiselt on 24 tunni perioodiline komponent selgelt eristatav augustis ja septembris ning vaevu eristatav oktoobris. November, detsember ja jaanuar seevastu ei oma perioodilist komponenti. See on ka põhjuseks, miks antud töö korrelatsiooniarvutused on tehtud just neil kuudel.

Sesoonne komponent jaguneb kaheks, suvine ja talvine.



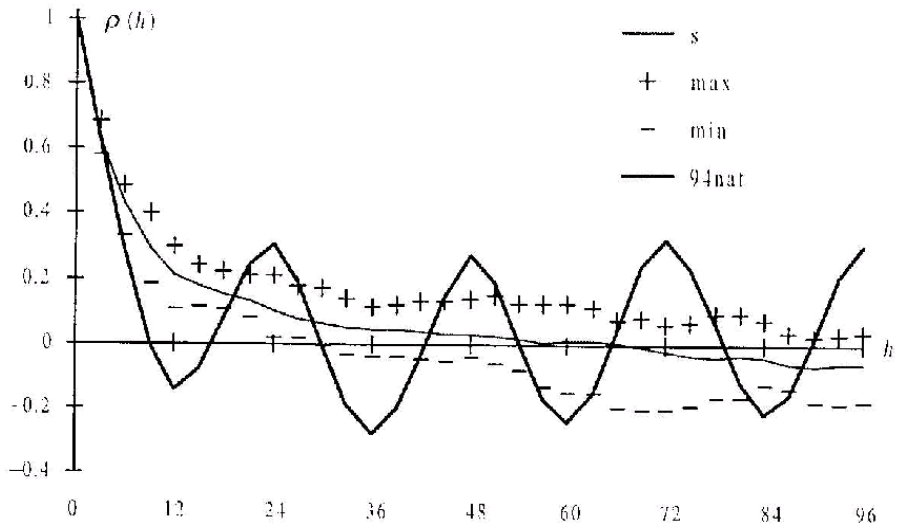

**Joonis 15. Tuule keskmine kiirus kuude lõikes Lääne-Eesti rannikul**

Joonisel 15. toodud keskmine tuule kiirus kuude lõikes on arvutatud Tallinna, Kuressaare, Pakri ja Vilsandi meteoroloogiajaamade 1983.-1993. aasta andmete alusel. Siit on näha, et talvekuudel on tuule keskmine kiirus 38% kõrgem suveperioodi keskmisest kiirusest. Huvi pakub samuti kevadine ja sügisene tuule kiiruse langev ning tõusev trend.



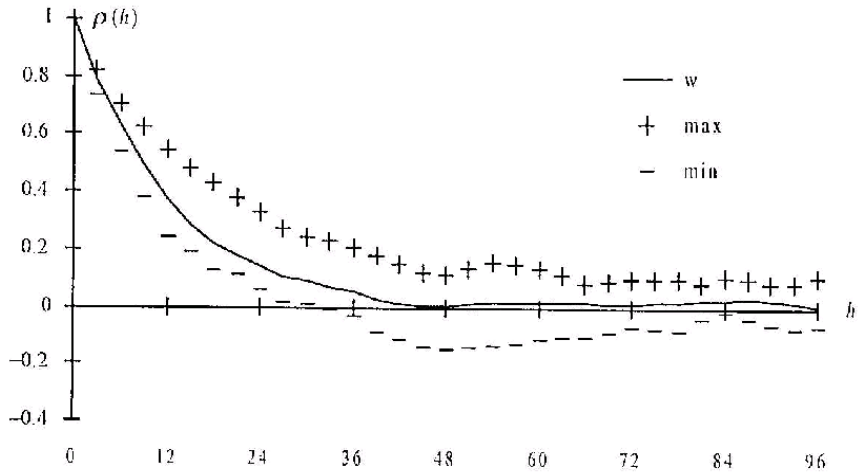

**Joonis 16. Erinevate asukohtade tuule kiiruste normaliseeritud autokorrelatsiooni-funktsioonid**

Suvesesooni iseloomustab rannal ja mandril tuule ööpäevane perioodiline komponent. Joonis 17. iseloomustab autokorrelatsioonifunktsiooniga arvutatud toorete andmete (kus perioodilist komponenti pole välja filtreeritud) graafikut suveperioodil. Joonisel on *94nat* toorete andmete joon, *s* näitab kõikide aastate keskmist väärtust, kus perioodiline komponent on välja filtreeritud.

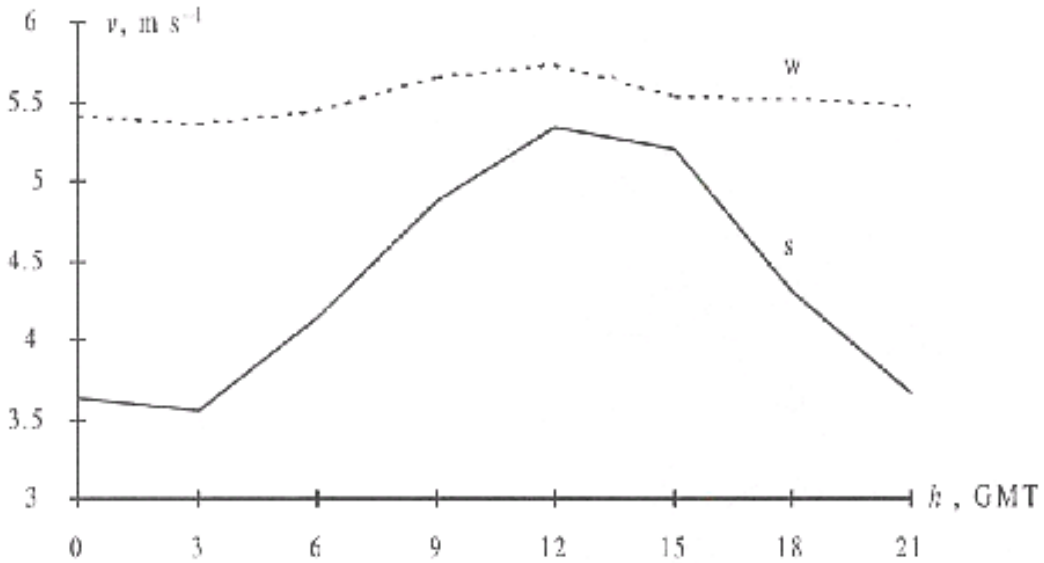



**Joonis 17. Normaliseeritud autokorrelatsioonifunktsioon Harkus suvel**

Joonisel 18. on toodud andmed talvise perioodi kohta. Nagu näha, ei moodustu talveperioodil ööpäevast perioodilist komponenti. Joonisel iseloomustab w aastate keskmist. Veelgi paremini on ööpäevase perioodi erinevused näha joonisel 19.



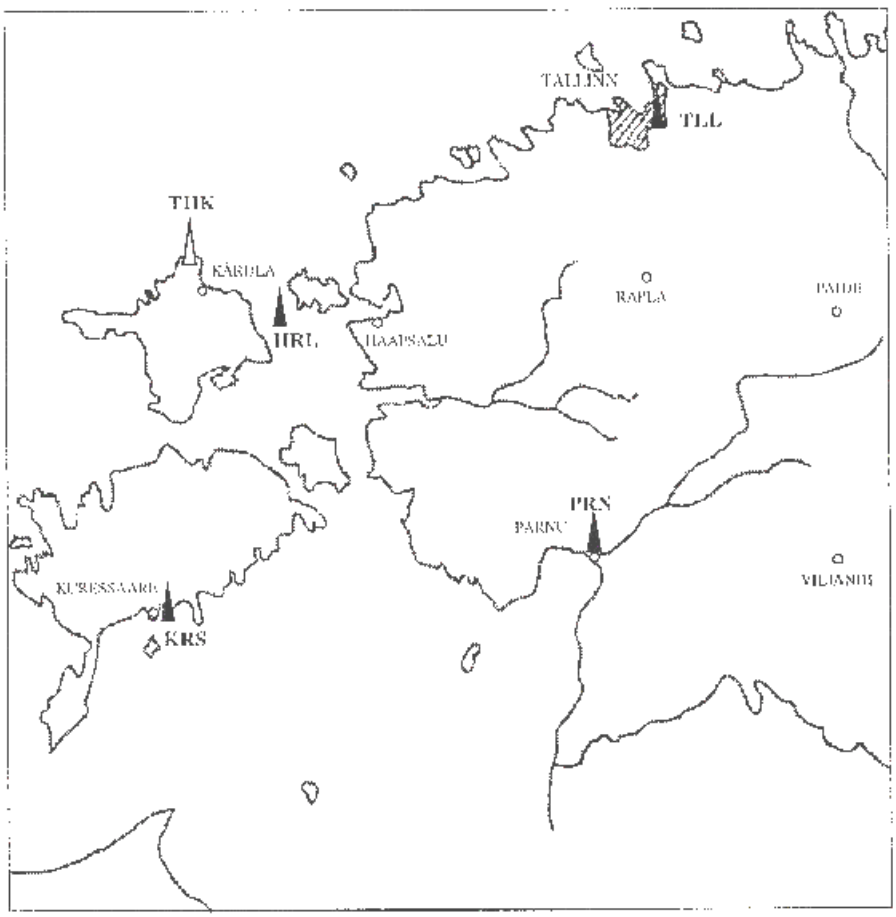

**Joonis 18. Normaliseeritud autokorrelatsioonifunktsioon Harkus talvel**




**Joonis 19. Keskmine päeva tuule kiirus Kuressaares suvel (s) ja talvel (t)**

Tuule dünaamika uurimisel on üheks huvipakkuvamaks osaks selle koosmõju erinevates piirkondades (hajutatult). Kui tuulikud või tuulikute pargid paiknevad

hajutatul, siis nende poolt tekitatav kiire võimsuse muutus on samuti hajutatud ehk maha surutud. Kuna Eesti energiasüsteem baseerub inertsetel soojuselektrijaamadel, siis omab ka see aspekt suurt tähelepanu. Teolan Tomsoni poolt tehtud uurimuses vaadeldi erinevate Eesti piirkondade tuule kiiruseid, mis toodud joonisel 20. Uurimuses leiti, et eeldus vastab tõele. Tuuleturbiinide geograafiline hajutamine annab tõepoolest tulu võimsuste lühiaegsete muutuste mahasurumisel. Selle efekti mõju suureneb seda rohkem, mida rohkem on tuulikuid grupis. Seega on tuuleparkide installeerimisega Eesti erinevatesse piirkondadesse võimalik maha suruda võimsuse muutusi. Teostatud uurimuse kohaselt pole siiski 100%-list muutust ühe tunni jooksul võimalik maha suruda, kuid selle esinemise tõenäosust võib vähendada kuni kahe suurusjärgu võrra.




**Joonis 20. Tuule dünaamika vaatlemisel hajutatult aluseks võetud tuule mõõtmise andmed**

## 6.5 Tuule kiiruse ja elektrienergia tarbimise omavahelised seosed

Käesoleva töö peamine eesmärk oli korrelatsiooniarvutuste teel välja selgitada, kas elektritarbimise ja tuule kiiruse vahel on olemas seos. Arvutused on teostatud keskendamise meetodil. Nimelt on nii tuule kiiruse kui elektrienergia tarbimise puhul kuu lõikes välja filtreeritud perioodiline komponent ja saadud tulemuse lineaarne keskmine seatud tõusunurgaga, mis on ligilähedane 0-le.

Arvutused on tehtud perioodi november 1998 kuni jaanuar 1999 kohta. Andmed on küll veidi aegunud, kuid hinnangute andmiseks piisavad.

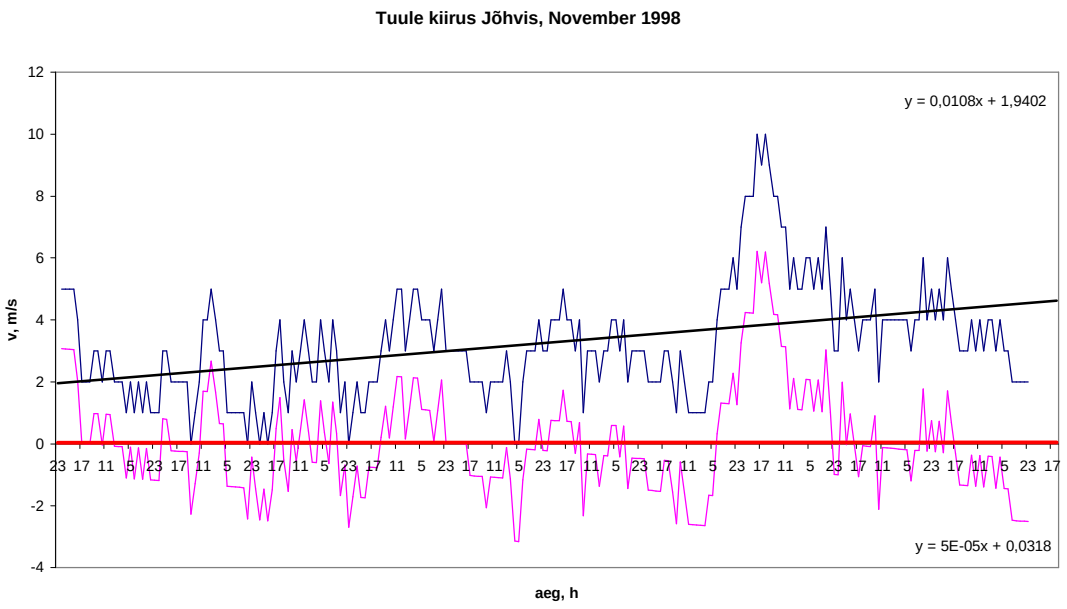
Arvutuste aluseks on võetud antud periood põhjusel, et talvekuudel on nii elektritarbimine kui ka tuule kiirus perioodi vältel stabiilse iseloomuga. Teistel aastaaegadel on mõlemad kas langeva või kasvava trendiga, see omakorda annab kindlasti korrelatsiooni tuule kiiruse ja eletrienergia tarbimise vahel.

Arvutustes on aluseks võetud kogu Eesti elektrienergia tarbimine. Kuid tuule kiirust on vaadeldud vaid Tallinna Harku ja Jõhvi tuulemõõduseadmete (anemomeetrite) andmete alusel, sest Tallinna ja tema lähiümbruse elektrienergia tarbimine moodustab kogutarbimisest suurtes piirides 60% ja Ida-Virumaa elektritarbimine umbes 25% kogutarbimisest. Seega kokku 85%. Kui nende kahe piirkonna tuule kiiruse ja elektrienergiatarbimise vahel esineb korrelatsioon, siis järelikult saab sama väita ka ülejäänud Eesti piirkondade kohta.

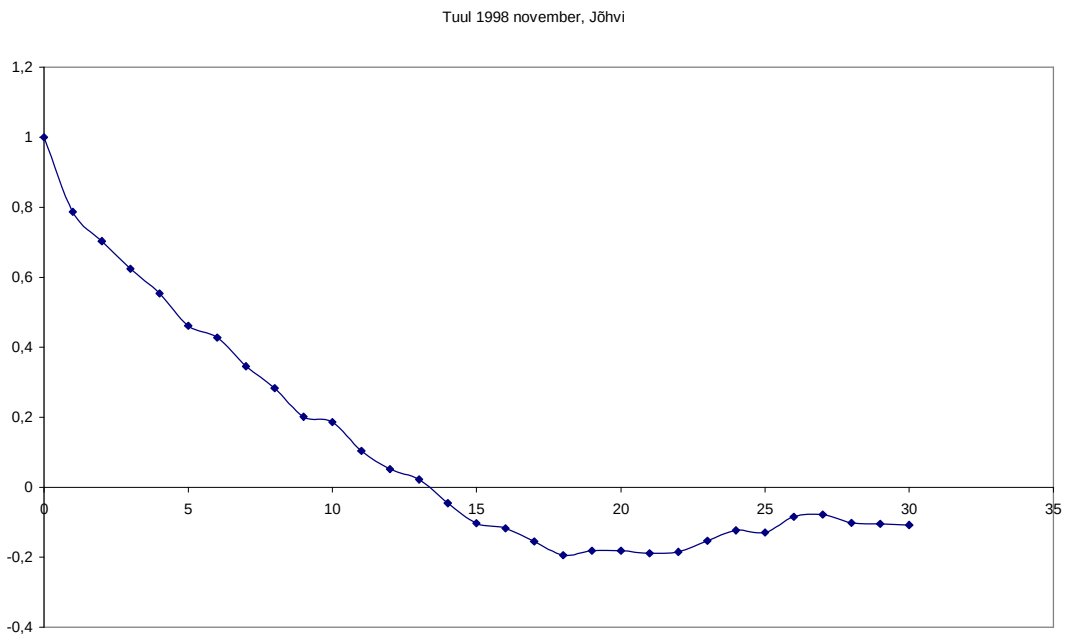
Korrelatsiooniarvutustes on keskendatud tuule kiiruse juhuslik komponent ja keskendatud elektrienergia tarbimise juhuslik komponent viidud ajalisse vastavusse ja kantud kogu mõõteperioodi (1 kuu) andmed diagrammile (ühele teljele vastavalt tuule kiiruse andmed meeter sekundis ja teisele elektritarbimise andmed megavattides). Tehtud arvutuste tulemused on graafilisel kujul esitatud järgnevatel joonistel.

Lisaks on välja toodud tuule kiiruse ja elektrienergia tarbimised nii filtreeritud kui filtreerimata kujul. Antud on samuti tuule kiiruse ja elektrienergia tarbimise juhuslike komponentide autokorrelatsioonifunktsioonid.

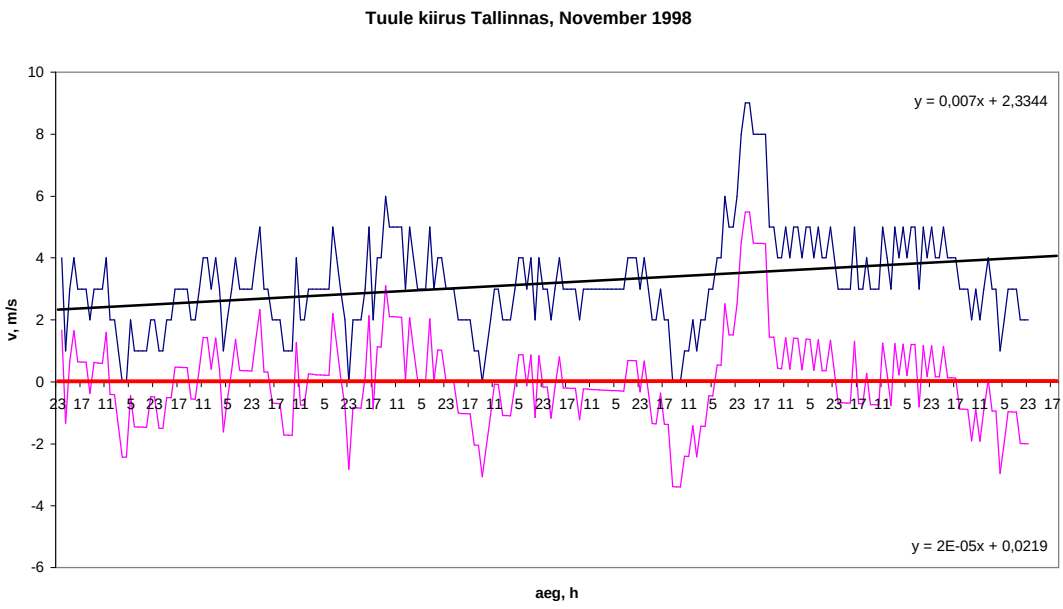
Kokkuvõtvalt ja võrdlevalt käsitleb saadud korrelatsiooniarvutuse tulemusi tabel V.



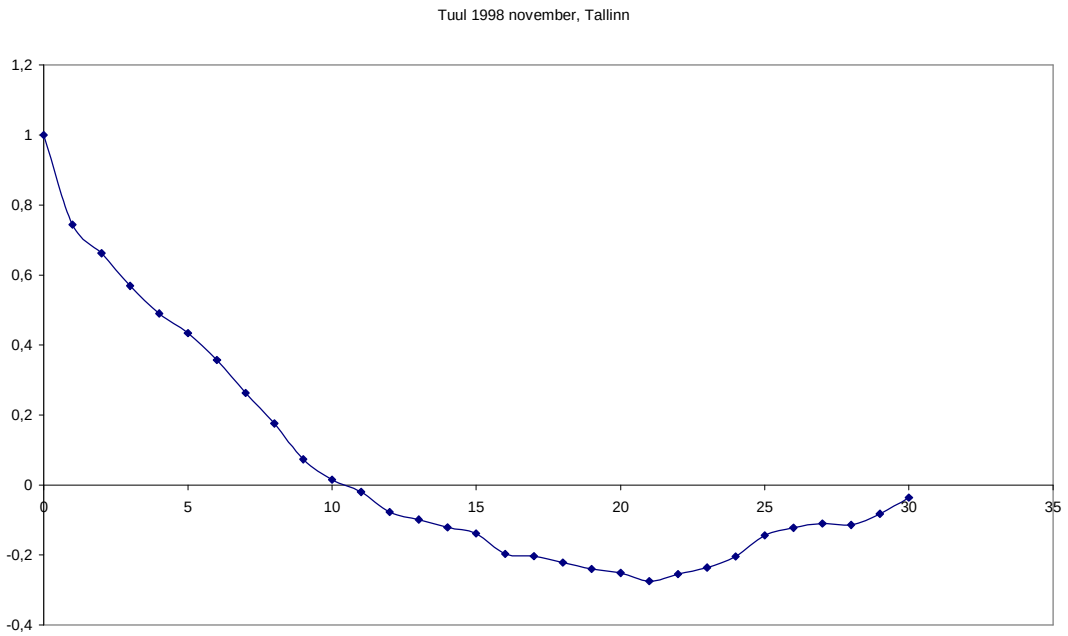

**Joonis 21. Tuule kiirus Jõhvis 1998 a. Novembris**



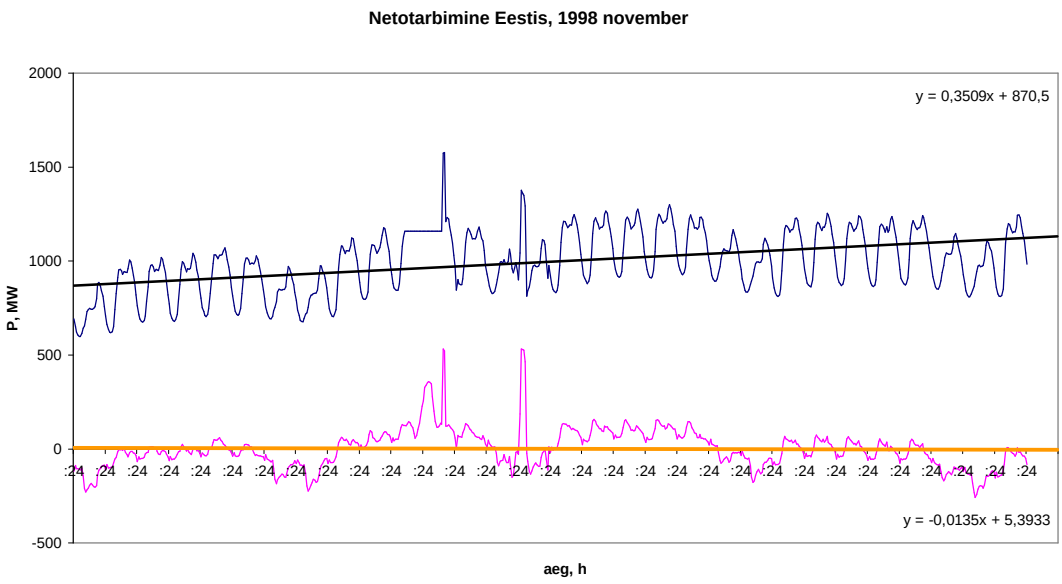

**Joonis 22. Arvutatud tuule kiiruse normaliseeritud autokorrelatsioonifunktsiooniga Jõhvis 1998 a. Novembris**



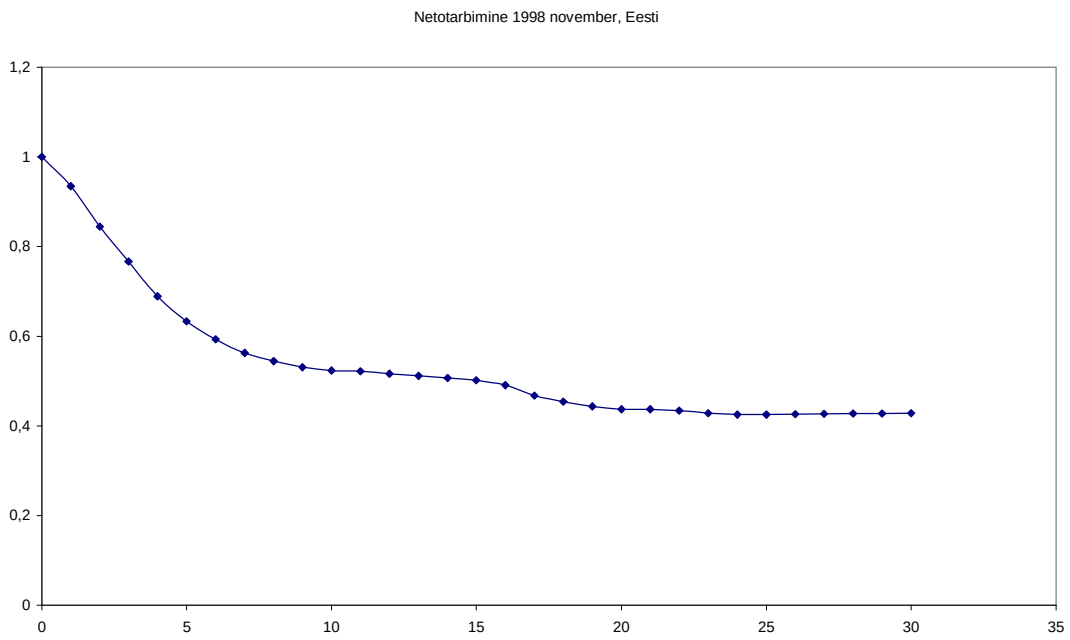

**Joonis 23. Tuule kiirus Tallinnas 1998 a. Novembris**



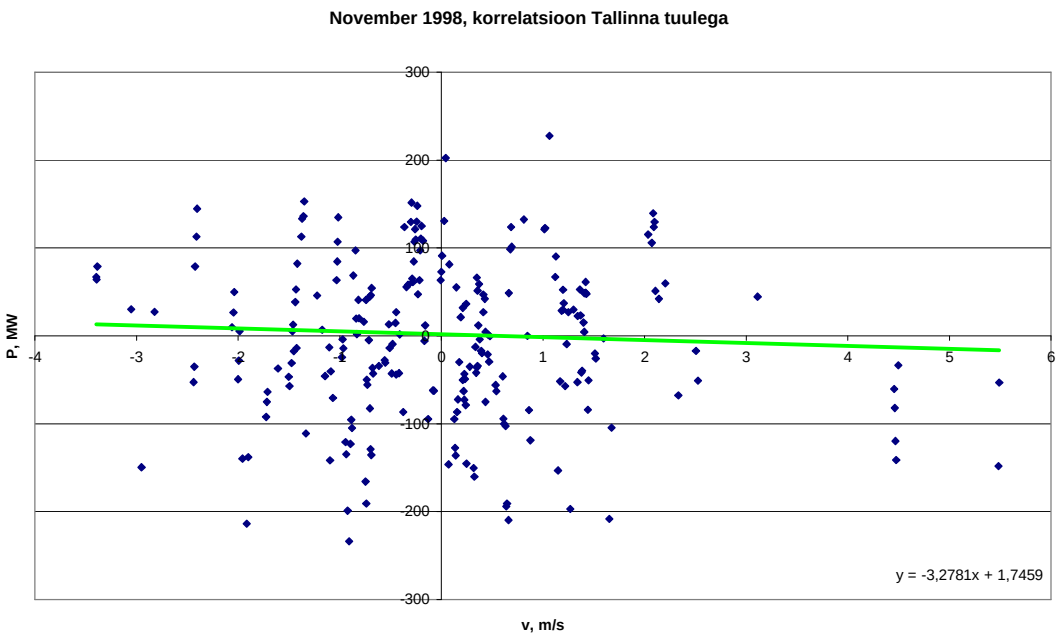

**Joonis 24. Arvutatud tuule kiiruse normaliseeritud autokorrelatsioonifunktsiooniga Tallinnas 1998 a. Novembris**



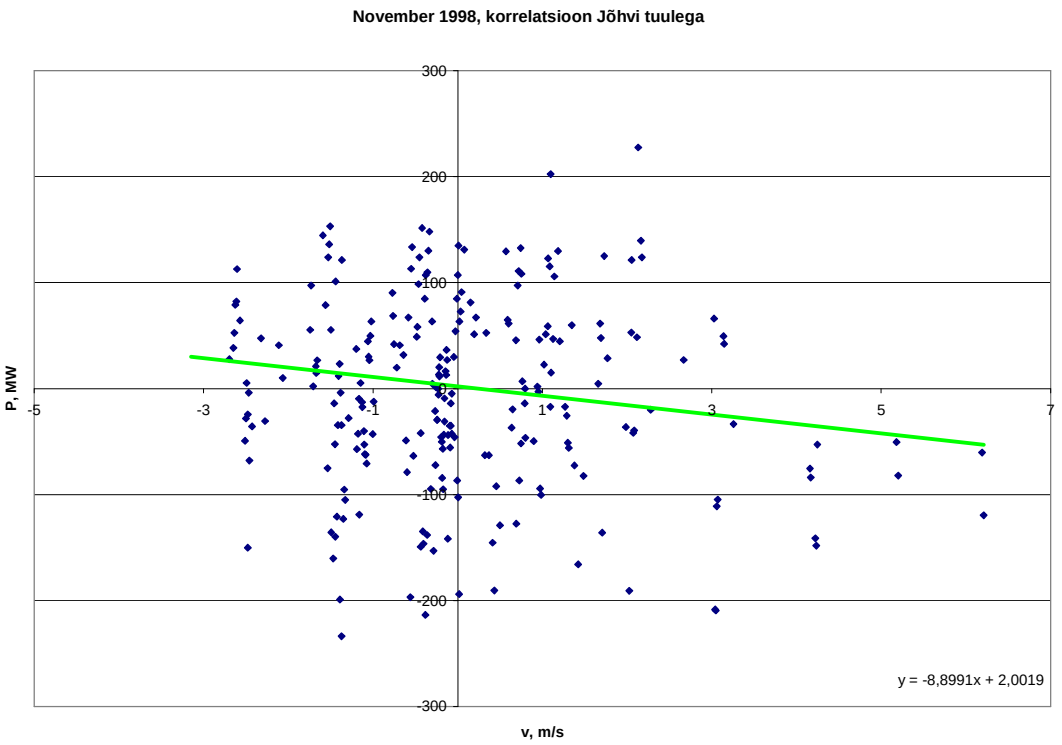

**Joonis 25. Elektri netotarbimine Eestis 1998 a. Novembris**



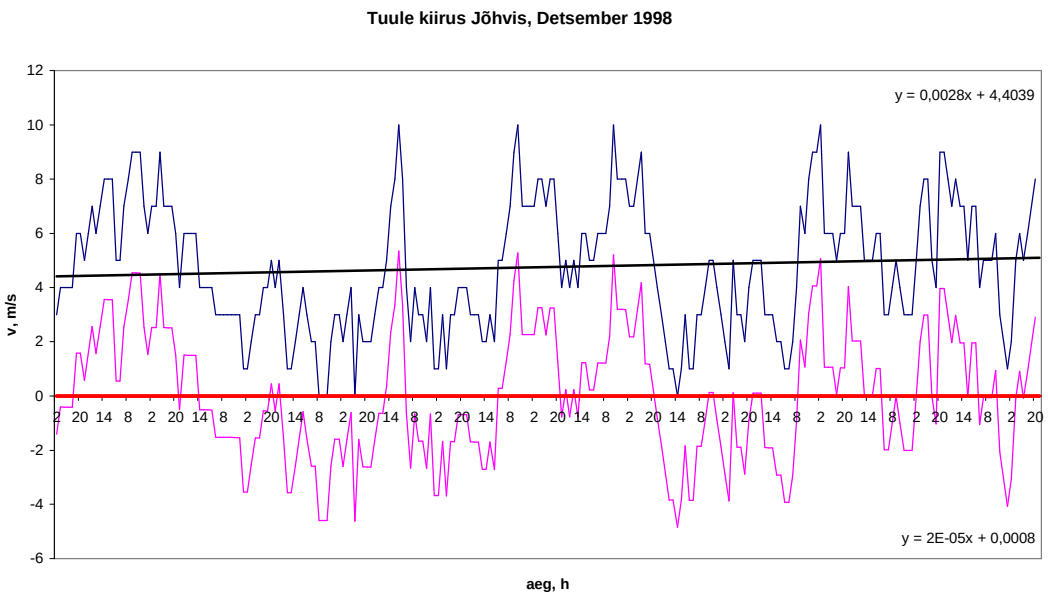

**Joonis 26. Arvutatud Eesti elektri netotarbimise normaliseeritud autokorrelatsioonifunktsiooniga Eestis 1998 a. Novembris**



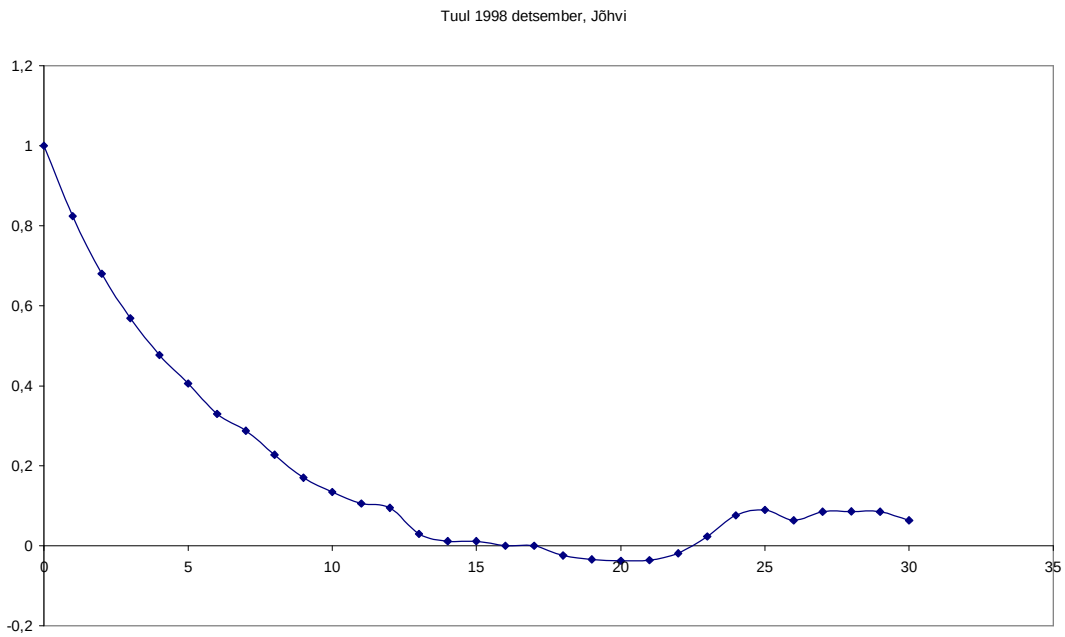

**Joonis 27. Elektri netotarbimise korrelatsioon Tallinna tuulega 1998 a. Novembris**



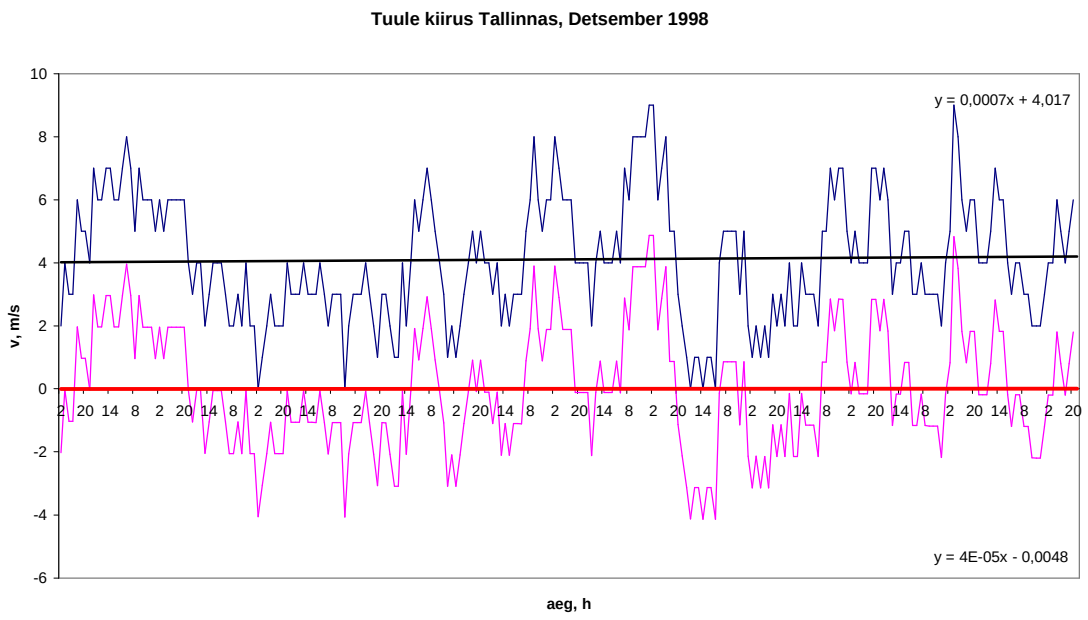

**Joonis 28. Elektri netotarbimise korrelatsioon Jõhvi tuulega 1998 a. Novembris**



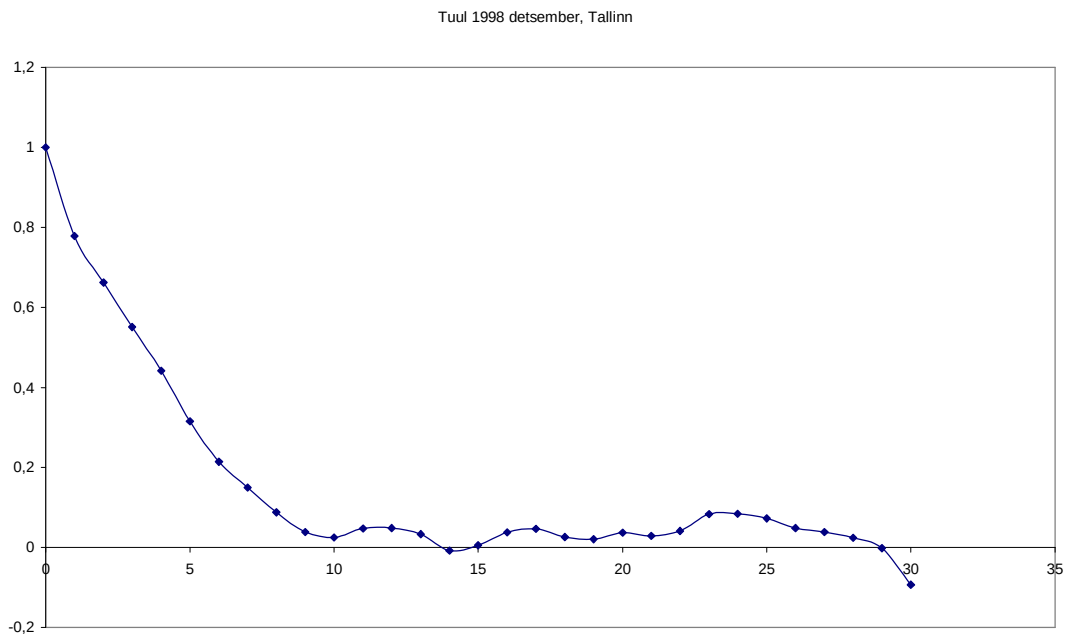

**Joonis 29. Tuule kiirus Jõhvis 1998 a. Detsembris**



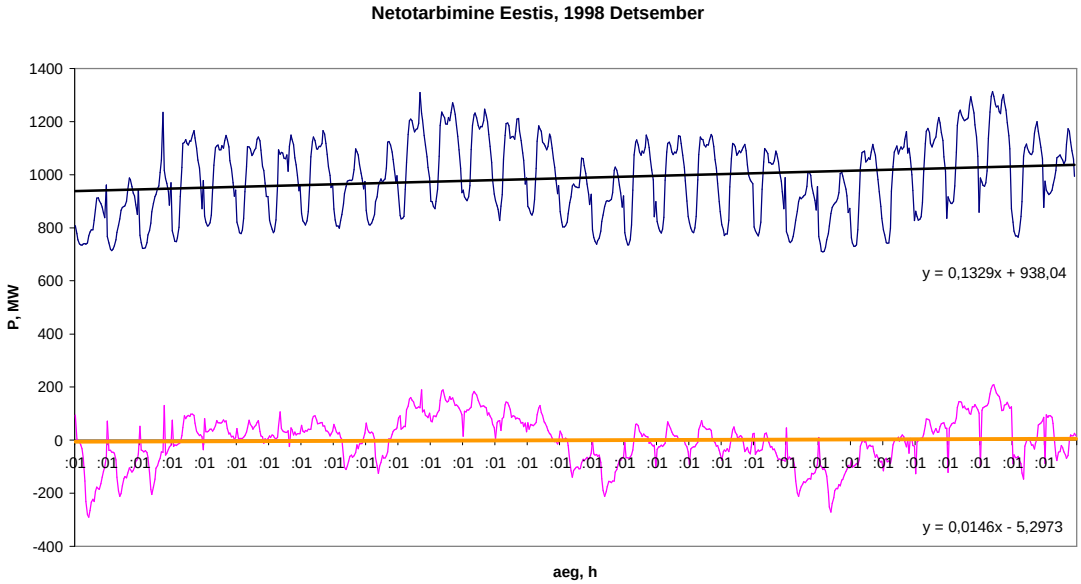

**Joonis 30. Arvutatud tuule kiiruse normaliseeritud autokorrelatsioonifunktsiooniga Jõhvis 1998 a. Detsembris**



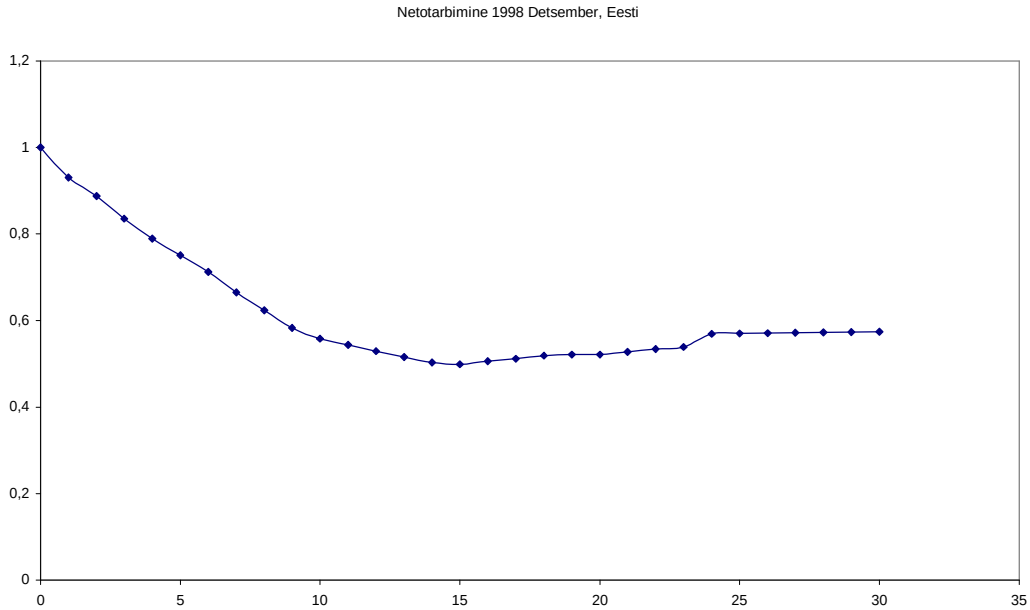

**Joonis 31. Tuule kiirus Tallinnas 1998 a. Detsembris**



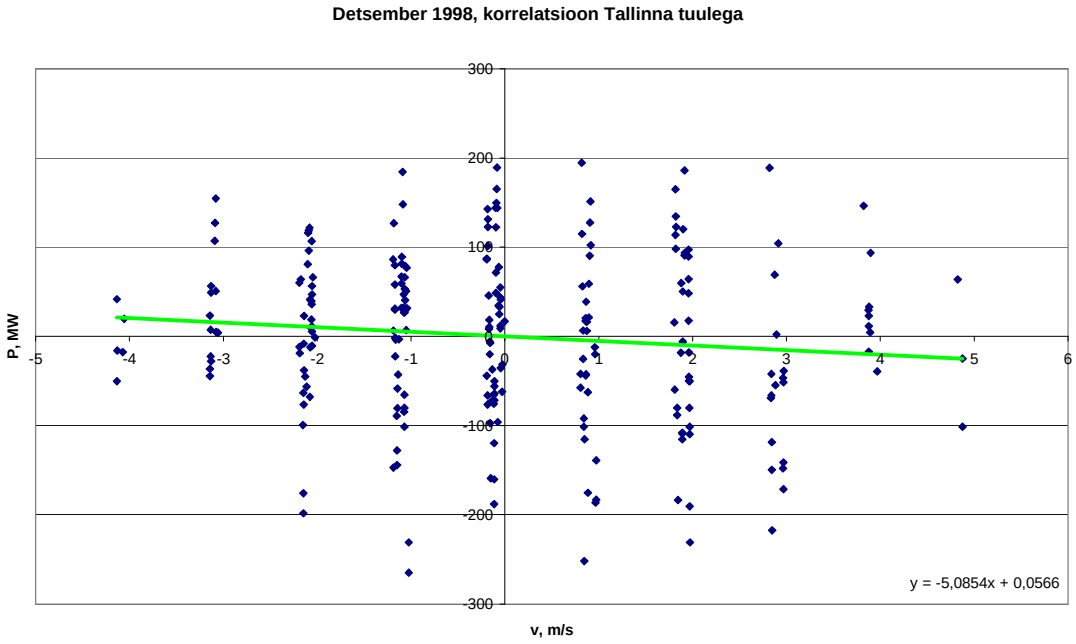

**Joonis 32. Arvutatud tuule kiiruse normaliseeritud autokorrelatsioonifunktsiooniga Tallinnas 1998 a. Detsembris**



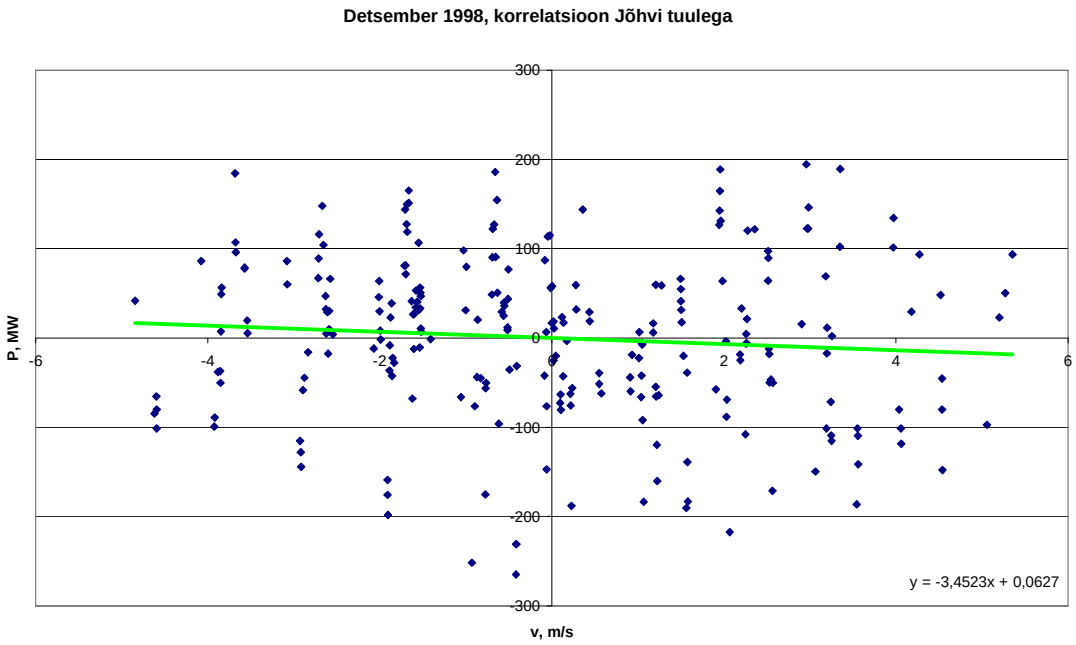

**Joonis 33. Elektri netotarbimine Eestis 1998 a. Detsembris**



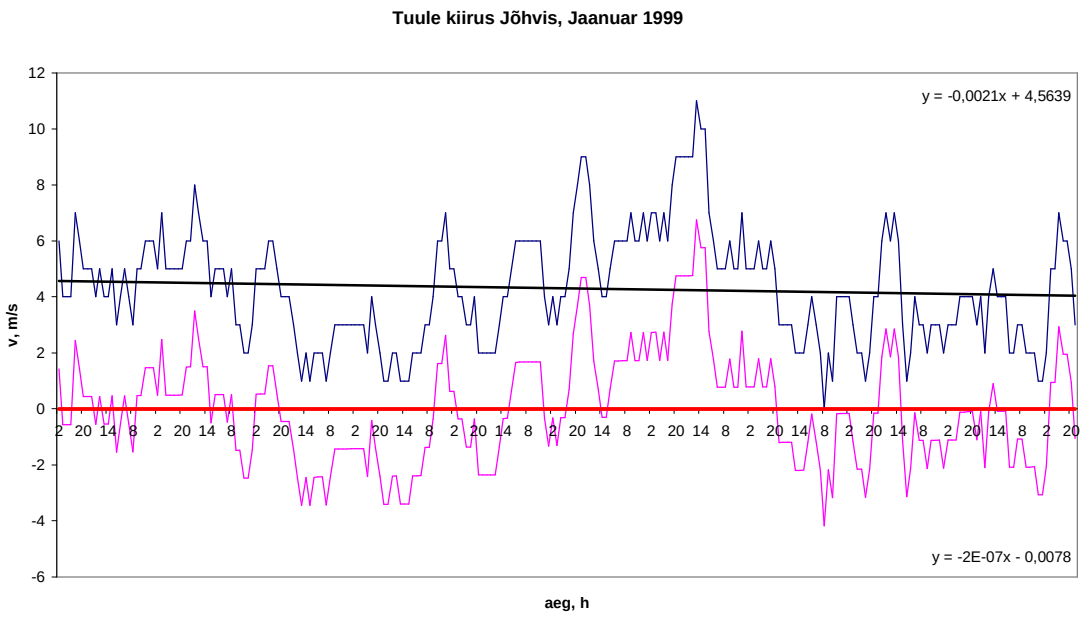

**Joonis 34. Arvutatud Eesti elektri netotarbimine normaliseeritud autokorrelatsioonifunktsiooniga Eestis 1998 a. Detsembris**



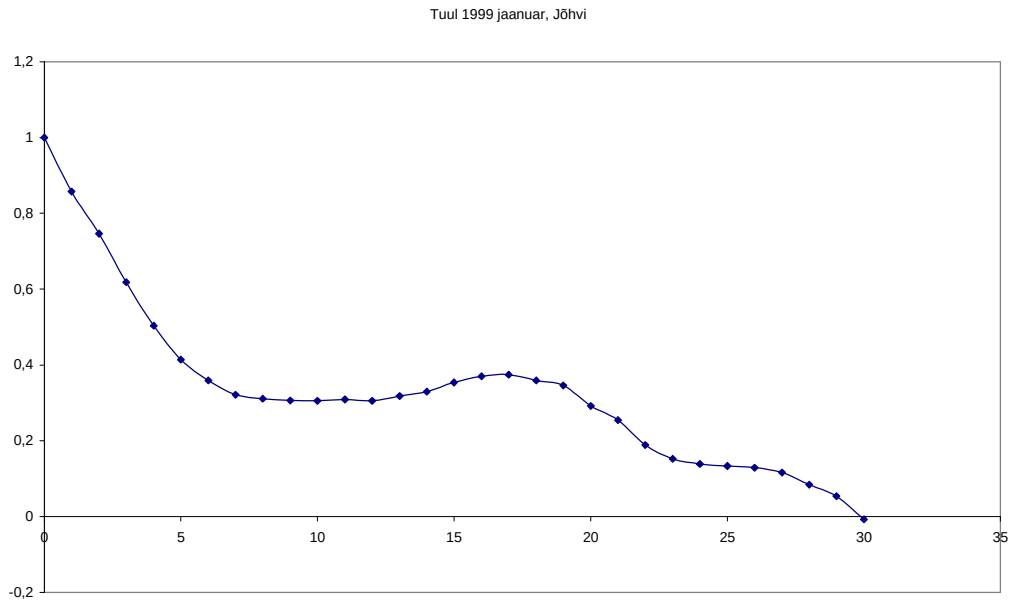

**Joonis 35. Elektri netotarbimise korrelatsioon Tallinna tuulega 1998 a. Detsembris**



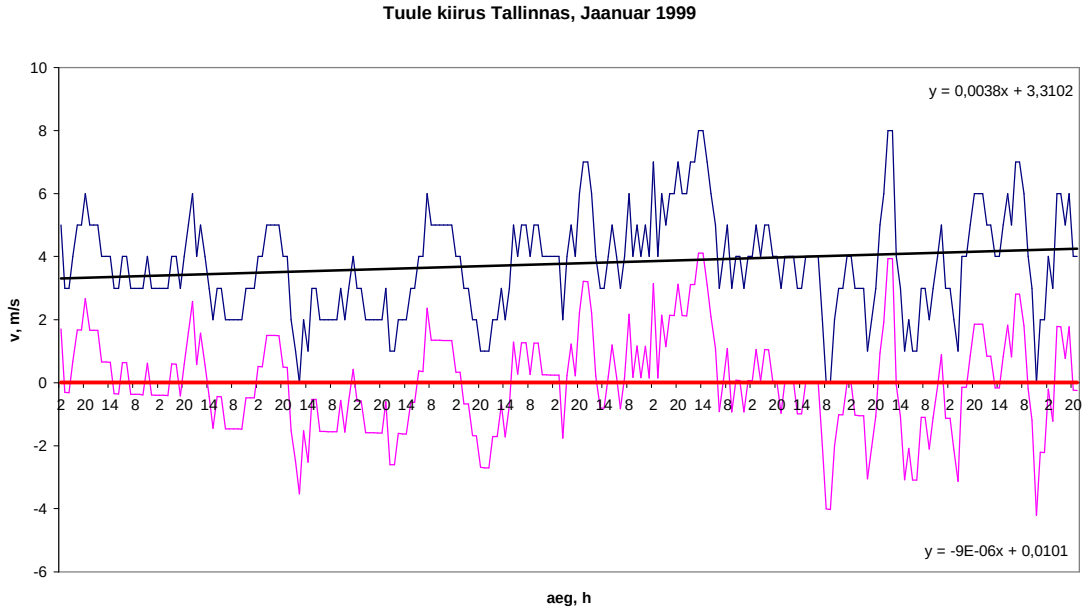

**Joonis 36. Elektri netotarbimise korrelatsioon Jõhvi tuulega 1998 a. Detsembris**



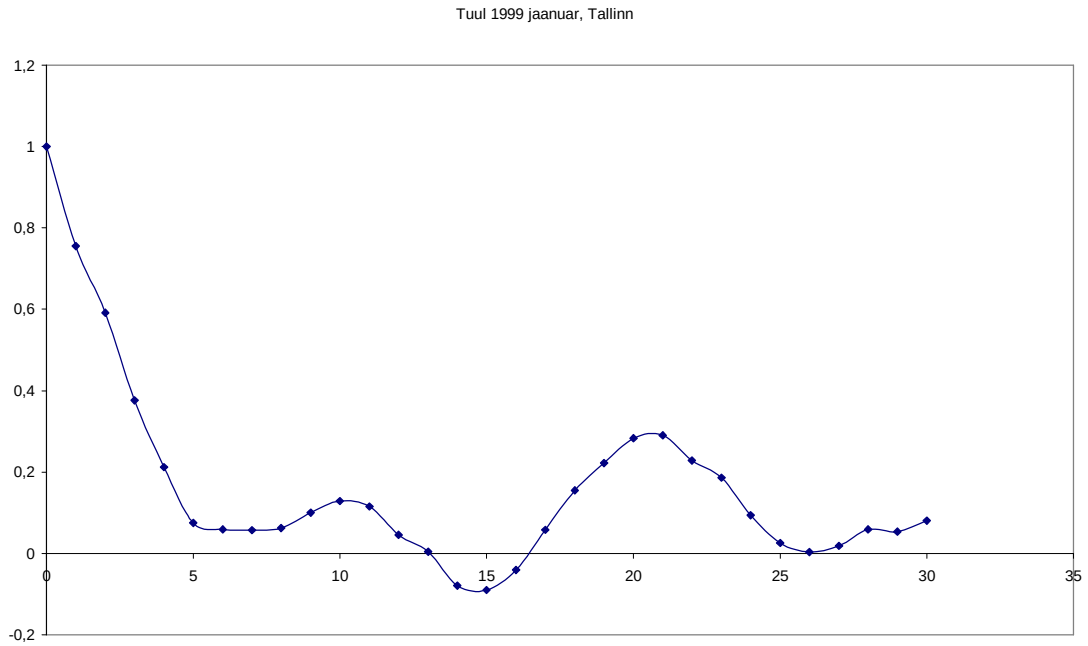

**Joonis 37. Tuule kiirus Jõhvis 1999 a. Jaanuaris**



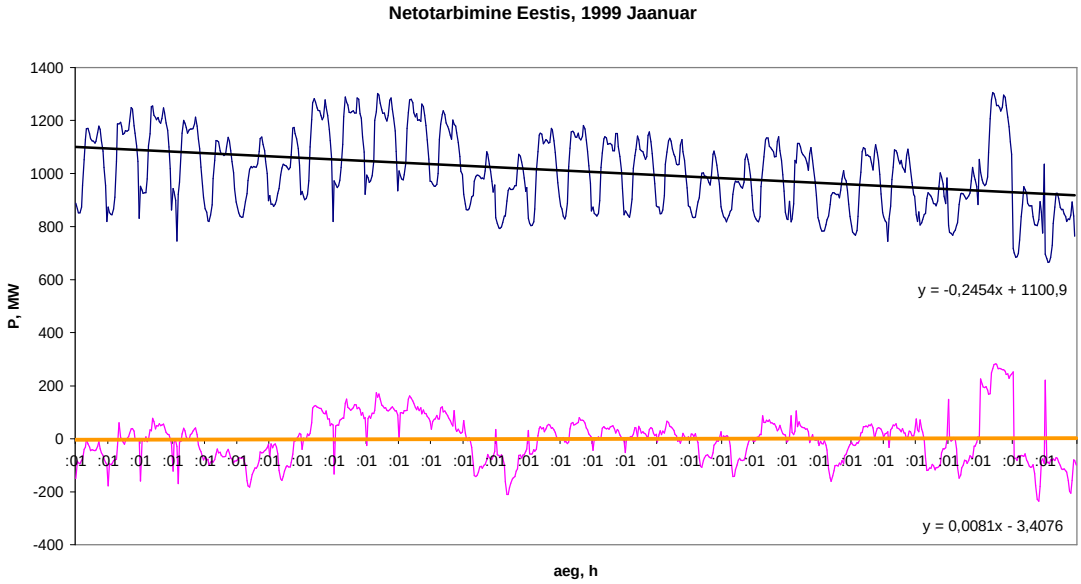

**Joonis 38. Arvutatud tuule kiiruse normaliseeritud autokorrelatsioonifunktsiooniga Jõhvis 1999 a. Jaanuaris**



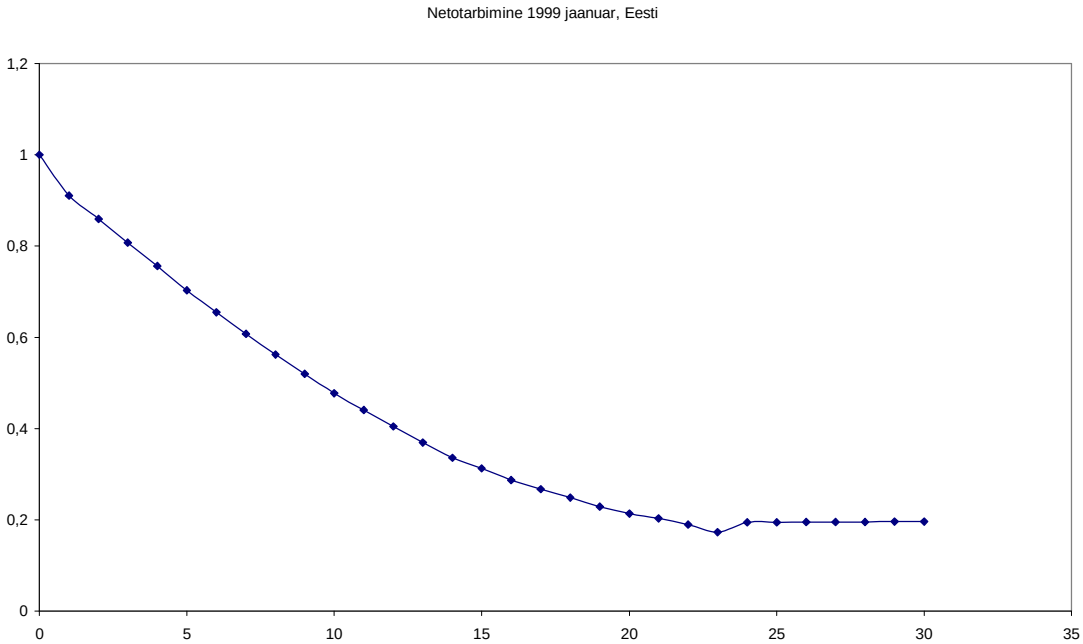

**Joonis 39. Tuule kiirus Tallinnas 1999 a. Jaanuaris**



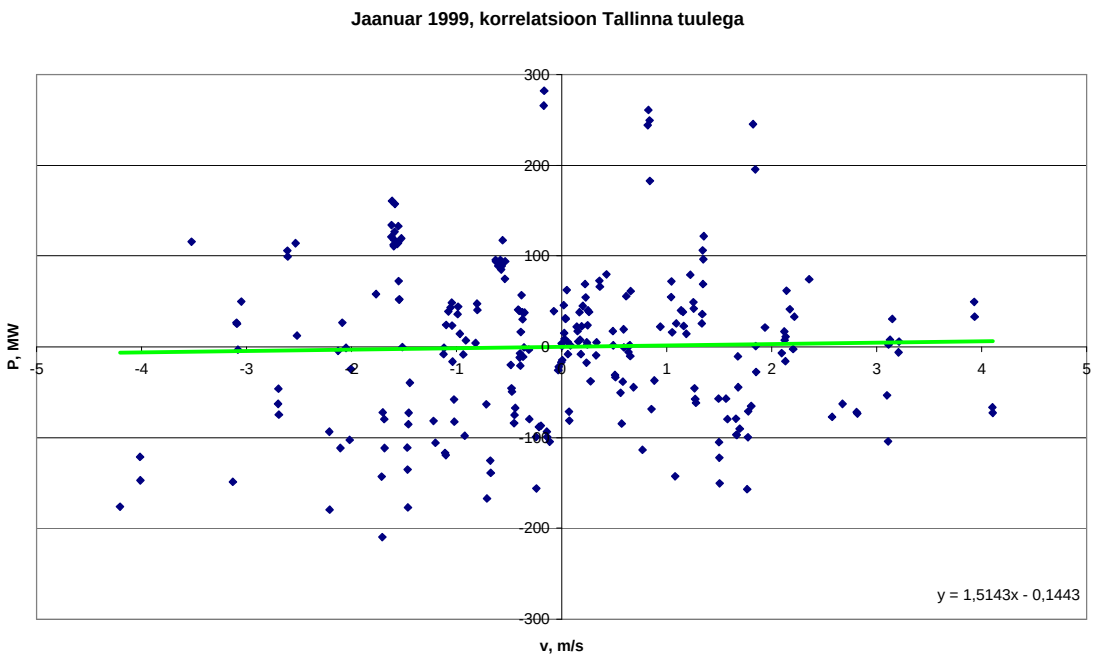

**Joonis 40. Arvutatud tuule kiiruse normaliseeritud autokorrelatsioonifunktsiooniga Tallinnas 1999 a. Jaanuaris**



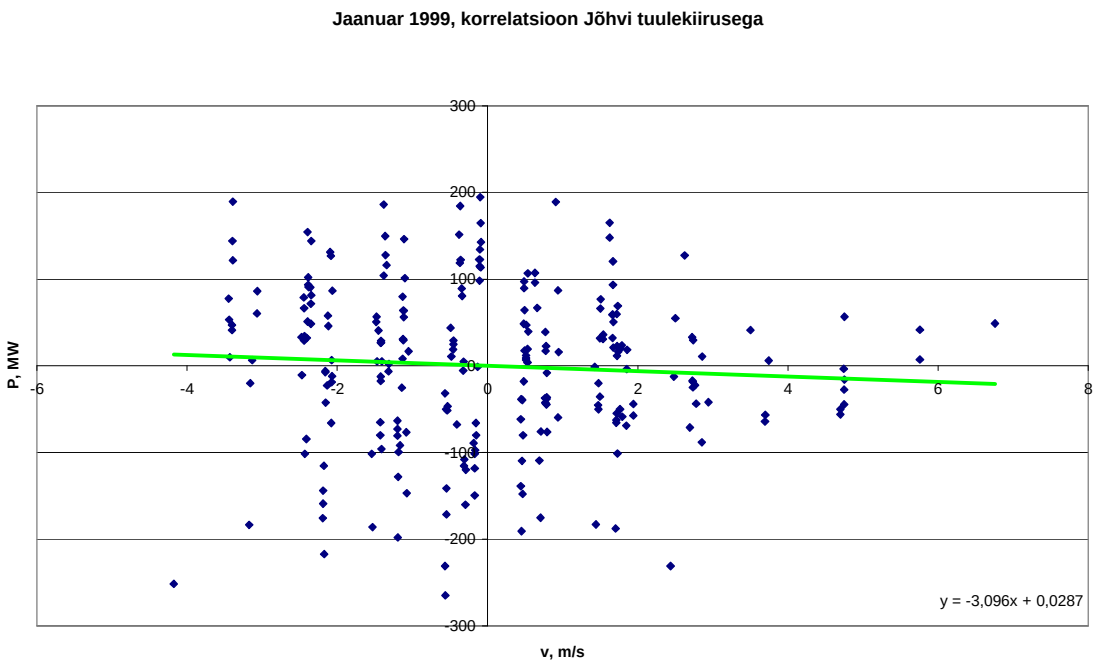

**Joonis 41. Elektri netotarbimine Eestis 1999 a. Jaanuaris**




**Joonis 42. Arvutatud Eesti elektri netotarbimise normaliseeritud autokorrelatsioonifunktsiooniga Eestis 1999 a. Jaanuaris**




**Joonis 43. Elektri netotarbimise korrelatsioon Tallinna tuulega 1999 a. Jaanuaris**




**Joonis 44. Elektri netotarbimise korrelatsioon Jõhvi tuulega 1999 a. Jaanuaris**

**Tabel V. Tuule kiiruse korrelatsioon elektrienergia tarbimisse [%/(m/s)]**

| Koht | November 1998 | Detsember 1998 | Jaanuar 1999 |
|---|---|---|---|
| Tallinn (Harku) | -1,40 | -1,92 | 0,54 |
| Jõhvi | -3,81 | -1,30 | -1,17 |
| Koos (Tall./Jõh.=1/0,42) | -1,500 | -1,233 | 0,024 |

Nagu on näha eespool toodud joonistelt ja samuti juuresolevast tabelist, on korrelatsioon nende kahe suuruse vahel praktiliselt olematu. Novembri ja detsembri korral lausa negatiivne, mis annab alust arvata, et seosed elektrienergia tarbimise ja tuule kiiruse vahel on juhuslikud, kui nad üldse eksisteerivad. Seoses saadud andmetega ei olnud mõtet otsida korrelatsiooni teiste samaväärsete perioodide korral teistel aastatel.

Järelikult ei sõltu elektrienergia tarbimine stabiilsete kuude lõikes (talvekuud) sellest, kas üldse, mis suunast ja millise kiirusega puhub tuul.

Elektrienergia tarbimine tuuliste ilmade puhul ei suurene. Koomiliselt lähenedes võib elektrienergia tarbimine tormide puhul hoopis väheneda – seda tänu alajaamade erinevatel põhjustel võrgust välja lülitamisele.

# 7 Tuuleenergeetika majanduslikkus

Peamine argument, mis tuuakse põhjuseks, et tuuleenergeetika on Eestis praktiliselt olematu, on tuuleenergia kallis hind. Et mitte kalduda tuuleenergia pooldajate ega vastaste poolele, olgu järgnevalt toodud nii ühtede kui teiste väiteid.

Tegelikkuses ei maksa tuuleenergia kui selline midagi, tinglikult on “kütus“ tasuta. Investeeringud on seevastu suured. Hinna sisse võib arvata ka mõju keskkonnale – visuaalne efekt inimestele (kellele meeldib ja kellele mitte) ja mõju looduskeskkonnale (väited ohtlikkusest lindudele ja vibratsiooni kaudu maapinnas olevale elusloodusele).

## 7.1 Tuuleenergia hind

Rootsi Tuuleenergia tehnoloogia seminaril 19.märtsil 2002. aastal Tallinnas Viru hotellis väideti, et tuuleenergia on kõige odavam energia üldse. Põhjenduseks oli toodud, et tuuleenergia on taastuvatest energiaallikatest kõige odavam ja taastumatutest odavam seoses oma keskkonnasõbralikkusega. See on kindlasti õige väide kuid teisalt – kui suur peaks olema $CO_2$ maks, et tuuleenergia suudaks konkureerida põlevkiviga?

Sellele küsimusele andsid hinnangu Olev Liik ja Markko-Raul Esop Tallinna Tehnikaülikoolist oma ettekandes "Tuuleenergia konkurentsivõime ja $CO_2$ emissioonide vähenemise analüüs Eestis mudeliga MARKAL" teisel TEUK (Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine) konverentsil [21]. Uurimus oli osaks Eesti Teadusfondi grandiprojektist "Tuulegeneraatorite kasutamise võimalused ja efektiivsus Eestis". Maailmapraktikas võetakse tuuleenergiat kasutusele vaid majanduslike soodustustega. Antud uurimuses aga üritati välja selgitada tuuleenergeetika konkurentsivõimet subsideerimise puudumisel Rahvusvahelise Energiaagentuuri energeetika, majanduse ja keskkonna kompleksse pikaajalise planeerimise mudeliga MARKAL, kasutades TTÜ elektroenergeetika Instituudis välja töötatud andmebaasi. Vaadeldi selle uurimuse käigus kolme tuulegeneraatori varianti:

- rannikul heades tuuletingimustes;
- rannikul parimates tuuletingimustes;
- rannikumeres (offshore).

Analüüsi ja uurimuse tulemustest selgub, et konkurentsivõime 2000. aasta investeeringute maksumusest tagaks:

- rannikul parimates tuuletingmustes investeeringukulu 44-69%;
- rannikul heades tuuletingimustes investeeringukulu 31-50%;
- rannikumeres olevate tuulikute puhul 27-30%.

Tegelike investeeringukulude korral tagaks konkurentsivõime $CO_2$ maks 100 $\$/t_{CO2}$ mis on vägagi ebareaalne, kuid arvestades järjest rangemaid keskkonnanõudeid ja Eesti peatset potentsiaalset liikmestaatust Euroopa Liidus, võib see olukord saabuda oodatust varem.

*Märkus:* Eestis oli kehtestatud $CO_2$ maks 2000. aastal 5 EEK/$t_{CO2}$ = 0,38 \$/$t_{CO2}$ ja 2001. aastal 7,5 EEK/$t_{CO2}$ = 0,57 \$/$t_{CO2}$ (ümberarvutuskursid kõikide hindade puhul on 13,16 EEK = 1 \$). Samas on maailmas kehtimas nn vaikne kokkulepe, et elektrijaamad vähemalt praegusel hetkel $CO_2$ emiteerimise eest ei maksa.

Tegelik olukord Eestis on üles ehitatud emissioonipõhiselt – seaduse järgi maksustatakse 50 MW ja üle selle seadmeid omavaid emiteerijaid. Maksustamine toimub emiteeritava koguse järgi. Looduskaitsjad ja eksperdid on teinud ettepaneku maksustada kütused sarnaselt aktsiisimaksuga. Seega, kütuse hinna sisse on arvatud lisaks hinda kujundavatele teguritele ka saaste hind (arvutatakse ümber algainele – näiteks $CO_2$ puhul süsinikule).

Saastetasud Eesti Vabariigis on toodud Lisas 1.

Seega on autorite poolt tehtud järeldus, et tuuleelektrijaamade konkurentsivõimet suurendaks ühelt poolt madalam investeeringute maksumus koos kõrgema toodetud elektri ostuhinnaga ja teisalt fossilsete energiaallikate baasil toodetud elektri kallinemine tänu keskkonnamaksudele ning kütuse hinnatõusule.

Autorite poolt on välja toodud ka väide, et uute investeeringute ja muude tegurite mõjul elektri hind Eestis kasvab, kuid samal ajal väheneb ka tuulegeneraatoritega saavutatav keskkonnasääst tänu uute tehnoloogiate paremale efektiivsusele. Pika aja jooksul arenevad ja muutuvad odavamaks ka teised praegu kallid taastuvenergia tehnoloogiad, saades omakorda konkurendiks tuuleenergiale. Kahjuks on autorid oma ettekandes unustanud fakti, et ka tuuleenergia tehnoloogiad muutuvad odavamaks, mis hinnanguliselt veel selle kümnendi lõpuks võib muuta nad konkurentsivõimeliseks praegu kasutusel olevate taastumatute energiaallikate tehnoloogiatega, rääkimata teistest taastuvenergia tehnoloogiatest.

## 7.2 Elektrienergia tootmiskulud erinevate tootmis-tehnoloogiate kasutamisel

Et arvutada summaarseid elektrienergia tootmiskulusid sõltuvana kasutatavast tehnoloogiast ja kütuse liigist on olulise faktorina vaja teada tulevase elektrijaama või energiaploki töörežiimi. Aastased töötundide arvud on vägagi erinevad töötamisel tipp-, pooltipp- või baaskoormusel.

Majandusministeeriumi poolt tellitud töö [22] alusel on koostatud tabel VI.

Tabeli koostamisel on arvestatud järgnevate nimivõimsuse kasutustundide arvuga aastas:

- Kondensatsioonelektrijaamad (-energiaplokid) - 5000 h;
- Koostootmisjaamad - 5000 h;
- Tuumaelektrijaamad - 6000 h;
- Tuulegeneraatorid - 2200 h.

*Märkus:* Esitatud arvud näitavad et arvestatud on elektrijaamade (-plokkide kasutamisega peamiselt baaskoormuse katteks).

Arvestuslik tööiga (tööressurss) on algandmetesse esitatud järgnevalt:

- Kondensatsioonelektrijaamad (-energiaplokid) kivisöel või raskel kütteõlil - 30 a.;
- Kondensatsioonelektrijaamad (-energiaplokid) maagaasil või kergel kütteõlil - 35 a.;
- Kombitsükliga jaamad - 30 a.;
- Gaasiturbiinjaamad - 25 a.;
- Tuulegeneraatorid - 20 a.;
- Tuumaelektrijaamad - 35 a..

*Märkus:* Tänapäevased tehnoloogiad annavad tuulegeneraatoritele siiski pikema eluea – kuni 30 a. See muudab tuulest toodetud elektri hinna tunduvalt soodsamaks. Kriitikat nõuab ka kasutustundide arv. Antud juhul on arvestatud võimsuskoefitsendiga $C_p$=0,25. Siiski on see suuresti sõltuv tuuletingimustest tuuliku paiknemiskohas ja ka tuuliku tüübist. Tänapäeval arvestatakse võimsuskoefitsendiga $C_p$=0,3 ja rohkemgi. Vaadeldes võimsuskoefitsenti tervele Eestile, tuleb see suurtes piirides $C_p$=0,2.

Seega ei saa võtta tehtud arvutusi absoluutse tõena. Samas tuleb märkida, et välistatud ei ole eespool toodud näitajate (eluiga ja kasutustundide arv) hoopis madalamad väärtused, kui antud arvutustes aluseks on võetud.

Tehtud uurimuses on võetud eelduseks, et investeeringud kaetakse pangalaenu arvelt. Intressimääraks on arvestatud 6% ja laenu kestuseks 12 aastat. Pangalaen on võetud aluseks seetõttu, et Eesti tingimustes on väga vähe tõenäoline, et investeeringud kaetakse omavahenditest, ka sellise Eesti mõistes hiidettevõtte nagu Eesti Energia

(EE) puhul (seoses kahe energiaploki renoveerimisega lähiajal on EE-l kavatsus võtta laenu mitu (täpset numbrit ei tea ka Eesti Energia käesoleva töö valmimise hetkeks ise) miljardit krooni).
Tehtud töös kasutatud intressimäär ja laenu ajaline kestus on hetkel sellised, mida Eesti pankadest pole võimalik saada. Järelikult kergitaks laenulepingu sõlmimine Eesti pankadega praegusel hetkel energia tootmiskulusid veelgi.
Arvutustes on laenu tagasimakse juures kasutatud võrdsete aastamaksete ehk annuiteedi meetodit.

Olulisteks komponentideks toodetava energia hinna prognoosimisel kujuneb kasutatava kütuse hind ja seadme kasutegur. Arvutustes on lähtutud 2000. aasta keskmistest Eesti hindadest, välja arvatud tuumakütus. Otseselt vastab Eesti andmetele vaid kütuse hind. Arvestatud ei ole kütuse hinna muutumist aastate lõikes, ei ole läbi viidud detailset rahavoogude arvutust aastate lõikes elektrijaama (-ploki) (diskonteerimata rahavood ilma inflatsiooni arvestamata).
Arvutused läbi viinud eksperdid vaatleksid tabelis VI. toodud väärtusi pigem lähtekohana teatud suhete või suundumuste kindlaks tegemisel. Saadud arvulised väärtused, mis on esitatud tabelis VI. täpsustuvad sedavõrd, kuivõrd otsustatakse edasi minna lähteülesande täpsustamisega ja tehnoloogilise skeemi valikuga. Isegi täielikult valitud tehnoloogilise skeemi ja seadmete korral pole arvutuste tulemusena leitud tootmiskulud veel kaugeltki lõplikud, kapitalikulu täpsustub vähempakkumiste korraldamisel ja saab täpse väärtuse alles pärast montaaþi- ja häälestustööde lõpetamist.

Töö teostanud eksperdid on teinud arvuste tulemusena järgnevad olulised järeldused:
Energia tootmishind sõltub kasutatava kütuse liigist ja kasutatavast energiamuundamise tehnoloogiast.

- Ekspertide analüüsi kohaselt annab minimaalse energia tootmishinna tuumaelektrijaamade tehnoloogia kasutamine. Samas tuleb sellesse suhtuda teatud reservatsioonidega. Nimelt on tänapäeval püstitatavate tuumajaamade energiaplokkide võimsused tavaliselt väga suured (600 MW ja enam), sellised energiaplokid Eestisse ei sobi. Teiseks, põhilised andmed tuumajaamade kohta pärinevad maadest, kus seda tehnoloogiat kasutatakse laiaulatuslikult ja on olemas vastav koolitussüsteem, kogemus ja riiklik tuumaohutuse tagamise süsteem. Eestis

ei ole sellealast kogemust, koolitussüsteemi ega ka riiklikku tuumaohutuse tagamise süsteemi. Vastavate süsteemide tagamine maksab väga palju, neid kulutusi on siinkohal väga raske hinnata. Suhteliselt väikese tootmishinna tuumajaamade korral on saanud oma arvutustes ka Soome spetsialistid;

- Suhteliselt madala tootmishinna on eksperdid saanud oma arvutuste kohaselt mitme variandi korral, mis on seotud maagaasi kasutamisega kütusena (nii kondensatsioonjaamade kasutamisel, kombitsükli kasutamisel kui ka avatud tsükli gaasiturbiinide kasutamisel);
- Tuulegeneraatorite kasutamisel annavad ekspertide arvutused suhteliselt kõrge elektri tootmishinna nagu ka kohalike kütuste (puidu ja turba) kasutamisel. Biomassi põletavate jaamade korral on ka teiste kirjandusest leitavate andmete korral elektrienergia tootmishind kõrge;
- Kohalike kütuste kasutamisel on koostootmisjaama energia tootmiskulud (tingituna suurest kapitalikulust) sedavõrd suured, et vähemalt praegu selline uus ettevõte ei saaks oma toodanguga Eesti turule. Koostootmisjaamade korral annab mõistliku energia tootmishinna maagaasi kasutamise variant ja ilmselt võib sellest oodata tõsist konkurenti elektrienergia tootmisel vabaturu tingimustes.

*Märkus:* Eksperdid soovitavad võrrelda tabelis VI. saadud andmeid ühest allikast saadud andmetega, mis toodud tabelites VII. ja VIII.

**Tabel VI. Potentsiaalsed energia tootmiskulud (energia hind jaama lattidel, ilma maksudeta) [22].**

| Kütuse (energiakandja) liik | Baasinves-teering | Kapitali osa energia tootmiskuludes | Summaarsed käitamis- ja hoolduskulud (va kütus) | Kütuse osa energia tootmiskuludes | Energia summaarsed tootmiskulud laenu tagasimakse perioodil | Energia summaarsed tootmiskulud arvutatuna kogu tööea kohta |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | EEK/$kW_{el}$ | s/kWh | s/kWh | s/kWh | | |
| *Kondensatsioonjaamad* | | | | | | |
| Kivisüsi | 18000...22000 | 42,9...52,5 | 8,2...19,0 | 29,6 | 81...101 | 62...78 |
| Raske kütteõli | 19000...20000 | 45,3...47,7 | 9,2...10,0 | 38,5 | 93...95 | 73...75 |
| Kerge kütteõli | 13700...17000 | 32,7...40,6 | 8,2...9,0 | 94,8 | 136...144 | 119...123 |
| Maagaas | 10500...12000 | 25,0...28,6 | 12,0...12,9 | 29,8 | 62...65 | 49...51 |
| *Kombitsükliga jaamad* | | | | | | |
| Kerge kütteõli | 10000...12000 | 23,9...28,6 | 9,3...10,0 | 66,4 | 100...104 | 85...87 |
| Maagaas | 8000...9000 | 19,1...21,5 | 7,7...9,0 | 20,9 | 48...50 | 41...42 |
| *Gaasiturbiinjaamad* | | | | | | |
| Maagaas | 6500...7500 | 15,5...17,9 | 5,5...6,0 | 35,8 | 57...59 | 50...51 |
| *Koostootmisjaamad (CHP)* | | | | | | |
| Kivisüsi | 29000...34000 | 69,2...81,1 | 10,3...20,0 | 14,6 | 95...112 | 65...79 |
| Raske kütteõli | 27000...31000 | 64,4...74,0 | 16,0...17,0 | 19,0 | 100...110 | 73...78 |
| Hakkpuit | 25000...29000 | 59,6...69,2 | 17,0...18,0 | 7,5 | 85...94 | 59...64 |
| Turvas | 25000...29000 | 59,6...69,2 | 13,0...15,0 | 9,4 | 82...92 | 56...62 |
| Maagaas | 12500...14000 | 29,8...33,4 | 7,0...8,0 | 14,7 | 52...55 | 39...41 |
| *Tuumaelektrijaamad* | | | | | | |
| Tuumakütus | 22000...28000 | 43,3...55,7 | 9,0...10,0 | 6,3 | 59...71 | 37...43 |
| *Tuulegeneraatorid* | | | | | | |
| Tuul | 16000...18000 | 86,7...97,6 | 10,0 | | 97...108 | 77...85 |
| *Hüdroelektrijaamad* | | | | | | |
| Vesi (taastatavad) | 10000...20000 | 29,8...59,6 | 3,0...8,0 | | 33...70 | 10...22 |
| Vesi (uued) | 25000...50000 | 78,5...156,9 | 3,0...8,0 | | 81...165 | 26...54 |
| *Gaasimootoriga generaatorid* | | | | | | |
| Maagaas | 14000...16500 | 33,4...39,4 | 14,0...16,5 | 14,7 | 62...71 | 51...57 |

**Tabel VII. Elektrienergia arvestuslikud tootmiskulud uutes Rootsi elektrijaamades [23]**

| Elektrijaama või energiaploki tüüp | Elektri tootmiskulud s/kWh |
|---|---|
| Hüdrojaamad | 47...64 |
| Kondensatsioonjaamad (õli) | 55...62 |
| Kondensatsioonjaamad (süsi) | 55...62 |
| Kondensatsioonjaamad (puiduhake) | 122...133 |
| Tuulegeneraatorid | 44...52 |
| Kombijaamad (maagaas) | 47...62 |
| Koostootmisjaamad (CHP) | 42...95 |

**Tabel VIII. Elektrienergia võimalikud tootmiskulud erinevate tootmistehnoloogiate kasutamisel [24]**

| Elektrijaama või energiaploki tüüp koos kasutatava tehnoloogia ja kütusega | Elektri tootmiskulud s/kWh |
|---|---|
| Kondensatsioonjaamad kivisöe tolmpõletamisega | 52...85 |
| Kondensatsioonjaamad kivisöe põletamisega atmosfäärirõhul keevkihis (AFBC) | 63...69 |
| Kondensatsioonjaamad kivisöe põletamisega rõhu alla keevkihis (PFBC) | 54...66 |
| Kondensatsioonjaamad integreeritud gasifikaatoritega kivisöe põletamiseks (IGCC) | 64...66 |
| Kombitsükliga jaamad (gaasiturbiinidega) | 48...95 |
| Tuumajaamad (kerge vee reaktoritega) | 73...96 |
| Suured hüdrojaamad | 49...113 |
| Tsentraliseeritud fotoelektriliste muunduritega jaamad | 147...816 |
| Geotermaal-elektrijaamad | 31...64 |
| Tuulegeneraatorid | 57...99 |
| Suured biomassi põletavad elektrijaamad | 97...101 |

Hinnang ekspertide poolt läbi viidud arvutustele ja saadud tulemustele:

1. Esmalt peab mainima, et eksperdid ise on suhtunud saadud tulemustesse kriitiliselt ja pigem näeksid toodud arve suhteliseks võrdlemiseks ühe või teise tootmistehnoloogia ja kütuse puhul. Saab väita, et tuulegeneraatoritega elektrienergia tootmishind võib olla nii kõrgem kui madalam. Seoses tehnoloogiate pideva täiustumise ja seeläbi võimsuse kasutusteguri suurenemise ning eluea pikenemisega kaldub vaekauss pigem madalama hinna poole

2. Teine oluline aspekt selles uuringus on, et tuulegeneraatorid on ainsaks elektrienergia tootmisviisiks taastuvatest energiaallikatest, mis suudavad konkurentsi pakkuda konventsionaalsetele energiatootmisviisidele ja elektrienergia tootmise hind kujuneb märgatavalt odavamaks võrreldes puidu ja turba kasutamisega samal eesmärgil;
3. Tuuleenergiast toodetava elektri hinda enim mõjutavateks teguriteks on kapitali maksumus, pangast võetava laenu tingimused ja tuuletingimused tuuliku asukohas. Need kolm suurust on vägagi varieeruvad.

*Järeldus:* hea investeerimisskeemi ja asukoha puhul on võimalik hoida tuulest toodetava elektrienergia hinda tasemel, mis suudab konkurentsi pakkuda kõikidele teistele energiatootmisviisidele (välja arvatud (rist)subsideeritud energiatootmisviisid).

## 7.3 Tuulest toodetud elektri müügihind lähtuvalt Eesti Vabariigi õigusaktidest

Peamiseks tuuleenergia kasutamist elektri tootmiseks piiravaks teguriks loetakse täiesti põhjendatult Eestis suhteliselt madalat elektri hinda, mis mõjutab vastavalt õigusaktides sätestatule tuulest toodetud elektri kokkuostuhinda. Praegu kehtiva Energiaseaduse § 28[1]. “Alternatiivselt toodetud elektrienergia ostukohustus” (Lisa 2) alusel on tuulest toodetud elektri ostukohustus 90% hinnaga kodutarbija tariifist, eeldusel, et alternatiivselt toodetud elektri kogumaht ei ületa kahte 2% möödunud aasta elektritoodangust ja installeeritud seadmete (antud juhul tuulikute) võimsus ei ületaks 10 MW. Seadus on siiski koostatud puudulikult, nimelt ei ole tänini selgeks vaieldud teemat, kas kodutarbija põhitariifi arvestatakse koos või ilma käibemaksuta. See on faktor mis mõjutab hinda oluliselt. Energiaseadus sätestab alternatiivselt toodetud elektrit, seega tuleb pöörduda tagasi käesoleva kirjutise algusesse ja vaadelda alternatiivse ning taastuvenergia vahet. Tänu seaduses sätestatud alternatiivsetele elektritootmisviisidele toodeti Ida-Virumaal edukalt elektrit põlevkivi uttegaasidest ja saadi Eesti Energialt kui elektrit kokku ostvalt institutsioonilt 90% kodutarbija tariifist. Seeläbi oli ületatud 2% piir ning teistele “alternatiivselt” elektrit tootvatele ettevõtetele praktiliselt enam ruumi polnud.

Käesoleval ajal on koostamisel uus Elektrituru seadus, kus eelpool toodud probleemid on suures osas leidnud lahenduse. Elektrituru seaduseelnõu taastuvenergia ostukohustust puudutav on toodud Lisas 3. Seaduseelnõu kohaselt on taastuvenergia baasil toodetud elektrienergia ostukohustuse hind 1,75 korda Narva elektrijaamade müügihind, tuulest toodetud elektrienergiale fikseeritud ajaperioodiga 12 aastat, kuid mitte kauem kui 2015 aasta lõpuni. Seega on ostukohustuse hind taas seotud Narvast väljastatava elektri hinnaga.

Hr. Vello Selg Tallinna Tehnikaülikooli Soojustehnika Instituudist on koostanud erinevate visioonide ja algandmete alusel elektri põhitariifi prognoosi kodutarbijatele ning selle baasil tuuleelektri müügihinnale. Käesoleva kirjutise autor võttis endale vabaduse teha järgnevale tabelile täiendusi uue seaduseelnõu tähenduses ja eeldusel, et kodutarbija põhitariifi arvestatakse ilma käibemaksuta. Tabelis IX. toodud tuuleelektri ostuhind on toodud arvutatuna kolmel erineval moodusel:

- moodus I – tuulest toodetud elektrit ostetakse hinnaga mis moodustab 90% kodutarbija põhitariifist (kodutarbija põhitariifi arvestatakse kuni 2006 aasta lõpuni koos käibemaksuga ja sealt edasi ilma;
- moodus II - tuulest toodetud elektrit ostetakse hinnaga mis moodustab 90% kodutarbija põhitariifist (kodutarbija põhitariifi arvestatakse ilma käibemaksuta);
- moodus III – tuulest toodetud elektrit ostetakse hinnaga mis on 1,75 korda Narva elektrijaamades toodetava elektri hind.

**Tabel IX. Elektri põhitariif kodutarbijatele ja tuuleelektri müügihind**

| Aasta | inflatsioonita reaalhind, s/kWh | hinna muutus, % | inflatsioon, % | tegelik muutus, % | tegelik reaalhind, s/kWh | tegelikud lisakulud, s/kWh | põhitariifi prognoos, s/kWh | kodutarbija põhitariif koos k.m.-ga, s/kWh | I moodus, s/kWh | II moodus, s/kWh | III moodus, s/kWh |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **2001** | 35,00 | 12,00 | 6,00 | | | 43,75 | 76,27 | 90,00 | ***81,00*** | ***68,64*** | |
| **2002** | 39,20 | 9,36 | 5,10 | 17,10 | 40,99 | 46,37 | 87,36 | 103,08 | ***92,77*** | ***78,62*** | ***71,72*** |
| **2003** | 42,87 | 7,30 | 4,34 | 13,70 | 46,60 | 48,74 | 95,34 | 112,50 | ***101,25*** | ***85,81*** | ***81,55*** |
| **2004** | 46,00 | 5,69 | 3,68 | 10,99 | 51,72 | 50,85 | 102,57 | 121,03 | ***108,93*** | ***92,31*** | ***90,51*** |
| **2005** | 48,62 | 4,44 | 3,13 | 8,83 | 56,29 | 52,72 | 109,01 | 128,63 | ***115,77*** | ***98,11*** | ***98,50*** |
| **2006** | 50,77 | 3,46 | 2,66 | 7,10 | 60,28 | 54,38 | 114,66 | 135,30 | ***121,77*** | ***103,20*** | ***105,50*** |
| **2007** | 52,53 | 2,70 | 2,26 | 5,73 | 63,74 | 55,82 | 119,56 | 141,08 | ***107,60*** | ***107,60*** | ***111,54*** |
| **2008** | 53,95 | 2,11 | 2,00 | 4,70 | 66,73 | 57,09 | 123,82 | 146,11 | ***111,44*** | ***111,44*** | ***116,79*** |
| **2009** | 55,09 | 1,64 | 1,94 | 3,58 | 69,12 | 58,23 | 127,35 | 150,28 | ***114,62*** | ***114,62*** | ***120,97*** |
| **2010** | 55,99 | 0,00 | 1,88 | 1,88 | 70,42 | 59,36 | 129,78 | 153,14 | ***116,81*** | ***116,81*** | ***123,24*** |
| **2011** | 55,99 | 0,00 | 1,82 | 1,82 | 71,71 | 60,47 | 132,18 | 155,97 | ***118,96*** | ***118,96*** | ***125,48*** |
| **2012** | 55,99 | 0,00 | 1,76 | 1,76 | 72,97 | 61,57 | 134,54 | 158,75 | ***121,08*** | ***121,08*** | ***127,69*** |
| **2013** | 55,99 | 0,00 | 1,70 | 1,70 | 74,21 | 62,66 | 136,87 | 161,50 | ***123,18*** | ***123,18*** | ***129,86*** |
| **2014** | 55,99 | 0,00 | 1,64 | 1,64 | 75,42 | 63,72 | 139,14 | 164,19 | ***125,23*** | ***125,23*** | ***131,99*** |
| **2015** | 55,99 | 0,00 | 1,58 | 1,58 | 76,62 | 64,77 | 141,39 | 166,84 | ***127,25*** | ***127,25*** | ***134,08*** |
| **2016** | 55,99 | 0,00 | 1,52 | 1,52 | 77,78 | 65,79 | 143,57 | 169,41 | ***129,21*** | ***129,21*** | ***136,12*** |
| **2017** | 55,99 | 0,00 | 1,46 | 1,46 | 78,92 | 66,79 | 145,71 | 171,93 | ***131,14*** | ***131,14*** | ***138,10*** |
| **2018** | 55,99 | 0,00 | 1,40 | 1,40 | 80,02 | 67,77 | 147,79 | 174,39 | ***133,01*** | ***133,01*** | ***140,04*** |
| **2019** | 55,99 | 0,00 | 1,34 | 1,34 | 81,09 | 68,71 | 149,80 | 176,77 | ***134,82*** | ***134,82*** | ***141,91*** |
| **2020** | 55,99 | 0,00 | 1,28 | 1,28 | 82,13 | 69,64 | 151,77 | 179,09 | ***136,59*** | ***136,59*** | ***143,73*** |
| **2021** | 55,99 | 0,00 | 1,22 | 1,22 | 83,13 | 70,53 | 153,66 | 181,32 | ***138,30*** | ***138,30*** | ***145,48*** |

Hr. Vello Selg on tabeli koostamisel lähtunud järgnevatest põhimõtetest:

- Eestis tekib vaba elektriturg, mis piirab senise monopoolse elektritootja võimalusi hinda pidevalt suvaliselt tõsta. Kuna praegused suured elektrijaamad lähevad renoveerimisele, sama toimub ka elektri transpordivõrkudega, põhjustab see kaasnevate suurte kulutuste katmiseks lähiaastatel (5...7 aasta jooksul) hinna suuremat kuid lõpuaastatel alanevas tempos kasvu. Seejärel aga toimub hinnatõus ainult vastavalt pidevalt alanevale inflatsioonile;
- Prognoosil lähtutakse lähtetariifist 90 senti/kWh 2001 aastal;
- Elektritariifi laeks Eesti kodutarbijale kujuneb Energiaturu Inspektsiooni eelmise peadirektori hinnangul tõenäoselt 1,5...1,7 EEK/kWh või veidi rohkem;
- Narva Elektrijaamade erastamise elektri hinnakujunduslikust osast oli NRG äriplaanis elektrihinna reaalhinna tõus 0,35 kroonist 0,533 kroonini kilovatt-tunni eest inflatsiooni arvestamata. Renoveerida tuleb sõltumata omanikust ja ligikaudu samad arvud jäid reaalhinna tõusu prognoosil aluseks.

Taoline hinnatõus antud perioodi vältel tähendab iga-aastast keskmist hinnatõusu eelmise aasta tasemest 7,922 % ehk u 8 %. Keskmist 8 %-list hinnatõusu + inflatsiooni arvestatakse alates aastast 2001.

- Inflatsiooni suuruseks aastal 2001 arvestatakse 6 %. Selle aluseks on viimaste aastate üldise tarbijahinnaindeksi kasvu alanev tendents (1998 aastal oli THI kasv u. 6,5%, IMF ennustas 1999 aastaks THI kasvuks 4%, 2000 aastaks aastainflatsiooni 3%) ja Valitsuse poolt välja kuulutatud kokkuhoiupoliitika. Seejuures on aga riiklikult reguleeritavate hindade (siia kuuluvad ka elektritariifid) kasv kiirem kui muudel hindadel ja seega inflatsioon mõnevõrra kõrgem. Järgmistel aastatel nähakse ette inflatsiooni iga-aastast vähenemist 2 % võrra kuni 2007 aastani ja seejärel < 2 %-list inflatsiooni aastas.
- Tariifi aastane kasv on algaastatel suurem (2001 aastal 14,7 %), seejärel pidevalt väheneb (2006 aastal 3,3 %). Perioodil 2007 kuni 2020 on tariifi iga-aastane kasv, vastavalt loodetavale vähenevale inflatsioonile 2,4...1,9 %. Elektritariifi suuruseks aastal 2020 oleks taolise skeemi kohaselt 165 s/kWh, milline tase mahuks ka Elektrihinna Inspektsiooni peadirektori poolt ette seatud piiridesse.

Kõik arvutused ning prognoosid on tehtud EEK$^{1999}$ vääringus.

## 7.4 Maailmas installeeritud elektrituulikute võimsus

**Tabel X. Maailmas installeeritud elektrituulikute võimsus 2001 a. lõpu seisuga [25]**

| Riik | Installeeritud tuulikute võimsus, 2001 aasta lõpp | Rahvuslik tuuleenergia eesmärk | Taastuvenergia osakaal elektritarbimises (%) 1997 | Taastuvenergia osakaal elektritarbimises (EL direktiiv…) (%) 2010 |
|---|---|---|---|---|
| Austria | 92 MW | | 70,0 | 78,1 |
| Belgia | 24 MW | 6% - 2010 | 1,1 | 6 |
| Taani | 2566 MW | 50% - 2030 (5500 MW) | 8,7 | 29 |
| Soome | 49 MW | 500 MW – 2005<br>1000 MW – 2010<br>2000 MW – 2020 | 24,7 | 31,5 |
| Prantsus maa | 138 MW | 5000 MW – 2010 | 15,0 | 21,0 |
| Saksamaa | 8766 MW | 22000 MW – 2010 | 4,5 | 12,5 |
| Kreeka | 399 MW | 350? MW – 2010 | 8,6 | 20,1 |
| Iirimaa | 135 MW | 500 MW – 2005<br>1150 MW – 2010 | 3,6 | 13,2 |
| Itaalia | 699 MW | 720 MW – 2002<br>2500 MW – 2010 | 16,0 | 25,0 |
| Holland | 515 MW | 9% - 2010 (6000 MW) | 3,5 | 9,0 |
| Norra | 17 MW | 900-1100 MW – 2010 | | |
| Poola | 30 MW | | | |
| Portugal | 162 MW | 2000 MW – 2010 | 38,5 | 39,0 |
| Hispaania | 4172 MW | 12% - 2010 (9000 MW) | 19,9 | 29,4 |
| Rootsi | 315 MW | 400 MW – 2002 | 49,1 | 60,0 |
| Türgi | 19 MW | 2500 MW – 2005<br>10000 MW – 2010 | | |
| UK | 520 MW | 6000 MW in 2010 | 1,7 | 10,0 |
| Euroopa (EWEA) | 18653 MW | 60000 MW – 2010<br>150000 MW – 2020 | 13,9 | 22 |
| Eesti | 0,15 MW | | <0,1% | |

# 8 Järeldused tehtud tööst ja ettepanekud edasiseks

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk oli vaadelda tuuleenergiat ja sellega seonduvaid probleeme erinevatest aspektidest lähtuvalt, jäädes samas erapooletuks. Töö algusosas on lahti seletatud tuuleenergia tekkepõhjused ja tema elektrienergiaks muundamise põhimõtted, peatudes seejuures erinevatel tema kasutamisega kaasnevatel asjaoludel. Bakalaureusetöö põhilise osa moodustavad tuule dünaamika ja sellega seonduva probleemistiku kirjeldused, mis sisaldavad ühe osana korrelatsiooniarvutusi tuule kiiruse ja elektrienergia tarbimise vahel ning ülevaadet tuuleenergeetika majanduslikkusest Eesti Vabariigi tingimustes.

## 8.1 Järeldused tuule dünaamika ülevaatele ja korrelatsiooniarvutuste tulemuste kohta

Tuule dünaamika vaatlemisele tuleb pöörata suuremat tähelepanu ja seda eelkõige lähtudes varustuskindluse probleemistikust lähtuvalt. Kuna tuulest toodetava elektri võimsus on vastavalt tuule kiiruse pidevale muutumisele samuti muutuv (seda kolmandas astmes tuule kiiruse suhtes), siis omab tuule dünaamiliste omaduste vaatlemine ja nende alusel koormuse planeerimine kuumale (pöörlevale) reservile ja selle alusel saasteemissioonile inertsetes soojuselektrijaamades suurt tähtsust. Hr. Teolan Tomsoni poolt tehtud uuringute alusel saab tuule dünaamika uurimise alusel koostada vastavalt aastasele ja ööpäevasele perioodilisele komponendile nn tootmisgraafikuid. Samuti aitab tuulest toodetava elektri võimsuse kõikumise vähendamisele kaasa tuulikute või tuuleparkide rajamine geograafiliselt üksteisest kaugetesse piirkondadesse (Eesti piires).

Seega on tuule kiiruse ette ennustamiseks ja võimsuse kõikumise vähendamiseks olemas järgnevad meetmed:

- Tuulikud (tuulepargid) üksteisest kaugel;
- Ööpäevase perioodilise komponendi arvestamine;
- Aastase perioodilise komponendi arvestamine;
- Tuule kiiruse lühiajaline ja väga täpne ennustamine moodsate seadmetega (eeldatavasti kasutavad sellised seadmed juba perioodiliste komponentide arvestamist).

Seega saab väita, et tuule kiirust ja seega samuti tuulikute poolt väljastatava elektri toodangut saab ette näha piisava täpsusega. Järelikult ei tekita see probleeme kuuma reservi töös hoidmisel ja selle jaoks koormusgraafikute koostamisel elektrisüsteemi dispetðeri poolt.

Aspekt, millega siiski tuleb arvestada ja mille kohta on käesolevas töös tehtud arvutused on tuule kiiruse ja elektrienergia tarbimise omavahelised seosed. Kui elektrienergia tarbimine suureneb tuule kiiruse kasvades, siis peab see samuti mingi konstandina iga tuule kiiruse puhul kajastuma kuuma reservi arvutustes ja seda hoolimata sellest kas elektrivõrku toodab elektrit tuulegeneraatoreid või mitte.

Tehtud korrelatsiooniarvutuste puhul sai vaadeldud kolme talvekuud kuna ilmselgelt on olemas trendid ülejäänud aastaaegadel. Nagu selgub korrelatsiooniarvutusi

kajastavatelt joonistelt ja tabelist V. ei ole elektrienergia tarbimise ja tuule kiiruse vahel ühest ja selget korrelatsiooni. Kuigi väike korrelatsioon on olemas võib teda siiski antud perioodi lõikes pidada juhuslikuks suuruseks ja seoses korrelatsiooni negatiivse iseloomu tõttu ka veaks.

Tehtud korrelatsiooniarvutustest saab seega järeldada et omavahelist seost tuule kiiruse ja elektrienergia tarbimise vahel ei ole. Seega ei tule ka tuule kiiruse ette ennustamise ja sellega seonduvalt tuulikute poolt toodetava elektri võimsuse dispetõerile edastamise korral arvestada veel teatud komponendiga mis saaks tulemust muuta.

## 8.2 Järeldused tuuleenergia majanduslikkusest Eesti Vabariigi tingimustes

Eesti Vabariigis praegu kehtiva Energiaseaduse (Lisa 2) alusel saavad alternatiivsetest energiaallikatest (sealhulgas tuulest) elektritootjad elektrit müüa võrku haldavale ettevõttele hinnaga mis moodustab 90% kodutarbija põhitariifist. Kahjuks ei anna seadus täpset ülevaadet kas kodutarbija põhitariifi arvestatakse käibemaksuta või ilma. Eeldades, et kodutarija põhitariifi hinna aluseks on siiski koos käibemaksuga hind, saavad käesoleva hetke elektrihinna alusel tuulest elektrit tootvad ettevõtjad 94,5 s/kWh eest. See on summa, millega on võimalik toota tuulest elektrit ja maksta tagasi tuuliku püstitamiseks võetud pangalaenu vaid parimate tuuletingimustega piirkondades. Käesolevas bakalaureusetöös vaadeldud uurimuses, mida kajastab tabel VI. on tuulest elektri tootmise hinnaks saadud laenu tagasimakse perioodil 97…108 senti kWh eest. Seega praegu kehtiva Energiaseaduse ja elektri hinna puhul ei ole mõtet tuulikuid Eestisse installeerida. Kuna EV Majandusministeeriumis valmib uus Elektrituru seaduseelnõu siis potentsiaalsed tuulikute ja tuuleparkide rajajad lähtuvad sellest. Uues seaduses on taastuvenergiale makstav hind samuti seotud Narva elektrijaamades toodetava elektri hinnaga, see on 1,75 korda Energiaturu Inspektsiooniga kooskõlastatud elektrienergia hinna piirmäär (Lisa 3) ehk käesoleval ajahetkel 76 s/kWh. See on ilmselgelt liiga madal hind tuulikute ja tuuleparkide installeerimiseks pangalaenu arvel. Seega kui Elektrituru seaduses jääb koefitsient 1,75 kehtima, tuleb tuuleparkide arendajatel oodata elektri hinna tõusu, mida üsnagi reaalselt käsitleb tabel IX. või leida kaasfinantseerimist erinevatest abiprogrammidest. Tabel IX. alusel on tuuleenergiast elektri tootmine rentaabel alates aastast 2005.

Teisalt elektri hinna tõus on pidev ja tuulegeneraatorite ja –parkide rajajad saavad rajada oma ettevõtmise üles ka riski peale, et elektri hind tõuseb.
Eeldatavasti algavad taastuvenergia hinna üle uues Elektrituru seaduses vaidlused ja tegelik hind jääb kusagile koefitsientide 1,75 ja 2,21 (mille on välja pakkunud Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon) vahele.

## 8.3 Ettepanekud edasiseks

Eestis on tuuleenergiaga tänini tegeletud peamiselt entusiasmist, nagu ka muude taastuvenergiat puudutavate küsimustega. Kuna taastuvenergia (sealhulgas tuuleenergia) kasutamine ja energiasääst on nii Euroopa Liidu kui kogu maailma üks prioriteete tuleks antud temaatikale pühendada rohkem tähelepanu samuti Eestis. Selleks tuleb leida vahendeid oskusteabe andmiseks. Alustada tuleks juba üldhariduskoolis, selgitades kuidas ja millistel eesmärkidel tuleb energiat säästa. Edasiõppimise korral peaks samuti praktiliselt kõikidel õpetatavatel erialadel olema kohustuslik kursus energia olemusest, selle saamisviisidest ja säästvast mõtteviisist. Eraldi peaks looma näiteks Tallinna Tehnikaülikooli kui kõige sobivama antud teemat käsitleva ülikooli juurde instituudi, mis koolitaks välja juba oma ala spetsialiste.

Käesoleva bakalaureusetöö temaatikast lähtuvalt on autoril järgnevad ettepanekud:

- jätkata tuule dünaamika uuringuid;
- teha põhjalik analüüs kogu aasta lõikes tuule kiiruse mõjust elektrienergia tarbimisele;
- tuuleenergiast elektri tootmisele makstava hinna kujundamiseks teha põhjalik uuring.

Tuule dünaamika uuringutega tuleb tegeleda edasi ja koostada adekvaatne Eesti tuuleatlas. Selle ja dünaamika uuringute alusel saab luua hea tuule kiiruste ette ennustamise süsteemi, seejuures arvestada tuulegeneraatorite paigutamisega erinevatesse geograafilistesse punktidesse. Seeläbi oleks minimeeritud võimalus, et tuulest toodetav elekter muutuks koormavaks Eesti elektrisüsteemile.
Tuule kiiruse korrelatsioonist elektrienergia tarbimisega tuleb teha põhjalikum uurimus, seda eelkõige kevad-, suve- ja sügiskuude lõikes ning vaadelda

korrelatsiooni mõju koos teoreetiliselt installeeritavate tuulegeneraatorite võimsustega. Ette rutates tuleb mainida, et käesoleva kirjutise autoril on kavas vastav uurimus ühe lülina ka kaasa teha.

Tuuleenergiast toodetava elektri hinna kujundamiseks tuleb teha uuring, et välja selgitada milline hinnavahemik on põhjendatud tulukusega. Teisalt tuleb suhtuda siiski Eestisse kui üleminekumajandusega riiki, kus elektri hinna tõstmine dotatsioonide maksmise eesmärgil võib põhjustada sotsiaalseid kriise. Seetõttu tuleb vaadelda probleemi laiemalt ja teha selgeks prioriteedid.

# 9 Kasutatud kirjandus ja esitatud andmete algallikad

[1] – M. Ahlhaus, Bioenergy, konspekt Fachhoschule Stralsund'st, Oktoober, November, Detsember 2000, Jaanuar 2001

[2] – http://unfccc.int/resource/cop3.html#kp - Kyoto protokoll

[3] – J. Punning, J. Terasmaa, I. Roos, S. Soosaar, M. Pensa, A. Kont, E. Metusala, T. Vürmer, Estonia's Third National Communication Under the UN Framework Convention on Climate Change, Estonia, November 2001, 79 lk.

[4] – http://www.windpower.org/tour/index.htm - Taani tuuletööstuse Assotsiatsiooni kodulehekülg

[5] – J. F. Walker, N. Jenkins, Wind Energy Technology, England, Chischester 1997, 161 lk.

[6] – V. Selg, Sihtasutuse Eesti Teadusfond lõpparuanne nr. 1888 - Tuuleenergia kasutamine soojusenergia tootmisel, Tallinn 1999

[7] – A. Kull, Tuuleatlas

[8] – Steinrücke, A. Kull, J. Stemmler, Zukünftige Nutzung der Windenergie in der Republik Estland. Die Erde, Berlin. 127, 193-204 lk.

[9] – A. Ots, V. Selg, A. Valma, A. Kull, Situation of Wind Energy Utilization in Estonia, stendiettekanne Euroopa tuuleenergia konverentsil, Nizza, Märts 1999

[10] – I. Aarna, Eesti Energia AS-i Strateegilise Arengu juhi andmetel

[11] – Project of the governments of Estonia, Latvia and Lithuania. Estonian Part, uurimus United Nations Development Program. Global Environment Facility raames

[12] – R. Oidram, Tuuleenergeetika võimalusest Eestis, Tallinna Tehnikaülikooli aastaraamat 1999, 254-259 lk.

[13] – S. Persaud, B. Fox, D. Flynn, Impact of Wind Energy Development On the Operation of an Isolated Thermal Power System, Ettekanne Euroopa tuuleenergia konverentsil, Kopenhaagen, Juuli 2001

[14] – H. Suik, Auru- ja gaasiturbiinid, konspekt Tallinna Tehnikaülikoolist, Veebruar, Märts, Aprill, Mai 2000

[15] – P. Ruðeljuk'i, Narva Elektrijamade Tootmisosakonna inseneri andmetel

[16] – T. Tomson, Eesti energiasüsteemi koormuse dünaamilised omadused, Energeetika infoleht nr. 4, 2000, 15-18 lk.

[17] – T. Tomson, M. Hansen, Wind Dynamics in the Moonsund Arhipelago, Eesti Teaduste Akadeemia Toimetised, 6/1, Märts 2000, 61-69 lk.
[18] – T. Tomson, M. Hansen, Performance of Dissipated Wind Turbines, Eesti Teaduste Akadeemia Toimetised, 6/4, Detsember 2000, 268-277 lk.
[19] – T. Tomson, Periodical Component of the West Estonian Wind, Eesti Teaduste Akadeemia Toimetised, 7/1, Märts 2001, 50-57 lk.
[20] – T. Tomson, M. Hansen, Seasonal Wind Stability on the West Estonian Coast, Eesti Teaduste Akadeemia Toimetised, 7/3, September 2001, 212-221 lk.
[21] – Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine. Teise konverentsi kogumik. Tartu, Estonia 2001, 159 lk.
[22] – Hinnangute andmine Eesti energeetikat iseloomustavatele indikaatoritele, EV Majandusministeeriumi lepingu 37/2000 aruanne, Tallinn, Oktoober 2000
[23] – Electricity Generating Costs, artikkel ajakirjast Electricity Market, 2000
[24] – J. Ellis, S. Peake, Policy Options to Limit CO2 emissions from Electricity Supply - An OECD perspective, artikkel kogumikust Electricity, Healt and the Environment. Comparative Assessment in Support of Cecision Making. Proceedings of an International Symposium, Vienna, 16-19 October 1995, 49-55 lk.
[25] – EWEA, BWEA, WPM, Carnegie Securities, EL Direktiiv 2001/77/EC

# 10 Lisad

## 10.1 LISA 1. Saastetasud Eesti Vabariigis

**RKs RT I 1999, 24, 361**

Välja kuulutatud
Vabariigi Presidendi 2. märtsi 1999. a
otsusega nr 524

**SAASTETASU SEADUS**

Vastu võetud 10. veebruaril 1999. a

**§ 10. Saastetasu määrad jäätmete keskkonda viimisel**

(1) Saastetasu määrad kroonides jäätmete tonni kohta jäätmete viimisel keskkonda on:
1) tavajäätmetel, välja arvatud käesoleva lõike punktis 2 nimetatud jäätmed, alates 1999. aasta 1. jaanuarist 1,6 krooni, alates 2000. aasta 1. jaanuarist 1,9 krooni, alates 2001. aasta 1. jaanuarist 2,3 krooni;
2) välispuistangutesse ladestataval aherainel, sealhulgas rikastusjäätmetel, alates 1999. aasta 1. jaanuarist 0,6 krooni, alates 2000. aasta 1. jaanuarist 0,9 krooni, alates 2001. aasta 1. jaanuarist 1,3 krooni;
3) ohtlikel jäätmetel, välja arvatud käesoleva lõike punktides 4, 5, 6 ja 8 nimetatud jäätmed, alates 1999. aasta 1. jaanuarist 4,8 krooni, alates 2000. aasta 1. jaanuarist 5,8 krooni, alates 2001. aasta 1. jaanuarist 7,0 krooni;
4) naftat, naftasaadusi, mineraalõli ning tahke kütuse või muu orgaanilise aine termilise töötlemise vedelprodukte, orgaanilisi lahusteid, raskmetalle (välja arvatud elavhõbe, kaadmium, plii ja arseen), orgaanilisi halogeenühendeid, värvaineid ja pigmente sisaldavatel jäätmetel, värvi- ja lakijäätmetel, nakkusohtlikel haigla- või tervishoiujäätmetel ning ravimijäätmetel alates 1999. aasta 1. jaanuarist 13,1 krooni, alates 2000. aasta 1. jaanuarist 15,7 krooni, alates 2001. aasta 1. jaanuarist 18,8 krooni;
5) puidukaitseaineid, tahke kütuse ja muu orgaanilise aine utmisel tekkinud tõrva, pigi, asfalti, anorgaanilisi pestitsiide, asbesti, arseeni ja pliid sisaldavatel jäätmetel ning põlevkivi töötlemise pigijäätmetel alates 1999. aasta 1. jaanuarist 131,8 krooni, alates 2000. aasta 1. jaanuarist 158,2 krooni, alates 2001. aasta 1. jaanuarist 189,8 krooni;
6) elavhõbedat, kaadmiumi, tsüaniide, polüklooritud bifenüüle ja terfenüüle (PCB-d, PCT-d) ning orgaanilisi pestitsiide sisaldavatel jäätmetel alates 1999. aasta 1. jaanuarist 1317,4 krooni, alates 2000. aasta 1. jaanuarist 1580,9 krooni, alates 2001. aasta 1. jaanuarist 1897,1 krooni;
7) põlevkivi lend- ja koldetuhal alates 1999. aasta 1. jaanuarist 1,9 krooni, alates 2000. aasta 1. jaanuarist 2,9 krooni, alates 2001. aasta 1. jaanuarist 4,2 krooni;
8) põlevkivi poolkoksil alates 1999. aasta 1. jaanuarist 5,2 krooni, alates 2000. aasta 1. jaanuarist 7,8 krooni, alates 2001. aasta 1. jaanuarist 11,2 krooni.
(2) Käesoleva paragrahvi lõikes 1 sätestatud saastetasu määrasid suurendatakse:
1) 3 korda, kui ladestuskoht asub linna, alevi või puhkeala piires või nende piirile lähemal kui 3 km;
2) 2 korda, kui ladestuskoht ei vasta sanitaar- või keskkonnanõuetele.
(3) Käesoleva paragrahvi lõikes 2 sätestatu ei laiene põlevkivi poolkoksi ladestuskohtadele 2002. aasta 1. jaanuarini.

**RKs RT I 2001, 102, 667**

Välja kuulutatud
Vabariigi Presidendi 27. detsembri 2001. a
otsusega nr 67

# SAASTETASU SEADUSE MUUTMISE SEADUS

Vastu võetud 13. detsembril 2001. a

**§ 4.** Paragrahvi 8:
**1)** lõige 1 muudetakse ja sõnastatakse järgmiselt:
« (1) Saastetasu määrad kroonides saasteaine tonni kohta järgmiste saasteainete viimisel välisõhku:
1) vääveldioksiid ($SO_2$) ja muud anorgaanilised väävliühendid – alates 2002. aasta 1. jaanuarist 79,0 krooni, alates 2003. aasta 1. jaanuarist 95,0 krooni, alates 2004. aasta 1. jaanuarist 114,0 krooni, alates 2005. aasta 1. jaanuarist 137,0 krooni;
2) süsinikoksiid (CO) – alates 2002. aasta 1. jaanuarist 11,0 krooni, alates 2003. aasta 1. jaanuarist 14,0 krooni, alates 2004. aasta 1. jaanuarist 16,0 krooni, alates 2005. aasta 1. jaanuarist 20,0 krooni;
3) tahked osakesed, välja arvatud raskmetallid või nende ühendid, – alates 2002. aasta 1. jaanuarist 79,0 krooni, alates 2003. aasta 1. jaanuarist 95,0 krooni, alates 2004. aasta 1. jaanuarist 114,0 krooni, alates 2005. aasta 1. jaanuarist 137,0 krooni;
4) lämmastikoksiidid, arvutatuna lämmastikdioksiidiks, ja muud anorgaanilised lämmastikuühendid – alates 2002. aasta 1. jaanuarist 182,0 krooni, alates 2003. aasta 1. jaanuarist 218,0 krooni, alates 2004. aasta 1. jaanuarist 262,0 krooni, alates 2005. aasta 1. jaanuarist 315,0 krooni;
5) lenduvad orgaanilised ühendid, välja arvatud merkaptaanid, – alates 2002. aasta 1. jaanuarist 182,0 krooni, alates 2003. aasta 1. jaanuarist 218,0 krooni, alates 2004. aasta 1. jaanuarist 262,0 krooni, alates 2005. aasta 1. jaanuarist 315,0 krooni;
6) merkaptaanid – alates 2002. aasta 1. jaanuarist 180 882,0 krooni, alates 2003. aasta 1. jaanuarist 198 970,0 krooni, alates 2004. aasta 1. jaanuarist 240 754,0 krooni, alates 2005. aasta 1. jaanuarist 264 829,0 krooni;
7) raskmetallid ja nende ühendid – alates 2002. aasta 1. jaanuarist 2896,0 krooni, alates 2003. aasta 1. jaanuarist 3476,0 krooni, alates 2004. aasta 1. jaanuarist 4171,0 krooni, alates 2005. aasta 1. jaanuarist 5005,0 krooni.»;
**2)** lõiget 3 täiendatakse punktiga 3 järgmises sõnastuses:
« 3) alates 2005. aasta 1. jaanuarist 11,3 krooni.»;
**3)** lõige 4 muudetakse ja sõnastatakse järgmiselt:
« (4) Käesoleva paragrahvi lõikes 3 sätestatu ei laiene biokütuse, turba ja jäätmete põletamisele.»

## 10.2 LISA 2. Energiaseaduse alternatiivselt toodetud elektrienergia ostukohustus

**§ 28[1]. Alternatiivselt toodetud elektrienergia ostukohustus**
(1) Turgu valitseval energiaettevõtjal on kohustus osta elektrienergiat tema võrguga ühendatud ettevõtjalt, kes toodab seda vee-, tuule- või päikeseenergiast, biokütusest või põlevkivi utmisel tekkivast jääkgaasist.
(2) Käesoleva paragrahvi lõike 1 alusel kohustatud energiaettevõtja ostab alternatiivselt toodetud elektrienergia hinnaga, mis moodustab 90 protsenti kodutarbija põhitariifist, juhul kui Eesti Vabariigis alternatiivselt toodetud elektrienergia müügimaht ei ületa 2 protsenti eelmisel aastal Eesti Vabariigis kasulikult tarbitud elektrienergia kogusest. Kui alternatiivselt toodetud elektrienergia müügimaht ületab 2 protsenti eelmisel aastal Eesti Vabariigis kasulikult tarbitud elektrienergia kogusest, kinnitab Energiaturu Inspektsioon võrguettevõtjale konkreetse ostuhinna vahemikus 60–90 protsenti kodutarbija põhitariifist.
(3) Alternatiivselt toodetud elektrienergia ostukohustust ei rakendata, kui:
1) alternatiivse elektrienergia tootja müüb elektrienergiat käesoleva seaduse § 18 lõike 6 alusel;
2) alternatiivselt toodetud elektrienergia tehnilised parameetrid ei võimalda elektrisüsteemi toimimist vastavalt käesoleva seaduse § 20 lõikes 2 sätestatule. [10.06.1998; 11.04.2001]

## 10.3 LISA 3. Elektrituru seaduseelnõu sätted taastuvenergiale

**§ 55. Taastuvad energiaallikad**
(1) Käesoleva seaduse tähenduses on taastuvateks energiaallikateks mittefossiilsed energiaallikad (vesi, tuul, päike, laine, tõus-mõõn, prügilagaas, heitvee puhastamisel eralduv gaas, biogaas ja biomass).
(2) Biomassiks käesoleva seaduse tähenduses on põllumajanduse (sealhulgas taimsete ja loomsete ainete) ja metsanduse ning nendega seonduva tööstuse toodete, jäätmete ja jääkide bioloogiliselt lagunev osa, samuti tööstus- ja olmejäätmete bioloogiliselt lagunevad komponendid.
**§ 56. Tootmine taastuvatest energiaallikatest**
(1) Tootja ei või ristsubsideerida tootmist taastuvatest energiaallikatest ja muud tootmist. Tootja peab Energiaturu Inspektsiooni nõudel esitama tulude ja kulude jaotuse kohta eraldi tootmise osas taastuvatest energiaallikatest ning muu tootmise osas.
(2) Tootja peab tootma elektrienergiat taastuvatest energiaallikatest niisuguse tootmisseadmega, mille kasutamine tootmiseks muudest energiaallikatest ei ole võimalik ja millega toodetud elektrienergia kogus määratakse kindlaks perioodimõõtmisega mõõteseadmega.
(3) Tootja peab esitama Energiaturu Inspektsioonile ja käesoleva seaduse §-s 57 nimetatud võrguettevõtjale iga kalendrikuu 3. kuupäevaks täpse teabe selle kohta, kui palju ta iga käesoleva paragrahvi lõikes 2 nimetatud tootmisseadme abil eelmise kalendrikuu jooksul taastuvatest energiaallikatest elektrienergiat tootis ning missuguse osa sellest müüdi iga tootmisseadme puhul käesoleva seaduse §-s 57 sätestatud ostukohustust kasutades.
(4) Energiaturu Inspektsioonil ja käesoleva seaduse §-s 57 nimetatud võrguettevõtjal on õigus nõuda tootjalt mistahes dokumente ja muud teavet, mis on vajalik käesoleva paragrahvi lõike 3 alusel esitatud teabe kontrollimiseks.
(5) Kui tootja tegevusloas sätestatud ja käesoleva paragrahvi lõikes 2 sätestatud nõuetele vastava tootmisseadmega taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergia kogus on mistahes kauplemisperioodil väiksem selle tootja poolt käesoleva seaduse §-s 57 sätestatud ostukohustust kasutades samal kauplemisperioodil tegelikult müüdud elektrienergia kogusest, on Energiaturu Inspektsioonil õigus tootjale antud tegevusluba kehtetuks tunnistada või muuta selle tingimusi nii, et tegevusloa alusel ei või enam müüa elektrienergiat käesoleva seaduse §-s 57 sätestatud ostukohustust kasutades.
**§ 57. Ostukohustus**
(1) Võrguettevõtja on kohustatud tema võrguga ühendatud tootja nõudel ostma ära selle tootja poolt taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergia, kui üheaegselt on täidetud kõik alljärgnevad tingimused:
1) tootja võib tegevusloa kohaselt müüa taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergiat käesolevas paragrahvis sätestatud ostukohustust kasutades;
2) elektrienergia on toodetud taastuvatest energiaallikatest ilma sünteetilisi aineid lisamata või neid põletamata käesoleva seaduse § 56 lõikes 2 nimetatud nõuetele vastava ja tootja tegevusloas kirjeldatud tootmisseadmega;
3) tootja täidab käesoleva seaduse 4. peatükis ja § 56 lõigetes 3 ja 4 sätestatud kohustusi.
(2) Tootja, kes soovib tema poolt taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergiat müüa käesolevas paragrahvis sätestatud ostukohustust kasutades, peab esitama võrguettevõtjale sellekohase taotluse. Taotluses tuleb märkida tootmisseadmed, mille abil võrguettevõtjale müüdavat elektrienergiat toodetakse, samuti muud elektrienergia müügiks vajalikud andmed.
(3) Võrguettevõtja peab käesoleva paragrahvi lõikes 1 nimetatud elektrienergiat ostma hinnaga, mis võrdub käesoleva seaduse § 74 lõike 5 alusel selles lõikes nimetatud tootja poolt Energiaturu Inspektsiooniga kooskõlastatud elektrienergia hinna piirmäära ja koefitsiendi 1, 75 korrutisega.
(4) Võrguettevõtjal on käesoleva paragrahvi lõikes 1 sätestatud kohustus:
1) vee ja biomassi abil toodetud elektrienergia osas 7 aasta jooksul pärast käesoleva seaduse jõustumist esmakordselt tööd alustanud tootmisseadmega elektrienergia tootmise alustamisest, kuid mitte kauem kui 31. detsembrini 2015;
2) punktis 1 nimetamata taastuvast energiaallikast toodetud elektrienergia osas 12 aasta jooksul pärast käesoleva seaduse jõustumist esmakordselt tööd alustanud tootmisseadmega elektrienergia tootmise alustamisest, kuid mitte kauem kui 31. detsembrini 2015;
3) enne käesoleva seaduse jõustumist tööd alustanud tootmisseadmega taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergia osas kuni 31. detsembrini 2008.
(5) Jaotusvõrguettevõtjal on õigus nõuda käesoleva paragrahvi lõikes 1 sätestatud kohustuse täitmiseks ostetud elektrienergia eest vastavalt käesoleva paragrahvi lõikele 3 makstud hinna ja käesoleva seaduse § 74 lõikes 5 nimetatud hinna vahe hüvitamist põhivõrguettevõtja poolt. Nimetatud hindade vahe hüvitamise täpsem kord, makstava hüvitise suuruse arvestamise ja selle võimaliku tasaarvestamise kord

põhivõrguettevõtjale maksmisele kuuluvate tasudega, hüvitise maksmise aluseks olevad dokumendid ja muu teave ja hüvitise tasumise tähtpäevad sätestatakse võrgukoodeksis.
(6) Põhivõrguettevõtja poolt käesoleva paragrahvi lõikes 1 sätestatud kohustuse täitmiseks või käesoleva paragrahvi lõike 5 alusel hüvitise maksmiseks tehtud kulutused loetakse põhivõrguettevõtja põhjendatud kuluks, mis liidetakse põhivõrguettevõtja poolt elektrienergia edastamise eest võetava tasu kujundamise ja kooskõlastamise aluseks olevatele kuludele.