

Energiatehnoloogia instituut

TUULEENERGEETIKA KESKKONNAMÕJUD

ENVIRONMENTAL IMPACTS OF WIND ENERGY

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Kalev Kuusik

Üliõpilaskood: 194124 EACB

Juhendaja: Andrei Dedov, vanemlektor

Tallinn 2023

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

(kuupäev digiallkirjas)

Autor: Kalev Kuusik

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

(kuupäev digiallkirjas)

Juhendaja: Andrei Dedov

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

“22” mai 2023. a

Kaitsmiskomisjoni esimees

Oliver Järvik

/ allkirjastatud digitaalselt /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina *Kalev Kuusik* (sünnikuupäev: 23.04.2000)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Tuuleenergeetika keskkonnamõjud,

mille juhendaja on *Andrei Dedov*

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

/ allkirjastatud digitaalselt /

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kalev Kuusik, 194124 EACB
Õppekava, peeriala: EACB17/20, energiatehnoloogia
Juhendaja: Andrei Dedov, andrei.dedov@taltech.ee

Lõputöö teema:

(eesti keeles) *Tuuleenergeetika keskkonnamõjud*
(inglise keeles) Environmental Impacts of Wind Energy

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Anda ülevaade Eesti tuuleenergeetika hetkeolukorrast ja tuleviku arengusuunast.
2. Hinnata kirjandusallikate põhjal maismaa- ja meretuuleparkide võimalikke negatiivseid keskkonnamõjusid kogu elutsükli jooksul.
3. Leida lahendusi tuuleenergeetika arengust tingitud keskkonnariskide maandamiseks.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Tutvumine teemakohase teaduskirjandusega	02.2023
2.	Andmete kogumine ning pealkirja sõnastamine	04.2023
3.	Lõputöö kirjutamine	06.2023
4.	Lõputöö lõplik viimistlemine ning esitamine	06.2023

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "30" mai 2023. a

Üliõpilane: Kalev Kuusik
/ allkirjastatud digitaalselt / (kuupäev digiallkirjas)

Juhendaja: Andrei Dedov
/ allkirjastatud digitaalselt / (kuupäev digiallkirjas)

Programmijuht: Oliver Järvik
/ allkirjastatud digitaalselt / (kuupäev digiallkirjas)

SISUKORD

EESSÕNA	6
LÜHENDTE JA TÄHISTE LOETELU	7
SISSEJUHATUS	8
1. TUULEENERGEETIKA EESTIS	9
1.1 Ülevaade.....	9
1.2 Tuuleenergeetika potentsiaal	11
1.3 Planeeritud tuulepargid	12
1.3.1 Maismaatuulepargid.....	12
1.3.2 Meretuulepargid	12
2. TUULEENERGIA	13
2.1 Ajalugu	13
2.2 Tehnoloogia.....	13
2.3 Energiaallikas	15
2.4 Tuulikute tüübid.....	16
3. KESKKONNAMÕJU	18
3.1 Mõju linnustikule.....	19
3.2 Mõju nahkhiirtele	21
3.3 Mõju kalastikule	21
3.4 Mõju kohalikule kliimale	23
3.5 Jäätmekäitlus	23
3.6 Mõju inimesele.....	26
3.7 Mõju meresõiduohutusele.....	30
4. VÕRDLUS PÕLEVKIVIELEKTRIJAAMAGA	32
KOKKUVÕTE	35
SUMMARY.....	37
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	39

EESSÕNA

Käesoleva bakalaureusetöö teema pakkus välja Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia instituudi vanemlektor Andrei Dedov. Teema valik on tingitud tänapäeval kiirelt arenevate taastuvenergia tehnoloogiate keskkonnamõjude hindamise olulisusest ning autori huvist energeetika tuleviku arengusuundade vastu. Lõputöö on koostatud kirjandusallikate ning statistiliste andmete põhjal.

Töö autor soovib tänada Andrei Dedovi, kelle professionaalne ning pühendunud juhendamine võimaldas lõputöö koostamisel saavutada kõik püstitatud eesmärgid!

Võtmesõnad: tuuleenergeetika, keskkond, jätkusuutlikkus, bakalaureusetöö.

LÜHENDTE JA TÄHISTE LOETELU

W	vatt
GWh	gigavatt-tundi, $*10^9$
TWh	teravatt-tundi, $*10^{12}$
dB	detsibell
Hz	herts
rpm	pöördeid minutis (<i>revolutions per minute</i>)
tCO₂/MWh	tonni süsinikdioksiidi megavatt-tunni kohta
KHG	kasvuhoonegaasid
CO₂	süsinikdioksiid

SISSEJUHATUS

Globaalne kliimasoojenemine on viimase sajandi jooksul põhjustanud mitmeid muutusi ümbritsevas looduskeskkonnas, mille negatiivsed mõjud väljenduvad kogu maailmas. Maa aasta keskmine õhutemperatuur on viimase 60 aasta jooksul tõusnud ligi 2 kraadi võrra, mille tagajärjel sulavad enneolematul kiirusel jäämassid ning tõuseb mereveetase. Tavapäraseks on muutumas äärmuslikud ilmastikuolud, milles hukuvad taime- ja loomaliigid. Peamiseks kliimamuutuste põhjuseks peetakse fossiilkütuste põletamist, mille käigus eritatakse atmosfääri suurtes kogustes globaalset soojenemist põhjustavaid kasvuhoonegaase. Globaalse kliimasoojenemise ohjeldamiseks ning soojeneva maailmaga kohanemiseks on Euroopa Liidu liikmesriigid alustanud aktiivset koostööd ning seadnud kliimaeesmärke kasvuhoonegaaside emissiooni lõpetamiseks hiljemalt 2050. aastal.

Eesti Vabariigi Valitsus kinnitas 2019. aasta 19. detsembril „Eesti riikliku energia- ja kliimakava aastani 2030“ eesmärgiga anda üksikasjaline ülevaade planeeritud riiklikest meetmetest Euroopa Liidus kokku lepitud energia- ja kliimapolitika eesmärkide saavutamiseks. Arengukava seab eesmärgiks taastuenergia osakaalu suurendamist vähemalt 42%-ni summaarsest lõpptarbimisest, mis näeb ette tänasel päeval töösolevate Narva elektrijaamade põlevkivil töötavate energiablokkide osalist sulgemist või töötundide vähendamist. Suurima kasvupotentsiaaliga taastuvelektrienergia allikaks peetakse tuuleenergiat, mille prognoositud elektrienergia aastatoodang suureneb 2030. aastaks ligi 4 korda nii uute maismaa- kui ka meretuuleparkide abil. Eesti maa- ja merealade tuuleparkide potentsiaalset võimekust hinnatakse 8,5 GW ulatuses, mis võimaldab mitmekordselt katta kogu Eesti energiavajaduse.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on kirjandusallikate põhjal analüüsida mere- ja maismaatuuleparkide keskkonnamõjusid elektrituulikute tootmisel, tööfaasis ja utiliseerimisel ning kaardistada peamised tekkivad häiringud ja ohud ümbritsevale elukeskkonnale. Bakalaureusetöö koosneb neljast peatükist. Esimeses peatükis antakse ülevaade Eesti energeetikast ning selle taastuenergia osakaalust ja tutvustatakse tuuleenergia potentsiaali regioonis. Teine peatükk loob ülevaate elektrituulikute tööpõhimõttest ning olemasolevatest tehnoloogiatest. Kolmanda osa alapeatükkides tutvustatakse võimalikke negatiivseid ja positiivseid tuuleenergeetika keskkonnamõjusid. Viimases peatükis võrreldakse statistiliste andmete põhjal tuuleenergeetikat hetkel kasutuses olevate põlevkivielektrijaamadega.

1. TUULEENERGEETIKA EESTIS

1.1 Ülevaade

Eesti esimene kaasaegne tuulegeneraator Gendvind 150 alustas tööd 1997. aasta 19. septembril Hiiumaa Tahkuna neeme tipus. Rahva seas Valgeks Inglis nimetatud tuulik saavutas maksimaalvõimsuse 150 kW tuulekiirusel 14 m/s ning tootis esimesel tööaastal võrku 288 MWh elektrit. Projekt läks maksma 3,2 mln krooni, millest 80% rahastas Taani Keskkonnafond. Gendvind 150 jäeti seisma 8. veebruaril 2005, kuna käigushoidmine osutus liiga kulukaks. Selleks hetkeks oli Eesti esimene tuulik tootnud võrku ligi 2,1 GWh elektrit, mis kinnitas taastuvatest energiallikatest elektri tootmise potentsiaali. Praeguseks on Tahkuna tuulegeneraator seisatud, kuid sellegipoolest omab olulist sümboolset rolli Eesti taastuvenergeetikas.[1]

Esimene Eesti tuulepark alustas elektri tootmist 11. oktoobril 2002. aastal Pärnu maakonnas Lääneranna vallas Virtsu alevikus. Virtsu I tuulepark koosneb kolmest Enercon E-4 elektrituulikust, mille koguvõimsuseks kujunes 1,8 MW ning prognoositud elektritoodanguks 4,8 GWh aastas. Hiljem püstitati Virtsu I tuuleparki 0,8 MW võimsusega Enercon E-53 tüüpi lisatuulik. Järgnevate aastate jooksul rajati poolsaarele ka Virtsu II (2008) ja Virtsu III (2011) tuulepark. Mõlemasse tuuleparki paigutati kolm 2,3 MW võimsusega Enercon E-70 tüüpi elektrituulikut ehk tuulepargi koguvõimsuseks kujunes 6,9 MW.[2]

Senini Eesti suurim Paldiski tuulepark valmis 2012. aastal Pakri poolsaarel Harjumaal. Tuuleparki püstitati kaheksateist General Electric 2,5 MW elektrituulikut koguvõimsusega 45 MW. Samuti asub Pakri poolsaarel kaheksa Nordex N-90 tüüpi 2,3 MW võimsuse tuulikuga Pakri tuulepark. Hetkel uusim Purtse tuulepark koosneb viiest Vestas V90 tüüpi 2 MW võimsusest elektrituulikust. Samuti on Purtse tuuleparki püstitatud viis uut Vestas V136 tüüpi 4,2 MW tuulikut, mis alustavad elektri tootmist 2023. aastal.[2], [3]

Tänaseks on Eesti energiasüsteemi kokku installeeritud 145 elektrituulikut koguvõimsusega 319,96 MW (vt tabel 1.1). Viimastel aastatel pole Eesti tuuleparkide osas toimunud suuri muutusi, mis on tingitud peamiselt kohalike kogukondade vastuseisust ning riigikaitse ja keskkonna piirangutest.[4] Tuuleparkide arengut on takistanud ka 2018. aastani kehtinud tuuleenergia toetuskeem, mis sätestas taastuvenergia toetuse mahupiirangu kalendriaastas kuni 600 GWh toodetud elektrienergia ulatuses. Alates 2019. aastast korraldab Majandus- ja

Kommunikatsiooniministeerium koostöös Eleringiga taastuenergia vähempakkumisi, mille eesmärk on tuua turule täiendavalt taastuvast energiaallikast toodetud elektrienergiat.[4]

Tabel 1.1 Eesti elektrisüsteemi installeeritud tuuleenergia tootmisüksused[2]

Tuulepark	Võimsus, MW	Tuulepark	Võimsus, MW
Virtsu I	1,8	Nasva tuulik I	2,3
Pakri	18,4	Aulepa II	9
Esivere	8	Aseriaru	24
Läätsa	3	Narva	39
Nasva	1,6	Paldiski	45
Viru-Nigula	24	Sikassaare	1,5
Ruhnu	0,15	Ojaküla	6,9
Sangla tuulik	0,3	Nasva tuulik II	3,6
Türju	0,3	Tamba	6
Virtsu lisatuulik	0,8	Mäli	12
Virtsu II	6,9	Aburi	1,8
Esivere I	12	Salme II	3
Aulepa I	39	Torgu	0,66
Vanaküla	9	Tooma II	7,05
Tooma I	16	Purtse	10
Virtsu III	6,9	KOKKU	319,96

Olemasolevad tuulepargid on rajatud valdavalt Kirde-, Loode- ning Lääne-Eesti rannikutele. Mandri-Eestis kehtivad riigikaitse huvidest lähtuvad kõrguspiirangud, mis tagavad Eesti Kaitseväe õhuseiresüsteemide korrektset tööd. Sellest tulenevalt on Vabariigi Valitsus teinud otsuse lisaradarite hankimiseks, mille tulemusena vabaneb 2025. aastaks kõrguspiirangutest ligikaudu 27000 m² suurune maa-ala. Jätkuvalt jääb kehtima kõrguspiirang idapiiri lähedasel alal.[5]

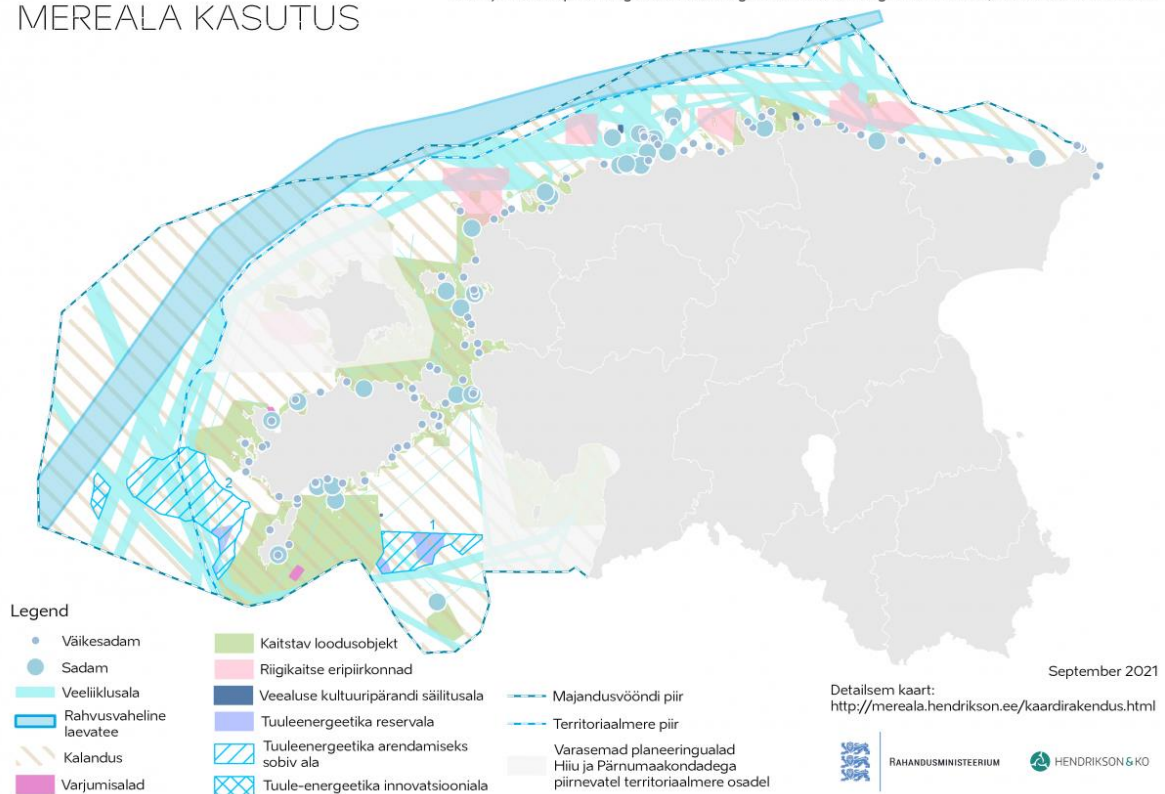
Eleringi 2021. aasta varustuskindluse aruande kohaselt on Eesti elektrisüsteemi installeeritud 2337 MW tootmisvõimsust, millest ligikaudu 13% moodustavad tuulegeneraatorid. Kokku toodeti samal aastal 7359 GWh elektrit, millest 733 GWh ehk ligikaudu 10% tootsid tuulikud. Võrreldes eelneva aastaga kahanes tuuleparkide tootmine 13%, mis on tingitud ilmastikuoludest. Kokku toodeti Eestis 2021. aastal taastuvatest allikatest 2578 GWh elektrienergiat.[6], [7]

1.2 Tuuleenergeetika potentsiaal

Tuuleenergial on Eestis kõrge kasvupotentsiaal, mis on eelkõige tingitud sobilikest tuuletingimustest rannikualadel. Pärast riigikaitseliste kõrguspiirangute kaotamist hinnatakse maismaa tuuleenergia potentsiaaliks 1,5 GW, millest juba ainuüksi piisaks Eesti elektritarbimise katmiseks. Seejuures tuleb märkida, et oluliselt saab suurendada tuuleenergia genereerimist ka uusi tuuleparke rajamata, kuna paljud olemasolevad elektrituulikud on vananenud ning vajavad asendamist tunduvalt suurema väljundvõimsusega tuulikutega. Mereala tuuleenergia potentsiaaliks hinnatakse 7 GW, mille sobivad arendusalad on välja toodud joonisel 1.1. Sellises mahus tuuleparkide rajamine koormab liigselt olemasolevat elektrivõrku, eeldab uute riikidevaheliste võrgühenduste loomist ning on tänase tarbimise juures majanduslikult ebamõistlik. [8]

MEREALA KASUTUS

* Vesiviljelust saab planeeringus sätestatud tingimustel arendada kogu Eesti merealal, v.a selleks välistatud alad



Joonis 1.1 Eesti mereala kooskasutuse planeeringulahendus[9]

1.3 Planeeritud tuulepargid

1.3.1 Maismaatuulepargid

Maismaatuulepargi arendusalasid on kohalike omavalitsuste planeeringutes 18 üldplaneeringuna ning 14 eriplaneeringuga. Planeeritud projektide koguvõimsus moodustab ligikaudu 3700 MW, millest piisab 2,3 kordselt Eesti energiavajaduse katmiseks. Planeeringu algatamine ei tähenda tuulepargi rajamise otsuse vastuvõtmist, vaid loob võimaluse kohalikul omavalitsusel koostöös arendajatega projekti sobilikkuse hindamiseks. Käimasolevate planeeringute suurimaks väljakutseks on keskkonnaalased piirangud.[10]

1.3.2 Meretuulepargid

Hetkel teadaolevalt Eestis meretuulepargid puuduvad, kuid on kindlasti vajalikud riiklike taastuvenergia eesmärkide saavutamiseks. Läänemere tuuletingimused loovad võimaluse rajada merre 83 GW võimsusega tuuleparke.[11] Eesti esimene meretuulepargi projekt sai alguse juba 2006. aastal. Tänapäevaks on Vabariigi Valitsus kinnitanud kuue meretuule projekti hoonestusloa ning kolm arendust on jõudnud keskkonnamõjuhindamise faasi. Eesti Energia soovib rajada Liivi lahte 1000 MW võimsusega meretuulepargi, kus tulenevalt tehnoloogia valikust püstitatakse 50 kuni 160 tuulikut. Utilitas Wind soovib püstitada Kihnu saare rannikumere piirkonda kavandatud Saare-Liivi meretuuleparki kuni 160 elektrituulikut koguvõimsusega 1200 MW. Saare Wind Energy soovib rajada maksimaalselt kuni 100 elektrituulikuga meretuulepargi võimsusega kuni 1400 MW Saaremaa lääneranniku piirkonnas. Kolme tuuleelektrijaama aastane hinnanguline kogutoodang moodustab 15 TWh elektrit.[10], [12]

2.TUULEENERGIA

2.1 Ajalugu

Esimese elektrienergia tootmiseks mõeldud tuuliku valmistas 1887. aastal Šoti professor James Blyth. Kümne meetri riidest labadega Blyth tuulik püstitati Marykirki suvila aeda, kus elektri tootmine kestis järgnevat 25 aastat. Aasta hiljem ehitas Ameerika leiutaja Charles Brush seedripuust 12 kW võimsusega tuuleturbiini, mis koosnes 144 labast. Taani teadlase Poul la Cour eestvedamisel püstitati 1900 aastaks Taanis tuhandeid tuulikuid, mille summaarne võimsus moodustas 30 MW. La Cour üheks uurimiselaks oli elektrienergia salvestamine ning tema leiutatud tuuleturbiin võimaldas elektrolüüsi teel toota veest vesinikku. Kaasaegse tuuleturbiini leiutajaks peetakse Taani inseneri Johannes Juuli. Kahekümne sajandi keskel valminud 200 kW kolmelabaline elektromehaanilise pööramissüsteemiga, tiivikute pidurdussüsteemiga ning asünkroongeneraatoriga tuulik sarnaneb suuremas osas tänapäeval kasutuses olevate tuulikutega.[13]

Tuule kui alternatiivse energiaallika olulisust mõisteti pärast 1973. aasta naftakriisi. Algas suure võimsusega tuuleturbiinide arendamine Taanis, Saksamaal, Rootsis, Suurbritannias ja Ameerika Ühendriikides eesmärgiga asendada elektrivõrgus fossiilsetel kütustel põhinevaid tootmisüksusi. Kümnenäendi vahetusel ehitati Taanis kaks 630 kW võimsusega elektriturbiini, mis kasutasid labade pööramiseks kaasaegseid *pitch control* ja *stall control* mehhanisme. Tuuleenergeetika ei kogunud tol ajal erilist populaarsust, kuna tuulikute ehitus osutus väga kalliks ning soojuselektrijaamades toodetud elektrienergia hind oli tarbijale soodsam. Elektrituulikute arendamine jätkus riiklike toetusprogrammide kaasabil ning 1980. aastatel valmistati algselt megavatine ning hiljem ka 2 MW võimsusega Tvind tuulegeneraator. Tänapäevaks on Euroopas 150 GW maismaa tuuleparke ja 22 GW mereparke ning tuuleenergia valdkonna käive ligikaudu 60 miljardit eurot.[13], [14]

2.2 Tehnoloogia

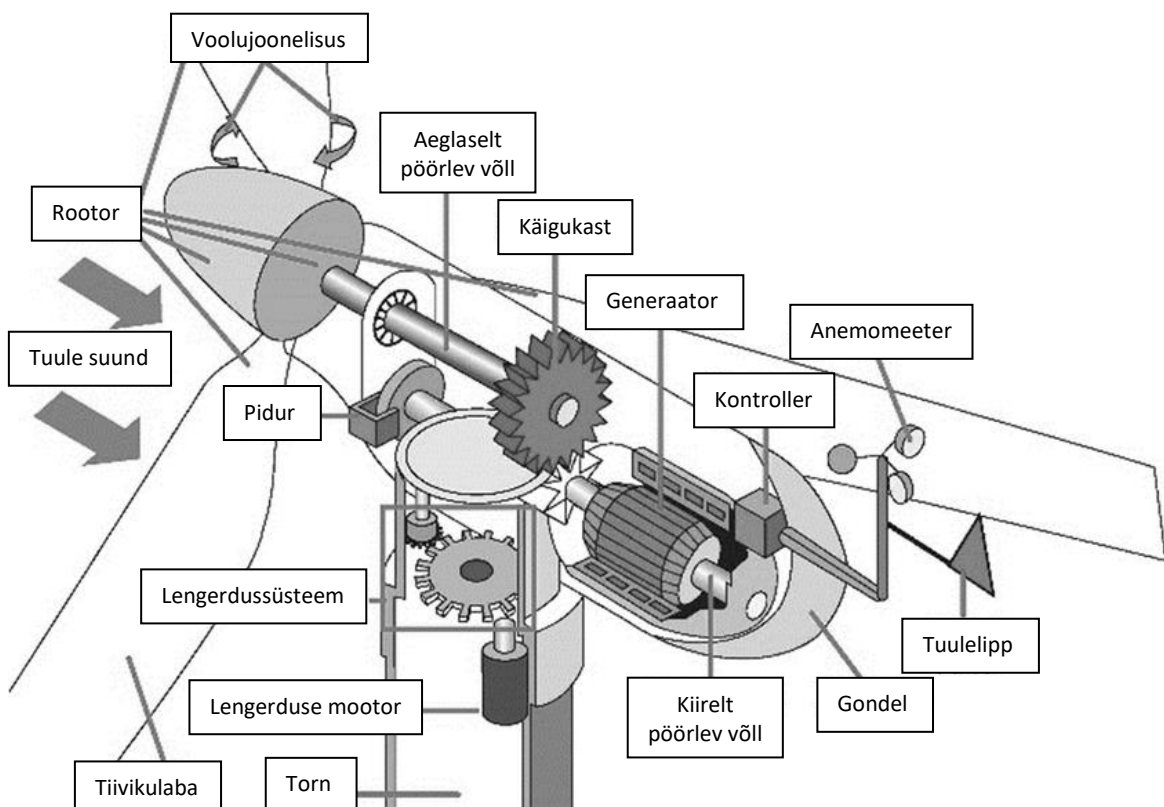
Elektrituulikud võivad väliselt olla küllaltki erinevad, kuid olenemata tüübist koosnevad tuulikud üldiselt samadest osadest (vt joonis 2.1). Tuuliku komponente saab jagada kaheks: mehaanilisteks ja elektroonilisteks.

Olulisemad mehaanilised komponendid:

- Vundament, mis tavaliselt valatakse betoonist maa sisse selle peale tuuliku torni püstitamiseks.
- Torn, mis on valmistatud terasest või betoonist gondli õhus hoidmiseks.
- Gondel on tavaliselt klaaskiust kest, mille sees asub generaator, aeglaselt ja kiirelt pöörlevad võllid ning kaitse- ja juhtimissüsteemid.
- Roor, mis ühendab tiivikulabasid generaatoriga
- Labad, mis omavad aerodünaamilist ehitust ning peamiseks ülesandeks on liikuvate õhumasside püüdmine.
- Käigukast, mis reguleerib võllide pöörlemiskiirust vastavalt tuuleoludele.

Olulisemad elektroonilised komponendid:

- Elektrigeneraator mehaanilise energia muundamiseks elektrienergiaks. Kasutatakse nii sünkroon- kui ka asünkroongeneraatoreid.
- Võimsusmuundur, mille ülesandeks on juhtida generaatori pöörlemissagedust võrgusageduse tagamiseks ning genereeritud alalisvoolu muundamine vahelduvvooluks.
- Transformaator, mis muundab toodetud elektrienergia pinget vastavalt võrgulepinguga ettenähtud väärtusele.



Joonis 2.1 Tuuleturbiini komponendid[15]

Tuuleturbiini töö põhineb tuule kineetilise energia muundamisel mehaaniliseks energiaks, mis omakorda muundatakse elektrigeneraatori abil elektriks. Tööpõhimõtte ei erine muudest kaasaegsetest generaatoritest, erinev on vaid elektri tootmiseks

kasutatav energiakandja. Elektrituuliku efektiivsuse tagamisel on oluline roll lengerdussüsteemil, mis pöörab gondlit nii, et tuule suuna muutmisel jäävad labad tuulega risti. Nii saavutatakse tuuliku optimaalne kasutegur. Tuuliku labad hakkavad liikuma tuulekiirusel 3 - 4 m/s ning enamasti on optimaalseim tuulekiirus 12 – 13 m/s. Kaitse- ja juhtimissüsteemide ülesandeks on tuulekiiruse jälgimine ning vajadusel rootori pidurdamine, et vältida avariilisi rikkeid.[16]

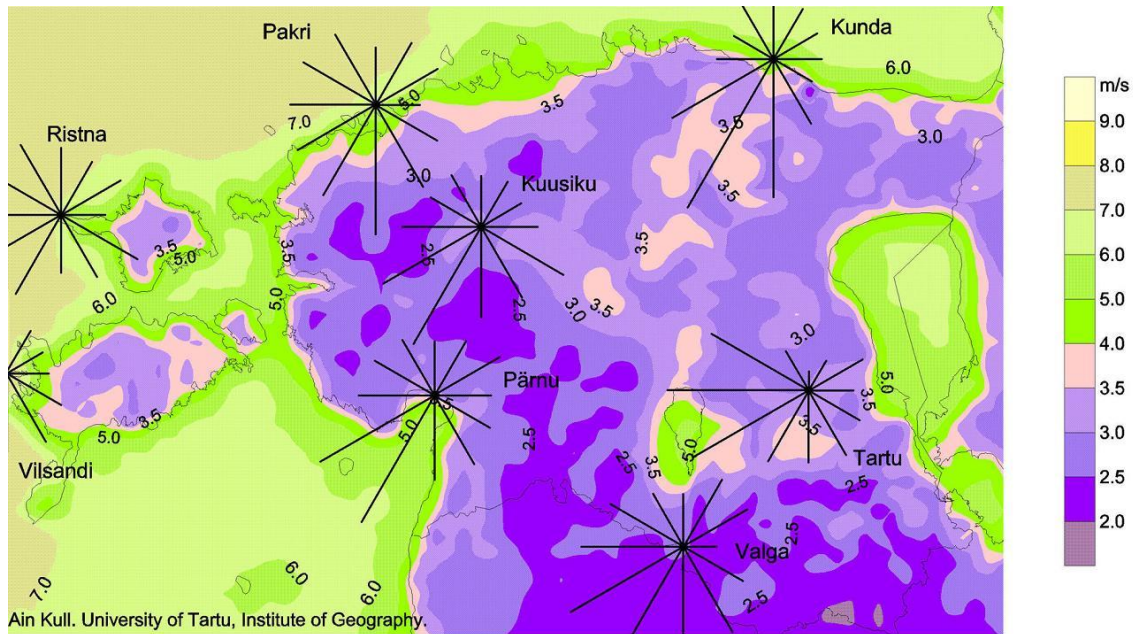
2.3 Energiaallikas

Tuuliku tiivikulabased paneb liikuma tuul, mida saab defineerida kui atmosfääri rõhkude erinevusest tingitud õhumasside liikumist. Rõhkude erinevust põhjustab ebaühtlane maapinna reljeef ja soojenemine erinevates laiuskraadides. Õhumassid liiguvad alati kõrgema õhurõhuga piirkondadest madalama rõhuga piirkondade suunas, millest tulenevalt erinevad ka tuulte suunad ja kiirused. Päevasel ajal on valdavad meretuuled, kuna päeval mere ääres olev pind soojeneb kiiremini kui meri ja soe õhk liigub mere poole. Vastupidiselt tekib öisel ajal maatuul, kuna vesi jahtub aeglasemalt kui maa. Suuresti sõltuvad tuuleolud ka aastaajast ning tuuliku torni kõrgusest.[16]

Eesti paikneb Läänemere rannikul, mida mõjutavad intensiivsed tsüklonid. Tugevamad tuuled puhuvad Lääne-Eesti ja saarte rannikualadel, kus aasta keskmine tuulekiirus kümne meetri kõrgusel ulatub kuni 7 m/s. Tuuline on ka Peipsi-äärne ala keskmine tuulekiirusega 6 m/s. Eesti tuuleolusid iseloomustab suur territoriaalne muutlikkus, mis on tingitud maastikulisest liigestatusest. Kahekümne laiuses rannikutsoonis kahaneb tuulekiirus keskmiselt 40% võrra, kuid sügavamale sisemaale liikudes enam hüppelist kahanemist ei toimu. Sisemaal toimub tuulekiiruse ühtlustumine, mille järel jääb see 4-5 m/s vahemikku. Eesti keskmised tuule kiirused on välja toodud joonisel 2.2, mis põhineb maapinnast 10 meetri kõrgusel kogutud mõõteandmetel.[17]

Õhumasside tihedus ja kiirus mõjutab tuule energiatihedust (W/m^2), mida saab defineerida kui ühikulise suurusega pindala risti läbiva õhuvoolu hetkelist energiat. Sisemaa tuule jaotus on oluliselt ühtlasem võrreldes rannikualadega, mistõttu on ka keskmine energiatihedus sisemaal märkimisväärselt madalam kui rannikupiirkondades. Saaremaa ja Hiiumaa läänerannikul ulatub energiatihedus $550 W/m^2$, kuid väheneb järsult juba saarte siseosas kuni $50-75 W/m^2$. Sisemaal on keskmine tuule energiatihedus kõigest 25-50, mis kasvab Võrtsjärvel kuni $175 W/m^2$ ning Peipsil kuni $250 W/m^2$. Peamiseks keskmise energiatiheduse ja potentsiaalse energia hulka

kajastavaks teguriks on kaugus rannikust. Kusjuures tuuliku kõrguse suurenedes kahaneb märkimisväärselt mainitud teguri mõju, kuna rannikule jäävast üleminekutsoonist sisemaa suunas olulist territoriaalset muutust ei esine.[17]

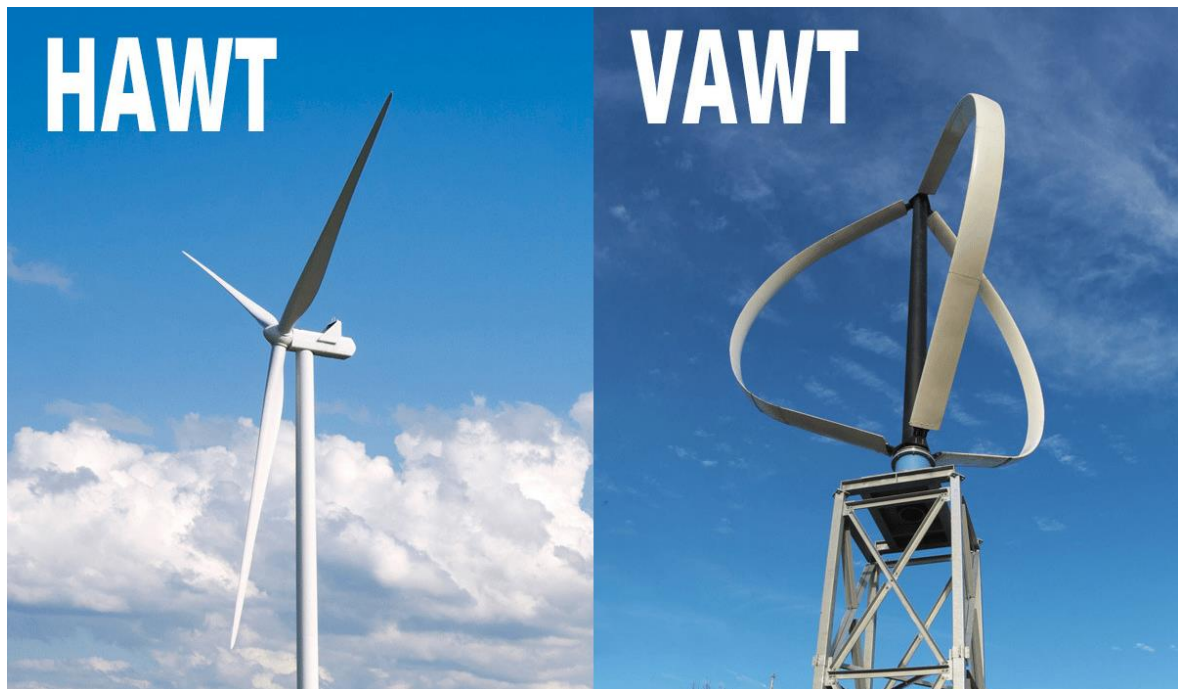


Joonis 2.2 Eesti keskmised tuule kiirused[18]

2.4 Tuulikute tüübid

Mehaanilise konstruktsiooni järgi saab olemasolevad tuulikute tehnoloogiad jagada kaheks: horisontaalvõllil paiknevate tiivikutega (HAWT) ja vertikaalvõlliga (VAWT) elektrituulikud, mille visuaalne erinevus on nähtav joonisel 2.3. Enamasti kasutatakse tänapäeval kolme aerodünaamilise tiivikulabaga horisontaalse teljega tuulegeneraatoreid, mis on välja arenenud traditsioonilistest tuuleveskitest ning sellega tõestanud kõrge töökindluse. Horisontaalvõlliga tuulikute gondel on paigaldatud torni otsa maapinna suhtes horisontaalselt, millest tuleneb ka nende nimetus. Taoliste tuulikute efektiivsuse tagamiseks on ülimalt oluline tuule suuna jälgimine ning pööramise mehhanismide korrektne töö. Sellised tuulikud on ebaefektiivsed tuuleturbulentsis ning tekitavad müra, mis võib takistada püstitamist müratundlikel aladel ja nende läheduses. Eeliseks on masstootmisest tulenev odavam hind ning lai suuruse ja võimsuse valik. Vertikaalse tuuleturbiini rootor on paigutatud vertikaalselt ning generaator koos käigukastiga asuvad maapinna lähedal, et vabastada torn liigest koormast. Vertikaalvõlliga elektrituulikud ei vaja pööramise mehhanismi, mis aitab suurendada töömomenti. Sellised tuulikud töötavad väiksemal labade pöörlemiskiirusel,

mis paraku nõuab suuremat massi tootlikkuse suurendamiseks ning suurendab mehaanilist koormust konstruktsioonile. Eeliseks horisontaalvõlliga tuulikute ees on väiksem müratase ning töö efektiivsuse sõltumatus tuule suunast, mis võimaldab püstitada tuulikud müratundlikele aladele ja majade või muude objektide vahel, kus esineb turbulentsete õhumasside liikumist. Suurimaks miinuseks on tehnoloogia kallidus. Eestis ühtegi vertikaalvõlliga tuulikut siamaani püstitatud ei ole.[16]

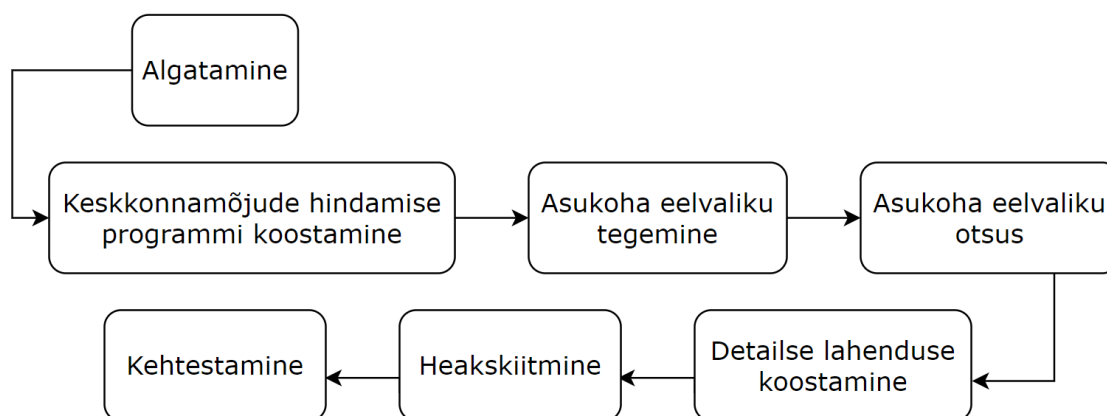


Joonis 2.3 Horisontaalvõllil paiknevate tiivikutega (vasakul) ja vertikaalvõlliga (paremal) elektrituulikud

3.KESKKONNAMÕJU

Tuuleenergeetikal on oluline roll seatud kliimaeesmärkide täitmisel, kuna elektri tootmisel ei põletata fossiilseid kütuseid ning õhku ei emiteerita süsinikdioksiidi, väävl- ja lämmastikuühendeid ega muid keskkonnakahjulikke gaase. Elektrituulikute töö ei põhjusta pinnaveekogude ega põhjavee saastumist ning ei tekita radioaktiivseid jäätmeid. Tuuleenergia on täielikult kodumaine ning rannikualadel pea aastaringselt saadaval. Sellegipoolest on tuulepargi arendaja kohustatud asukohavalikul läbi viima põhjalikud uuringud, et veenduda asukoha sobilikkuses lähtuvalt kavandatava tegevuse keskkonnamõjudest.

Tuuleparkide planeerimise põhimõtteid ning nõudeid planeerimismenetlusele ja planeeringu elluviimisele sätestab Planeerimisseadus, mida uuendati 2023. aasta veebruaris eesmärgiga võimaldada senisest kiiremalt ja tõhusamalt tuuleparke planeerida. Vähemalt 30 meetri kõrgused elektrituulikud on määratud olulise ruumilise mõjuga ehitiste nimekirja, mille planeerimisel tuleb alata kohaliku omavalitsuse eriplaneering, mis ühendab ühes menetluses üldplaneeringut ja detailplaneeringut. Eriplaneeringu menetluse käigus määratakse tuulepargi asukoht ning koostatakse keskkonnamõju strateegilise hindamise aruanne, mis esitatakse kohalikele omavalitsusele kooskõlastamiseks. Keskkonnamõju hindamisel tuleb arendajal kaaluda ka kavandatava tegevuse asukoha reaalseid alternatiive. Joonisel 3.1 on esitatud skemaatiliselt kohaliku omavalitsuse tuulepargi eriplaneeringu protsess.[19]



Joonis 3.1 Tuulepargi kohaliku omavalitsuse uuendatud eriplaneeringu protsess

Elektrituulikute põhjustatud keskkonnamõjuks on negatiivne mõju kohalikele taimestikule ja loomastikule, mis võib tuleneda ehitustööde käigus pesitsuskohtade hävinemisest või juba töösoleva tuuliku põhjustatud vibratsioonist ja infrahelist. Samuti

mõjutavad tuulepargid vahetus läheduses elavaid inimesi, kuna tekitavad müra ning tihtipeale ka vastuolu seoses visuaalse väljanägemisega. Teatavasti on siamaani esinenud negatiivset mõju õhuseiresüsteemide ja raadioside tööle. Kõiki eelnimetatud ja ka muid võimalikke mõjusid on oluline põhjalikult uurida keskkonnamõju hindamise käigus, et tagada keskkonnaalane jätkusuutlikkus.

3.1 Mõju linnustikule

Tuuleparkide mõju linnustikule avaldub peamiselt liikide ulatuslikes ümberpaiknemistes, kokkupõrkesuremuses, elupaikade hävimises või kahjustamises, barjääriefektis ning muudes kaudsetes mõjudes. Tihtipeale erinevad maismaa- ja meretuuleparkide mõjud, mis on tingitud merel paiknevate elektrituulikute oluliselt suurtematest mõõtudest ning sõltuvalt keskkonnatingimustest aladel pesitsevate linnuliikide erinevusest.

Linnustiku ümberpaiknemine tuuleparkide aladelt võib toimuda nii tuulikute ja kogu vajaliku infrastruktuuri rajamise, käitamise kui ka kasutuselt kõrvaldamise käigus. Kusjuures mõju ulatus on liigiti erinev ning selle põhjalik väljaselgitamine nõuab pikaajaliste uuringute läbiviimist. Linnustiku ümberpaiknemine tekitab potentsiaalset ohtu väljasuremiseks, mis sõltub suuresti piirkonnas mõjutamata elupaikade olemasolust. Tuuleparkide rajamisel otsene elupaikade hävinemine on üldiselt vähetõenäoline, kuid sõltub arendatava projekti iseloomust ning võib suurendada juurdepääsuteede ning elektriliitumiste lisamise vajadusel. Meretuuleparkide püstitamisel ei esine elupaikade hävinemise ohtu, kuna veekogudel lindude elupaigad puuduvad.[20]

Barjääriefekt on nähtus, mille korral muutub linnustiku liikumine selliselt, et vältida tuuleparke. Negatiivsete mõjude vältimiseks on oluline analüüsida tuulepargi asukohavalikut, et mitte takistada linnuliikide liikumist väljakujunenud regulaarsetel liikumisteedel. Vastasel juhul võivad lennutrajektoorid muutuda liiga suures ulatuses, mille tagajärjel suureneb kriitiliselt kohaliku linnustiku energiakulu. Mõju võivad suurendada muud kaudsed mõjud nagu elupaikade kvaliteedi langus ja saakloomade arvukuse muutus piirkonnas, kuhu soovitakse rajada või juba rajatakse tuuleparki. See võib vähendada teatud linnuliikide toidu kättesaadavust, mis sunnib neid elupaikadest kaugemale liikuma. Kaudsete mõjude hindamine on suur väljakutse, kuna nõuab teadmisi ning arusaamist süsteemi toimimisest erinevatel tasanditel.[20]

Kokkupõrkesuremus on üldiselt madal, kuid avaldub kõige selgemalt. Eestis on alates 2005. aastast läbi viidud mitmeid kokkupõrkesuremuse seireuuringuid, mille tulemused on esitatud tabelis 3.1. Kokkupõrkerisk sõltub suuresti tuulepargi asukohast ning seal pesitsevatest linnuliikidest. Uuringute põhiselt on eriti ohustatud suured liuglevad linnud nagu kotkad ja haukad. Üldiseks seaduspärasuseks peetakse, et lindude lennu intensiivsus väheneb vastavalt kõrguse kasvule, kuid lennukõrgused mere kohal ulatuvad üle kilomeetri ning kindlad mõõtmed, mille puhul on kokkupõrkerisk välistatud puuduvad. Lindudele ohutumad on kõrged tuulikud, mille pöörleva rootori töötsooni alumine piir on maapinnast kõrgel. Sellisel juhul väheneb kokkupõrke tõenäosus rootoriga, kuid ohtlikud võivad olla ka tuulikute tornid ja lähedal asetsevad elektrimastid. Rootorite pindala suurenedes kasvab elektrituulikute võimsus ning vastavalt on vajalik ka suurendada tuulikutevahelist kaugust. Selliselt omakorda väheneb tuulikute koguarv, mis kokkuvõttes võib vähendada kogu tuulepargi rootorite tööpiirkondade pindala ning linnustiku kokkupõrkesuremust.[21]

Tabel 3.1 Lindude hukkumine Eesti tuuleparkides (seireandmed)[22]

Tuulepark	Aasta	Hukkunud lindude arv
Pakri	2005	2
Virtsu	2008, 2010	10
Aulepa	2010 – 2011, 2013, 2016	2
Vanaküla	2010	1
Tooma	2010, 2019	10
Esivere	2010, 2019	4
Paldiski	2014 – 2016	41
Tamba-Mäli	2019	1
	KOKKU	71

Kokkupõrkeohtu saab vähendada erinevate visuaalsete vihjete andmise abil, mis parandavad tiivikulabade nähtavust ning aitavad lindudel tuulikuga kokkupõrget vältida. Norra Smøla tuulepargis kontrolliti hüpoteesi, mille alusel ühe tiivikulaba värvimine parandab elektrituuliku nähtavust ning seega väheneb ka kokkupõrkesuremus. Läbiviidud katse tulemusena selgus, et värvitud labaga tuulikuga põrkas aasta jooksul kokku 70% võrra vähem linde kui ümbritsevate tuulikutega, mille labad olid värvimata. Töösoleva tuuleturbiini tiivikulaba värvimine on ressursikulukas, kuid kulu on võimalik viia miinimumi laba värvimisel enne tuuliku püstitamist. Lähedal asuvate elektriliinide ja -mastide märkimiseks saab kasutada lindudele hästi nähtavaid markereid. Kokkupõrkesuremuse määramiseks tuleb tuulepargi rajamise järgselt läbi viia järelseiret, et vajadusel negatiivset mõju leevendada.[23]

3.2 Mõju nahkhiirtele

Nahkhiirtele avaldavad negatiivset mõju eelkõige elektrituulikud, mis on püstitatud metsade lähedusse, kus asuvad pesitsus- ja toitumispaid. Ehitustööde käigus esineb elupaikade hävinemise oht, kuid tõenäosus on väike. Samuti on peaaegu olematu kokkupõrkesuremus tulenevalt nahkhiirte väikesest suurusest ning madalast lennukõrgusest.

Enamasti mõjutab nahkhiiri tuuliku tööst tingitud müra, mis takistab metsades saakloomade kuulmist ning sunnib mürarikkaid piirkondi vältima. Turu Ülikooli uuringu kohaselt suurenes nahkhiirte arvukus oluliselt alates 800 meetri kaugusel tuuleparkidest. Eeltoodud mõjude leevendamiseks tuleb enne tuulepargi ehitamist uurida piirkonnas elavaid liike ning vajadusel muuta asukohavalikut. Keskkonnamõjude vähendamiseks peab elektriturbiine püstitama majandusmetsade lähedusse, kuna sealne struktuur on erinev looduslikust ning ei ole tavaliselt nahkhiirte eelistatud esmane elupaik. Juba olemasolevate tuuleparkide negatiivset mõju nahkhiirtele vähendada on äärmiselt keeruline, kuna rootori pöörlemisel või gondli pööramisel tekkiv müra on vältimatu.[24], [25]

3.3 Mõju kalastikule

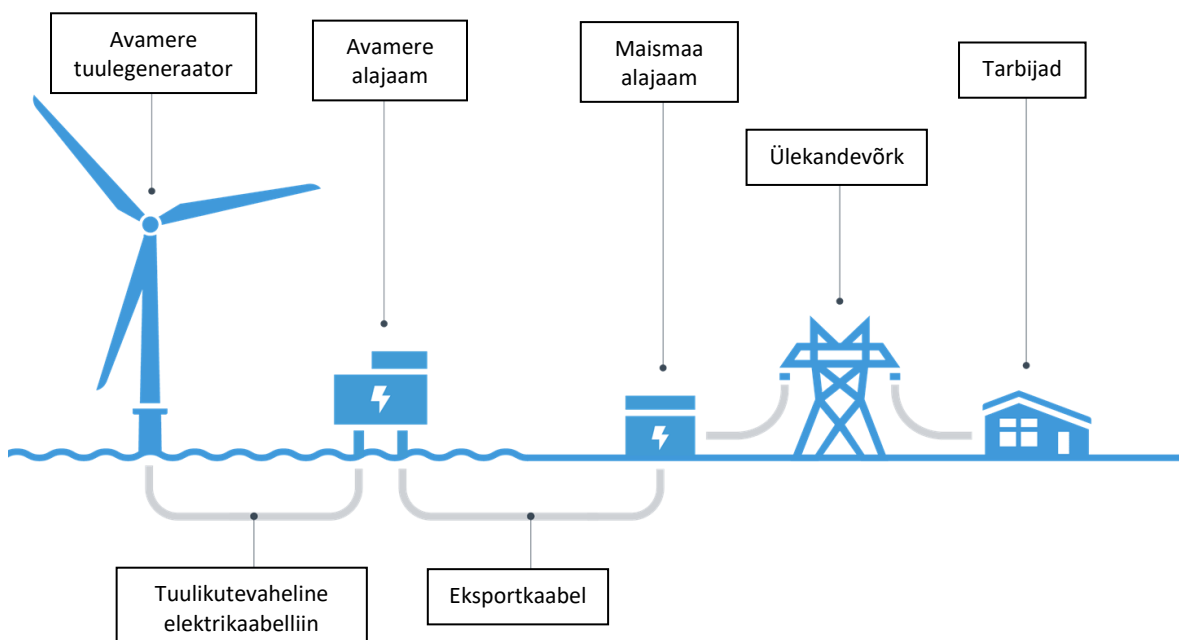
Negatiivset mõju kalastikule saab jagada põhimõtteliselt kahesuguseks. Looduskaitsele olulistele ehk haruldastele või ohustatud liikidele negatiivse mõju avaldamise tüüpiline tulem on oht bioloogilisele mitmekesisule ehk kalaliikide arvukuse vähenemine. Tööstuskaladele negatiivse mõju avaldamise peamiseks negatiivseks tulemiks on kalapüügisektori oluliste liikide arvukuse vähenemine mõjutatud piirkonnas. Sellisel juhul puudub oluline mõju kalastiku mitmekesisule, kuid kahjustab kohalikku tööhõivet ja majanduslikku seisundit.

Juba ehitusjärgus avamere tuulepargid võivad avaldada olulist negatiivset keskkonnamõju piirkonna vee-elustikule. Tuulikute püstitamiseks vajaliku merepõhja puurimise käigus tekkiv ehitusmüra genereerib väga kõrgeid ja laiaulatuslikke helirõhu tasemeid, mis kahjustavad kalade kuulmiselundeid. Samuti tekib merepõhja puurimise ja kaevamise käigus suures koguses taashõljutatud setteid, mis sõltuvalt koostisest ja

suurusest kahjustavad sealseid kalaliike. Vees hõljuvad osakesed võivad ummistada kalade lõpuseid ning blokeerida hapniku kättesaadavust, kahjustada soomuseid ja vähendada nähtavust. Siiski peetakse neid mõjusid väheolulisteks, kuna ehitusperiood on küllaltki lühiajaline võrreldes tuuleturbiinide eluea pikkusega.[26]

Opereerimisfaasis tekitavad tuulepargid peamiselt töömüra, mille kuuldavus sõltub tuulikute arvust ja võimsusest, tuule kiirusest, vee sügavusest ning merepõhja omadustest. Töömüra on palju madalama intensiivsusega võrreldes ehitusmüraga, kuid esineb tuuleturbiini kogu tööperioodi vältel ehk ligi 50 aastat. Samuti tekib avamere tuuleparkide hooldustööde käigus merel liikumise vajadusest tingitud laevamüra. Keskmiselt kulub ühe avamere tuulegeneraatori hooldamiseks kaks päeva aastas ning sõltuvalt tuulepargi suurusest võivad hooldustööd toimuda peaaegu aastaringelt.[26]

Avamere tuuleparkides toodetud elektrienergiat transporditakse maismaale merepõhja paigaldatud elektrikaablite kaudu (vt joonis 3.2). Elektrikaablite pikkus on sõltuvalt tuulepargi asukohast erinev, kuid ulatub tihtipeale üle 20 km pikkuseks. Kaablit ümbritseb kogu ulatuses elektromagnetväli, mis mõjutab teatud kalaliikide käitumist ja rännet. Nähtuse mõjusid on aga lihtne leevendada kasutades sobivamat isolatsiooni või kaabli varjestamisega merepõhja.



Joonis 3.2 Avamere tuulepargi lihtsustatud skeem[27]

Tuulikute füüsiline olemasolu mõjutab juba iseenesest kogu vee-elustikku, kuna tegemist on tehniliku objektiga, mis esialgselt ei kuulu antud keskkonda. Elektrituulikute

vundament tekitab mere põhjas kunstlikke riffe ehk ehitisi, mis on paigaldatud merepõhja tahtmatult või plaanipäraselt funktsioneerides alusena mereelustiku arengule. Vundamenti koloniseerivate erinevate liikide tüübid sõltuvad näiteks struktuuri suuruselt, kõrgusest, kujust, profiilist, keerukusest ja materjalist. Kalastikule ja kalandusele mõjub taoliste riffide teke positiivselt, kuna ümbruses suureneb kalade tihedus ja liikide mitmekesisus.[26]

3.4 Mõju kohalikule kliimale

Globaalset kliimamuutust põhjustavad peamiselt fossiilsete kütuste põletamisel tekkivad heitgaasid, mida juhitakse atmosfääri. Tuulegeneraatoriga elektri tootmiseks puudub vajadus igasuguste kütuste põletamiseks, kuna võllid pöörlevad liikuva õhu energia mõjul ehk kogu protsessi võib pidada õhureostuse vabaks. Elektrituulikute tootmisel ning transportimisel kulutatud energiat kompenseeritakse mitmekordselt tuuliku eluea jooksul. Seega, tuuleparkide püstitamine mõjutab keskkonda positiivselt, kuna selliselt vähendatakse soojuselektrijaamade tööaega ning heitmeid.

Tänaseks on leitud, et maismaa tuulepargid võivad põhjustada kohalikke kliimamuutusi. Ameerika Ühendriikides korraldatud mõõtmiste alusel järeldati, et suured tuulegeneraatorid mõjutavad oluliselt maapinna temperatuure, kuna tiivikulabade liikumisega tekitatud turbulentsed õhuvood päevasel ajal jahutavad ning öisel ajal soojendavad maapinda. Samuti on osa keskkonnateadlasi jõudnud arvamusele, et tiivikulabade tekitatud turbulents võib mõjutada kohalikke õhuvoogude liikumist, mille tagajärjel muutub piirkonna loomulik vee aurustumise kiirus põhjustades pikemaid põuaperioode. Ilmselt puudub taolistel nähtustel mõju globaalsele kliimamuutusele, kuid sellegipoolest tuleb antud valdkonda tulevikus põhjalikumalt uurida, et tagada jätkusuutlik elektrienergia tootmine.[28]

3.5 Jäätmekäitlus

Kaasaegsete tuuleturbiinide väljundvõimsuse suurenemine on põhjustanud elektrituulikute tootmiseks kuluva energia- ja resurssikulu kasvu. Tuulegeneraatorite eluiga on hinnanguliselt 20 kuni 25 aastat, kuid tihtipeale pikeneb eluiga süsteematiliste hooldustööde abil mitme aasta võrra, mis aitab suurendada tulu ning vähendada negatiivseid keskkonnamõjusid. Statistika kohaselt moodustavad rikete kõrvaldamine ja hoolduskulud kuni 25% toodetud elektrienergia kogumaksumusest, mis on vajalik

jätkusuutlikkuse tagamiseks. Tuuleturbiini seisukorra hindamiseks kasutatakse mitmeid seadmeid kaugdiagnostika läbiviimiseks, mis suurendab kasutatavate komponentide arvu. Siinkohal jääb suur vastutus tuulikutootjatele, kelle ülesandeks on analüüsida materjalikasutuse tõhusust tootmises ning jõuda optimaalseima tootmisskeemini, mis ei koorma liigselt ümbritsevat keskkonda, kuid samas tagab elektrituulikute rikkevaba tööd. Tänapäeval saab taaskasutada ligikaudu 85-90% tuulikus kasutatavatest materjalidest, mis on juba iseenesest hea näitaja, kuid loodetavasti suureneb tulevikus veelgi. Hinnanguliselt saab 60 MW tuulepargi kasutuselt kõrvaldamisel taaskasutada kokku ligikaudu 8000 tonni materjale, mille täpsem jaotus on esitatud tabelis 3.2. Jäätmekäitlusele aitab kaasa läbimõeldud seadusandlus, mille alusel kohustatakse arendajaid planeerima elektrituulike kasutuselt kõrvaldamist veel enne ehitustööde algust arvestades kasutatavate materjalide koostist ning omdausi.[29]

Kõige enam kasutatakse tuulikutes mustmetalle ehk rauda ja selle sulameid. Enim kasutatav sulam on teras, mida saab taaskasutada mitmeid kordi ning mille puhul on väljakujunenud suurepäraselt toimiv järelturg. Terast saab aga toota paljudes erinevates sulamites leageerivate elementidega nagu kroom, mangaan, boor ja muud elemendid, mis muudavad terase struktuuri keerulisemaks ning raskendavad ringlussevõttu. Taoliste sulamite kasutamine võib osutada tulevikus probleemiks, kuna pärast kasutuselt kõrvaldamist jäävad sulamist toodetud osad kasutuseta. Samuti leidub elektrituulikutes teisi metalle nagu alumiinium ja vask. Alumiiniumit leidub peamiselt kaablites ning redelites ja platvormides. Alumiiniumi puhul on eriti oluline ringlussevõtt, kuna taastöödeldud metalli tootmisel vähenevad negatiivsed keskkonnamõjud võrreldes esmatootmisega seoses väiksema energiakuluga. Taaskasutamine ei põhjusta omaduste halvenemist. Vask on oma omaduste tõttu tuulikutes laialdaselt kasutatav metall. Vaske saab kasutada puhtal kujul või leageerida tsingi või nikliga. Põhimõtteliselt saab vaske lõputult ringlusse võtta, kuid sarnaselt terasega võivad teatud vasesulamid olla taaskasutamiseks liiga keerulise struktuuriga.[29]

Tiivikulabad ja sageli ka gondel ehitatakse komposiitmaterjalist, mille kasutamine ajas hoogsalt suureneb. Termoreaktiivseid maatriksipõhiseid komposiite kasutatakse tänapäeval ka teistes tööstusharudes nagu kosmonautika või autotööstus, sest komposiitmaterjalid on omadustelt vastupidavaid ning neid on lihtne töödelda. Vaatamata suurepärasele omadustele leidub ka komposiitmaterjalide juures negatiivset keskkonnamõju. Erinevalt metallidest on komposiitmaterjali ringlussevõtt raskendatud keerulise komposiitkonstruktsiooni tõttu. Pärast kasutuselt eemaldamist komposiitmaterjalist elemente enamasti põletatakse ning tuhka ladestatakse

prügilatesse või lisatakse ehitusmaterjalidesse, kui see on kooskõlas kohalike seadustega. Tuulikulabade ladestamise prügilatesse on paljud riigid tänaseks keelustanud. Vähem levinud alternatiivne võimalus on materjalide taaskasutamine, mille tehnoloogia arendamist tänapäeval takistab taastöötlemise kõrge maksumus ning turunõudluse puudulikkus.[29]

Kasutatud määrdeõli saab ümber töödelda baasõliks ning seejärel seda taaskasutada. Õli rafineeritakse sarnaselt toornaftaga. Protsessi käigus eemaldatakse kasutatud õlist ebavajalikud saasteained nagu vesi, keemilised lisandid, mustus ja kütusejäädid. Tulemuseks on rafineeritud õli, mis on sama kvaliteetne kui algne produkt. Selliselt saab määrdeõlilisid lõputulust taaskasutada, kuna määrdeained ajas ei kulu.

Elektri- ja elektroonikaseadmeid on elektrituuliku kasutusea lõpus küllaltki keeruline taaskasutada materjalide keerulise koostise tõttu. Lisaks on tihtipeale kogu elektroonika pärast kasutamisest eemaldamist liigselt vananenud ning ei ühildu kaasaegsete süsteemidega. Keskkonnamõju vähendamiseks tuleb taaskasutada nii palju kui võimalik elektroonikaseadmetes leiduvaid olulisi komponente nagu vaske ja väärismetalle, sest nii saab vähendada nende kaevandamise mahtu. Tulevikus suureneb väärismetallide taaskasutamise olulisus veelgi seoses tehnoloogia arenguga, mis nõuab suuremas koguses keerukamaid elektri- ja elektroonikaseadmeid. Samuti tasub tähelepanu pöörata tuulikutes kasutatavate akude taastöötlemisele, kuna nende tootmine on äärmiselt energiakulukas ja koostise oluline osa on väärismetallid.

Tuulegeneraatorites kasutatakse neodüümmagneteid, mis on tänapäeval tugevamaid püsिमagnetid, mille koostisesse kuuluvad raud, boor ning haruldased muldmetallid nagu neodüüm ja düsproosium. Ajalooliselt on haruldaste muldmetallide taaskasutamine olnud väga madal jäädes isegi alla 1%. Elektrituulikute puhul on aga haruldastel muldmetallidel põhinevate püsिमagnetite taaskasutamine küllaltki levinud, kuna need on piisavalt suured ning lihtsasti eemaldatavad. Püsिमagnetite tootmisel taastöödeldud komponentidest kulutatakse ligi poole vähem energiat võrreldes esmatootmisega, mis aitab vähendada keskkonnamõju ning parandada majanduslikku kasumlikkust.[29]

Tiivikulabades leidub arvestatavas koguses sünteetilisi orgaanilisi polümeere. Tuulikutes kasutatavate termoplastide eeliseks on vastupidavus korrosioonile ning töötlemise lihtsus. Kuumutamisel termoplastide koostises ei toimu keemilisi muutusi, mis võimaldab neid mitmeid kordi uuesti vormida. Ringlussevõtt toimub tavaliselt mehaanilise ümbertöötlemisega, mis hõlmab nelja etappi: sorteerimine; hakkimine;

pesemine ja kuivatamine; sulatamine ja töötlemine pelletiteks, millest omakorda saab valmistada soovitud kujuga lõpp-produkti.[29]

Tihti peale leidub tuulikulabade koostises balsapuitu, mis on paigutatud komposiitmaterjali kihtide vahel. Balsapuidu eeliseks on soodsam hind võrreldes metallidega ning suurem vastupidavus võrreldes plastidega. Pärast tuuliku eluea lõppu saab puitu põletada energia tootmise eesmärgil. Balsapuidu kasutamise järsk suurenemine on põhjustanud niinimetatud musta turu teket Lõuna-Ameerika riikides, kus ei järgita ettenähtuid raieahtu. Taoline ebaseaduslik raie põhjustab mitmeid keskkonnaprobleeme nagu Amazonase vihmametsade ja seal elavate põlisrahvaste kiiret kadumist. Siinkohal jääb suur vastutus tuulikutootjatele, kes peavad veenduma kasutatavate materjalide ohutuses ja seaduslikus päritolus.[30]

Tabel 3.2 Tuulepargi (60 MW) utiliseerimise käigus tekkivate potentsiaalselt taaskasutatavate jäätmete kogused[29]

Tuulikutes leiduv materjal	Kogus, kg
Mustmetallid	6560000
Alumiinium	104000
Komposiitmaterjalid	660000
Määrdeõlid	30000
Elektroonikaseadmed	124000
Akud	36000
Neodüümmagnetid	40000
Vask	292000
Balsapuu	29000
Polüetüleen	32000
Polüpropüleen	6600
Polüvinüülkloriid	6000
KOKKU	7919600

3.6 Mõju inimesele

Keskkonnamõjude hindamise käigus pööratakse suurt tähelepanu tuuleparkide mõjule inimeste tervisele ja heaolule. Ilmtingimata tekib tuulepargi rajamise protsessi käigus müra ja visuaalseid häiringuid, mis võivad küll tekitada pahameelt kohalikele elanikkonnale, kuid üldiselt on ehitusjärgu häiringud lühiajalised ning ei tekita ohtu inimeste tervisele. Oluliselt tähtsam on pöörata tähelepanu rajatava tuulepargi elektri

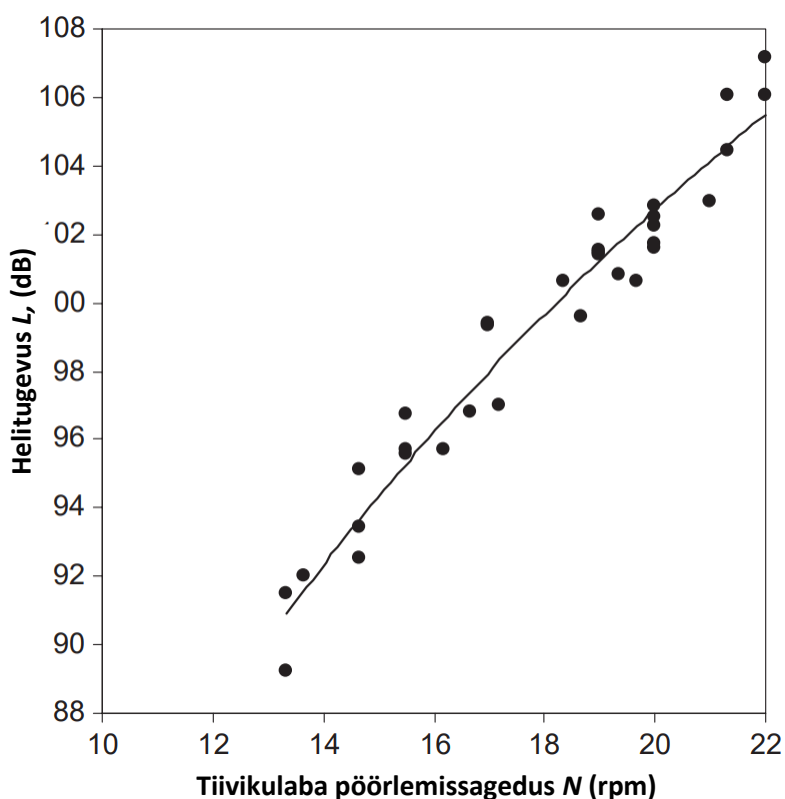
tootmise käigus tekkivate võimalikele mõjudele ning analüüsida nende vastavust kehtivale seadusandlusele ja standarditele. Arvestada tuleb ka kõikvõimalikke kaudsete mõjudega nagu oluliste alade maa- ja veekasutus, mis võivad halvendada elanikkonna sotsiaalmajanduslikku olukorda seoses töökohtade kadumisega. Tänapäevaks ei ole leitud ühtegi tuuleparkide negatiivset mõju, mis kahjustaks inimeste elukvaliteeti globaalselt ehk elektrituulikute mõju rahvastikule on seotud peamiselt vahetus läheduses elavate inimestega.

Tuuleparkide visuaalne mõju põhineb inimestele harjumuspärase maastikuvaate muutusega, mis on tingitud paigaldatavatest hiiglaslikest tehiskonstruksioonidest. Eriti teravalt väljendub visuaalsest mõjust tingitud rahvastiku vastuolu piirkondades, mille maastikel senini puudub igasugune inimlik sekkumine. Tuulikute asukohaks valitakse tavapäraselt sobivamate tuuleoludega kõrgemad alad, mis muudab need nähtavaks ka väga suurte vahemaade tagant. Samuti on inimestele tihtipeale vastuvõetamatud uued elektrimastid ja -liinid, mis on vajalikud energia transportimiseks tarbijateni. Vaatamata sellele puudub visuaalsel mõjul oht inimeste tervisele ning suhtumine sõltub arvamusest, mis on küllaltki subjektiivne näitaja. Eestis läbiviidud tuuleparkide meelsusuuringud näitavad, et vaid kolmandik elanikest on meelestatud positiivselt oma kodu või suvekodu lähedusse rajatavate maismaatuuleparkide suhtes. Meretuuleparkide puhul on sama näitaja oluliselt kõrgem ning ligi kaks kolmandikku elanikest suhtuvad meretuuleparkide rajamisele kodu või suvekodu lähedusse pigem positiivselt. Tavaliselt sõltub inimeste suhtumine tuuleparkidesse kliimaeesmärkide teadlikkusest ning nende seosest taastuveneergetikaga.[31], [32]

Tuuleparkide visuaalse mõju hindamine on keeruline, kuid ülimalt oluline protsess, millest sõltub tulevikus rahvastiku aktsepteeritavus. Tänapäevaks on leitud mitmeid meetmeid, mis võivad muuta tuulepargid inimestele visuaalselt vastuvõetavamaks. Tuulepargi aktsepteerimises oluline parameeter on selle normaalne töö. Tuuleturbiinide normaalse töö korral peetakse neid otstarbekaks ning kasulikeks. Vastupidiseid emotsioone tekitavad aga olukorrad, kus tuulise ilma korral tiivikulabad ei pöörle ning tekitavad ebakindlust vajalikkuse suhtes. Sobilik asukohavalik aitab samuti parandada visuaalsest mõjust tingitud vastuolu. Avatud või tasastele aladele paigutatud tuuleturbiinid on hästi nähtavad suurte vahemaade tagant, mis tihtipeale tekitab vastuolu. Sobivamad kohad on mäeahelike tipud või kitsad orud, kus tuulikud eriti välja ei paista. Asukohavalikul tuleb võimalusel välistada looduskauneid alasid ning eelistada maastike, millele ei pöörata erilist tähelepanu nagu vanad kaevandused või suured kivised maa-alad. Tuuleparkide visuaalne aktsepteeritavus sõltub kasutatavate tuulikute mudelist, värvusest ja kõrgusest. Üldiselt arvatakse, et torutornid on

visuaalsest aspektist vastuvõetavamad kui võretornid. Suur roll on ka visuaalsel ühtlusel ehk labad, gondel ning torn peaksid kogu tuulepargi ulatuses olema ühesugused. Sõltuvalt asukohast saab kasutada erinevaid värve, et hajutada tuulikud ümbritsevasse keskkonda.[32]

Tuuleturbiini töö käigus tekib müra, mis võib kahjustada inimeste heaolu ning halvemal juhul ka tervislikku seisundit. Tekkiva müra helitugevus ulatub kuni 95-105 dB (vt joonis 3.3), mis on võrreldav ööklubis tekkiva müraga. Vastavalt keskkonnaministri määrusele "Välisõhus leviva müra normtasemed ja mürataseme mõõtmise, määramise ja hindamise meetodid" jäävad tööstusmüra normtaseme piirväärtused päevasel ajal 55-65 dB ning öisel ajal 40-50 dB vahemikku sõltuvalt müra kategooriast, mis määratakse üldplaneeringu maakasutuse juhtotstarbe alusel. Pidev madalsageduslik müra põhjustab unehäireid, peavalu, peapööritust, ärritust, mälu- ja kontsentratsioonihäireid. Negatiivsete mõjude vältimiseks nõutakse tuulikute planeerimisel müra leviku hindamise läbiviimist, et veenduda rakendatud tööstusmüra normtaseme nõuete täitmisel. Tänapäeval saab hindamisel kasutada modelleerimist, mis võimaldab hinnata müra levikut erinevate tuule suundade ja kiiruste korral. Hindamisel tuleb arvestada nii mehaanilise kui ka aerodünaamilise müraga ning vajadusel samas piirkonnas tekkiva muu tööstusmüra koosmõjuga vastuvõtjale.[33], [34]



Joonis 3.3. Tuulepargi (30 MW) helitugevus mõõteväärtused 400 m ja 1500 m kaugusel[35]

Mehaanilist müra tekitavad peamiselt tuuliku liikuvad elektromehaanilised osad nagu generaator ja käigukast. Samuti tekib tugev mehaaniline müra tuuliku gondli pöörlemisel tuule poole. Mehaanilise müra vähendamiseks aitab kvaliteetne ja toimiv isolatsioon, mille abil välditakse vibratsiooni edasikandumist masti või labakomplektidesse ja selle kiirgamist konstruktsioonist tuleneva müra kujul. Aerodünaamilist müra põhjustavad turbulentsed õhukeerised labade tippudes ning tiiviku pöörlemise sagedus. Tekkiv heli on sarnane tormise mere müraga ning suuresti sõltub tuule tugevusest. Müra väheneb tuulikute vahelise kauguse suurenedes ning tuule kiiruse languse korral. Elektrimuulikutega kiire areng ning mõõtmete suurenemine on kaasa aidanud müra leviku tõkestamisele, kuna kõrgel tekkiv müra ei levi kogu ulatuses maapinnani. Samuti puudub meretuuleparkidel negatiivne müra mõju inimeste tervisele, kuna tuulegeneraatorid paigaldatakse tavaliselt mitme kilomeetri kaugusele rannikualadest ning tekkiv müra sumbib täielikult enne elupaikadeni jõudmist.[33]

Tuuleturbiini töö tekitab infraheli (alla 20 Hz) laineid, mis võivad levida mitmekümne kilomeetri kaugusele tingituna halvast neeldumisest atmosfääri ja tehisobjektidesse. Vaatamata laiale levikule ei kujuta infraheli ohtu inimeste tervisele, kuna madalsageduslik heli on inimese kõrvadele kuuldamatu ning ümbritsevas keskkonnas üldlevinud pärinedes looduslikest allikatest. Samuti puuduvad igasugused teaduslikud uuringud, mis kinnitavad infraheli negatiivset mõju inimestele. Tihtipeale on elektrimuulikutega läheduses elavate inimeste terviseprobleemide tajumine tingitud hoopis juba eelnevalt negatiivsest suhtumisest tuuleparkidesse. Soome valitsuse poolt tellitud uuringu tulemused näitasid, et varasemalt tuuliku infrahelist põhjustatud terviseprobleemidest teatanud inimesed ei olnud võimelised heliproovides madalsageduslikke laineid tajuda. Lisaks leiti, et kokkupuude tuuliku infraheliga ei põhjustanud füsioloogilisi reaktsioone.[36]

Rahvastiku heaolu langust võivad tekitada päikesepaisteliste ilmade korral kõrgete elektrimuulikutega ja vajalike kommunikatsioonide poolt põhjustatud päikesevarjud. Arvestades Päikese diameetrit, kaugust maapinnast ning võimalikku madalaimat tõusnurka võivad 45-meetrise rootori läbimõõduga tuuliku varjud ulatuda kuni 4,8 km kaugusele, kuid realselt varjud nii kaugemale ei ulatu seoses atmosfääri optiliste takistustega. Tänapäeval võetakse arvutustes ja mudelites varjude maksimaalseks ulatuseks 2 km.[34]

Tuulikute varjusid jagatakse kaheks liigiks – liikuvad varjud ja perioodilised peegeldused. Liikuvad varjud on tingitud tiivikulabade pöörlemisest ning tekivad hetkel

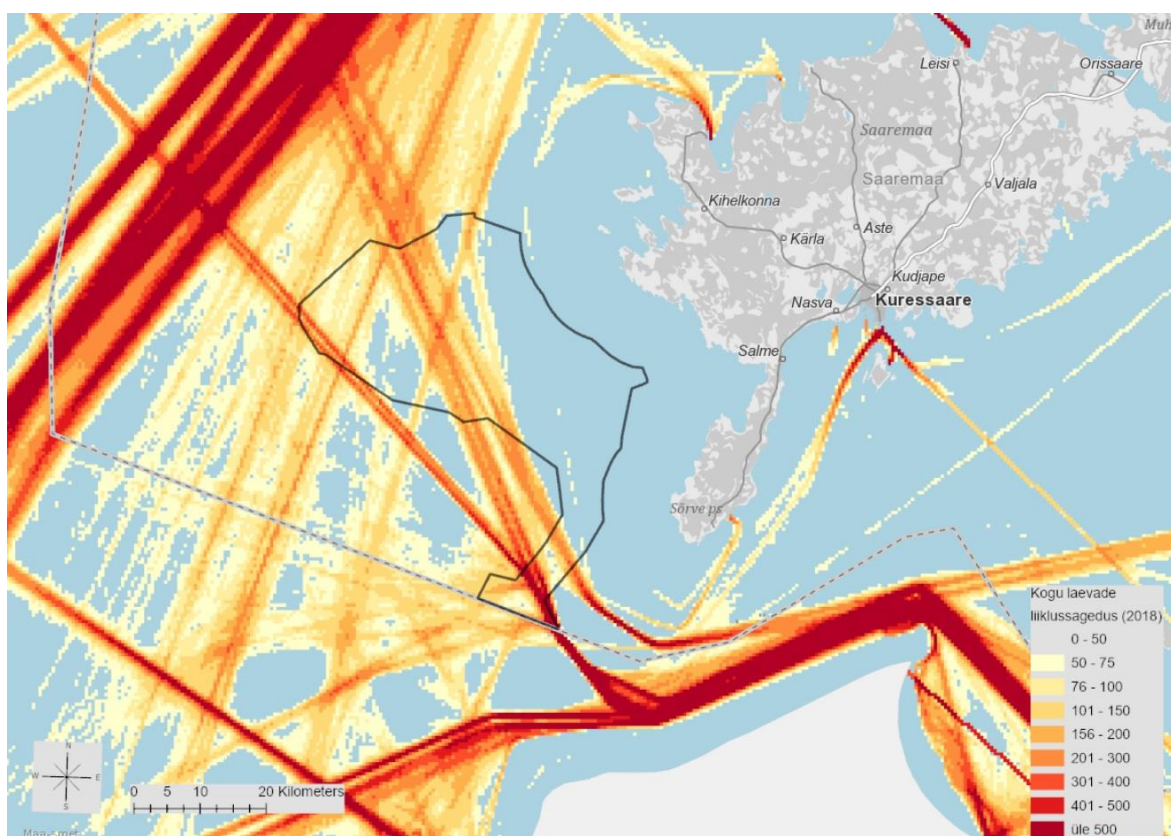
kui laba lõikab päikese ja vaatluspunkti vahelist telge. Antud efekti muudab inimestele häirivaks asjaolu, et normaalsest tööst tingitud varjud on liikuvad ja vilkuva efektiga, mis tingimata tekitab ebamugavusi igapäevastes tegevustes. Kõige enam häirivad liikuvad varjud hommikuti ja õhtuti ehk Päikese väiksema tõusunurga korral. Perioodiline peegeldus on nähtus, mil Päike peegeldub tiivikulabadelt põhjustades teatud vaatluspunktides hetkelist ebameeldivat helkimist. Mainitud efekti põhjustab tuuliku labade pinna peegeldus, mida saab vältida kasutades vastavaid pinnatöötlusmeetodeid. Üldiselt ei ole varjud inimestele ohtlikud, kuid võivad olla äärmiselt ärritavad ning põhjustada halba eelarvamust tulevikku planeeritud tuuleparkide projektide suhtes, mis aeglustab kliimaeesmärkide täitmist.[34]

Halva asukohavaliku analüüsi järgselt püstitatud tuulepargid võivad negatiivselt mõjutada ka piirkonna majanduslikku seisundit takistades kohaliku äritegevuse arengut või tekitades maa ja kinnisvara väärtuse langust. Meretuuleparkide rajamisel tuleb arvestada olemasolevate mereturismi objektidega ja sadamatega ning väljakujunenud reisijate- ja kaubaveo veeteedega. Maismaatuuleparkide planeerimisel tuleb analüüsida ümbritseva keskkonna osatähtsust kogu majanduses. Levinud turismipiirkondadesse paigaldatud tuulikud rikkuvad sihtkohtade unikaalsuse, mille tagajärjel väheneb turismi osakaal ning sadamate ja majutusasutuste vajalikkus, mis omakorda põhjustab tööhõive vähenemist. Alates 2023. aasta 1. juulist jõustub Keskkonnatasude seaduse muudatus, mis sätestab tuuleenergiast elektrienergia tootmise tasu suuruse ning ulatuse. Tasu hakkavad maksma tuuleparkide omanikud kohalikele omavalitsustele ja inimestele, kes elavad tuulepargi mõjupiirkonnas. Tuulikutasu suurus sõltub tuulepargi toodangust ja elektrienergia hinnast, mis 100 MW maismaatuulepargi ning 50 €/MWh elektrienergia puhul moodustab kokku 150000 eurot aastas ja 1000 MW võimsuse meretuulepargi ning 50 €/MWh elektrienergia puhul 1,4 miljonit eurot aastas. Antud meede vähendab tuulepargi püstitamisest tingitud majanduslikku seisundi langust, kuid võimalusel tuleks juba eelnevalt planeerida tuulepark asukohta, kus puudub oluline mõju piirkonna majandusele.[37]

3.7 Mõju meresõiduohutusele

Planeeritud meretuuleparkide arendamine suurendab konkurentsi mereruumi kasutamise pärast, mis võib tekitada konflikte erinevate koostoimivate merekasutuse valdkondade vahel. Eesti merealade planeerimisel keskendutakse üha enam tuuleenergeetikale sobilike alade leidmisele, mis on kulutõhususe saavutamise

eesmärgil ruumikulukad ning paratamatult tekitavad konflikte teiste tegevusaladega. Meresõiduohutuse tagamiseks tuleb tuuleenergeetika planeeringu protsessi käigus põhjalikult analüüsida ka piirkonna laevaliiklust ning sellele vajalikku ruumi ja vastavust rahvusvaheliste mereõiguse konventsioonide nõuetele, mis hõlmavad laevaliiklusteeninduse radarite, navigatsiooniseadmete ja raadiosidesüsteemide kaitset.[38]

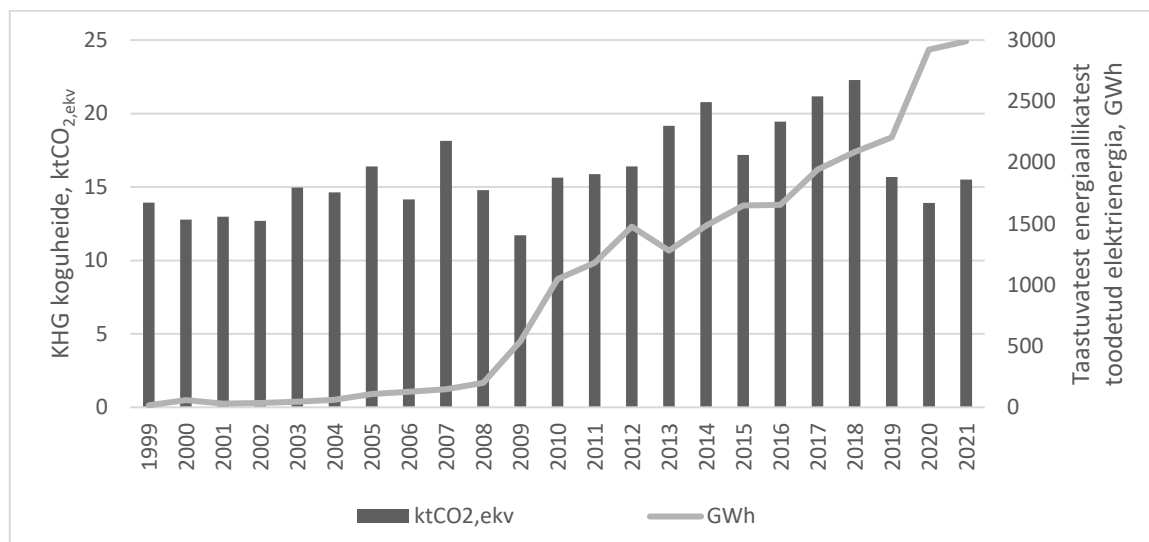


Joonis 3.4 Laevade liiklussagedus ja tuuleenergeetika arendamiseks sobiv ala Saaremaa läänerannikul[38]

Peamiseks ohuks uutele avamere kasutusvaldkondadele alade määramisel on õnnetusriski suurenemine. Väljakujunenud laevateede ja manööverdamiseks vajalikele ohutusaladele püstitatud tuuleturbiinid takistavad sealset laevaliiklust, mille tulemusena suunatakse liiklus ümber muudele aladele. Taolise ümbersuunamise tagajärjel kasvab omakorda sõiduradadel laevaliikluse tihedus ning veesõidukite kokkupõrkeoht. Tuuleparkide mõju laevaliiklusele piirkonnas on vältimatu, kuid põhjaliku tuulikute mõju- ja riskianalüüsi ning erinevate juba olemasolevate laevaliikluse modelleerimise tarkvarade abil on võimalik leida optimaalseim lahendus tuulepargi paigutuse osas ning täielikult maandada kõikvõimalikud õnnetusriskid. Joonisel 3.4 on selgesti nähtavad väljakujunenud laevateed, mille kasutamist takistab planeeritav tuuleenergeetika arendamiseks sobiv ala.[38]

4.VÕRDLUS PÕLEVKIVIELEKTRIJAAMAGA

Sarnaselt tuuleenergiaga saab põlevkivist toodetud elektrienergiat pidada täielikult kodumaiseks, kuna põlevkivi kaevandamine, töötlemine ning kasutamine toimub Eestis. Põlevkivi on üks suuremaid süsinikdioksiidi tootjaid Euroopa Liidus, mille põletamisel eritatakse keskkonda keskmiselt 1,04 tCO₂/MWh sõltuvalt kivimi mineraalsusest. Töö käigus elektrituulikud ei erita keskkonda kasvuhooonegaase, kuid sellegipoolest kaardistatakse tuulegeneraatorite süsinikdioksiidi heitmete hulka nende eluea baasil. Keskmiselt loetakse tuuleparkide heitmete koguseks 0,014 tCO₂/MWh, mis sõltub tuulikute konstruktsioonist ning kasutatavast tootmistehnoloogiast. Joonisel 4.1 on graafiliselt kujutatud Eesti KHG koguheide arvestatuna CO₂ ekvivalendina ehk erinevate KHG kogus ümber arvatuna CO₂ koguseks ja taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergia kogused 1999. – 2021. aastal.[39]



Joonis 4.1 Eesti KHG heide ja taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergia[40], [41]

Statistikaameti andmetel toodeti 2021. aastal Eesti elektrisüsteemis 7,359 TWh elektrit, millest ligi poole ehk 3,759 TWh moodustas põlevkivist toodetud elektrienergia ning umbkaudu kümnendikku ehk 0,733 TWh tuuleenergia. Tuginedes eelnevalt väljatoodud väärtustele saab arvutada elektrienergia tootmise käigus tekkinud süsinikdioksiidi heitmete hulka, mis põlevkivienergia puhul moodustab 3,9 mln tCO₂. Tuulegeneraatorite poolt toodetud elektrienergia koguse katmiseks põlevkivijaamade abil lisanduks süsinikdioksiidi heitmete hulka lisaks 0,8 mln tCO₂. Arvestades 2021. aasta süsinikuheitme kvoodi keskmist hinda 60 €/tCO₂ oleks põlevkivist elektrienergia tootjad pidanud tasuma ligikaudu 48 mln euro väärtuses lisatasusid. Tulevikku prognoositakse jätkuvat süsinikuheitme kvoodi hinna kasvu, mis suurendab veelgi tuuleenergeetika ning muudel taastuvatel energiaallikatel põhinevate elektritootmiste olulisust.[40], [41]

Eesti põlevkivitööstusel on tähtis sotsiaalmajanduslik roll, kuna ajalooliselt on põlevkivi taganud regiooni energeetilise sõltumatuse ning andnud olulise osa majanduse kogutoodangusse. Fossiilkütuste põletamisel atmosfääri eralduva CO₂ koguse vähendamiseks on uuritud mitmeid CO₂ püüdmise ja ladustamise tehnoloogiaid. Lähitulevikus rakendamiseks peetakse kõige sobivamateks CO₂ püüdmistehnoloogiateks absorptsiooni ja hapnikus põletamist, mille valmidustase paraku veel ei võimalda tööstuslikku kasutamist. Lisaks puuduvad Eestis kogutud CO₂ ladustamis- ning kasutusvõimalused, mille tagajärjel ei ole mainitud tehnoloogiate kasutamine majanduslikult põhjendatud tingituna püüdmise, puhastamise, transpordi ja ladustamise kõrge rahalisest kulust.[42]

Samuti ei teki elektrituulikute töö käigus tootmisjäätmeid, mis vajavad rohkelt ruumi ladestamiseks. Põlevkivist elektrienergia tootmiseks kulus 2021. aastal 4,357 mln tonni kütust (vt tabel 4.1). Põlevkivitööstuse peamisteks kõrvalsaadusteks on elektrijaamades põlemisel tekkiv põlevkivituhk ning kaevandatud mäemassi rikastamise käigus tekkiv aheraine. Kõrvalsaadusi püütakse ära kasutada erinevates tööstusharudes nagu keemia- ja ehitusmaterjalitööstuses toorainena ning põllumajanduses erinevate väetiste lisanditena, kuid ringlusevõtt moodustab keskmiselt vaid ligikaudu 30% aheraine puhul ning jääb alla 5% tuha puhul. Kokkuvõttes tekkivad kaevanduste ja soojuselektrijaamade lähedusse tehnilikud aheraine- ja tuhamäed põlevkivitööstuse kõrvalsaaduste ladestamiseks. Lisaks nõuab põlevkivienergeetika uute kaevanduste rajamist, kuna hetkel toimivate allmaakaevanduste ja karjäärade ressursid ammenduvad. Uute kaevanduste rajamine on aga vastuolus seatud kliimaeesmärkidega ning tihtipeale tekitavad uued kaevandused vastumeelsust kohaliku elanikkonna seas.

Tabel 4.1 Elektrienergia toodang Eestis 2021. aastal[40], [41]

Põlevkivi	Toodetud elektrienergia, GWh	3579
	Elektrienergia tootmiseks tarbitud kütus, tuhat t	4357
Tuuleenergia	Toodetud elektrienergia, GWh	733
	Elektrienergia tootmiseks tarbitud kütus	0
KOKKU	Toodetud elektrienergia, GWh	7359
	Toodetud tuuleenergia arvelt säästetud süsinikuheitme tasu, mln €	48

Tuuleenergia põhiliseks puuduseks on ilmastikuoludest sõltuv varustuskindlus, kuna tuulegeneraator toodab elektrit vaid ettenähtud tuulekiiruse korral, mis jääb tavaliselt vahemikku 3 kuni 25 m/s. Elektrienergia üle- või puudujäägi kompenseerimiseks sobivad eelkõige erinevad energiasalvestid, mis sõltuvalt vajadusest tarbivad või annavad võrku elektrit. Energia salvestamiseks sobivad suuremahulised akupatareid ning suruõhu- või pumphüdroakumulatsioonijaamad, mis paraku algfaasis olevate

tehnoloogiate ja investeringuks ebaratsionaalse kalli maksumuse tõttu Eestis puuduvad. Alternatiivina saab piirkonda rajada kiire võimsusreserviga soojuselektrijaama, mille automaatika juhib tootmisüksuseid ilmastikuoludest tingitud elektri genereerimise ja tarbimise ebabilnasi korral. Põlevkivielektrijaamade tootmine on juhitav ehk sõltub vaid operaatori määratud seadeväärtusest, mida vajadusel saab muuta. Olukorras, kus puuduvad vajalikud energiasalvestuse tehnoloogiad taastuenergia järskude genereerimise muutuste kompenseerimiseks ei ole võimalik sulgeda kõik põlevkivist energiat tootvad elektrijaamad, kuna vaid need suudavad tänases olukorras tagada Eesti elektrisüsteemi stabiilsuse ja töökindluse.

KOKKUVÕTE

Euroopa Liidu kliimaeesmärkide saavutamiseks tuleb riigi energiaportfelli muuta oluliselt mitmekesisemaks suurendades taastuvatel energiaallikatel põhinevate tootmisüksuste osakaalu elektrisüsteemis. Fossiilsete kütuste põletamisel tekkivate kasvuhonegaaside heitekoguseid saab vähendada päikeseelektrijaamade abil, mille arv ilmtingimata kasvab olulisel määral järgnevate aastate jooksul, kuid suurima kasvupotentsiaaliga ning kliimapoliitika eesmärkide saavutamise võtmeteguriks peetakse maismaa- ja meretuuleparke. Tänapäevaks on Eesti elektrisüsteemi ühendatud 145 maismaatuulikuga koguvõimsusega 319,96 MW, mille toodang moodustab keskmiselt 10% aastas toodetud summaarsest elektrienergiast. Tuuleenergia potentsiaalseks võimsuseks hinnatakse 1,5 GW maismaal ning 7 GW merel, mis võimaldab katta mitmekordselt kogu Eesti aastase energiatarbimise. Planeeritud tuulepargid tekitavad kohaliku elanikkonna seas tohutult vastukaja tingituna tehnoloogia uudsusest regioonis. Elukeskkonna säästmiseks kohustab Eesti Vabariigi seadusandlus tuuleparkide arendajaid läbi viima keskkonnamõjude hindamise eesmärgiga kaardistada ning vältida kõikvõimalikke otseseid või kaudseid negatiivseid mõjusid ja ohte ümbritsevale keskkonnale.

Antud töö eesmärk oli kirjandusallikate põhjal uurida mere- ja maismaatuuleparkide keskkonnamõjusid ning võimalikke lahendusi ohtude ärahoidmiseks. Peamine tuuleparkidega kaasnev häiring on elektrituulikute normaalse töö käigus tekkiv müra, mis vahetus läheduses mõjutab loomade tavapärasel elutegevust ning kahjustab inimeste tervist. Tihtipeale tekitab tuuleparkide läheduses elavatel inimestel vastuolu visuaalne väljanägemine, kuna tuuleturbiinid ei sobitu ümbritsevasse keskkonda. Lisaks põhjustavad visuaalset häiringut massiivsete konstruktsioonide poolt tekitatud liikuvad varjud ning ebasobilikust pinna töötamise meetodist tingitud perioodilised peegeldused tiivikulabade pinnalt. Tuuleturbiinide ja vajalike kommunikatsioonide püstitamisel hävinevad haruldased taimed ning loomade elupaigad. Kõik eelmainitud riskid on keskkonnale äärmiselt koormavad, kuid lihtsasti välditavad põhjaliku asukohavaliku abil. Tuuleparkide asukohavalikul tuleb vältida inimestele olulisi ja looduskauneid alasid ning maastike, kus inimtegevus võib kahjustada haruldasi looma- ja taimeliike. Lindude kokkupõrkesuremuse vähendamiseks tuleb muuta nähtavamaks tiivikulabad ning markeerida elektriliinid ja -mastid pesitsuspaikade läheduses. Meretuuleparkide puhul on otsene mõju keskkonnale minimaalne, kuid arvestada tuleb kindlasti ka kaudsete ohtudega nagu kohalike elanike sotsiaalmajandusliku seisukorra halvenemine. Hiiglaslikud tuulepargid ei tohi takistada väljakujunenud reisijate- ja kaubaveo veeteede kasutamist ning mereturismi arengut regioonis.

Tuuleenergia tootmisega ei eritata keskkonda kasvuhoonegaase, kuna tuuleturbiini töö põhineb tuule kineetilise energia muundamisel mehaaniliseks energiaks ehk elektri tootmiseks ei põletata fossiilseid kütuseid. Samuti ei teki tuuleparkide töö käigus tootmisjäätmeid nagu tuhk, mille ringlussevõtt on keeruline ning ladestamiseks kulub suuri maa-alasid. Tuuleparkide keskmiseks elueaks hinnatakse 25 aastat, mida saab tihtipeale oluliselt pikendada süstemaatiliste hooldustööde abil. Kasutuselt kõrvaldamise järel saab suurema osa tuuleturbiinides leiduvatest komponentidest taaskasutada või suunata ümbertöötlemisele, mis aitab vähendada materjali- ja energiakulu võrreldes esmatootmisega. Tuuleparkide utiliseerimine on oluline protsess, mille planeerimist tuleb alustada juba enne tuuleturbiinide püstitamist, et leida optimaalne viis kasutatavate materjalide ringlussevõtuks ning kindlustada ümbritseva keskkonna ohutus.

Tuul on soodsaim ja puhtaim taastuv energiaallikas, mille abil toodeti 2021. aastal 733 GWh süsinikuheitevaba elektrienergiat. Planeeritud maismaa- ja meretuulepargid tagavad energiavarustuse ning aitavad saavutada Eesti energiasõltumatus. Paraku sõltub taastuvenergia varustuskindlus ilmastikuoludest ning Narva Elektriyaamade põlevkiviplokkide täielik sulgemine ei ole võimalik, kuna tänases elektrisüsteemis puuduvad vajalikud tehnoloogiad taastuvenergia järskude genereerimise muutuste kompenseerimiseks. Tuuleenergeetikal on võtmeroll seatud kliimaeesmärkide täitmisel, kuid oluline on säilitada vastutustundlik lähenemine, sest vaid nii saavutatakse jätkusuutlik areng.

SUMMARY

In order to meet the EU's climate targets, the country's energy portfolio needs to be significantly diversified by increasing the share of generation units using renewable energy in the electricity system. Greenhouse gas emissions from the combustion of fossil fuels can be reduced by solar power plants, which will inevitably increase significantly in the coming years, but onshore and offshore wind farms are considered to have the greatest potential for growth and are seen as a key factor in achieving climate policy objectives. To date, 145 onshore wind farms with a total capacity of 319.96 MW are connected to the Estonian electricity system, generating on average 10% of the total electricity produced annually. The potential capacity of wind power is estimated at 1.5 GW onshore and 7 GW offshore, which would cover several times Estonia's total annual energy consumption. The planned wind farms are generating a strong negative response from the local population due to the novelty of the technology in the region. In order to preserve the living environment, the legislation of the Republic of Estonia obliges the developers of wind farms to carry out an environmental impact assessment (EIA) with the aim of mapping and avoiding any direct or indirect negative impacts and threats to the surrounding environment.

The aim of this thesis was to study the environmental impacts of offshore and onshore wind farms and possible solutions to prevent risks, based on literature sources. The main disturbance associated with wind farms is the noise generated during the normal operation of wind turbines, which affects the normal life of animals in the immediate vicinity and can be harmful to human health. People living near wind farms are often put off by the visual appearance of the wind turbines as they do not blend in with their surroundings. In addition, visual disturbance is caused by moving shadows created by the massive structures and by periodic reflections from the surface of the blades due to an unsuitable surface treatment method. The erection of wind turbines and the necessary connections destroy rare plants and animal habitats. All the above risks are extremely damaging to the environment, but are easily avoidable through careful site choice. When choosing sites for wind farms, it is important to avoid areas of human importance and natural beauty, and landscapes where human activities could harm rare animal and plant species. For offshore wind farms, the direct impact on the environment is minimal, but indirect risks such as the socio-economic deterioration of local populations must be taken into account. Giant wind farms must not hinder the use of established passenger and freight waterways and the development of maritime tourism in the region.

Wind energy production does not emit greenhouse gases, as the wind turbine's functioning is based on the conversion of the wind's kinetic energy into mechanical energy, i.e., no fossil fuels are burned to produce electricity. Wind farms also do not generate production waste, such as ash, which is difficult to recycle and requires large areas of land for depositing. The average lifetime of wind farms is estimated at 25 years, which can often be significantly extended through systematic maintenance. After decommissioning, most of the components in wind turbines can be reused or recycled, which helps to reduce material and energy consumption compared to primary production. The recycling of wind farms is an important process that needs to be planned before the wind turbines are erected in order to find the optimal way to recycle the materials used and to ensure the safety of the surrounding environment.

Wind is the cheapest and cleanest renewable energy source, producing 733 GWh of carbon-free electricity in 2021. The planned onshore and offshore wind farms will ensure energy supply and will help Estonia achieve energy independence. However, the security of supply of renewable energy is dependent on weather conditions, and the complete closure of the shale blocks of Narva power plants is not feasible, as the current electricity system lacks the necessary technologies to compensate for sudden changes in renewable energy generation. Wind power has a key role to play in meeting the climate targets set, but it is important to maintain a responsible approach as this is the only way to achieve sustainable development.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] J. Õunpuu, "Tuuleenergia ajalugu ning inimeste suhtumine enne ja pärast tuulepargi püstitamist," Tallinna Ülikool, Tallinn, 2005.
- [2] "Tuuleenergia Eestis – Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon." <https://tuuleenergia.ee/tuuleenergia-eestis/> (20.04.2023).
- [3] "Purtse uues tuulepargis said püsti kõik tuulikud - Enefit Green." <https://enefitgreen.ee/uudised/Purtse-uues-tuulepargis-said-pusti-koik-tuulikud> (20.04.2023).
- [4] Elering, *Elektrituru käsiraamat*. Tallinn, 2022.
- [5] "Tuuleenergia | Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium." <https://mkm.ee/energeetika-ja-maavarad/taastuvenergia/tuuleenergia> (20.04.2023).
- [6] Elering, "Eesti tarbijate elektrivarustuskindluse aruanne aastani 2030," Tallinn, 2021.
- [7] Eesti Taastuvenergia Koda, *Taastuvenergia aastaraamat 2021*. Tallinn, 2022.
- [8] Rohetiiger, "Energia teekaardi värskendus- teekaart 2023," 2023.
- [9] Hendrikson&Ko, "Eesti mereala planeering," 2021.
- [10] T. Tatar, "Riigi roll energiaportfelli kujundamisel," Tallinn, 2023.
- [11] K. Freeman *et al.*, "How offshore wind will help Europe go carbon-neutral," 2019.
- [12] "Arendusprojektid – Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon." <https://tuuleenergia.ee/arendusprojektid/> (20.04.2023).
- [13] S. Patel, "Changing Winds: The Evolving Wind Turbine," 2021.
- [14] "Tuuleenergia – Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon." <https://tuuleenergia.ee/tuuleenergia/> (20.04.2023).
- [15] S. Balischewski, I. Hauer, M. Wolter, C. Wenge, P. Lombardi, and P. Komarnicki, "Battery storage services that minimize wind farm operating costs: A case study," *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, ISGT-Europe 2017 - Proceedings*, vol. 2018-January, pp. 1–6, Jul. 2017, doi: 10.1109/ISGTEUROPE.2017.8260130.
- [16] M. O. Ashglaf, "Development of Hybridization concept for horizontal axis wind / tidal systems using functional similarities and advanced real-time emulation methods," Normandie Université, 2019.
- [17] R. Kiviselg, "Tuuleenergeetika, selle arengut mõjutavad tegurid ja perspektiiv Eestis," Tartu Ülikool, 2003.
- [18] A. Kull, *Eesti tuuleatlas*. Tartu, 1996.
- [19] Riigi Teataja, "Planeerimisseadus." Accessed: Apr. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/119032019104?leiaKehtiv#para74>

- [20] B. Gove, R. Langston, A. McCluskie, J. Pullan, and I. Scrase, "Wind farms and birds: an updated analysis of the effects of wind farms on birds, and best practice guidance on integrated planning and impact assessment," Strasbourg, 2013.
- [21] A. Kuus, V. Volke, and L. Luigujõe, "Kas ja kuidas avameretuulikud kõrgusega kuni umbes 300 m võivad mõjutada lindude rännet?," Tartu, 2021.
- [22] Eesti Ornitoloogiaühing, "Üle-eestiline maismaalinnustiku analüüs (Riigihanke nr 239156)," Tartu, 2022.
- [23] R. May, T. Nygård, U. Falkdalen, J. Åström, Ø. Hamre, and B. G. Stokke, "Paint it black: Efficacy of increased wind turbine rotor blade visibility to reduce avian fatalities," *Ecol Evol*, vol. 10, no. 16, pp. 8927–8935, Aug. 2020, doi: 10.1002/ECE3.6592.
- [24] S. P. Gaultier, T. M. Lilley, E. J. Vesterinen, and J. E. Brommer, "The presence of wind turbines repels bats in boreal forests," *Landsc Urban Plan*, vol. 231, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.LANDURBPLAN.2022.104636.
- [25] J. S. Ellerbrok, A. Delius, F. Peter, N. Farwig, and C. C. Voigt, "Activity of forest specialist bats decreases towards wind turbines at forest sites," *Journal of Applied Ecology*, vol. 59, no. 10, pp. 2497–2506, Oct. 2022, doi: 10.1111/1365-2664.14249.
- [26] M. Vetemaa, "Hiiumaa madalike piirkonna kalastiku uuring," Tartu, 2017.
- [27] "Offshore wind power | Ørsted." <https://orsted.kr/en/renewable-energy-solutions/offshore-wind-power> (26.04.2023).
- [28] D. Y. C. Leung and Y. Yang, "Wind energy development and its environmental impact: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 1031–1039, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.RSER.2011.09.024.
- [29] J. P. Jensen, "Evaluating the environmental impacts of recycling wind turbines," *Wind Energy*, vol. 22, no. 2, pp. 316–326, Feb. 2019, doi: 10.1002/WE.2287.
- [30] C. Ferro, "Wind turbine propellers boost balsa wood sales," *GLOBAL AFFAIRS*, 2021.
- [31] Kantar, "Tuuleparkide meelsusuuring," 2021.
- [32] D. Al Katsaprakakis, "A review of the environmental and human impacts from wind parks. A case study for the Prefecture of Lasithi, Crete," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 2850–2863, Jun. 2012, doi: 10.1016/J.RSER.2012.02.041.
- [33] Keskkonnaministerium, "Müraga arvestamine tuulikute planeerimisel."
- [34] L. Käär, "Tuuleparkide mõju hiiumaa ranniku näitel," Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2014.

- [35] G. P. Van Den Berg, "Effects of the wind profile at night on wind turbine sound," *J Sound Vib*, vol. 277, no. 4–5, pp. 955–970, Nov. 2004, doi: 10.1016/J.JSV.2003.09.050.
- [36] P. Maijala *et al.*, "Infrasound Does Not Explain Symptoms Related to Wind Turbines," Helsinki, 2020.
- [37] A. Karlõševa, V. Lahtvee, and T. Nõmmann, "Eesti mereala keskkonnaseisundi majanduslik analüüs," Tallinn, 2012.
- [38] K. Süsmalainen, "Kavandatavate avamere tuuleparkide ja laevaliikluse koostoime Eestis," Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2021.
- [39] A. Siirde, M. Eldermann, P. Rohumaa, and J. Gusca, "Analysis of Greenhouse Gas Emissions From Estonian Oil Shale Based Energy Production Processes," *Oil Shale*, vol. 30, no. 2S, pp. 268–282, 2013, doi: 10.3176/oil.2013.2S.07.
- [40] "KE033: Elektri jaamade toodang ja energia tootmiseks tarbitud kütus. Statistika andmebaas." https://andmed.stat.ee/et/stat/majandus__energeetika__energia-tarbimine-ja-tootmine__aastastatistika/KE033 (27.04.2023).
- [41] "EEA greenhouse gases — data viewer — European Environment Agency." <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer> (27.04.2023).
- [42] A. Siirde *et al.*, "Kliimamuutuste leevendamine läbi ccs ja ccu tehnoloogiate (ClimMit)," Tallinn, 2021.