



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Energiatehnoloogia instituut

MAISMAATUULIKUTE SOTSIAAL-, KESKKONNA- JA KLIIMAMÕJU

SOCIAL, ENVIRONMENTAL, AND CLIMATE IMPACT OF ONSHORE WIND TURBINES

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Helena Klaar

Üliõpilaskood: 232291MASM

Juhendaja: Janika Laht, doktorant-nooremteadur

Tallinn 2025

(Tiitellehe pöördel)

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.

"21".05.2025

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"21" .05.2025

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....2025

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Helena Klaar

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Maismaa tuulikute sotsiaal-, keskkonna- ja kliimamõju“, mille juhendaja on Janika Laht
 - 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.
-

_____ (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Taltech Energiatehnoloogia instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Helena Klaar, 232291MASM

Õppekava, peeriala: MASM, Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika

Juhendaja(d): Janika Laht, doktorant-nooremteadur, 55620654

Lõputöö teema:

„Maismaatuulikute sotsiaal-, keskkonna- ja kliimamõju“

“Social, environmental and climate impact of onshore wind turbines”

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Anda teaduskirjandusele tuginev terviklik ülevaade maismaatuuleenergiast, selle arengusuundadest ning keskkonna-, kliima- ja sotsiaalsetest mõjudest läbi kogu elutsükli hindamise (LCA) kontseptsiooni käsitlemise.
2. Viia läbi keskkonna-, kliima- ja sotsiaalsete mõjude hindamine (LCA, S-LCA) ning analüüsida ka strateegilise keskkonnamõju hindamise (KSH) tulemusi Saarde tuulepargi näitel.
3. Võrrelda kolme hindamisviisi (LCA, S-LCA, KSH) tulemusi, tuues esile nende vastastikused täiendused ja sisulised erinevused ning teha järeldused maismaatuulikute mõju mitmetasandilise hindamise vajaduse kohta.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teoreetiline osa koostamine – asjakohaste teadusallikate ja muude usaldusväärsete allikate otsimine, analüüsimine, kirjutamine	01.04.25
2.	Praktilise osa läbiviimine ja dokumenteerimine – keskkonna-, kliima- ja sotsiaalsete mõjude analüüside (LCA, S-LCA, KSH) teostamine ja esitamine	10.05.25
3.	Struktureerimine, viimased täiendused ja keeleline viimistlemine – töö lõplik sõnastamine ja vormistamine vastavalt nõuetele	21.05.25

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** “21”05.2025 a

Üliõpilane: Helena Klaar “21”.05.2025 a

Juhendaja: Janika Laht “21”.05.2025 a

Programmijuht: Alar Konist “21”.05.2025 a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	6
SISSEJUHATUS	7
1. MAISMAATUULIKUD: ÜLEVAADE JA ARENG	8
1.1 Maismaa tuuleturbiinid ja nende tööpõhimõtted	8
1.2 Tuuleenergia eelised	10
1.3 Maismaatuulikute tehnoloogia ja ehitus	11
1.4 Maismaa tuuleparkide rajamine ja elutsükkel	15
1.5 Tuleviku arengusuunad ja väljakutsed	18
1.6 Eesti maismaatuulikud – hetkeseis ja arengud	21
2. TUULETURBIINIDE ELUTSÜKLI HINDAMINE.....	25
2.1 Elutsükli hindamise (LCA) meetodika	25
2.1.1 Esimene etapp – tooraine hankimine ja materjalide tootmine	27
2.1.2 Teine etapp - transport	30
2.1.3 Kolmas etapp - ehitus ja paigaldus	31
2.1.4 Neljas etapp - käitamine ja hooldus	33
2.1.5 Elutsükli lõpp: demonteerimine ja ringlussevõtt.....	37
2.2 Sotsiaalne ja sotsiaal-majanduslik elutsükli hindamine (S-LCA)	41
2.2.1 S-LCA ja selle mõjud	41
2.2.2 Majanduslik mõju.....	45
3. PRAKTILINE OSA.....	48
3.1 Materjal ja meetodika	48
3.1.1 Maismaa tuulepargi kirjeldus: Saarde tuulepark	48
3.1.2 Kasutatud meetodid	51
3.2 Tulemused ja analüüs	56
3.2.1 Simapro hindamistulemused	56
3.2.2 S-LCA tulemused ja küsitluste analüüs	64
3.2.3 Kombineeritud hindamine – LCA, S-LCA ja KSH tulemuste võrdlus ning vastastikune täiendamine	70
KOKKUVÕTE	78
SUMMARY	80
KASUTATUD KIRJANDUS.....	82
LISA 1. Sotsiaalse elutsükli hindamise (S-LCA) küsitluse küsimused	94

EESSÕNA

Magistritöö teema pakuti välja lõputöö juhendaja Janika Lahe poolt ning lõplik sõnastus formuleeriti koostöös autori ja juhendaja kokkuleppel. Töö koostamisel on tuginetud teadusartiklitele, metoodilistele juhendmaterjalidele ja projektipõhiste allikatele, mis on välja toodud kasutatud kirjanduse loetelus.

Lõputöö käigus on analüüsitud:

- Teaduskirjanduse põhjal maismaatuuleenergia ja tuuleturbiinide tehnoloogilisi omadusi, arengusuundasid ja tulevikutrende;
- Maismaatuulikute elutsükli etappide (tooraine hankimine ja materjalide tootmine, transport, ehitus ja paigaldus, käitamine ja hooldus ning demonteerimine ja ringlussevõtt) kirjeldust ja eripärasid;
- Keskkonna-, kliima- ja sotsiaalset mõju elutsükli eri etappides;
- Maismaatuulikute elutsükli tarkvara SimaPro ning IMPACT 2002+ metoodika abil, kasutades näitena Saarde tuulepargi;
- Saarde tuulepargi keskkonnamõjude strateegilise hindamise (KSH) tulemusi;
- Saarde tuulepargi sotsiaalset müju kohalikule kogukonnale, kasutades küsitlust kui kvantitatiivset uurimismeetodit ning toetudes S-LCA käsitletud põhimõtetele;
- Kolme erineva hindamise meetodi (KSH, LCA, S-LCA) tulemuste võrdlust ning nende erisusi ja vastastikuseid täiendusi.

Autor tänab juhendaja Janika Lahte meeldiva koostöö eest.

SISSEJUHATUS

Traditsiooniliste energiaallikate hinnatõus, impordisõltuvus ja varustuskindluse tagamise vajadus on suunanud investeeringud tuuleenergia tootmisvõimsuste kasvu. Samal ajal on kasvav energiavajadus ning mure õhusaaste ja kliimamuutuste pärast ajendanud riike seadma ambitsioonikaid eesmärke taastuvenergia kasutuselevõtu suurendamiseks ning saasteainete heitkoguste vähendamiseks. Tuuleenergia, olles küps ja suhteliselt madala tasakaalustatud maksumusega tehnoloogia, on kujunenud taastuvenergia arendamise üheks olulisemaks suunaks.

Tuuleenergeetikaga kaasnevad aga ka keskkonna- ja sotsiaalsed väljakutseid – alates maastikulisest ja visuaalsest mõjust kuni materjalikasutuse, ökoloogiliste häiringute/mõjude ning elutsükli lõpus tekkivate jäätmeteni. Erilist tähelepanu nõuavad küsimused, mis puudutavad kohalike kogukondade hoiakuid, elukeskkonna muutusi ja tuuleturbiinide mõju kogu nende eluea jooksul.

Käesoleva magistritöö fookuses on maismaatuulikute keskkonna-, kliima- ja sotsiaalsete mõjude hindamisele kogu elutsükli ulatuses, ühendades teoreetilise taustakäsitluse ja praktilise juhtumianalüüsi. Teoreetilises osas antakse ülevaade maismaatuuleenergia arengust, tuuleturbiinide tehnoloogilistest omadustest, elutsükli etappidest ning nendega seotud mõjudest, mille hindamiseks on rakendatud erinevaid meetodikaid. Praktilises osas analüüsitakse Saarde tuulepargi keskkonnamõjusid elutsükli hindamise (LCA) abil, kasutades selleks tarkvara SimaPro ja IMPACT 2002+ meetodikat ja hinnatakse sotsiaalset mõju kohaliku kogukonna küsitluse kaudu (S-LCA). Lisaks võrreldakse saadud tulemusi Saarde tuulepargi strateegilise keskkonnamõju hindamise (KSH) tulemustega, tuues esile kolme hindamismeetodi sarnasused, erinevused ja vastastikused täiendused.

Töö eesmärk on pakkuda tasakaalustatud, teaduspõhine ja mitmemõõtmeline ülevaade tuuleenergia arendamisega kaasnevatest mõjudest Saarde tuulepargi näitel, toetades keskkonnateadlikku planeerimist ja ühiskondlikku dialoogi taastuvenergia arendamise kontekstis.

1. MAISMAATUULIKUD: ÜLEVAADE JA ARENG

Peatükis käsitletakse maismaatuulikute tööpõhimõtteid, ehitust, kasutatavaid materjale ning nende tehnoloogilist ja majanduslikku arengut. Peatükis kirjeldatakse tuulikute tüüpe, komponente ja nende funktsiooni, samuti materjalide rolli töökindluse ja tootlikkuse tõstmisel. Samuti antakse ülevaade tulevikusuundumustest, mille hulka kuuluvad näiteks digitaliseerimine, biomimeetika ja energiasalvestusvõimekus. Peatüki lõpus tuuakse välja Eesti maismaatuuleenergia hetkeseis ja arenguperspektiivid.

1.1 Maismaa tuuleturbiinid ja nende tööpõhimõtted

Maismaatuulik ehk tuulegeneraator on tehnoloogiline seade, mis muundab tuule kineetilise energia (loodusliku ja taastuva energiaallika) elektrienergiaks. See on üks olulisemaid taastuvenergiaallikaid, mille kasutamine maismaal on viimastel kümnenditel kiiresti kasvanud. Tuulikuid paigaldatakse piirkondadesse, kus tuulekiirus on stabiilne ja sobiv elektritootlikkuseks [1], [2].

Maismaatuulikud erinevad suuruse, võimsuse (mõnest kW-st mitme MW-ni) ja konstruktsiooniliste omaduste poolest. Väikese võimsusega tuulikud sobivad üksikute hoonete või talumajapidamiste energiavajaduse katmiseks, samas kui suure võimsusega tööstuslikud tuulikud paigaldatakse tuuleparkidesse ning ühendatakse elektrivõrku. Tuulepargid on kompleksid, mis koosnevad mitmest turbiinist koos elektriühenduse ja juhtimissüsteemidega. Parkide suurus võib ulatuda mõnest turbiinist sadade seadmeteni, mis katavad ulatuslikke territooriume, sõltuvalt piirkonna tuulepotentsiaalst ja tarbimisvajadusest. Viimastel aastatel on paigalduspõhimõtted muutunud - turbiinide kõrguse ja nimivõimsuse kasv nõuab suuremaid vahekaugusi ja optimeeritud paigutust [1], [2], [3], [4].

Tuuleturbiinitehnoloogia on alates 1980. aastatest teinud kiire arenguhüppe, liikudes väikese võimsusega seadmetest mitme megavatisse väljundiga kaasaegsete lahendusteni. Lisaks võimsuse kasvule on toimunud ka oluline areng konstruktsioonis – varasematest standardsetest lahendustest on jõutud optimeeritud disainideni, mis arvestavad nii töökoormusi kui ka turu nõudmisi. Kaasaegsed turbiinid võivad ulatuda enam kui 150 meetri kõrgusele, võimaldades efektiivsemat elektritootmist ka piirkondades, kus tuule kiirus on mõõdukas [5], [6].

Maismaatuulikute töö põhineb aerodünaamilisel printsibil - tuule liikumine rootorilabade ümber tekitab nende eri külgedel rõhuerinevuse. Selle tulemusel tekib laba ühel küljel madalam ja teisel kõrgem õhurõhk ehk tõstejõud, mis ületab takistusjõu ja paneb

rootori pöörlema. Rotor, mille labad on kinnitatud horisontaalteljele, suunab tuule kineetilise energia pöörleva liikumisena generaatorile. Tüüpilises konstruktsioonis liigub pöördemoment esmalt madalakiirusvõllile (7–12 p/min ehk pööret minutis), seejärel suunatakse see käigukasti, mis suurendab pöörlemiskiirust üle 100 korra ja edastab selle kõrgekiirusvõllile, mis omakorda käitab generaatorit sagedusel üle 1500 p/min. Sõltuvalt konstruktsioonist toimub see kas käigukasti abil (mis suurendab pöörlemiskiirust ja võimaldab kasutada kompaktsemat generaatorit) või otseajamiga süsteemi kaudu, kus rotor on ühendatud generaatoriga otse [5], [6], [7], [8].

Kaasaegsed tuulikud on varustatud automaatsete juhtimissüsteemidega, mis jälgivad tuule suunda ja kiirust ning kohandavad turbiini asendit, et saavutada maksimaalne energiatootlikkus. Elektritootmine algab tavaliselt siis, kui tuule kiirus ulatub 3–5 m/s ning maksimaalne võimsus saavutatakse sõltuvalt seadme tüübist sõltuvalt vahemikus 12–15 m/s. Kui tuulekiirus ületab ligikaudu 25 m/s, seiskub tuuleturbiin automaatselt, et vältida mehhaaniliste komponentide võimalikke kahjustusi [5], [7], [8].

Maismaatuuleturbiinide tootlikkust mõjutavad mitmeid tegurid:

- Rotorilabade pindala ja seadme kõrgus – mida suuremad on labad ja kõrgem asetus, seda rohkem tuuleenergiat kogutakse [9];
- Tuule kiirus ja õhutihedus – toodetud võimsus kasvab tuulekiiruse kuubis, mistõttu väike muutus kiiruses annab suure muutuse toodangus. Tihedam õhk sisaldab rohkem kineetilist energiat [5];
- Töötamiskiiruste vahemik – süsteem toodab elektrit ainult teatud tuulekiiruste vahemikus ning selle väljundit iseloomustab tuuleturbiini võimsusköver. Liiga tugeva tuule korral tuleb turbiinid ohutuse taastamiseks peatada, et vältida seadmete kahjustumist [5].

Toodetud elekter edastatakse esmalt madalpinge kaudu tuulepargivõrku, kus trafod tõstavad pinget 20–66 kV tasemele. Seejärel suunatakse energia alajaama, kus see tõstetakse kõrgepingetasemele (üle 132 kV), võimaldades selle edastamist jaotus- ja ülekandevõrkudesse [8].

Maismaatuulikute areng on suurendanud nii turbiinide mõõtmeid kui ka energiatootlikkust. Sellega on kaasnenud uusi tehnilisi väljakutseid, nagu tuulevarjuefekti ehk äratusefekti juhtimine, kus ühe turbiini poolt tekitatud turbulentsed õhuvoolud mõjutavad järgmisi turbiine. See on toonud kaasa vajaduse suurendada turbiinide vahekaugust ja muuta paigutusstrateegiaid [3].

Lisaks tuuleoludele mõjutavad tuulepargi asukoha valikut ka maastikulised tingimused, näiteks - avatud alad ja kõrgendikud soodustavad paremat tuulekasutust. Toodetud elektrienergia võrku suunamise võimalused sõltuvad otseselt elektrivõrguga ühendamise tehnilistest tingimustest. Lisaks tuleb arvestada keskkonna- ja sotsiaalsete mõjudega, näiteks mõju ökosüsteemile ning kohalike elanike hoiakud. Tuuleenergia potentsiaali hinnatakse viie kategooria alusel [6], [10]:

- Kliimaatiline potentsiaal – tuule olemasolu looduslikes tingimustes;
- Kohalik potentsiaal – sobivus geograafiliselt ja keskkonnatingimustelt;
- Majanduslik potentsiaal – osa tehnilisest potentsiaalist, mis on tasuv;
- Operatiivne potentsiaal – tegelik rakendatav tootmisvõimekuse määr;
- Tehniline potentsiaal – võimalik kasutus olemasoleva tehnoloogiaga.

1.2 Tuuleenergia eelised

Maismaatuuleenergia kasutamine pakub mitmeid eeliseid fossiilkütustel põhineva elektritootmise ees. põhineva elektritootmisega. Eelised jagunevad kolme kategooriasse: majanduslikud, keskkonnavalased ja sotsiaalsed [8].

Majanduslikud eelised:

- Töökohtade loomine - pakub tööd kümnetele tuhandetele inimestele. 2021. aastal töötas USA-s tuuleenergia valdkonnas ligikaudu 120 000 inimest, aastaks 2030 võib see arv kasvada 569 000-ni [8], [11];
- Kuluefektiivsus - tuuleenergia maksumus on viimase 10 aasta jooksul langenud ligi 50% [12];
- Väikesed rajamis- ja hoolduskulud - muudavad tuuleenergia kättesaadavaks [12];
- Lühike ehitusperiood – tuulepargi rajamine võtab tavaliselt 2–3 aastat, mis võimaldab kiiremat rakendamist võrreldes näiteks tuumaelektrijaamadega, mille ehitus kestab keskmiselt 5-7 aastat [10];
- Investeeringute tasuvus - pikaajaline stabiilsus tuleneb kütusehindadest sõltumatuses [10].

Keskkonnavalased eelised:

- Kasvuhoonegaaside vähendamine - CO₂ ja saasteainete puudumine [10], [12];
- Minimaalne veekasutus ja praktiliselt jäätmevaba – käitamise ajal/elektrienergia tootmise ajal [8];
- Madal keskkonnamõju – sobib looduskeskkonda, ei erita toksilisi aineid [12];
- Võimaldab kombineeritud kasutust koos päikese- ja hüdroenergiaga [12];
- Taastuv ja ammendamatu ressurss [10];

- Pärast elutsükli lõppu on võimalik maa taastada algseesse seisundisse [8];
- Saab kombineerida põllumajanduse või loomakasvatusega [8];
- Paindlik maakasutus – tuuleturbiinid sobivad põllumajandusmaadele, teede äärde, endistele tööstusaladele, prügilate kõrvale ja muudele vähemkasutatavatele aladele [10].

Sotsiaalsed eelised:

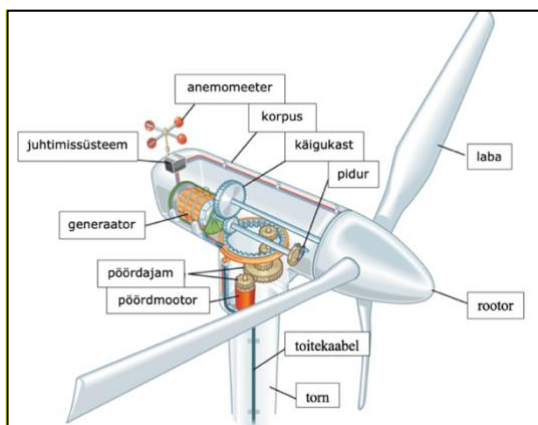
- Energiajulgeoleku kasv ja sõltuvuse vähenemine imporditud kütustest [10];
- Kogukondade kaasamine ja osalusmudelid [12];
- Panustab rahvusvaheliste kliimaeesmärkide täitmisesse [12];
- Sobib nii väikemajapidamistele kui ka tööstusüksustele [10].

Maismaatuuleenergia on üks kuluefektiivsemaid taastuvenergiaallikaid – Eestis jäävad selle tootmiskulud 40–60 euro vahele megavatt-tunni kohta, võrreldes näiteks põlevkivielektriga, mis on ligi kolm korda kõrgema hinnaga (~180 €/MWh). Tänu sellele on tuuleenergia muutunud turupõhiselt konkurentsivõimeliseks ka ilma riiklike toetusteta, võimaldades pakkuda stabiilset ja taskukohast elektri hindu. Tuuleparkide rajamist rahastatakse erinevatest allikatest, sealhulgas Euroopa Liidu fondidest, riiklikest meetmetest ja pikaajalistest elektri ostulepingutest (PPA) [13], [14].

Majanduslikud riskid hõlmavad muu hulgas elektri hinna kõikumist, regulatiivsete tingimuste muutust (nt toetuste määrad) ja piirkondlikke tuuleolude erinevusi. Samas aitavad tehnoloogia areng ning kõrgem efektiivsus neid riske vähendada [13], [15].

1.3 Maismaatuulikute tehnoloogia ja ehitus

Maismaatuuleturbiin koosneb kolmest põhikomponendist: tornist, rootorist ja gondlist (joonis 1) [5].



Joonis 1. Tuuleturbiin ja selle osad (autori täiendustega) [16]

Alljärgnevalt on esitatud olulisemad süsteemiosad koos nende kirjelduse ja funktsioonidega (Tabel 1) [5], [17].

Tabel 1. Süsteemiosad koos nende kirjelduse ning funktsioonidega

Komponent	Kirjeldus ja funktsioon	Viide
Torn	Toetab turbiini konstruktsiooni ja tõstab rootori tuulekiiruste seisukohalt optimaalsele kõrgusele. Tavaliselt valmistatud terasest või betoonist, koosnevad sektsioonidest, mis sisaldab elektrikaableid.	[5], [18]
Vundament	Maapinnas paiknev massiivne betoonkonstruktsioon, mis kannab turbiini raskust ja talub dünaamilisi koormusi.	[18]
Gondel	Sisaldab peamisi mehhaanilisi ja elektrilisi komponente (generaator, käigukast, juhtimissüsteemid). Pöörleb automaatselt vastavalt tuule suunale; kaitseb sisekomponente.	[5], [18]
Rootorilabad	Aerodünaamilised elemendid, mis muundavad tuuleenergia pöörlemisenergiaks. Tavaliselt valmistatud klaas- või süsinikkiudkomposiitidest.	[18]
Rootor	Ühendab labad peavõlliga ja edastab pöördemomendi generaatorile.	[18]
Peavõll	Edastab mehaanilise energia rootorilt generaatorile.	[6]
Käigukast	Suurendab rootori madalat pöörlemiskiirust. Kasutatakse paralleelteljelist ja planetaarülekanedega süsteeme; osadel turbiinidel kasutatakse otseajamit.	[5]
Generaator	Muundab mehaanilise energia elektrienergiaks. Levinumad on: DFIG (koos käigukastiga) ja PMSG (otseajam, ilma käigukastita).	[5], [17]
Toiteelektronika	Stabiliseerib elektriväljundi pinget ja sagedust, et see vastaks võrgunõuetele. Sisaldab sagedusmuundurit, pehmekäiviteid ja kondensaatoripankasid.	[5]
Juhtimissüsteemid	Koosnevad riist- ja tarkvara kombinatsioonist. Tagavad turbiini ohutu ja tõhusa töö, reguleerides rootori pöörlemiskiirust, labade nurka ning turbiini päärlemist tuule suunas. Võivad olla passiivsed (nt stalli-efekt) või aktiivsed (elektrilised ja mehaanilised seadmed). Kasutatakse ka IoT-süsteeme, mis võimaldavad reaalsajas jälgimist ja ennetavat hooldust.	[5], [18]
Võimsuse juhtimine	Reguleerib tootmist kolme meetodiga: stalli juhtimine (passiivne aerodünaamiline piiramine), pitch-juhtimine (labade nurga muutmine) ja aktiivne stalli juhtimine (kombineeritud meetod).	[5]
Ühendus elektrivõrguga	Elektrienergia edastatakse võrku läbi transformaatori. Kaasaegsed süsteemid võimaldavad juhtida aktiiv- kui ka reaktiivvõimsust, tagades võrgu stabiilsuse	[5]

Levinumad materjalid maismaatuuliku komponentide valmistamisel hõlmavad terast, alumiiniumisulameid, klaas- ja süsinikkiude, vaigupõhiseid sideaineid, rauda, malmi, vaske ning osaliselt ka puitu. Tornid ja konstruktsioonelemendid toodetakse peamiselt konstruktsiooniterasest ja/või raudbetoonist. Labades kasutatakse komposiite (klaas- või süsinikkiud + epoksü- ja polüestervaigud), mis tagavad väikese massi ja hea vastupidavuse väände ja tuulekoormustele. Alumiiniumisulameid rakendatakse

sageli torni ja rootori komponentides, et vähendada kaalu ja parandada korrosioonikindlust, eriti niisketes või mereäärsetes oludes [1].

Tuuleturbiini labad moodustavad suurima ja materjalimahukaima osa kogu konstruktsioonist, mistõttu on nende valmistamisel kasutatavate materjalide valik keskkonna- ja tootmisaspektist eriti oluline. Tuuleturbiinide labade valmistamisel kasutatakse peamiselt komposiitmaterjale, mille olulisemateks koostisosadeks on tugevduselementidena klaas-, süsinik- ja aramiidkiud ning sideainetena polümeersed vaigud. Kõige levinumad materjalid on klaaskiuga tugevdatud plastid (GFRP) ja süsinikkiuga tugevdatud plastid (CFRP). Süsinikkiudude eelis seisneb nende ligikaudu 20% suuremas tugevuses ja kuni 70% väiksemas massis võrreldes klaaskiududega, mistõttu kasutatakse neid eelkõige suurte labade tootmisel, kus aerodünaamiline efektiivsus ja kaal on kriitilise tähtsusega [19].

Komposiitlabad koosnevad:

- Tugevduskiududest - klaaskiud, süsinikkiud, aramiidkiud [20];
- Polümeermaatriksist - termoreaktiivsed vaigud (nt epoksü-, polüestervaigud) või termoplastsed vaigud [20].

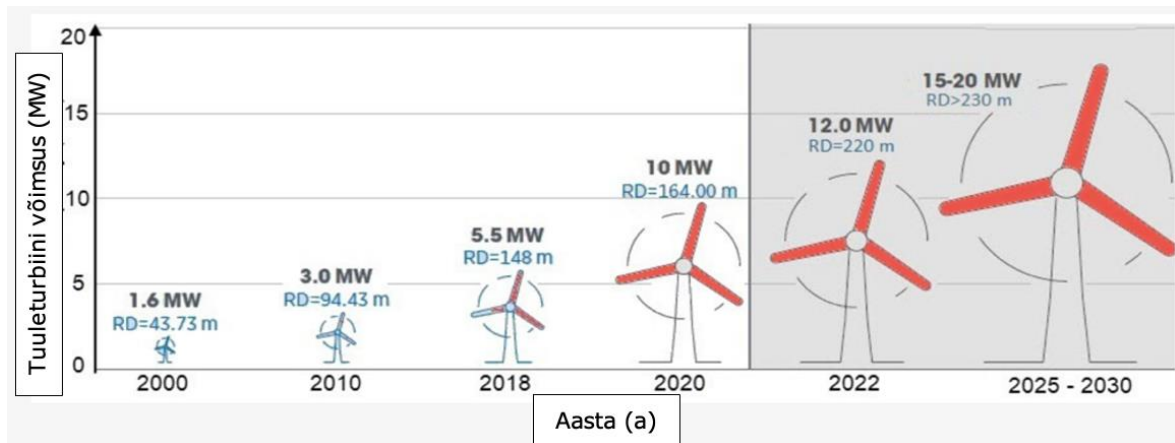
Labade sisemuses kasutatakse sageli *sandwich*-struktuure, mille puhul kahe tugevduskihi vahele asetatakse kerge südamik, näiteks vahtplast või balsapuit. See võimaldab saavutada väikese massi juures vajaliku jäikuse ja mehaanilise vastupidavuse. Termoplastsed vaigud on eelistatud tänu nende taaskasutusvõimele ja paremale vormitavusele. Aramiidkiud (näiteks Kevlar) lisavad labadele kulumis- ja kuumataluvust, kuid on kallimad ja seetõttu vähem levinud. Tugevduskiud moodustavad enamikes tänapäevastes lahendustes ligikaudu 60-70% laba massist [20].

Tuuleturbiine saab liigitada mitmete omaduste järgi, näiteks rootori orientatsiooni, labade arvu, töökiiruse või Reynolds'i arvu alusel. Praktikas liigitatakse need enim suuruse järgi (joonis 2) [2]:

1. Väikse võimsusega tuuleturbiinid - sobivad majapidamistele, talumajapidamistele ja väikeettevõtetele, kus suurtuulikute paigaldamine on piiratud. Rootori pindala on kuni 200 m², kogukõrgus kuni 30 m, rootori läbimõõt on kuni 15 m, labade pikkus 0,6–3,5 m ja torni kõrgus 10–24 m [2], [7].
2. Keskmise suurusega tuuleturbiinid - kasutatakse suuremates elamu- piirkondades, tööstuskompleksides, ärikeskustes ja põllumajanduses. Võimsus

kuni 250 kW, torni kõrgus 30–60 m, labade pikkus 7,5–15 m ja rootori läbimõõt kuni 60 m [7].

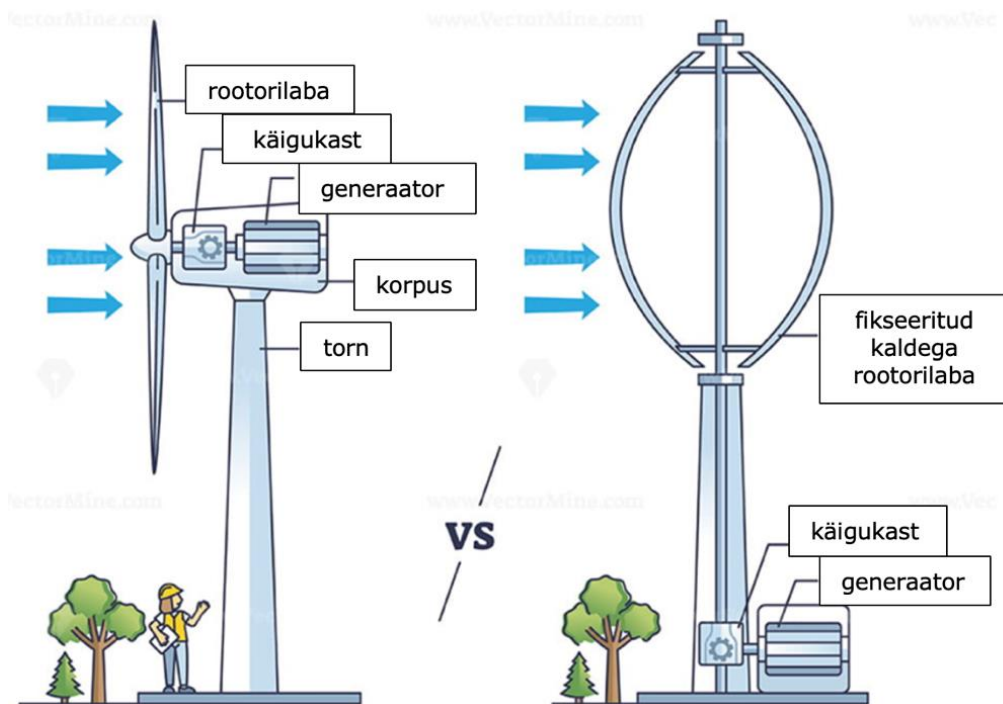
3. Suure võimsusega tuuleturbiinid - tööstuslikud seadmed võimsusega üle 250 kW (kaasaegsed mudelid ületavad sageli 5 MW). Rotori läbimõõt üle 100 m, labade pikkus üle 38 m ning torni kõrgus üle 60 m [2], [7].



Joonis 2. tuulegeneraatorite kõrguse ja võimsuse muutused ajas (autori täiendustega) [20]

Tuuleturbiine jagatakse ka pöörlemistelje suuna alusel (Joonis 3):

1. Vertikaalteljega tuuleturbiinid (VAWT) - rootori pöörlemistelg paikneb vertikaalselt, paralleelselt maapinnaga. Sobivad muutliku tuulesuunaga piirkondadesse ja linnakeskkonda. Eelistena tuulesuuna jälgimise puudumine ja kompaktne ehitus. Puudustena on madal efektiivsus ja suurem mehhaaniline koormus. Levinud alamtüübid on Savoniuse ja Darrieuse turbiinid [7].
2. Horisontaalteljega tuuleturbiinid (HAWT) - kõige levinum tüüp, mille rootor on horisontaalne ja labad orienteeritakse tuule suunas. Tavaliselt kolme labaga konfiguratsioon, kuna see tagab hea tasakaalu ja väiksema vibratsiooni. Sobib suuremahulistele tuuleparkidele [1], [6].



Joonis 3. Horisontaal- ja vertikaalteljelised tuuleturbiinid (autori täiendustega) [21]

1.4 Maismaa tuuleparkide rajamine ja elutsükkel

Maismaatuuleparkide rajamine algab sobiva asukoha valikust, mida mõjutavad mitmed tehnilised, keskkonnaalased ja sotsiaalsed tegurid. Enamasti paigutatakse tuulepargid hõredalt asustatud aladele, et minimeerida müra- ja visuaalseid mõjusid. Asukoha määramisel tuleb arvesse võtta piirkonna tuulepotentsiaali, tuulekiiruse ja suuna varieeruvust, geoloogilisi tingimusi, ligipääsetavust, olemasolevat taristut ning keskkonna- ja maakasutuspiiranguid. Elektritootmise potentsiaali hindamiseks kasutatakse meteoroloogilisi mõõteseadmeid ja arvutusmudeleid, mis võimaldavad prognoosida tuulepargi eeldatavat tootlikkust kogu selle elutsükli vältel [8].

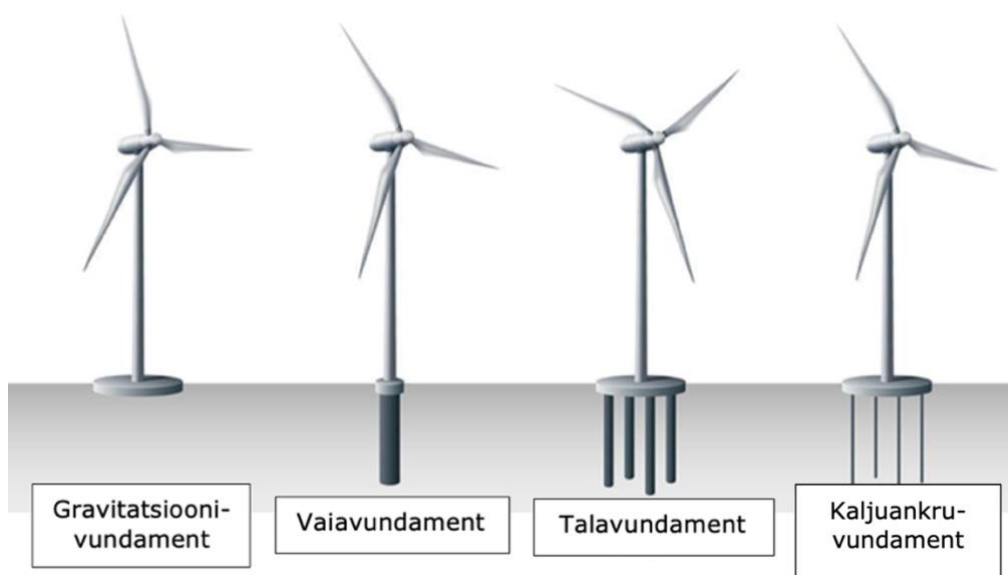
Tuulepargi rajamine on keerukas ja mitmeetapiline protsess, mis eeldab täpset planeerimist, tõhusat logistikat ning eri valdkondade spetsialistide koostööd [1]:

1. Komponentide tootmist ja transporti spetsiaalsete veokitega [1];
2. Tornisektsioonide kokkupanekut ja sisekaabelduse paigaldust [1];
3. Gondli tõstmist torni tippu kraana abil [1];
4. Rootori ja labade monteerimist [1];
5. Elektri- ja juhtimissüsteemide ühendamist [1].

Tuulikute vundamendid on tuuleturbiinide konstruktsioonilised alused, mis peavad taluma suuri staatilisi ja dünaamilisi koormusi, sealhulgas tuule tekitatud momente ning raskusjõust tingitud vertikaalkoormusi. Vundamendi tüüp sõltub pinnase omadustest,

turbiini mõõtetest ning piirkondlikest koormustingimustest. Levinumad on järgmised vundamenditüübid (joonis 4) [22]:

- Gravitatsioonivundament – tugev betoonplaat, suur materjalimaht, vajab pikemat ehitusaega, sobib tugeva pinnase korral [22].;
- Vaiavundament – sügavale paigaldatud vaiad, sobib pehme pinnasega alale, rajamine on inseneri-tehnilisem ning kulukam [22].;
- Talavundament – kombineeritud lahendus (koosneb gravitatsioonialusel vundamendist ja vaiadest, mis ühendatakse omavahel betoontalade abil), jaotab koormust tõhusalt [22].;
- Kaljuankruvundamendid – kinnitub otse kaljusse, väga stabiilsed, sobib mägiste ja raskesti ligipääsetavatele aladele [22].



Joonis 4. Maismaatuulikute vundamendi tüübid (autori täiendustega) [2]

Viimastel aastatel on kasvanud huvi tehases toodetud eeltöödeldud ja modulaarsete lahenduste/vundamentide vastu, mis võimaldavad kiiret paigaldust, väiksemat materjalikulu, suuremat tootmistäpsust ja lihtsamat hooldust. Uuenduslikuks lahenduseks on eeltöödeldud tihedate ribidega vundament (PDRF), mis pakub moodulipõhist ülesehitust, tõhusamat koormusjaotust, madalamat betoonikulu ja väiksemat keskkonnajalajälge [22].

Tuulepargi eluiga on keskmiselt 25 aastat, pärast mida rakendatakse üht järgmistest strateegiatest [23]:

1. Eluea pikendamine –hoolduse-ja remondi abil [23];
2. Rekonstrueerimine – olemasolevate seadmete asendamine uutega [23];

3. Demonteerimine – pargi lammutamine ja ala taastamine kui selle säilitamine ei ole enam majanduslikult otstarbekas [23].

Demonteerimisel saab taaskasutada kuni 95% komponentidest (teras, alumiinium, vask), kuid komposiitlabade ümbertöötlemine on tehniliselt keerukam. Uurimissuunad keskenduvad keemilisele lagundamisele, materjalide ümbertöötamisele ja ringlussevõtu võimalustele ehitusmaterjalidena [23].

Tuuleenergia jätkusuutlikkuse oluliseks väljakutseks on turbiinide elutsükli lõppfaasi tõhus haldamine. Saksamaa, California ja Texase näitel on ilmnenud vajadus reguleerida vananenud seadmete eemaldamist, kuna mitmeid tuulepargid on maha jäetud või töötavad kuni rikkeni, kuna arendajad on tegevuse lõpetanud või puuduvad vahendid lammutuseks. Mitmetes piirkondades on kehtestatud nõuded, mille kohaselt tuleb kasutusloa raames kavandada ka turbiinide demonteerimise/elutsükli lõppfaasi kava, et vältida seadmete maha jätmist. Eriliseks probleemiks on saanud labade ja elektroonika komponentide ladestamine või põletamine, sest taaskasutamine on keerukas [3].

Tuuleturbiinide töökindluse ja energiatootlikkuse suurendamisel mängib olulist rolli labade geomeetria ja materjalide optimeerimine. Kasutatakse tehisintellektil põhinevaid algoritme ja täiustatud aerodünaamilisi mudeleid, et optimeerida keerdenurga jaotust (TAD), vähendada turbulentsi, vibratsiooni ja müra taset. Arendatakse intelligentseid labasid, mis kohanduvad tuuleoludele, piirates koormusi ja suurendades materjalide vastupidavust [24].

Komposiitmaterjalide areng on viinud kergemate ja tugevamate labadeni. Laialdaselt kasutatakse süsinikkiudkomposiite, millel on parem tugevus-mass suhtarv. Hübriidkomposiidid, mis ühendavad süsinikkiu tugevuse ja klaaskiudude kuluefektiivsuse, võimaldavad kuni 25% pikkuse kasvu ilma massi olulise suurenemiseta. Arenduses on paind-pöördkoppeldusega labad, mis vähendavad konstruktsioonikoormust ning võimaldavad pikemaid labasid ilma lisakoormuseta. Süsiniknanotorude lisamine suurendab vahekihtide nihketugevust kuni 30%. Täiendavad uurimissuunad hõlmavad ka termoplastilisi ja biopõhiseid komposiite, mis pakuvad kiiremat tootmist ja paremat taaskasutusvõimet. Samuti uuritakse looduslike kiudude (bambus) kasutamist, et vähendada sõltuvust sünteetilisest materjalidest ja suurendada labade biolagunevust. Kasutusele on võetud materjalid, mis sisaldavad süsiniknanotorusid, võimaldavad kohapealset polümeerisatsiooni või isegi iseparanemist

mikropraagi korral (millega parandatakse labade eluiga kuni 25%) [24], [25], [26], [27].

Generaatorite efektiivsust suurendatakse ülijuhtivate materjalidega, mis võimaldavad väiksema massiga süsteeme ja vähendavad energiakadu. Näiteks baarium-vaskoksiid ehk REBCO lindid (kuuludes haruldaste muldmetallide hulka) juhivad voolu üle saja korra rohkem kui samasuur vaskkaabel. Karlsruhe Tehnoloogiainstituudi prototüüp vähendas 10 MW generaatori kaalu 30%, säilitades sama efektiivsuse. Kõrgtemperatuurised ülijuhtivad (HTS) generaatorid võimaldavad elektrienergia edastamist praktiliselt kadudeta, kuna neil puudub elektritakistus [25].

Tornides rakendatakse ülikõrge tugevusega betooni (UHPC), mis võimaldab ehitada kergemaid ja kõrgemaid konstruktsioone, suurendades energiakogumist kuni 12% ka madala tuulekiiruse korral. Kaasaegsed tornid kombineerivad teras- ja betoonelemente, rakendades optimeerimismeetodeid, et vähendada materjalikulu ja vältida resonantsi. Otseajamiga generaatorid vähendavad mehhanilisi kadusid ja hooldusvajadust, kuigi nende mass ja hind on seni olnud piiravad tegurid [24], [25].

Turbiinide nimivõimsuse kasv on toonud kaasa mastaabisäästu – sama koguse elektri tootmiseks on vaja vähem seadmeid ja infrastruktuuri. See vähendab paigalduse, hoolduse ja materjalide kogukulusid ning muudab maismaatuuleenergia üha konkurentsivõimelisemaks elektritootmise viisiks [8].

1.5 Tuleviku arengusuunad ja väljakutsed

Tulevikusuundumused tuuleenergeetikas keskenduvad peamiselt digitaliseerimisele, majanduslikule tasuvusele, energiasalvestusvõimekuse suurendamisele ja süsteemse töökindluse parandamisele. Digitaliseerimine mängib kesksel rollil tänapäevaste tuuleparkide töökindluse ja tootlikkuse suurendamisel ning hoolduskulude vähendamisel. Autonoomsed andmekogumissüsteemid, näiteks droonid ja tehisintellektil põhinevad lahendused, võimaldavad turbiinide kiiret ja täpset inspekteerimist – visuaalne kontroll võib kesta kõigest 30 min, mis on oluline ajasääst võrreldes tavapärase meetoditega. Süsteemide skaleeritavus tagab pideva järelevalve kogu tuulepargis ning automatiseeritud andmeanalüüs võimaldab varajast rikete avastamist ja seeläbi tööseisakute vältimist [28].

Tuuleenergeetika sektor on jõudnud küpse arenguetapini, kuid seisab silmitsi mitmete väljakutsetega. Üheks olulisemaks probleemiks on elektri tootmise ja tarbimise ajalis-ruumiline tasakaalustamine. Kuna tuuleenergia toodang on öösiti sageli kõrge, samas

kui tarbimine madal, pööratakse kasvavat tähelepanu energiasalvestustehnoloogiatele – nt akupangad, suruõhusalvestid ja elektrisõidukid, mis võimaldavad paindlikkust ja võrgu stabiilsust [3], [5], [29].

Reaalajas töötavad digitaalsed kaksikud võimaldavad varajast rikete avastamist, hoolduse optimeerimist ning turbiinide eluea pikendamist. Näiteks NorthWindi projektis on selline tehnoloogia edukalt rakendatud tuulikute efektiivsuse tõstmiseks. Lisaks võimaldavad masinõppel ja reaalajas andmetel põhinevad juhtimissüsteemid kohandada labade kaldenurki, jälgida jääolusid ning optimeerida energiakasutust, vähendades samas komponentide kulumist ja OPEX-kulusid. Äratusefekti (Ülemises tuules paiknevate turbiinide mõju allatuules olevatele turbiinidele vähendab tootlikkust) vähendamine on samuti oluline: nutikad juhtimissüsteemid suudavad hallata iga turbiini tööd nii, et kogu tuulepargi tootlikkus oleks maksimaalne. Samuti paraneb andmete kättesaadavus – tuulepargi kõik osapooled saavad reaalajas ligipääsu vajalikele andmetele, mis parandab juhtimisotsuste kvaliteeti ja kiirendab reageerimist tehnilistele probleemidele [25], [30].

Paralleelselt toimub areng biomimeetikas, mille eesmärk on tõsta turbiinilabade aerodünaamilist efektiivsust loodusest inspireeritud disainide abil. Näiteks on albatrossi lennumehaanika ja röövlindude tiivakujud andnud eeskujude labadele, mis pakuvad paremat tõstevõimet ja väiksemat turbulentsi ka madala tuulekiiruse korral. Sellised biomimeetilised labad suurendavad energiatootmist ja laiendavad töövahemikku, võimaldades tuuleenergiat toota ka keerulisemates ilmastikuoludes või vähem soodsates piirkondades [25].

Olulise väljakutsena kerkib esile tuuleenergia tootmise ja elektritarbimise tasakaalustamine. Kuna öine tootmine on sageli suurem kui nõudlus, on kasvav vajadus efektiivsete energiasalvestuslahenduste järele. Uuritakse akupankade, suruõhusalvestite ja elektrisõidukite integreerimist mobiilsete salvestusseadmetena, võimaldades neil salvestada elektrit öösel ja anda see võrku tagasi tiptundidel [3], [29].

Majanduslikult on tehnoloogia areng vähendanud oluliselt tuuleenergia tootmiskulusid, prognooside järgi 17–35% võrra aastaks 2035, muutes selle järjest konkurentsivõimelisemaks fossiilkütuste kõrval. Uued disainilahendused ja materjalid võimaldavad ehitada suuremaid ning tõhusamaid tuulikuud, mis toodavad rohkem elektrit madalamate kuludega. Siiski kaasnevad suuremõõtmeliste tuuleturbiinidega ka logistilised ja regulatiivsed piirangud. Mitmetes riikides on kehtestatud tuulikute labade

maksimaalse kõrguse piirangud, et vältida häireid lennuradaritele või visuaalset mõju maastikule. Suurte labade valmistamine, mida ei ole võimalik kokku pakkida ega painutada, nõuab erilahendustega logistikat; näiteks võib torni läbimõõt välistada transpordi läbi viaduktide ja sildade. Kuigi valdavalt kasutatakse komponentide veoks autotransporti, eelistatakse väga suurte turbiinide korral raudteetransporti, mis piirab tuuleparkide rajamist raskesti ligipääsetavatesse piirkondadesse. Lisaks suurenevad tootmis- ja paigalduskulud, kuna suuremad tornid, vundamendid, rootorid ja ajamisüsteemid peavad taluma oluliselt suuremaid mehaanilisi koormusi. Täiendavaid piiranguid seavad elektrivõrguga ühilduvuse nõuded ning regioonipõhised kõrguspiirangud [3], [9], [25], [31], [32].

Tulevikuturbiinide töökindlus peab vastama nii kohalike elektrivõrkude kui ka ilmastikutingimuste spetsiifilistele nõuetele. Samuti mõjutavad turbiinootmist tooraine, eelkõige haruldaste muldmetallide hinnakõikumised ja kättesaadavus, mistõttu arendatakse lahendusi, mis pikendavad seadmete eluiga ja suurendavad töökindlust [31].

Lisaks tehnoloogilistele aspektidele mõjutavad tuuleenergia arengut ka süsteemsed piirangud. Menetlusprotsessid on mitmetes riikides aeglased ja keerukad – kooskõlastused, uuringud ja regulatiivsete erisuste lahendamine võivad võtta aastaid. Eestis on enamik tuuleenergia projekte seotud kohtumenetlustega, mis viitab vajadusele selgema, kiirema ja prognoositavama planeerimissüsteemi järele. Täiendavaks kitsaskohaks on elektrivõrguga liitumise raskused: ajalooliselt ida-lääne suunal arenenud ülekandevõrk ei toeta piisavalt Lääne-Eesti potentsiaali, kus sobivamad tuuleolud valdavalt asuvad. Kuna arendajate võimekus rahastada võrguühendusi iseseisvalt on piiratud, eeldatakse koordineeritud investeeeringuid ja riiklikku tuge võrguarendusse [33], [34].

Tuuleenergeetika arengut mõjutavad ka globaalsed tururiskid, sealhulgas hinnatõusud, materjalide kättesaadavus ja tarneahelate ebastabiilsus. Väikese sisetarbimisega riikides, nagu Eestis, on uute tootmisvõimsuste lisamine pelgalt turujõudude toel keeruline, mis tähendab, et vajalik on täiendav poliitiline ja majanduslik tugi [34].

Materjalide kättesaadavus ja hinnakõikumised mõjutavad otseselt investeeeringute tasuvust. Regiooniti erinevad elektrivõrgud, keskkonnanõuded, geograafilised asukohad ja tehnoloogilised võimalused tingivad vajaduse kohandada tuuleturbiinide tehnoloogiat vastavalt kohalikele oludele. Edukaks arenguks on oluline ka ühiskondlik aktsepteeritus

– kohalike kogukondade kaasamine ja läbipaistev suhtlus on määrava tähtsusega, et vältida projektide viibimist või peatamist [3], [31].

Tuuleparkide arendamisel tuleb tulevikus arvesse võtta nii uute alade (*greenfield*) kasutuselevõttu kui ka olemasolevate parkide moderniseerimist (*repowering*). Uute seadmete paigaldus nõuab põhjalikku tehnilist ja majanduslikku analüüsi, arvestades seadmete valikut, tarbimise ja tootmise tasakaalu, materjalide elutsükli ning hilisemat utiliseerimist. Samuti on mastaabisäästu ja tehnoloogia areng viinud selleni, et maismaa tuuleenergia on muutunud hinnalt võrreldavaks fossiilkütustel põhineva elektriga [3], [5].

Üha olulisemaks muutub tuuleenergia elutsükli hindamine, kusjuures uued lähenemised põhinevad masinõppel, asjade internetil (IoT) ja ennustavatel digitaalsetel kaksikutel. Need tehnoloogiad võimaldavad täpset, reaajas toimuvat süsteemide jälgimist ning süsiniku jalajälje hindamist, vähendades samal ajal energiatarbimist ja keskkonnamõjusid. IoT ja masinõppe kombineerimine võimaldab paremat prognoositavust, täpsemaid juhtimisotsuseid ning suurendab süsteemide töökindlust ja kestvust. Ennustav digitaalne kaksik loob tervikliku mudeli kogu tuulepargi elutsüklist, alates projekteerimisest kuni utiliseerimiseni, võimaldades simulatsioone, hoolduse optimeerimist ja tõhusamat juhtimist [35].

1.6 Eesti maismaatuulikud – hetkeseis ja arengud

Maismaatuuleenergia areng Eestis on viimase kümnendi jooksul märgatavalt kiirenenud, kajastades tehnoloogilist arengut, investeringute kasvu ning regulatiivse keskkonna soodustamist. Esimene elektrituulik (150 kW) püstitati 1997. aastal Hiiumaale ning esimene tuulepark loodi 2002. aastal Virtsu I nimelise projektina (1,8 MW, kolm Enerconi turbiini) [36].

2024. aasta seisuga on Eestis olemasolev maismaa tuuleparkide koguvõimsus 694 MW, mis katab ligikaudu 608 000 kodumajapidamise energiavajaduse. Lähiajal on plaanitud täiendada 325 MW maismaatuulevõimsuse kasutuselevõtt, millest suuremad projektid on Sopi-Tootsi (255 MW), Purtse (21 MW), Saarde tuulepark (38 MW). Ülejäänud osa moodustavad väiksemad arendused või detailidesse mitte täpsustatud projektid. Nende projektide eeldatav valmisaeg on 2025. aastal [36], [37], [38].

Lisaks lähiajal kasutuselevõetavale 325 MW võimsusele, on arenduses mitmed täiendavad projektid, sealhulgas Aidu tuulepark (75 MW), Purtse (21 MW) ning Sopi-Tootsi, millest saab valmimisel Eesti suurim tuulepark (255 MW). Ettevõtte AS Utilitas

(sh tuuleenergiat arendav tütarettevõtte Utilitas Wind OÜ) arendab 123 MW ulatuses tootvaid parke, 900 MW ulatuses edasijõudnud arendusi ning 1 100 MW ulatuses varajasel faasis projekte. TMV Green ja Rootsi taastuenergia ettevõtte OX2 koostööprojekti raames planeeritakse 500 MW lisavõimsust. TMV Green vastutab maa kasutuse ja võrguühenduste eest, OX2 aga investeeringute, ehituse ja käitamise eest [39], [40].

Riik on otsustanud enampakkumisele panna 85 km² riigimaad, kuhu võiks rajada kuni 1100 MW ulatuses uusi tuuleparke. Eestis on menetluses 30 kohaliku omavalitsuse eriplaneeringut ning 11 detailplaneeringut koguvõimsusega üle 700 MW. Notariaalsete kokkulepetega projektide realistlikuks koguvõimsuseks hinnatakse 2 847 MW [39], [39], [41], [39], [42].

Planeeringute esimene eesmärk on määrata sobivaimad asukohad, mis vastavad keskkonna- ja tuuletingimustele. Seejärel koostatakse detailsemad lahendused. Planeeringute protsess hõlmab ka keskkonnamõjude hindamist ja sotsiaalse elutsükli analüüsi (S-LCA), et hinnata tuuleparkide mõju kohalikele kogukondadele ja määrata võimalikud leevendusmeetmed [39], [42].

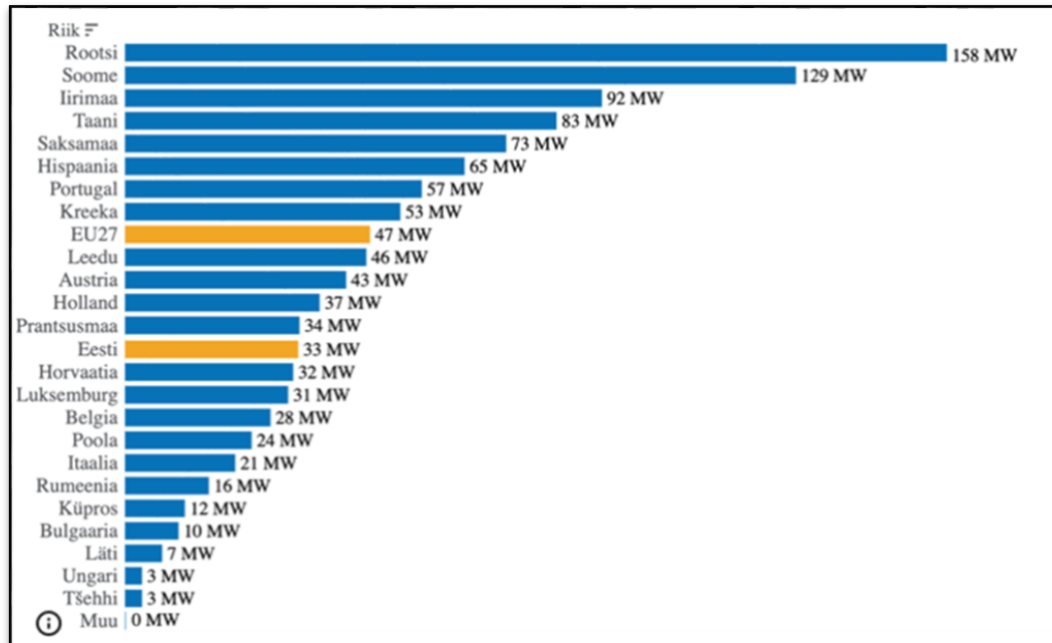
2023. aastat võib pidada murranguliseks taastuenergia arengus Eestis. Valmisid mitmed uued tuulepargid, riigi ja erasektori koostöö muutus sisulisemaks ning ühiskondlik hoiak taastuenergia suhtes paranes. Kinnistu arusaam, et Eesti jätkusuutlik areng on taastuenergia arengu lahutamatu osa. Samas esines arendusprotsessi jooksul ka sisemisi kõhklusid ja arutelusid. 2023. aasta oktoobris maksti esimesed tuulikutasud neljale omavalitsusele: Lüganuse, Saarde, Viru-Nigula ja Põhja-Pärnumaa vallale. Kuna paljud tuulikud olid veel ehitusjärgus ega veel tootnud elektrit, jäi laekunud summa alla 10 000 euro kvartalis ühe omavalituse kohta. Aasta lõpuks kinnitas ka valitsus oma pühendumust taastuenergia suunas, pakkudes sektorile ja ühiskonnale stabiilseid arenguraame [43], [44].

Alates 1. juulist 2023 kehtib Eestis tuulikutasu, mille eesmärk on suurendada kohalike elanike toetust tuuleparkidele. Tasu makstakse üle 30 meetri kõrguste tuulikute eest, millele on pärast nimetatud kuupäeva väljastatud kasutusluba. Tasu ulatub kuni kuue alampalga suuruseni aastas ning seda makstakse [36]:

- kuni 2 km kaugusel elavatele elanikele, kui tuulik on kuni 250 m [36];
- kuni 3 km kaugusel, kui tuulik ületab 250 m kõrgust [36].

Tuuleenergia on Eestis kulutõhus viis taastuvelektri tootmiseks. Maismaatuuleparkide kasutegur jääb vahemikku 25–40%, mis viitab heale tootlikkusele aastaringset [36].

Kuigi areng on kiirenenud, jääb Eesti endiselt alla EL keskmisele tuulevõimsuse näitajale 100 000 elaniku kohta – Eestis oli see 2023. aastal vaid 33 MW, samal ajal kui Soomes oli see 129 MW ja Rootsis 158 MW (joonis 5) [41].



Joonis 5. Euroopa Liidu liikmesriikide tuuleenergia võimsus 100 000 elaniku kohta, 2024. aasta seisuga [41]

Eesti riiklik energia- ja kliimakava (REKK 2030) ning energiamajanduse arengukava (ENMAK 2035) näevad ette, et aastaks 2030 tuleb kogu riigi elektritarbimine katta taastuvenergiaallikate kaudu. Tuuleenergia mängib selles kesksel rollil [41].

Eesmärkide täitmiseks on plaanis paigaldada vähemalt 1200 MW tuuleenergiavõimsust, mille aastane kogutoodang ulatuks 2640 GWh-ni. Täiendavate analüüside põhjal on siiski hinnatud, et kogu taastuvelektri katmiseks Eestis aastaks 2030 on vaja rajada ligikaudu 2850 MW maismaatuuleparke, 1500 MW päikeseparke ning tagada vähemalt 1000 MW ulatuses energiasalvestusvõimekust [33], [36], [45].

Tuuleenergia tootlikkus sõltub ilmastikuoludest, mis tingib vajaduse energiavõrgu paindlikkuse järele. Eesti elektrisüsteem on tugevalt seotud Põhjamaade ja Baltimaade energiavõrkudega, mis võimaldab tootmisvõimsuste regionaalset tasakaalustamist. Võrgu stabiilsuse tagamiseks rakendatakse [46]:

- Hüdro- ja päikeseenergia kombineeritud tootmine [46];

- Salvestuslahendused (aku- ja hüdroalvestid) [46];
- Kiiresti käivitavad reservvõimsused [46].

Tulevikuprognoside kohaselt suudavad kaks meretuuleparki koos täiendavate maismaatuuleparkide ja salvestusvõimsustega katta kuni 95% Eesti aastasest elektritarbimisest. Ülejäänud osa on planeeritud katta biometaani ja sektoriülese integratsiooni abil, näiteks roheline vesiniku tootmise ja kaugküttevõrkude kaudu [24], [46].

Eesmärkide saavutamise eeldab liitumisvõimsuste suurendamist elektrivõrgus, vesiniku kasutuse ja ekspordi arendamist ning piiriüleste elektriühenduste tugevdamist Soome ja Lätiga [33].

Kuigi planeeritud on ligikaudu 6300 MW ulatuses projekte, ilmselt ei realiseeru kõik. Eesti vajaduste rahuldamiseks piisaks ligikaudu 2320 MW lisavõimsusest, mis tähendaks keskmiselt ühe 20 tuulikuga tuulepargi rajamist igas maakonnas [47].

Eesti tuuleenergia areng sõltub otseselt tehnoloogilise innovatsiooni, planeerimisprotsesside tõhustamise ning kogukondade kaasamise tasemest. Kuigi riik on seadnud ambitsioonikad eesmärgid ja toetab nii maismaa- kui ka meretuuleparkide arendust, kujutavad menetluste ajamahukus ja sotsiaalse aktsepteeritavuse probleemid endiselt olulisi väljakutseid. Tuuleenergia edendamine eeldab hästi koordineeritud strateegiat, kus tehniline võimekus, kohalike sidusrühmade koostöö ning stabiilne poliitiline raamistik toimivad kooskõlas, et tagada energiajulgeolek ja kliimaneutraalsuse suunas liikumine [38], [41].

2. TUULETURBIINIDE ELUTSÜKLI HINDAMINE

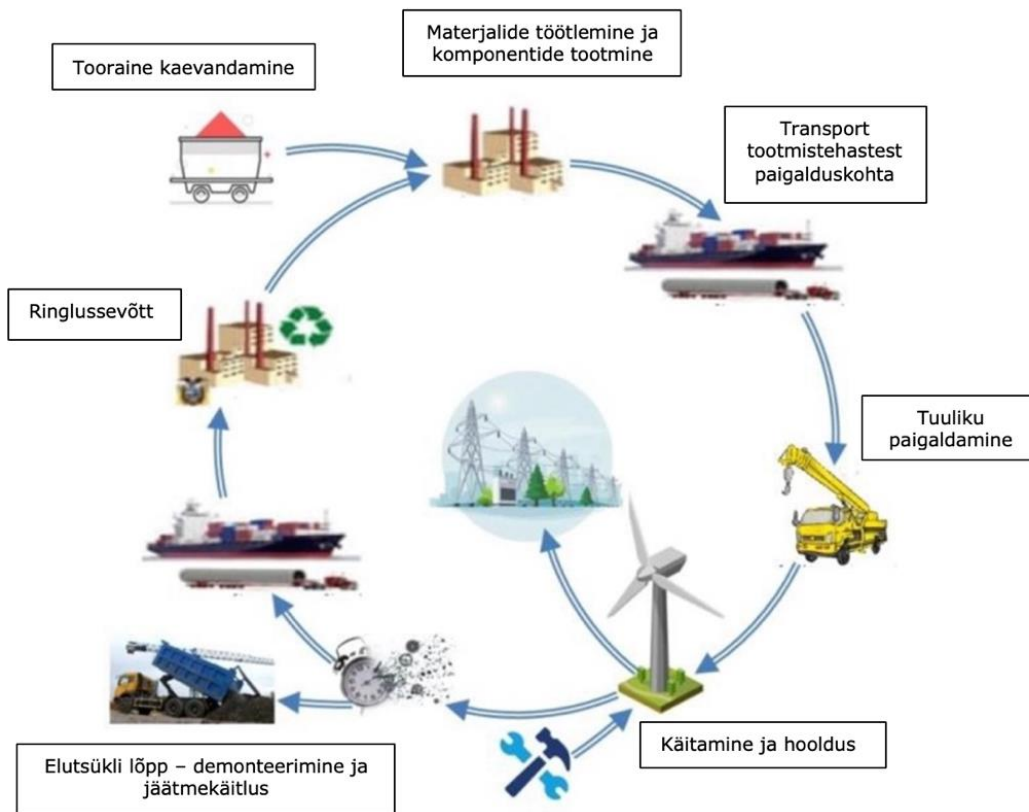
Peatükk käsitleb maismaatuulikute elutsükli etappe, alates tooraine hankimisest kuni demonteerimiseni. Iga etapi juures analüüsitakse olulisemaid keskkonna-, kliima- ja sotsiaalseid mõjusid, tuginedes LCA ja S-LCA metoodikatele.

2.1 Elutsükli hindamise (LCA) metoodika

Tuuleturbiinide keskkonnamõjude hindamiseks kasutatakse elutsükli hindamise (LCA) metoodikat, mis võimaldab analüüsida kogu süsteemi mõju alates tooraine kaevandamisest kuni elutsükli lõpuni. Tegemist on rahvusvaheliselt standarditud raamistikuga (ISO 14040 ja 14044), mida rakendatakse laialdaselt nii tootearenduses kui ka poliitikakujundamises keskkonnateadlikkuse suurendamiseks. LCA eesmärk on kvantitatiivselt hinnata materjalide ja energia kasutust ning heitkoguseid kõikides toote või süsteemi elutsükli etappides. Metoodika koosneb neljast põhietapist: eesmärgi ja ulatuse määratlemine, elutsükli inventuuri koostamine (sisendid ja väljundid), keskkonnamõju hindamine ning tulemuste tõlgendamine ja parendusvõimaluste määratlemine [48], [49], [50], [51], [52], [53].

Tuuleenergia kontekstis rakendatakse LCA-d selleks, et selgitada välja, millised protsessid tuuleturbiini eluea jooksul põhjustavad suurima keskkonnamõju. Uuringud näitavad, et kuigi turbiinide tööfaasis on keskkonnamõju minimaalne, kaasnevad märkimisväärsed heited materjalide tootmise, komponentide transpordi ja paigaldus-etapis. Eriti suure keskkonnajalajäljega on generaatorid ja labad, mille valmistamisel kasutatakse energiamahukaid ja keskkonnariske kätkevaid materjale nagu haruldased muldmetallid ja süsinikkiud. Lisaks sõltuvad LCA tulemused tugevalt kasutatud andmebaasidest, süsteemiipiiride määratlemisest ning sellest, kas analüüs hõlmab kogu tarneahelat, sealhulgas imporditud komponentide tootmist ja logistikat. Piiratud süsteemiipiirid võivad anda eksitava pildi tuuleenergia tegelikust süsinikujalajäljest, eriti riikides, mis ei tooda turbiine kohapeal [54], [55], [56], [57].

Tavapäraselt jagatakse tuuleturbiinide elutsükkel viieks faasiks: tooraine hankimine ja materjalide tootmine (nt teras, betoon, vask, alumiinium, komposiidid); transport; ehitus ja paigaldus; käitamine ja hooldus (sealhulgas määrdeainete kasutus, hooldustsükliid ja rikete parandamine) ning lõppfaasina demonteerimine ja materjalide ringlussevõtt. Tuuleturbiini elutsükli ja selle peamisi etappe on visuaalselt esitatud joonisel 6, mis illustreerivad nii materjalide ja energia voogu kui ka komponentide tootmise, transpordi, kasutuse ja ringlussevõtu järjestust [53], [55].



Joonis 6. Tuulepargi elutsükkel (autori täiendustega) [53]

LCA tulemused sõltuvad oluliselt kasutatud metoodikast – näiteks IMPACT 2002+, ReCiPe või CML – mis määravad, millised mõjukategooriad hindamise alla kuuluvad. Kõige tavapärasemalt analüüsitakse keskkonnamõjusid kategooriates nagu kasvuhoonegaaside emissioon, energia- ja veekasutus, ressursside ammendumine, eutrofeerumine ja toksilisus. Valitud metoodika mõjutab nii tulemuste detailsust kui ka nende võrreldavust teiste uuringutega [57], [58].

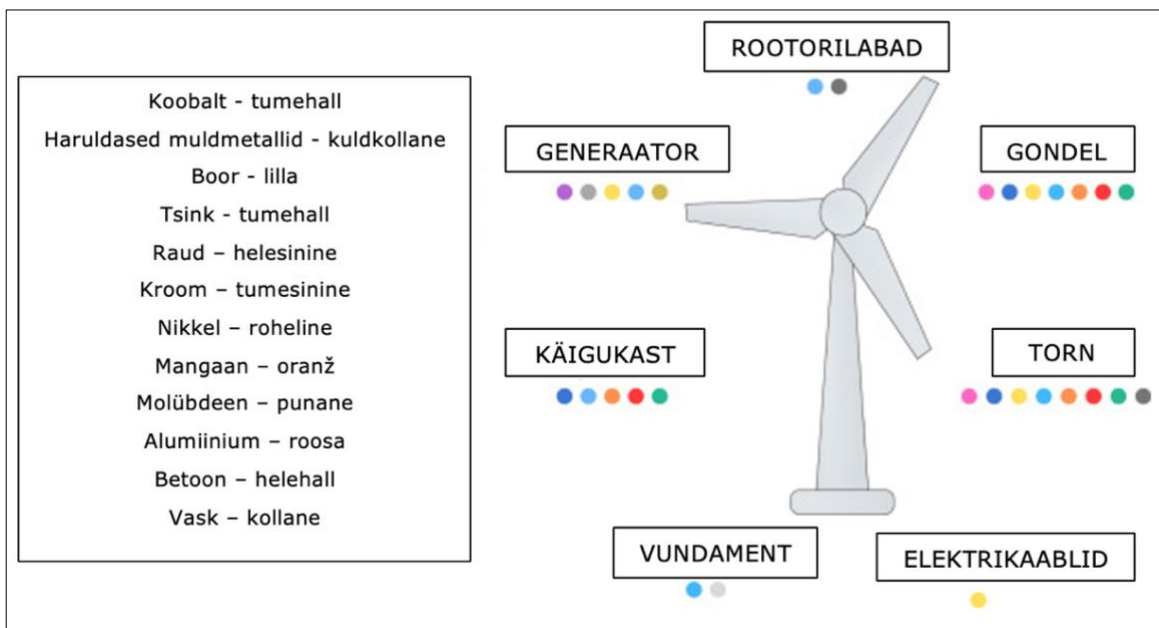
Üha enam integreeritakse LCA-sse ka sotsiaalseid ja majanduslikke aspekte, kasutades sotsiaalse elutsükli hindamise (S-LCA) metoodikat, mis võimaldab hinnata töötingimusi, kogukondade kaasatust ja muid ühiskondlikke mõjusid. Selline laiendatud lähenemine aitab taastuenergia arendusel paremini toetada ÜRO kestliku arengu eesmärke [50], [51], [55], [59].

LCA oluline tööriist, mis võimaldab tuvastada tuuleenergia keskkonnamõju suurimad allikad ja toetada teadlikke valikuid tehnoloogiate ja poliitikameetmete väljatöötamisel. Õigesti rakendatud LCA aitab vähendada negatiivseid mõjusid, suurendada ressursitõhusust ja suunata arendustegevusi madala süsinikujalajäljega lahenduste suunas, toetades samal ajal õiglast ja kestlikku üleminekut puhtale energiale [52],[53], [58].

2.1.1 Esimene etapp – tooraine hankimine ja materjalide tootmine

Maismaatuulikute elutsükli esimene etapp, tooraine kaevandamine/hankimine ja materjalide tootmine, hõlmab laiaulatuslikke, energia- ja ressursimahukaid tööstusprotsesse, mis määravad olulisel määral kogu süsteemi keskkonna- ja sotsiaalse jalajälje. Selle faasi keskmes on tuuleturbiini põhikomponentide nagu rootori, masti, gondeli, vundamendi ja võrguühenduse infrastruktuuri valmistamine [53], [59].

Kasutatavad peamised materjalid on teras, betoon, alumiinium, vask, komposiitmaterjalid ja haruldased muldmetallid (joonis 7). Teras moodustab kuni 79% turbiini kogumassist, olles enim kasutatud materjal, samas kui betoon moodustab olulise osa vundamendist ja mastist. Alumiiniumit kasutatakse kergkonstruktsioonides, kuid selle tootmine on eriti süsinikumahukas – keskmiselt 11,5 t CO₂ ühe t kohta, samas kui vase ja mangaani tootmisel on CO₂ emissioon vastavalt 2,4 kg ja 6 kg iga toodetud kilogrammi kohta. Ringlussevõtt võimaldab alumiiniumi puhul kuni 95% energia- kokkuhoidu, vähendades oluliselt selle süsinikujalajälge. Lisaks sellele kaasneb alumiiniumi tootmisega punase muda teke – kõrge leeliselisusega jääk, mis võib reostada pinnast ja veekogusid, kui seda ei käidelda nõuetekohaselt [53], [59].



Joonis 7. Turbiinis kasutatavad materjalid (autori täiendustega) [53]

Komposiitmaterjalid, näiteks süsinikkiud ja klaaskiud, on kriitilise tähtsusega eriti rootorilabade puhul, kuna need pakuvad kergust ja struktuurset tugevust. Nende tootmine on aga üks energiantensiivsemaid tööstusprotsesse. Süsinikkiudude tootmine vajab kuni 286 MJ/kg ja põhjustab kuni 100 kg CO₂ emissiooni ühe kilogrammi kohta. Lisaks eralduvad nende töötlemisel peenosakesed ja toksilised ühendid, mis kujutavad

ohtu inimeste tervisele. Näiteks süsinikkiudude purunemisel võivad tekkida mehaaniliselt töödeldud peenosakesed, mille sissehingamine põhjustab respiratoorseid probleeme. Komposiitmaterjalide põletamisel eralduvad toksilised ühendid, sealhulgas lenduvad orgaanilised ühendid ja kantserogeensed osakesed, eriti epoksüvaigust. Samuti on tuvastatud, et tootmisjääkide (näiteks - klaaskiudmatid, vaigukettad, vaakumkile, infusioonimaterjalid, infusioonimaterjalide jäägid) ringlussevõtt võimaldab kuni 85% keskkonnamõjude vähendamist, hõlmates fossiilkütuste tarbimist, toksilisust ja PM2.5 heiteid. Uuringute kohaselt on epoksüvaiguplaatide tootmisel toksiline mõju märkimisväärselt madalam kui näiteks klaaskiudmatil, mis eraldab tootmisel kantserogeenseid aineid nagu kaadmium ja arseen [56], [60], [61].

Generaatorites kasutatavad püsिमagnetid nõuavad haruldasi muldmetalle, näiteks neodüüm, düsproosium, praseodüüm ja terbium, mille kaevandamine on kontsentreeritud vähestesse riikidesse, eelkõige Hiinasse ja Kongo DV-sse. Kaevandamisprotsessid on seotud radioaktiivsete jäätmete, happelise reovee ja raskmetallide sattumisega keskkonda. Kaevandamise kõrvalsaadused satuvad sageli veekeskkonda, põhjustades happelise reovee, raskmetallide ja toksiliste kemikaalide levikut. Näiteks Hiina Bayan Obo kaevanduses tekib ühe tonni haruldaste muldmetallide kohta ligi 75 m³ happelist reovett, 9 000–12 000 m³ mürgiseid gaase ning üks tonn radioaktiivseid jäätmeid, mis juhitakse looduslikesse veekogudesse. Selle tagajärjel kannatavad ökosüsteemid, sealhulgas kalade ja teiste veeloomade populatsioonid. Muldmetallide tootmisel eralduvad lisaks mürgised gaasid nagu vesinikfluoriid ja vääveldioksiid (üle 12 000 m³ ühe tonni kohta). Terviseriskid hõlmavad vähki, neuroloogilisi kahjustusi ja elukeskkonna saastumist [59], [60].

Tuuleenergia komponentide toorainete kaevandamine on tugevalt kontsentreeritud teatud geograafilistesse piirkondadesse, mis suurendab varustuskindluse ja geopoliitiliste riskide taset. Hiina on juhtiv haruldaste muldmetallide, alumiiniumi ja neodüümi tootja; Türgi domineerib boori kaevandamises; Lõuna-Aafrika on peamine kroomi ja mangaani allikas; Austraalia ja Kanada on suurtootjad raua, alumiiniumi ja nikli vallas. Tähtsateks eksportijateks on ka Brasiilia, Tšiili, Gabon, India, Indoneesia, Kasahstan, Madagaskar, Myanmar, Peruu, Venemaa ja Kongo Demokraatlik Vabariik [59].

Materjalikasutus varieerub ka sõltuvalt generaatoritüübist – püsिमagnetitega otseajamiga generaatorid (DD-PMSG) kasutavad märkimisväärselt rohkem haruldasi muldmetalle kui käigukastiga kahekordselt toidetud asünkroongeneraatorid (GB-DFIG), mis tuginevad rohkem vaske ja terast. Vasetootmine on samuti seotud ulatusliku

energia- ja veekuluga ning keskkonnasaastega – iga kilogrammi vase kohta paiskub õhku 2,4 kg CO₂. Lisaks kasutatakse toorainena mangaani, molübdeeni ja koobaltit, mille kaevandamisel tekib suur kogus heitmeid (nt mangaani puhul 6 t CO₂ 1 t kohta) [59].

Tooraine tootmisest tulenevad mõjud varieeruvad ka sõltuvalt tootmisriigi energiaportfellist – näiteks Hiina, kus domineerib kivisüsi, tekitab palju kõrgema CO₂ jalajälje kui taastuenergiale toetuvad riigid. Keskkonnamõjude analüüs näitab, et metallide ja betooni ulatuslik kasutamine moodustab üle 85% kogu CO₂, NO_x, SO₂ ja PM2.5 emissioonidest tuuleturbiini elutsükli. LCA vaates on oluline hinnata ka mitmeid teisi mõjukategooriaid. Ressursside ammendumise potentsiaal (ADP) on seotud haruldaste metallide, alumiiniumi ja vase kaevandamisega. Fossiilkütuste ammendumise potentsiaal (ADP fossil) viitab kivisöel ja maagaasil põhinevate protsesside sõltuvusele, näiteks terase- ja tsemenditootmises. Happevihmade potentsiaal (AP) tuleneb metallide ja tsemendi tootmise käigus eralduvatest NO_x ja SO₂ emissioonidest. Eutrofeerumise potentsiaal (EP) viitab fosfori- ja lämmastikuühendite sattumisele veekeskkonda, mille tulemuseks võib olla vetikate vohamine ja hapnikupuudus [62], [56], [62], [63], [64].

Inimtoksilisuse potentsiaal (HTP) ja ökotoksilisuse potentsiaal (TETP, FAETP, MAETP) käsitlevad raskmetallide (nt kroomi, vase, kaadmiumi, arseeni) ning toksiliste kemikaalide mõju tervisele ja ökosüsteemidele. Näiteks on tuvastatud, et Lõuna-Aafrika kaevandustes suureneb raskemetallide tõttu maksavähi ja kardiovaskulaarsete haiguste esinemine. Osoonikihi kahandamise potentsiaal (ODP) on seotud fluoritud ühendite ja sideainete kasutamisega, eriti labade ja elektroonikakomponentide tootmisel. Fotokeemilise osooni tekke potentsiaal (POCP) peegeldab NO_x ja VOC heitmete interaktsiooni päikesevalguse toimel, mis põhjustab sudu teket. Samuti põhjustavad tahkete osakeste (PM2.5) emissioonid terviseriske, eriti linnalähedastes piirkondades, kus tuuleparke rajatakse [48], [59], [63], [64], [65].

Prognooside kohaselt võib aastaks 2050 tuuleenergiasektori vajadus betooni ja terase järele seitsmekordistuda, samas kui haruldaste muldmetallide nõudlus võib kasvada kuni 700%, sõltuvalt püsिमagnetite levikust. Ameerika Ühendriikides prognoositakse samal perioodil terase kasutuse kasvu üle 500% ning tsemenditarbimise kahekordistumist. Euroopa Liidu sõltuvus Hiinast ja teistest tarnijatest seab ohtu varustuskindluse ja suurendab geopoliitilisi riske. Haruldaste muldmetallide ringlussevõtu määr jääb alla 1%, kuid erinevad meetodid, sealhulgas otsetaaskasutus,

püro- ja hüdro metallurgia, võivad õigel rakendamisel katta kuni 59% nõudlusest pärast 2050. aastat [66], [67].

Tootmisinnovatsioonid, nagu Hexcrete-tornid, betooni 3D-printimine ja spiraalkeevitus, pakuvad uusi võimalusi materjalikulu, energiatarbimise ja transpordikoormuse vähendamiseks. Need tehnoloogiad võimaldavad paindlikumat paigaldamist ka keerukatesse asukohtadesse, vähendades visuaalset ja logistilist mõju. Komposiitmaterjalide jääkide taaskasutus, sealhulgas vaiguga kaetud torud, klaaskiudmatid ja epoksüvaigud, võib vähendada elutsükli keskkonnamõjusid kuni 85% ulatuses [56], [60], [68].

Tooraine hankimise ja materjalide tootmise faas kujundab olulisel määral tuuleenergia süsteemi keskkonna jätkusuutlikkust. Selle tõhusamaks muutmine nõuab süsteemset ringmajanduse rakendamist, energiatõhusaid tootmisviise kogu elutsükli ulatuses [65], [66].

Lisaks materjalide ja komponentide tootmisele on maismaa tuuleparkide rajamisel oluline käsitleda ka elektrivõrguga liitumise taristu planeerimist, millel on otsene mõju nii keskkonnale kui ka kohalikele kogukondadele. Suuremate tuuleparkide puhul kasutatakse sageli õhuline, mis võivad oluliselt mõjutada maastikupilti ja põhjustada avalikku vastuseisu. Alternatiivina paigaldatavad maa-alused kaablid võivad samuti avaldada mõju, eriti looduslikult tundlikes piirkondades, kus on vaja luua kaitsevööndeid. Elutsükli hindamise vaatenurgast on soovitatav kavandada turbiinide asetus ja liitumispunktid tervikuna, et minimeerida kulusid ja vähendada visuaalset, sotsiaalset ning keskkonnamõju, parandades seeläbi projekti vastuvõetavust ja jätkusuutlikkust [69].

2.1.2 Teine etapp - transport

Transpordietapp hõlmab tuuleturbiini komponentide logistilist liikumist tootmiskohtadest paigaldusplatsile, kusjuures suuremõõtmeliste osade – näiteks mastide ja rootorilabade – veoks on vajalik spetsiaalne tehnika, eelnev teolude hindamine ning vajadusel eriveolod ja ajutine liikluskorraldus. Lisaks transporditakse tundlikke elektrisüsteemide komponente, nagu sise- ja väkiskaableid ning alajaamaseadmeid, mis vajavad mehhaanilise vibratsiooni ja ilmastikumõjude vastu kaitset. Lisaks maismaatranspordile kasutatakse sageli ka meretransporti, mille keskkonnamõju kvantifitseerimiseks rakendatakse süsinikujalajälje kalkulaatoreid ning elutsükli hindamise (LCA) meetodikaid. Maanteetranspordi logistiliste kauguste

määramisel kasutatakse tihti geoinfosüsteeme (GIS), mis võimaldavad optimeerida marsruute ning seeläbi vähendada emissioone [52], [53], [64].

Keskkonnamõjude vaates on transpordietapp üks olulisemaid kasvuhoonegaaside (GHG) heite allikaid, kuna sõltub peamiselt fossiilkütustel töötavatest maantee- ja meretranspordivahenditest. Heitmete hulk sõltub komponentide mõõtmetest, massist, kaugusest tootmisüksusest paigaldusplatsini ning kasutatavate transpordivahendite tüübist. Näiteks 80 t veoauto CO₂ emissioonitegur 4,533 kg/km tähendab, et 1 t transportimine 1000 km kaugusele põhjustab ligikaudu 56,66 kg CO₂ heidet. GHG mõju kasvab eriti siis, kui komponente tuleb toimetada pikkade vahemaade taha või kui turbiinid on mahukamad. Transpordietapi emissioonide täpne kvantifitseerimine on seetõttu oluline LCA-s, et suunata süsiniku vähendamise strateegiaid ja optimeerida logistikaplaane [53], [62], [63], [64].

Lisaks süsinikuheitmetele suurendab transpordietapp fossiilkütuste ammendumise potentsiaali (ADP fossil), kuna vedu põhineb valdavalt diislikütusel. Elektriveokite, raudteetranspordi või kohaliku tootmise eelistamine võib märkimisväärselt vähendada süsteemi sõltuvust taastumatutest energiaallikatest. Samuti on transpordiga kaasnevad NO_x ja SO₂ emissioonid seotud happevihmade potentsiaaliga (AP), mille mõju ulatub nii piirkondlikule kui ka laiemale ökosüsteemile (mõju pinnasele, veekogudele, taimestikule, ehitusmaterjalidele), kuigi see jääb LCA-des sageli tähelepanuta. AP kvantifitseerimine võimaldab hinnata transpordiga seotud õhusaaste ulatust ning kavandada sobivaid leevendusmeetmeid [48], [62], [65].

Mõju vähendamiseks kasutatakse järjest enam logistiliselt tõhusaid lahendusi, nagu hübriidornide betoonist sektsioonide jagamine väiksemateks segmentideks (kolm kuni neli kaarekujulist elementi kõrgusega ligikaudu 4 meetrit) või mastide kohapealne tootmine spiraalkeevituse abil, mis võimaldab vältida ulatuslikku transporti ning vähendada sellega seotud keskkonnamõjusid. Samuti võib olulist mõju avaldada logistikaplaani optimeerimine, mis hõlmab sobivamate transpordivahendite valikut ja koormate konsolideerimist. Regionaalsete tarnijate eelistamine võib samuti oluliselt vähendada keskkonnajalajälge [62], [63], [68].

2.1.3 Kolmas etapp - ehitus ja paigaldus

Ehitus- ja paigaldusetapp hõlmab mitmeid tehniliselt ja logistiliselt keerukaid tegevusi, mille mõju tuuleenergia süsteemi kogukeskkonnajalajäljele on küll suhteliselt tagasihoidlik, kuid siiski märkimisväärne. Peamised keskkonnakoormused on seotud fossiilkütustel töötavate rasketehniliste seadmete, näiteks kraanade,

transpordiseadmete, spetsiaalsete tõsteseadmete ning transpordivahendite ja ehitusmasinate kasutamisega, mille ekspluateerimine põhjustab kasvuhooonegaaside heidet ning lokaalseid mõjusid, nagu pinnasekahjustused, erosioon ja õhusaaste. Hinnanguliselt moodustab see etapp ligikaudu 2% kogu elutsükli süsinikujalajäljest, kuid selle optimeerimine võib aidata oluliselt vähendada kogu süsteemi keskkonnamõjusid [52], [53], [70].

Paigaldusetapp hõlmab kraanade ja ehitusmasinate kasutamist ning tõsteteadmete rakendamist, tuuleturbiinide, alajaamade ja elektrisüsteemide installeerimist, sealhulgas sise- ja väliskaablite ning trafopunktide ühendamist elektrivõrguga. Kasvava võimsusega turbiinide kasutuselevõtt on viinud innovatiivsete kraanatehnoloogiate, nagu modulaarsed ja isetõstetavad, elektrilised ja hübriidmudelid, arenguni, mis võimaldavad vähendada fossiilkütuste tarbimist ning sellega seotud emissioone. Ehitusplatsidel kasutatakse järjest enam taastuenergiaallikaid ning täiustatud emissioonikontrolli- ja hüdroüsteeme, mis aitavad vähendada energiakasutust ning tõsta protsesside keskkonnasõbralikkust. Kraanatehnoloogia täiustamine, nagu regeneratiivsete pidurisüsteemide kasutamine ja tööseisakute vähendamine, aitab samuti tõsta paigaldusetapi jätkusuutlikkust [53].

Tuuleparkide rajamine mõjutab maakasutust/maastikku, eriti tundlikes või mägistes piirkondades, kus ulatuslikud pinnasetööd – maapinna tasandamine, juurdepääsuteede ja vundamentide rajamine, mis suurendavad erosiooniriski ning võivad häirida mullakooslusi ja kohalikke elupaiku. Kaudsed mõjud hõlmavad rohumaade ja põllumajandusmaa pindala vähenemist, mis võib mõjutada piirkonna ökoloogilist ja majanduslikku kasutuspotentsiaali. Eriti ohustatud on piirkonnad, kus häiritakse loomade rändeteid või hävitatakse põlised taimestikukooslused. Seetõttu on mitmed riigid kehtestanud spetsiifilised juhised, mis näevad ette reovee käitlemise, taastaimestamise, rasketehnika minimeerimise ja ehitusprotsesside keskkonnamõju leevendamise meetmed [71], [72], [73].

Suurvõimsusega turbiinide vundamendid on materjalimahukad ja võivad moodustada kuni 74% kogu turbiini massist, kusjuures betooni kulu ulatub 600–1 000 tonnini turbiini kohta. Kuna tsemendi tootmine on kõrge CO₂ heitega, on betoonisegude koostise optimeerimine võtmetähtsusega – kõrgahjusõelmete, mikrosilika või lendtuhkade lisamine, tugevama betooni (nt 40 MPa) kasutamine ja leelisaktiveeritud tsemendisegude rakendamine võib vähendada emissioone kuni 45%. Lisaks kasutatakse konstruktsioonilisi uuendusi, nagu ribivundamendid, eelfabrikeeritud pingebetoonsegmentid ja alternatiivsed ühenduslahendused, mis aitavad vähendada

materjalikulu ja paigaldusaega. Katsetamisel on ka väiksema süsinikujalajäljega sideained, nagu leelisaktiveeritud tsemendid (ACC) ning taaskasutatud betoonitäiteainete kasutus, mis võimaldavad minimeerida loodusvarade tarbimist [74], [75], [76], [77].

Vundamentide elutsükli lõpus jäetakse need sageli osaliselt maasse (eemaldatakse vaid pinnapealne osa – 1-2 meetrit), mis võib piirata ala edasist kasutusvõimalust. Näiteks juhul, kui soovitakse piirkonda arendada elamurajoon või muu taristu eesmärgil. Sellistes olukordades võivad allesjäänud betoonistruktuurid vähendada pinnase ehituslikku väärtust ja funktsionaalsust. Seetõttu on arendatakse lahendusi, Keskkonnamõju leevendamiseks arendatakse lahendusi, mis võimaldavad olemasolevate vundamentide korduvkasutust uute turbiinide paigaldamisel ning kergesti eemaldatavaid ja modulaarseid süsteeme; lisaks rakendatakse väiksema süsinikujalajäljega ehitusmaterjale, mis kokkuvõttes toetavad materjalide taaskasutust ja ringmajanduse põhimõtteid [78].

Püsiva keskkonnamõjuga on ka hooldusteede rajamine (rasketehnikale, hooldustiimile), mis võimaldab juurdepääsu turbiinidele paigaldus- ja hooldusfaasis. Need teed võivad põhjustada pinnase tihendamist, elupaikade killustumist ja maastikulisi häiringuid, jäädes siiski kasutusse kogu turbiini eluea jooksul [79].

Ehitus- ja paigaldusetappi iseloomustab kõrge logistiline haavatavus, mis on seotud globaalsete tarneahelate katkemise riskiga – ilmastikutingimused, geopoliitilised pinged looduslikud ja majanduslikud šokid ja tarnehäired võivad viia komponentide hilinemiseni, pikendades ehitusprotsessi ning suurendades ajutist maakasutust ja energiatarvet. Seetõttu rakendatakse üha enam "just-in-time" logistikamudeleid, mille abil vähendatakse ladustamisvajadust, optimeeritakse tööoperatsioone ja minimeeritakse keskkonnakoormust [80].

Tulevikusuundumused hõlmavad kliimaneutraalse logistika arengut, sealhulgas elektri- ja vesinikutoitel veovahendite kasutuselevõttu ning taastuenergia toimivate lahenduste rakendamist ehitusplatsidel. Need strateegiad aitavad vähendada fossiilkütuste tarbimist ja toetavad tuuleenergia taristu keskkonnasäästlikku arendust [81].

2.1.4 Neljas etapp - käitamine ja hooldus

Käitamis- ja hooldusperiood on tuuleturbiini elutsükli kõige pikem faas, mille jooksul toimub elektrienergia tootmine ning kaasnevad mitmed kaudsed keskkonnamõjud.

Kuigi elektritootmine ise ei tekita otseseid heitmeid, on hooldustegevustel ja taristul märkimisväärne mõju nii energiakasutusele kui ka ökosüsteemidele. Käitamisfaasi energiavajadus moodustab hinnanguliselt 1,2–4% kogu elutsükli energiatarbest, sõltudes turbiini suuruselt, asukohast ja hooldusstrateegiast. Hooldustegevused hõlmavad regulaarselt määrdeainete ja filtrite vahetust käigukastide või generaatorite asendamist, ning tööjõu transporti. Näiteks vajab tüüpiline 2 MW turbiin vähemalt ühte käigukasti vahetust iga seitsme aasta järel, ja remonditöid keskmiselt iga 1–3 aasta jooksul. Kohapealne remont kestab keskmiselt 21 tundi ja võib ulatuda ligikaudu 4800 euron. Lisaks on vajalik pidev energiavarustus turbiini käivitussüsteemide, pidurisüsteemide, sammukontrolli ja yaw-mehhanismi töös hoidmiseks [52], [53].

Kvaliteetseks hoolduseks on üha enam rakendusel ennustava hoolduse ja seisukorrareire süsteemid, mis tuginevad vibratsiooni- ja optilistele sensoritele ning kaugjälgitavatele SCADA- ja CMS-platvormidele. Uued tehnoloogiad, nagu UV-kiirguse toimel kivistuvad materjalid ja laserkattega tugevdatud liimühendused, võimaldavad rikete kiiremat ja energiasäästlikumat kõrvaldamist. Laserkattega tugevdatud liimühendused, mille puhul kasutatakse laserkütet, et parandada liimühenduste mehhaanilisi omadusi ning kiirendada liimimisprotsessi [52], [53], [82].

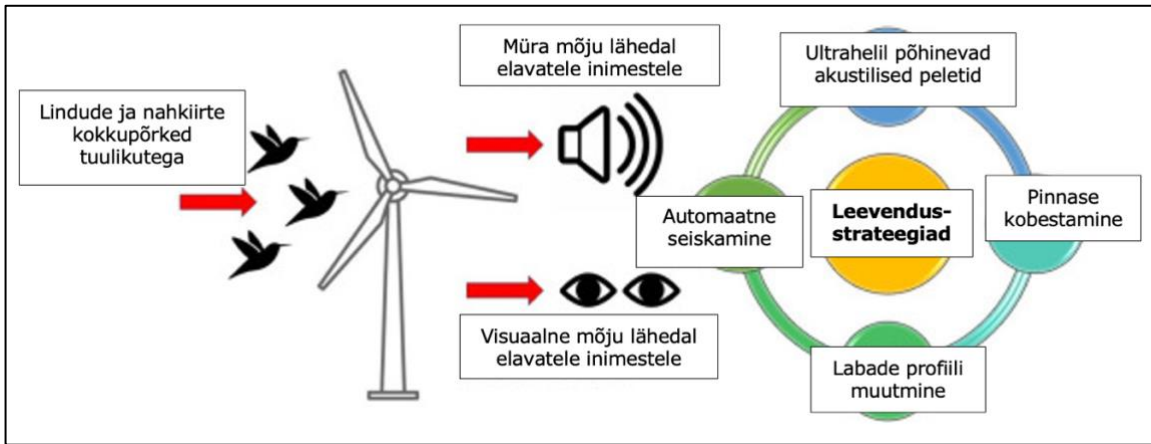
Turbiinilabade tööea pikendamine on keskkonnahoidlik meede, mis vähendab vajadust uute materjalide järele ja minimeerib jäätmeteket. Labade eluea pikendamiseks kasutatakse mitmeid lähenemisviise, sealhulgas mehaaniliselt tugevamate materjalide kasutuselevõttu, tõhusamaid hooldus- ja remondimeetodeid ning labade taaskasutus- ja uuendusprotsesse. Rakendatakse tugevamaid komposiite, erosioonikindlaid katematerjale, hübriidmaterjale ja arendatakse isetaastuvaid süsteeme, nagu mikrokapseldatud epoksüvaigud ja termoreversiivsed polümeerid. Kuigi mõned neist võivad vähendada mehaanilist tugevust, on arenduses ka vitrimääridel põhinevad komposiidid, mis ühendavad taastuvuse ja tugevuse. Siiski on nimetatud tehnoloogiate rakendamisel mitmeid piiranguid. Näiteks võivad vaskulaarsed süsteemid ja mikrokapslid vähendada materjali mehaanilist tugevust, samas kui Diels–Alder polümeerid võivad olla liiga pehmed struktuursete rakenduste jaoks. Alternatiivina arendatakse vitrimääridel põhinevaid komposiitmaterjale, mis ühendavad mehaanilise tugevuse ja ringlussevõetavuse omadused, kuid nende laialdane rakendamine eeldab veel täiendavaid uuringuid [82].

Ökoloogiliselt on käitamisetapp seotud elupaikade fragmenteerumise ja kokkupõrkeriskiga, eriti rändlindude ja nahkhiirte jaoks. Elupaikade killustumine võib põhjustada loomade ümberasumist ning häirida sigimis- ja toitumispaiku, mis omakorda

mõjutab nende liikumismustreid ja geenivoolu. Mõjude ulatus sõltub asukohavalikust, turbiini disainist, valgustingimustest ja ilmastikust. Kuigi uuringud näitavad, et fossiilkütustel töötavad elektrijaamad põhjustavad kogumõjus suuremat elurikkuse vähenemist, näiteks võib lindude suremus fossiilsete jaamade läheduses olla kuni 95% suurem võrreldes tuuleenergiaga, on siiski oluline tuuleparkide planeerimisel ja käitamisel rakendada tõhusaid leevendusmeetmeid. Nende hulka kuuluvad näiteks ultrahelipeletussüsteemid, labade osaline mustaks värvimine kontrastsuse tõstmiseks ning automaatsed peatumismehhanismid, mis tuvastavad lähenevaid linde ja aeglustavad seeläbi labade liikumist või peatavad turbiini töö. Nahkhiirte puhul on leitud, et nende aktiivsus suureneb madala tuulekiiruse tingimustes, mistõttu kasutatakse töörežiime, mis piiravad turbiinide tööd sellistel perioodidel, vähendades suremust kuni 50% ilma olulise mõjuta elektritootmisel [72], [73], [83], [84].

Hinnanguliselt moodustavad 1000 MW paigaldatud tuuleenergia võimsusega seotud lindude hukkumised ligikaudu 20% kõigist aastas hukkunud lindudest. Võrdluseks: jahipidamise tagajärjel hukkub aastas hinnanguliselt 1500 lindu ning kokkupõrked elektriliinide ja transpordivahenditega põhjustavad kuni 2000 surmajuhtumit [60], [83].

Maismaatuulepargid võivad põhjustada märkimisväärset visuaalset ja akustilist häiringut, mõjutades kohalike elanike heaolu ja avalikku suhtumist. Visuaalne mõju on subjektiivne ja sõltub turbiinide suurusest, värvist, asukohast ning valgustusest; see võib mõnedele olla häiriv, teistes aga tekitada positiivseid assotsiatsioone. Visuaalset mõju vähendatakse neutraalsete värvitoonide, madala peegeldusvõimega labakatete ja planeerimisel kasutatavate GIS-analüüside (geograafiliste infosüsteemide, mis võimaldavad määrata nii tuuleturbiinide nähtavusulatust kui ka visuaalse häiringu intensiivsust erinevates maastikutüüpides.) abil. Müra jaguneb mehaaniliseks (generaatori, hammasrataste, laagrite töö) ja aerodünaamiliseks (tuleneb õhu liikumisest läbi rootorilabade) ning võib tekitada unehäireid ja stressi, kuigi tugev seos tervisemõjudega ei ole teaduslikult kinnitatud. WHO soovib öiseks müratasemeks alla 30 dB(A) (joonis 8). Müraleevendust pakuvad labade aerodünaamiline optimeerimine, vibratsioonisummutavad konstruktsioonid ja tuuleparkide piisav kaugus elamutest (vähemalt 2 km). Uuringud rõhutavad vajadust arvestada nii maastikulisi kui ka hoonete konstruktsioonilisi omadusi ning viitavad sellele, et hästi kavandatud tuulepargid võivad sulanduda keskkonda ning nende mõju saab asjakohaste meetmetega tõhusalt vähendada [71], [72], [73], [84].



Joonis 8. Leevendusstrateegiad tuulikute poolt põhjustatud mõjudele (autori täiendustega)

Tehnilised riskid, nagu labade purunemine, õlilekked, jäätumine ja tulekahjud, on harvad, kuid arvestatavad. Üks tuulik võib sisaldada kuni 500 liitrit õli, mille lekkimisel on potentsiaal reostada pinnast ja vett. Tulekahjud, mida esineb keskmiselt kord 2000 turbiini kohta, ennetatakse suitsu-, leegi- ja kuumaandurite ning automaatsete kustutussüsteemidega. Avariilukorrad ei kujuta üldjuhul otsest ohtu inimeste tervisele, kuna tuulikud paiknevad elamupiirkondadest eemal. Turbiinide seisukorda jälgivad elektroonilised seire- ja juhtimissüsteemid ning tuulepargi haldajal peab olema koostatud reageerimisplaan õnnetuste lahendamiseks. Jäätumise vältimiseks rakendatakse labade soojendust ja jääseireandureid. Riskide maandamine nõuab regulaarset hooldust, hädaolukorra plaane ja digitaalseid seisundiseiresüsteeme [85], [86].

Tuulepargid võivad põhjustada ka mikrokliimaatilisi muutusi, nagu pinnatemperatuuri tõus, sademete ja tuulevoogude muutus. Need mõjud on lokaalsed, kuid tundlikes ökosüsteemides võivad need mõjutada mullaniiskust, taimestikku ja süsinikuringet. Mõju globaalsele temperatuurile on hinnatud siiski tühiseks. Mõnes piirkonnas võib mikrokliimaatilisel mõjul olla ka positiivne roll, näiteks soosinud taimestiku kasu ning vähendades külmakahjustuste esinemissagedust [72], [73], [84].

Turbiinide tööea pikendamine vähendab oluliselt elutsükli keskkonnamõjusid. Pikem eluiga võimaldab hajutada materjalide tootmise, paigalduse ja hooldusega seotud emissioone suuremale kogusele toodetud energiale. Näiteks vähenes Vestas V112-3,45 MW turbiini GWP 16 aasta jooksul 6,6 g CO₂-e/kWh-lt, 24 aastaga 4,4 g CO₂-e/kWh-le ning 30 aastaga 2,8 g CO₂-e/kWh-le. Samuti langes 3,2 MW turbiinil CO₂ heide 10-aastase eluea puhul 8,7 kg CO₂/MWh-lt 30 aastaga 2,8 kg CO₂/MWh-le. Kuna

hoolduskulud moodustavad 20–25% kogu elutsüklikuludest, on tööea pikendamine oluline ka majanduslikult [61], [82].

Käitusetapis avalduvad keskkonnariskid on peamiselt seotud hooldusvedelike lekete, tulekahjude ja labade jääumisega. Määrdeainete leke võib reostada mulda ja põhjavett, eriti tundlikes piirkondades nagu joogiveehaarded ja kõrge põhjaveetasemega alad. Riskide maandamiseks soovitatakse kasutada biolagunevaid määrdeaineid, tugevdada seiret ja tagada kiire reageerimine. Samuti tuleb hinnata labade jääumise mõju ohutusele ja tuulikute töövõimele ning kasutada vajadusel jääseire- ja soojendussüsteeme [85].

Tänapäevased tuuleturbiinid on varustatud seisundiseiresüsteemidega (CMS), mis võimaldavad reaajas andmete kogumist ja kaugjälgimist SCADA-võrkude kaudu. Uuemad arengusuunad hõlmavad pilvepõhiseid platvorme ja automatiseeritud diagnostikat, mis suurendavad töökindlust ja vähendavad vajadust kohapealseks sekkumiseks. Kuigi süsteemide enda energiatarve on väike, muutub see aspekt oluliseks taastuvenergia digitaliseerumise kontekstis [87].

2.1.5 Elutsükli lõpp: demonteerimine ja ringlussevõtt

Maismaatuulikute elutsükli lõppfaas hõlmab nende demonteerimist, komponentide taaskasutust ja võimaluse korral materjalide ümbertöötlemist, mille eesmärk on keskkonnamõjude vähendamine ja materjalivoogude suunamine ringmajandusse. Tuuleturbiinide keskmine kasutusiga ulatub 20–25 aastani, mille möödumisel alustatakse seadmete lahti võtmist ja materjalide utiliseerimist. Komponentid transporditakse vastavatesse ladustamis- või jäätmekäitluskohtadesse ning materjalid, millel on kõrge ringlussevõtupotentsiaal (nt teras, vask ja alumiinium), suunatakse taaskasutusse. Näiteks terase ringlussevõtt võimaldab säästa kuni 72% energiat võrreldes esmase toodanguga, vähendada CO₂ heidet 1,67 tonni võrra ühe tonni kohta ning alandada õhusaastet 86%, veekulu 40% ja veereostust 76%. Ringlussevõtt aitab ka muude komponentide, nagu instrumentatsioonisüsteemide, puhul keskkonnamõjusid ligikaudu 20% võrra vähendada, samas kui tornielementide fossiilkütustel põhinev energiatarve võib väheneda kuni 56%. Siiski sõltuvad need tulemused konkreetsest tuuleturbiini disainist, kuna kõik konstruktsioonid ei ole optimeeritud efektiivseks ringlussevõtuks [52], [53], [54].

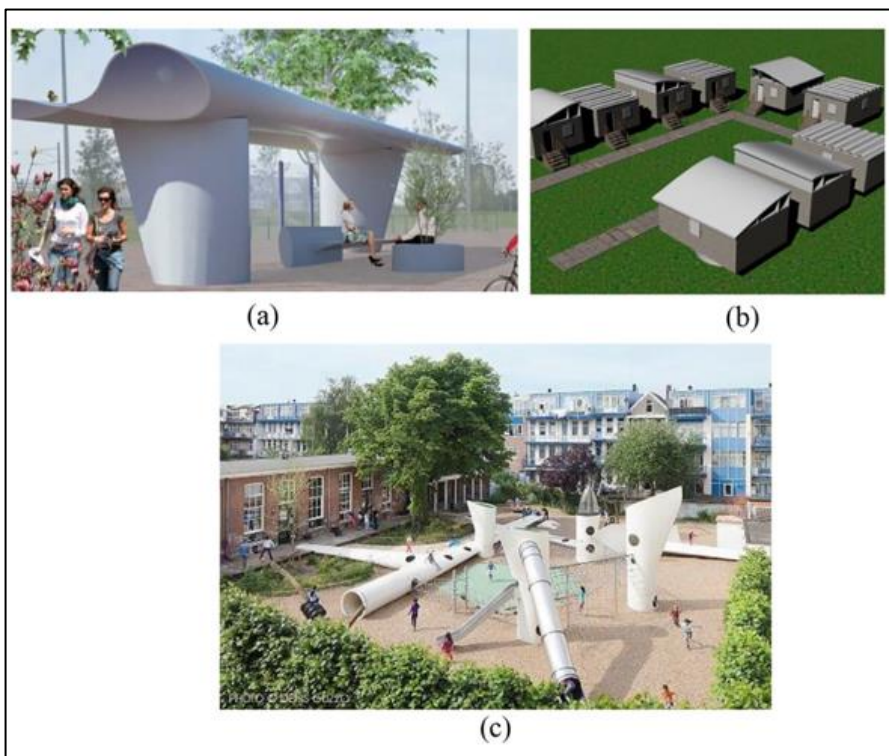
Suurimaks väljakutseks tuulikute elutsükli lõpus on komposiitmaterjalist rootorilabad, mis on peamiselt valmistatud klaaskiust tugevdatud plastidest ja mille ringlussevõtt on tehniliselt keeruline ja energiamahukas. Tõhusa ümbertöötlemise võimaluste

puudumisel ladestatakse need sageli prügilatesse või põletatakse, mis võib põhjustada toksiliste ühendite – sealhulgas metalloksiidide ja kaltsiumoksiidi – eraldumist ning tõsiseid tervise- ja keskkonnanriske. Kehtivad Euroopa regulatsioonid piiravad selliste materjalide ladestamist, ent alternatiivsed meetodid, nagu mehaaniline purustamine, termiline töötlus (pürolüüs, fluidiseeritud voodi) ja keemiline lagundamine (solvolüüs, superkriitilised lahustid), on kõik seotud kas kiudude kahjustumise, energiamahukuse või kõrgete kuludega. Keemiline ringlussevõtt pakub LCA-analüüside kohaselt väiksemaid heitkoguseid kui ladestamine, kuid nõuab märkimisväärset energiapanust ja investeeringuid [60], [84].

Alternatiivseks lähenemiseks on komposiitmaterjalide kasutamine betooni täitematerjalina. See aitab vähendada liiva ja kruusa kasutamist, vähendada betoonitootmise süsinikujalajälge ning suunata muidu jäätmetena käsitletavat materjalid funktsionaalsesse uuskasutusse. Uuringud on näidanud, et selline taaskasutus võib isegi parandada betooni survetugevust ja vastupidavust. Täiendavalt on arendamisel keskkonnasõbralikumad materjalid, näiteks termoplastsed komposiidid ja looduslikest kiududest (bambus, lina, kookos) valmistatud biolagunevad lahendused, millel on madalam tihedus, väiksem energianõudlus ja paremad mehaanilised omadused, ent mille rakendatavus suurte labade tootmises on seni piiratud. Mitmeid neist, sealhulgas puidulaminaate ja looduskiude, on katsetatud tuuleturbiinide rootorilabade sisestruktuurides ja kestades, kuigi nende kasutus jääb veel piiratud ulatusega. Üheks paljulubavaks võimaluseks on termoplastsed komposiidid, mis on taaskasutatavad, kerged, suure löögikindlusega ning sobivad hästi tänapäevaste tootmistehnoloogiatega. Kuigi nimetatud alternatiivid ei ole veel sobivad suuremõõtmeliste labade tootmiseks, pakuvad need perspektiivi väikese ja keskmise suurusega seadmete jaoks [60], [82], [88].

Otsetaaskasutus on teine olulist potentsiaali omav strateegia, kus labasid kasutatakse ilma ümbertöötlemiseta ehitus- ja infrastruktuuriprojektides, nagu elektriliinide mastid, jalakäijate sillad ja linnamööbel. Näiteks on Clipper C96 labasid kasutatud elektripostidena, (Suhail jt (2019) ehitasid 8,5-meetrise jalakäijate silla, mis vastas Eurocode standarditele; Zhang jt (2022) kasutasid LM 13.4 labasid 5-meetrise silla rajamisel) on rakendanud neid sildade ehitamisel ning Rotterdami Wikado mänguväljak on tuntud avaliku ruumi näide labade korduskasutusest. Selline lähenemine pikendab komponentide eluiga, väldib energiamahukat ümbertöötlemist ja toetab visuaalselt atraktiivsete, keskkonnamõjult madalate lahenduste loomist. Taaskasutatud labasid kasutatakse jalakäijate sildades, elektriliinide mastides ja linnamööblis, näiteks mänguväljakutes (Rotterdamis), vähendades seeläbi materjalivoogude põletamist ja

ladestamist (joonis 9). Kui labade tehniline seisukord ei võimalda nende esialgsel kujul taaskasutust, rakendatakse ümberkasutust, mille käigus kasutatakse labasid konstruktsioonelementidena näiteks elektriülekanaliinide mastides, sildade kandvates osades või elumajade ehitusprojektides, kus komposiitmaterjalid peavad taluma äärmuslikke keskkonnatingimusi. Bussipeatused, pinkide konstruktsioonid ning mänguväljakud [19], [60], [82].



Joonis 9. Komposiitmaterjalist tuuleturbiinilabade struktuursete omaduste rakendamine eriotstarbelistes ehituslahendustes: (a) istekohad linnaruumis, (b) elumajad, (c) mänguväljak [60]

Tulevikku suunatud disainis on oluline integreerida süsteemne LCA juba projekteerimisetappi, et hinnata erinevate materjalide ja konstruktsioonilahenduste keskkonnamõjusid ning kavandada turbiinikomponentide lihtsat demonteerimist ja korduskasutust. Samal ajal tuleb tugevdada ringmajanduse strateegiaid, sealhulgas ringlusesse võetud materjalide turgude arendamist, laiendatud tootjavastutuse rakendamist, parandusele ja korduskasutusele keskenduvate ärimudelite toetamist ning teadus- ja arendustegevuse rahastuse suurendamist. Tugev regionaalne taristu võib samuti ringlussevõtu määra oluliselt tõsta – näiteks Hispaaniasse, Navarra piirkonda rajatud Waste2Fiber® tehas suudab töödelda kuni 6000 tonni labamaterjali aastas ning loob üle 100 töökoha, vähendades samas oluliselt ka keskkonnamõjusid [54], [60], [82], [89]

Jäätmevoogude prognoosid näitavad vajadust süsteemsete lahenduste järele: aastaks 2030 ulatuvad labade jäätmemahud kuni 200 000 tonnini aastas ning 2050. aastaks võivad need tõusta 800 000 tonnini. Kuna ringlussevõtu määr sõltub oluliselt transpordikuludest ja logistilisest taristust, on ringluskeskuste rajamine tootmisaktiivsetesse piirkondadesse kriitilise tähtsusega, et vältida labade ladestamist ja toetada kohapealset töötlemist. Sotsiaalsest vaatenurgast näitavad uuringud tugevat avalikku toetust jätkusuutlikele EOL-lahendustele – Hollandis peab 90% vastanutest oluliseks leida tõhusaid taaskasutusviise, kuid senise praktikaga on rahul vaid 8%. Positiivsete näidetena võib esile tuua Türgis maavärina järel labadest ehitatud WTB-bH tüüpi energiatõhusad eluasemed, mis on sobilikud autonoomseks taastuenergia kasutamiseks kriisipiirkondades [60], [84], [90], [91], [92].

Tulevikuarengud nõuavad terviklikku strateegiat, mis ühendab teadus- ja arendustegevuse, ringlussevõetud materjalide turu arendamise, laiendatud tootjavastutuse rakendamise ning korduskasutusele suunatud ärimudelite edendamise. Samuti on oluline pikendada turbiinide eluiga ja lihtsustada nende hooldust, et vähendada jäätmeteket ning suurendada ressursside kasutusefektiivsust. Prognooside kohaselt tuleb 2030. aastaks utiliseerida ligikaudu 200 000 tonni labamaterjali. Labade jäätmekogus võib kasvada 800 000 tonnini aastaks 2050. Seetõttu on vajalik arendada tööstuslikke ringluskeskusi ja regionaalset logistilist taristut, et vähendada transpordikulusid ning suurendada materjalide kohapealset taaskasutust [78], [89], [93].

Lisaks keskkonnaaspektidele avalduvad elutsükli lõpus ka olulised regionaalsed ja sotsiaalsed mõjud, mis küll ei kuulu formaalse S-LCA metoodika alla, kuid täiendavad elutsükli lõppfaasi käsitlust ja aitavad hinnata ringmajanduse tegelikku toimimist praktikas. Heaks näiteks on Hispaaniasse, Navarra piirkonda rajatud Waste2Fiber® tehas, mis suudab töödelda kuni 6000 tonni labamaterjali aastas, luues üle 100 töökoha ja aidates vähendada piirkondlikku keskkonnakoormust. Uuringud näitavad, et ringlussevõtu tase on kõrgem piirkondades, kus on olemas kohalik ringlustaristu, samas kui selle puudumine sunnib omanikke ladestamise kasuks otsustama. Tundlikkuse analüüsid kinnitavad, et uute ringluskeskuste rajamine võib vähendada ladestamist kuni 15%. Sotsiaalsete mõjude osas toetab avalikkus tugevalt labade taaskasutust – näiteks Hollandis peab 90% inimestest seda vajalikuks, kuid rahulolu senise praktikaga avaldas vaid 8%. Lisaks on komposiitmaterjalide kasutamine kriisilahendustes, nagu Türgi maavärinajärgsed ajutised eluasemed, näidanud, et labade korduskasutus võib pakkuda energiatõhusaid ja autonoomseid lahendusi, millel on ka selge sotsiaalne väärtus. Samas näitavad juhtumid nagu Šotimaa, kus puuduvad ladestamise piirangud, et

poliitikameetmete puudumine võib tekitada avalikku kriitikat ja alandada usaldust taastuenergia jätkusuutlikkuse vastu [60], [89], [90], [92].

Lammutamise ja utiliseerimise käigus võib suurenda ökotoksilisuse potentsiaal (TETP, FAETP, MAETP), kuna keskkonda võivad sattuda raskmetallid ja komposiitmaterjalide laguproduktid. Need ühendid võivad püsida ökosüsteemides pikaajaliselt ning kujutada ohtu nii maismaa- kui ka veekeskkonnale. USEtox-metoodika võimaldab neid riske kvantifitseerida ja suunata keskkonnajuhtimist ohutumate jäätmekäitlusviiside suunas. Elutsükli lõpp on seega üks kõige keerukamaid faase maismaatuulikutel hindamisel, eeldades nii tehnoloogilist innovatsiooni kui ka poliitilist tahet, et luua tõhus, madala keskkonnamõjuga ja sotsiaalselt aktsepteeritud süsteem kogu taastuenergia tarneahelas [48], [62], [65].

2.2 Sotsiaalne ja sotsiaal-majanduslik elutsükli hindamine (S-LCA)

2.2.1 S-LCA ja selle mõjud

Sotsiaalne ja sotsiaal-majanduslik elutsükli hindamine (S-LCA) on hindamismeetod, mille eesmärk on tuvastada toodete ja teenuste sotsiaalsed ning majanduslikud mõjud kogu nende elutsükli jooksul, alates tooraine kaevandamisest kuni jäätmekäitluseni. Erinevalt tavapärasest elutsükli keskkonnamõjude hindamisest (E-LCA) lisab S-LCA hindamisse sotsiaalse ja majandusliku mõõtmise, keskendudes sellistele aspektidele nagu inimõigused, töötingimused, kogukondade heaolu ja ühiskondlik õiglus. S-LCA järgib ISO 14040 standardit ja UNEP-i juhiseid, hõlmates nelja etappi: eesmärgi ja ulatuse määramine, sotsiaalne elutsükli inventuur, mõju hindamine ja tulemuste tõlgendamine [94], [95], [96].

Traditsioonilistes LCA-analüüsides on sotsiaalsete aspektide käsitlemine jäänud tagaplaanile, keskendudes peamiselt keskkonna- ja majandusmõjudele. Samas rõhutavad mitmed uuringud, et sellised tegurid nagu inimõigused, töötingimused, elukvaliteet, on võrdväärselt olulised näiteks CO₂ heitega või kulutõhusus. Sellest tulenevalt on sotsiaalne elutsükli hindamine muutumas üha olulisemaks tööriistaks jätkusuutliku energiapolitika kujundamisel [94].

S-LCA hindamisel võetakse arvesse erinevaid sidusrühmi – töötajaid, kogukondi, tarbijaid ja ühiskonda tervikuna. Meetodi kaudu on võimalik tuvastada sotsiaalseid riske ja võimalusi, näiteks sunnitöö kasutamine, diskrimineerimine, tööohutusprobleemid või kogukonna vastuseis. Hindamist toetavad ka rahvusvahelised raamistikud nagu ÜRO

kestliku arengu eesmärgid (SDG), eelkõige SDG 3 (tervis ja heaolu), SDG 8 (väärikas töö) ja SDG 10 (ebavõrdsuse vähendamine) [94], [97], [96], [98].

S-LCA kasutab mitmesuguseid kvalitatiivseid ja kvantitatiivseid hindamismeetodeid, sealhulgas sotsiaalsete riskide võrdlust standardväärtustega, töö kvaliteedi hindamist, sidusrühmapõhiseid küsitlusi, valikueksperimente (CE) ja ruumilise ebavõrdsuse mõõdikuid, nagu Gini indeks. Näiteks sMV-SKPI (multimuutuja sotsiaalne võtmenäitaja) indeks võimaldab hinnata sotsiaalset aktsepteeritavust väärtusel 0 kuni 1, kaasates tegurid nagu müra, visuaalne mõju ja maavarade kaevandamine. Mitme eesmärgiga optimeerimismudelid aitavad tasakaalustada sotsiaalseid, keskkonna- ja majanduslikke kaalutlusi. Sotsiaalse aktsepteeritavuse uurimisel on kasutatud ka valikueksperimente (Choice Experiments, CE), mis võimaldavad kvantifitseerida elanike hoiakuid. Näiteks on mõõdetud majapidamiste valmisolekut maksta selle eest, et turbiinid paigaldataks kaugemale asulatest (nt 0,48–0,49 eurot iga 100 meetri lisakauguse eest). Samuti on hinnatud sotsiaalse õiguse jaotumist ruumiliselt, näiteks Gini indeksiga, mis näitab, kui ebaühtlaselt on jaotatud kasu või koormus erinevate piirkondade vahel [94], [98], [99], [100].

Maismaatuuleparkide kontekstis avalduvad sotsiaalsed mõjud eelkõige planeerimise (Eriline rõhk on hindamise varajasesse planeerimisfaasi integreerimisel, et suurendada vastavust muutuvatele sotsiaalsetele tingimustele), ehituse ja kasutuse faasides, mil tekivad kõige tihedamad kontaktid kohalike kogukondade ja tööjõuga. Projekti vastuvõetavus sõltub usaldusest, läbipaistvast kommunikatsioonist ja kogukonna kaasamisest. Pika elutsükliga energiatehnoloogiate, nagu tuuleturbiinide, puhul rõhutatakse üha enam vajadust tulevikku suunatud S-LCA järele. Muutuvad ühiskondlikud ja majanduslikud tingimused teevad staatilise hindamismudeli ebapiisavaks [98], [101].

Eestis on tuuleparkide arendamine kulgenud mitmetes piirkondades vastuoluliselt – domineerivad hirmud müra, visuaalse mõju, kinnisvarahindade languse ja elukeskkonna kvaliteedi halvenemise ees. Samal ajal on kohalike kogukondade kaasamine, läbipaistev kommunikatsioon ja õiglane hüvitamissüsteem osutunud võtmeteguriteks aktsepteeritavuse suurendamisel. Soome, Läti ja Leedu näited näitavad, et kogukondlikult suunatud toetuskeemid võivad edukalt leevendada vastuseisu ja tugevdada usaldust. Eestis aga on arutelud tuuleparkide võimalike tervise- ja keskkonnamõjude üle mõnel juhul eskaleerinud kriitikaks, mis on takistanud planeerimisprotsesse [102], [103].

Sotsiaalsete ja majanduslike mõjude kompleksne hindamine tuuleenergia projektides eeldab nii globaalse kui kohaliku konteksti arvestamist, kombineerides kvalitatiivseid ja kvantitatiivseid hindamismeetodeid. S-LCA pakub selleks üha olulisemat raamistikku [84].

Sotsiaalne õiglus ja kogukondlik kaasatus hõlmab jaotuslikku (kasud ja koormused), protseduurilist (kaasamine otsustusprotsessi) ja tunnustamisõiglust (haavatavate rühmade arvestamine). Kohalike kogukondade kaasamine mõjutab otseselt projektide aktsepteeritavust – kui konsultatsioonid on formaalsed ja sisutühjad, nagu Šotimaal Dorenelli pargi puhul, tekib vastuseis ka rahaliste hüvitiste korral. Norra Foseni juhtum, kus saami rahva õigusi eirati, tõi kaasa ülemkohtu sekkumise ning näitab kultuuriliste õiguste kesksel rollil taastuvenergeetikas ja ulatuslikud protestid, rõhutades, et isegi healuriikides tuleb sotsiaalse õiguse ja kultuuriliste õiguste arvestamine asetada keskkonna- ja majanduseesmärkidega samale tasemele. Eestis on tuuleparkide arendamine tekitanud vastuseisu, mis on seotud müra, visuaalsete häiringute ja kinnisvarahindade languse hirmuga. Aktsepteerimist aitab suurendada läbipaistev kommunikatsioon ja õiglane kompensatsioon [84], [94], [98], [104].

Paljud planeerimismudelid keskenduvad endiselt peamiselt tehnilistele ja majanduslikele näitajatele, jättes tähelepanuta kohalike elanike visuaalse tajutavuse ja sotsiaalse sidususe, kuigi sisuline osalus otsustusprotsessides aitab ennetada konflikte ja suurendada projektide legitiimsust. Näiteks Šotimaal Dorenelli tuulepargi laienduse puhul peeti avalikku konsultatsiooni formaalseks ja sisutühjaks, mistõttu projektiga ei lepitud, isegi vaatamata pakutud rahalistele hüvitistele. Sarnaseid mustreid on täheldatud laiemalt. Näiteks Suurbritannias lükati aastatel 1991-2017 tagasi 52% maismaa tuuleenergia projektide taotlusest. Peamiseks põhjuseks on ilmnunud kohalike elanike vastuseis. Sarnased probeelmid on ilmnunud ka Ameerika ühendriikides, Kanadas ja teistes riikides. Sellised konfliktid põhjustavad projektide viivitusi, toovad kaasa lisakulusid ning aeglustavad kliimaeesmärkide saavutamist [84], [94], [94], [105].

Ebavõrdne kasu jaotus ning hüvitamissüsteemid on sagedased konfliktiallikad. Maaomanikud võivad saada kõrget tulu, samas kui naabruses elavad inimesed kogevad vaid häiringuid (visuaalne häiring, kinnisvara hinnalangus) ilma hüvitisteta. Seetõttu on oluline õiglane ja läbipaistev hüvitamissüsteem. MacIntyre'i tuulepargi näide Austraaliast, kus maaomanikud said kuni 40 000 AUD aastas, illustreerib sellise ebavõrdsuse potentsiaalset mõju sotsiaalsele aktsepteerimisele [84], [104].

Töötingimused ja töö kvaliteet mõjutavad töötajate heaolu ja energiatootmise sektori sotsiaalsed jalajälge. Töötingimuste hindamisel arvestatakse palga, ohutuse, haridustaseme ja kvalifikatsiooninõuetega. Maismaatuuleparkides on tööohutus ja töötajate kvalifikatsioon üldiselt parem kui avamerel, ent palgad madalamad ja ametiühingute puudumine probleemiks. Tööjõu tootlikkuse kasv võib küll kulusid vähendada, kuid põhjustada tööintensiivsuse suurenemist ja stressi [94], [106].

Kultuuri ja identiteedi kahjustamine võib tekkida, kui tuulepargid mõjutavad pühapaiku või ajaloolisi ning traditsioonilisi maastikke. Kolumbias La Guajira piirkonnas peatas Wayuu kogukonna vastuseis tuulepargi võrguühenduse, kuna see ohustas nende traditsioonilist eluviisi; sarnane kultuuriline konflikt ilmnis ka Norra saamide juhtumis (Norra juhtub kinnitab sotsiaalset haavatavust isegi healuriikides). Lisaks ilmnevad sageli kogukondade seesmised lõhed, kui osa elanikke on valmis projektiga nõustuma (rahalise hüvitise või teenuse nimel), teised aga tajuvad seda kultuurilise väärtuste kahjustamisena [104], [107].

Materjalide sotsiaalne jalajalg sõltub tuuleturbiinide komponentide päritolust. Näiteks vase ja haruldaste muldmetallide (nt neodüüm) kasutus võib suurendada inimõiguste rikkumise riski, eriti kui need pärinevad Kongo või Hiina tarnijatelt. See toob esile vajaduse eelistada keskkonna- ja sotsiaalsõbralikumaid alternatiive, nagu plastvahtplast või madala süsinikusisaldusega teras. Materjalide sotsiaalne jalajalg sõltub tuuleturbiinide komponentide päritolust. Näiteks vase ja haruldaste muldmetallide (nt neodüüm) kasutus võib suurendada inimõiguste rikkumise riski, eriti kui need pärinevad Kongo või Hiina tarnijatelt. Lisaks on täheldatud lapstööjõu kasutust ja inimõiguste rikkumisi, eriti koobalti puhul Kongo DV-s. Samuti viitavad uuringud sellele, et 40% Hiina neodüümitootmisest toimub reguleerimata allikatest, mis viitab puudulikule järelevalvele ja seadusandlusele. Sotsiaalsed ja keskkonnaohtlikud mõjud ilmnevad ka muude kriitiliste toorainete, näiteks mangaani, molübdeeni ja koobalti puhul, mille kaevandamisel tekib suur kogus heitmeid (nt mangaani puhul 6 tonni CO₂ ühe tonni kohta) ning mis on seotud veereostuse, kohalike kogukondade ümberasustamise ja looduslike elupaikade kadumisega. Näiteks Lõuna-Aafrika kroomi- ja platinaaladel on dokumenteeritud joogiveevarude saastumist ja majanduslikku haavatavust, mis on põhjustanud pudelivee kallinemise ja suurendanud ebavõrdsust [59], [60], [94], [101].

Usaldus ja kommunikatsioon kohalike kogukondadega on kriitiline tegur projekti vastuvõetavuse kujundamisel. Austraalia MacIntyre'i projektis põhjustas vähene

kommunikatsioon ja kasu ebavõrdne jaotus usalduskriisi. Usaldus sõltub läbipaistvast infovahetusest ja kultuuriliste ökosüsteemiteenuste arvestamisest [84], [94], [98].

2.2.2 Majanduslik mõju

Majanduslik mõju hõlmab tuuleenergia projektide tasuvust ja mõju kohalikule majandusele. Maismaatuuleparkide LCOE (*Levelized Cost of Electricity*) jääb üldiselt vahemikku 0,02–0,05 \$/kWh, olles madala CapEx-i ja OpEx-i tõttu konkurentsivõimeline. Digitaalsed lahendused, nagu kaugseire ja UV-liimid, vähendavad hoolduskulusid. Kohalikku majandust toetavad töökohad, omavalitsuste maksutulud ja kasvav energiasõltumatus. Kinnisvarahindade ja turismi mõju on kontekstipõhine, varieerudes negatiivsest positiivseni. Taaskasutus ja jäätmekäitlus on maismaal lihtsamini teostatav, võimaldades ringmajandust. Poliitilised ja tururiskid, sealhulgas toetuste ebastabiilsus, võivad mõjutada investeeringuid, kuid paindlik ja läbipaistev poliitika aitab vähendada ebakindlust [108], [109].

Tööjõu tootlikkuse ja kulude arengut iseloomustab trend, kus automatiseerimine, materjalihindade muutused, haldus- ja finantskulude vähenemine ning paigaldatud võimsuse kasv aitavad märgatavalt vähendada tuuleturbiinide tootmis- ja paigalduskulusid. Suuremad tootmismahud võimaldavad rakendada mastaabisäästu ja optimeerida tarneahelaid. Samas võib tööjõu kasvav tootlikkus suurendada tööintensiivsust ja tekitada survet tulemuslikkusele, eriti väiksemates projektietappides [106].

Investeeringutasuvust hinnatakse finantsnäitajate kaudu nagu netoväärtus (NPV), sisemine tasuvusmäär (IRR) ja tasuvusperiood (PBP), mis kinnitavad maismaatuuleparkide head tasuvust. Tüüpiliselt jäävad CapEx väärtused umbes 1750 \$/kW ja OpEx ligikaudu 41 \$/kW aastas. Maismaatuuleparkide kulustruktuur on stabiilsem ja paremini prognoositav, kuna looduslikud tingimused on paremini prognoositavad [108], [109].

Operatsiooni- ja hoolduskulud moodustavad 5–20% kogu elutsüklikuludest ning hõlmavad kaugjälgimist, kindlustust, haldustasusid ja maamakseid. Eriti tuleb arvestada ootamatute rikete suure osakaaluga, mis võib ulatuda kuni 65% kõigist hoolduskuludest; mõnel juhul võivad need kulud ulatuda kuni 30 000 dollarini turbiini kohta aastas. Labade sagedased rikked (485–603 eurot aastas) ja kriitiliste komponentide (inverterite, käigukastide) vananemine tõstavad kulusid pärast garantiiperioodi. Uuenduslikud remondilahendused, nagu UV-kõvastuvad liimid, võivad vähendada tööaega (4 tunnilt 20-le minutile) ja -kulusid kümnekordselt. Digitaalne

kaugseire ja ennetav hooldus vähendavad seisakuid, kuid nõuavad suuri alginvesteeringuid [93], [108], [110], [111].

Tuuleparkide mõju kinnisvara väärtusele ja turismile sõltub tugevalt piirkondlikust kontekstist ning kogukonna hoiakutest. Mõnes piirkonnas võib kinnisvara väärtus langeda visuaalse mõju või müra tõttu, kuid teiste näidete põhjal on täheldatud positiivset mõju tänu infrastruktuuri parendamisele ja piirkonna rohelse maine tugevdamisele. Sarnane vastandlikkus ilmneb ka turismisektoris – visuaalse häiringu kõrval võib roheenergia maine suurendada küllastatavust [84].

Kohaliku majanduse vaatenurgast loovad tuulepargid töökohti ehitus- ja käitusetappides, toovad maaomanikele ja omavalitsustele rendi- ja maksutulu ning vähendavad sõltuvust imporditavast energiast. Keskmiselt loob üks megavatt paigaldatud võimsust 0,395 töökohta kogu elutsükli jooksul [94], [108].

Komponentide taaskasutus ja jäätmekäitlus on maismaaprojektides logistiliselt lihtsamini korraldatavad kui avamerel, mis muudab need kuluefektiivsemaks ja loob paremad eeldused standardiseeritud ringmajandusmudelite kasutamiseks. Tõhus ressurside ringlus aitab samas vähendada keskkonnamõjusid ja tugevdada majanduslikku jätkusuutlikkust [19], [108].

Poliitilised ja tururiskid hõlmavad toetuste ebastabiilsust, elektri hinna volatiilsust ja regulatiivseid muutusi. Eestis on arutlusel diferentseeritud hinnapiiride kehtestamine, mis võib suurendada investeeringute usaldusväarsust. Samal ajal mõjutab ebakindlus toetuste osas projektide rahavooge ning võib pärssida investorite huvi. Mitmes riigis, sealhulgas Saksamaal ja Ühendkuningriigis, on sotsiaalne vastuseis ja õigusalsed vaidlused viinud tuulepargi projektide viibimiste või tagasilükkamiseni, millega kaasnevad märkimisväärsed viivituskulud ja kliimaeesmärkide saavutamise ohustamine [94], [112].

Lisaks keskkonnamõjudele hinnatakse tuuleenergia projektide majanduslikku tasuvust süsiniku- ja energia tasuvusperioodi kaudu. Süsiniku tasuvusperiood (*carbon payback period*) näitab, kui kiiresti suudab tuuleturbiin oma toodetud puhta energiaga tasakaalustada kogu ehituse, paigalduse ja käitamise käigus tekkinud süsinikuemissioonid. Maismaatuulikutel puhul on see keskmiselt umbes seitse kuud, samas kui nende tööiga ulatub 20-25 aastani, mis võimaldab pikaajalist keskkonnakasut. Sarnane näitaja on energiatasuvusperiood (*energy payback time*), mis viitab ajale, mille jooksul turbiin toodab tagasi kogu enda elutsükliks kulunud energia. Näiteks hinnati

kahte 2 MW maismaatuulikutüüpi turbiini, kus torukujulise torniga mudeli tasuvusaeg oli 5-6 kuud ja võrestorniga variandil vaid 4 kuud – erinevus tulenes kasutatud konstruktsioonimaterjalidest [35].

Majandusliku tasuvuse hindamisel rakendatakse ka tundlikkuse analüüsi, mille abil hinnatakse, kuidas mõjutavad lõpptulemust sellised tegurid nagu intressimäärad, elektri hind või hoolduskulud. See võimaldab tuvastada võtmetegureid, mille muutus võib mõjutada projekti kogukulu. Oluline majandusnäitaja on LCOE (Levelized Cost of Energy), mis väljendab kogu elutsükli jooksul toodetud elektrienergia keskmist maksumust. Maismaatuulikute LCOE jääb tavaliselt vahemikku 0,05 \$/kWh ning Hiinas võib see langeda alla 0,03 \$/kWh. Analüüsid näitavad, et LCOE-d on võimalik vähendada kuni 35%, kui rakendada efektiivseid tootmisprotsesse, suurendada netootlikkust ja edendada infrastruktuuri ning materjalide taaskasutust. Samas võivad majanduslikku tasuvust mõjutada süsteemipõhised piirangud, näiteks võrguühenduste viivitused ja taastuenergia tootmise vahelduvus, mis võivad suurendada ebakindlust ja keerukust investeringute planeerimisel [35], [84], [108].

3. PRAKTILINE OSA

Praktilises osas hinnatakse Saarde tuulepargi näitel maismaatuuliku elutsükli keskkonna-, majanduslikke ja sotsiaalseid mõjusid. Selleks kombineeritakse kolm hindamismeetodit: elutsükli hindamine (LCA), sotsiaalne elutsükli hindamine (S-LCA) ja keskkonnamõjude strateegiline hindamine (KSH). Mitmetasandiline lähenemine võimaldab analüüsida tuulepargi mõju nii lokaalsel kui globaalsel tasandil, sidudes tehnilised andmed kogukondliku tajuga.

3.1 Materjal ja metoodika

3.1.1 Maismaa tuulepargi kirjeldus: Saarde tuulepark

Käesoleva töö praktilise osa aluseks on Saarde tuulepark (joonis 10), mis asub Edela-Eestis Pärnumaal Saarde vallas, Kamali ja Tõlla külade piirkonnas. Tuulepark kuulub Utilitas Wind OÜ portfelli ning alustas elektritootmist 2023. aastal. Objekt valiti uurimuse aluseks, kuna selle rajamisele eelnes ulatuslik keskkonnamõjude strateegiline hindamine (KSH) ning see on esimene suurem maismaatuulepark Eestis pärast kümnendipikkust pausi [113].



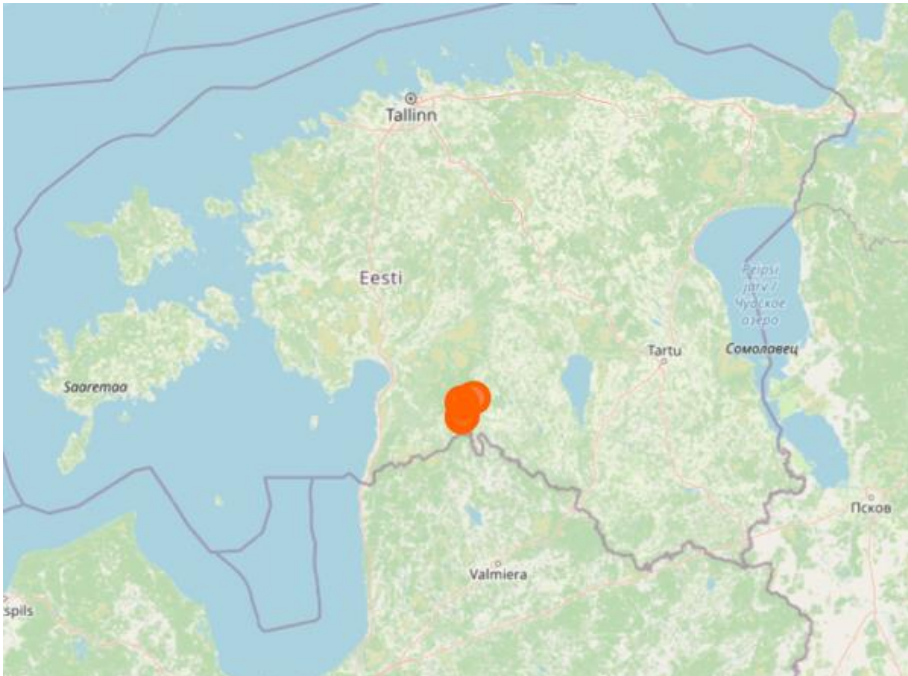
Joonis 10. Saarde tuulepark [114]

Tuulepark koosneb üheksast Vestas V150 (joonis 11) tüüpi tuulikust, mille nimivõimsus on 4,3 MW, andes koguvõimsuseks 39 MW. Iga torni kõrgus on 155 m, rootori tipu kõrgus 230 m ja rootori diameeter on 150 m. Tuulikud on paigutatud aladele, kus inimtegevus (näiteks: põllumajandus, teed või muud rajatised) on juba varem piirkonda mõjutanud ning ka looduskooslused on aja jooksul nendega kohandunud. Selline asukoha valik aitab minimeerida täiendavat keskkonnamõju ja piirata mõju senistele ökosüsteemidele [114], [115].

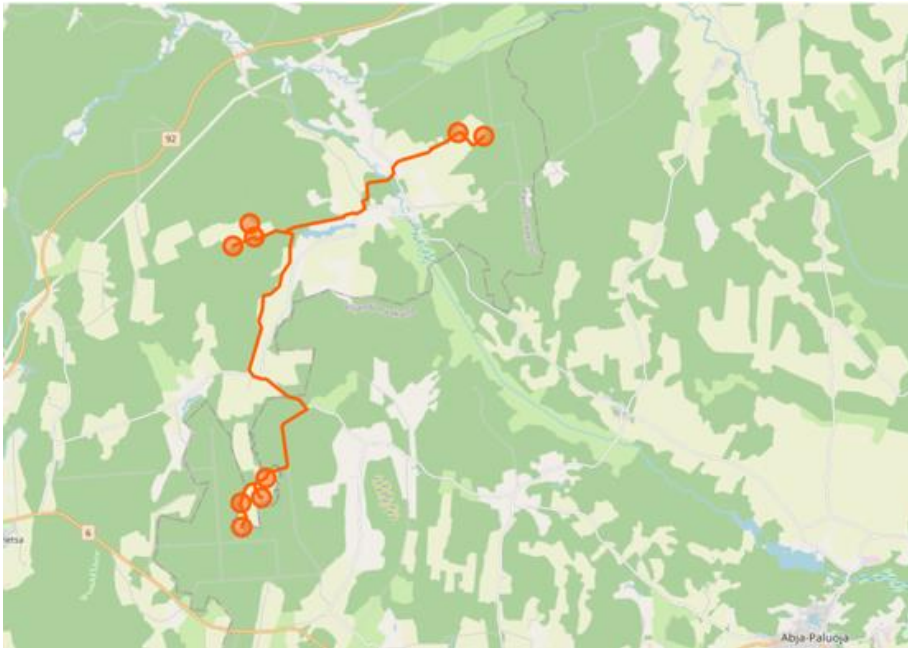


Joonis 11. Vestas tuuleturbiin [116],[117]

Tuulepargi ehitus toimus aastatel 2022-2023. Kasutusload väljastati 2023. aasta detsembris ning 15. septembril 2024 avati ametlikult Eesti esimene Utilitas Wind OÜ maismaatuulepark (joonis 12). Saarde tuulepark jaotub kolmeks gruppiks: suurim grupp nelja tuulikuga asub Neitsipõllu ja Vana-Neitsi maaüksustel, kolme tuulikuga grupp paikneb Kurmi-Merdi maaüksusel ning väikseim kahe tuulikuga grupp asub Kera ja Laane maaüksustel (joonis 13) [44], [115].



Joonis 12. Saarde tuulepargi asukoht [118]



Joonis 13. Tuuleparkide asetus [118]

Projekti arendajaks oli OÜ Tuulepealne Maa, kuuludes Utilitase kontserni. Tuulikute tarnimiseks sõlmiti leping maailma juhtiva tuulikutootja Vestas Wind Systems A/S. Tuulikute komponendid toodi Eestisse meritsi Hispaaniast, Taanist ja Indiast. Paigaldustööd algasid 2023. aasta mais ning ehitustööd (joonis 14) viisid läbi Nordecon Betoon, Verston ja Connecto, koostöös Eleringiga, kelle abiga rajati ka uus alajaam [44], [117], [119].



Joonis 14. Komponentide transport ja saabumine sadamasse ning ehitustööd [119], [120]

Investeeringu kogumaht on üle 60 miljoni euroni, millest 26 miljonit investeeriti 2022. aastal ja 32,7 miljonit 2023. aastal. Prognoositav aastane elektritoodang on 135 GWh, mis katab enam kui 40 000 majapidamise aastase elektritarbimise, hõlmates kogu Pärnumaad ja osa ümbritsevatest piirkondadest. Elektritootmist täisvõimsusel alustatakse 2024. aasta teisel poolel [114], [117], [121]. Lisaks tehnilistele aspektidele sõlmiti seadmetarnijaga 30-aastane täisteenindusleping, mis tagab seadmete töökindluse ja hoolduse kogu elutsükli jooksul [114].

3.1.2 Kasutatud meetodid

Praktilise osa eesmärk on hinnata Saarde tuulepargi keskkonna-, majanduslikke ja sotsiaalseid mõjusid, kasutades kolme erinevat lähenemist, sh nende tulemusi omavahel võrreldes ja analüüsid – keskkonnamõjude strateegiline hindamine (KSH), elutsükli hindamine (LCA, SimaPro) ja sotsiaalse elutsükli hindamine (S-LCA).

1. KSH

Töö autor analüüsis „Saarde valla tuulikuparkide P14, P15, P16 detailplaneeringute keskkonnamõju strateegilise hindamise“ (KSH) lõpparuannet ning sellega seotud täiendavaid uuringuid, sealhulgas nahkhiirte ja linnustiku uuringuid kõigi kolme arendusala kohta. Samuti käsitleti eraldi läbi viidud täiendavat mürauringut. Kõigi analüüsitud dokumentide alusel koostati kokkuvõtted ning tuvastati peamised keskkonnaspektid, mida võrreldi LCA ja S-LCA tulemustega.

KSH analüüs tugines dokumendipõhisele sisuanalüüsile, mille käigus hinnati nimetatud strateegilise hindamise aruande ja lisauuringute sisu, ulatust ning järeltulemusi. Analüüsi fookuses olid peamised keskkonnaaspektid: müra, infraheli, varjuilumise, looduskoosluste seisund, visuaalne mõju ja sotsiaalmajanduslikud tegurid. Nende kaudu tuvastati strateegilises hindamises esile toodud mõjude laad ja ulatus ning võrreldi neid teiste hindamismeetoditega. Selline lähenemine võimaldas esile tuua rakendatud meetodite tugevused ja piirangud ning kaardistada olulisemad keskkonnariskid planeeringuala kontekstis.

Saarde tuulepargi strateegiline keskkonnamõju hindamine (KSH) viidi läbi vastavalt Planeerimisseadusele (RT I, 26.02.2015, 3) ja Keskkonnamõju hindamise ja keskkonnajuhtimissüsteemi seadusele (RT I 2005, 15, 87). [122], [123] KSH algatati 2017. aastal ning hindamisaruanne valmis 2020. aasta jaanuaris. Hindamisprotsessi viisid läbi Skepast & Puhkim OÜ ja Hendrikson & Ko eksperdid. Hinnati võimalikke keskkonna-, tervise- ja sotsiaalmajanduslikke mõjusid kolmes arenduspiirkonnas (P14,

P15, P16). Analüüsis kasutati modelleerimisprogramme, näiteks WindPRO, samuti viidi läbi väliuuringutele ning korraldati avalikke arutelusid [124].

2. LCA

Saarde tuulepargi keskkonnamõjude hindamiseks viidi läbi elutsükli hindamine (LCA) SimaPro 9.5 tarkvara abil. SimaPro on maailmas üks levinumaid ja kasutatavamaid elutsükli modelleerimise ja hindamise tarkvarasid, mis sai avalikkusele kättesaadavaks 1990. aastal Taani ettevõtte poolt. [125] Programmiga on võimalik modelleerida ja analüüsida erinevate toodete ja teenuste olemusringe kaasates kõiki toote/teenuse elutsükli etappe, mõõta kogu elutsükli etappide keskkonnamõjusid ning ühtlasi identifitseerida kõige problemaatilisemad kohad. Programmi on integreeritud mitmeid andmebaase ja hindamismeetodeid, mida on võimalik kasutada toote või teenuse kogu elutsükli, süsiniku ja/või vee jalajälje arvutamiseks, toodete ökodisainis, keskkonnadeklaratsiooni koostamisel, keskkonnaaruandluses ja ka keskkonnategevuse tulemuslikkuse seires jms.

Analüüs põhines IMPACT 2002+ v2.15 hindamismetoodikal, mis ühendab kesktaseme (midpoint) mõjukategooriad ning lõpp-punkti (endpoint) kahjukategooriad, võimaldades keskkonnamõjude kompleksset ja koondatud hindamist kogu süsteemi elutsükli ulatuses. Mõjukategooria on keskkonnamõju liik, millega on võimalik seostada uuritava süsteemi elutsükli inventuuranalüüsi tulemusi. Elutsükli hindamise inventuuranalüüsi tulemused klassifitseeritakse mõjukategooriatesse nende mõju-indikaatorite põhjal. [126] Mõjukategooriate tulemused korrutatakse läbi tunnusteguritega, et leida kahjukategooriate väärtused. Kõik mõjukategooriate tulemused on väljendatud referentsühikutes, mis on omavahel võrreldavad ning mis on seotud nelja kahjukategooriaga: 1) inimtervis, 2) ökosüsteemide kvaliteet, 3) kliimamuutused ja 4) maavarad. Käesolevas töös elutsükli hindamiseks kasutatud mõjukategooriad ja vastavad ühikud on esitatud tabelis 2.

Tabel 2. Impact 2002+ mõjukategooriad, nende ühikud ja seotud kahjukategooriad

Mõjukategooria eesti keeles	Mõjukategooria inglise keeles	Ühik	Seotud kahjukategooria
Kantserogeensed ühendid	<i>Carcinogens</i>	kg C ₂ H ₃ Cl ekv õhku	Inimtervis (DALY ¹)
Mittekantserogeensed ühendid	<i>Non-carcinogens</i>	kg C ₂ H ₃ Cl ekv õhku	Inimtervis (DALY)
Anorgaaniliste ühendite mõju hingamisteedele	<i>Respiratory inorganics</i>	kg PM _{2.5} ekv õhku	Inimtervis (DALY)
Ioniseeriv kiirgus	<i>Ionizing radiation</i>	Bq C-14 ekv õhku	Inimtervis (DALY)
Osoonikihi hõrenemine	<i>Ozone layer depletion</i>	kg CFC-11 ekv õhku	Inimtervis (DALY)
Orgaaniliste ühendite mõju hingamisteedele	<i>Respiratory organics</i>	kg C ₂ H ₄ ekv õhku	Inimtervis (DALY); ökosüsteemide kvaliteet (PDF m ² /a)
Vesikeskkonna ökotoksilisus	<i>Aquatic ecotoxicity</i>	kg TEG ⁴ ekv vette	Ökosüsteemide kvaliteet (PDF m ² /a) ²
Maapinna ökotoksilisus	<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	kg TEG ekv pinnasesse	Ökosüsteemide kvaliteet (PDF m ² /a)
Vesikeskkonna eutrofeerumine	<i>Aquatic eutrophication</i>	kg PO ₄ ekv vette	Ökosüsteemide kvaliteet (PDF m ² /a)
Vesikeskkonna hapestumine	<i>Aquatic acidification</i>	kg SO ₂ ekv vette	Ökosüsteemide kvaliteet (PDF m ² /a)
Maapinna eutrofeerumine / hapestumine	<i>Terrestrial acidification / nutrification</i>	kg SO ₂ ekv õhku	Ökosüsteemide kvaliteet (PDF m ² /a)
Maakasutus	<i>Land occupation</i>	m ² haritavat maad/a	Ökosüsteemide kvaliteet (PDF m ² /a)
Globaalne soojenemine	<i>Global warming</i>	kg CO ₂ ekv õhku	Kliimamuutused (kg CO ₂ ekv)
Taastumatud energiaallikad	<i>Non-renewable energy</i>	MJ või kg toornafta ekv (860 kg/m ³)	Maavarad (MJ)
Maavarade kaevandamine	<i>Mineral extraction</i>	MJ või kg Fe ekv	Maavarad (MJ), Inimtervis (DALY ³)

Impact 2002+ meetodi loojad soovivad analüüsida kõiki kategooriaid eraldiseisvalt. Siiski on võimalik kõikide kahjukategooriate tulemused ka kokku liita (esitada tulemused

¹ DALY – ingl *Disability-Adjusted Life Years*. Kasutatakse inimtervise hindamisel, mis iseloomustab haiguse raskusastet nii enneaegse surma kui ka morbiidsuse ehk halvendatud elukvaliteedi läbi. Näiteks väärtus 3 DALY-t tähendab, et terve populatsiooni peale kaotatakse 3 aastat.

² PDF·m²·a – lühend ingl *Potentially Disappeared Fraction of Species* ehk potentsiaalselt kaduvate liikide osakaal ruutmeetri kohta ühes aastas. Kasutatakse ökosüsteemide kvaliteedi hindamisel. Näiteks väärtusega 0,2 PDF m²a tähendab, et maapinna ühel ruutmeetril võib potentsiaalselt hävineda ühe aastaga 20% selle liikidest.

³ DALY – ingl *Disability-Adjusted Life Years*. Kasutatakse inimtervise hindamisel, mis iseloomustab haiguse raskusastet nii enneaegse surma kui ka morbiidsuse ehk halvendatud elukvaliteedi läbi. Näiteks väärtus 3 DALY-t tähendab, et terve populatsiooni peale kaotatakse 3 aastat.

öko-punktides (Pt), kasutades normaliseerimist ja kaalumist. Normaliseerimine ja kaalumine loovad võimaluse erinevate hoonekomponentide ja faaside keskkonnamõjude omavaheliseks võrdlemiseks. Mõjude normaliseerimine toimub kas mõju- või kahjukateooriate tasemel. Tulemuste normaliseerimiseks kasutatakse taustsüsteemi, mis väljendab keskmise eurooplase poolt tekitatud mõju igale kahjukateooriale. Antud väärtusi väljendatakse ökopunktides (Pt), mis esindab ühe inimese keskmistatud mõju antud kahjukateooriale Euroopa piirides ühes aastas. Seetõttu on ka Impact 2002+ meetod mõeldud kasutamiseks eelkõige süsteemidel, mis asuvad Euroopa piirides – sel juhul on taustandmed ning saadud tulemused kõige täpsemad. Impact 2002+ meetodis on kaalumistegur kõikidele kahjukateooriatele võrdne (=1).

Käsitletud süsteemi piirid hõlmasid kolme peamist komponenti: tuulegeneraatorite tootmine ja paigaldus (üheksa Vestas V150 tuulikut, 4,5 MW), elektrivõrguühenduste rajamine üheksa tuuliku jaoks ning suure võimsusega elektrienergia tootmine Eestis. Süsteemi fookus oli tuulepargi 25-aastaselt kavandatud elutsükli.

LCA sisendandmed põhinesid Ecoinvent 3.8 andmebaasil, kus valiti olemasolevate protsesside seast need, mis kõige täpsemalt kirjeldasid Saarde tuulepargi tehnoloogilisi lahendusi (sh teras, betoon, vask, plastid, komposiitmaterjalid, elektrilised komponendid ja transport). Vajadusel tehti kohandusi Eesti oludele vastavaks, sealhulgas elektritootmise emissioonitegurite ja logistiliste kauguste osas. Ecoinvent andmebaas on välja töötatud *Swiss Centre for Life Cycle Inventories* poolt ning see on üks ulatuslikemaid rahvusvahelisi andmebaase LCA jaoks, mis sisaldab järjepidevaid, kvaliteetseid ja ühtseid andmeid elutsükli hindamise jaoks.

Valitud IMPACT 2002+ meetodika võimaldas siduda detailse keskkonnamõjude analüüsi strateegilise, koondtaseme hindamisega, võimaldades võrrelda mõju erinevate süsteemikomponentide vahel ning luua aluse tuuleenergia keskkonnateadlikuks planeerimiseks. Meetodika valik põhines selle teaduslikul aktsepteeritusel ning võimekusel arvestada erinevat liiki keskkonnakoormustega nii lokaalses kui globaalses kontekstis.

3. Sotsiaalse elu tsükli hindamine (S-LCA)

Saarde tuulepargi sotsiaalse mõju hindamiseks viidi läbi sotsiaalse elutsükli hindamine (S-LCA) rakendus, mille keskmes oli struktureeritud elanikkonnaküsitlus. S-LCA meetod lähtub rahvusvahelistest suunistest (UNEP/SETAC 2020) ning võimaldab hinnata toote või teenuse kogu elutsükli jooksul avalduvaid sotsiaalseid ja sotsiaalmajanduslikke mõjusid erinevatele sidusrühmadele. Käesolevas töös keskenduti otseselt mõjutatud

kohalikule kogukonnale, rakendades kvalitatiivsete ja kvantitatiivsete elementidega kombineeritud küsitlust.

Küsitlus (vt Lisa 1) loodi Google Formsi keskkonnas ning avaldati autori isiklikul sotsiaalmeediakanalil (Instagram) ning postitati Saarde valla kogukonna Facebook gruppi. Küsimustik oli avatud kahe nädala vältel (2.-16. mai) ning vastamiseks suunatud inimestele, kelle elukoht jääb 10 km raadiusesse Saarde tuulepargist. Küsitlusele vastas kokku 37 inimest. Vastanute arv võimaldas kvalitatiivses raamistuses tuvastada peamisi korduvaid hoiakuid ja kogukondlikke narratiive.

Küsimustik oli struktureeritud nelja põhimõõtmel alusel, mis on kooskõlas S-LCA suuniste ja sotsiaalse mõju võtmvaldkondadega:

1. Igapäevaelu ja kogukondlik heaolu;
2. Keskkonna- ja tervise mõjude tajumine;
3. Majanduslik mõju ja hüvitusmehhanismide hinnang;
4. Sotsiaalsed suhted, usaldus ja osalusprotsesside kogemus.

Küsitluses kombineeriti kvantitatiivseid valikvastuseid (hinnangulised protsendid, sagedusjaotused) avatud küsimustega, mille eesmärk oli koguda kvalitatiivset sisendit elanike subjektiivsete hinnangute, väärtushoiakute ja tunnetuslike kogemuste kohta. Selline lähenemine võimaldas integreerida statistilisi sagedusi sisuliste tsitaatide ja sotsiaalse konteksti tõlgendamiseks.

Pärast vastuste laekumist viidi läbi temaatiline sisuanalüüs, mille käigus rühmitati sarnase sisuga vastused kokku. Kvalitatiivse analüüsi eesmärgiks oli tuvastada sotsiaalse aktsepteeritavuse võtmetegurid ning kirjeldada, kuidas kogukond tajub tuulepargi mõju kohalikule elanikkonnale, tervisele ja sotsiaalsele sidususele. Kvantitatiivsed andmed esitati toetavalt sagedusprotsendina ja valitud visuaalsete diagrammidena, et rõhutada levinumaid hoiakuid.

Lõpuks võrreldi S-LCA tulemusi paralleelselt läbi viidud elutsükli hindamise (LCA) ning keskkonnamõjude strateegilise hindamise (KSH) tulemustega, et tuvastada meetodiliste lähenemiste ühis- ja erijooned ning luua mitmetasandiline arusaam tuulepargi tegelikust sotsiaalsest ja keskkondlikust jalajäljest.

3.2 Tulemused ja analüüs

3.2.1 Simapro hindamistulemused

Karakteriseerimistulemused näitavad selgelt, et kogu elutsükli suurim keskkonnamõju tuleneb tuulikute tootmis- ja paigaldusetapist. See etapp avaldab kõigis 15 keskkonnamõju kategoorias suurimat mõju, viidates sellele, et tooraine kaevandamine, materjalide töötlemine ning energiamahukad tootmisprotsessid on kogu süsteemi peamised koormust tekitavad allikad (joonis 15 ja tabel 3). Kõige enam on selle etapi mõju domineeriv kanterogeensete ainete, osoonikihi hõrenemise, hingamisteid kahjustavate orgaaniliste ühendite, globaalse soojenemise ja taastumatute energiaallikate kasutuse kategooriates.

Tabel 3. Tuulepargi elutsükli faaside suhteline osakaal erinevates keskkonnamõju kategooriates karakteriseerimistulemuste põhjal (%)

Mõjukategooria	Võrguühenduste loomine/Ehitus-etapp (%)	Maismaatuuliku (komponentide) tootmine (%)	Elektritootmine (%)
Kantserogeensed ühendid	18,2913	100	12,3528
Mittekantserogeensed ühendid	39,6299	100	14,575
Anorgaaniliste ühendite mõju hingamisteedele	23,49	100	12,8984
Ioniseeriv kiirgus	19,1504	100	12,5449
Osoonikihi hõrenemine	14,9546	100	12,181
Orgaaniliste ühendite mõju hingamisteedele	11,2497	100	11,9627
Veekeskonna ökotoksilisus	34,2132	100	14,019
Maapinna ökotoksilisus	32,6059	100	13,8454
Maapinna eutrofeerumine/hapestumine	23,0784	100	12,8607
Maakasutus	20,335	100	12,5652
Vesikeskkonna hapestumine	30,712	100	13,655
Vesikeskkonna eutrofeerumine	38,4508	100	14,4729
Globaalne soojenemine	11,0068	100	11,644
Taastumatud energiaallikad	12,1269	100	11,8045
Maavarade kaevandamine	40,678	100	14,6815

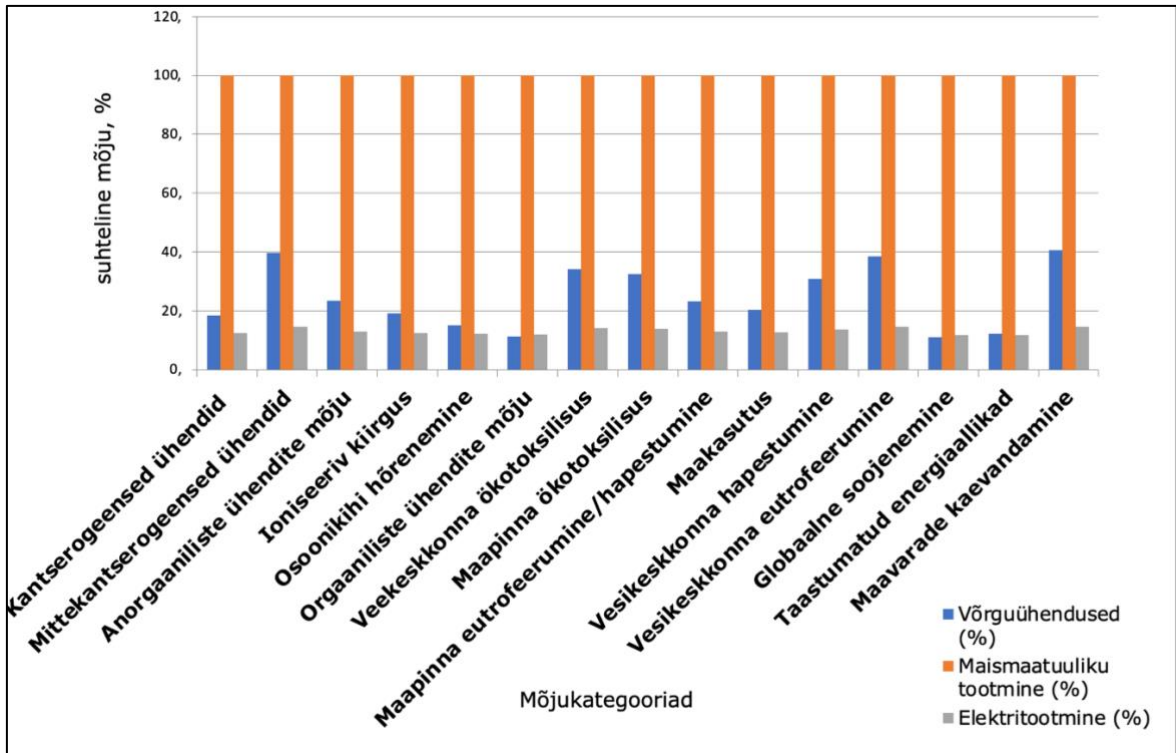
Tootmisetapi mõju on nimetatud kategooriates 100%, mis näitab selgelt, et isegi taastuvenergiasüsteemide puhul pärineb suurim keskkonnakoormus just materjalide tootmise ja töötlemise ahelast, mitte süsteemi kasutusetapist. Võrreldes sellega on tuulikute elektrivõrguga ühendamise ning opereerimise etappide mõju oluliselt väiksem, jäädes enamikes kategooriates ligikaudu 11,4% tasemele tootmisetapi mõjust. Kõige madalam keskkonnamõju avaldub elektritootmise faasis, mis kinnitab tuuleenergia väikest süsinikujalajälge ja madalat ressursside kasutust eksploatatsiooniperioodil. Suurimad erinevused võrguühenduse ja elektritootmise mõju vahel ilmnevad näiteks kantserogeensete ainete (vastavalt 18,3% ja 12,4%) ning maavarade kaevandamise (vastavalt 40,7% ja 14,7%) kategooriates. Seega on just toormemahukus, mitte energia tootmine ise, tuuleenergia keskkonnamõjude kujunemisel määravaks teguriks.

Võrguühenduse loomisel, mis hõlmab kaablite, liitumispunktide ja maa-aluste ühenduste rajamist, avaldub mitmes keskkonnakategoorias samuti märgatav mõju. Eriti oluliseks kujunevad mittekantserogeensete ainete emissioon (39,6%), vesikeskkonna eutrofeerumine (30,7%), maavarade kaevandamine (40,7%) ning maapinna- ja veekeskonna ökotoksilisus (34,2%). Need mõjud tulenevad eelkõige taristuehituses kasutatavate materjalide – nagu betoon, metall, plast, intensiivsest kasutusest, millega kaasnevad ulatuslikud loodusressursside ammutamised ning toksiliste ühendite emissioonid keskkonda. Ehkki tootmisfaas domineerib, näitavad need tulemused, et võrguühendusel on oluline roll akumulatuurivates keskkonnamõjude kategooriates. Selliseid mõjusid tuleks arvesse võtta eelkõige suuremahuliste ühenduste planeerimisel ja madalama jalajäljega lahenduste eelistamisel.

Kõrgepingelise elektri tootmise etapp, kuigi protsentuaalselt väikseima mõjuga, annab siiski mõõdetava panuse mitmesse keskkonnakategoorias. Peamiselt paistavad silma mittekantserogeensed ühendid (14,6%), vesikeskkonna eutrofeerumine (14,5%), maavarade kaevandamine (14,7%) ja veekeskonna hapestumine (13,7%). Need mõjud tulenevad eeskätt hooldustegevustest, elektrisüsteemi komponentide elutsüklist ja varuosade tootmisest. Ehkki tuuleenergia tootmine on energiatarbimise mõttes keskkonnasäästlik, viitavad tulemused kaudsetele mõjudele, mis on seotud elektrienergia edastuse ja taristu toimimisega.

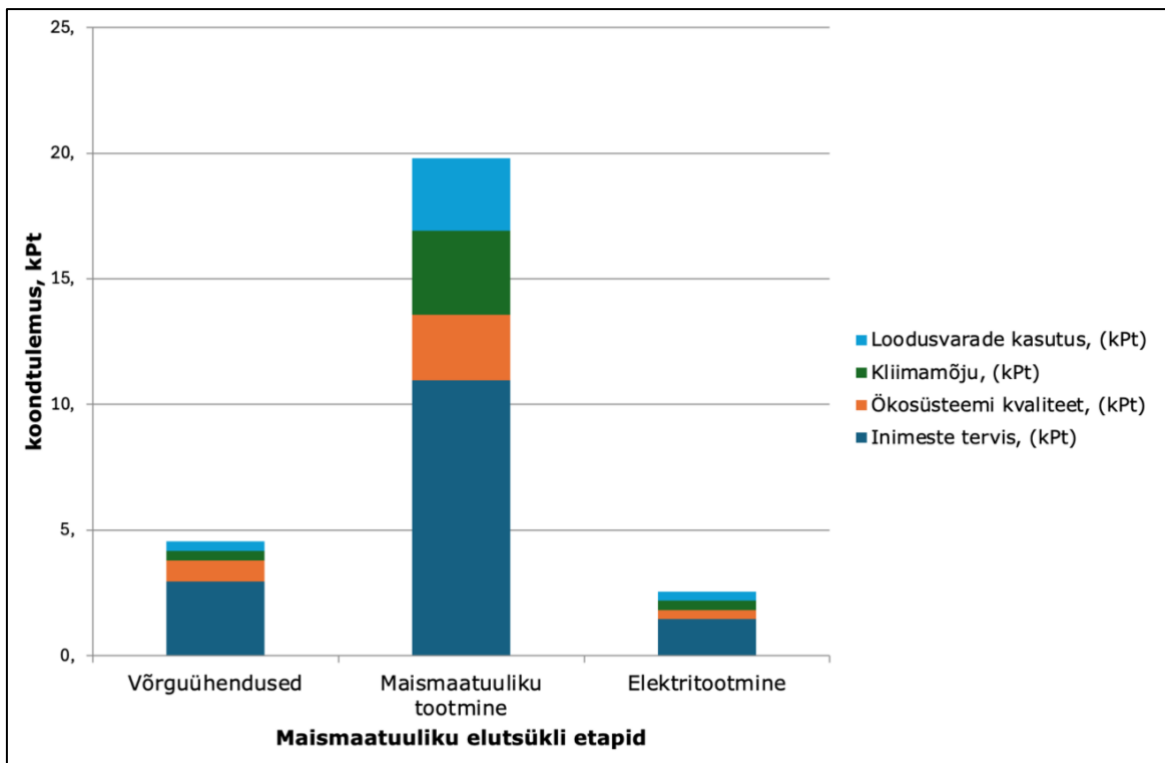
Saarde tuulepargi LCA karakteriseerimistulemused kinnitavad, et suurim keskkonnamõju on seotud tuulikute tootmisfaasiga. Seejuures ei saa alahinnata ka võrguühenduse ning elektritootmise etappide mõju, eelkõige veeökosüsteemide koormuse ja maavarade kaevandamise seisukohalt.

Visuaalne esitus (joonis 15) toetab eeltoodud mustreid: oranžid sambad, mis tähistavad tuuliku tootmist, domineerivad kõigis kategooriates; sinised sambad, mis kujutavad võrguühendust, on mõõduka kõrgusega; hallikad sambad, mis esindavad elektritootmist, jäävad kõige madalamaks. Antud visuaalne jaotus toetab kvantitatiivseid andmeid ning võimaldab keskkonnamõjude etappidevahelist selget võrdlust.



Joonis 15. Karakteriseerimistulemused – Saarde tuulepargi elutsükli etappide keskkonna-mõju erinevates kategooriates (autori täiendustega)

Kahjuhindamise tulemused kinnitavad karakteriseerimistulemustest tehtud järeldusi, viidates, et Saarde tuulepargi elutsükli suurim keskkonnamõju tuleneb tuuliku tootmis- ja paigaldamisetapist. See etapp domineerib kõikides hinnatud kahjukategooriates – inimeste tervise, ökosüsteemi kvaliteedi, kliimamuutuse ja maavarade kaevandamise valdkonnas. Näiteks on tootmisfaasi mõju inimtervisele 10,9512 kPt, ökosüsteemi kvaliteedis 2,6271 kPt, kliimamuutustele 3,3424 kPt ning ressursside kasutusele 2,8774 kPt. Kõigis neljas kahjukategoorias on selle osakaal hinnanguliselt 100%. See tähendab, et kogu koormus igas kategoorias on seotud eelkõige tuuliku tootmise ja paigaldusega mis omakorda viitab selgelt, et kõige tõhusam viis keskkonnamõjude vähendamiseks seisneb just nimelt tuulikute tootmistsükli optimeerimises (joonis 16).



Joonis 16. Elutsükli etappide koondmõju neljas kahjukategoorias (autori täiendustega)

Võrguühenduse etapi mõju on samuti arvestatav, eriti inimtervise kategoorias, kus selle osakaal ulatub üle veerandi kogu koormusest (2,9652 kPt). See viitab eelkõige tootmisprotsessides vabanevatele hingamisteed kahjustavatele ühenditele ja kaevandustegevusega seotud keskkonnamoormustele. Ökosüsteemi kvaliteedi kahjukategoorias ulatub võrguühenduse panus 0,8368 kPt-ni, kliimamuutuste kategoorias 0,3679 kPt-ni ning maavarade kaevandamise osas 0,3797 kPt-ni.

Elektritootmise etapp, ehkki absoluutarvudes väikseima mõjuga, ei ole mõju poolest täiesti ebaoluline. Inimtervise kategoorias on selle etapi panus 1,4533 kPt, ökosüsteemide kvaliteedis 0,3617 kPt, kliimamuutuste osas 0,3892 kPt ja maavarade kasutuse kategoorias 0,3428 kPt. Kõige tugevam mõju avaldub ökosüsteemidele ja ressursside kasutusele, viidates võimalikele pikaajalistele ja kumulatiivsetele mõjudele, mis võivad ajas kasvatada üldist keskkonnamoormust. Kliimale ja inimtervisele avalduv mõju jääb alla 15% tootmisetapi vastavatest väärtustest, kuid seda ei saa siiski pidada täielikult tähtsusetuks (Tabel 3).

Tabel 3. Saarde tuulepargi elutsükli etappide kahjumõju väärtused neljas kategoorias

Elutsükli etapp	Inimtervis (kPt)	Ökosüsteemide kvaliteet (kPt)	Kliimamuutus (kPt)	Maavarad (kPt)
Võrguühendused	2,9652	0,8368	0,3679	0,3797
Maismaatuuliku tootmine	10,9512	2,6271	3,3424	2,8774
Elektritootmine	1,4533	0,3617	0,3892	0,3428

Karakteriseerimismeetodi tulemused näitavad, et suurim keskkonnamõju kaasneb tuulikute tootmisetapis. See etapp annab kõrgeima väärtuse kõigis 15 hinnatud keskkonnamõju kategoorias, peegeldades eeskätt tooraine kaevandamise, metallide töötlemise ja energiamahukate tööstusprotsesside kumulatiivset mõju.

Kõige olulisemad erinevused ilmnevad kategooriates, mis on seotud inimtervise ja fossiilsete energiaallikate kasutusega. Näiteks on anorgaaniliste ühendite mõju tootmisfaasis 7,2568 kPt, võrreldes võrguühenduse (1,7046 kPt) ja elektritootmise (0,9360 kPt) näitajatega. Sarnane muster ilmneb ka mittekantserogeensete ainete puhul (2,7429 kPt tootmises; 1,087 IPT võrguühenduses) ning kantserogeenide ühendite puhul (0,9374; 0,1715 kPt). Need tulemused viitavad selgelt sellele, et seadmete tootmisetapp on peamine õhusaastega seotud koormuse allikas.

Ka globaalse soojenemise potentsiaal on tootmisetapis kõrgeim - 3,3424 kPt, võrreldes võrguühenduse (0,3679 kPt) ja elektritootmise (0,3892 IPT) väärtustega. Sarnane suundumus ilmneb taastumatute energiaallikate kasutuse kategoorias, kus tootmise mõju ulatub 2,7695 kPt-ni, võrreldes elektritootmise 0,3269 kPt-ga. Need näitjad rõhutavad fossiilkütuste olulist rolli tuuliku tootmisahelas. Ka maavarade kaevandamise mõju on suurim tootmisetapis (0,1079 kPt), jäädes võrguühenduse (0,0439 kPt) ja elektritootmise (0,0158 kPt) näitajatest oluliselt kõrgemaks.

Võrguühenduse rajamine avaldab tugevat mõju mitmetes toksilisuse kategooriates. Näiteks on selle panus maapinna ökotoksilisuses 0,7824 kPt, võrreldes tootmisetapi 2,3996 kPt-ga. Ka hingamisteedele ohtlike ühendite kategooriates on võrguühenduse mõju ulatuslik, viidates sellele, et kaablite, alajaamade ja liitumistaristu rajamisega kaasneb ulatuslik materjalikasutus ning saasteainete emissioon.

Elektritootmise etapp on absoluutarvudes madalaima mõjuga, kuid ka selles faasis ilmnevad arvestatavad keskkonnamõjud, eelkõige fossiilsete ressursside kasutuse ja

hingamisteede tervisekategoriate puhul. Need mõju on seotud eeskätt hooldustegevuste, varuosade tootmise ning komponentide asendamisega kogu tuuliku eluea jooksul (Tabel 4).

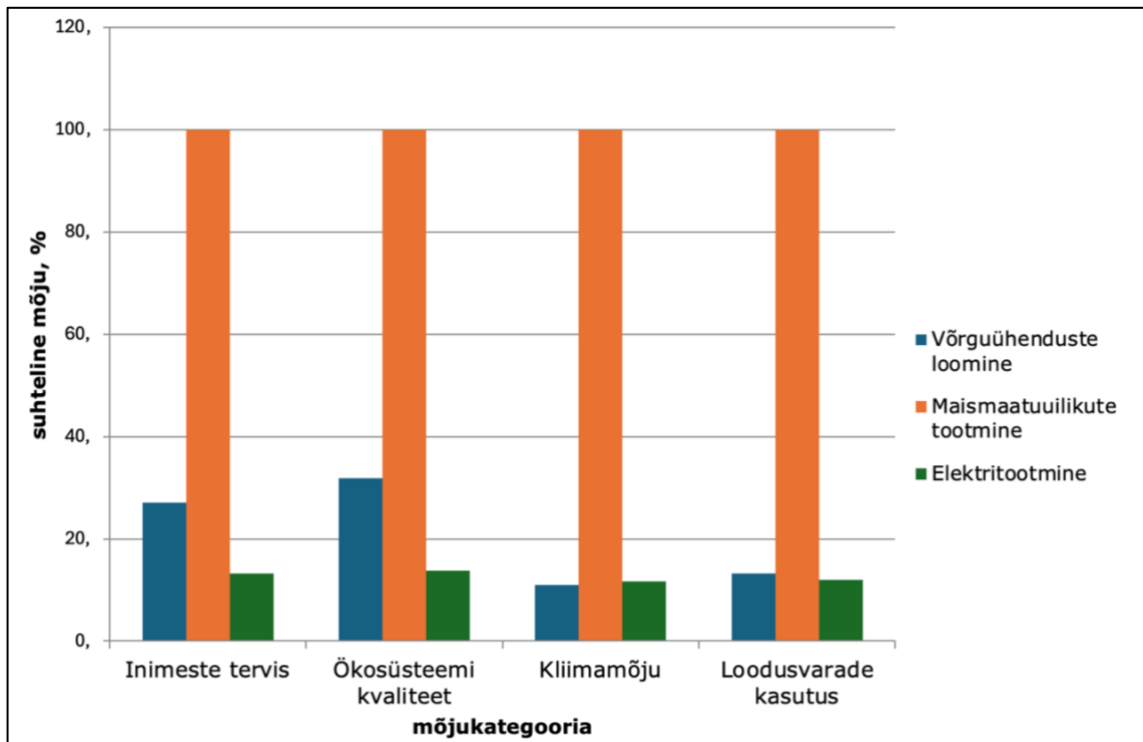
Tabel 4. Saarde tuulepargi elutsükli olulisemate keskkonnamõjude karakteriseerimise tulemused (valik peamiste mõjukategoriate põhjal)

Mõjukategooria	Võrguühendus (IPt)	Tootmine (Ipt)	Elektritootmine (Ipt)
Kantseroogeensed ühendid	0,1715	0,9374	0,1158
Mittekantseroogeensed ühendid	1,087	2,7429	0,3998
Anorgaaniliste ühendite mõju hingamisteedele	1,7046	7,2568	0,936
Globaalne soojenemine	0,3679	3,3424	0,3892
Taastumatud energiaallikad	0,3359	2,7695	0,3269
Maavarade kaevandamine	0,0439	0,1079	0,0158

Üldskoori analüüs, mis koondab kõik mõjukategooriad üheks arvuliseks näitajaks, kinnitab varasemaid järeldusi ning võimaldab võrrelda kolme süsteemikomponenti koondtasandil (joonis 17) Kõige suurema kumulatiivse keskkonnamõjuga paistab silma tuuliku tootmis- ja paigaldusetapp, mille osakaal ulatub igas hinnatud kahjukategoorias 100%-ni. Tegemist on kogu elutsükli ressursimahukaima ja keskkonnamõjult intensiivseima etapiga.

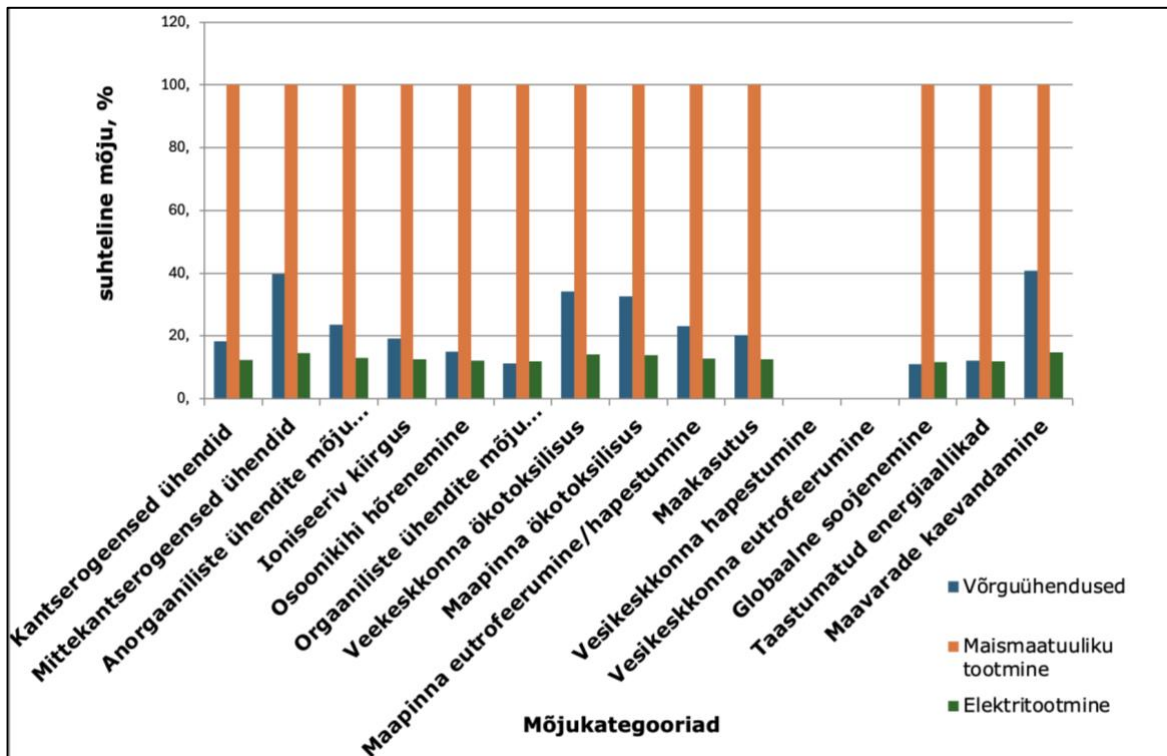
Võrguühenduse etapp avaldab mõõdukat mõju, olles eriti märgatav ökosüsteemide kvaliteedis (31,9%) ja inimeste tervise (27,1%) kategooriates. Mõju on tagasihoidlikum maavarade kaevandamine (13,2%) ja kliimamuutuse (11,0%) kategooriates.

Kõrgepingelise elektri tootmine avaldab elutsükli kontekstis väikseimat keskkonnamõju, kuid selle panus ei ole ebaoluline. Inimeste tervise kategoorias moodustab see 13,3%, ökosüsteemi kvaliteedis 13,8% (0,3617 kPt), kliimamuutuse kategoorias 11,7% (0,3892 kPt) ja ressursside kasutuses 11,9% (0,3428 kPt). Ehkki selle mõju on madalam, ilmneb see siiski järjekindlalt kõigis hinnatud üldskoori kategooriates ning selle panus tuleb arvesse võtta (joonis 17).



Joonis 17. Üldskoori analüüs – LCA komponentide võrdlus (%) (autori täiendustega)

IMPACT 2002+ meetodikal põhinev üksikmõju analüüs 15 keskkonnakategooria lõikes (joonis x) näitas selget mõjujaotust elutsükli etappide vahel. Tootmisfaas domineerib kõigis kategooriates. Võrguühenduse etapp avaldab suurt mõju mittekantserogeensete ühendite (39,63%), veekeskkonna ökotoksilisuse (34,21%) ja maavarade kaevandamise (40,68%) kategooriates. Elektritootmise panus on külln väiksem, kuid siiski arvestatav samades kategooriates: vastavalt 14,58%, 14,02% ja 14,68%. Need tulemused näitavad, et kuigi elektritootmine ise on operatiivselt keskkonnasäästlik, tuleb arvestada ka sellega seotud komponentide ja kumulatiivset keskkonnamõju kogu süsteemi eluea jooksul (joonis 18).



Joonis 18. Elutsükli etappide suhteline keskkonnamõju 15 kahjukategooria lõikes (autori täiendustega)

Eraldi märkimist väärib asjaolu, et IMPACT 2002+ meetodika võimaldab hinnata keskkonnamõjusid ka nn lõpp-punkti tasandil, võimaldades siduda kvantitatiivsed tulemused ühiskonna ja looduskeskkonna seisundi tevikliku hindamisega. See lähenemine võimaldab süstemaatilisemat ja mõjusamat tõlgendust võrreldes üksnes vahepunkti tasandi analüüsiga.

Laiem tulemuste tõlgendus näitab, et peamised keskkonnamõjud ei pärine süsteemi kasutusfaasist, vaid hoopis materjalide tootmise ja tarneahela etappidest. Sellest tulenevalt peaksid tulevased tuuleparkide disainlahendused keskenduma madala keskkonnajalajäljega materjalide kasutamisele, energiatõhusatele tootmistehnoloogiatele ning optimeeritud logistikavoo rakendamisele. Täiendavat tähelepanu väärib ringmajanduslike põhimõtete integreerimine, sealhulgas komponentide taaskasutusvõimalused ja elutsükli lõpu strateegiad.

Saarde tuulepargi LCA tulemused pakuvad usaldusväärset teaduslikku alust nii taastuvenergiatehnoloogiate keskkonnamõjude võrdlemiseks kui ka poliitikasoovituste kujundamiseks kestlikuma ja keskkonnateadlikuma infrastruktuuri arendamisel.

3.2.2 S-LCA tulemused ja küsitluste analüüs

Alljärgnev analüüs on temaatiliselt struktureeritud, keskendudes müra ja tervise mõjudele, visuaalsele ja esteetilisele häiringule, elukeskkonna tajutavatele muutustele, sotsiaalsele usaldusele ja kogukonna kaasamisele, majandusliku kasu jaotusele ning hüvitusmehhanismide tajutud õiglustundele (tabel 5).

Tabel 5. Peamised sotsiaalsed mõju ja kommentaarid

Mõjuteema	Osakaal vastanutest/ vastajatest	Märkused / Kvalitatiivsed tsitaadid
Müra ja tervise mõjud	46% (mürähäiring) / 30% (tervisesümptomid)	<p>„Tervise probleemid, uneprobleemid, kumin vilin peas“</p> <p>„Peale tuugenite tööle hakkamist on mul tekkinud terviseprobleemid. Olenevalt tuule suunast olen väsinud, iiveldab, kõrvus surub jne. See on kohalike elanike piinamine, siin pole võimalik elada“;</p> <p>„Tervisehäired, tuulikute tulev häiriv heli“;</p> <p>„Tunnen pidevat väsimust“;</p> <p>„Inimesed on teinud vallale avalduse tervisehäirete kohta, reaktsioon 0“;</p> <p>Mul pole jõudu, et teha tööd. Ma viibin kodus eemal ja mul pole siis terviseprobleeme. Mul on Sõrves suvekodu, siin meri mühib ja mul pole mingeid terviseprobleeme. Terviseamet vassib oma mõõtmistega. Siin mitmed kodud müügis, aga kes otab tuugenite vahele kodu?“;</p> <p>„Ma tean, et vähemalt üks pere on tervise pärast kodust lahkunud, mõned plaanivad veel“;</p> <p>„Ennem oli vaikus ja linnulaul, nüüd on vuhin, kohin, undamine, pahin“;</p> <p>„Kuulen müra 24/7“;</p> <p>„Tunnen pidevat väsimust, vahel ka vibratsiooni“;</p> <p>„Tunnen end nagu oleksin merehaige. Kamali, Tõlla külas pole üldse võimalik olla, seal on nii halb olla, õhku nagu pole. Päästke palun inimesed“;</p> <p>„See on imelik, aga mu sügav rahu on raskemini kättesaadav, on ette tulnud ärevust, täiesti ilma põhjuseta. Väsimusest taastumine võtab palju kauem aega. Keha on rohkem väsinud ja väsib tegevusi tehes kiiremini“.</p>
Kaasamise ja usalduse puudus	59%	<p>„Meiega ei arvestatud“;</p> <p>„Otsused tehti meie selja taga“;</p> <p>„Minu usaldus valla otsustajate vastu on kadunud, samuti on kadunud usaldus eesti riigi juhtimise suhtes. Inimestega ei arvestata. Olen oma majas elanud 38a, ma tahan siin edasi elada. Mu vanus on sellises eas, et enam ei tahaks alustada uut elu, kuskil mujal riigis“;</p> <p>„Soovin enne rajamist teada, mis mu koju tuleb. Täna sel päeval on see tugevalt usaldust mõjutanud. Praegu anti lihtsalt teada otsusest. Ei saanud varem infot“;</p> <p>„Kuulata kogukonna muresid ja ettepanekuid“;</p> <p>„Rohkem põhjendatud argumente, avalikustamist, kõigi osapoolte ärakuulamist“;</p> <p>„Tehke korrektsed Uuringud, ilma pettusteta, sest inimesed on piisavalt targad“;</p> <p>„Vaja on rohkem tutvustada ja kaasata, oli küll koosolekuid, aga ju liiga vähe“.</p>

Mõjuteema	Osakaal vastanutest/vastajatest	Märkused / Kvalitatiivsed tsitaadid
Majanduslik kasu puudub	57%	<p>„Kasu saavad üksikud, meie ainult häiringut“;</p> <p>„Loodusvaated on muudetud, vastu ei anta mitte midagi“;</p> <p>„Kinnisvarale ei ole ostjat kui teab et tuulikud on läheduses“;</p> <p>„Ei ole kasu, ei tehta midagi“;</p> <p>„Need tuulikud pole kuidagi edendanud kohalikku elu“;</p> <p>„0, kogukonnale 0 kasu, isegi bussipeatust ei ole saanud maainimene“;</p> <p>„Isegi kui on midagi tehtud, siis ma pole kuulnud. Ainsad teed, mida kindlasti ehitati, olid tuulepargi juurdepääsu teed. Väga tahaks kuulda, kui on mingeid mänguväljakuid vm rajatud. Või kus seda infot jagatakse?“;</p> <p>„Tehke päris panus kohalikku elukvaliteeti – kas panustamine kooli, lasteaeda, mänguväljakutsesse, spordirajatistesse, teedesse vms- kuhu iganes, kust inimene päriselt väärtust saab“.</p>
Visuaalne häiring ja esteetika	38%	<p>„Koduhoovist neid näha ei ole, paiknen üsna metsa sees. Koju sõites aga on neid näha väga kaugelt, visuaalselt need maastikupilti ei sobi ning eelistaks vaateid ilma nendeta“;</p> <p>„230m tuugeneid näeb juba kaugelt. Need ei sobi looduse keskele ega maapiirkonda“;</p> <p>„See on kohutav vaatepilt meie maastikule. Rikub looduse ilu“;</p> <p>„Ma näen tuulikuid, kui koju sõidan, aga mitte kodust. Mul ei peaks olema mingit viha, ega ärrituvust nende suhtes, nähtavalt pole nad ju kuidagi mu elu seganud. Kuid see ongi imelik, ma vihkan neid, ärritun, kui näen punaseid tulukesi pimedas... See ongi ülimalt kummaline, pole nagu minu käitumise moodi. Mõistusega saan aru, et pole põhjust, kuid see tekitab ikkagi kui koju sõites v lahkudes neid näen“;</p> <p>„Inetu, võõras, lisaks on labade pöörlemise varjud“;</p> <p>„Visuaalne häirering, öösel punased tuled, päeval labade varjude karusell“.</p>
Loodusmõjud ja elukeskkonna kadu	~60% (kirjelduslik)	<p>„Linde ja loomi on selles piirkonnas vähem“;</p> <p>„See on mulle selge, et kuuldav tuulikute müra kindlasti segab loodust, loomi, linde, samuti võeti ju maha metsa, tuuliku pargi rajamiseks. Ükski loom, ega inimene ei soovi oma elupaika monotoonset müra, kas sisi kuuldavat v siis inimkõrvale kuuldamatut. Loomad, linnud ei raja om kodu selle mõjusvääri sisse, kuid ka nemad õppivad uut tunda ja võivad esialgu eksida“;</p> <p>„Metsad on maha võetud, teed on puruks sõidetud, teedele on paigaldatud tõkkepuud, teid ei saa enam kasutada, sest pähe võib kukkuda jää kamakaid, surnud linde“;</p> <p>„Ärge palun tapke inimesi, linde, loomi. Te olete mõrvarid! Miks ei püstitata neid linnade lähedale? Seal on ju tarbijad lähedal. Aga sellest tuleks katastroof, siis tullakse metsade vahele, kus kannatajaid vähe. Püsivat elektri tootmist arendada, aga mitte noolida toetusi, mis tulevad ju lõpuks ikka inimeste taskust“;</p> <p>„Tuulikute ümbruses on mets kõik maha raiutud, linnud, loomad, konnad, mesilased on haruldased külalised“.</p>
Hüvituste ebaõiglane jaotus	57%	<p>„Arge pakkuge kompensatsiooni neile, kellel pole tuulepargi rajamisel mingit seost.“;</p> <p>„Ei saa hüvitist, kuigi mõjutab mu elu“;</p> <p>„See tasu, mis taluvustasuks makstakse võiks asendada päriselt odava energiahinnaga. (nb- mitte ainult elekter, millele liidetakse pidevalt tõstetav võrgutasu, vaid koguarvel kajastuv)“;</p> <p>„Tunnen, et liiga vähesed saavad kompensatsiooni“;</p>

Mõjuteema	Osakaal vastanutest/ vastajatest	Märkused / Kvalitatiivsed tsitaadid
		"Toetus ainult majaomanikule, kellel on sissekirjutus ja see on 6 € päevas. Minu osaline töövõime on näiteks 11 € päevas. Enne tuulikuid olin täiesti terve inimene. Käisin 25 aastat Tallinnas tööl. Nüüd ei saa kodus voodistki välja".

Kuigi KSH ja täiendav müraseire kinnitasid, et tuulikute tekitatud müratase ja infraheli jäävad alla kehtivate piirnormide, viitas 46% S-LCA küsitlustele vastanutest, et nad tajuvad müra igapäevase häiringuna. Ligikaudu 30% märkisid, et on kogenud sellega seotud tervisemõjusid, sealhulgas unehäireid, ärevus, iiveldus, peavalud, keskendumisraskused. Mitmed vastajad tõid välja ka emotsionaalseid ja vaimseid pingeid – näiteks kirjeldas üks vastaja pidevat vibratsiooni, mis on muutnud vaikes kohas elamise võimatuks. Oluline on rõhutada, et sellised subjektiivsed mõjud ei pruugi kajastuda standardsetes keskkonnamõjude hindamise raamistikutes, nagu LCA või KSH, mis keskenduvad peamiselt mõõdetavatele helitasemetele. See tõstab esile vajaduse käsitleda tervisemõjusid laiemalt.

Visuaalse häiringu teema kerkis vastustes selgelt esile. Ligikaudu 38% küsitlusele vastanutest nimetasid tuulikuid visuaalselt häirivateks, rõhutades nende mõju maastiku ilmele ja kodutune kadumisele. Mitmed kommentaarid viitasid tähistäeva kadumisele ja domineerivatele vilkuritele, näiteks: „enne nägin tähistäevast, nüüd ainult punased vilkurid“ ja „maastik on rikutud – varem oli see meie mets“.

KSH hinnagus määratleti visuaalne mõju mõõdukaks ja tuginedes nähtavusanalüüsile ning fotomontaažidele. S-LCA tulemused aga näitavad, et maastiku esteetiline väärtus ei piirdu pelgalt nähtavuse või kauguse mõõtmisega, vaid on tihedalt seotud emotsionaalse seotuse, kodutunde ja piirkondliku identiteediga. Visuaalne häiring avaldub eriti tugevalt neile, kelle elukoht jääb tuulikute lähedale.

Elukeskkonna muutused, sealhulgas looduskoosluste kadumine, kajastusid paljude vastajate hinnangutes. Üle poole vastanutest tõid välja, et tuulepargi rajamisega kaasnes lindude ja loomade taandumine, metsarahu kadumine ning maastiku industrialiseerumine. Üks vastaja märkis: „Meie mets on nüüd kruusatee ja betoonvundamendi all, loodus vaikib“. Kuigi KSH rõhutas, et Natura 2000 alasid ei mõjutatud ning raadamist tehti minimaalselt, ilmnes S-LCA vastustest oluline tajutav erinevus. Keskkonna rahunemise või vaikuse kadumine on aspekt, mida ei ole võimalik kvantifitseerida standartsete KSH või LCA meetodikate kaudu, kuid mis mõjutab oluliselt inimeste elukvaliteeti.

Sotsiaalse usalduse ja kogukonna kaasamise aspektid olid küsitluses kesksel kohal. 59% vastanutest märkisid, et neid ei kaasatud arendusprotsessi sisuliselt ning info edastamine toimus hilja või pelgalt formaalsel kujul. Vastustes väljendus frustratsioon näiteks järgmiste sõnastuste kaudu: „Meiega ei arvestaud“, „See oli juba otsustatud“ ja „Keegi ei küsinud meie arvamust“.

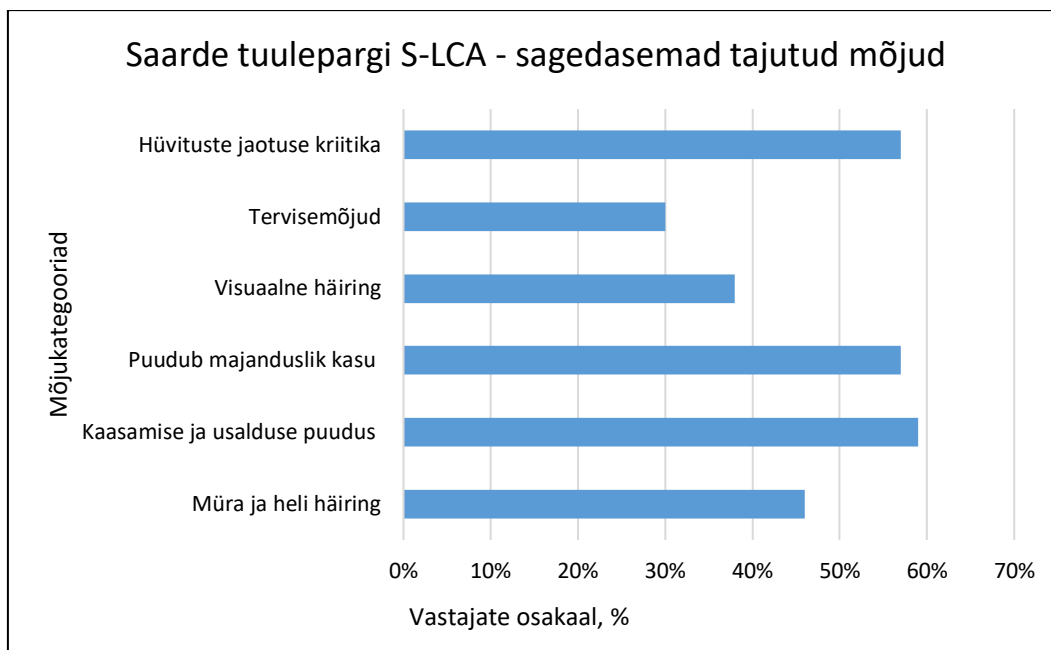
Sellised hinnangud kinnitavad, et kaasamine ei ole üksnes formaalne protseduuriline kohustus, vaid oluline sotsiaalne väärtus, mille kvaliteet määrab projekti legitiimsuse kogukonna silmis. Kuigi KSH dokument viitab toimunud avalikele aruteludele, näitavad S-LCA tulemused, et formaalne osalemine ei pruugi tagada kogukonna sisulist heakskiitu. Usalduse puudumine arendaja, kohaliku omavalitsuse ja kohalike elanike mõjutab negatiivselt ka teiste keskkonna- ja sotsiaalsete mõjude aktsepteeritavust.

Küsitluse tulemused osutasid ka rahalise kasu jaotumise ebavõrdsusele. 57% vastanutest ei tajunud projekti isiklikku hüvena ning tundsid, et majanduslik kasu koondus üksikute maaomanike või arendajate kätte. Mitmed vastajad märkisid, et: „Kõik saavad kasu, ainult mitte meie, kelle kodu kõrval need tuulikud seisavad“. Positiivse näitena toodi siiksi esile elektriarevete kompenseerimist või kohalike teenuste rahastamist.

KSH viitab omavalitsusele laekuvatele maksudele ja kehtivatele hüvitissüsteemidele, kuid S-LCA tulemused osutavad, et õiglustunne ei tulene pelgalt kompensatsioonimehhanismide olemasolust, vaid nende tajutavast aususest ja läbipaistvusest. Küsitluses ilmnes tugev vastandumine – „meie“ vs „nemad“ – mis viitab puudulikule sotsiaalse õigluse tajumisele.

Lisaks kasu puudmisele tõsteti esile ka hüvitismehhanismide ebapiisavust ja läbipaistmatust. Korduvalt mainiti, et puudub selgus selle kohta, kes saab hüvitist, kui palju ja milliste kriteeriumite alusel. Esitati ka konkreetseid ettepanekuid, näiteks ühtlased toetused kõigile tuulikute vahetutele naabritele või kohalike avalike teenuste sihipärane rahastamine.

Need ettepanekud viitavad soovile, et tuulepargi arendusega kaasnev majanduslik kasu oleks seotud kogu kogukonna hüvanguga, mitte ainult kitsalt määratletud huvigruppidega. Hüvitus ei ole S-LCA vaatenurgast pelgalt materiaalse kahju kompensatsioon, vaid ka usalduse taastamise ja kogukondliku kuuluvustunde tugevdamise vahend (joonis 19).



Joonis 19. Sotsiaalsete mõjude esinemissagedus küsitluses

Saarde tuulepargi S-LCA tulemused kinnitavad, et sotsiaalne aktsepteeritavus ei sõltu üksnes formaalsest vastavusest kehtivatele piirnormidele ega tehnilisest sobivusest. Tajutavad mõjud – alates mürast ja visuaalsest disharmoonias kuni kogukondliku lõhestumise ja ebaõigluse tajuni. Need võivad oluliselt mõjutada projekti pikaajalist legitiimsust ja ühiskondlikku vastuvõetavust.

Usaldus ja kogukondlikud suhted kujunesid kõige polariseerivamaks teemavaldkonnaks. Kuni 59% vastanutest (22 inimest) viitasid konfliktidele, vastandumisele või tõsisele õhkkonna pingestumisele. Kirjutati, et: „Kogukond on vastandunud – tuulikute vastased ja need, keda ei sega“. Ligikaudu 38% (14 inimest) märkisid, et neil puudus usaldus kohalike võimude või arendajate suhtes, põhjendades seda hilinenud infoedastuse ja formaalseks tajutud kaasamisega. Teisalt tõid 6 vastajat (16%) esile ka positiivsemaid kogemusi. Mitmed märkisid, et tuulepargi temaatika on tekitanud rohkem külasisest suhtlust ja ühtustunnet: „Külaelanikud hoiavad rohkem kokku. Meil on ühine mure, mida arutada“. Sellised kommentaarid viitavad, et sotsiaalsed mõjud ei ole pelgalt negatiivsed, vaid võivad teatud tingimustel tugevdada ka kogukondlikku sidusust (tabel 6).

Tabel 6. Usalduse ja suhtluse tajumine vastustes

Teema	Väljendused vastustes	Esinemissagedus
Usalduse puudumine / Mõju omavahelisele suhtlusele	<p>„Valla poolt kumab ükskõiksus kohalike muredele“;</p> <p>„Inimestes on viha“;</p> <p>„Saarde vald pole isegi küsitlenud kohalikke.. Meid endise Saarde valla elanikke on maha müüdüd“;</p> <p>„Otsused tehti selja taga“;</p> <p>„Mind tuulepark ei mõjuta kuid kohalike inimeste pidevad vaidlused sel teemal sotsiaalmeedias tüütavad ära“;</p> <p>„Näitab segadust ja ebaühtlast hoiakut kogukonnas, mis viitab usalduse puudumisele projekti suhtes“.</p>	14
Kehv kommunikatsioon	<p>„Ei sobi metsapealinna külje alla. Visuaalne reostus“ (otsuse mõju ei ole selgitatud, kaasamisprotsess pole olnud selge);</p> <p>„Kuidagi ei meeldi nende tuulikute nähemine, ei oska seletada, enim häirib pimedas, need punased tuuled, see on imelik“ (võib viidata vähesele selgitusele visuaalsete ja öiste mõjude osas).</p>	11
Neutraalne/ei oska öelda	<p>„Ei fänna neid ega ka need ei sega kuidagi“;</p> <p>„Ei ole mingit muutust“;</p> <p>„Ei ole kindlat seisukohta – eks neil ole häid ja halbu külgi“;</p> <p>„Mul ei ole tuulikute vastu midagi, aga ei tunne ka mingit kasu“.</p>	7
Positiivne hinnang	<p>„Olen saanud kasu ekskursioonide ja koolituste näol“;</p> <p>„Loob alsue tööstuse arenguks ääremaal“;</p> <p>„Tuulikud on kenamad ja efektiivsemad kui päikesepargid“;</p> <p>„Tuulikud on toredad ja rohelised. ESG on tulevik!“;</p> <p>„Tuulikud igati vajalikud ja ei tee mingit kahju“.</p>	5

Küsitluse põhjal jagunesid vastajad kaheks ka tuulepargi sobivuse üldhinnangutes piirkonna konteksti. 16 inimest (43%) pidasid arendust sobimatuks piirkonna iseloomu ja looduskeskkonna seisukoahlt, samas kui 8 vastajat (22%) olid projekti suhtes positiivselt meelestatud. Veel 9 vastajat (24%) toetasid arendust teatud tingimustel, näiteks juhul kuui kasu jaotus laiemalt või kui suhtlus kohalikega paraneks. Nagu üks toetav kommentaar märkis: „Tuuleenergia on roheline ja vajalik tulevikule“.

S-LCA lisab hindamismudelitele ainulaadset väärtust, tuues esile need aspektid, mis jäävad väljapoole KSH kvantitatiivseid mõõdikuid ja LCA globaalse süsnikujalajälje kalkulatsioonid. Taastuvenergia projektide jätkusuutlikkuse eelduseks on usaldusel põhinev, läbipaistev ja kaasav protsess, milles kogukonna häält kuulatakse juba

planeerimise varases staadiumis. Saarde tuulepargi juhtum näitab, et ainult mitme hindamismeetodi kombineeritud kasutamine võimaldab liikuda sotsiaalselt ja keskkondlikult vastutustundliku arengusuuna poole. Sotsiaalse mõõtme süstemaatiline analüüs võimaldab paremini mõista projekti tegelikku vastuvõetavust, kujundada õiglasemaid hüvitusmehhanisme ning suurendada kohalike elanike usaldust ja kaasatust. S-LCA rakendamine peaks kujunema taastuenergia planeerimise tavapraktikaks, aidates tagada, et roheline üleminek oleks mitte ainult tehnoloogiliselt ja keskkonnaliselt, vaid ka sotsiaalselt õiglane.

3.2.3 Kombineeritud hindamine – LCA, S-LCA ja KSH tulemuste võrdlus ning vastastikune täiendamine

Saarde tuulepargi hindamisel rakendati kolme erinevat lähenemist – elutsükli hindamist (LCA), sotsiaalse elutsükli hindamist (S-LCA) ja keskkonnamõjude strateegilist hindamist (KSH). Nende tulemuste võrdlus võimaldab analüüsida, kuidas erinevad meetodikad omavahel kattuvad, erinevad või teineteist täiendavad. LCA keskendub kvantitatiivsetele keskkonnamõjudele kogu süsteemi elukaare vältel, S-LCA toob esile kohaliku kogukonna sotsiaalsed tajud ja väärtushinnangud, KSH aga keskendub planeeringualale lokaalselt avalduvatele mõjudele, insenertehniliselt mõõdetavatele mõjudele ning hindab nende vastavust kehtivatele õigusnormidele ja ruumilise planeerimise raamistikule. Kolme lähenemisviisi integreerimine võimaldab kujundada terviklikuma arusaama tuulepargi mõjust keskkonnale, inimeste heaolule ja sotsiaalsetele suhetele ehk nii globaalsest kui ka lokaalsest perspektiivist. Alljärgnevalt võrreldakse hindamismetoodikaid valdkonniti, et selgitada nende rolli ja koosmõju tuulepargi mõjude tuvastamisel.

LCA tulemused näitasid selgelt, et suurimad keskkonnamõjud koonduvad tuulikute tootmisfaasi, mis domineerib kõigis hinnatud kategooriates – sealhulgas globaalse soojenemise potentsiaalis (3,34 kPt), kantserogeensete ühendite (0,94 kPt) ja taastumatute maavarade kasutuse osas. Elektritootmise ehk kasutusetaapp avaldas keskkonnale kõige väiksemat mõju, kinnitades tuulikute pika eluea ja energiatootmise efektiivsuse rolli kogumõju vähendamisel. KSH rõhutas samuti, et tuulepargi elukaare jooksul toodetakse 36 korda rohkem energiat, kui selle rajamiseks kulub, ning aidatakse vältida 230 000 tonni CO₂ heidet, kinnitades sellega LCA järeltulemuste kasutusetaapi madala keskkonnamõju kohta. See erineb KSH fookusest, mis keskendus peamiselt kasutusfaasile – hinnates müra, infraheli, varjuvilkumist, vibratsiooni, visuaalset mõju ning mõju pinnasele ja veekeskkonnale. KSH tulemuste kohaselt jäid kõik keskkonnanäitajad alla kehtivate piirnormide: näiteks modelleeritud müratase ei ületanud öisel ajal 40 dB piiri, infraheli tase jäi inimese tajulävist madalamaks ja varjuvilkumise aastane kestus jäi alla 30 tunni. Seetõttu ei peetud täiendavaid

leevendusmeetmeid vajalikuks [124]. Hilisem müraseire (2024. aastal) kinnitas varasemate tulemuste paikapidavust, näidates, et siseruumides mõõdetud infraheli jäi vahemikku 41,8-52,9 dB, mis jääb oluliselt alla rahvusvahelise 85 dB piirväärtuse [127]. Vibratsiooni osas järeldati, et tuulikute konstruktsioonid ja vundamendid välistavad vibratsiooni leviku väljapoole, mistõttu mõju inimeste ja ühiskonna jaoks puudub [124]. Samas ilmnes S-LCA tulemuste põhjal, et objektiivselt mõõdetavad piirnormid ei pruugi alati kajastada inimeste kogemust. Kuni 46% vastanutest nimetasid müra- ja vibratsiooni mõjusid igapäevaselt häirivaks, mis põhjustasid unehäireid, väsimust, keskendumisraskusi ja peavalusid. Need tajupõhised kogemused ei kajastu LCA-s, mis ei hõlma inimesele suunatud lokaalseid sensoorseid mõjusid, kuid S-LCA kaudu tulevad nähtavale elukeskkonna kvaliteeti mõjutavad emotsionaalsed ja kehalised reaktsioonid. Seetõttu on S-LCA võimekus nähtamatuid, ent tähenduslikke sotsiaalseid mõjusid esile tuua hindamissüsteemis asendamatu – eriti juhtudel, kus ametlik tehniline hinnang (nt KSH) ja kogukondlik kogemus lähevad lahku.

LCA analüüs tõi selgelt esile võrguühenduse ja taristu rajamise panuse mitmesse keskkonnamõju kategooriasse. Näiteks moodustas võrguühendus 39,6% mitte-kantserogeensetest emissioonidest, 40,7% maavarade kaevandamise mõjudest ja 30,7% vesikeskkonna ökotoksilisusest. Need mõjud on peamiselt seotud betooni, metalli ja plastide kasutusega elektriliinide, alajaamade ja juurdepääsuteede rajamisel. LCA kaudu nähtavaks muudetud globaalsed ja akumuleeruvad mõjud peegeldavad laiemat ressursitarbimise jalajälge, mis ei pruugi KSH hinnangutes esile tõusta. KSH järgi piirdusid taristu rajamise mõjud ehitusperioodiga ning neid hinnati ajutisteks ja lokaalseks – elektriliinid ja teed paigutati valdavalt olemasolevate trasside kõrvale, metsaraie jäi minimaalseks (0,034–0,043 ha) ning looduskoosluste häiring oli lühiajaline (mistõttu täiendavaid meetmeid ei rakendatud). Kuna tegevus ei hõlmanud uusi karjääre ning vajalikud materjalid hangiti olemasolevatest lubatud maardlatest, ei hinnatud mõju kohalikele maavaradele oluliseks [124]. See kontrast LCA süsteemse globaalse käsitlemise ja KSH kohaliku ulatust rõhutava lähenemise vahel toob esile, kui oluline on mitmetasandiline hindamine. LCA annab kvantitatiivse raamistiku materjalikasutuse ja keskkonnajälje mõistmiseks kogu elutsükli ulatuses, samas kui KSH võimaldab hinnata, kui võrd need mõjud realiseeruvad konkreetsetes ruumilises kontekstis. Seega täiendavad need kaks käsitlust teineteist, pakkudes nii süsteemset kui ka lokaalselt määratletud hinnangut taristuaarenduse keskkonnamõjudele. Sotsiaalse mõõtme lisab S-LCA, mille tulemused näitasid, et osa kogukonnast avaldas muret suurenenud tööstusliku tegevuse tunde ja looduskoosluste häiringu üle, kuigi ametlikus KSH hinnangus neid muresid oluliseks ei peetud. Seega täiendab S-LCA kvantitatiivseid ja ruumilisi hinnanguid subjektiivsete, kuid ühiskondlikult tähenduslike kogemustega.

Planeeringualadel ei tuvastatud ka kultuuripärandi objekte ega väärtuslikke maastikke, mistõttu ei hinnatud KSH-s tuulepargi mõju kultuuriväärtustele oluliseks. Visuaalne mõju hinnati mõõdukaks – fotomontaažide ja nähtavusanalüüsi põhjal ulatus nähtavus maksimaalselt 20-30 km raadiusesse, kuid ei põhjustanud olulist maastikuhajjustust. Samuti hinnati pinnase ja veekeskonna mõjutused ajutisteks ja ebaolulisteks: põhjaveel mõju peeti madalaks, arvestades aluspinna keskmist kaitstust [124]. See kinnitab sisuliselt LCA tulemust, mille kohaselt tuulikute kasutusfaas on väga madala keskkonnamõjuga.

Sarnane metoodiline täiendavus ilmneb ka elurikkuse ja loodumõjude hindamisel. LCA hindas ökosüsteemi kvaliteedi kaotust tuulikute tootmisfaasis 2,63 kPt ja võrguühenduse osas 0,84 kPt ulatuses, pakkudes kvantitatiivset hinnangut ökosüsteemide koormusele. Siiski ei võimalda LCA tuvastada liikidepõhiseid ohte ega regionaalseid loodusväärtusi, mille arvesse võtmiseks on vajalik KSH ja eksperthinnangute kombineerimine. KSH raames viidi Saarde planeeringualadel läbi täiendavad loodusväärtuste seireuringud, mille tulemusel tuvastati mitmete kaitsealuste liikide, nagu väike-konnakotkas ja hiireviu, potentsiaalsed riskid. Seetõttu soovitati P15 ja P16 alal konkreetsetest tuulikukohtadest loobuda (P16 alal põhjapoolsest tuulikust ning P15 alal tuulikute nr 9–12), et vältida pesitsus- ja toitumisalade häirimist. Samuti täheldati piirkonnas liike nagu teder, laululuik ja sookurg, kelle puhul hinnati häiringurisk mõõdukaks. Nahkhiirte rändeuuringud tuvastasid kümme liiki, sh suurvidevlane ja hõbe-nahkhiir, ning soovitati töörežiimide ajutist muutmist kõrgendatud kokkupõrkeriski tingimustes [128], [129], [130]. Need liikidepõhised seireandmed ja nendele tuginevad planeeringu kohandused on keskkonnakaitsele määrava tähtsusega, kuid jäävad LCA haardest täielikult välja. S-LCA lisas hinnangule veel ühe olulise mõõtme – nimelt kogukonna subjektiivsed tajud elurikkuse vähenemisest. Vastustes kirjeldasid kohalikud elanikud lindude kadumist ja looduse vaikuse vähenemist püsiva negatiivse muutusena. Sellised tajupõhised hinnangud ei kajastu ei LCA kvantitatiivses ega KSH insenertehnilises raamistikus, kuid mõjutavad tugevalt projekti sotsiaalset vastuvõetavust ja tunnetuslikku õiglust. Seega täiendab S-LCA elurikkuse käsitlust, lisades inimkesksed ja sotsiaalsed mõõtmed, mis muudavad nähtavaks kogukondliku kogemuse looduslike muutuste keskel.

Jäätmeäitluse käsitluses ilmnevad samuti LCA ja KSH metoodiliste fookuste erinevused. KSH kohaselt suunati ehitusfaasis tekkinud jäätmed taaskasutusse ning tuulikute elu lõppedes tekkivad jäätmed, sealhulgas betoon, metall ja plast, on suuresti ringlusesse võetavad. Betoonvundamendi eemaldamist hinnati tehniliselt keerukaks,

kuid teostatavaks. Eksploatatsiooni käigus tekkivate jäätmete mõju hinnati madalaks eeldusel, et järgitakse kehtivaid nõudeid [124]. LCA seevastu ei paku lokaalset hinnangut jäätmekäitluse praktikatele, vaid analüüsib süsteemseid mõjusid kogu elutsükli vältel, keskendudes näiteks jäätmetekkest tulenevale ökotoksilisusele või ressursside kadule. Seetõttu võimaldab kahe meetodika kombineeritud rakendamine hinnata nii makrotasandi kumulatiivseid mõjusid kui ka kohapealsete jäätmehoolduse mehhanismide piisavust ja tõhusust.

Avariiolukordade riskianalüüsina käsitles KSH võimalust, et mehaanilise rikke korral võib tuuliku gondlist lekkida õli. Kuigi sellise reostuse tõenäosus hinnati väga väikeseks, arvestades olemasolevaid hooldus- ja kontrolliprotokolle ning päästeteenistuse reageerimisvõimekust, lisab KSH hinnang väärtusliku mõõtme riskijuhtimise vaatenurgast c See on aspekt, mida ei LCA ega S-LCA oma hindamismudelites ei hõlma, kuid millel võib olla oluline piirkondlikus hädaolukordade planeerimises ja keskkonnanohutuse tagamises, see teeb aga KSH hinnangud asendamatuks.

Lisaks käsitles KSH ka kumulatiivset ja sünergilist mõju, arvestades teiste piirkonnas paiknevate tuuleparkide võimalikku koosmõju. Müra ja visuaalse mõju modelleerimine viidi läbi eeldusel, et realiseeruvad arendusmahud maksimaalses ulatuses. Hinnati, et ka kõige ebasoodsamate stsenaariumide korral jäävad mõjud kehtestatud piirväärtuste piiresse ning keskkonna seisukohalt aktsepteeritavaks [124]. See strateegiline ruumiline planeerimisvaade ei ole LCA ega S-LCA standardraamistik esindatud, kuid täiendab oluliselt mõjude koostoime ulatuse mõistmist ja ruumilise koormuse tasakaalustamist.

Ka majandusmõjude hindamises ilmnisid olulised erinevused KSH ja S-LCA vahel. KSH rõhutas tuulepargi majanduslikku kasu kohalikule omavalitsusele ja piirkonnale: ehitusperioodil loodi ajutisi töökohti ehitus-, transpordi-, toitlustus- ja majutussektorites, püsiv tööhõive piirdub peamiselt hooldus- ja haldustegevustega nagu niitmine ja võsa eemaldamine. Lisaks saab vald tulu maamaksust ja kasutustasudest ning kuni 2 km raadiuses elavad inimesed saavad rahalist hüvitist. Arvuliselt hinnati, et 0,32 €/MWh tasu toob vallale aastas ligikaudu 43 000 eurot ehk umbes 0,6% valla kogueelarvest [117], [124], [131]. Sotsiaalmajanduslikku mõju peeti kokkuvõttes positiivseks, ehkki mõõdukaks. Samas tõi S-LCA küsitlus esile kohaliku kogukonna oluliselt kriitilisema hinnangu. 57% vastanutest ei tajunud tuulepargi majanduslikku kasu ning leidsid, et hüvitised ei ole piisavalt läbipaistvad ega õiglaselt jaotatud. Sageli mainiti, et kasu saavad vaid suurmaaomanikud, samas kui teised kogukonnaliikmed kogevad keskkonnamõjusid ilma vastutasuta. Lisaks tehti ettepanekuid luua

mehhanisme, mis võimaldaksid laiemat kasusaajate ringi – näiteks kohalike elektri-
arvete alandamine või piirkondlikud arendusfondid. Sellised ideed ja väärtuspõhised
hinnangud jäävad väljapoole LCA ja KSH formaalseid raamistikke, kuid on kriitilised
sotsiaalse õigluse ja aktsepteeritavuse hindamisel.

Sarnaselt ilmnesevad olulised erinevused ka visuaalse mõju ja esteetilise sobivuse
käsitlemisel. KSH hinnangul jäi visuaalne mõju mõõdukaks, toetudes nähtavusmudelitele
ja fotomontaažidele, mille alusel oli tuulikute nähtavus maksimaalselt 20–30 km
raadiuses. Ei tuvastatud kaitsealuseid maastikke ega kultuuripärandi objekte, mistõttu
visuaalset mõju ei peetud määravaks. Seevastu S-LCA vastustes mainis 38% elanikest
visuaalse häiringu olemasolu, viidates labade liikumisele, tuuleparkide valgustusele ning
maastikuga sobimatusse kui teguritele, mis tekitavad tugevaid emotsionaalseid ja
esteetilisi vastureaktsioone. Need subjektiivsed kogemused mõjutavad oluliselt
elukeskkonna tajutavat kvaliteeti ja sotsiaalset suhtumist projekti.

Sotsiaalse usalduse ja kogukonna kaasamise valdkonnas jäi KSH hinnang pigem
formaalseks. Viidati küll asjaolule, et planeerimisprotsessis viidi läbi avalikud arutelud
ja kogukonna teavitamine toimus kehtestatud korra kohaselt, kuid hinnangutes puudus
sügavam käsitus usalduslike suhete või sotsiaalse legitiimsuse kohta. Seevastu S-LCA
tulemused osutasid märkimisväärsele kogukondlikule pingestumisele. Kuni 59%
vastanutest tajus kogukonna lõhestumist, nõrka informeeritust ning vähest usaldust
arendaja ja kohalike omavalitsuste vastu. Probleemidena nimetati info hilist edastamist,
formaalset ja sisutühja kaasamist ning puudulikku vastutulelikkust kogukonna
ettepanekutele. Sellised järeldused viitavad, et sotsiaalne aktsepteeritavus ei sõltu
üksnes mõõdetavatest keskkonna- või majandusnäitajatest, vaid ka kogetud
kaasamiskvaliteedist ja kogukondlikust õiglusest. Need aspektid jäävad ametlikes
LCA ja KSH hinnangutes sageli tähelepanuta, kuid on S-LCA kaudu selgelt esile toodavad
ja analüüsitavad.

Kuigi LCA ei hõlma otseselt sotsiaalseid ega liikidepõhiseid loodusmõjusid, pakub see
väärtuslikku süsteemset infot kogu tarneahela ja elutsükli kohta. IMPACT 2002+
metoodika tulemused näitasid, et Saarde tuulepargi suurimad keskkonnamõjud
koonduvad tootmisfaasi – 10,95 kPt mõju inimtervisele ja 3,34 kPt kliimamuutustele –,
samas kui võrguühendus moodustas ligi kolmandiku ökosüsteemi kvaliteedi koormusest
(0,84 kPt). Need tulemused aitavad kvantitatiivselt hinnata süsteemi kumulatiivset
jalajälge, kuid ei haara sotsiaalset konteksti ega kogukonna hinnanguid. S-LCA seevastu
ei kvantifitseeri keskkonnamõju, kuid võimaldab mõista, kuidas inimesed mõju tajuvad
ja sotsiaalselt tõlgendavad, tuues esile legitiimsuse ja õigluse mustrid, mida LCA

ega KSH ei käsitle. Samuti ei käsitle LCA ega KSH väärtuspõhiseid konflikte, nagu kogukonna õiglustunne, arusaam ebavõrdsest kasu jaotusest või taju, et areng toimub kohalike elanike arvelt. LCA keskendub tehnoloogilistele ja materjalipõhistele keskkonnamõjudele globaalses skaalas, S-LCA aga toob esile emotsionaalsed, eetilised ja kogukondlikud hinnangud. KSH jääb peamiselt normatiivse ja ruumilise hindamise tasandile, jättes kõrvale globaalse mõju ja väärtuskonfliktid.

Kolme hindamismeetodi - LCA, S-LCA ja KSH - koosrakendamine võimaldab luua mitmetasandilise ja tasakaalustatud arusaama taastuvenergia arenduste mõjust. Kombineerides globaalse keskkonnamõju hindamise (LCA), lokaalse planeeringu-konteksti (KSH) ja kogukondlikud tajud (S-LCA), kujuneb meetodiline tervik, mis ühendab tehnilise täpsuse, sotsiaalse tundlikkuse ja ruumitunnetusega. Selline integreeritud lähenemine on hädavajalik vastutustundlikuks keskkonna-, sotsiaal- ja majandusmõjude juhtimiseks.

Mitmetasandilise analüüsi täienduseks esitab järgnevalt tabel (tabel 7) kolme meetodika võrdluse valitud aspektide lõikes, tuues välja kattuvused, erinevused ning iga meetodi eripära Saarde tuulepargi kontekstis.

Tabel 7. LCA, S-LCA ja KSH meetodikate võrdlus valitud mõjude ja tunnuste lõikes Saarde tuulepargi näitel

Aspekt	LCA (elutsükli hindamine)	S-LCA (sotsiaalse elutsükli hindamine)	KSH (keskkonnamõju strateegiline hindamine)
Fookus	Materjalipõhine, kvantitatiivne, globaalse ulatusega	Subjektiivne kogemus, kogukondlik taju, sotsiaalne aktsepteeritavus	Ekspertpõhine, lokaalne ja planeeringuga seotud
Peamine eesmärk	Kogu elutsükli keskkonnamõjude arvutus	Kogukondade heaolu, õigus ja usaldus	Õiguslik sobivus ja kohalike keskkonnamõjude hindamine
Tootmisfaasi mõju	Kõrgeim mõju kõikides kategooriates (100%) - CO ₂ , toksilisus, energia, ressursid	Ei käsitle tehniliselt, kuid tähtis seoses sotsiaalse õiglustajuga	Mõju pinnasele ja kliimale ehitusetapis, kuid hinnatud ajutiseks ja hallatavaks
Elektritootmise ehk kasutusetapi mõju	Väga madal, ent tuvastatav (nt veeökotoksilisus, hoolduskomponendid)	Tajutakse müra ja infraheli kaudu - suurim kogukondlik mure	Mudel kinnitab - müratase alla normi; inframõjud puuduvad (allikate põhjal)
CO₂ ja kliimamõju	On hinnatud kogu elutsükli ulatuses, sh materjalide tootmises	Kaudselt tajutav kui „rohepööre“ vs „looduse arvelt“	Sama CO ₂ vältimine mainitud, kuid mitte kvantitatiivselt välja arvatud

Aspekt	LCA (elutsükli hindamine)	S-LCA (sotsiaalse elutsükli hindamine)	KSH (keskkonnamõju strateegiline hindamine)
Müra ja infraheli	Ei käsitle	46% vastajatest kogeivad mürahäiringut ja infraheli mõju, unehäired, iiveldus	Modelleerimisel müranormid täidetud; täiendav seire tehtud, normid kinnitatud
Loodusmõju (loomad, linnud)	Tuvastatav ökoloogilise ja toksilisuse kategooriate kaudu	Kogukond tajub lindude/loomade kadumist, ökoloogilise rahu kadumist	Tuvastati riskid lindudele ja nahkhiirtele, rakendati leevendusmeetmed
Visuaalne mõju	Ei käsitle	38% tajuvad tugevat häiringut (punased tuled, labade varjud); osa harjub	Nähtavusanaluüsiga määrati visuaalne mõju mõõdukaks (fotomontaažid)
Tervisemõju	Hinnatakse emiteeritavate ainete kaudu (kantserogeenid, anorgaanilised ühendid)	30% mainib tervise halvenemist – unehäired, tinnitus, väsimus	Ei tuvastatud ohtu – müratase normis, infraheli alla tajuläve
Majanduslik mõju	Süsinikujalajälje vähendamine, energiatootlikkus, tehnoloogiline kasu	Tajutakse ebaõiglust (kasusaajad = suurmaoanikud), hüvitised ebaõiglasel, kasu kogukonnale väike	Tööhõive ja tulu omavalitsusele mainitud positiivselt; hüvitusüsteem olemas
Usaldus ja kaasamine	Ei käsitle	59% tajub usalduse puudust, formaalne kaasamine, hiline infoedastus	Viide kaasamisele planeeringufaasis, kuid kogukondlike reaktsioone ei kajastata
Loodusväärtuste säilitamine	Arvestab kaudset mõju materjalikasutuse kaudu	Kogukond näeb ohuna loodusrahule ja vaimsele kvaliteedile	Natura alad jäeti kõrvale, tundlike liikide puhul asukohti kohandati
Andmete päritolu	IMPACT 2002+ mudel; maismaatuuliku andmed	Küsitlused, kvalitatiivne sisuanalüüs	Ekspertarvamused, seired, modelleerimine (WindPRO)
Metoodika tugevus	Süvitsi kvantifitseeritud, globaalne, materjaline süsteemne mõju	Paljastab kogukondliku aktsepteeritavuse, sotsiaalse õigluse ja tajulise heaolu aspekte	Kohalik mõju ametlikuks planeeringuks, õiguslik sobivus, tehniline kontroll
Metoodika piirang	Ei arvesta kohaliku tajuga, ei käsitle usaldust ega esteetikat	Ei kvantifitseeri globaalseid mõjusid, ei käsitle materjalivoogusid ega energiatarvet	Ei käsitle globaalseid ahelaid, süsinikujalajälge, elutsükklisi või tunnetuslikke mõjusid

Aspekt	LCA (elutsükli hindamine)	S-LCA (sotsiaalse elutsükli hindamine)	KSH (keskkonnamõju strateegiline hindamine)
Täiendavus teiste meetoditega	Täiendab KSH-d süsteemse globaalse vaatega	Täiendab KSH-d inimeste tunnetuse ja aktsepteeritavuse mõõtmes; lisab, mida LCA ei näe	Täiendab LCA-d ruumiliselt ja seaduslikult, kuid vajab tuge nii LCA kui S-LCA tulemustest

KOKKUVÕTE

Käesolev magistritöö käsitles maismaatuulikute elutsükliühiste keskkonna-, kliima- ja sotsiaalsete mõjude hindamist, kasutades juhtumiuuringuna Saarde tuuleparki. Töö eesmärk oli võrrelda kolme hindamismetoodikat – elutsükli hindamist (LCA), sotsiaalse elutsükli hindamist (S-LCA) ja keskkonnamõjude strateegilist hindamist (KSH) ning analüüsida nende metoodikate kattuvusi, erinevusi ja vastastikust täiendavust. Töö lõppeesmärgiks oli pakkuda mitmetasandiline arusaam tuuleenergia arendusprojektide mõjudest, mis ühendaks kvantitatiivsed, kvalitatiivsed ja kogukondlikult tajutavad aspektid.

Töö teoreetiline osa keskendus maismaatuulikute tööpõhimõtete, arengu, elutsükli etappide ja levinumate hindamismetoodikate teoreetilisele käsitlusele. Analüüsiti olemasolevat teaduskirjandust elutsükli hindamise (LCA), sotsiaalse elutsükli hindamise (S-LCA) ja keskkonnamõjude strateegilise hindamise (KSH) rakendatavuse kohta taastuvenergia kontekstis. Lisaks uuriti varasemaid uuringuid, mis käsitlevad tuuleenergia sotsiaalseid ja keskkonnamõjusid, ning hinnati nimetatud metoodikate sobivust maismaatuulikute mõju hindamisel. See lõi aluse töö praktilisele osale ja võimaldas siduda konkreetseid uurimistulemusi laiemate teaduslike aruteludega.

Praktilises osas kasutati mitut metoodilist lähenemist: LCA jaoks modelleeriti kogu tuulepargi elutsükkel SimaPro tarkvara ja IMPACT 2002+ metoodika abil, KSH analüüsi aluseks võeti strateegilise hindamise lõpparuanne ning lisauuringud müra, nahkhiirte ja linnustiku kohta. Sotsiaalse mõõtmehindamiseks viidi läbi küsitlus kohalike elanike seas, millele vastas 37 inimest. Kvalitatiivsed vastused struktureeriti temaatilisteks alateemadeks (müra ja tervisemõjud, visuaalne häiring, keskkonnatunne, usaldus ja kaasamine, majanduslik kasu ja hüvitised), mida analüüsiti koos kvantitatiivsete trendidega.

LCA tulemused näitasid, et tuulepargi suurim keskkonnamõju avaldub seadmete tootmisfaasis, domineerides kõigis 15 mõjukategoorias. Tootmise mõju on kõrgeim nii inimeste tervise, globaalse soojenemise, ökosüsteemi kvaliteedi kui ka maavarade kaevandamise kategooriates. Elektritootmise etapp avaldas seevastu kõige väiksemat mõju, kinnitades tuuleenergia madalat operatiivset süsiniku jalajälge. Võrguühenduse loomine osutus mõjusaks mittekantserogeensete ühendite, toksilisuse ja maavarade kaevandamise kategooriates, eelkõige taristuehituse tõttu. KSH keskendus lokaalselt tajutavatele mõjudele – müra, infraheli, varjuviljumine ja visuaalne mõju. Sellega leiti, et kõik näitajad jäävad alla kehtivate piirväärtuste, mistõttu olulisi keskkonnanäitajaid ei tuvastatud.

S-LCA tulemused tõid seevastu esile tajupõhised mõjud ja kogukondliku hinnangu, mida teised meetodid ei kajasta. 46% vastanutest pidasid mürahäiringut igapäevaseks probleemiks, mida seostati unehäirete, peavalude ja ärevusega. 59% viitas usalduskriisile kohalike elanike, arendaja ja omavalitsuse vahel. Visuaalne häiring, looduskosluste kadumine ja kodukeskkonna industrialiseerumine mõjutasid tugevalt inimeste tunnetuslikku elukvaliteeti. Samuti tõi 57% vastanutest välja, et nad ei koge projektist mingit isiklikku majanduslikku kasu ning tajuvad hüvitusmehhanisme ebaõiglastena ja läbipaistmatutena. Need tulemused osutavad, et formaalne vastavus piirnormidele ei taga sotsiaalset aktsepteeritavust ega legitiimsust.

Metoodikate võrdlus näitas selgelt, et iga hindamislähenemine täidab erinevat, kuid olulist rolli. LCA pakub täpset ja võrreldavat hinnangut globaalse keskkonnamõju kohta, KSH tagab juriidilise ja tehnilise vastavuse kohaliku planeerimise kontekstis, kuid ainult S-LCA suudab esile tuua kogukondlikke tundeid, väärtuspõhiseid konflikte ja sotsiaalse õigluse küsimusi. Ainult nende kolme kombineeritud kasutamine võimaldab hinnata arendusprojekti mõju nii loodus- kui ka sotsiaalsüsteemile terviklikult.

Kokkuvõttes näitab Saarde tuulepargi juhtum, et keskkonnamõjude hindamisel ei piisa ainult tehnilistest ega õiguslikest näitajatest – määravaks võivad osutada ka subjektiivsed kogemused, väärtuspõhised hoiakud ja kogukondlik usaldus. Elutsükli hindamine (LCA) võimaldab kvantitatiivselt hinnata globaalseid keskkonnamõjusid ja ressursside kasutust, keskkonnamõju strateegiline hindamine (KSH) kaardistab lokaalseid, normatiivseid ja planeeringuprotsessiga seotud aspekte, samas kui sotsiaalne elutsükli hindamine (S-LCA) toob esile inimeste tegelikud kogemused, tajutud mõjud ja sotsiaalse legitiimsuse küsimused. Kõik kolm meetodit keskenduvad erinevatele, ent teineteist täiendavatele mõõtmetele. Nende kombineeritud rakendamine võimaldab kujundada usaldusväärse ja mitmetasandilise arusaama taastuvenergia projektide mõjust. Ainult juhul, kui ka kogukond tajub projekti õiglase ja kaasavana, on tagatud selle pikaajaline aktsepteeritavus ja kestlikkus.

SUMMARY

This master's thesis focused on assessing the life cycle-based environmental, climate, and social impacts of onshore wind turbines, using the Saarde wind farm as a case study. The aim was to compare three assessment methodologies—Life Cycle Assessment (LCA), Social Life Cycle Assessment (S-LCA), and Strategic Environmental Assessment (SEA)—and to analyze their overlaps, differences, and mutual complementarity. The final objective was to provide a multi-layered understanding of the impacts of wind energy development projects by integrating quantitative, qualitative, and community-perceived aspects.

The theoretical part of the thesis addressed the principles of operation, development, life cycle phases, and commonly used impact assessment methods for onshore wind turbines. A literature review was conducted on the applicability of LCA, S-LCA, and SEA within the context of renewable energy. In addition, previous studies on the social and environmental impacts of wind energy were examined, and the suitability of these methodologies for evaluating onshore wind projects was assessed. This created a foundation for the practical part of the thesis and enabled the integration of specific research results with broader scientific discourse.

The practical section applied multiple methodological approaches: the entire life cycle of the wind farm was modeled using SimaPro software and the IMPACT 2002+ method for the LCA; the SEA analysis was based on the official strategic assessment report and additional studies on noise, bats, and birdlife. To assess the social dimension, a community survey was conducted, with 37 responses. Qualitative responses were categorized into thematic areas (noise and health effects, visual disturbance, environmental perception, trust and participation, economic benefit and compensation), which were analyzed alongside quantitative trends.

LCA results showed that the greatest environmental impacts of the wind farm occur during the manufacturing phase, dominating all 15 impact categories. This phase had the highest effect in terms of human health, global warming potential, ecosystem quality, and resource depletion. In contrast, the electricity production phase had the lowest environmental impact, confirming the low operational carbon footprint of wind energy. Grid connection contributed significantly to impacts in the categories of non-carcinogenic substances, toxicity, and resource use—mainly due to infrastructure construction. The SEA focused on locally perceived impacts such as noise, infrasound,

shadow flicker, and visual effects, concluding that all measured indicators remained below regulatory thresholds and no significant environmental risks were identified.

S-LCA results, however, highlighted perception-based impacts and community-level evaluations not captured by the other methods. About 46% of respondents reported noise disturbance as a daily issue, linked to sleep disruption, headaches, and anxiety. 59% pointed to a crisis of trust between local residents, the developer, and the municipality. Visual disturbance, loss of natural habitats, and the industrialization of the living environment significantly affected perceived quality of life. Additionally, 57% stated that they did not benefit economically from the project and considered the compensation mechanisms to be unfair and non-transparent. These results suggest that formal compliance with legal thresholds does not guarantee social acceptability or legitimacy.

The comparison of methodologies clearly demonstrated that each approach serves a distinct yet essential purpose. LCA offers precise and comparable evaluations of global environmental impacts, SEA ensures legal and technical compliance in local spatial planning, while only S-LCA can uncover community sentiments, value-based conflicts, and issues of social justice. Only through their combined application can the impact of a development project on both ecological and social systems be comprehensively assessed.

In conclusion, the Saarde wind farm case demonstrates that environmental impact assessment cannot rely solely on technical or legal metrics—subjective experiences, value-driven perceptions, and community trust may prove decisive. LCA enables the quantification of global environmental impacts and resource use, SEA maps localized, normative, and planning-related aspects, while S-LCA brings forth actual lived experiences, perceived impacts, and questions of social legitimacy. Each of the three methodologies focuses on different but complementary dimensions. Their integrated application provides a reliable and multidimensional understanding of the impacts of renewable energy projects. Long-term acceptance and sustainability can only be ensured if the project is also perceived by the community as fair and inclusive.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] "Wind turbine: what it is, parts and working | Enel Green Power." Accessed: Mar. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.enelgreenpower.com/learning-hub/renewable-energies/wind-energy/wind-turbine>
- [2] Merlin Rehema Kristel Nõges Kerli Kirsimaa Karina Suik, "Kohalike omavalitsuste tuule- ja päikeseenergia käsiraamat".
- [3] F. Haces-Fernandez, M. Cruz-Mendoza, and H. Li, "Onshore Wind Farm Development: Technologies and Layouts," *Energies* 2022, Vol. 15, Page 2381, vol. 15, no. 7, p. 2381, Mar. 2022, doi: 10.3390/EN15072381.
- [4] "Tuuleenergia | Keskkonnaportaal." Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://keskkonnaportaal.ee/et/teemad/taastuvenergia/tuuleenergia>
- [5] "Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines - Google Books." Accessed: Feb. 27, 2025. [Online]. Available: https://books.google.ee/books?hl=en&lr&id=xYGEEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=what+are+onshore+wind+turbines&ots=__n7ZXK3hc&sig=-ZObAJcxKgr5Ail9g5Eow5znVjE&redir_esc=y&pli=1#v=onepage&q&f=false
- [6] "How a Wind Turbine Works - Text Version | Department of Energy." Accessed: Mar. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/wind/how-wind-turbine-works-text-version>
- [7] "(PDF) Comprehensive Analysis of Wind Turbines: A Comparison Between Onshore and Offshore Wind Turbines." Accessed: Feb. 27, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/377804844_Comprehensive_Analysis_of_Wind_Turbines_A_Comparison_Between_Onshore_and_Offshore_Wind_Turbines
- [8] "Wind Farms - Iberdrola - Iberdrola." Accessed: Feb. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.iberdrola.com/sustainability/how-onshore-wind-farms-work?utm>
- [9] "Wind Turbines: the Bigger, the Better | Department of Energy." Accessed: Mar. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/articles/wind-turbines-bigger-better>
- [10] A. D. Mohammad Borhani, "Comprehensive Analysis of Wind Turbines: A Comparison Between Onshore and Offshore Wind Turbines," Feb. 2025.
- [11] R. McKenna *et al.*, "High-resolution large-scale onshore wind energy assessments: A review of potential definitions, methodologies and future research needs," *Renew Energy*, vol. 182, pp. 659–684, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.RENENE.2021.10.027.

- [12] P. Beiter, J. T. Rand, J. Seel, E. Lantz, P. Gilman, and R. Wiser, "Expert perspectives on the wind plant of the future," *Wind Energy*, vol. 25, no. 8, pp. 1363–1378, Aug. 2022, doi: 10.1002/WE.2735.
- [13] "Kristen Michal: võideldes tuuleparkide vastu võideldakse kalli elektri poolt | Arvamus | ERR." Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.err.ee/1609599062/kristen-michal-voideldes-tuuleparkide-vastu-voideldakse-kalli-elektri-poolt>
- [14] "Soodsaim viis elektri tootmiseks: maismaa tuuleenergia - TMV Green." Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://tmvgreen.ee/artiklid/soodsaim-viis-elektri-tootmiseks-maismaa-tuuleenergia/>
- [15] "Tuuleparkide arendajad peavad taastuenergia eesmärges aastaks 2030 optimistlikeks | Majandus | ERR." Accessed: Mar. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.err.ee/1609589117/tuuleparkide-arendajad-peavad-taastuenergia-eesmarke-aastaks-2030-optimistlikeks>
- [16] "Wind turbine | Renewable Energy, Efficiency & Design | Britannica." Accessed: Apr. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/wind-turbine>
- [17] A. Farina and A. Anctil, "Material consumption and environmental impact of wind turbines in the USA and globally," *Resour Conserv Recycl*, vol. 176, p. 105938, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2021.105938.
- [18] "Wind turbine: what it is, parts and working | Enel Green Power." Accessed: Mar. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.enelgreenpower.com/learning-hub/renewable-energies/wind-energy/wind-turbine>
- [19] A. Hasheminezhad, Z. Nazari, B. Yang, H. Ceylan, and S. Kim, "A comprehensive review of sustainable solutions for reusing wind turbine blade waste materials," *J Environ Manage*, vol. 366, p. 121735, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2024.121735.
- [20] M. Bošnjaković, M. Katinić, R. Santa, and D. Marić, "Wind Turbine Technology Trends," *Applied Sciences 2022, Vol. 12, Page 8653*, vol. 12, no. 17, p. 8653, Aug. 2022, doi: 10.3390/APP12178653.
- [21] "<https://vectormine.com/item/horizontal-vs-vertical-axis-wind-turbine-principle-structure-outline-diagram/>," *VectorMine*.
- [22] H. Wang, C. Liu, Y. Guo, H. Hao, and L. Zhang, "Experimental study on the mechanical characteristics of prefabricated dense ribs foundation for onshore wind turbines," *Structures*, vol. 73, p. 108273, Mar. 2025, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2025.108273.

- [23] "How Does Onshore Wind Power Work? | Ørsted." Accessed: Feb. 27, 2025. [Online]. Available: <https://orsted.com/en/what-we-do/renewable-energy-solutions/onshore-wind-energy/technology>
- [24] M. Bošnjaković, M. Katinić, R. Santa, and D. Marić, "Wind Turbine Technology Trends," *Applied Sciences* 2022, Vol. 12, Page 8653, vol. 12, no. 17, p. 8653, Aug. 2022, doi: 10.3390/APP12178653.
- [25] "Advances in High-Performance Wind Turbines." Accessed: Mar. 01, 2025. [Online]. Available: <https://inspenet.com/en/articulo/advances-high-performance-wind-turbines/>
- [26] "Bends, Twists, and Flat Edges Change the Game for Wind Energy | Department of Energy." Accessed: Feb. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/wind/articles/bends-twists-and-flat-edges-change-game-wind-energy?>
- [27] "Kuidas taaskasutada tuulegeneraatori labasid? Neli nutikat võimalust." Accessed: Feb. 28, 2025. [Online]. Available: <https://teadus.postimees.ee/7930770/kuidas-taaskasutada-tuulegeneraatori-labasid-neli-nutikat-voimalust>
- [28] "An overview of the history of wind turbine development: Part I—The early wind turbines until the 1960s." Accessed: Feb. 21, 2025. [Online]. Available: https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.1177/0309524X221117825?src=getft&utm_source=mendeley&getft_integrator=mendeley
- [29] "Wind energy." Accessed: Feb. 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy/>
- [30] "Wake Up Call: Why Wind Farm Digitization Can't Afford to Wait." Accessed: Feb. 28, 2025. [Online]. Available: https://www.vhive.ai/wake-up-call-why-wind-farm-digitization-cant-afford-to-wait/?utm_
- [31] J. Serrano-González and R. Lacal-Aránzategui, "Technological evolution of onshore wind turbines—a market-based analysis," *Wind Energy*, vol. 19, no. 12, pp. 2171–2187, Dec. 2016, doi: 10.1002/WE.1974.
- [32] "Future of Onshore Wind Energy: Advantages & Disadvantages." Accessed: Feb. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.trccompanies.com/insights/the-future-of-onshore-wind-energy/>
- [33] "Kuidas lepitada kogukondi tuuleparkide rajamisega? - Arenguseire Keskus." Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://arenguseire.ee/pikksilm/kuidas-lepitada-kogukondi-tuuleparkide-rajamisega>

- [34] "Eesti meretuule väärtuspakkumine, september 2023 – Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon." Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://tuuleenergia.ee/eesti-meretuule-vaartuspakkumine-september-2023/>
- [35] B. Desalegn, D. Gebeyehu, B. Tamrat, T. Tadiwose, and A. Lata, "Onshore versus offshore wind power trends and recent study practices in modeling of wind turbines' life-cycle impact assessments," *Clean Eng Technol*, vol. 17, p. 100691, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.CLET.2023.100691.
- [36] "Tuuleenergia | Kliimaministeerium." Accessed: Mar. 01, 2025. [Online]. Available: <https://kliimaministeerium.ee/energeetika-maavarad/taastuenergia/tuuleenergia>
- [37] "Taastuenergia ja jäätmemajanduse roll energiamajanduses. Soojusäri väljakutsed Innar Kaasik Taastuenergia ja väikekoostootmise juht".
- [38] "Valitsuse pressikonverents, 27. veebruar 2025 | Eesti Vabariigi Valitsus." Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://valitsus.ee/uudised/valitsuse-pressikonverents-27-veebruar-2025>
- [39] "Tuuleenergia - Utilitas." Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://utilitas.ee/energia-tootmine/tuuleenergia/>
- [40] "OX2 laiendab oma tegevust Eestisse - OX2." Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.ox2.com/et/eesti/uudised/pressiteated-ja-uudised/ox2-laiendab-oma-tegevust-eestisse/>
- [41] "Tuuleenergeetika võimsus Eestis | Keskkonnaportaal." Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://keskkonnaportaal.ee/tuuleenergeetika-voimsus-eestis>
- [42] "Ülevaade tuuleenergeetika arenduste hetkeseisust (august 2024) | Keskkonnaportaal." Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://keskkonnaportaal.ee/et/ulevaade-tuuleenergeetika-arenduste-hetkeseisust-august-2024>
- [43] "Esmakordselt tuuleparkidelt kogutud tuulikutasu laekub neljale omavalitsusele - Ajakiri Keskkonnatehnika." Accessed: Mar. 01, 2025. [Online]. Available: <https://keskkonnatehnika.ee/esmakordselt-tuuleparkidelt-kogutud-tuulikutasu-laekub-neljale-omavalitsusele/>
- [44] "TAASTUVENERGIA AASTARAAMAT 2023 Eesti Taastuenergia Koda", Accessed: Apr. 25, 2025. [Online]. Available: www.taastuenergeetika.ee
- [45] Eriväljaanne valmis koostöös Eesti Tuuleenergia Assotsiatsiooniga, "Tuuleenergia eri," Sep. 2020.
- [46] "5 kõige põletavamad küsimust ja vastust tuulikute kohta - Utilitas." Accessed: Mar. 01, 2025. [Online]. Available: <https://utilitas.ee/5-koige-poletavamatkusimust-ja-vastust-tuulikute-kohta/>

- [47] "Kellele on vaja taastuenergiat? - Raplamaa Sõnumid." Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://sonumid.ee/2025/01/28/kellele-on-vaja-taastuenergiat/>
- [48] B. Atilgan Turkmen and F. Germirli Babuna, "Life Cycle Environmental Impacts of Wind Turbines: A Path to Sustainability with Challenges," *Sustainability 2024, Vol. 16, Page 5365*, vol. 16, no. 13, p. 5365, Jun. 2024, doi: 10.3390/SU16135365.
- [49] "LCA – ELUTSÜKLI HINDAMINE | EESTI." Accessed: Mar. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.bureauveritas.ee/jatkusuutlikkuse-teenused/kestliku-arengu-teenused/lca-ehk-elutsukli-hindamine>
- [50] S. Davidsson, M. Höök, and G. Wall, "A review of life cycle assessments on wind energy systems," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 17, no. 6, pp. 729–742, 2012, doi: 10.1007/S11367-012-0397-8.
- [51] M. Tavares Da Silva, V. Z. Rebutini, and F. N. Mancini, "BRAZILIAN ARCHIVES OF BIOLOGY AND TECHNOLOGY Life Cycle Assessment (LCA) and Wind Power Generation: Application of the Methodology and the Generator to Power System," *Arch. Biol. Technol. v*, vol. 61, p. 18000470, 2018, doi: 10.1590/1678-4324-smart-2018000470.
- [52] B. Guezuraga, R. Zauner, and W. Pölz, "Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines," *Renew Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 37–44, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.RENENE.2011.05.008.
- [53] Y. F. Nassar *et al.*, "Carbon footprint and energy life cycle assessment of wind energy industry in Libya," *Energy Convers Manag*, vol. 300, p. 117846, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2023.117846.
- [54] K. Doerffer, P. Baldowska-Witos, M. Pysz, P. Doerffer, and A. Tomporowski, "Manufacturing and Recycling Impact on Environmental Life Cycle Assessment of Innovative Wind Power Plant Part 1/2," *Materials 2021, Vol. 14, Page 220*, vol. 14, no. 1, p. 220, Jan. 2021, doi: 10.3390/MA14010220.
- [55] U. Das and C. Nandi, "Life cycle assessment on onshore wind farm: An evaluation of wind generators in India," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 53, p. 102647, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.SETA.2022.102647.
- [56] K. Piotrowska and I. Piasecka, "Specification of environmental consequences of the life cycle of selected post-production waste of wind power plants blades," *Materials*, vol. 14, no. 17, p. 4975, Sep. 2021, doi: 10.3390/MA14174975/S1.
- [57] B. Tremeac and F. Meunier, "Life cycle analysis of 4.5 MW and 250 W wind turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 8, pp. 2104–2110, Oct. 2009, doi: 10.1016/J.RSER.2009.01.001.
- [58] "LCA in wind energy." Accessed: Mar. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.wind-energy-the-facts.org/lca-in-wind-energy.html>

- [59] K. Morozovska, F. Bragone, A. X. Svensson, D. A. Shukla, and E. Hellstenius, "Trade-offs of wind power production: A study on the environmental implications of raw materials mining in the life cycle of wind turbines," *J Clean Prod*, vol. 460, p. 142578, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2024.142578.
- [60] N. Rathore and N. L. Panwar, "Environmental impact and waste recycling technologies for modern wind turbines: An overview," *Waste Management and Research*, vol. 41, no. 4, pp. 744–759, Apr. 2023, doi: 10.1177/0734242X221135527/ASSET/C98D7F5D-8914-4C66-81F7-4AAFC4D224E5/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1177_0734242X221135527-FIG5.JPG.
- [61] V. Revilla-Cuesta, M. Skaf, V. Ortega-López, and J. M. Manso, "Raw-crushed wind-turbine blade: Waste characterization and suitability for use in concrete production," *Resour Conserv Recycl*, vol. 198, p. 107160, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2023.107160.
- [62] L. L. Barbara Mendecka, "Life cycle environmental impacts of wind energy technologies: A review of simplified models and harmonization of the results," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Mar. 2019.
- [63] B. Jamie Fischer Advisor, D. McNally EDITORIAL REVIEWER, and J. Visch, "Comparing Wind and Solar Energy Impacts on the Environment: A LCA Approach Using openLCA Platform," 2021.
- [64] S. Verma, A. Ranjan Paul, and N. Haque, "Selected Environmental Impact Indicators Assessment of Wind Energy in India Using a Life Cycle Assessment," 2022, doi: 10.3390/en15113944.
- [65] S. Sala, "Draft recommended LCIA methods", Accessed: Apr. 06, 2025. [Online]. Available: <http://lct.jrc.ec.europa.eu/http://ies.jrc.ec.europa.eu/http://www.jrc.europa.eu/>
- [66] G. Savvidou and F. Johnsson, "Material Requirements, Circularity Potential and Embodied Emissions Associated with Wind Energy," *Sustain Prod Consum*, vol. 40, pp. 471–487, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.SPC.2023.07.012.
- [67] A. Farina and A. Anctil, "Material consumption and environmental impact of wind turbines in the USA and globally," *Resour Conserv Recycl*, vol. 176, p. 105938, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2021.105938.
- [68] K. Eileen and S. Jones, "Life Cycle Assessment Comparing Concrete Additive Manufacturing to Conventional Manufacturing of Ultra-Tall Wind Turbine," 2022.
- [69] J. Pedersen, J. M. Weinand, C. Syranidou, and D. Rehfeldt, "An efficient solver for large-scale onshore wind farm siting including cable routing," *Eur J Oper Res*, vol. 317, no. 2, pp. 616–630, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.EJOR.2024.04.026.

- [70] "Efficient and sustainable turbine maintenance and installation." Accessed: Mar. 28, 2025. [Online]. Available: <https://stateofgreen.com/en/solutions/efficient-and-sustainable-turbine-maintenance-and-installation/>
- [71] M. S. Nazir, N. Ali, M. Bilal, and H. M. N. Iqbal, "Potential environmental impacts of wind energy development: A global perspective," *Curr Opin Environ Sci Health*, vol. 13, pp. 85–90, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.COESH.2020.01.002.
- [72] T. A. Hamed and A. Alshare, "Environmental Impact of Solar and Wind energy- A Review," *[Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems]*, vol. [10], no. [2], p. [1]-[23], Jan. 2022, doi: 10.13044/J.SDEWES.D9.0387.
- [73] G. Msigwa, J. O. Ighalo, and P. S. Yap, "Considerations on environmental, economic, and energy impacts of wind energy generation: Projections towards sustainability initiatives," *Science of The Total Environment*, vol. 849, p. 157755, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2022.157755.
- [74] M. L. Berndt, "Influence of concrete mix design on CO2 emissions for large wind turbine foundations," *Renew Energy*, vol. 83, pp. 608–614, Nov. 2015, doi: 10.1016/J.RENENE.2015.05.002.
- [75] "74 percent of wind turbine mass is in the foundation." Accessed: Mar. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.americanexperiment.org/74-percent-of-wind-turbine-mass-is-in-the-foundation/>
- [76] "Researchers Study Concrete as an Alternative to Steel for Wind Turbine Foundations and Towers | Department of Energy." Accessed: Mar. 28, 2025. [Online]. Available: https://www.energy.gov/eere/wind/articles/researchers-study-concrete-alternative-steel-wind-turbine-foundations-and-towers?nrg_redirect=470006
- [77] "Laying the foundation for wind turbines now and in the future | Wind Systems Magazine." Accessed: Mar. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.windsystemsmag.com/laying-the-foundation-for-wind-turbines-now-and-in-the-future/>
- [78] E. Aydin and H. Ş. Arel, "High-volume marble substitution in cement-paste: Towards a better sustainability," *J Clean Prod*, vol. 237, p. 117801, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.117801.
- [79] "Wind energy and the environment - U.S. Energy Information Administration (EIA)." Accessed: Mar. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.eia.gov/energyexplained/wind/wind-energy-and-the-environment.php>
- [80] P. Senna, A. Da Cunha Reis, A. Castro, and A. C. Dias, "Promising research fields in supply chain risk management and supply chain resilience and the gaps

- concerning human factors: A literature review," *Work*, vol. 67, no. 2, pp. 487–498, 2020, doi: 10.3233/WOR-203298/ASSET/04190904-EFE9-4BF0-B2FE-27833268C687/ASSETS/GRAPHIC/10.3233_WOR-203298-FIG9.JPG.
- [81] B. Wen, Q. Jin, H. Huang, P. Tandon, and Y. Zhu, "Life cycle assessment of Quayside Crane: A case study in China," *J Clean Prod*, vol. 148, pp. 1–11, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.146.
- [82] L. Mishnaevsky, "Sustainable End-of-Life Management of Wind Turbine Blades: Overview of Current and Coming Solutions," *Materials 2021, Vol. 14, Page 1124*, vol. 14, no. 5, p. 1124, Feb. 2021, doi: 10.3390/MA14051124.
- [83] "Environmental Impacts of Wind Power | Union of Concerned Scientists." Accessed: Mar. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.ucs.org/resources/environmental-impacts-wind-power>
- [84] R. McKenna *et al.*, "System impacts of wind energy developments: Key research challenges and opportunities," *Joule*, vol. 9, no. 1, p. 101799, Jan. 2025, doi: 10.1016/J.JOULE.2024.11.016.
- [85] K. Skepast and P. Oü, "Tuulepargi planeeringu ja KSH (KMH täpsusega) lähtekohtade analüüs Lõppraport", Accessed: Mar. 31, 2025. [Online]. Available: www.skpk.ee
- [86] T. N. N. K. M. P. P. K. E. K. Urmas Uri, "PÕHJA-PÄRNUMAA VALLA TUULEPARKIDE ERIPLANEERINGU ASUKOHA EELVALIK JA KESKKONNAMÕJU STRATEEGILISE HINDAMISE I ETAPI ARUANNE," Apr. 2023.
- [87] P. Tchakoua, R. Wamkeue, M. Ouhrouche, F. Slaoui-Hasnaoui, T. A. Tameghe, and G. Ekemb, "Wind Turbine Condition Monitoring: State-of-the-Art Review, New Trends, and Future Challenges," *Energies 2014, Vol. 7, Pages 2595-2630*, vol. 7, no. 4, pp. 2595–2630, Apr. 2014, doi: 10.3390/EN7042595.
- [88] J. Manso-Morato, N. Hurtado-Alonso, V. Revilla-Cuesta, and V. Ortega-López, "Management of wind-turbine blade waste as high-content concrete addition: Mechanical performance evaluation and life cycle assessment," *J Environ Manage*, vol. 373, p. 123995, Jan. 2025, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2024.123995.
- [89] "ACCIONA'S wind blade recycling plant 'Waste2Fiber®' declared project of regional interest by the Navarra government." Accessed: Mar. 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.acciona.com/updates/news/accionas-wind-blade-recycling-plant-waste2fiber-declared-project-regional-interest-navarra-government?>
- [90] W. R. Azzam *et al.*, "Recycling Decommissioned Wind Turbine Blades for Post-Disaster Housing Applications," *Recycling 2025, Vol. 10, Page 42*, vol. 10, no. 2, p. 42, Mar. 2025, doi: 10.3390/RECYCLING10020042.

- [91] "First study on public perception of wind turbine circularity." Accessed: Mar. 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.tno.nl/en/newsroom/2025/01/public-wind-turbine-circularity/>
- [92] J. Walzberg, A. Cooperman, L. Watts, A. L. Eberle, A. Carpenter, and G. A. Heath, "Regional representation of wind stakeholders' end-of-life behaviors and their impact on wind blade circularity," *iScience*, vol. 25, no. 8, p. 104734, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.ISCI.2022.104734.
- [93] "Wind turbine repairs cost \$8bn in 2019 | Wood Mackenzie | Wood Mackenzie." Accessed: Apr. 11, 2025. [Online]. Available: [https://www.woodmac.com/press-releases/unplanned-wind-turbine-repairs-to-cost-industry-\\$8-billion-in-2019/](https://www.woodmac.com/press-releases/unplanned-wind-turbine-repairs-to-cost-industry-$8-billion-in-2019/)
- [94] b, *, E. V. b, L. V. O. b, G. T. a, c, S. E. T. a, J. D. a A. Buchmayra, "Exploring the global and local social sustainability of wind energy technologies: An application of a social impact assessment framework," *Appl Energy*, 2022.
- [95] "Guidelines for SOCIAL LIFE CYCLE ASSESSMENT OF PRODUCTS AND ORGANIZATIONS 2020".
- [96] "UNEP Social LCA and ISO 26000 - ISO26000SGN." Accessed: Apr. 13, 2025. [Online]. Available: <https://iso26000sgn.org/iso-26000/about-iso26000/unep-social-lca-and-iso-26000/>
- [97] T. Sudan, R. Taggar, P. K. Jena, and D. Sharma, "Supply chain disruption mitigation strategies to advance future research agenda: A systematic literature review," *J Clean Prod*, vol. 425, p. 138643, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2023.138643.
- [98] T. Tsani, J. M. Weinand, J. Linßen, and D. Stolten, "Quantifying social factors for onshore wind planning – A systematic review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 203, p. 114762, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.RSER.2024.114762.
- [99] S. Arregui, S. de Uña, D. Garcia, and A. Talayero, "An Indicator to estimate the social impact in wind farms," *Energies and Quality Journal*, vol. 2, pp. 48–53, Jul. 2024, doi: 10.24084/EQJ24.244.
- [100] J. Guan and H. Zepp, "Factors Affecting the Community Acceptance of Onshore Wind Farms: A Case Study of the Zhongying Wind Farm in Eastern China," *Sustainability 2020, Vol. 12, Page 6894*, vol. 12, no. 17, p. 6894, Aug. 2020, doi: 10.3390/SU12176894.
- [101] V. Gavrilan, "Degree Project in Strategies for Sustainable Development Second cycle, 30 credits Developing Prospective S-LCA Using a case study approach on wind power to problematise the assessment of prospective social impacts via S-LCA methodology", Accessed: Apr. 09, 2025. [Online]. Available: www.kth.se

- [102] "Tuulikute vaba Eesti! - Rahvaalgatus." Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://rahvaalgatus.ee/initiatives/1335-tuulikute-vaba-eesti>
- [103] "Seisame koos Eestimaa looduse ja inimeste tervise eest – anna oma allkiri! - Vanglplaneet." Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://vanglplaneet.ee/blog/2025/02/20/seisame-koos-eestimaa-looduse-ja-inimeste-tervise-eest-anna-oma-allkiri/>
- [104] "Norway and the Sami people end a dispute over Europe's largest onshore wind farm | AP News." Accessed: Apr. 09, 2025. [Online]. Available: <https://apnews.com/article/norway-sami-wind-farm-energy-indigenous-54f4cafbee29578dc9de1f206df3f9ff>
- [105] "'We're being bribed with cheap electricity' - Locals furious over plans for UK's largest onshore wind farm in Scotland | The Scottish Sun." Accessed: Apr. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.thescottishsun.co.uk/money/13922515/cabrach-uk-largest-windfarm-locals-angry-bribe/>
- [106] A. Elia, M. Taylor, B. Ó Gallachóir, and F. Rogan, "Wind turbine cost reduction: A detailed bottom-up analysis of innovation drivers," *Energy Policy*, vol. 147, p. 111912, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.ENPOL.2020.111912.
- [107] "Renewable energy ambitions in northern Colombia collide with Indigenous worries | AP News." Accessed: Apr. 09, 2025. [Online]. Available: <https://apnews.com/article/wind-energy-colombia-wayuu-indigenous-resistance-clash-cemetery-renewable-e55077418352f19349dc27b09f1eee18>
- [108] J. Liu *et al.*, "Life cycle cost modelling and economic analysis of wind power: A state of art review," *Energy Convers Manag*, vol. 277, p. 116628, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2022.116628.
- [109] T. Stehly, P. Duffy, and D. Mulas Hernando, "2022 Cost of Wind Energy Review," p. 627281636, 2023.
- [110] "O&M Best Practices for On-site Wind Turbines | PNNL." Accessed: Apr. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.pnnl.gov/projects/om-best-practices/onsite-wind-turbines>
- [111] L. Mishnaevsky and K. Thomsen, "Costs of repair of wind turbine blades: Influence of technology aspects," *Wind Energy*, vol. 23, no. 12, pp. 2247–2255, Dec. 2020, doi: 10.1002/WE.2552.
- [112] "Climate ministry planning changes to wind farm support scheme | News | ERR." Accessed: Apr. 12, 2025. [Online]. Available: <https://news.err.ee/1609261071/climate-ministry-planning-changes-to-wind-farm-support-scheme>

- [113] "Saarde tuulepark - Open Infrastructure Map." Accessed: Apr. 25, 2025. [Online]. Available: <https://openinframap.org/stats/area/Estonia/plants/-17237834>
- [114] "2023. AASTA KONSOLIDEERITUD MAJANDUSAASTA ARUANNE".
- [115] "Saarde tuulepargi helirõhutasemete mõõtmiste selgitav aruanne".
- [116] "Saardesse kerkib Eesti võimsaim tuulepark." Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://parnu.postimees.ee/7554400/saardesse-kerkib-eesti-voimsaim-tuulepark>
- [117] "Saardesse kerkib Eesti võimsaim tuulepark." Accessed: Apr. 25, 2025. [Online]. Available: <https://parnu.postimees.ee/7554400/saardesse-kerkib-eesti-voimsaim-tuulepark>
- [118] "Relation: Saarde tuulepark (17237834) | OpenStreetMap." Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.openstreetmap.org/relation/17237834#map=7/58.643/24.730>
- [119] "Pärnumaal Saarde vallas avati Utilitase esimene tuulepark Eestis - YouTube." Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=woXvvV7bID4>
- [120] "Saarde tuulikupargi laiendus põrkus kohalike müramurele | Eesti | ERR." Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.err.ee/1609539646/saarde-tuulikupargi-laiendus-porkus-kohalike-muramurele>
- [121] "Saarde vallas valmis üheksa tuulikuga tuulepark | Majandus | ERR." Accessed: Apr. 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.err.ee/1609101830/saarde-vallas-valmis-ueksa-tuulikuga-tuulepark>
- [122] "Keskkonnamõju hindamise ja keskkonnajuhtimissüsteemi seadus–Riigi Teataja." Accessed: May 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/13277900>
- [123] "Planeerimisseadus–Riigi Teataja." Accessed: May 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/130122024014>
- [124] Riin Kutsar KSH juhtekspert Kaile Eschbaum Keskkonnakorralduse spetsialist, "Saarde valla tuulikuparkide P14, P15, P16 detailplaneeringute keskkonnamõju strateegiline hindamine," Jan. 2020.
- [125] "Handbook for Product Social Impact Assessment 3.0 Mark Jacob Goedkoop PRé Consultants BV," 2016, doi: 10.13140/RG.2.2.23821.74720.
- [126] E. – S. and T. R. series Luxembourg: Publications Office of the European Union, "ILCD Handbook," 2010.
- [127] "Uuring: Saarde tuulepark ei põhjusta lubatust suuremat müra – Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon." Accessed: Apr. 25, 2025. [Online]. Available:

<https://tuuleenergia.ee/uuring-saarde-tuulepark-ei-pohjusta-lubatust-suuremat-mura/>

[128] Kotkaklubi, "Kokkuvõte," Jan. 2019.

[129] H. Pehlak and O. Ü. Xenus, "Saarde valla tuuleenergeetika arenduspiirkondades P14 ja P16 tuuleparkide rajamisega kaasnev mõju linnustikule".

[130] M. O. Kalda, "Nahkhiirte uuring Saarde valda kavandatavate P14, P15 ja P16 tuuleparkide mõju kohta nahkhiirtele lõpparuanne Koostajad: MSc Rauno Kalda".

[131] "Saarde tuulepark - Saarde Vallavalitsus." Accessed: Apr. 25, 2025. [Online]. Available: <https://saarde.ee/saarde-tuulepark>

LISA 1. Sotsiaalse elutsükli hindamise (S-LCA) küsitluse küsimused

Küsitluse pealkiri: Saarde tuulepargi mõju kohaliku kogukonna vaates

Kaaskiri/Sissejuhatus:

Tere!

Olen Tallinna Tehnikaülikooli magistrant ning õpin Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika erialal. Kirjutan lõputööd, mis käsitleb maismatuulikute keskkonna-, kliima- ja sotsiaalsed mõju. Praktilise osa raames viin läbi uuringu, mille eesmärk on hinnata Saarde tuulepargi sotsiaalsed mõju kohaliku kogukonna vaates (*Social Life Cycle Assessment ehk S-LCA*).

Käesoleva küsitluse eesmärk on koguda Saarde piirkonna elanike arvamusi tuulepargi rajamise võimalikest mõjudest igapäevaelule, tervisele, elukeskkonnale ja kogukondlikele suhetele. Küsitlusele ootan vastama inimesi, kelle elukoht jääb kuni 10 km raadiusesse Saarde tuulepargist.

Kõik vastused on anonüümsed ning neid kasutatakse ainult lõputöö raames üldistatud kujul. Küsitlusele vastamine võtab ligikaudu 5-10 minutit.

Suur tänu, et leiate aega vastamiseks – Teie panus on selle töö jaoks väga väärtuslik!

Küsimused:

Kogukondlik heaolu ja igapäevaelu

1. Kuidas on Saarde tuulepargi rajamine mõjutanud Teie igapäevast elu?
- Kui soovite, siis põhjendage enda eelnevat vastust
2. Kas tuulepargiga seoses on tehtud investeeringuid (teeholdus, sidevõrk, mänguväljakud, ürituste toetamine vms), mis on Teie elu või kogukonna heaolu parandanud?
- Kui jah, kuidas hindate nende investeeringute kasu – kas need vastavad kohaliku kogukonna vajadustele ja ootustele

Tervise ja keskkonna tajumine

3. Kas olete pärast tuulepargi rajamist täheldanud muutusi müras, vibratsioonis või tervisega seotud aspektides?
- Kui vastasite jaatavalt, palun põhjendage enda vastust.

4. Kuidas tajute tuulikute visuaalset mõju maastikule ja oma koduümbrusele?
5. Kas teie hinnangul on tuulepargi rajamine mõjutanud kohalikke loodus- või kultuuriväärtusi?
- Kui vastasite jaatavalt, palun põhjendage oma vastust.

Majanduslik mõju ja hüvitamine

6. Kas tuulepark on mõjutanud Teie kinnisvara väärtust või majanduslikku olukorda?
- Kui vastasite jaatavalt, siis palun selgitage ja/või tooge näide/näiteid.
7. Kas Teie kui kohaliku elaniku jaoks on kehtestatud mõni hüvitise- või toetuskeem (näiteks rahaline kompensatsioon)?
- Olenemata sellest, mida vastasite, palun põhjendage enda vastust
8. Kas tunnete, et arendusprotsessis on arvestatud kohalike huvidega ning võimalikke mõjusid on õiglaselt kompenseeritud?

Sotsiaalsed suhted ja usaldus

9. Kuidas tuulepargi rajamine on mõjutanud kohalikke suhteid kogukonnas (koostöö, konfliktid, ükskõiksus)?
10. Kuidas hindate arendajate ja kohalike elanike vahelist suhtlust ning kaasamist enne ja pärast tuulepargi rajamist?

Üldine hinnang ja soovitused

11. Kas näete tuulepargi rajamisel positiivseid külgi? Milliseid?
12. Kui saaksite anda ühe soovitus tulevastele arendustele või sarnastele projektidele, mis see oleks?
13. Kui soovite, lisage siia veel midagi, mida peate oluliseks mainida: