

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Infotehnoloogia teaduskond

Konstantin Jefimov 211770IAAM

**Tuulikulabade inspeksiooniandmete infosüsteemi äri – ja  
süsteemianalüüs tuulikulabade vigastuste ennetavaks  
tuvastamiseks Enefit Green AS-i näitel**

Magistritöö

Juhendaja: Taivo Kangilaski  
PhD

Tallinn 2023

# **Autorideklaratsioon**

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teised autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Konstantin Jefimov

19.05.2023

## **Annotatsioon**

### **Tuulikulabade inspeksiooniandmete infosüsteemi äri – ja süsteemianalüüs tuulikulabade vigastuste ennetavaks tuvastamiseks Enefit Green AS-i näitel**

Käesoleva töö eesmärgiks on läbi viia tuulikute labade inspeksiooni ja eelhoiatuse rakenduse analüüs ning välja pakkuda / kavandada võimalikud uued lahendused hoolduspersonalile, kes vastutavad igapäevase tuulikulabade inspekteerimise eest. Lahenduse võtme-elementideks on masinõppel põhinev lahendus, mis suudab iseseisvalt tuvastada vigastusi tuulikulabadel. Hetkel Enefit Green AS-l neid vajadusi arvestavat lahendust ei ole ning 495 tuulikulaba vajavad pärast inspeksiooni manuaalset andmeanalüüsi. Lisaks puudub süsteemne ülevaade labariketest ning võime teha ennustusi rikete arenemise ning nende kriitilisuse kohta.

Oluline on seegi, et Enefit Green AS-i tootmisportfell kasvab 2025. aastaks praeguselt 457 MW-lt ca 1.1 GW-ni. See tähendaab eeskätt seda, et tootmismahtude kasvades jääb manuaalseteks lisa-analüüsideks ning uuringuteks üha vähem aega. Enefit Greeni AS-i IT-strateegia üks põhipostulaate on läbi digitaliseerimise luua ettevõttele lisaväärtust, automatiseerida protsesse ning tõsta tootmisvarade käideldavust. Loodav infosüsteem kategoriseerib, sorteerib ning klassifitseerib droonidega tehtud labapiltidelt tuvastatuid rikkeid. Hooldusvajaduse automatiseerimise abil saab ettevõtte säästa ressursi labaparanluste pealt, sest hoolduspersonal saadetak vaid sinna, kuhu on infosüsteem soovitanud minna vastavalt labarikke kriitilisusele. Lühikesem seisakuaeg tuulikul tähendab rohkem elektritoodangut ning kõrgemat tuuliku käideldavust. Õigel ajal märkamata vigastus tuulikulabal võib viia katastroofiliste tagajärgedeni. Lisaks kulub liiga hilja avastatud labavigastuse likvideerimisele rohkem ressursse (eelkõige rohkem aega ning raha).

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 77. leheküljel, 7 peatükki, 29 joonist, 22 tabelit.

## **Abstract**

The aim of this master's thesis is to carry out a business and system analysis for the development of the wind turbine blade inspection information system. Based on the results of the master's thesis components, it is possible to develop a solution based on the business needs of the renewable energy company (Enefit Green AS), which allows to analyze and identify various defects occurring on the wind turbine blades using inspection images. Currently, in Enefit Green AS there is no solution that would allow the company to:

1. quickly analyze wind turbine blade inspection images and other observation data after the visual inspections are carried out;
2. detect developing faults on wind turbine blades and also give an indication regarding their progression;
3. give an assessment of the extent of the wind turbine blade failure (categorize the blade failures in terms of their criticality and physical dimensions);
4. make quick and accurate decisions regarding which wind turbine blades are most critical to be repaired and which wind turbine blade works can be postponed.

In order to assess the impact of the problem, author interviews production managers of the company's wind department, manager of asset management department and the manager of the wind department. In addition, author examines existing business process currently related to the wind turbine blade inspection and gives proposals to improve the current process and describes the company's new required capabilities needed to realize the proposed solution.

Author also carries out an extensive overview of the literature - how has similar problem been solved in the wind power industry and scientific community and also gives recommendations, which solutions should be implemented in the designed software solution.

Planned solution enables automatic wind blade inspection data analysis, failure category analysis, failure assessment and more effective wind turbine blade maintenance planning.

Master's thesis is in Estonian, contains 77 pages of text, 7 chapters, 29 figures and 22 tables.

## Lühendite ja mõistete sõnastik

<i>ad-hoc</i>	Väljend, mida kasutatakse tähenduses 'kindlaks otstarbeks, selleks korraks või juhtumiks'
API	<i>Application Programming Interface</i> , rakendusliides
BI	<i>Business Intelligence</i> , äriteave
BPMN	<i>Business Process Modelling Notation</i> , äriprotsesside modelleerimiskeel ehk graafiline notatsioon äriprotsesside ja töövoogude täpsemaks kirjeldamiseks
DBMS	<i>Database Management System</i> , andmebaasi haldussüsteem
EG	Enefit Green
EE	Eesti Energia
EAM	<i>Enterprise and Asset Management</i> , varahaldustarkvara
FURPS+	<i>Functionality, Usability, Reliability, Performance, Sustainability</i> , on akronüüm, mis esindab tarkvara kvaliteedi atribuutide klassifitseerimise mudelit
HTTPS	<i>Hypertext Transfer Protocol Secure</i> , turvaline protokoll autentitud ja krüpteeritud informatsiooni edastamiseks
Inspektsiooni kampaania	Hooldusmeeskonna väljasõidu ajal sooritatud labainspeksioonid
PAM	<i>Production and Asset Management</i> , Enefit Greeni juhtimiskoosolek
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> , arvutisüsteemide ja sidevõrkude abil toimuv tehniliste protsesside jälgimine ja juhtimine
MW	Megavatt
MS	Microsoft
MoSCoW	Funktsionaalsuste prioriteetide seadmise tehnika
NPS	<i>Nord Pool Spot</i> , ettevõtte, mis peab Norra, Taani, Rootsi, Soome, Eesti ja Leedu ühist elektribörsi
KPI	<i>Key Performance Indicator</i> , võtmemõõdik
Tootmata jäänud toodang	Toodang, mida tootmisüksus oleks võinud toota, kui tootmisüksus poleks olnud ühel või teisel põhjusel elektrivõrgust väljas (enamasti hoolduse või rikkalise seisaku tõttu)

Töökindlus	Võtmemõõdik Enefit Green tootmisportfellis, hindab opereeriva üksuse tõrgete osakaalu teatud ajaperioodil. Autor kasutab magistritöös antud mõistet sünonüümina mõistega "käideldavus"
LCOE	<i>Levelized Cost of Electricity</i> , ehk elektrienergia tasandatud maksumus tuulegeneraatori elektritootmise keskmise praeguse netokulu mõõt tuulegeneraatori kogu eluea jooksul
UML	<i>Unified Modelling Language</i> , unifitseeritud modelleerimiskeel
UI	<i>User Interface</i> , kasutajaliidese disain
Labavigastus	Ükskõik milline labavigastuse, mis eksisteerib ühel kolmest tuuliku labadest/tiivikust
VSM	<i>Value Stream Mapping</i> , materjali- ja teabevoe kaardistamine
WF	<i>Wind farm</i> , tuulepark
WT	<i>Wind turbine</i> , tuulik

# Sisukord

<b>Sissejuhatus</b> . . . . .	<b>11</b>
<b>1 Äriprobleemi kirjeldus</b> . . . . .	<b>13</b>
1.1 Probleemi püstitus ja magistritöö eesmärk . . . . .	13
1.2 Magistritöö skoop . . . . .	15
1.3 Autori roll . . . . .	16
1.4 Probleemi juurpõhjuste analüüs . . . . .	16
1.4.1 Probleemi mõju ettevõtte KPI-dele . . . . .	17
1.4.2 Probleemi lühikokkuvõte . . . . .	19
1.5 Metoodikate kirjeldus . . . . .	19
1.5.1 Ärianalüüsi metoodikad . . . . .	19
1.5.2 Süsteemianalüüsi metoodikad . . . . .	24
<b>2 Ettevõtte kirjeldus</b> . . . . .	<b>28</b>
2.1 Ettevõtte tegevusala kirjeldus . . . . .	28
2.1.1 Ettevõtte struktuuri kirjeldus . . . . .	28
2.1.2 Ettevõtte tuuleüksuse kirjeldus . . . . .	29
2.1.3 Ettevõtte varahalduse üksuse kirjeldus . . . . .	30
2.2 Ettevõtte strateegiline vaade . . . . .	30
2.2.1 Ettevõtte digitaliseerimise strateegia . . . . .	31
2.2.2 Probleemi seos ettevõtte strateegiaga . . . . .	32
<b>3 Kirjanduse ülevaade</b> . . . . .	<b>33</b>
3.1 Tuuliku ehitus ja tuulikulabade olulisus . . . . .	33
3.1.1 Levinumad labarikked ning rikkekategooriad . . . . .	33
3.2 Valdonna praktika probleemi lahendamiseks . . . . .	34
3.2.1 Masinõppe piirangud probleemi lahendamisel . . . . .	37
3.2.2 Teadustööde ülevaade . . . . .	37
<b>4 AS-IS vaade</b> . . . . .	<b>39</b>
4.1 Ärianalüüs . . . . .	39
4.1.1 Tuuleüksuse motivatsioonimudel . . . . .	39
4.1.2 Tuuleüksuse ärivõimekuste ülevaate kaart . . . . .	39
4.1.3 Tuulikute labade inspektsiooni protsess . . . . .	40
4.1.4 Labainspektsiooni - ja hoolduse protsessi SWOT analüüs . . . . .	42
4.1.5 Labainspektsiooni - ja raportite analüüsi voodiagramm . . . . .	43

4.2	AS-IS protsessi kitsaskohad . . . . .	47
<b>5</b>	<b>TO-BE vaade . . . . .</b>	<b>48</b>
5.1	Ärianalüüs . . . . .	48
5.1.1	Ärimudeli lõuend ja Mendelow maatriks . . . . .	48
5.1.2	Ärireeglid ja äriinfo mudel . . . . .	51
5.2	Uue protsessi modelleerimine . . . . .	53
5.2.1	Masinõppe funktsionaalsus uues äriprotsessis . . . . .	55
5.2.2	GAP analüüs uue protsessi rakendamiseks . . . . .	57
5.2.3	Loodava äriprotsessi väärtusvoog . . . . .	58
5.3	Süsteemianalüüs . . . . .	59
5.3.1	Kasutusmallid . . . . .	59
5.3.2	Kasutusmallide kirjeldused . . . . .	60
5.3.3	Tuulikulabade infosüsteemi funktsionaalsed nõuded . . . . .	68
5.3.4	Tuulikulabade infosüsteemi mittefunktsionaalsed nõuded . . . . .	71
5.4	IT-arhitektuur . . . . .	73
5.4.1	Kavandatava infosüsteemi kihiline mudel . . . . .	74
5.4.2	Komponentmudel . . . . .	74
5.4.3	Evitusdiagramm . . . . .	77
5.4.4	Relatsiooniline andmemudel . . . . .	78
5.4.5	Dimensionaalne andmemudel . . . . .	78
<b>6</b>	<b>Lahenduse elluviimine . . . . .</b>	<b>80</b>
6.1	Ajaplaan . . . . .	80
6.2	Riskianalüüs . . . . .	84
<b>7</b>	<b>Kokkuvõte . . . . .</b>	<b>88</b>
	<b>Kasutatud kirjandus . . . . .</b>	<b>90</b>
	<b>Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks . . . . .</b>	<b>98</b>
	<b>Lisa 2 - Tuulikulabade vigastuste kategooriad . . . . .</b>	<b>99</b>
	<b>Lisa 3 - Levinumad tuulikulabade vigastused . . . . .</b>	<b>100</b>



## Jooniste loetelu

1	Rikke ulatuse ning aja progresseerumise suhe eri tuulikuhoolduse liikide puhul. Allikas: [9]. . . . .	15
2	Äriprobleemi juurpõhjuste analüüs Ishikawa meetodil. Allikas: autori koostatud. . . . .	17
3	EG üldine stuktuur. Allikas: [40] . . . . .	29
4	EG tuuleenergia üksus. Allikas: autori koostatud. . . . .	30
5	EG varahalduse üksus. Allikas: autori koostatud. . . . .	31
6	Enefit Greeni strateegilised eesmärgid. Allikas: [42]. . . . .	32
7	Tuulik ja selle komponendid. Allikas: [44]. . . . .	33
8	Tuuliku labadel teostatavad tööd "rope-access" meetodil. Allikas: Enefit Green. . . . .	34
9	Tuuleenergia tootmisjuhi põhiprotsessid ja vastutusosalad. Allikas: autori koostatud. . . . .	40
10	Tuuleüksuse motivatsioonimudel. Allikas: autori koostatud. . . . .	41
11	Tuuleüksuse võimekuste kaart. Allikas: autori koostatud. . . . .	42
12	Tuulikulabade inspeksiooniprotsessi SIPOC diagramm. Allikas: autori koostatud. . . . .	43
13	Tuulikulabade inspeksiooni - ja hooldusprotsessi SWOT analüüs. Allikas: autori koostatud. . . . .	44
14	Tuulikulabade inspeksiooni - ja hooldusprotsessi voodiagramm. Allikas: autori koostatud. . . . .	45
15	Tuulikulabade inspeksiooni - ja hooldusprotsessi labainspeksiooni raporti manuaalse ülevaatamise alamprotsessi kirjeldus. Allikas: autori koostatud. . . . .	46
16	Mendelow maatriks uue infosüsteemi lahenduse projekti vaatest. Allikas: autori koostatud. . . . .	49
17	Ärireeglitel põhinev äriinfo mudel. Allikas: autori koostatud. . . . .	52
18	Tuulikulabade inspeksiooni - ja hooldusprotsessi voodiagramm (TO-BE). Allikas: autori koostatud. . . . .	54
19	Tüüpiline masinõppe mudeli treenimise protsess. Allikas: autori koostatud [65] põhjal. . . . .	55
20	Tuulikulaba vigastuste masinõppe mudeli treenimise voodiagramm CNN-meetodil. Allikas: autori koostatud [57] põhjal. . . . .	56

21	Labavigastuste automaatse tuvastuse ja hooldustöö planeerimise väärtusvoog. Allikas: autori koostatud. . . . .	59
22	Kavandatava infosüsteemi kasutusmallide mudel. Allikas: autori koostatud.	60
23	Tuuliku labainspektsiooni andmete analüüsiprotsessi kihiline mudel. Allikas: autori koostatud. . . . .	74
24	Kavandatava tuulikulabade infosüsteemi komponentmudel. Legend: oranž - loodavad moodulid, lilla - olemasolevad moodulid, roheline - välised moodulid. Allikas: autori koostatud [76] põhjal. . . . .	75
25	Tuulikulabade infosüsteemi evitusdiagramm. Allikas: autori koostatud [76] põhjal. . . . .	77
26	Tuulikulabade infosüsteemi relatsiooniline andmemudel. Allikas: autori koostatud. . . . .	78
27	Tuulikulabade infosüsteemi dimensionaalne andmemudel. Allikas: autori koostatud. . . . .	79
28	Tuulikulabade infosüsteemi realiseerimise Gantt diagrammiga koos kriitilise ahelaga. Allikas: autori koostatud. . . . .	83
29	Esiserva erosioon tuulikulabal. Allikas: Enefit Green. . . . .	101

## Tabelite loetelu

1	Tuulikulabade inspeksiooniprotsessi efektiivistamise lisandväärtus. Allikas: autori koostatud. . . . .	19
2	Äriprobleemi ülevaade. Allikas: autori koostatud. . . . .	19
3	Tuuliku labainspeksiooni meetodite võrdlus. Allikas: autori koostatud [54, 55, 56] põhjal. . . . .	36
4	Tuuliku labavigastuste masinõppe tuvastusega seotud uurimustööde kirjeldus ja kasutatud meetodikate võrdlus. Allikas: autori koostatud tabelis märgitud autorite põhjal. . . . .	38
5	SIPOC diagrammis kasutatud rollid ja nende kirjeldused. Allikas: autori koostatud. . . . .	44
6	Magistritöö probleemi ärimudeli lõuend. Allikas: autori koostatud. . . . .	50
7	Labainspeksioonide analüüsi ja vigastuste tuvastuse gap analüüs. . . . .	58
8	UC01 kirjeldus. Allikas: autori koostatud. . . . .	61
9	UC02 kirjeldus. Allikas: autori koostatud. . . . .	61
10	UC03 kirjeldus. Allikas: autori koostatud. . . . .	62
11	UC04 kirjeldus. Allikas: autori koostatud. . . . .	63
12	UC05 kirjeldus. Allikas: autori koostatud. . . . .	64
13	UC06 kirjeldus. Allikas: autori koostatud. . . . .	65
14	UC07 kirjeldus. Allikas: autori koostatud. . . . .	66
15	UC08 kirjeldus. Allikas: autori koostatud. . . . .	67
16	UC09 kirjeldus. Allikas: autori koostatud. . . . .	67
17	Tuulikulabade infosüsteemi funktsionaalsed nõuded. Allikas: autori koostatud. . . . .	68
18	Tuulikulabade infosüsteemi mittefunktsionaalsed nõuded. Allikas: autori koostatud. . . . .	72
19	Joonisel 24 kasutatud komponentide kirjeldused. Allikas: autori koostatud. . . . .	75
20	Lahenduse realiseerimise ajaplaan. Allikas: autori koostatud. . . . .	80
21	Lahenduse realiseerimisega seotud riskid ning nende maandamise ettepanekud. Allikas: autori koostatud. . . . .	84
22	Tuuliku labarikete kategooriad ja rikete ulatus. Allikas: autori koostatud [9] põhjal. . . . .	99

## Sissejuhatus

Tuuleenergeetika muutub iga aastaga üha olulisemaks energeetika valdkonnaks ning 2015. aastal kokku lepitud Pariisi kliimalepete täitmiseks ja süsinikuneutraalsuse saavutamiseks 2050. aastaks on üha rohkem organisatsioone üle maailma investeerimas taastuvenergia tootmisvõimekusse. Ka paljud Euroopa Liidu liikmesriigid on muutmas oma energiapoliitikat ning tegemas poliitilisi otsuseid rajamaks uusi ja jätkusuutlikke energialahendusi. [1]

Rahvusvaheline tuuleenergia nõukogu (GWEC) hindas oma 2021. aasta raportis, et tänase seisuga on maailmas installeeritud 743 GW tuuleparke, millest 2021. aastal rajati 93 GW (86.9 GW maismaa tuuleparke ning 6.1 GW meretuuleparke) [2]. Enefit Greenil AS-il on 2023. aasta alguse seisuga aktiivses ehitusfaasis neli tuuleparki erinevatel koduturgudel kogumahuga 211<sup>1</sup> MW. [3]

Tuuleparkide töökindel opereerimine on aga suuresti seotud tootmisüksuste efektiivse käidu korraldamisega, mis omakorda on seotud tootmisüksuste pideva monitoorimisega, seejuures ligi kolmandik hoolduskuludest teevad tuuleparkide omanikud just labavigastuste likvideerimiseks, mis on ka selle lõputöö fookus[4]. Tuuliku labavigastuste õigeaegne avastamine on ülima tähtsusega, sest liiga hilja avastatud labarike võib tuulikule olla katastroofilise tulemusega (tuuliku rootoribalansi häirumise tõttu võib tuulik ebakorrapäraste mehaaniliste jõudude toimele kokku variseda). [5]

Enefit Green AS-il on 2023. aasta alguse seisuga portfellis 397.8 MW tuuleparke: 22 tuuleparki ning 165 tuulikut [6]. Igal tuulikul on kolm laba ehk tiivikut ning nende summaarne arv ettevõttes on 495. Kõik labad vajavad regulaarseid inspeksioone, rikete tuvastust ning neile järgnevat hooldus - ja parandustöid.

Magistritöö eesmärgiks on läbi viia äri - ja süsteemianalüüs loodava tuulikulabade inspeksiooni infosüsteemi arendamiseks. Magistritöö tulemusel on võimalik arendada ettevõtte äri vajadusi arvestav infosüsteem, mille oluliseks komponendiks on masinõppel põhinev lahendus, mis võimaldab automaatselt analüüsida ning tuvastada erinevaid labadel esinevaid rikkeid droonidelt pärinevate inspeksioonipiltide abil. Hetkel puudub Enefit Green AS-s lahendus, mis võimaldaks:

---

<sup>1</sup>2 tuuleparki Leedus, 1 tuulepark Soomes ja 1 tuulepark Eestis.

1. kiiresti analüüsida labainspektsiooni käigus saadud tuulikulabade kohta koostatud (meta)andmeid;
2. tuvastada labavigastusi tuulikutel ning hinnata nende võimalikku progressiooni;
3. anda hinnang tuulikulaba rikke ulatuse kohta (nt kategoriseerida labariket selle kriitilisuse aspektist, hinnata vigastuse füüsilisi dimensioone jm);
4. teha kiireid ning täpseid otsuseid selle kohta, millise tuulikulabasid on kõige kriitilisem (olulisem) lähiajal hooldada ja/või parandada.

Probleemi mõju hindamiseks intervjuerib autor ettevõtte tuulevaldkonna tootmisjuhte, varahalduse juhti ja tuule valdkonna juhti. Lisaks tutvub autor hetkel ettevõttes kehtiva labainspektsiooni läbiviimise protsessiga seotud teiste äriprotsessidega ning pakub välja parendusettepanekud olemasoleva protsessi parandamiseks ning kirjeldab selle lahenduse realiseerimiseks ettevõttes vajaminevaid uusi ärivõimekusi.

Loodav lahendus võimaldab automaatset tuulikulabade inspektsiooni andmete analüüsi, rikete kategoriseerimist, rikete hindamist ning efektiivsemat hoolduste planeerimist.

Magistritöö struktuur on üles ehitatud järgmiselt:

1. esimeses peatükis kirjeldab autor probleemi ning selle seost ettevõtte KPI-dega; lisaks kirjeldab autor kasutatud äri - ja süsteemianalüüsi meetodikaid;
2. teises peatükis kirjeldab autor ettevõtte Enefit Green AS-i tegevust, eesmärke ning struktuuri;
3. kolmanda peatüki pühendab autor kirjanduse ülevaatele - autor analüüsib, mis on tuuleenergeetika ja masinõppe valdkonna parimad praktikad sarnase probleemi lahendamisel;
4. neljandas peatükis kaardistab autor täna organisatsioonis kehtivat labainspektsiooni läbiviimise protsessi ning annab omapoolse hinnangu tänase protsessi kitsaskohtadele;
5. viiendas peatükis kaardistab autor tulevast äriprotsessi ning esitab uued, vajaminevad võimekused, mis on uue protsessi realiseerimiseks tarvilikud;
6. kuuendas peatükis kajastab autor lahenduse elluviimisega seotuid aspekte - näidatakse projektiplaani koos kriitilise projektiahelaga, riskide mõjuhinnanguid ning riskide ennetamise meetmeid.

# 1. Äriprobleemi kirjeldus

Selles peatükis kirjeldatakse äriprobleemi detailsemalt, tuues seejuures välja, miks on antud probleemi lahendamine Enefit Greeni AS-i jaoks oluline. Äriprobleemi lahendamise olulisus ettevõttele seisneb eeskätt ressursside piiratuse printsiibis, st aeg, raha ja tööjõud on ettevõtte jaoks piiratud ressursid ning probleemi lahendamisel on laiemas plaanis eesmärk tagada olukord, kus piiratud ressursse (nt hooldusmeeskonnad) kasutatakse efektiivselt ja seal, kus tegelikult vaja. Seejärel tuuakse välja täpsemalt meetodikad, millega autor asub äriprobleemi analüüsima ning lahendama.

Lisaks tuuakse välja probleemi majanduslik mõju ettevõtte finantsulemustele ning vaadeldakse, millised on täna tuuleenergeetika valdkonna parimad praktikad antud probleemi lahendamisel. Finantsanalüüsis vaadeldakse tegelikke hooldusandmeid ettevõtte tuuleparkidest nii Eestis kui Leedus. Autor tuletab nende andmete pealt probleemi finantsmõju hinnangulise ulatuse.

## 1.1 Probleemi püstitus ja magistritöö eesmärk

Tuulikuid peetakse üheks efektiivseimaks viisiks toota taastuvelektrit. Seejuures on ääretult oluline säilitada tuuliku erinevate komponentide ohutus ja korrektne funktsioneerimine. Võimetus seda tagada tähendab tuuliku struktuurse tervilikkuse kontekstis tihti katastroofilisi tagajärgi. Erinevate autorite hinnangul kulub tuulikulabade rikete likvideerimiseks ligi 15-30% kogust tuulikuhooldusele kuluvast aastasest hoolduseelarvest. [7]

Tuulikute tehnoloogia on jõudsalt arenemas ning see tähendab eelkõige võimsamaid generaatoreid ning pikemaid ja suuremaid tuulikulabasid. Tuulikulabade proportsioonide kasvuga suureneb aga aerodünaamiline koormus, mille osaks tuulikulabad saavad. See tähendab omakorda, et tuuliku võimsuse kasvuga suureneb märkimisväärselt ka tõenäosus erinevateks labadega seotud riketeks [8]. Siit järeldub vajadus omada detailset ülevaadet tuulikulabade seisukorrast kogu tuuliku elukaare vältel, mis uutel tuulikutel ulatub 30. aastani.

Levinud viisiks omada head ülevaadet tuulikukomponentide seisukorrast on teostada plaanilisi hooldusi. Seejuures tuuliku komponentidega seotuid hoolduseid saab laias laastus jagada kaheks [9]:

- ennetav hooldus - hooldust teostatakse enne rikke toimumist ehk hooldus on preventiivse loomuga (reeglina kasutatakse tuulikutootja poolt määratud ning soovitatud intervalle ehk hooldusvälpasid);
- korrektiivne hooldus - hooldust teostatakse pärast rikke toimumist (n-ö avariiremont).

Ennetava hoolduse puhul eristatakse ka lisaks regulaarsele ehk teatud ajaskeemiga toimuvale hooldusele ka konditsioonipõhist (ehk seisukorrapõhist ehk prediktiivset) hooldust. Viimase puhul eristatakse tuuliku komponendi puhul selle eri olekuid ehk konditsioone kasutades selleks nt spetsiaalset monitoorimistarkvara (ing k. "SCADA" ehk arvutisüsteemide abil tehniliste parameetrite jälgimine), visuaalset inspektsiooni jm. Kui sooritatud hooldused ei anna oodatuid tulemusi, kaalutakse üldjuhul seadme täielikku asendamist või nt ümberdisainimist.

Suhe erinevate hooldusliikide vahel on esitatud joonisel 1. Ilmneb, et korrektiivne hooldus järgneb väga suure ulatusega rikkele, kus tavaliselt üks põhikomponentidest tuulikus (nt käigukast, trafo, generaator vm) on muutunud kasutuskõlbmatuks ning vajab suuremat remonti või täielikku väljavahetamist.

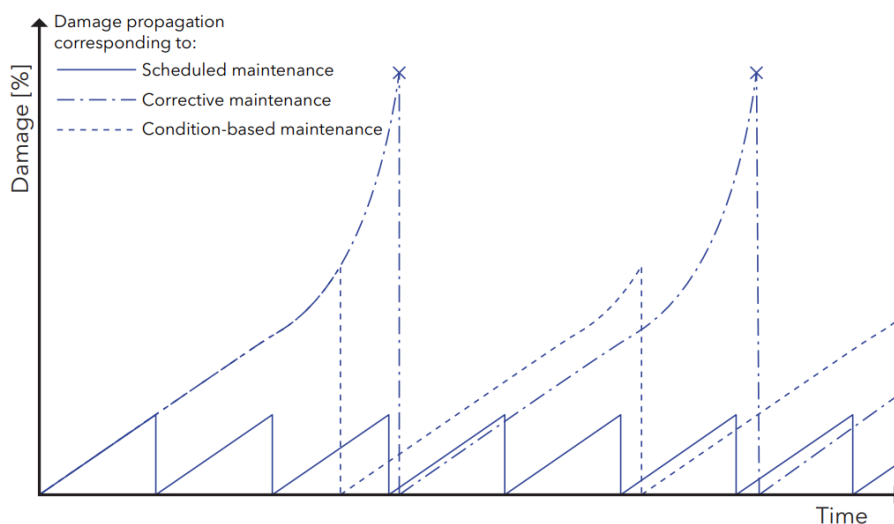
Ennetavat hooldust tehakse regulaarsete välpade tagant ning see tagab tuulikukomponentide korrektse käidu ning ohutuse. Regulaarne hooldus tähendab aga üldjuhul ettevõttele kõrgeid püsikulusid. Konditsioonipõhise hooldusega on võimalik minimeerida hoolduskulusid tagades seejuures ka tuuliku ohutus ning organisatsioonis eesmärgiks võetud töökindlus (käideldavus).

Õigeaegselt märkamata (arenevad) vigastused tuulikulabadel loovad ettevõttele eelkõige kolm probleemi:

1. tuulikute labahooldused muutuvad pikemaks ja kallimaks;
2. pikem hooldus tähendab pikemat seisakuaega, ehk suuremat toodangu kadu;
3. suurem toodangu kadu mõjutab oluliselt tootmisüksuse töökindlust ning viimasest johtuvalt ettevõtte finants - ja toodangueesmärke.

*Magistritöö äriprobleem on tuulikulabade hoolduse vajaduse ebapiisav tuvastus ning rikete tuvastamiseks ning likvideerimiseks kuluv pikk aeg. Magistritöö eesmärk on leida lahendus, mis võimaldaks ettevõttel vähendada tuulikulabade inspektsioonideks kuluvat aega, suurendada tuulikulabade rikete tuvastamise efektiivsust ning sooritada tuulikulabade inspektsiooniandmete automaatset analüüsi, mis aitaksid kaasa järgnevate tuulikulabade hooldustegevuste planeerimisele.*

Mõned autorid on tuvastanud, et ligi 85% täna opereerivatest tuulikulabadest omavad erineva kriitilisustasemega labarikkeid [10]. Ehk tuulikulabade seisukorra ülevaate omamine on väga oluline just selles kontekstis, et oleks võimalik analüüsida, kas ja kuidas võivad labarikked edasi progresseeruda. Tuuleparkide omanikud (nagu seda on ettevõtte Enefit Green AS) seisavad probleemi ees, kuidas minimeerida hoolduskulusid säilitades samaaegset tuuliku ohutust ning kõrget töökindlust. [11]



Joonis 1: Rikke ulatuse ning aja progresseerumise suhe eri tuulikuhoolduse liikide puhul. Allikas: [9].

## 1.2 Magistritöö skoop

Magistritöö skooopi kuuluvad järgmised tegevused:

- ettevõtte ning kahe ettevõtte alamüksuse (tuuleüksus ja varahalduse üksus) kirjeldus;
- äriprobleemi analüüs ning selle mõjude hinnang ettevõtte KPI-dele ning ettevõtte strateegiale;
- olemasoleva tuulikulabade inspeksiooni protsessi kirjeldus ning kitsaskohtade kaardistus;
- uue tuulikulabade inspeksiooni protsessi kirjeldamine;
- uue protsessi toimimiseks vajalike võimekuste kaardistus;
- tuulikulabade analüüsi infosüsteemi funktsionaalsete ning mittefunktsionaalsete nõuete kaardistus;
- kasutusmallide mudeli koostamine;
- kasutuslugude kirjeldamine;
- äriinfo kirjeldamiseks vajaminevate mudelite koostamine;
- tuulikulabade analüüsi infosüsteemi arhitektuuri koostamine;
- infosüsteemi juurutamise planeerimise projektiplani ning infosüsteemi riskianalüüsi



koostamine.

Magistritöö skoopi ei kuulu:

- turvanõuete kaardistus, selle tõttu et neile kehtivad Eesti Energia kontsernis fikseeritud tingimused;
- infosüsteemi prototüübi koostamine ja testimine;
- infosüsteemi programmeerimisega seotud tegevused;
- turul olevate karbitoodete analüüs;
- infosüsteemi hoolduse ja haldamisega seotud tegevused.

### 1.3 Autori roll

Autor töötab Enefit Greenis analüütikuna ning tegeleb igapäevaselt tootmisvarade käideldavuse analüüsiga, *ad-hoc* andmeanalüüsidega, IT-analüüsiga, andmekvaliteedi jälgimise ja korrigeerimisega, uute IT - ning riistvaraliste lahenduste kaardistamisega üle kõikide koduturgude ja tootmissektorite jm.

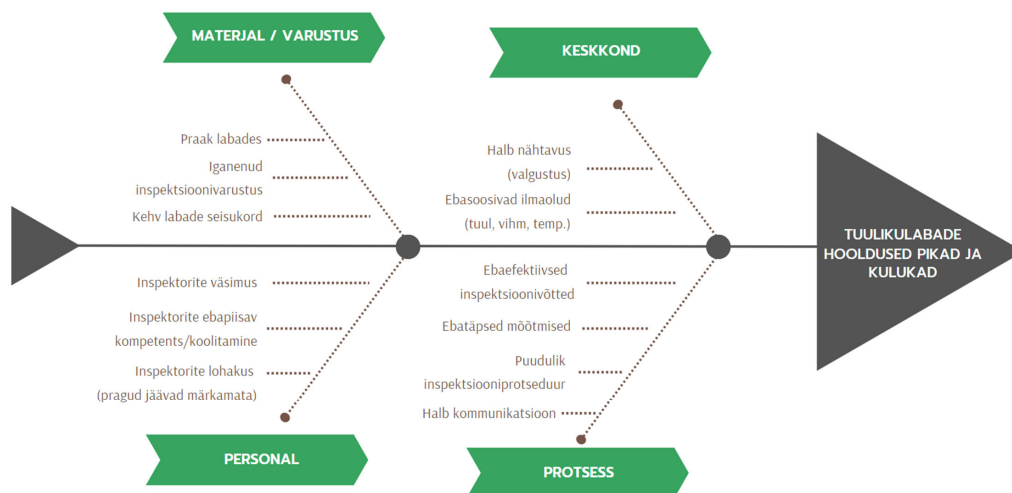
Magistritöö autor osaleb ka töögrupis, mis on seotud antud magistritöö temaatikaga ehk uue IT-lahenduse funktsionaalsuste kaardistamisega, mis aitaksid tuuleüksuse tootmisjuhtidel planeerida järgnevateks aastateks tuuliku labahoolduste strateegiat ning omada selget ülevaadet, millistest printsiipidest lähtuvalt teostatakse labatöid Enefit Green AS-s. Autor kasutab oma lõputöös allikaid, mis on viitamisreeglite kohaselt välja toodud, kuid mis on börsiettevõtte Enefit Green AS-i asutusesisesed dokumendid ning avalikustamisele ei kuulu.

### 1.4 Probleemi juurpõhjuste analüüs

Autor analüüsib äriprobleemi võimalikke juurpõhjusteid kasutades selleks Ishikawa meetodit. Ishikawa meetod töötati esialgselt välja Jaapanis Kaoro Ishikawa poolt 1960ndatel kvaliteedikontrolli tööriistana, kuid seda meetodit võib kasutada ka probleemide juurpõhjuste analüüsina ning samuti analüüsima protsessi kitsaskohtasid [12].

Joonisel 2 on näidatud Ishikawa diagrammi lähtudes defineeritud äriprobleemist. Ilmneb, et peamised põhjused, mis tingivad äriprobleemi, on seotud tuulikulabade inspeksiooni protsessiga ning keskkonnast tingitud faktoritega. Ehk näiteks keskkonnamõjude tõttu võivad labainspeksioonid drastiliselt pikemaks venida, või ei ole inspeksiooniprotseduur piisavalt kiire (nt selle tõttu, et vigastuste likvideerimine võtab aega, sest klaaskiudkihid

peavad labal kuivama).



Joonis 2: Äriprobleemi juurpõhjuste analüüs Ishikawa meetodil. Allikas: autori koostatud.

### 1.4.1 Probleemi mõju ettevõtte KPI-dele

Tulenevalt tuuliku labatööde pikkusest, ohtlikkusest ning keerulisusest, on labahoolduste KPI (ing k. "Key Performance Indicator", võtmemõõdik) mõju mõõdetav neljal moel:

1. toodangu kadu (labahoolduse ajal saamata jäänud toodang, st tuulik oleks võinud labahoolduse ajal hoopis opereerida ning müüa elektrivõrku elektrienergiat);
2. töökindluse kadu (saamata jäänud toodang mõjutab tuuliku ning tuulepargi töökindlust vastavalt organisatsiooni poolt defineeritud meetodikatele);
3. rahaline kadu (saamata jäänud toodangu rahaline väärtus konkreetsel tunnil kehtiva NPS (ing k. "Nord Pool Spot") hinna järgi);
4. ohutus (ettevõtte üks KPI-dest on aruandlusperioodi ajal toimunud õnnetused EG koduturgude ning üksuste üleselt).

Autor kasutab labatööde mõjude kvantifitseerimiseks 2022. a. Enefit Green tuuleparkides teostatud labatööde hooldus - ja finantsandmeid. Hetkel tehakse Enefit Greeni tuulikuinspeksioone preventiivsel moel ehk EG hoolduspartnerid külastavad teatud välja tagant kõiki tuuleparke ning vajadusel sooritavad ka parandusi. Iga inspeksiooniga ei kaasne

hooldust, kuid iga inspeksiooniga pannakse tuulik seisma ehk kaasneb toodangu kadu vastavalt riigis kehtivale elektri turuhinnale. Lisaks toimub hooldus - ja inspeksioonitegevus nn "rope-access" meetodil, kus hoolduspersonal kasutab spetsiaalset varustust selleks, et rippuda füüsiliselt laba küljes.

2022. aastal teostatud labainspeksioonide ja labahooldustest tingitud tuuliku keskmiseks mitte-opereerimise kestvuseks oli 74 tundi. Inspeksiooni puhul analüüsib hoolduspersonal kolme laba (seejuures on tuuliku rootori asendit vaja iga kord muuta, selleks et inspekteeritav laba oleks suunatud maa poole) ning koostatakse raport ja ülevaade labade olukorrast. Suuremate labavigastuste puhul tehakse koheselt ka korrektiivne hooldus, või planeeritakse see tulevikku, kui nt hooldusmeeskond ei ole koheselt saadav või tuuleolud ei ole hoolduseks sobilikud.

Enefit Greeni AS-i tuuleparkide keskmine elektrienergia tootmata jäämisest tingitud toodangu kadu ühe inspekteeritud tuuliku kohta oli 2022. aastal 40.3 MWh, mille keskmine turuväärtus oli koos taastuenergia toetusega<sup>1</sup> 12 370 eur. Siia arvestatakse juurde ka hooldus - ja transpordikulud, mille suurusjärk on 9 000 eur. Ehk summaarselt kulus ühe tuuliku inspekteerimiseks keskmiselt ligi 21 500 eur aastas.

Oluline on ka töökindluse ja toodangu mõju, ehk kõikide labatööde teostamiseks kulunud ajaga oleksid tuulikud võinud toota elektrienergiat (nn. toodangu kao komponent). Tabelis 1 on näidatud, kuidas tuulikulabade inspeksiooni - ja hooldustööde tänasest pikast kestvusest jääb ettevõttel aastas tootmata ligi 3.78 GWh elektrienergiat turuväärtusega 0.93 M eur.

Arvutustes on kasutatud Eesti keskmist NPS hinda 2022. aastal<sup>2</sup>, millele on liidetud teatud tuuleparkides kehtivad taastuenergia toetused. Arvestades Enefit Greeni äri - ja digitaliseerimise strateegiat on prioriteetne vähendada hoolduskulusid ning optimiseerida seniseid labainspeksioone - ja hoolduseid. Enefit Green on eesmärgiks võtnud labainspeksioonidele kuluvat aega vähendada kahekordselt. See tähendab, et realiseeritavate lisavõimekuste kaudu labade inspekteerimisel on võimalik saada kasu läbi selle, et tuulik on vähem elektrivõrgust väljas ning toodab mitte-opereerimise asemel elektrienergiat.

Teisisõnu - lisaväärtus väljendub lisatoodangus, mida tuulik on võimeline tootma võrreldes olukorraga, kui ta poleks seda teinud labainspeksiooni või labahoolduse tõttu. Arvuliselt väljendub see ligi 21 MWh suuremas toodangus tuuliku kohta aastas. Niisiis on laba-

<sup>1</sup>Tuuleenergia tootmisele makstakse Eestis taastuenergia toetust kuni 600 gigavatt-tunni täitumiseni ehk maksimaalselt 32,2 miljonit eurot toetust (iga toodetud megavatt-tunni kohta makstakse lisaks elektri turuhinnale juurde taastuenergia toetust 53,7 eurot).

<sup>2</sup>2022. aasta keskmine NPS hind Eestis oli 192,82 eurot MWh kohta. Allikas: [13]

hoolduste optimeerimise (aja vähendamise) lisaväärtuseks tuulepargi väiksem seisakuaeg, sellest johtuvalt aga suurem toodang ning kõrgem käideldavus.

Tabel 1: Tuulikulabade inspeksiooniprotsessi efektiivistamise lisandväärtus. Allikas: autori koostatud.

Parameeter	2022 tegelik inspeksiooniaeg	2022 tegelik toodangu kadu/kao maksumus	2023-25 eesmärgistatud labade hooldusaeg	Lisaväärtus lisatoodangu- ja kasumina
Tuuliku kohta aastas	74 h	-40,3 MWh (-9,9 K eur)	36 h	+20,7 MWh (+3,2 K eur)
Kõikide aastas inspekteeritavate tuulikute kohta (94 tk)	6 956 h	-3 788 MW (-933 K eur)	3 384 h	+1 945 MWh (+298,9 K eur)

## 1.4.2 Probleemi lühikokkuvõte

Äriprobleemi terviklik kokkuvõte on näidatud tabelis 2. Ilmneb, et põhiprobleem seisneb asjaolus, et pikast tuulikulabade inspeksioonist tingitult jääb ettevõttel tootmata märkimisväärses koguses elektrienergiat, millel on tulenevalt elektrienergia hinna suurest volatiilsust Balti regioonis oluline finantsmõju.

Tabel 2: Äriprobleemi ülevaade. Allikas: autori koostatud.

Äriprobleemi kirjeldus	Äriprobleemi tagajärg	Äriprobleemi finantsmõju
Inspeksiooniaeg keskmiselt 74 tundi tuuliku kohta	3,78 GWh tootmata elektrit	0,93 M eur väiksem ettevõtte käive

## 1.5 Metoodikate kirjeldus

Autor alustab probleemi analüüsimist olemasoleva tuulikulabade hooldusandmete analüüsi protsessi ning selle kitsaskohtade kaardistamisest. Edasi järgneb kirjanduse analüüs, milles autor hindab teaduskirjanduses esitatud parimat praktikat mainitud eesmärkide (eeskätt automaatne labavigastuste tuvastus) saavutamisel. Välja tuuakse olulisemad järeldused, mida silmas pidada antud äriprobleemi lahendamisel ning rakendatakse seda teadmust uue, st "TO-BE" protsessi, kaardistamisel. Lisaks hinnatakse ka täna ettevõttes olemasolevaid ning puuduvaid võimekusi, mis läbi kavandatava infotehnoloogilise lahenduse võimaldaksid äriprobleemi lahendada. Metoodikad on jagatud äri- ja süsteemianalüüsi metoodikateks.

### 1.5.1 Ärianalüüsi metoodikad

Autor kirjeldab selles alampeatükis põgusalt igat lõputöös kasutatud ärianalüüsi metoodikat.

## Võimekuste põhine planeerimine

Autor kasutab võimekustel põhinevat planeerimist lähtuvalt TOGAF raamistikust [14]. Ärianalüüsi juures lähtutakse BABOK teadmuskogust [15]. Valitud meetodikaid rakendades on ettevõttel võimalik alustada uue infotehnoloogilise lahenduse arendusega. TOGAF aitab vastata järgmistele küsimustele [16]:

- milliseid ärivõimekusi saab parandada uute lahenduste/tehnoloogiate abil;
- milliseid ärivõimekusi toetavad need infosüsteemid, mille kasulik eluiga läheneb lõpule;
- milliste ärivõimekuste puhul on äritehnoloogia poolne sobivus halb/madal;
- millised ärivõimekused saavad olema mõjutatud uue infosüsteemi kavandamisel?

Võimekuste põhine lähenemine tähendab eeskätt seda, et ettevõttes läbiviidavad muudatused on joondatud ettevõtte strateegilise visiooniga ning seda lähenemist peetakse väga efektiivseks järgmistel põhjustel [17]:

- tegemist on kogu organisatsiooni hõlmava lähenemisviisiga;
- võimekuste põhine lähenemine keskendub otseselt sellele, mida peab ettevõtte oma äristrateegia elluviimiseks tegema;
- see annab ülevaate ettevõtte üldistest võimekustest;
- see seob algatused ja projektid otseselt võimekuste muutustega ja omakorda tagasi organisatsiooni pikemate ärieesmärkidega;
- see aitab välja sõeluda kõrgeima prioriteediga võimekused, mis vajavad arendamist;
- see hoiab ära liiga varaseid järeldusi kavandatavate lahenduste osas;
- see pakub süstemaatilise viisi muutuste algatuste tuvastamiseks.

## Motivatsioonimudel (*Motivational Model*)

Motivatsioonimudelit kasutatakse põhjuste ning motivatsioonide mudeldamiseks, mis on uue arhitektuuri kavandamise aluseks. Motivatsioonimudel koosneb järgmistest elementidest [18]:

- *Stakeholder* - Mudeli element, mis kirjeldab indiviidi, meeskonna või organisatsiooni huve;
- *Driver* - mudeli element, mis esindab välist või sisemist tingimust, mis motiveeriks ettevõtet oma eesmärgi määratlema ja nende saavutamiseks vajalikke muudatusi ellu viima;
- *Assessment* - mudeli element, mis kirjeldab ettevõtte olukorra analüüsi tulemust mõne *Driver*-i osas;

- *Goal* - mudeli element, mis kirjeldab kõrgetasemelist kavatsuste, suuna või soovitud lõppseisundi avaldust organisatsiooni ja selle sidusrühmade jaoks;
- *Outcome* - mudeli element, mis kirjeldab lõppseisundit/staatust;
- *Principle* - mudeli element, mis kirjeldab kavatsuste avaldust, mis rakendub mis tahes süsteemile kirjeldatud arhitektuuris.
- *Requirement* - mudeli element, mis kirjeldab vajaduse avaldust;
- *Constraint* - mudeli element, mis kirjeldab teatud eesmärkide saavutamise piiratust;
- *Meaning* - mudeli element, mis kirjeldab teatud kontekstis sisalduvaid teadmisi või asjatundlikkust või sellele antud tõlgendust;
- *Value* - mudeli element, mis kirjeldab kontseptsiooni suhtelist väärtust, kasulikkust või tähtsust.

### Väärtusvoog (*Value Stream*)

Väärtusvoo kaardistamine on *Lean* tööriist, mida kasutatakse toote või teenuse tarnimise protsessi kõigi etappide visualiseerimiseks, analüüsimiseks ja parandamiseks. VSM (ing k. "*Value Stream Mapping*"), mis on tuntud ka kui materjali- või teabevoo kaardistamine, esindab kogu kauba-, materjali- või teabevoogu tarnijalt kliendile. Väärtusvoo tehnika on osa ka Six Sigma ja Lean Six Sigma metoodikatest protsesside täiustamiseks. [19]

Väärtusvoo kaardistamise metoodika loodi Taiichi Ohno poolt 1960ndatel tema töö ajal Toyota korporatsioonis. Oma olemuses on väärtusvoo kaardistamine süstemaatiline viis protsessi kitsaskohtade ja raiskamiste (ing k. "*waste*") illustreerimiseks. [20]

Väärtusvoo kaardistamisel on mitmeid kasulikke külgi protsessi parendamisel, millest olulisemad on järgmised [21]:

- VSM aitab visualiseerida rohkemat kui ainult ühe protsessi ehk VSM keskendub voole;
- VSM aitab tuvastada kohti protsessides, kus tegeletakse raiskamisega (nt ebaotstarbekad tegevused, ootamised, kontrollimised jms);
- VSM loob ühise keele rääkimaks ühest konkreetsest protsessist;
- VSM muudab väärtusvoogu puuduvad otsused ilmseks - on võimalik otsustuspunkte analüüsida ning nende üle arutleda. Vastasel juhul sünnivad paljud otsused vaikimisi;
- VSM on rakendusplaani aluseks - see aitab kavandada, kuidas terve väärtusvoog peaks toimima;
- VSM loob seose materjali - ja infovoo vahele.

## Äriprotsesside modelleerimiskeel BPMN (*Business Process Modelling Notation*)

Vastavalt Open Management Group definitsioonile on BPMN äriprotsesside modelleerimiskeel, mis annab ettevõtetele võimaluse hoomata oma sisemisi äriprotseduure graafilisel kujul [22]. Lisaks tagab see organisatsioonidele võimaluse neid protseduure standardisel viisil edastada. See tagab, et ettevõtted mõistavad ennast ja oma äris osalejaid ning võimaldavad organisatsioonidel kiiresti kohaneda uute ärisituatsioonidega.

Võrreldes UML modelleerimiskeelega on BPMN suunatud rakenduste modelleerimisel objektorienteeritud lähenemisele, samal ajal kui BPMN rakendab süsteemide modelleerimisel protsessikeskset lähenemist. Ehk kui BPMN keskendub äriprotsessidele, siis UML keskendub infosüsteemide disainile ja seetõttu ei ole need kaks konkureerivat tähistust, vaid on erinevad vaated süsteemidele. [22]

## Ärimudel ning ärireeglid

Protsesside dokumenteerimisel on lisaks nende kaardistamisele/visualiseerimisele oluliseks tegevuseks ka ärireeglite koostamine. "Ärireeglid on protsessi käigus tehtavate otsuste või arvutuste kokkulepitud või väljakujunenud tingimused." [23] Ehk ärireeglid defineerivad hilisema protsessi kulgemise ning tingimuslikkuse. Ärireegleid on erinevaid tüüpi ning igal tüübil on erinev dokumenteerimise viis. Kõige levinumad reeglite tüübid on järgmised [23]:

- sisendparameetrid - informatsioon, mida kasutatakse reegli jõustamiseks;
- väljundparameetrid - mis juhtub või tekib pärast reegli jõustamist;
- arvutus - või otsustusloogika - teatud mehhanism, kuidas sisendparameetrist saab väljundparameeter;
- reegli kehtivuse aeg - aeg, mille jooksul reegel on aktiivne (ehk kehtib);
- reegluga seotud konstantid ning muutujad - reegli jõustamisega seotud väärtused.

## SIPOC meetod (*Supplier, Input, Process, Outputs, Customers*)

SIPOC (ing k. "*Supplier, Input, Process, Outputs, Customers*") on protsesside kaardistamise vorm. SIPOC annab tulemuseks kõrgetasemelise protsessikaardi, mida kasutaja saab rakendada projekti kiireks analüüsimiseks ning võrdluspunktide pakkumiseks kõigile meeskonnaliikmetele. Samuti võib SIPOC diagramm aidata tuvastada probleeme ja eristada protsessi osad, mis pole vajalikud või lisavad vähe väärtust. [24]

Antud meetod tuleneb Six Sigma metoodikast ning on protsessijuhtimises väga kasulik, sest see võimaldab visuaalselt hinnata, mida protsess nõuab tarnijatelt (ing k. "*Suppliers*") ning mida kliendid (ing k. "*Customers*") ootavad vastukaaluks protsessilt endalt. [25]

## SWOT meetod

SWOT-analüüs on meetod, mida kasutatakse organisatsiooni, plaani, projekti, isiku või äritegevusega seotud "tugevuste", "nõrkuste", "võimaluste" ja "ohtude" hindamiseks. [26] SWOT-i peetakse väga efektiivseks meetodiks hindamaks ettevõtte ja selle protsesside tulemuslikkust, konkurentsi, riske ning potentsiaale. [27]

Ettevõtte teeb SWOT analüüsi läbiviimisel kindlaks kriitilised ohud ning võimalused oma konkurentsikeskkonnas. Lisaks analüüsitakse, kuidas konkurents selles keskkonnas tõenäoliselt areneb ning milline on keskkonna mõju ettevõtte ees seisvatele ohtudele, kuid ka võimalustele. Kui SWOT-i välisanalüüs keskendub ettevõtte ees seisvatele keskkonnaohtudele ja võimalustele, siis sisemine analüüs aitab ettevõttel tuvastada oma organisatsiooni tugevaid ning nõrku külgi. Samuti aitab SWOT meetod ettevõttel mõista, millised on selle ressursid ning millised võimalused on konkurentsieelise allikad. Ehk kokkuvõtlikult saab SWOT abil organisatsioon valida omale sobiva pikaajalisema äristrateegia. [26]

## Ärimudeli lõuend (*Lean Canvas*)

Ärimudeli lõuend on ühe leheküljeline äriplaani mall, mille on loonud Ash Maurya ja mis aitab äriideed selle peamiseks eeldusteks ning riskideks lahti mõtestada. See on kohandatud Alex Osterwalderi ärimudeli lõuendist ja optimeeritud alustavatele ettevõtetele ning uutele äriprotsessidele. See asendab detailsed äriplaanid ühelehelise ärimudeliga. [28]

## Huvitatud osapooled (Mendelow maatriks)

Selleks et hinnata, milliseid osapooli tuleb hoida informeerituna ja rahulolevana, saab neid järjestada nende võimu (ing k. "*power*") ja huvitaseme (ing k. "*level of interest*") järgi. Sellise meetodi pakkus välja Aubrey Mendelow 1991. aastal, mis soovitab analüüsida ettevõtte/protsessi gruppe võimu (defineeritud kui võime mõjutada ettevõtte strateegiat või projekti ressursse) ja huvide (kui huvitatud on grupp ettevõtte või projekti õnnestumisest) järgi. Maatriksi järgi joonistub välja neli eri omadustega gruppi [29]:

1. suure võimuulatuse ja suure huviga inimeste grupp: seda gruppi tuleb täielikult kaasata, tehes nende rahuldamiseks suurimaid jõupingutusi (ing k. "*manage closely*" grupp);
2. suure võimu-ulatuse, kuid väiksema huviga inimeste grupp: selle grupiga tuleb teha piisavalt tööd, et nad oleksid rahul, kuid mitte nii palju, et edasiantav sõnum oleks grupile koormaks (ing k. "*keep satisfied*" grupp);
3. väikese võimuulatuse, kuid väga huvitatud inimeste grupp: seda gruppi tuleb pi-



isavalt informeerida tagamaks, et suuri probleeme ei tekiks. See grupp võib samuti aidata välja tuua valdkondi, mida oleks võimalik parandada või mis on kahe silma vahele jäänud (ing k *"keep informed"* grupp);

4. madala võimuulatuse ning minimaalse huviga inimeste grupp: seda gruppi ei peaks informatsiooniga tüütama, kuid tuleb jälgida, kas grupi huvi või võimu tase võib ühel või teisel põhjusel ajas muutuda. (ing k. *"monitor"* grupp).

## **GAP analüüs**

Vastavalt TOGAF raamistikule on loodava arhitektuuri keskne lähtekoht asjaolu, et loodav arhitektuur peab toetama ettevõtte informatsiooni töötlemise vajadusi. [14] Kõige kriitilisemaks puudujääkide (ing k. *"gap"*-ide) allikaks, mida tuleks esmasjoones arvesse võtta, on sidusrühmade (ing k. *"stakeholders"*) mured, mida ei ole varasemas arhitektuuris käsitletud. Autor kirjeldab järgmiseks eri tüüpe puudujääke vastavalt TOGAF raamistikule [14]:

### **Ettevõtte domeeniga seotud puudujäägid:**

- inimestega seotud puudujäägid;
- protsessidega seotud puudujäägid;
- kasutusel olevate tööriistadega seotud puudujäägid;
- informatsiooniga seotud puudujäägid;
- mõõtmisega, finantsidega, rajatistega seotud puudujäägid.

### **Andmete domeeniga seotud puudujäägid:**

- andmed ei asu seal, kus neid on kõige rohkem vaja;
- ei kasutata neid andmeid, mida oleks vaja;
- andmed pole kättesaadavad siis kui neid on kõige rohkem vaja;
- andmeid ei tarbita, eksisteerivad andmelüngad jm.

## **1.5.2 Süsteemianalüüsi meetodikad**

Autor kirjeldab selles alampeatükis põgusalt igat lõputöös kasutatud süsteemianalüüsi meetodikat.

### **Kasutusmallide mudel (*Use Case Model*)**

Kasutusmallide mudel meetod süsteemi funktsionaalsete nõuete täpsustamiseks ehk kasutusmallid määravad infosüsteemi eeldatava käitumise (**mida** peab süsteem saama

teha), mitte selle täpset meetodit (**kuidas** ta seda peaks tegema). Kasutusmallide mudeli põhikontseptsioon on see, et see aitab selle koostajal kujundada süsteemi lõppkasutaja vaatenurgast. Tegemist on efektiivse meetodiga süsteemi käitumise edastamiseks kasutaja terminites, täpsustades kogu väliselt nähtava süsteemi käitumise. [30]

Kasutusmallide mudeli peamised eesmärgid on järgmised [31]:

- täpsustada süsteemi konteksti;
- jäädvustada süsteemi nõudeid;
- valideerida süsteemi arhitektuuri;
- juhtida uue infosüsteemi juurutamist ja luua testjuhtumeid.

### **Komponentmudel ja evitusdiagramm**

Komponentmudel illustreerib infosüsteemi komponente, mida süsteemi ehitamiseks kasutatakse. Lisaks näitab see infosüsteemi komponentide vahelisi seoseid, nende sõltuvusi, sidet ja muid tingimusi [32]. Komponentmudeli abiga saavutatakse muuhulgas järgmised eesmärgid:

- defineeritakse ja dokumenteeritakse süsteemi arhitektuur;
- visualiseeritakse korduvad interaktsioonid ning sõltuvused infosüsteemi komponentide vahel.

Komponentmudel on eriti kasulik siis, kui on vajadus süsteemi kavandada mitme sihtkeskkonna jaoks eraldi disainiarhitektuuriga. Komponentmudel on süsteemi ülesehituse abstraktsioon või üldistus ehk süsteemi põhifunktsionaalsusest ülevaate andmiseks jäetakse välja enamik disaini üksikasju. [33]

UML-i<sup>3</sup> evitusdiagramm (ing k. "*deployment diagram*") on diagramm, mida kasutatakse objektorienteeritud süsteemi füüsiliste aspektide modelleerimiseks. Neid kasutatakse sageli süsteemi staatilise evitusvaate (riistvara topoloogia) modelleerimiseks. Evitusdiagrammid on olulised klient-/serveri- ja hajutatud süsteemide visualiseerimiseks, täpsustamiseks ja dokumenteerimiseks ning ka evitavate süsteemide haldamiseks. [34]

---

<sup>3</sup>Ühtne mudelikeel ehk ühtne visualiseerimiskeel on üldotstarbeline noteeringukeel keerulise tarkvara, peamiselt suurte objektorienteeritud projektide spetsifitseerimiseks ja visualiseerimiseks. Allikas: Wikipedia

## Äriprotsessi kihiline realiseerimise mudel (*Layered View*)

Kihiline mudel on *ArchiMate*<sup>4</sup> "kõik-ühes" mudel, mis võimaldab anda ettevõtte arhitektuuri ülevaate ühes diagrammis. Ehk kihilise realiseerimise mudel loob hulga elemente ja diagramme, mis võimaldavad visualiseerida ettevõtte arhitektuuri mitut kihti ühes ülevaatalikus diagrammis. *ArchiMate* soovib rühmitada arhitektuuri artefaktid [35]:

- spetsiaalseteks (ing k. "*dedicated*") kihtideks – siia kuuluvad tehnoloogia, rakendus, protsessid ja osalejad/rollid – mis paljastavad teenuste kihi "teostussuhte" kaudu;
- teeninduskihid, mida iga spetsiaalne ehk "*dedicated*" kiht realiseerib.

## MoSCoW ja FURPS+ meetodikad

Vastavalt Satzinger *et al.* [36] saab süsteeminõudeid jagada kahte kategooriasse: funktsionaalsed nõuded ning mittefunktsionaalsed nõuded. Funktsionaalsed nõuded on tegevused, mida süsteem peab täitma (st äritegevused, millele süsteemi rakendatakse). Mittefunktsionaalsed nõuded on süsteemi omadused, välja arvatud need tegevused, mida see peab tegema või toetama.

MoSCoW meetod on nelja-etapiline lähenemine prioriteetide seadmiseks, tagamaks projekti parima tasuvuse läbi hästi valitud ärinõuete. MoSCoW tähistab sõnu "*must have*" (eesti k. peab olema), "*should have*" (eesti k. peaks olema), "*could have*" (eesti k. võiks olla) ja "*will not have*" (eesti k. ei pea olema).

MoSCoW meetodil on järgmised eelised [37] :

- meetod võimaldab kõigil projektis osalejatel teada, millised tööd tuleb kõigepealt lõpetada ja kuidas see töö aitab suurendada tulusid;
- meetod võimaldab vähendada tegevuskulusid;
- meetod aitab tõsta projekti tootlikkust või tõsta klientide rahulolu;
- äripoolel aitab MoSCoW sidusrühmadel tarkvara valimisel arutleda konkreetsete toote funktsioonide olulisuse üle;
- IT poolel mängib MoSCoW meetod Agiilses projektijuhtimises olulist rolli, aidates projektimeeskondadel kasutajalugusid prioriseerida.

FURPS on akronüüm, mis tähistab funktsionaalsust, kasutatavust, töökindlust, jõudlust ja turvalisust. FURPS-i täht "F" on samaväärne eelnevalt määratletud funktsionaalsete

<sup>4</sup>ArchiMate on avatud ja sõltumatu ettevõttearhitektuuri modelleerimiskeel, mis toetab arhitektuuri kirjeldamist, analüüsi ja visualiseerimist ärivaldkondade sees ja nende vahel üheselt mõistetaval viisil. Allikas: Wikipedia

nõuetega. Ülejäänud FURPS-i kategooriad kirjeldavad mittefunktsionaalseid nõudeid. FURPS+ on FURPS-i laiendus, mis lisab täiendavaid kategooriaid, sealhulgas disainipiiranguid, aga ka rakendus-, liidese-, füüsilisi ja tuginõute piiranguid ehk need kategooriad on kokku võetud plussmärgiga (""). [36]

### **Relatsiooniline andmemudel**

Relatsiooniline andmebaas on teatud tüüpi andmebaas, mis salvestab ja pakub juurdepääsu üksteisega seotud andmepunktidele. Sellised andmebaasid põhinevad relatsioonimudelil, mis on intuiitiivne ja arusaadav viis andmete esitamiseks tabelites.

Relatsioonandmebaasis on iga tabeli rida kordumatu ID-ga kirje, mida nimetatakse võtmeks. Tabeli veerud sisaldavad andmete atribuute ja igal kirjel on tavaliselt iga atribuudi jaoks väärtus, mis muudab andmepunktide vaheliste seoste loomise lihtsaks. Relatsioonimudel tähendab, et loogilised andmestruktuurid – andmetabelid, vaated ja indeksid – on füüsilistest salvestusstruktuuridest eraldi. See eristus tähendab seda, et andmebaasi administraatorid saavad hallata füüsilist andmesalvestust, mõjutamata juurdepääsu neile andmetele loogilise struktuurina. [38]

### **Dimensionaalne andmemudel**

Dimensionaalne modelleerimine on andmestruktuuri tehnika, mis on optimeeritud andmete salvestamiseks andmelaos. Dimensioonide modelleerimise eesmärgiks on optimeerida kavandatavat andmebaasi andmete efektiivsemaks otsimiseks. Dimensioonilise modelleerimise idee töötas välja Ralph Kimball 1996. aastal ja see koosneb "faktide" ja "mõõtmete" tabelitest. Andmelaos olev dimensioonimudel on loodud andmelaos arvulise teabe (nt väärtused loendused, kaalud jm) lugemiseks, kokkuvõtmiseks ning analüüsimiseks. Seevastu suhtemudelid on optimeeritud andmete lisamiseks, värskendamiseks ja kustutamiseks reaalsajas võrgutehingute süsteemis. [39]

## **2. Ettevõtte kirjeldus**

Selles peatükis kirjeldab autor ettevõtte tegevusvaldkonda, ettevõtte eesmärgid ning selle üldist struktuuri. Lisaks kirjeldatakse detailsemalt tuuleenergia ja varahalduse meeskonnad.

### **2.1 Ettevõtte tegevusala kirjeldus**

Enefit Green AS on Eesti Energia kontserni kuuluv taastuvenergeetika ettevõtte, mille tootmisportfelli kuulub 2023. kevade seisuga 398 MW tuuleparke, 30 MW päikeseparke, 28 MW / 80 MW (vastavalt elektri/soojusvõimsus) koostootmisjaamu ning üks pelletijaam. Lisaks on Enefit Greenil 1 MW muid objekte - Ruhnu saare taastuvenergialahendus ning Keila-Joa hüdroelektrijaam. Summaarselt on Enefit Greenil 457 MW tootmisvõimsust. [6]

Enefit Greenil on kavas kasvatada oma tootmisvõimsust praeguselt tasemelt 2025. aastaks 1092 MW-ni, mis on enam kui kahekordne kasv [3]. Alates 2021. aasta sügisest on Enefit Green noteeritud NASDAQ Tallinn börsil ning Enefit Greenil on ligi 60 000 investorit.

#### **2.1.1 Ettevõtte struktuuri kirjeldus**

Enefit Green AS jaguneb kolmeks põhiliseks osakonnaks: 1) arendusosakond, 2) tootmiseosakond ja 3) finantsosakond. Lisaks toetavad Greeni tegevust teised üksused, mis on esitatud joonisel 3. Ettevõtte juhatus on 2023. a. kevade seisuga neljaliikmeline: 1) Aavo Kärmas (juhatuse esimees), 2) Veiko Rääm (juhatuse liige finantsalal), 3) Innar Kaasik (juhatuse liige tootmise - ja varahalduse alal), 4) Andres Maasing (juhatuse liige uute arenduste alal).

Tootmisosakond jaguneb omakorda kuueks:

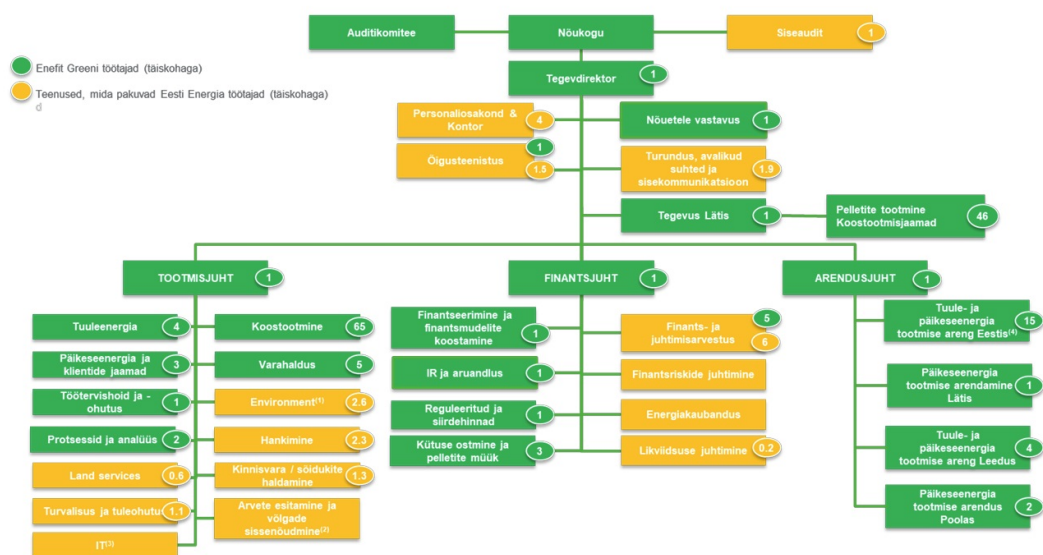
1. tuuleenergia üksus (Eesti ja Leedu tuulepargid);
2. päikeseenergia üksus (Eesti ja Poola päikesepargid);
3. töötervishoiu - ja ohutuse üksus;
4. protsesside ja analüüsi üksus;
5. varahalduse üksus;
6. koostootmise üksus (Eesti ja Läti koostootmisjaamad);

Autor kirjeldab täpsemalt varahalduse - ning tuuleüksust, sest need on antud magistritööga kõige tihedamalt seotud.

## 2.1.2 Ettevõtte tuuleüksuse kirjeldus

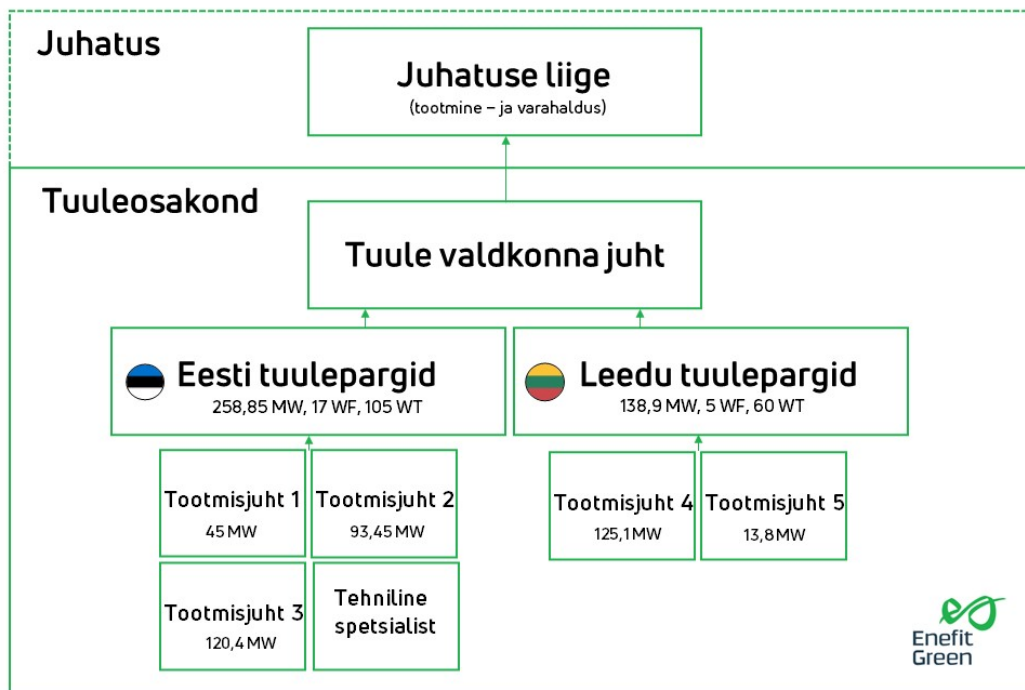
Tuuleenergia üksus Enefit Greenis vastutab Eesti ja Leedu tuuleparkide käidu, hoolduse planeerimise, ohutuse tagamise, eelarvestamise jm jooksvate ning strateegiliste tegevuste korraldamise eest. Antud magistritöö skoobis on vaid EG opereeritavad tuulepargid ehk lisanduvaid uusi arenduse või ehituse faasis olevaid tuuleparke lõputöös ei käsitleta.

Enefit Greeni struktuur on seotud emaettevõtte Eesti Energia struktuuriga ehk Enefit Greenile osutatakse teenuseid ka teiste (Enefit Greeni mittekuuluvate) üksuste poolt. Joonisel 3 on näha Enefit Greeni ja toetavate üksuste struktuuri.



Joonis 3: EG üldine struktuur. Allikas: [40]

Joonisel 4 on näidatud Enefit Greeni tuuleenergia üksuse struktuuri. Ilmneb, et tuuleenergia on jagunenud kaheks alamosaks: 1) Eesti tuulepargid kogumahuga 258,85 MW ning 2) Leedu tuulepargid kogumahuga 138,9 MW. Kokku on 2023. aasta alguse seisuga EG-s viis tuuleenergia tootmisjuhti, kellest kolm vastutavad Eesti tuuleparkide eest ning kaks vastutavad Leedu tuuleparkide eest. Tootmisjuhi vastutusalasse kuuluva tuuleenergia võimsuse arv on näidatud samal joonisel. Lisaks kuulub meeskonda tehniline spetsialist, kes toetab tootmisjuhte ja valdkonnajuhti erinevates küsimustes, mis puudutab tehniliste jooniseid ning alajaamu. Kokku on EG tuuleportfellis 165 tuulikut, millest 64% ehk 105 tuulikut asub Eestis ning 36% ehk 60 tuulikut asub Leedus. Summaarne tuulikulabade hulk on 495 tk, millest Eestis on 315 tk ning Leedus 180 tk.



Joonis 4: EG tuuleenergia üksus. Allikas: autori koostatud.

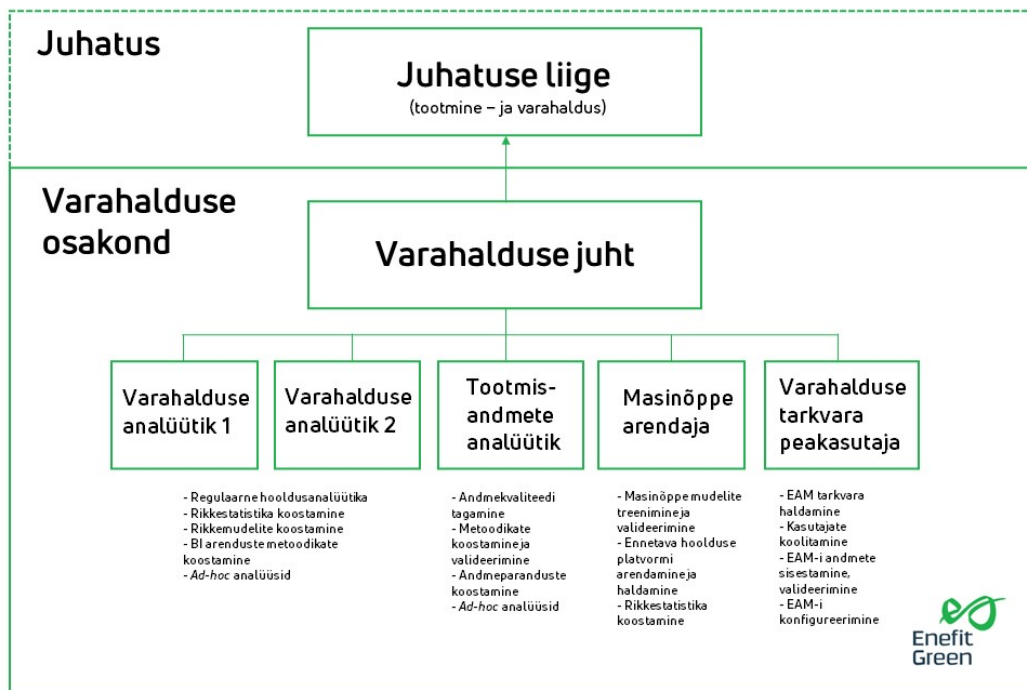
### 2.1.3 Ettevõtte varahalduse üksuse kirjeldus

Varahalduse üksuse peamine funktsioon on ettevõtte varade töökindluse maksimeerimine kõikide tootmissektorite lõikes. Lisaks planeerib varahalduse üksus ettevõtte digitaliseerimise strateegiat ning joondab seda teiste ettevõttes toimivate protsessidega. Varahalduse üksuse tugi seisneb tootmisvarade hooldusandmete ning rikkestatistika kogumises ning selle analüüsimises võimalike lahenduste väljapakkumises tõstmaks tootmisvarade töökindlust ning tootmise efektiivsust.

Varahalduse üksus tegeleb ka rikete ennetava jälgimisega kasutades selleks masinõppe algoritme, et tuvastada tootmisparameetrite anomaaliaid erinevatel objektidel. Joonisel 5 on kirjeldatud varahalduse üksuse struktuuri. Nimetatud üksuses on lisaks üksusejuhile 5 meeskonna liiget, kelle tähtsaimad tööülesanded on esitatud samal joonisel. Varahalduse üksus teeb kõige tihedamat koostööd tootmise - ja varahalduse üksusega, kuid toetatakse ka teisi üksuseid väljaspool PAM-i.

## 2.2 Ettevõtte strateegiline vaade

Enefit Greeni äristrateegia perioodiks 2022-2026 näeb ette tootmisvõimsuse suurendamist neljakordselt seniselt võimsuselt 457 MW kuni 1900 MW-ni. Seda saavutatakse rajades



Joonis 5: EG varahalduse üksus. Allikas: autori koostatud.

uusi tuule - ja päikeseparke kõikidel koduturgudel. Tuuleparkide ehitamise ja arendamise investeeritakse strateegiaperioodil ligi 990 miljonit eurot ning lisandub 800 MW tootmisvõimsust. Suurim kasv tuleb seejuures Eestist ja Leedust. Päikeseparkidesse investeeritakse ligi 495 miljonit eurot ning kasvatatakse päikeseparkide tootmisvõimsust praeguselt 30 MW-lt 609 MW-ni. [41]

### 2.2.1 Ettevõtte digitaliseerimise strateegia

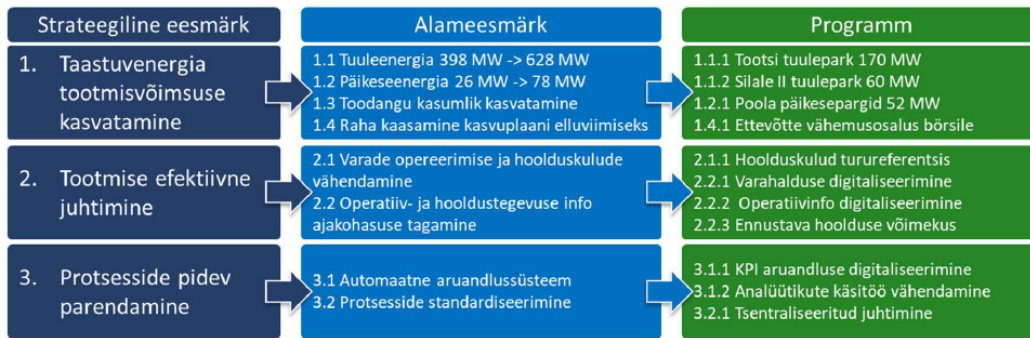
Enefit Greeni strateegilised eesmärgid on esitatud joonisel 6. Ilmneb, et ettevõttel on kolm põhilist fookuskohta, milleks on tootmisvõimsuste kasvatamine, tootmise efektiivne juhtimine ning protsesside optimeerimine.

Tagamaks olemasolevate ning lisanduvate tootmisvõimsuste efektiivsus ning kõrge töökindlus, on Enefit Greeni prioriteet tootmisandmeid digitaliseerida ning kasutades parimat tööstuspraktikat ennetada seisakuid, suuremaid rikkeid ja remonditöid. Seejuures on oluline välja tuua, et tootmisobjektide tehnoloogiliste ning geograafiliste erisuste tõttu ei ole täna võimalik ilma spetsiaalsete IT-lahendusteta toodangu eesmärke täita. Need alameesmärgid on seotud tootmise efektiivse juhtimise strateegilise eesmärgiga.

Digitaliseerimine Enefit Greenis kätkeb endas järgmisi tegevusi:



## Ettevõtte strateegilised eesmärgid



Joonis 6: Enefit Greeni strateegilised eesmärgid. Allikas: [42].

- operatiiv - ja ajalooliste hooldusandmete olemasolu tagamine kõikide tootmisüksuste lõikes;
- automaatse raporteerimise tagamine ettevõtte kõigi vajalike KPI-de lõikes;
- energia tootmist, töökindluse tagamist ning rikete ennetamist toetavate infosüsteemide arendamine ja haldamine;
- eelmistest tegevustest johtuvalt andmepõhise ning faktidel põhineva juhtimise võimaldamine.

Kõik loetletud tegevused on olulised, kuid suurimat rolli omistab magistritöö autor lähiaastatel eelkõige lisalahenduste arendamisele. Nendeks on näiteks suurandmetega seotud arendused (ing k. *"Big Data"*), digitaalse teisiku tehnoloogia (ing k. *"Digital Twin"*) ja teised suurandmetega seotud lahendused, mida EG planeerib rakendada olemasolevate ning lisanduvate tootmisobjektide paremaks haldamiseks ja käitamiseks. Iseäranis oluline on välja tuua seda, et lisanduvate võimsuste juures kasvab tootmisandmete hulk eksponentsiaalselt. Autor hindab, et automaatset analüüsi võimaldavate lahenduste arendamine saab ettevõtte jaoks lähiaastatel väga oluliseks eeskätt just lisatulu ning lisa-efektiivsuse leidmise seisukohast.

### 2.2.2 Probleemi seos ettevõtte strateegiaga

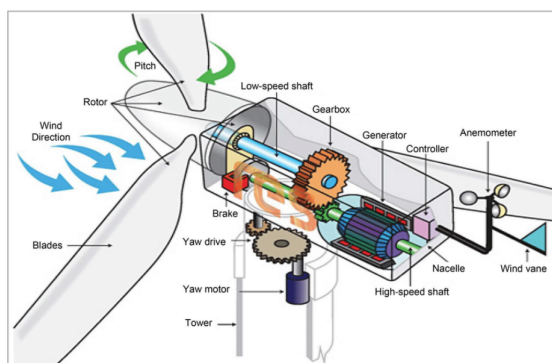
Peatükis 2.2.1 kirjeldati detailsemalt Enefit Greeni strateegilisi eesmärke. Seejuures mainiti, et suurimaks väljakutseks ning potentsiaalseks tuluallikaks saab lähiaastatel hooldus - ja rikkeandmete automaatse analüüsi võimekus. **Magistritöö äriprobleem on niisiis seotud eeskätt teise alam-plokiga ettevõtte strateegilisi eesmärke kirjeldaval joonisel 6, milleks on tootmise efektiivne juhtimine.** Sellise lahenduse ellukutsumine aitab ettevõttel edukalt liikuda mainitud strateegilise eesmärgi saavutamise suunas.

### 3. Kirjanduse ülevaade

Antud peatükis kirjeldab autor põgusalt tuuliku ehitust ning seejärel liigub edasi valdkonna parimate praktikate tutvustamise ja analüüsi juurde kasutades selleks valdkonnaga seotud teaduskirjandust.

#### 3.1 Tuuliku ehitus ja tuulikulabade olulisus

Tuulik muundab tuulest saadud kineetilist energiat mehaaniliseks energiaks, mis omakorda muundatakse seadmete abil elektrienergiaks. Jooniselt 7 on näha, et tuulikulabad, mis on tuule püüdmiseks aerodünaamiliselt optimeeritud, panevad pööreldes liikuma rootori, mis omakorda on ühenduses käigukastiga. Viimane edastab pöörlemisenergiat generaatorile, kus toimubki elektri tootmine. [43]



Joonis 7: Tuulik ja selle komponendid. Allikas: [44].

Tuulikulabad etendavad elektri genereerimises tuulikust olulist rolli - tänu neile muundatakse tuulest saadav kineetiline energia seadmete abil elektrienergiaks. Seejuures on tuulikulabade kuju, kaal, aerodünaamika jm omadused optimeeritud selliselt, et tuulikulaba saaks maksimaalselt tuult püüda ning pöörelda minimaalse õhutakistusega [45]. Vastavalt Betzi seadusele saab reaalingimustes tuulik tuulest kätte maksimaalselt 59.3% kineetilisest energiast. [46]

##### 3.1.1 Levinumad labariked ning rikkekategoriad

Rikkeid tuuliku labadel võib kategoriseerida viieks. Tabelis 22 (Lisa 2) on näidatud viie põhilise rikketüübi kirjeldust ning kui kriitiline see rike on tuuliku jaoks. Tegemist on tuuleenergeetikas üldlevinud labarikete kategoriseerimise viisiga, kuid siiski tuleb silmas pidada, et rikete kategoriseerimisel tuleb arvestada ka nt geograafilisi nüansse ning seda

kui palju kulub aega teatud rikke kõrvaldamiseks [9].

On tuntud fakt, et tuulikulabad on tuulikus kõige rohkem välistele ilmastikumõjudele allutatud komponent, seega nendega on tihti ka kõige rohkem probleeme. [47] Joonisel 8 on näidatud tüüpilist viisi, kuidas tuulikulabasad inspekteeritakse ning parandatakse. Tuulikulabade rikked jaotatakse enamasti viieks kategooriaks, kus kõige kriitilisem labavigastus on kategooriaga "5".

Lisaks on võimalik tuuliku labarikkeid kategoriseerida vastavalt rikete tekkemehhanismile. Neid jaotatakse üldjuhul neljaks [47]:

1. äikeselöögist tingitud labavigastused;
2. labavigastused, mis on tingitud labamaterjalide loomulikust kulumisest;
3. laba esiserva erosioon;
4. tuulikulaba jäätumisest tingitud vigastused.

Autor kirjeldab detailsemalt labavigastuste kategooriasid Lisas 2 ning vigastuste tekkemehhanisme Lisas 3.



Joonis 8: Tuuliku labadel teostatavad tööd "rope-access" meetodil. Allikas: Enefit Green.

### 3.2 Valdkonna praktika probleemi lahendamiseks

Eelmises peatükis esitatud labavigastustele ja nende tekkimismehhanismidele on tuulevaldkonnas välja pakutud arvukalt uudseid lahendusi, kuid nende detailsem analüüsimine ei ole antud magistritöö skoobis. Küll aga soovib autor keskenduda sellele, milliseid lahendusi on täna tuulevaldkonnas rakendatud, mis aitaksid saavutada järgmisi eesmärke, mida autor tõi välja ka magistritöö probleemi defineerimisel:

- vähendada tuulikulabade inspeksioonideks kuluvat aega (alustades vajaliku informatsiooni koondamisest enne tuuliku seiskamist ning inspekteerimist kuni tuuliku

käivitamiseni pärast tuuliku inspeksiooni);

- vähendada tuulikulabade hooldusega seotuid kulusid (eeskätt peab autor silmas seda, kuidas saab planeerida hoolduseid sellisele ajale, kui kehtiv elektri hind on minimaalne ning tuuleolud on inspeksioonide jaoks soodsad);
- oluliselt kiirendada tuulikulabade inspeksioonidest pärineva toorinformatsiooni analüüsi (ehk kuidas on võimalik andmete analüüsi automatiseerida).

Eelnevalt väljatoodu on tihedalt seotud normeeritud elektrienergia hinnaga (ing k. "*LCOE*" ehk *levelized cost of electricity*). Viimane on põhiliseks tuuleenergeetika arengu katalüsaatoriks ehk tuuleparke arendavad, ehitavad ning käitavad ettevõtted on ärioluliselt huvitatud elektrienergiat tootma oma tootmisvaradega maksimaalselt kaua võimalikult madalate tootmiskuludega. [48]

Üheks võimaluseks, mis aitaks lahendada ülal mainitud probleeme, on kasutada droonipõhiseid inspeksioone. Viimane lähenemine võimaldab tuuleparkide omanikel läbi viia madala kuluga efektiivseid ning kiireid labainspeksioone, mis muuhulgas võimaldavad ka odavalt sooritada prediktiivset ehk ennetavat hooldust (vt definitsiooni kirjeldust ptk 1.1). [49]

Tuulikulaba seisundi hindamiseks kasutatakse ka spetsiaalseid sensoreid (nt vibratsioonisensorid, akustikasensorid jm), kuid nende integreerimine tuulikusse tähendab tavaliselt eeskätt mahukat alginvesteeringut ning ajas degradeeruvaid sensoreid, mida tuleb regulaarselt jälgida, hooldada ning lõpuks ka vahetada. [50]

Olgugi, et droonipõhise inspeksiooni puhul on võimalik head ülevaadet saada eeskätt tuulikulaba välistest vigastustest ning mitte seesmistest vigastustest (ehk tuulikulaba sees olevad vigastused), on kaasaegne valdkonnapraktika tõestanud, et eksisteerib üha rohkem olukordi, kus väline labavigastus tähendab ka vigastust tuulikulaba sees. [51]

Droonipõhistest inspeksioonidest pärinevate andmete analüüs on üldjuhul keeruline ja aeganõudev protsess. See on üks põhjustest, miks labainspeksioonide maksumus püsib võrdlemisi kõrgel tasemel. [49] Viimastel aastatel toimunud olulised arengud tehisintellekti tehnoloogiates on erinevaid masinõppe tehnoloogiaid muutnud märkimisväärselt efektiivsemaks, mis võimaldab tööstusel seda trendi kasulikult labainspeksioonides ja hilisemas andmeanalüüsis ja andmete väärindamises ära kasutada. [52]

Drooninspeksioonide ja hilisema masinõppe funktsionaalsuse poolt avastatud rikked võib jagada vastavalt eelmises peatükis (ja Lisas 2) kirjeldatud klassifikatsioonile. Kuna tuulepargid ning neis olevad tuulikud asuvad erinevates geograafilistes lokatsioonides, siis

on ka labadega seotud rikete osakaalud erinevad. Näiteks Enefit Greeni Eesti põhjarannikul olevad tuulepargid on rohkem allutatud jäätumisest tingitud labavigastustele. Kõige rohkem on Enefit Green AS kogemusel probleeme labade esiservaga, sest see allub kõige suuremale aerodünaamilisele koormusele. Kuna õhus lendlevad erinevad osakesed (tolm, vesi jne) siis suurel kiirusel saab tuuliku esiserv kõige rohkem kannatada ning autor hindab, et magistritöös käsitletav ning kavandatav lahendus avastab neid vigastuse liike kõige rohkem ning nende osakaal kõikidest labariketest on kõige suurem.

Tabelis 3 on esitatud drooninspeksioonide eelised ja puudused võrreldes klassikalise, st nõõrligipääsu meetodiga (ing k. *"rope-access method"*) ning kaamerapõhise labainspeksiooniga, mida teostatakse maapinnalt. Lisaks visuaalsele inspeksioonile eksisteerivad ka muud labainspeksioonimeetodid nagu infrapunakiirguse -, ultraheli -, akustilise emissiooni jm inspeksiooniliigid, kuid need lähtuvad asjaolust, et tehnik omab ligipääsu tuulikulabale ning antud kontekstis autor neid ei analüüsi, sest need sarnanevad nõõrligipääsu meetodile. [53]

Tabel 3: Tuuliku labainspeksiooni meetodite võrdlus. Allikas: autori koostatud [54, 55, 56] põhjal.

Labainspeksiooni mõjutav komponent	Droon-inspeksioon	Nõõrimeetod („rope-access“)	Inspeksioon maapinnalt kõrg-resolutsioonilise kaameraga
<i>Ilm</i>	Olenevalt droonist on võimalik inspeksiooni sooritada tuulekiirustel kuni 20 m/s	Väga ilmastikust sõltuv, tehnikud ei tohi labatõid sooritada alates tuulekiirusest 10 m/s	Ilmastik ei ole määrav, kuid ilmastik mõjutab inspeksiooni kvaliteeti
<i>Ülesseadmise aeg</i>	Minimaalne (tehnik laseb inspeksioonidrooni lendu ning inspeksioon algab)	Suur (tehnikud peavad liikuma läbi tuuliku labadele)	Minimaalne (tehnik kasutab teleobjektiivi maapinnalt)
<i>Töö kestvus</i>	Keskmiselt 1 tuulik 2-3 h jooksul	Heade tingimuste korral 1-2 tuulikut päevas	Heade tingimuste korral 2-5 tuulikut päevas
<i>Ohutus</i>	Inimesed ei tee tööd kõrgustes	Inimesed töötavad eluohtlikus kõrguses	Inimesed ei tee tööd kõrgustes
<i>Andmete kvaliteet</i>	Kõrgresolutsioonilised pildid kõikidest labakülgedest kõikidel vajalikel kaugustel	Keskmise resolutsiooniga pildid tehnikutele kättesaadavatest labakülgedest piiratud kaugusel	Kõrgresolutsioonilised pildid kättesaadavatest labakülgedest piiratud kaugusel
<i>Maksumus</i>	Madal	Kõrge	Madal
<i>Töö korratavus samadel/võrreldavatel tingimustel, mis varem</i>	Lihtsasti korratav	Korratav, kuid on keeruline	Korratav, kuid on keeruline

### 3.2.1 Masinõppe piirangud probleemi lahendamisel

Eri autorid on masinõppe kasutamisel labainspeksioonides välja toonud ka probleemseid asjaolusid [49, 57]:

- labavigastuste erinevad suurused eri vigastuste liikide lõikes on tihti masinõppe meetodite jaoks tülikad;
- suure resolutsiooniga piltide kogumine on keeruline ilma spetsiaalse drooni tehnoloogiata;
- treeningandmestiku loomine uue masinõppe mudeli integreerimiseks äriprotsessidesse võib osutada aeglaseks ning keeruliseks ülesandeks;
- sobiva arvutusliku tehisintellekti meetodi valimine, millega kõige täpsemini masinõppemudelit treenida (kaasaarvatud sobiva treeningandmestiku jaoks andmete kogumine ja noteerimine).

Erialakirjanduses on välja pakutud lahendusi, kuidas nimetatud murekohti lahendada ning seeläbi muuta masinõppe algoritme tuulikulaba inspeksioonidest saadud piltide analüüsimisel efektiivsemaks. Vigastuste erisusele ning piltide kogumise tülikusele on Shihavuddin *et al.* [49] välja pakkunud piltide augmenteerimise protsessi, mille käigus luuakse juba olemasolevatest treeningandmetest uued treeningandmed muutes viimaseid arvutuslikult võrreldes originaalidega. See võimaldab mudelit saada täpsemaks minimiseerides treeningandmete suure mahu olemasolu vajalikkust. Sarnast lähenemist rakendasid ka Reddy *et al.* [57].

### 3.2.2 Teadustööde ülevaade

Seoses tehisintellekti meetoditega on mitmed autorid kasutanud konvolutsioonilisi närvivõrke, rakendades lisaks R-CNN meetodit (ing k. "*Region Based Convolutional Neural Networks*"), mille spetsiifika on seotud eeskätt objektide tuvastamise ning masinägemisega [58, 59, 49]. Tuulikulabade vigastuste ennustamiseks on kasutatud ka SCADA-põhiseid meetodeid, mis kasutavad erinevaid tuulikust (labast) pärit signaale, selleks et ennustada tuulikulaba normaaltalitusest erinevat käitumist. [60]

Autor kaardistab tabelis 4 erinevate autorite uurimustöid, milles keskendutakse masinõppe meetoditel tuulikulaba seisukorra analüüsile ning vigastuste ennetavale avastamisele. Detailsemalt analüüsib autor masinõppe spetsiifikat antud äriprobleemi lahendamise kontekstis peatükis 5.2.1.

Tabel 4: Tuuliku labavigastuste masinõppe tuvastusega seotud uurimustööde kirjeldus ja kasutatud meetodikate võrdlus. Allikas: autori koostatud tabelis märgitud autorite põhjal.

Uurimustöö autorid	Kasutatavad meetodid	Üldprotsess	Lisainfo	Meetodi täpsus / tulemus
Yang <i>et al.</i> [59]	Segmenteerimise meetod + CNN (ing k <i>Convolutional Neural Network</i> ) + Otsustusmetsa meetod (ing k <i>random forest</i> )	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) <i>Otsu</i> läve meetod laba segmenteerimiseks (teisioõnu: taustapikslite eemaldamiseks)</li> <li>2) Süvaõppe (CNN) meetodit kasutatakse vigastus-tunnuste automaatseks eraldamiseks kiht-kihi haaval</li> <li>3) Tulemused klassifitseeritakse otsustusmetsa algoritmiga</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Treeningandmete puuduse tõttu kasutati teadmiste ülekannet (ing k <i>„knowledge transfer“</i>) kasutades ImageNet andmebaasi</li> <li>2) Treeningandmestik: 700 vigastustevaba labapilti, 200 vigastusega labapilti</li> <li>3) Testandmestik: 350 vigastustevaba labapilti, 100 vigastustega labapilti</li> </ol>	Varieerides treeningandmestiku suurus 84% (<20% treeningandmestikust) kuni 98,9% (>40% treeningandmestikust)
Reddy <i>et al.</i> [57]	Labainspektiooni piltide manuaalselt noteeritud pildid + CNN	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Andmete ettevalmistamine (mh augmentatsioon)</li> <li>2) Pildilõikuri (ing k <i>„image slicer“</i>) rakendamine piltide vähendamiseks</li> <li>3) Manuaalne notatsioon</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Labainspektiooni piltide augmenteerimine Keras raamistikuga</li> <li>2) Treeningandmestik: 800 vigastustevaba labapilti, 540 vigastusega labapilti 3) Testandmestik: 100 vigastustevaba labapilti, 67 vigastusega labapilti</li> </ol>	94,9% - binaarne klassifikatsioon (on labavigastus / ei ole labavigastus) 90,6% - multifaktoriaalne klassifikatsioon (mis tüüpi labavigastus)
Chandrasekhar <i>et al.</i> [60]	SCADAst pärinevad signaalid tuulikulaba talituse ennustamiseks (väliskeskonna temp., tuuliku võimsus, labanurk, labaaäre võnkesagedus, generaatori RPM)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Andmete kogumine, puhastamine, normaliseerimine</li> <li>2) Tunnuste (featuuride) valik</li> <li>3) Gaussi protsessi põhine treeningmeetod (stohhastiline meetod juhuslike muutujate regressiooni analüüsiks)</li> <li>4) Gaussi põhine ennustus</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Põhiline kasutatav (ennustatav) featuur: labaaäre võnkesagedused</li> <li>2) Teine oluline täpsust parandav featuur: väliskeskonna temperatuur</li> <li>3) Võimaldab ennustada tuulikulaba normaalalituduse erinevat käitumist</li> <li>4) Treeningandmestikus kasutati normaalalituduse tuulikuid</li> <li>5) 2500 andmepunkti 2-aastase perioodi jooksul eri tuulikute</li> </ol>	Välja töötatud mudel oli võimeline ennustama kriitilist labavigastust 6 kuud enne selle juhtumist
Shihavuddin <i>et al.</i> [49]	Region Based Convolutional Neural Network (R-CNN) ja eri tüüpi piltide augmentatsioonitehnikad	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Drooninspektioonist pärinevad pildid noteeritakse manuaalselt</li> <li>2) Annoteeritud inspektioonipiltide augmentatsioon</li> <li>3) Süvaõppe (R-CNN meetod) kasutamine treeninguks</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) CNN muudab pildid featuuride kaardiks (ing k <i>„feature map“</i>)</li> <li>2) Närvivõrk ennustab, kus võiksid ennustavad labavigastused featuuride kaardil asetseada läbi huvipakkuva piirkonna koondamise (ing k <i>„region of interest pooling“</i>)</li> <li>3) Klassifikaatori põhisel teeb närvivõrk otsuse, kas konkreetne objekt asub pildil või ei</li> <li>4) Süvaõppe mudel moodustab ennustusmudeli, mida rakendatakse uute piltide analüüsil</li> <li>5) Kasutati 701 droonipilti mudeli treenimiseks</li> </ol>	81,1% eri tüüpi labavigastuste puhul

## **4. AS-IS vaade**

Antud peatükis kirjeldab autor olemasolevaid protsesse, mis on seotud tuuliku labahoolduste - ja parandustega. Autor kasutab erinevaid ärianalüüsi tehnikaid ning kaardistab seejärel olemasolevate protsesside kitsaskohtasid.

### **4.1 Ärianalüüs**

Ärianalüüs algab olemasoleva tuulikulabade inspeksiooniprotsessi kaardistamisega. Tuulikulabade inspeksioonide korraldamise eest EG tuuleparkides vastutab konkreetse tuulepargi eest vastutav tootmisjuht, kes tagab, et tema vastutusallas olevates tuuleparkides oleksid inspeksioonid ning järgnevad hooldustööd tehtud regulaarselt ning kvaliteetselt.

Joonisel 9 on näidatud tuuleenergia tootmisjuhi põhilisi vastutusalasid, millest antud magistritöö on kõige tihedamalt seotud tegevusega "plaaniliste hoolduste ja inspeksioonide läbiviimine". On oluline välja tuua, et joonisel 9 näidatud protsessid on tihedalt üksteisega seotud. Näiteks on tuulepargi kuine käideldavus seotud muuhulgas sellega, kas konkreetsetes tuuleparkides teostati sel kuul suuremaid (erakorralisi) parandustöid. Parandustööde läbiviimine aga eeldab mh seda, et püstitakse eesmärgistatud hoolduseelarves.

Protsesside kaardistamine tagab ettevõttele ühtse arusaama oma äriprotsessidest ning võimaldab ettevõtte äriprotsesse analüüsida ning planeerida parendustegevusi [61]. Autor jätkab ärianalüüsi tuulikulabade inspeksiooni protsessi kaardistamisega, mis kuulub joonisel 9 oleva "plaaniliste hoolduste ja inspeksioonide planeerimine" tegevuse alla.

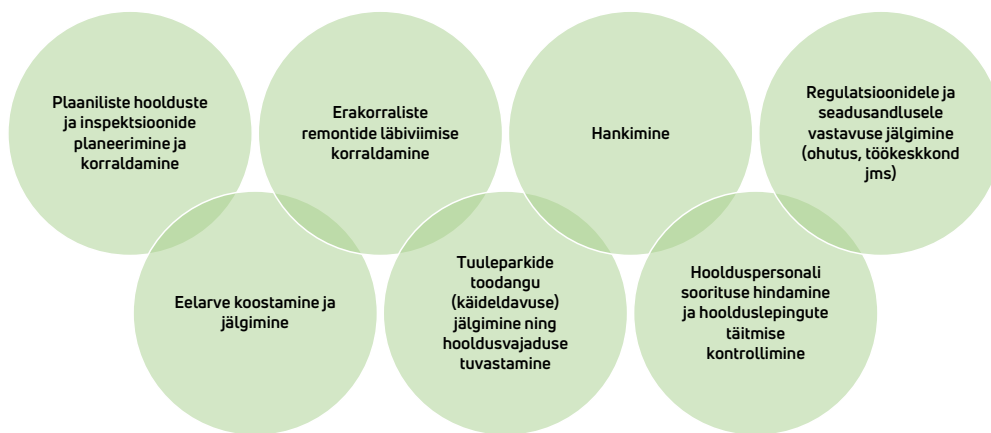
#### **4.1.1 Tuuleüksuse motivatsioonimudel**

Joonisel 10 on näidatud EG tuuleüksuse motivatsioonimudelit võttes arvesse ettevõtte strateegilisi eesmärgi ning peatükis 3.2 esitatud võimalikke lahendusi.

#### **4.1.2 Tuuleüksuse ärivõimekuste ülevaate kaart**

Joonisel 11 on näidatud EG tuuleüksuse ärivõimekuste kaarti koos parendamist vajavate võimekustega. Kõige suuremaks prioriteediks peab autor järgmiseid nõrgalt realiseeritud võimekusi:





Joonis 9: Tuuleenergia tootmisjuhi põhiprotsessid ja vastutusala. Allikas: autori koostatud.

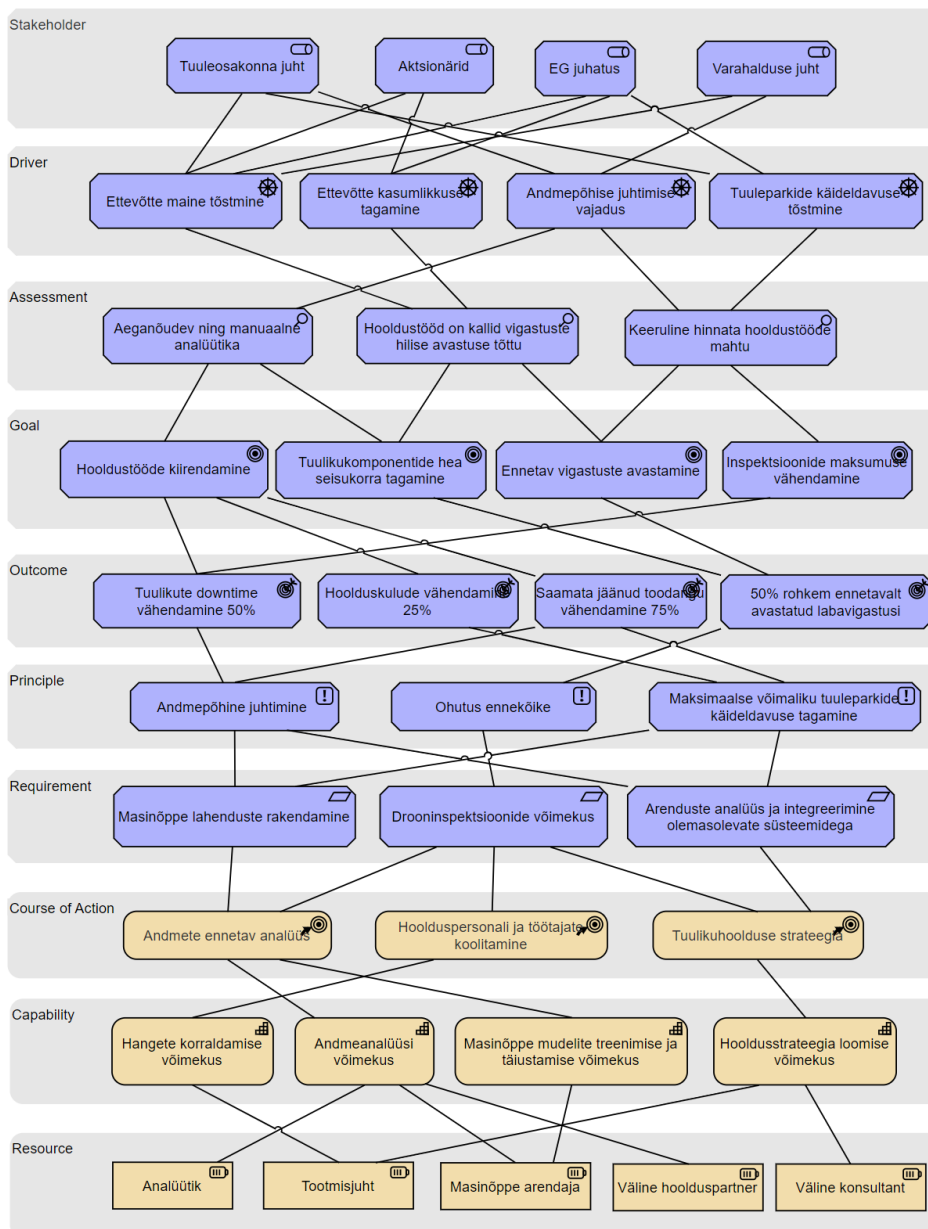
- arendustegevuse juhtimise võimekus;
- hoolduspartneri poolt edastatava dokumentatsiooni analüüsi võimekus;
- lisatööriistade (infosüsteemide) arendamise analüüsi võimekus;
- vanade süsteemide väljavahetamise võimekus.

### 4.1.3 Tuulikute labade inspeksiooni protsess

Joonisel 12 on näidatud tuulikulabade inspeksiooniprotsessi SIPOC meetodil. SIPOC diagrammil (joonis 12) kasutatud rollid on detailsemalt lahti kirjeldatud tabelis 5.

Ilmneb, et suur osa informatsioonist pärineb inspeksioonimeeskonnalt, mis vastutab tuulikulabade detailse inspeksiooni ning hilisema inspeksiooniraporti koostamise eest. Raport on ülimalt tähtsusega, sest sellel põhinevad järgnevad otsused, mida tootmisjuht vastu võtab. Näiteks on otsustuskohaks see, kas on vajadus saata meeskond uuele inspeksioonile, et mõnda kohta tuulikulabal valideerida või kas mõnda labariket on tarvis kiiremas korras parandada.

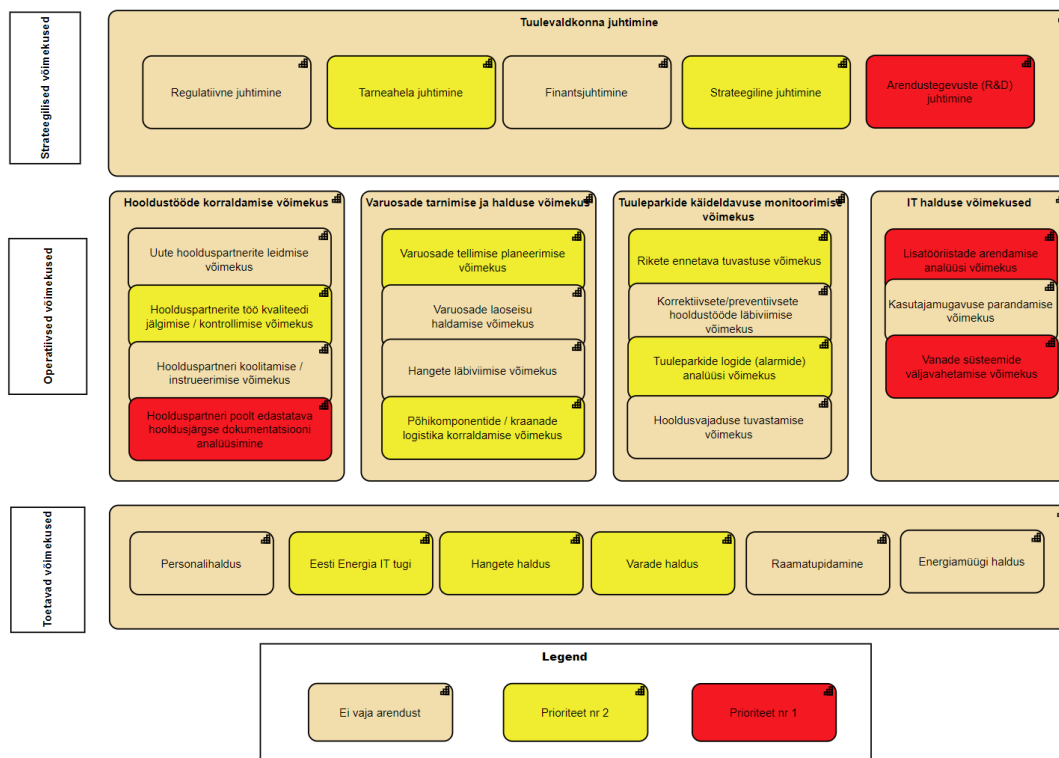
Labaparenduste planeerimine põhineb niisiis aktiivsel hoolduspartneri ning EG meeskonna vahelisel kommunikatsioonil. Probleemaatiliseks hindab autor siiski tõsiasja, et täna ei



Joonis 10: Tuuleüksuse motivatsioonimudel. Allikas: autori koostatud.

võimalda hoolduspersonalilt saadetakse aruanded tootmisjuhil teha kiiret ja detailset analüüsi labariket rikkelisuse ning progresseerumise kohta.

Täna toimub ettevõttes raportite analüüs manuaalselt, antud tegevus on ajamahukas ning inimlikel põhjustel võib tekkida olukord, et olulisemad kohad raportis võivad jääda märkamata nii hoolduspersonalil, kes raporti koostab, kui ka tootmisjuhil/varahalduse analüütikul, kes on selle raporti lõppkliendideks. Autor jätkab analüüsi kaardistades hetkel ettevõttes kehtivat labainspeksiooni põhiprotsesse.

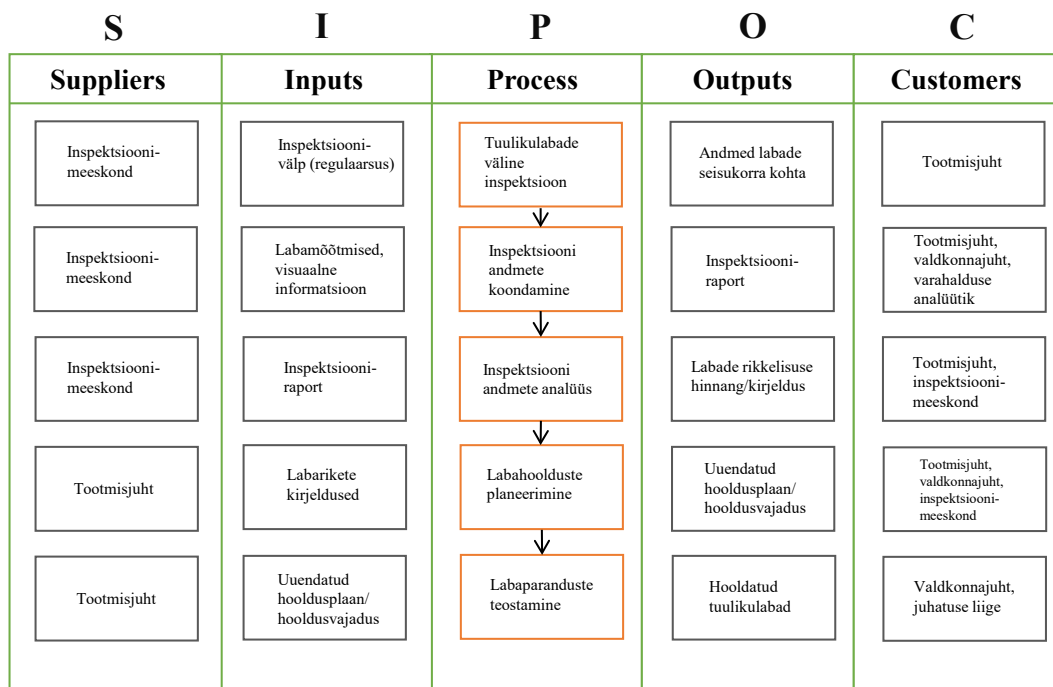


Joonis 11: Tuuleüksuse võimekuste kaart. Allikas: autori koostatud.

#### 4.1.4 Labainspektiooni - ja hoolduse protsessi SWOT analüüs

AS-IS protsessi SWOT analüüs on esitatud joonisel 13. Autor hindab põhilisteks tugevusteks ettevõtte tugevat finantsolukorda ning väga erinevate kompetentsidega inimeste olemasolu mitte ainult ettevõttes Enefit Green, vaid kogus Eesti Energia kontsernis. Nõrkusteks on peamine välja tuua kahte asjaolu. Esiteks - tänane protsess ei võimalda efektiivselt hinnata labatööde mahtu pärast inspektiooni, ehk millised vigastused vajavad kiireloomulist parandamist ning milliseid labavigastusi saab jätta tähelepanuta. Kõiki tuulikulabasid hooldada perfektse seisukorrani ei ole majanduslikult otstarbekas.

Teiseks - täna ei ole ettevõttes meetodikat, mis võimaldaks tootmisjuhtidel mõista, millised tuulikulabade vigastused on võrreldes varasema inspektiooniga progresseerunud. Autor hindab suurimaks võimaluseks äriprotsessi parandamisel uute IT lahenduste juurutamist



Joonis 12: Tuulikulabade inspektsooniprotsessi SIPOC diagramm. Allikas: autori koostatud.

ning koostööd teiste ettevõtetega, kellel on olemas kogemus antud vallas. Kõige suuremaks ohuks hindab autor hoolduspartneri ebakvaliteetset inspektsooni, mille tulemusel ei ole Enefit Greenil adekvaatset informatsiooni edasiste otsuste langetamiseks.

#### 4.1.5 Labainspektsooni - ja raportite analüüsi voodiagramm

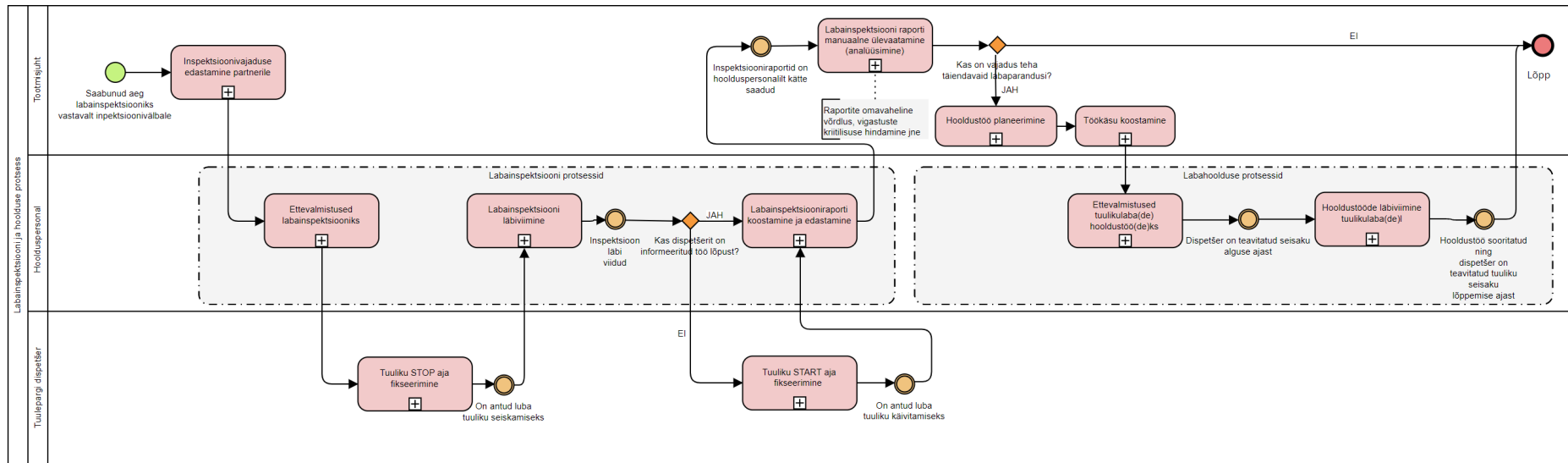
Joonisel 14 on esitatud olemasoleva tuulikulaba inspektsooni - ja hooldusprotsessi voodiagramm. Protsessi kaardistamise meetodikana kasutab autor BPMN-i, mis on struktureeritud protsesside kaardistamise viis, millega saab edukalt dokumenteerida, modelleerida, analüüsida, simuleerida, ja teostada muutusi äriprotsessides, võttes arvesse nende panust äritegevuse tulemuslikkusesse [62]. Kuna tuuliku komponentide hoolduse äriprotsess on selgelt laiapõhjalisem ja keerulisem, kui on antud magistritöö skoop, siis kaardistab autor detailsemalt joonisel 14 seda osa, kus on tootmisjuhil on kätte saadud inspektsooniraportid hoolduspartneri poolt ning algab nende raportite analüüsi protsess. Seda protsessi on kirjeldatud joonisel 15.

Tabel 5: SIPOC diagrammis kasutatud rollid ja nende kirjeldused. Allikas: autori koostatud.

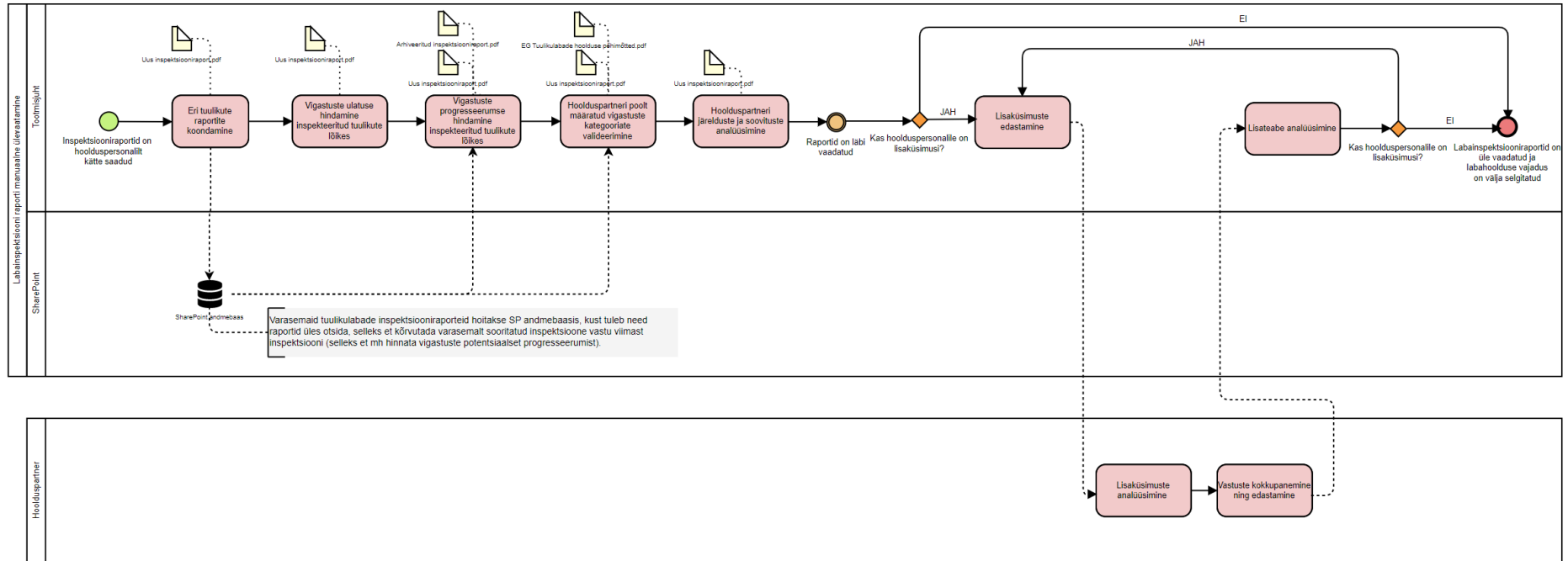
Roll	Kirjeldus
Tootmisjuht	Vastutab tuuleparkide käidu, ohutuse, hangete läbiviimise jm eest (vt joonis 9)
Valdkonnajuht	Tuuleenergia valdkonnajuht, kes kureerib turgudeüleselt tootmisjuhtide tööd; hindab tootmisjuhtide sooritust ning vastutab terviklikult tuuleparkide efektiivsuse ja ohutuse eest
Varahalduse analüütik	Toetab antud protsessi raames tootmisjuhti, et hinnata toodangu ja käideldavuse kadu inspeksiooni ajal; analüüsib labainspeksiooni raportit hindamiseks võimalikke rikkeid
Inspeksioonimeeskond	Sooritab inspeksiooni - ja vajadusel ka parandustöid tuulepargis
Juhatuse liige	Tootmise eest vastutav juhatuse liige, kelle ülesanne on tagada tootmisüksuste efektiivseks toimimiseks vajalikud võimekused; hindab valdkonnajuhtide tööd



Joonis 13: Tuulikulabade inspeksiooni - ja hooldusprotsessi SWOT analüüs. Allikas: autori koostatud.



Joonis 14: Tuulikulabade inspektsiooni - ja hooldusprotsessi voodiagramm. Allikas: autori koostatud.



Joonis 15: Tuulikulabade inspektsooni - ja hooldusprotsessi labainspektsooni raporti manuaalse ülevaatamise alamprotsessi kirjeldus. Allikas: autori koostatud.

## 4.2 AS-IS protsessi kitsaskohad

Eelmisest analüüsisist johtuvalt teeb autor antud peatükis järelused olemasoleva (AS-IS) protsessi puuduste kohta. Magistritöö äriprobleem on seotud tuulikulabade hoolduse vajaduse ebapiisava tuvastusega ning kui see vajadus fikseeritakse, on tihti labade parandamiseks kuluv aeg ebaratsionaalselt pikk, sest tavaliselt on inspeksiooni teostav meeskond teine kui see meeskond, mis sooritab parandusi.

Autori hinnangul võib kehtiva protsessi puudused jagada laias laastus kaheks liigiks. Esimesed on seotud sellega, mida võib ajaliselt paigutada labainspeksiooni ja labaparenduse vahele:

- tootmisjuht peab mõistma, milline tuulik vajab pärast inspeksiooni kiireloomulist parandamist ning millise vigastusega kannatab oodata - see on keeruline kui puudub kvaliteetne ja struktureeritud inspeksiooniandmestik ja selged teadmised sellest, mis töid on tuulikulabadel varasemalt sooritatud (**nn. hooldusvajaduse ebapiisava tuvastuse faktor**);
- tootmisjuhil on olemasoleva äriprotsessiga keeruline analüüsida eri hoolduspartnerite raporteid - need on erinevas formaadis, mis teeb nende läbivaatamise aeglaseks ja väga ajamahukaks tegevuseks (**nn. ajamahukuse faktor**);

Teised puudused on seotud andmeanalüüsiga, mis järgneb nii labainspeksioonile kui ka labaparendusele:

- EG varahalduse osakonnal ning EG tuuletootmise osakonnal on täna keeruline teha kvaliteetseid järelusi eri labavigastuste progresseerumise kohta (**nn. analüüsi keerukuse faktor**);
- puudub võimalus tootmisjuhile sobivalt filtreerida labarikkeid kategooriate, vigastuse ulatuse, tuulepargi, tuuliku vm vajalikul moel (**nn. raporteerimise keerukuse faktor**);

Kõik need põhjused loovad olukorra, kus ettevõtte kaotab raha tuuleparkide käideldavuse kao kaudu, sest pannakse seisma sellised tuulikud, mis võiksid oma labaseisukorraga edasi elektrienergiat toota ning millede parandamist võiks lükata tulevikku. See eeldab aga väga head andmepõhist ülevaadet labade seisukorrast, et selliseid otsuseid saaks langetada.



## 5. TO-BE vaade

Antud peatükis kirjeldab autor uut protsessi, mis on seotud tuuliku labahoolduste - ja parandustega. Autor kasutab selleks erinevaid varem kirjeldatud ärianalüüsi, süsteemianalüüsi ning IT-arhitektuuri planeerimise tehnikaid.

### 5.1 Ärianalüüs

Autor alustab ärianalüüsi uue protsessi kaardistamisest ning Mendelow maatriksi koostamisest, näitamaks uuest protsessist huvitatud osapooli. Vastavalt TOGAF raamistiku [14] printsiipidele on asjakohane näidata ka ettevõttes eksisteerivad ja puuduolevad kompetentse, selleks et uut lahendust realiseerima hakata.

Autor jätkab seejärel kavandatava infosüsteemi nõuete ja kasutajalugude kirjeldamisega, mis saavad aluseks uue lahenduse arendamisel. Seejärel koostab lahenduse IT-arhitektuuri ning koostab äriprobleemi lahendamiseks vajaliku andmebaasi olemi-suhte diagrammi.

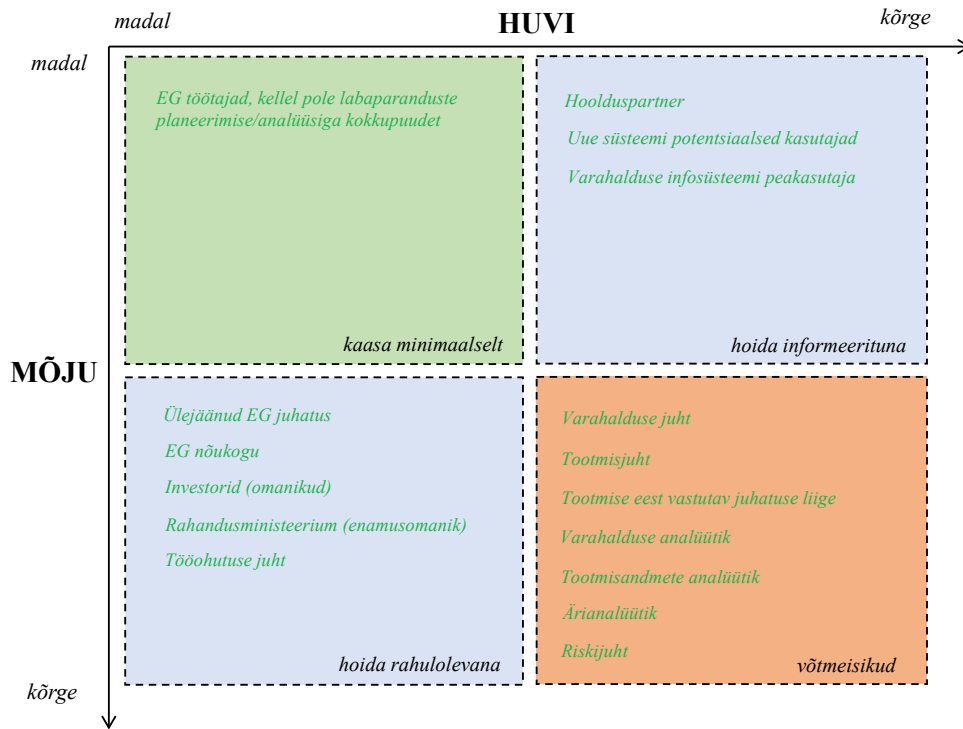
#### 5.1.1 Ärimudeli lõuend ja Mendelow maatriks

Autor kasutab ärimudeli lõuendi tehnikat äriprobleemi kokkuvõtte esitamiseks. Samuti kasutab autor Mendelow maatriksit, kirjeldamaks uuest infosüsteemist huvitatud osapooli. Mendelow maatriks on esitatud joonisel 16. Maatriksist ilmneb, et kõige suuremat mõju ja ärihuvi omavad rollid, mida autor järgnevalt kirjeldab:

1. varahalduse juht - rolli huvi lähtub digitaaliseerimisest, IT-strateegiast ja ettevõtte strateegilistest eesmärkidest;
2. tootmisjuht - rolli huvi lähtub tootmise (kasumi) maksimeerimise eesmärgist olemasolevate varadega;
3. tootmise eest vastutav juhatuse liige - rolli huvi lähtub vastutusest juhatuse esimehe, EG nõukogu, aktsionäride ja enamusosaniku ees;
4. varahalduse analüütik - rolli huvi lähtub efektiivsest andmeanalüüsi eesmärgist ning soovist osundada puudujääkidele olemasolevates äriprotsessides;
5. tootmisandmete analüütik - rolli huvi lähtub soovist õigeaegselt märgata tuulikurikkeid - ja vigastusi;
6. äri/finantsanalüütik - rolli huvi lähtub eesmärgist leida kõige kuluefektiivsemad lahendused ettevõttele;










7. riskijuht - rolli huvi lähtub riskide maandamise vajadusest uute lahenduste kasutusele võtmisel.

Ärimudeli lõuend on esitatud tabelis 6 ning toob kokkuvõtlikult välja probleemi olemuse ning võimaliku lahenduse koos kulustruktuuride ja potentsiaalsete tuluvoogudega.



Joonis 16: Mendelow maatriks uue infosüsteemi lahenduse projekti vaatest. Allikas: autori koostatud.

Tabel 6: Magistritöö probleemi ärimudeli lõuend. Allikas: autori koostatud.

<p><b>PROBLEEM</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Labainspeksioonide andmeanalüüs keeruline ja aeganõudev</li> <li>- Raskus teha andmepõhiseid otsuseid andmestiku põhjal</li> <li>- Tuulikute käideldavuse langus</li> </ul>	<p><b>LAHENDUS</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Masinnägemisel põhinev tuulikute labavigastuste tuvastus</li> <li>- Hooldusandmete struktuurne olemasolu</li> <li>- Tuulikute labavigastuste progresseerumise automaatne jälgimine</li> </ul>	<p><b>VÄÄRTUSPAKKUMINE</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 50% vähem labavigastustega seotud tuuliku seisakuid</li> <li>- 75% vähem manuaalset sekkumist vajavat andmetöötlust</li> <li>- 1% rohkem elektri-toodangut</li> </ul>	<p><b>EBAÕIGLANE EELIS</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Täisautomaatne tuulikulaba analüütika koos hooldusvajaduse tuvastamisega</li> <li>- Andmepõhised käidukorraldusega seotud juhtimisotsused</li> </ul>	<p><b>KLIENDI SEGMENT</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tuuleenergia valdkonnajuht</li> <li>- Tuuleenergia tootmisjuhid</li> <li>- Varahalduse analüütikud</li> <li>- Tootmise ja finantside eest vastutavad juhatuse liikmed</li> <li>- Varahalduse juht</li> </ul>
<p><b>OLEMASOLEVAD ALTERNATIIVID</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Lisainspeksioonide sooritamine tuuleparkides</li> <li>- Vibratsiooni jm andurite paigaldamine tuulikulabadesse</li> <li>- Lisakompetentsi värbamine ettevõttesse (tehnikud, analüütikud)</li> </ul>	<p><b>VÕTME MÕÕDIKUD</b> </p> <p>+3.8 GWh suurem aastane elektrienergia toodang +0.93 M eur suurem ettevõtte tulu</p>	<p><b>IDEE KONTSEPTSIOON</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tuulikute labavigastuste progresseerumise ja kriitilisuse automaatne tuvastamise võimekus</li> </ul>	<p><b>KANALID</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ettevõtte sisevõrk</li> <li>- Iga-aastane DigiDay üritus (ettevõttesisene konverents)</li> </ul>	<p><b>VARAJASED VASTUVÕTJAD</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tuuleenergia tootmisjuht</li> <li>- Varahalduse analüütikud</li> <li>- Tuuleenergia valdkonnajuht</li> </ul>
<p><b>KULUDE STRUKTUUR</b> </p> <p>2023 - 2026</p> <p>Lahenduse arendus: 0.35 M eur Droonide soetamine: 0.05 M eur Töötajate koolitamine: 0.01 M eur Lahenduse haldus ja tugi: 0.05 M eur</p>		<p><b>TULUVOOD</b> </p> <p>2023 - 2026</p> <p>Töötajate tööaja sääst: 0.09 M eur Lisa-elektrienergia tootmine (1% aastas) : 2.8 M eur</p>		

## 5.1.2 Ärireeglid ja äriinfo mudel

Antud peatükis kirjeldab autor loodava tuulikulaba infosüsteemi ärireeglid, mis saavad olema aluseks loodavale äriinfo mudelile.

**R1.** Üks labavigastus saab olla ühel tuulikulabal. Ühel labal saab olla mitte ühtegi kuni mitu labavigastust.

**R2.** Üks vigastuse liik saab olla mitte ühegi kuni mitmel vigastusel. Üks vigastus saab korraga olla seotud ühe vigastuse liigiga.

**R3.** Üks inspeksioonipilt saab olla seotud ühe tuulikuga. Üks tuulik võib olla seotud mitte ühtegi kuni mitme inspeksioonipildiga.

**R4.** Üks tuulik saab olla seotud ühe või mitme tuulikulabaga. Üks tuulikulaba saab olla seotud ühe tuulikuga.

**R5.** Üks hooldusvajadus saab olla seotud ühe tuulikuga. Üks tuulik saab olla seotud mitte ühegi kuni mitme hooldusvajadusega.

**R6.** Üks töökäsk võib olla seotud ühe kuni mitme hooldusvajadusega. Üks hooldusvajadus võib olla seotud mitte ühegi kuni mitme töökäsuga.

**R7.** Üks tuulik saab olla seotud ühe tuulepargiga. Ühe tuulepargiga saab olla seotud üks kuni mitu tuulikut.

**R8.** Üks tuulikutehnoloogia saab olla seotud mitte ühegi kuni mitme tuulepargiga. Üks tuulepark saab olla seotud ühe või mitme tuulikutehnoloogiaga.

**R9.** Üks masinõppe mudel saab olla seotud mitte ühegi kuni mitme masinennustusega. Üks masinennustus saab olla seotud ühe masinõppe mudeliga.

**R10.** Ühe töökäsuga saab olla seotud mitte ühtegi kuni mitu hooldusmeeskonda. Üks hooldusmeeskond võib olla seotud mitte ühtegi kuni mitme töökäsuga.

**R11.** Üks inspeksioonidroon võib olla seotud mitte ühegi kuni mitme labainspeksiooniga. Üks labainspeksioon võib olla seotud mitte ühegi kuni mitme inspeksioonidrooniga.

**R12.** Üks labainspeksioon võib olla seotud ühe kuni mitme töökäsuga. Üks töökäsk võib

korraga olla seotud mitte ühegi või ühe labainspekttsiooniga.

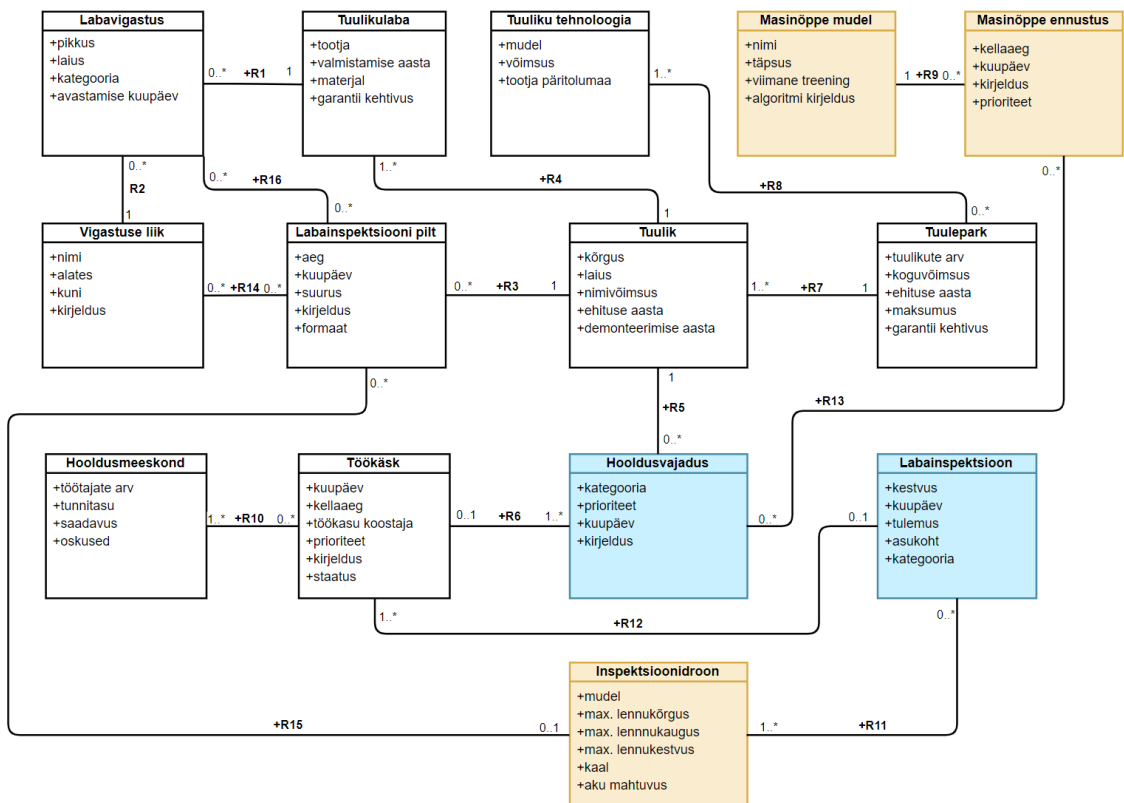
**R13.** Ühe masinõppe ennustus võib olla seotud mitte ühegi kuni mitme hooldusvajadusega. Üks hooldusvajadus võib olla seotud mitte ühegi kuni mitme masinõppe ennustusega.

**R14.** Üks inspekttsioonipilt võib olla seotud mitte ühegi kuni mitme vigastuse liigiga. Üks vigastuse liik võib olla seotud mitte ühegi kuni mitme inspekttsioonipildiga.

**R15.** Üks labainspekttsiooni pilt võib olla seotud mitte ühegi või ühe inspekttsioonidrooniga. Üks inspekttsioonidroon võib olla seotud mitte ühegi kuni mitme labainspekttsiooni pildiga.

**R16.** Üks labavigastus võib olla seotud mitte ühegi kuni mitme labainspekttsiooni pildiga. Üks labainspekttsiooni pilt võib olla seotud mitte ühegi kuni mitme labavigastusega.

Joonisel 17 on esitatud ärireeglitel põhinev äriinfo mudel. Siniselt on näidatud parandamist vajavad objektid ning kollaselt kavandatava infosüsteemiga lisanduvad objektid.



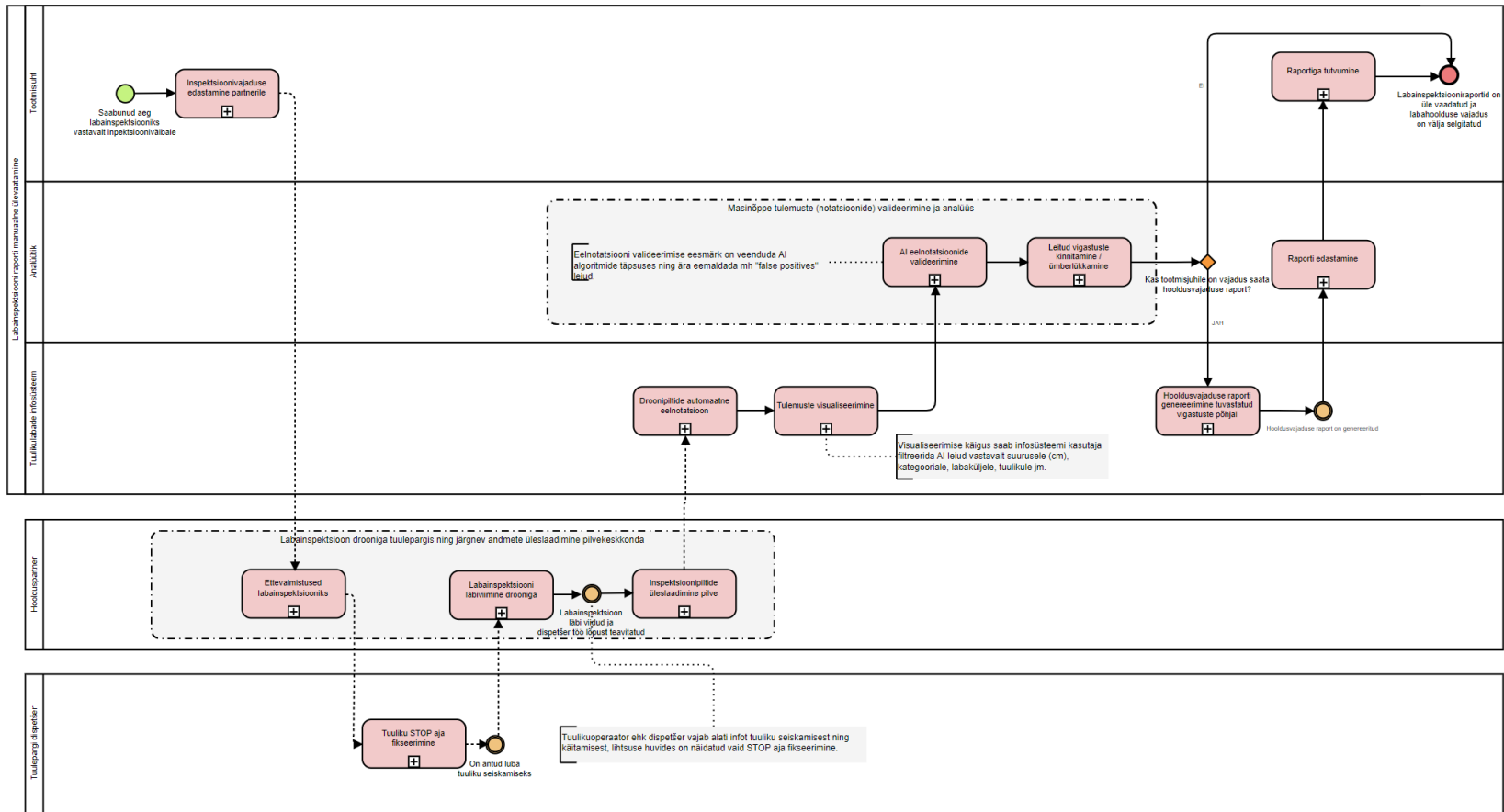
Joonis 17: Ärireeglitel põhinev äriinfo mudel. Allikas: autori koostatud.

## 5.2 Uue protsessi modelleerimine

Joonisel 18 on näidatud uus labainspektsooni - ja hooldustegevuse äriprotsess (TO-BE). Lisandunud on tuulikulabade infosüsteem, mis on võimeline masinõppe mudelite abil tuvastama inspektsoonipiltidelt vigastusi ning hindama nende kriitilisust vastavalt kasutaja poolt seadistatud kriteeriumitele. Uue protsessi puhul on oluline välja tuua järgmised eeldused:

- tootmisjuht ei pea hooldusraporteid käsitsi analüüsima;
- tootmisjuht suudab võrrelda varasemaid labainspektsooniraporteid omavahel, st hinnata vigastuse võimalikku progresseerumise määra;
- labainspektsoonide põhiliseks töövahenditeks on spetsiaalsed droonid ning väljaõpetatud tehnikud, seeläbi vähendades hooldus - ja administratiivse töö hulka.

Uue protsessi keskne osa on kavandatud tuulikulabade infosüsteem, mis on võimeline treenitud masinõppe mudeliga tegema labavigastuste kohta ennustusi lisanduvate drooninspektsooni piltide põhjal. Ehk märkimisväärset osa uuest äriprotsessist etendab masinõppe mudelite koostamise, treenimise, valideerimise ja testimise võimekus. Autor kirjeldab neid järgmises peatükis 5.2.1.

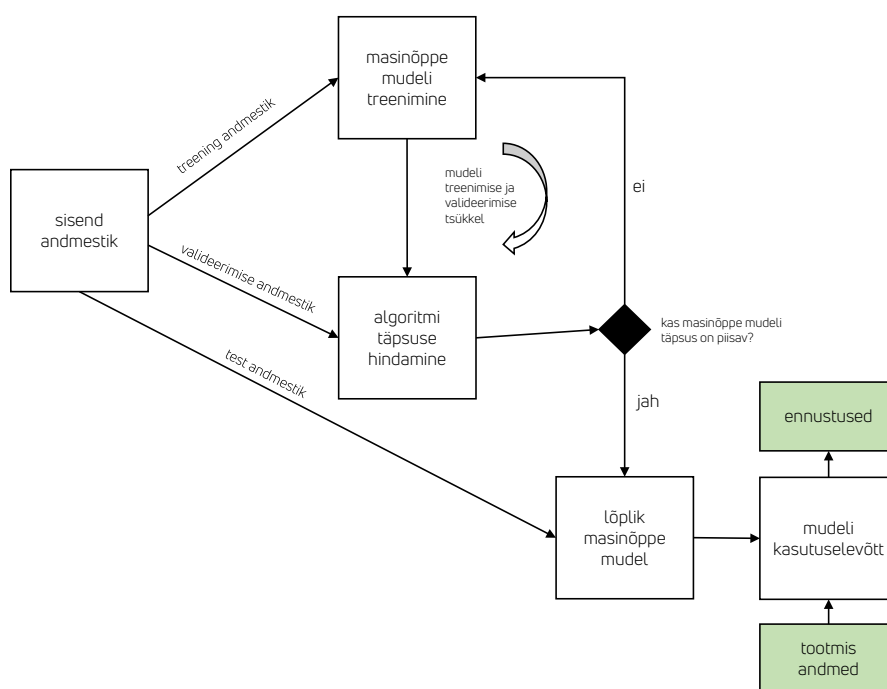


Joonis 18: Tuulikulabade inspeksiooni - ja hooldusprotsessi voodiagramm (TO-BE). Allikas: autori koostatud.

## 5.2.1 Masinõppe funktsionaalsus uues äriprotsessis

Masinõppe on teadusvaldkond, mis käsitleb arvutusalgortimide kasutamist empiiriliste andmete muutmiseks kasutatavateks mudeliteks [63]. Klassikaline masinõppe projekti koostamise voodiagramm on esitatud joonisel 19. Masinõppe mudeli koostamine eeldab järgmiseid fundamentaalseid samme [64]:

1. vajaliku andmestiku koondamine, millel hakkab põhinema loodav masinõppe mudel;
2. andmestiku töötlus, puhastus, vajadusel noteerimine;
3. sobiva mudeli/algoritmi kasutamine mudeli treenimiseks;
4. mudeli treenimise initsereerimine jagades algandmestiku kolmeks: treeningandmestik, valideerimisandmestik ja testandmestik;
5. mudeli täpsuse analüüs;
6. vajadusel mudeli algoritmi parameetrite häälestus;
7. mudeli kasutuselevõtt rakendades mudeli peal uusi andmeid (joonisel 19 "tootmisandmed").



Joonis 19: Tüüpiline masinõppe mudeli treenimise protsess. Allikas: autori koostatud [65] põhjal.

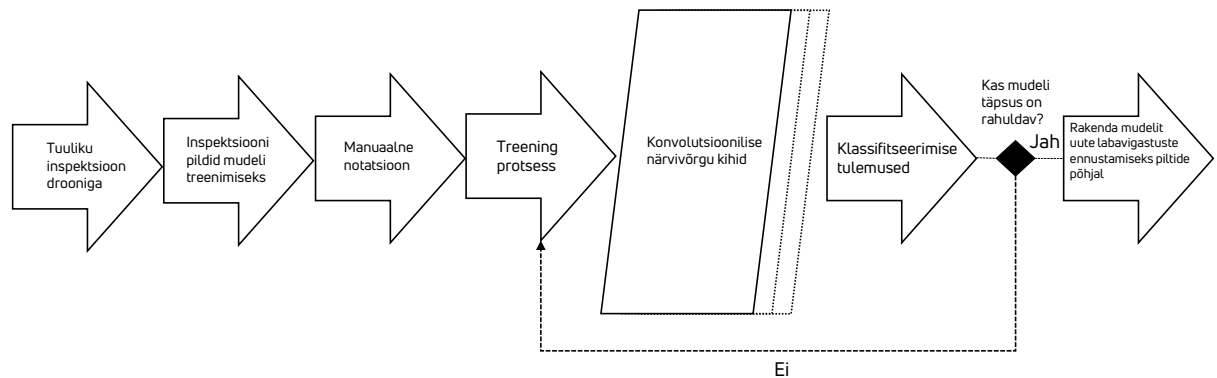
Uue labainspektsioonist pärinevate andmete analüüsiprotsessi raames kasutatud masinõppe



modeli treenimismeetodiks on valitud CNN meetod, mis on piltide klassifitseerimises kujunenud masinõppe valdkonna parimaks praktikaks [66, 67]. CNN meetodit eelistatakse kui:

- mudeli treenimisel soovitakse vältida keerulist ja aeganõudvat piltide eeltötlust;
- mudeli toorandmeid (dronepilte) on soov klassifitseerida otse.

Joonisel 20 on esitatud kontseptuaalne labainspeksioonidest pärinevate piltide masinõppe mudeli treenimise algoritm.



Joonis 20: Tuulikulaba vigastuste masinõppe mudeli treenimise voodiagramm CNN-meetodil. Allikas: autori koostatud [57] põhjal.

Jooniselt 20 ilmneb, et TO-BE äriprotsessis kasutatava masinõppe mudeli treenimise protsessi võib jagada viieks alamosaks:

1. tuulikuinspeksioonist saadud dronepildid jagatakse treening -, valideerimis - ja testandmestikuks (vastavalt üldskeemile joonisel 19);
2. kuna närvivõrgu treenimine eeldab suure noteeritud andmestiku olemasolu, siis luuakse esialgsele mudelile notatsioonid, millega luuakse ennustatavad klassifikatorid. Tihti on see tegevus manuaalne, kuid on võimalikud ka tehisintellekti põhiseid notatsioonitehnikaid;

3. konvolutsioonilise närvivõrgu treeningprotsess, kus uute andmete pealt genereeritakse uued notatsioonid näidates tuvastatud vigastusi piiratud kastina (ing k. "*bounding box*");
4. närvivõrgu parameetrite modifitseerimine vastavalt eelmises punktis saadud tulemustele;
5. mudeli rakendamine uute inspeksiooniandmete analüüsil;
6. järgnevatel mudeli kasutamistel on vajadus mudeli täpsust hinnata ning pisteliselt hinnata mudeli poolt ennustatud labavigastusi ning vajadusel neid korrigeerida - seda saab teha EG töötaja, kes on saanud selleks spetsiaalse koolituse.

Magistritöö autorile on teada, et suuremahulise treeningandmestiku hankimine võib osutada aeganõudvaks ning keeruliseks väljakutseks. Seetõttu soovib autor kasutada piltide augmenteerimise tehnikat, mis loob olemasolevatest piltidest uued variatsioonid. Eri autorid [57, 68] on kasutanud selleks Keras raamistikku.

Selles peatükis mainitust järeltab autor ning toetub seejuures Reddy *et al.* [57] uurimustööle, et masinõppe poolne labavigastuste tuvastus närvivõrkude abil soodustab uute, potentsiaalsete labavigastuste avastamist, mis seejuures vähendab oluliselt tuuliku planeeritud seisakuaega ning vajadust teha labainspeksioone manuaalselt (ehk nõõrligipääsu meetodil)

## 5.2.2 GAP analüüs uue protsessi rakendamiseks

Tabelis 7 on esitatud loodava äriprotsessi GAP analüüs, mis põhineb varem mainitud TOGAF raamistikul [14] ning mille eesmärk on kaardistada olemasolev ning tulevane arhitektuur ning olemasolevad ja puuduolevad võimekused.

Vastavalt tabelile 7 on tuvastatud järgmised võimekused, mis loovad ettevõttele lisandväärtust:

1. drooninspeksioonide läbiviimise võimekus, mis tagab kiiremad ning efektiivsemad tuulikulabade inspeksioonid;
2. labavigastuste progresseerumise tuvastuse võimekus - sellega tagatakse läbi loodava infosüsteemi ettevõtte tootmisvarade õigeaegne hooldus ja tootmisvarade ohutu käidukorraldus (kuna alates teatud tuulikulaba vigastuste kategooriast tuleb tuulik seisata, vt rikete kategooriasid Lisa 2-st);
3. masinõppe mudelite treenimise ja täiustamise võimekus - sellega tagatakse muuhulgas eelmise võimekuse efektiivsus, sest masinõppe mudeli täpsusel, valideerimise, testimise ning lisaparameetrite lisamise võimekusel põhineb suuresti loodava info-

Tabel 7: Labainspeksioonide analüüsi ja vigastuste tuvastuse gap analüüs.

→ Loodavad võimekused  ↓ Olemasolevad võimekused	Laba inspeksioonide piltide analüüsi võimekus	Drooninspektio oni võimekus	Labavigastuste progresseerumise tuvastuse võimekus	Masinõppe mudelite treenimise ja täiustamise võimekus	Labade hooldusvajaduse automaatse tuvastuse võimekus	Laba inspeksioonide (meta)andmete filtreerimise ja raporteerimise võimekus	Labade parandustööde/ inspeksioonide tellimise võimekus	Eemaldatud võimekused
Laba inspeksioonide piltide analüüsi võimekus	Säilib võimekus inspeksioonipilte käsitsi analüüsida							
Labade parandus/ inspeksioonitöö de tellimise võimekus							Säilib võimekus ja tööde tellimise protseduur	
Manuaalne labavigastuste progresseerumise tuvastuse võimekus								Eemaldatud
Uued võimekused		Gap: Droon inspeksiooni võimekus	Gap: Labavigastuste progresseerumise tuvastuse võimekus	Gap: Masinõppe mudelite treenimise ja täiustamise võimekus	Gap: Labade hooldusvajaduse automaatse tuvastuse võimekus	Gap: Laba inspeksioonide (meta)andmete filtreerimise ja raporteerimise võimekus		

üsteemi väärtus;

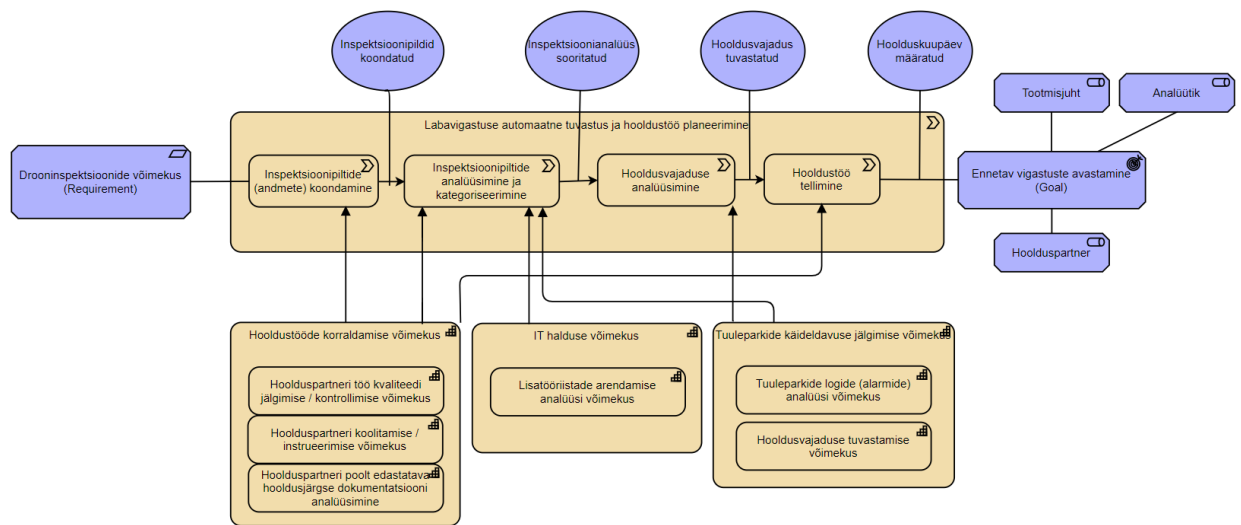
- labade hooldusvajaduse automaatse tuvastuse võimekus - loodavasse infosüsteemi on võimalus lisada äri poolt ette antud rikketekooriaid ning selle automaatsel tuvastusel masinõppe mudeli poolt luuakse teavitus tootmisjuhile;
- labainspeksioonide (meta)andmete filtreerimise ja raporteerimise võimekus - sellega tagatakse labainspeksioonide kohta käiva informatsiooni struktureerituse, detailsuse ja sobiva formaadi.

Autor hindab, et tänane võimekus hinnata manuaalselt labavigastuste progresseerumist on oma olemuselt väga ajamahukas ning subjektiivsetel põhjustel ka ebatäpne tegevus, seega seda võimekust on vastavalt GAP analüüsile autori arvates mõistlik eemaldada, sest uue infosüsteemiga on see võimekus asendatud automaatse labavigastuse progresseerumise tuvastuse võimekusega.

### 5.2.3 Loodava äriprotsessi väärtusvoog

Joonisel 21 on esitatud loodava äriprotsessi väärtusvoogu. Labavigastuste automaatse tuvastuse ja hooldustöö planeerimise protsess jaguneb neljaks alamprotsessiks:

1. inspeksioonipiltide (andmete) koondamine;
2. inspeksioonipiltide analüüsimine ja kategoriseerimine;
3. hooldusvajaduse analüüsimine;
4. hooldustöö tellimine.



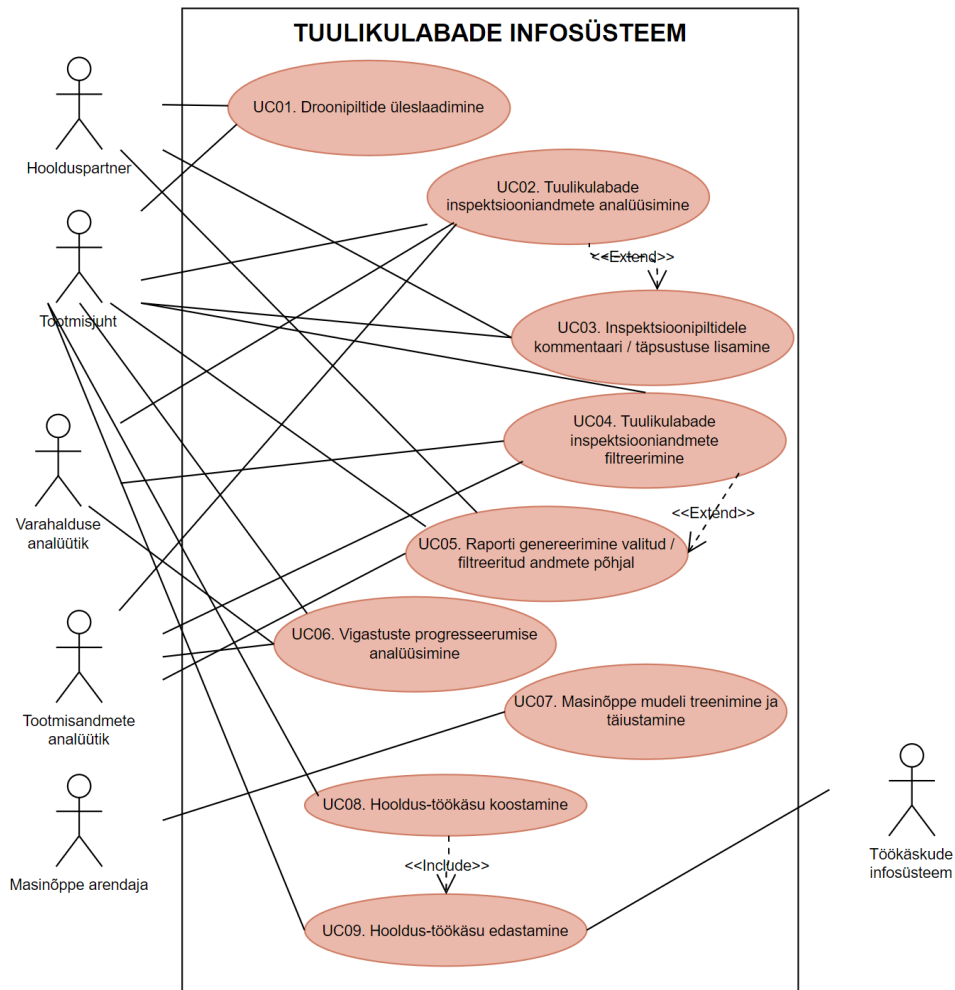
Joonis 21: Labavigastuste automaatse tuvastuse ja hooldustöö planeerimise väärtusvoog. Allikas: autori koostatud.

## 5.3 Süsteemianalüüs

Autor alustab süsteemianalüüsi kasutusmallide kirjeldamisest ning liigub edasi funktsionaalsete ja mittefunktsionaalsete nõuete kirjelduste juurde.

### 5.3.1 Kasutusmallid

Joonisel 22 on näidatud tuulikulaba infosüsteemi kasutusmallide diagramm.



Joonis 22: Kavandatava infosüsteemi kasutusmallide mudel. Allikas: autori koostatud.

### 5.3.2 Kasutusmallide kirjeldused

Autor kasutab kasutusmallide kirjeldamisel A. Cockburni meetodit [69], mis jagab kasutusmalli järgmisteks põhilisteks osadeks:

- kasutusmalli nimi;
- kasutusmalli skoop/eesmärk;
- kasutusmalli eeltingimus;
- kasutusmalli aktor(id);
- kasutusmalli peastsenaarium ning alternatiivne stsenaarium;
- kasutusmalli järelingimus

Tabelites 8 kuni y on esitatud kasutusmalli mudelil 22 näidatud kasutuslood.

Tabel 8: UC01 kirjeldus. Allikas: autori koostatud.

<b>Nimi</b>	<b>UC01. Droonipiltide üleslaadimine</b>
Kontekst	Labainspektiooni järgne droonipiltide üleslaadimine tuulikulabade infosüsteemi andmebaasi
Tulemus	Droonipildid on edukalt üles laetud infosüsteemi andmebaasi, kust masinõppe mudel saab nendega sooritada vajalikku töötlust
Eeltingimus	Inspeksioon on edukalt sooritatud ning kasutaja on edukalt süsteemi sisse logitud
Aktorid	Hoolduspartner
Põhistsenaarium	1. Kasutaja avab andmete üleslaadimise vaate 2. Kasutajale näidatakse varem üleslaaditud toorpiltide struktuuri 3. Kasutaja loob uue alamkausta uute inspeksioonipiltide jaoks 4. Kasutaja nimetab kausta vastavalt inspekteeritud tuulepargile/tuulikule ja kuupäevale 5. Kasutaja laeb üles droonipildid 6. Kasutaja nimetab ümber üleslaaditud pildid vastavalt kokkulepitud masinloetavale struktuurile
Alternatiivne stsenaarium	1. Kasutaja avab andmete üleslaadimise vaate 2. Kasutajale näidatakse varem üleslaaditud toorpiltide struktuuri 3. Kasutaja loob uue struktuuripuu 4. Kasutaja laeb üles droonipildid
Järeltingimus	Hoolduspartner veendub, et tuulepargis sooritatud inspektiooni kirjeldavad droonipildid on liikunud droonilt tuulikulabade infosüsteemi andmete struktuuripusse. Droonipiltide edukas üleslaadimine on tingimuseks järgnevatele masinõppe protsessidele ning andmete kuvale.

Tabel 9: UC02 kirjeldus. Allikas: autori koostatud.

<b>Nimi</b>	<b>UC02. Tuulikulabade inspeksiooniandmete analüüsimine</b>
Kontekst	Tootmisjuht avab masinõppe mudeli ennustuste vaate ning hindab mudeli täpsust ja mudeli avastatud vigastusi tuulikulabadel
Tulemus	Ülevaade tuulikulabadel masinõppe mudeli poolt avastatud vigastustest
Eeltingimus	Masinõppe mudel on edukalt sooritanud üleslaetud droonipiltide põhjal ennustusi
Aktorid	Tootmisjuht

(Jätkub järgmisel lehel)

Tabel 9: UC02 kirjeldus. Allikas: autori koostatud. (Jätk)

Nimi	UC02. Tuulikulabade inspeksiooniandmete analüüsimine
Põhistsenaarium	1. Kasutaja avab infosüsteemi 2. Kasutaja avab inspeksioonitulemuste vaate 3. Kasutaja valib välja vajaliku tuulepargi 4. Kasutaja valib välja vajaliku tuuliku 5. Kasutaja valib välja vajaliku tuulikulaba 6. Infosüsteem näitab visuaalselt kasutajale valitud üksuse lõikes masinõppe mudeli ennustusi ning rikkekategooriasid 7. Kasutaja avab kõige suurema vigastuste hulgaga tuulikut 8. Kasutaja avab kõige suurema vigastuste hulgaga tuulikulaba
Alternatiivne stsenaarium	1. Kasutaja avab infosüsteemi 2. Kasutaja tahab näha ainult masinõppe mudeli poolt avastatud kõige kriitilisemaid rikkeid (st kategooria 5) 3. Infosüsteem kuvab kõikide ajalooliste inspeksioonide lõikes soovitud vigastusi 4. Kasutaja ekspordib infosüsteemist raporti sobivas formaadis koos vigastuste metaandmetega
Järeldingimus	Kasutaja on tuvastanud uued vigastused tuulikulabadel ning on võimeline planeerima jätkutegevusi seoses tuulikulabade hooldamisega

Tabel 10: UC03 kirjeldus. Allikas: autori koostatud.

Nimi	UC03. Inspeksioonipiltidele kommentaari/täpsustuse lisamine
Kontekst	Kasutaja soovib droonivigastustele lisada täiendavaid kommentaare rikke ulatuse, paranduse vajaduse vm kohta
Tulemus	Tuulikulabade droonipiltidele on kasutaja poolt tehtud lisamärke, mis võimaldab sooritada lisafiltreeringuid
Eeltingimus	Inspeksioon on edukalt sooritatud, masinõppe mudel on teinud vajalikud arvutused ning pakkunud välja tähelepanu vajavad pildid
Aktorid	Tootmisjuht, hoolduspartner

(Jätkub järgmisel lehel)

Tabel 10: UC03 kirjeldus. Allikas: autori koostatud. (Jätk)

<b>Nimi</b>	<b>UC03. Inspeksioonipiltidele kommentaari/täpsustuse lisamine</b>
Põhistsenaarium	1. Kasutaja avab infosüsteemi 2. Kasutaja avab inspeksioonitulemuste vaate 3. Kasutaja valib inspeksioonipildid tuvastatud vigastused pikkuse (cm) järgi 4. Kasutaja hindab labavigastuse ulatust 5. Kasutaja soovib märkida droonipildile endapoolse kommentaari (paranduse vajalikkuse, rikke ulatuse vm kohta) 6. Kasutaja salvestab kommentaari konkreetsele inspeksioonipildile 7. Kasutaja ekspordib sobivas formaadis (.xlsx, .csv, .pdf) vigastuste loetelu koos kommentaaridega
Alternatiivne stsenaarium	1. Kasutaja avab infosüsteemi 2. Kasutaja avab viimase inspeksioonitulemuste vaate 3. Kasutaja valib välja kõik ühe tuulepargi lõikes teatud kuupäeval tehtud inspeksioonipildid 4. Kasutaja valib kõik eelmises punktis mainitud inspeksioonipildid 5. Kasutaja lisab märke/kommentaari kõikidele mainitud inspeksioonipiltidele
Järeltingimus	Valitud inspeksioonipiltidele on lisatud tootmisjuhi poolt vajalikuks peetav kommentaar/täiendus

Tabel 11: UC04 kirjeldus. Allikas: autori koostatud.

<b>Nimi</b>	<b>UC04. Tuulikulabade inspeksiooniandmete filtreerimine</b>
Kontekst	Kasutaja soovib konfigurereida inspeksiooniandmetest endale sobiva vaate selleks et andmeid analüüsida
Tulemus	Ülevaade inspeksioonipiltidelt pärit (meta)andmetest sobivas dokumendiformaadis on olemas
Eeltingimus	Droonipildid on üles laetud; masinõppe mudelid on sooritanud analüüsi (ärioloogika on paika pandud); labavigastused on tuvastatud
Aktorid	Tootmisjuht, varahalduse analüütik, tootmisandmete analüütik
Põhistsenaarium	1. Kasutaja avab infosüsteemi 2. Kasutaja avab andmete eksportimise vaate 3. Kasutaja valib kriteeriumid, mille alusel inspeksiooniandmeid filtreerida 4. Kasutaja saab kasutada filtreid selleks et välja filtreerida sobiva tuulepargi, tuuliku, tuulikulaba või teatud omadustega labavigastuse 5. Infosüsteem kuvab filtreeringu tulemusi 6. Infosüsteem kuvab filtreeringu tulemusi visuaalselt (histogramm, tulpgraafik, pie-chart)

(Jätkub järgmisel lehel)



Tabel 11: UC04 kirjeldus. Allikas: autori koostatud. (Jätk)

<b>Nimi</b>	<b>UC04. Tuulikulabade inspeksiooniandmete filtreerimine</b>
Alternatiivne stsenaarium	1. Kasutaja avab infosüsteemi 2. Kasutaja avab andmete eksportimise vaate 3. Infosüsteemis näitab andmeid visuaalselt ettemääratud filtreerimissätetega (riikidepõhiselt, tuulepargi põhiselt, tuuliku põhiselt) 4. Kasutaja saab valida detailsema vaate vastavalt soovitud andmete agregeerituse tasemele
Järeltingimus	Inspeksioonipiltidest pärinevad andmed on sobivas formaadis filtreeritud ning on sobivad edasiseks töötluks või raporteerimiseks

Tabel 12: UC05 kirjeldus. Allikas: autori koostatud.

<b>Nimi</b>	<b>UC05. Raporti genereerimine valitud/filtreeritud andmete põhjal</b>
Kontekst	Infosüsteemi kasutajal on vajadus andmeid välja eksportida sobival kujul
Tulemus	Sobival kujul inspeksiooniandmete aruanne on välja eksporditud ja on sobiv edastamiseks kolmandatele osapooltele
Eeltingimus	Raporti genereerimiseks vajalikud andmed on valitud; raporti struktuur ja formaat on kasutaja poolt sätestatud
Aktorid	Tootmisjuht, varahalduse analüütik, tootmisandmete analüütik, hoolduspartner
Põhistsenaarium	1. Kasutaja avab infosüsteemi 2. Kasutaja avab raporteerimise vaate 3. Kasutaja avab raporteerimise vaates raporti modifitseerimise alamvaate 4. Kasutaja seadistab omale sobiva detailsusega andmed (nt asukohapõhine detailsus, defektipõhine detailsus, raskusastmepõhine detailsus, trendipõhine filtreering) 5. Kasutaja saab sooritada põhilisi matemaatilisi tehteid (liitmine, lahutamine, jagamine, korrutamine) andmeveergudega 6. Kasutaja saab muuta raporti visuaalset struktuuri 7. Kasutaja saab muuta eksporditava raporti formaati (.csv, .xlsx, .pdf) 8. Kasutaja saab valida andmete graafilise või risttabeli esituskuju 9. Kasutaja saab seadistatud raporti esitluskuju salvestada tuleviku tarbeks 10. Kasutaja ekspordib raporti ning kasutab seda oma töös

(Jätkub järgmisel lehel)

Tabel 12: UC05 kirjeldus. Allikas: autori koostatud. (Jätk)

<b>Nimi</b>	<b>UC05. Raporti genereerimine valitud/filtreeritud andmete põhjal</b>
Alternatiivne stsenaarium	1. Kasutaja avab infosüsteemi 2. Kasutaja avab raporteerimise vaate 3. Kasutaja avab raporteerimise vaates raporti modifitseerimise alamvaate 4. Kasutaja aktiveerib varem seadistatud raporti kuju 5. Kasutaja ekspordib andmed vastavalt varem loodud raportistruktuurile 6. Kasutaja ekspordib raporti ning kasutab seda oma töös
Järeltingimus	Kasutaja on raporti edukalt ekspordinud ning salvestatud raportikuju on võimalik kasutada uuesti

Tabel 13: UC06 kirjeldus. Allikas: autori koostatud.

<b>Nimi</b>	<b>UC06 Vigastuste progresseerumise analüüsimine</b>
Kontekst	Kasutaja soovib näha vigastuse võimalikku progresseerumist, juhul kui samal tuulikul ja samal labal on varem sooritatud inspeksioone
Tulemus	Ülevaade ja visuaalne esitus tuulikulaba vigastustest
Eeltingimus	Konkreetsel tuulikul samal labal on inspeksiooni läbi viidud vähemalt 2 korda; inspeksioonipildid on andmebaasis struktureeritud ja noteeritud kujul
Aktorid	Tootmisjuht, varahalduse analüütik, tootmisandmete analüütik
Põhistsenaarium	1. Kasutaja avab infosüsteemi 2. Kasutaja avab inspeksioonitulemuste vaate 3. Kasutaja valib sobiva inspeksioonikirje 4. Kasutaja valib teda huvitava tuulepargi, tuuliku ja laba 5. Infosüsteem näitab, kas samal tuulikul on varasemalt sooritatud inspeksioone 6. Kasutaja lisab selle varasema inspeksioonipildi olemasolevasse vaatesse 7. Kasutaja näeb eri labainspeksioonide pilte samale vigastusele ühes vaates 8. Kasutaja saab hinnata vigastuse progresseerumist (kui ta on olemas) 9. Kasutaja saab teha vastavaid märkeid ja täiendusi kommentaarina/täiendusena 10. Kasutaja saab muuta labavigastuse kriitilisust ning seada see hooldustöö prioriteedina ettepoole

(Jätkub järgmisel lehel)

Tabel 13: UC06 kirjeldus. Allikas: autori koostatud. (Jätk)

Nimi	UC06 Vigastuste progresseerumise analüüsimine
Alternatiivne stsenaarium	1. Kasutaja avab infosüsteemi 2. Kasutaja avab inspeksioonitulemuste vaate 3. Süsteem kuvab kõiki töid, kus on ühel või enamal tuulikul tehtud üks või enam inspeksiooni 4. Kasutaja valib teda teda huvitava tuulepargi, tuuliku ja laba 5. Edasi jätkub kõik nagu põhistsenaariumi punktid 6-10
Järeldingimus	Kasutajal on ülevaade labavigastustest, mis on tuvastatud varem kui on toimunud viimane inspeksioon ning on olemas ülevaade nende vigastuste võimalikust arengust

Tabel 14: UC07 kirjeldus. Allikas: autori koostatud.

Nimi	UC07 Masinõppe mudeli treenimine ja täiustamine
Kontekst	Kasutaja soovib täiustada masinõppe algoritme ning täiendada treeningandmestikku, parandada olemasolevate mudelite täpsust ja/või muuta masinõppe otsustusalgoritme
Tulemus	Masinõppe mudelid on kasutaja poolt täiustatud ning on parima võimaliku täpsusega
Eeltingimus	Masinõppe mudelite loogika on seadistatud; treeningandmestik on valideeritud ja noteeritud
Aktorid	Masinõppe arendaja
Põhistsenaarium	1. Kasutaja avab infosüsteemi 2. Kasutaja avab masinõppe mudelite mooduli 3. Kasutaja hindab masinõppe mudelite täpsust 4. Kasutaja saab muuta masinõppe mudelite loogikaid 5. Kasutaja saab visuaalselt hinnata viimaste tulemuste täpsusi (nt veamaatriks jm) 6. Kasutaja saab seadistada uue treeningtsükli parameetreid 7. Kasutaja saab salvestada treenimiseks kasutatud parameetreid 8. Kasutaja alustab (uue) mudeli treenimist
Alternatiivne stsenaarium	1. Kasutaja avab infosüsteemi 2. Kasutaja avab masinõppe mudelite mooduli 3. Kasutaja saab importida välise treeningandmestiku 4. Kasutaja saab seadistada uue treeningtsükli parameetreid 5. Kasutaja saab salvestada treenimiseks kasutatud parameetreid 6. Kasutaja alustab (uue) mudeli treenimist
Järeldingimus	Masinõppe mudel on täiustatud ning treenitud

Tabel 15: UC08 kirjeldus. Allikas: autori koostatud.

<b>Nimi</b>	<b>UC08 Hooldus-töökäsu koostamine</b>
Kontekst	Kasutaja soovib pärast labavigastuste avastamist luua hooldusvajadusel põhineva töökäsu, mis on hoolduspartnerile töö kohta käivaks informatsiooniks
Tulemus	Hooldustöökäsk on formuleeritud, valitud on hooldamist vajav tuulik ja defineeritud labavigastuse ulatus ja kategooria
Eeltingimus	Labavigastus on masinõppe mudeli poolt märgatud, selle ulatus ja kriitilisus selgeks tehtud
Aktorid	Tootmisjuht
Põhistsenaarium	1. Kasutaja avab infosüsteemi 2. Kasutaja avab inspeksioonitulemuste vaate 3. Kasutaja filtreerib välja labavigastuse suuruse (cm) põhjal inspeksioonitulemused 4. Kasutaja analüüsib vigastusi ning hindab hoolduse vajadust 5. Kasutaja valib vigastuse ning vajutab "New Work Order Based on Finding" 6. Kasutaja määrab töökäsu nimetuse 7. Kasutaja määrab töö teostaja 8. Kasutaja määrab töö teostamise perioodi 9. Kasutaja lisab vajalikud kommentaarid 10. Kasutaja salvestab töökäsu
Alternatiivne stsenaarium	1. Tuulikulabade infosüsteem genereerib töökäsu vastavalt eelseadistatud parameetritele (nt vigastus üle 10 cm, kriitilisus 5) 2. Tuulikulabade infosüsteem kuvab loodud töökäsu peavaates 3. Kasutaja valideerib töökäsu 4. Kasutaja salvestab või tühistab töökäsu
Järeltingimus	Hooldustöökäsk on koostatud

Tabel 16: UC09 kirjeldus. Allikas: autori koostatud.

<b>Nimi</b>	<b>UC09. Hooldus-töökäsu edastamine</b>
Kontekst	Pärast töökäsu koostamist edastab tuulikulabade infosüsteem hooldustöökäsu töökäskude infosüsteemi, kust hoolduspersonal saab selle kätte
Tulemus	Töökäskude infosüsteemis on jõudnud informatsioon uue töökäsu kohta, mis sai loodud tootmisjuhi poolt
Eeltingimus	Labavigastus(ed) on tuvastatud ja analüüsitud ning hooldustöökäsk on koostatud

(Jätkub järgmisel lehel)

Tabel 16: UC09 kirjeldus. Allikas: autori koostatud. (Jätk)

Nimi	UC09. Hooldus-töökäsu edastamine
Aktorid	Tootmisjuht, töökäskude infosüsteem
Põhistsenaarium	1. Tuulikulabade infosüsteem uuendab kord tunnis töökäskude vaadet 2. Tuulikulabade infosüsteem edastab uute töökäskude tekkimisel informatsiooni töökäskude infosüsteemi 3. Töökäskude infosüsteem saab informatsiooni hooldustöö kohta kätte.
Alternatiivne stsenaarium	1. Tuulikulabade infosüsteem genereerib töökäsu vastavalt masinõppe mudelile 2. Informatsioon loodud töökäsu kohta edastatakse töökäskude infosüsteemi
Järeldingimus	Hooldustöökäsk on edastatud töökäskude infosüsteemi

### 5.3.3 Tuulikulabade infosüsteemi funktsionaalsed nõuded

Tabelis 17 on esitatud tuulikulabade infosüsteemi funktsionaalsed nõuded vastavalt MoSCoW meetodi esimesele kolmele tähele (ing k. *MUST*, *SHOULD*, *COULD*). Autor läheneb funktsionaalsetele nõuetele lähtuvalt infosüsteemi eri moodulitest.

Tabel 17: Tuulikulabade infosüsteemi funktsionaalsed nõuded. Allikas: autori koostatud.

ID	Moodul	Sisu	Prioriteet
<b>FNR1</b>	Analüütika	Labavigastuste andmete pärimine järgmiste filtreerimisvõimalustega: 1) inspeksioonikuupäeva kaupa 2) riigi ehk asukoha kaupa 3) tuuliku tootmistehnoloogia kaupa 4) tuulepargi kaupa 5) tuuliku kaupa 6) vigastuse kategooria kaupa 7) laba külje kaupa 8) vigastuse kommentaari kaupa 9) vigastuse dimensiooni kaupa (pikkus, laius, kõrgus) 10) töökäsu numbri kaupa 11) hooldusmeeskonna kaupa 12) inspeksioonidrooni kaupa	MUST
<b>FNR2</b>	Raportid	Labavigastuste raporti genereerimine FNR1 kirjeldatud filtreeringutega	MUST

(Jätkub järgmisel lehel)

Tabel 17: Tuulikulabade infosüsteemi funktsionaalsed nõuded. Allikas: autori koostatud. (Jätk)

ID	Moodul	Sisu	Prioriteet
<b>FNR3</b>	Raportid	Masinõppe mudeli poolt tuvastatud anomaaliade ülevaate kuvamine ja nende põhjal raporti genereerimine	SHOULD
<b>FNR4</b>	Analüütika	Tuuliku detailses vaates tuulikuvigastuse progresseerumise kuvamine	MUST
<b>FNR5</b>	Analüütika	Labavigastuste masinõppe genereeritud eelnotatsioonide kuvamine ja notatsiooni valideerimise muutmise võimalus	MUST
<b>FNR6</b>	Analüütika	Labavigastuste masinõppe genereeritud eelnotatsioonide salvestamise võimalus	MUST
<b>FNR7</b>	Armatuurlaud	Inspektsioonikampaania ülevaate, staatuse, planeeritud lõppkuupäeva, inspekteeritavate tuulikute ja nende tuulikute tehnoloogiate kuvamine	MUST
<b>FNR8</b>	Armatuurlaud	Inspektsioonikampaania detailide avamine - kuvatakse detailvaade inspekteeritavatest tuulikute ning FNR4 kirjeldatud parameetrite detailvaade	SHOULD
<b>FNR9</b>	Raportid	Inspektsioonikampaania ülevaate detailide põhjal raporti genereerimine	SHOULD
<b>FNR10</b>	Armatuurlaud	Valitud labavigastuste andmete põhjal graafikute kuvamise võimalus (nt avastatud vigastused tuulikulaba külje, tuulepargi kohta)	SHOULD
<b>FNR11</b>	Armatuurlaud	Otsinguvälja kasutamine on võimalik sell-eks et otsida huvipakkuvat tuuleparki, tuulikut, tuulikulaba koodi, inspektsioonikampaania koodi	SHOULD

(Jätkub järgmisel lehel)

Tabel 17: Tuulikulabade infosüsteemi funktsionaalsed nõuded. Allikas: autori koostatud. (Jätk)

ID	Moodul	Sisu	Prioriteet
<b>FNR12</b>	Armatuurlaud	Sobiva inspeksioonivigastuse kirje avamisel kuvatakse vigastus tuulikulaba lõikes (kuvatakse tuulikulaba dimensioonid ning osutatakse vigastuse asukohale võrreldes kogu tuulikulaba dimensiooniga)	MUST
<b>FNR13</b>	Armatuurlaud	Kuvatakse, mitu tuulikut inspekteeritakse märgitud inspeksioonikampaania lõikes	SHOULD
<b>FNR14</b>	Armatuurlaud	Kuvatakse, kas lisaks labainspeksioonile teostatakse ka muid hooldusliike lisaks labainspeksioonidele (nt piksekaitse kontroll vm)	COULD
<b>FNR15</b>	Kaardivaade	Tuuleparkide ja tuulikute kuvamine geograafiliselt	MUST
<b>FNR16</b>	Kaardivaade	Tuulekiiruse, tuulesuuna, õhuniiskuse, sademete olemasolu kuvamine valitud labainspeksiooni asukohas	SHOULD
<b>FNR17</b>	Kaardivaade	Valides inspeksioonikampaania näitab kaart, milliseid tuulikuid terveist tuulepargist on inspekteeritud või planeeritakse inspekteerida (roheline = tuulik on juba inspeksioonikampaania raames inspekteeritud; oranž = tuulik ootab planeeritud labainspeksiooni; hall = tuulikule pole määratud labainspeksiooni)	SHOULD
<b>FNR18</b>	Hoolduse planeerimine	Kuvatakse kõige kõrgema vigastusekategoriaga tuulikulabad	MUST
<b>FNR19</b>	Hoolduse planeerimine	Infosüsteem arvutab hoolduse pikkust vastavalt rikke kategoriale, rikke dimensioonidele ning hooldusmeeskonna saadavusele	MUST

(Jätkub järgmisel lehel)

Tabel 17: Tuulikulabade infosüsteemi funktsionaalsed nõuded. Allikas: autori koostatud. (Jätk)

ID	Moodul	Sisu	Prioriteet
<b>FNR20</b>	Hoolduse planeerimine	Infosüsteem arvutab hoolduse maksumust vastavalt etteantud NPS hinnale, etteantud hooldusmeeskonna püsikuludele ning FNR19 tingimuses arvatud hoolduse pikkusele	SHOULD
<b>FNR21</b>	Hoolduse planeerimine	Infosüsteem hindab olemasolevate labainspektsioonide andmeid ning prognoosib, millistes tuulikulabades arenevad vigastused kõige tõenäolisemalt	MUST
<b>FNR22</b>	Tingimused	Kasutaja on võimeline seadistama labainspektsioonide piltide eelnotatsiooni algoritmi täpsust	MUST
<b>FNR23</b>	Tingimused	Kasutaja on võimeline seadistama labainspektsioonide vigastuste progresseerumise tuvastamise algoritmi	MUST
<b>FNR24</b>	Tingimused	Kasutaja on võimeline seadistama FNR19-s välja toodud parameetreid ning lisama uusi parameetreid, mida võetaks arvutuses arvesse	SHOULD
<b>FNR25</b>	Tingimused	Infosüsteemi võib seadistada saatma välisele partnerile või EG töötajale elektroonilist kirja, kui masinõppe algoritm on tuvastanud teatud kategooriaga labavigastuse	MUST
<b>FNR26</b>	Tingimused	Infosüsteemi vaateid saab seadistada vastavalt kasutaja vajadusele	COULD
<b>FNR27</b>	Liidestused	Infosüsteem on võimeline andmeid edastama kolmandatele osapooltele ning teistele varahalduse infosüsteemidele	MUST

### 5.3.4 Tuulikulabade infosüsteemi mittefunktsionaalsed nõuded

Tabelis 18 on esitatud tuulikulabade infosüsteemi mittefunktsionaalseid nõudeid lähtuvalt FURPS+ nõuete klassifitseerimise mudelile [70]:



Tabel 18: Tuulikulabade infosüsteemi mittefunktsionaalsed nõuded. Allikas: autori koostatud.

FURPS+	Mittefunktsionaalne nõue
Functionality (Funktsionaalsus)	<p><b>NFR1.</b> Infosüsteem on võimeline inspeksioonipilte analüüsima</p> <p><b>NFR2.</b> Infosüsteem on võimeline tegema inspeksioonipiltide põhjal hooldusvajaduse ennustusi</p> <p><b>NFR3.</b> Infosüsteem on võimeline prognoosima kõige tõenäolisemalt arenevat labavigastust</p> <p><b>NFR4.</b> Infosüsteem toetab eri formaadis inspeksioonipilte</p> <p><b>NFR5.</b> Infosüsteemis on võimekus muuta masinõppe algoritmi tingimusi</p> <p><b>NFR6.</b> Infosüsteem teeb korrektseid automaatseid notatsioone labainspeksiooni piltidele kasutades selleks eelnooteeritud treeningandmestikku</p> <p><b>NFR7.</b> Infosüsteemi kasutamine on arusaadav olenemata kasutaja töörollist (analüütik, insener, hooldustehnik, juhatuse liige vm)</p>
Usability (Kasutatavus)	<p><b>NFR8.</b> Infosüsteemi kasutamine ei vaja detailset koolitust ning on kasutajale intuiitiivne</p> <p><b>NFR9.</b> Infosüsteemi vaateid ning suurst saab muuta arvestades inimeste eelistusi ning silmanägemist</p> <p><b>NFR10.</b> Infosüsteemi kohta on olemas ajakohane dokumentatsioon koos kirjeldatud võimekustega</p> <p><b>NFR11.</b> Infosüsteem on esteetiliselt meeldiv kasutamiseks</p>
Reliability (Töökindlus)	<p><b>NFR12.</b> Infosüsteemi töökindlus kuus peab olema 99%</p> <p><b>NFR13.</b> Infosüsteem toetab mitmefaktorilist autentimist</p> <p><b>NFR14.</b> Infosüsteem vastab Eesti Energias sätestatud IT-riskide maandamise reeglitele</p> <p><b>NFR15.</b> Infosüsteemi andmed peavad olema teatud ajavälba tagant varundatud toorkujul alternatiivsesse andmebaasi selleks et vältida andmekadusid</p>
Performance (Jõudlus)	<p><b>NFR16.</b> Infosüsteem on võimeline analüüsima, treenima ning kasutama muudes operatsioonides labainspeksioonide pilte/metaandmeid nii, et see ei mõjuta süsteemi üldist tööd ning jõudlust</p> <p><b>NFR17.</b> Infosüsteemi saavad korraka kasutada 40 inimest ilma et see mõjutaks üldist jõudlust</p> <p><b>NFR18.</b> Analüütika, hoolduse planeerimise jt moodulid avanevad maksimaalselt 3. sekundiga</p> <p><b>NFR19.</b> Hooldusvajaduse töökäsu edastus töökäskude infosüsteemi peab toimuma 15. minuti jooksul pärast selle loomist tuulikulabade infosüsteemis</p>

(Jätkub järgmisel lehel)

Tabel 18: Tuulikulabade infosüsteemi mittefunktsionaalsed nõuded. Allikas: autori koostatud.  
(Jätk)

FURPS+	Mittefunktsionaalne nõue
Supportability (Toetatavus)	<b>NFR20.</b> Infosüsteemi on lihtne ja kiire lisada uusi tootmisüksuseid üle kogu Enefit Greeni koduturgude (eelkõige uued tuulepargid) <b>NFR21.</b> Infosüsteemi ei ole keeruline lisada uusi masinõppe treeningalgoritme ning täiustada/täiendada varasemaid <b>NFR22.</b> Infosüsteemis kasutatav keel on inglise keel
+ Design constraints (Disaini piirangud)	<b>NFR23.</b> Inspektsiooniandmete hoiustamiseks on kasutatud relatsioonilist andmebaasi (PostgreSQL või MySQL)
+ Implementation constraints (Implementatsiooni piirangud)	<b>NFR24.</b> Infosüsteemi arendamiseks on kasutatud Pythonit ning masinõppe teegiks kasutatakse Apache MXNeti, mille põhiline eelis on süvaõppe skaleeritavusel [71]. Koodi haldamiseks kasutatakse GitKraken [72] keskkonda.
+ Interface constraints (Liidestuste piirangud)	<b>NFR25.</b> Infosüsteem kasutab andmete edastamiseks SOAP protokoll [73] ning XML andmeformaati
+ Physical constraints (Füüsilised piirangud)	<b>NFR26.</b> Füüsilised piirangud infosüsteemil puuduvad. Infosüsteem kasutab pilveteenuseid andmete hoiustamisel.

## 5.4 IT-arhitektuur

Vastavalt Gartneri definitsioonile on *"IT-arhitektuur põhimõtete, juhiste või reeglite jada, mida ettevõtte kasutab IT-ressursside hankimise, ehitamise, muutmise ja liidestamise protsessi juhtimiseks kogu ettevõttes. Need ressursid võivad hõlmata seadmeid, tarkvara, sidet, arendusmetoodikat, modelleerimisvahendeid ja organisatsioonilisi struktuure."* [74]

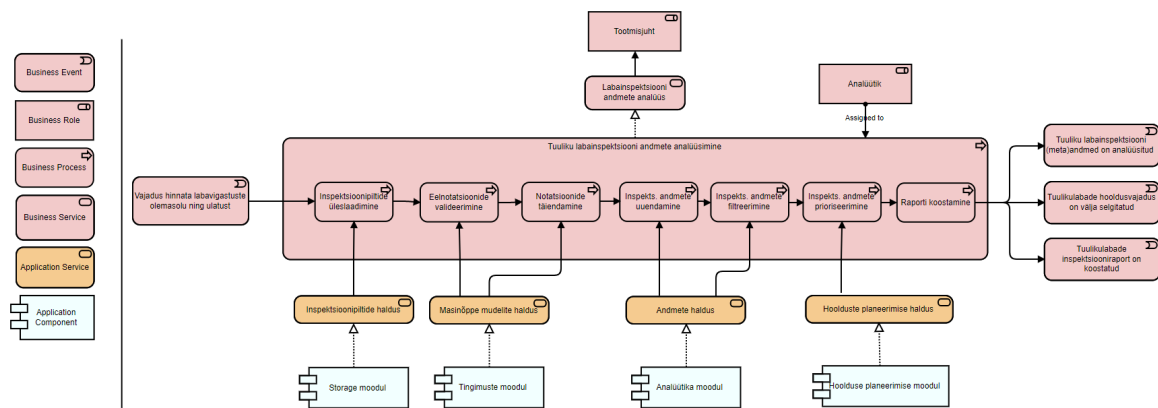
IT-arhitektuuri saab lisaks defineerida järgmiste põhifunktsionaalsustega [75]:

1. see näitab põhialuseid selle kohta, kuidas on tarnitavad/kavandatavad lahendused konstrueeritud nii, et need integreeruksid olemasolevate süsteemidega ja vastaksid konkreetsetele nõuetele;
2. see on kavandatava või olemasoleva rakenduse IT-komponentide kõrgetasemeline mudel, mis hõlmab tarkvara ja riistvara;
3. see on integreeritud tarkvaraarenduse metoodikatesse, et mõista ja kujundada IT-tarkvara ja riistvara spetsifikatsioone ning mudeleid kooskõlas standardite ja spetsifikatsioonidega;

4. see on parimate tavade kogum, mis julgustab avatud lähtekoodiga tehnoloogiastandardite, ülemaailmse tehnoloogia koostalitlusvõime ja olemasolevate IT-platvormide (integratsioonid, andmevahetus jne) kasutamist;
5. see pakub sidusat ja universaalset viisi lahenduse IT-võimaluste kavandamise ja tarnimise näitamiseks ning arutamiseks.

### 5.4.1 Kavandatava infosüsteemi kihiline mudel

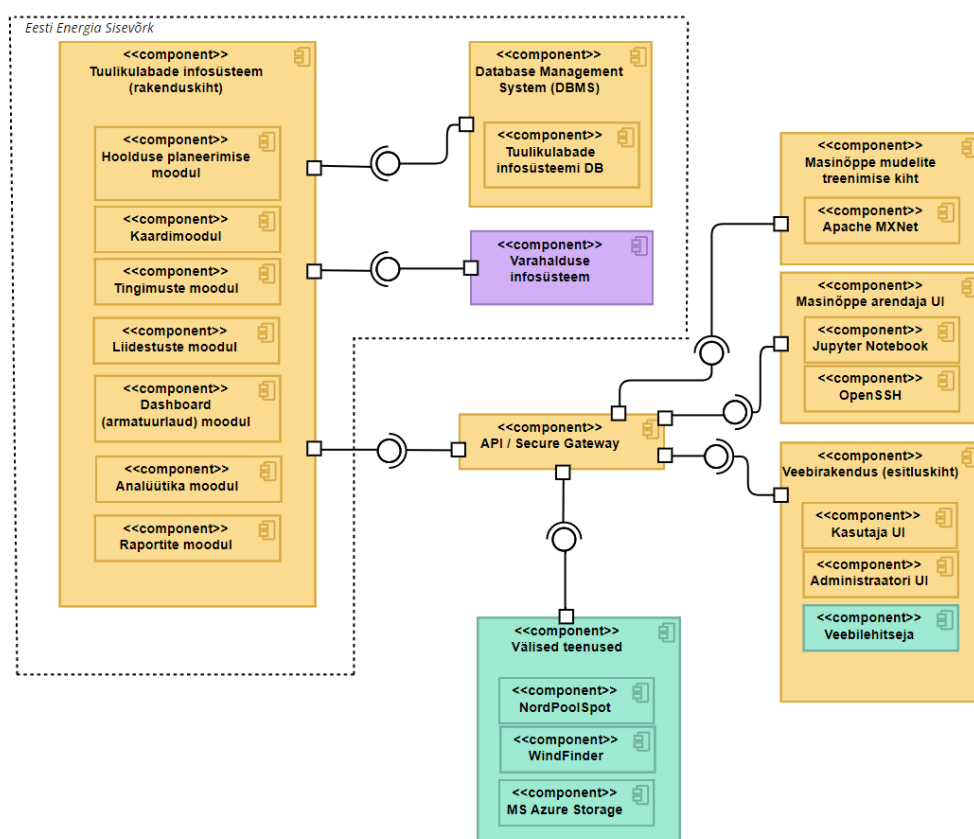
Joonisel 23 on esitatud labainspektiooni andmete analüüsi protsessi kihilist mudelit ehk sidestatust komponentidega.



Joonis 23: Tuuliku labainspektiooni andmete analüüsiprotsessi kihiline mudel. Allikas: autori koostatud.

### 5.4.2 Komponentmudel

Joonisel 24 on esitatud kavandatava infosüsteemi komponentdiagramm. Infosüsteem suhtleb väljaspool sisevõrku olevaid komponente läbi API ning pärib omale funktsionaalsuste realiseerimiseks vajalikud andmed. Oranži värviga on näidatud loodavad moodulid, lilla värviga olemasolevad moodulid ning rohelisega välised moodulid. Tabelis 5.4.2 esitatud joonisel 24 näidatud komponentide kirjeldused.



Joonis 24: Kavandatava tuulikulabade infosüsteemi komponentmudel. Legend: oranž - loodavad moodulid, lilla - olemasolevad moodulid, roheline - välised moodulid. Allikas: autori koostatud [76] põhjal.

Tabel 19: Joonisel 24 kasutatud komponentide kirjeldused. Allikas: autori koostatud.

Komponent (Moodul)	Komponendi (mooduli) kirjeldus
Hoolduse planeerimise moodul	Moodul, kus toimub tuuliku labade hoolduse maksumuse, kestvuse planeerimine, töökäsu koostamine jm
Kaardimoodul	Moodul, kus kuvatakse kaardivaates Enefit Greeni tuuleparke ning selles olevaid tuulikuid ja tuulikutes läbiviidavaid labadega seotuid hooldus - või inspeksioonitöid
Tingimuste moodul	Moodul, kus toimub erinevate arvutustega, infoedastuse ning masinõppega seotud tingimuste muutmine
Liidestuste moodul	Moodul, mis vastutab andmevahetuse eest teiste infosüsteemide ning andmebaasidega

(Jätkub järgmisel lehel)

Tabel 19: Joonisel 24 kasutatud komponentide kirjeldused. Allikas: autori koostatud. (Jätk)

<b>Komponent (Moodul)</b>	<b>Komponendi (mooduli) kirjeldus</b>
Dashboard (armatuurlaua) moodul	Moodul, kus toimub labainspeksioonidega seotud andmete ülevaatlik kuvamine
Analüütika moodul	Moodul, kus toimub labavigastustega seotud andmete haldamine ning vajadusel raportite genereerimine
Raportite moodul	Moodul, kus toimub ülevaatlike raportite genereerimine vastavalt kasutaja poolt etteantud tingimustele
Database Management System	Andmebaasihaldussüsteem, mis suhtleb rakenduskihiga ning pärib ja edastab vajalikud andmed
Varahalduse infosüsteem	Infosüsteem, kus asuvad Enefit Greeni tootmisvaradega seotud hooldustööde töökäsud
API / Secure Gateway	Turbelahendus, mis pakub turvalist ja kontrollitud juurdepääsu eri komponentidele
NordPoolSpot	Moodul, mis pärib andmed NordPoolSpot.com-st olevaid keskmiseid tunnipõhiseid elektri hindu riigiti
WindFinder	Moodul, mis pärib andmed Windfinder.com-st olevaid keskmiseid tunnipõhiseid tuulekiiruseid, tuulesuundasid, õhuniiskusi jm riigiti
MS Azure Storage	Microsofti hallatav pilvesalvestuslahendus tänapäevaste andmesalvestusstsenaariumide jaoks. Azure Storage pakub kättesaadavat, suurel määral skaleeritavat, vastupidavat ja turvalist salvestusruumi mitmesugustele pilves leiduvatele andmeobjektidele.
Apache MXNet	Moodul, kus on avatud lähtekoodiga süvaõppe tarkvararaamistik, mida Enefit Greeni masinõppe arendaja kasutab närvivõrkude treenimiseks ning ja kasutuselevõtmiseks
Jupyter Notebook	Avatud lähtekoodiga tarkvara interaktiivseks programmeerimiseks mitmes programmeerimiskeeles
OpenSSH	SSH-protokollil põhinevate võrguprotokollide komplekt, millega luuakse klient-server arhitektuuri kasutavas võrgus turvalisi kanaleid üle turvamata võrgu.
Kasutaja UI	Moodul, mis võimaldab kasutajal oma töös rakendada tuulikula-bade infosüsteemi funktsionaalsusi
Administraator UI	Moodul, mis võimaldab admin-õigustega kasutajal muuta erinevaid sätteid infosüsteemi parameetrites

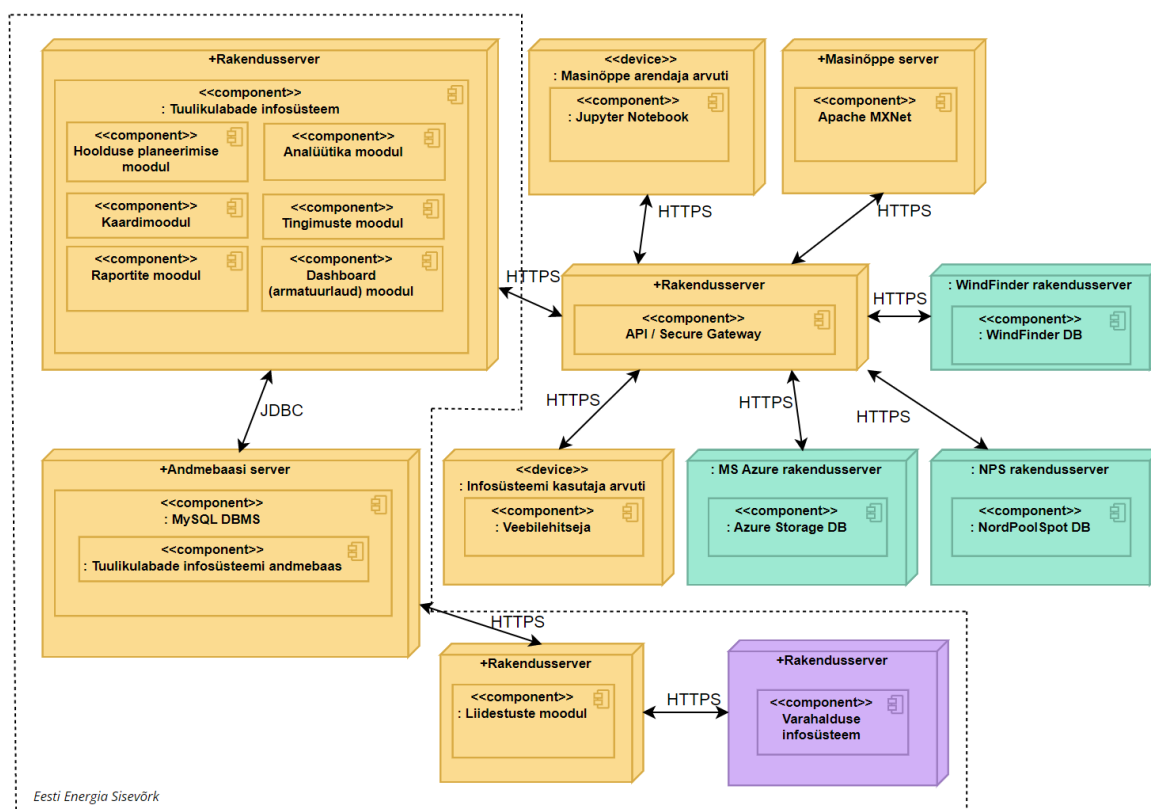
(Jätkub järgmisel lehel)

Tabel 19: Joonisel 24 kasutatud komponentide kirjeldused. Allikas: autori koostatud. (Jätk)

Komponent (Moodul)	Komponendi (mooduli) kirjeldus
Veebilehitseja	Tarkvara, mille abil saab lokaalses arvutis vaadata Internetis (või ka kohtvõrgus) paiknevatel veebilehtedel olevat teksti, pilte, videot, heli- ja teisi faile ning muud informatsiooni

### 5.4.3 Evičiusdiagramm

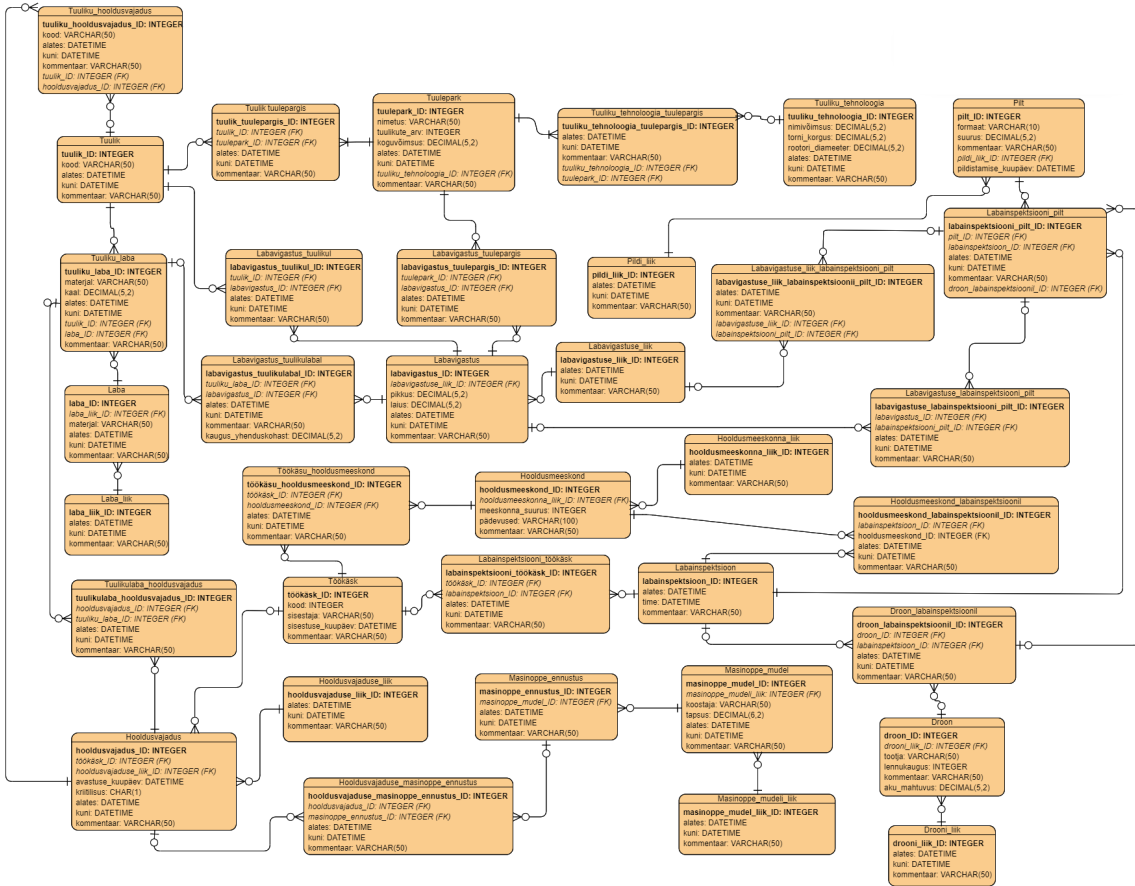
Joonisel 25 on näidatud tuulikulabade infosüsteemi evičiusdiagramm. Sarnaselt komponentdiagrammiga on oranži värviga näidatud loodavad moodulid, lilla värviga olemasolevad moodulid ning rohelisega välised moodulid.



Joonis 25: Tuulikulabade infosüsteemi evičiusdiagramm. Allikas: autori koostatud [76] põhjal.

## 5.4.4 Relatsiooniline andmemudel

Joonisel 26 on näidatud tuulikulabade infosüsteemi relatsiooniline andmemudel.

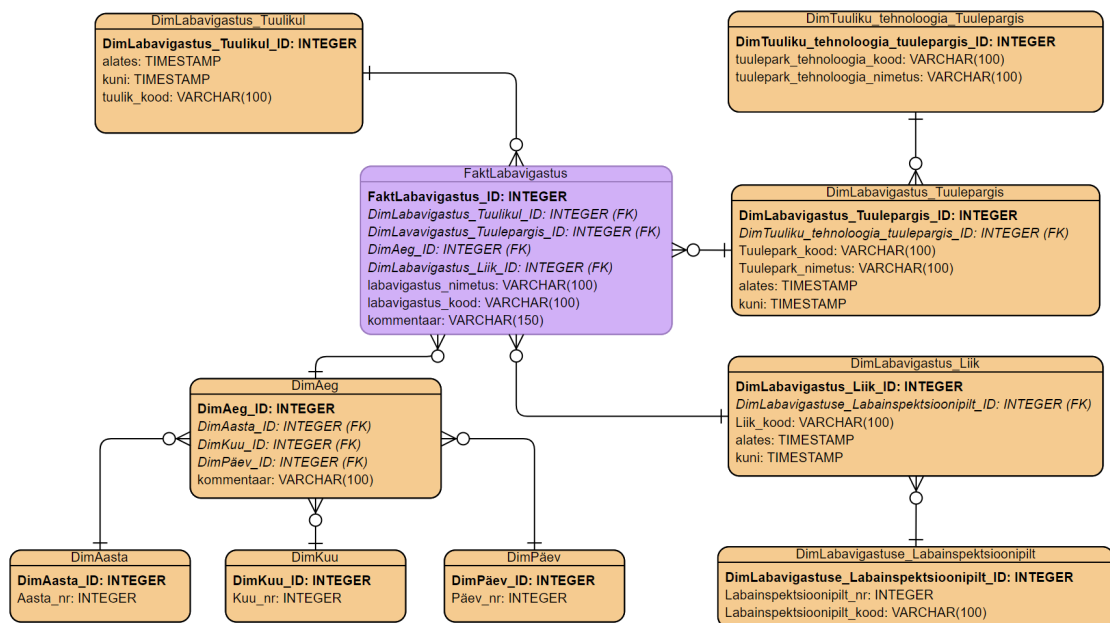


Joonis 26: Tuulikulabade infosüsteemi relatsiooniline andmemudel. Allikas: autori koostatud.

## 5.4.5 Dimensionaalne andmemudel

Joonisel 27 on näidatud tuulikulabade infosüsteemi dimensionaalset andmemudelit, mis võimaldab kuvada labavigastusi:

- aja dimensiooni (aasta, kuu, päev) lõikes;
- labavigastuse liigi dimensiooni lõikes;
- labavigastuse tuulepargi dimensiooni lõikes;
- labavigastuse tuulepargi tehnoloogia dimensiooni lõikes;
- labavigastuse tuuliku dimensiooni lõikes.



Joonis 27: Tuulikulabade infosüsteemi dimensionaalne andmemudel. Allikas: autori koostatud.



## 6. Lahenduse elluviimine

Antud peatükis esitab autor kavandatud infosüsteemi realiseerimise ajaplaani koos sellele järgneva riskianalüüsiga.

### 6.1 Ajaplaan

Tabelis 20 on esitatud projekti elluviimise ajakava. Joonisel 28 on näidatud projekti elluviimise Gantt graafikut koos kriitilise ahela ja puhvritega. Ajaplaanis ning Gantti graafikus on arvestatud tööpäevade arvu, mitte kalendripäevade arvu (ehk ühe nädala puhul on arvestatud viie tööpäevaga).

Tabel 20: Lahenduse realiseerimise ajaplaan. Allikas: autori koostatud.

ID	Ülesande kirjeldus	Vastutaja	Algus	Lõpp	Tööpäevad
1	Arendusvajaduse kinnitamine Enefit Green'i juhatuses koos projekti skoobi, vajaduse tutvustuse ja tasuvusarvutusega	Projektijuht	05/06/2023	06/06/2023	2
2	IT-ressurssi planeerimine projekti realiseerimiseks	Projektijuht	07/06/2023	21/06/2023	11
3	Projektdokumentatsiooni koostamine koos vajalike väljundite ja tähtaegadega	Projektijuht	22/06/2023	25/07/2023	24
4	IT-arendusprojekti koostamine koos detailse lähteülesande, kasutuslugude ning funktsionaalsustega	IT-juht	26/07/2023	15/08/2023	15
5	Tuulikulabade infosüsteemi arendamine	IT-arendaja	16/08/2023	15/01/2023	109

(Jätkub järgmisel lehel)

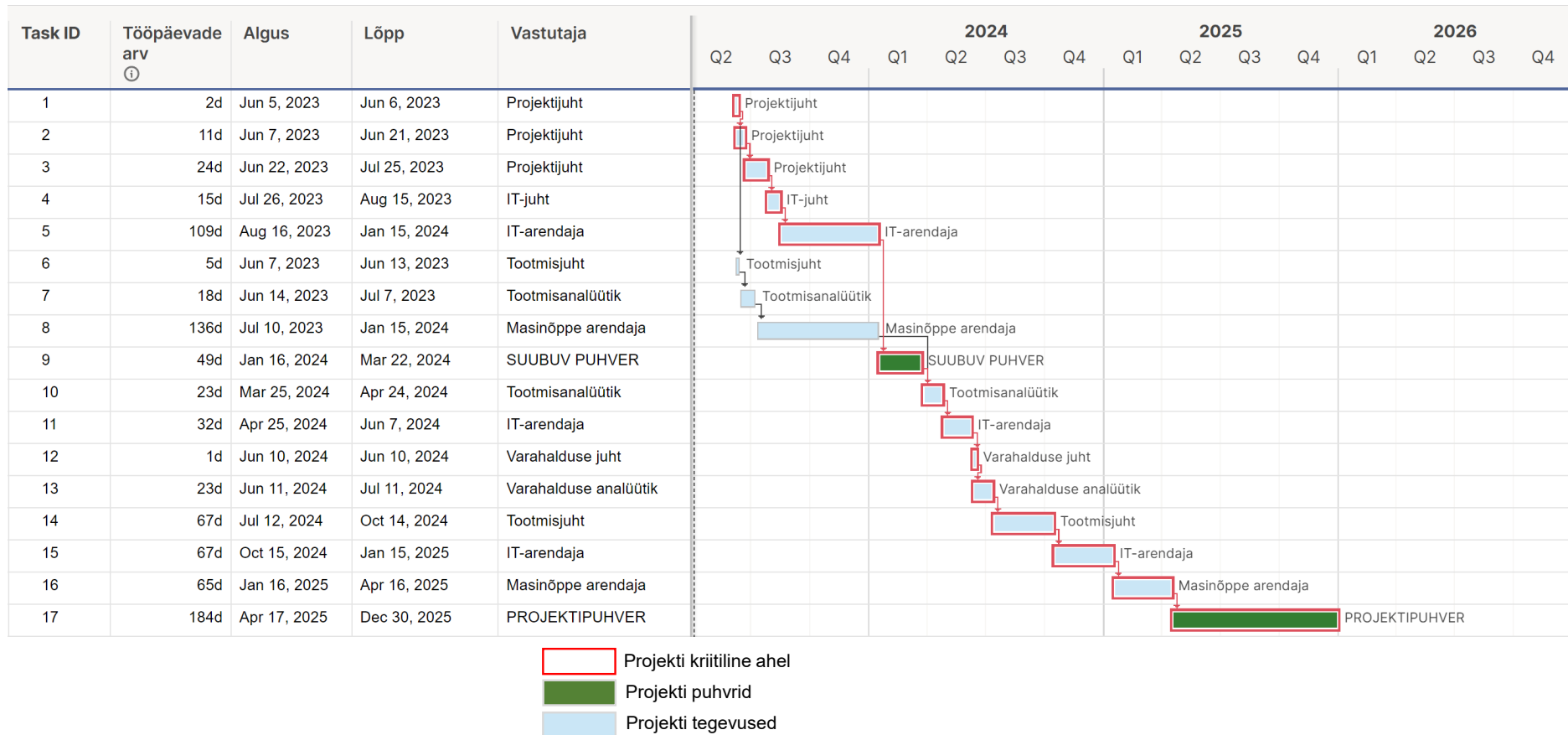
Tabel 20: Lahenduse realiseerimise ajaplaan. Allikas: autori koostatud. (Jätk)

ID	Ülesande kirjeldus	Vastutaja	Algus	Lõpp	Tööpäevad
6	Inspektsioonidroonide soetamine ning test-inspektsioonide teostamine tuuleparkides (andmete kogumine)	Tootmisjuht	07/06/2023	13/06/2023	5
7	Inspektsioonipiltide manuaalne notatsioon treeningandmestiku jaoks	Tootmisanalüütik	14/06/2023	07/07/2023	18
8	Masinõppe mudeli koostamine ja valideerimine ennetavaks labavigastuste tuvastuseks	Masinõppearendaja	10/07/2023	15/01/2024	136
9	Puhver	Projektijuht	16/01/2024	22/03/2024	49
10	Tuulikulabade infosüsteemi testimine	Tootmisanalüütik	25/03/2024	24/04/2024	23
11	Testimise tagasiside põhjal lisafunktsionaalsuste/täienduste realiseerimine	Projektijuht	25/04/2024	07/06/2024	32
12	Uue lahenduse live võtmine ning kasutuselevõtmisest kommuniqueerimine	Varahaldusejuht	10/06/2024	10/06/2024	1
13	Hoolduspersonali ja teiste kasutajate koolitamine infosüsteemi kasutamiseks	Varahalduseanalüütik	11/06/2024	11/07/2024	23
14	Test-periood hoolduspersonaliga	Tootmisjuht	12/07/2024	14/10/2024	67
15	Kasutajate tagasiside põhjal täienduste realiseerimine / bug'ide likvideerimine	IT-arendaja	15/10/2024	15/01/2025	67
16	Masinõppe treeningmudeli täiendamine uute inspektsiooniandmetega	Masinõppearendaja	16/01/2025	16/04/2025	65

(Jätkub järgmisel lehel)

Tabel 20: Lahenduse realiseerimise ajaplaan. Allikas: autori koostatud. (Jätk)

ID	Ülesande kirjeldus	Vastutaja	Algus	Lõpp	Tööpäevad
17	Projekti puhver	Projektijuht	17/04/2024	30/12/2025	184



Joonis 28: Tuulikulabade infosüsteemi realiseerimise Gantt diagrammiga koos kriitilise ahelaga. Allikas: autori koostatud.

## 6.2 Riskianalüüs

Tabelis 21 on esitatud magistritöös käsitletud ja kavandatud infosüsteemi elluviimisega seotud riskid, nende kirjeldused, mõju ulatus, juhtumise tõenäosus ning ennetamise meetmed, kuidas riske maandada.

Tabel 21: Lahenduse realiseerimisega seotud riskid ning nende maandamise ettepanekud.  
Allikas: autori koostatud.

ID	Risk ja selle kirjeldus	Tõenäosus (madal, keskmine, kõrge)	Mõju (madal, keskmine, kõrge)	Ennetamise meetmed
1	Ebarealistlikud ootused tarkvarale (tarkvara ei tee seda, mis kavandatud; ei kiirenda protsessi; lisab ärile kulusid)	madal	kõrge	1) Defineerida tarkvara implementeerimise plaan 2) Defineerida kriitilised etapid, mida tarkvara peab teatud kuupäevaks olema võimeline tegema 3) Parandada kommunikatsiooni IT ja äri vahel (regulaarsed kohtumised)
2	Ebapiisav ressurss arendamiseks ja testimiseks	keskmine	kõrge	1) Uute arendajate värbamine (EE seest või tööturult) 2) Vähemprioriteetsetelt projektidelt värbajate rakendamine

(Jätkub järgmisel lehel)

Tabel 21: Lahenduse realiseerimisega seotud riskid ning nende maandamise ettepanekud.  
Allikas: autori koostatud. (Jätk)

ID	Risk ja selle kirjeldus	Tõenäosus (madal, keskmine, kõrge)	Mõju (madal, keskmine, kõrge)	Ennetamise meetmed
3	Kehv muutuste juhtimine	keskmine	keskmine	1) Uue tarkvara kohta info regulaarne jagamine (nt mida on eelmisel nädalal tehtud saanud, mida on plaanis teha järgmisele nädalal) 2) Koolituste läbiviimine 3) Hoolduspartnerite infoväljas hoidmine 4) Juhatuse kaasamine sõnumi edastamise kvaliteedi parandamiseks
4	Ebaefektiivne andmete migreerimine uude süsteemi/andmebaasi	keskmine	kõrge	1) Andmete terviklikkuse verifitseerimine arendusfaasi vältel 2) Andmete turvalisuse tagamine arendusfaasi vältel 3) Kaardistada olemasolevad andmete migreerimise poliitika ja parimad tavad EE siseselt 4) Kirjeldada andmete migreerimise plaan teistest süsteemidest tuulikulabade infosüsteemi

(Jätkub järgmisel lehel)

Tabel 21: Lahenduse realiseerimisega seotud riskid ning nende maandamise ettepanekud.  
Allikas: autori koostatud. (Jätk)

ID	Risk ja selle kirjeldus	Tõenäosus (madal, keskmine, kõrge)	Mõju (madal, keskmine, kõrge)	Ennetamise meetmed
5	Koolitamise kvaliteet ei ole piisav uue infosüsteemi efektiivseks kasutamiseks	kõrge	keskmine	1) Koolitusplaani koostamine 2) Digitaalsete koolituste läbiviimine koos järelkuulamise võimalusega 3) Tehnilise dokumentatsiooni koostamine koos põhiliste funktsionaalsuste kirjeldamisega
6	Masinõppe mudelite ebapiisav täpsus labavigastuste ennustamiseks ning tuvastamiseks	kõrge	kõrge	1) Andmeteaduse meeskonna suurendamine 2) Andmeteadlaste regulaarne koolitamine ning teemakohastel konverentsidel osalemine 3) Regulaarsed <i>hackathonid</i> probleemilahendamise oskuste ning " <i>out-of-the-box</i> " mõtlemise arendamiseks
7	Treeningandmete puudus uue masinõppe mudeli täpsuse suurendamiseks	madal	kõrge	1) Koostöö partneritega samast valdkonnast 2) Avalike andmebaaside kasutamine (nn. " <i>knowledge transfer</i> ") 3) Treeningandmete sisseostmine 4) Treeningandmete kogumine teistest EG tuuleparkidest

(Jätkub järgmisel lehel)

Tabel 21: Lahenduse realiseerimisega seotud riskid ning nende maandamise ettepanekud.  
Allikas: autori koostatud. (Jätk)

ID	Risk ja selle kirjeldus	Tõenäosus (madal, keskmine, kõrge)	Mõju (madal, keskmine, kõrge)	Ennetamise meetmed
8	Arendusprojekti edasilükkumine kaugemale kui planeeritud	keskmine	kõrge	1) Töötajate puhkuste sobiv planeerimine (selleks et oleks võimalik vajadusel asendada ning arendusprindis ei katkeks) 2) Uute projektipõhiste arendajate värbamine
9	Soetatud inspeksioonidronid ei vastootustele	madal	kõrge	1) Olemasolevate lahenduste (dronide) kaardistamine 2) Testlendude tegemine erinevate dronidega



## 7. Kokkuvõte

Antud magistritöö eesmärgiks oli sooritada tuulikulabade inspeksiooni infosüsteemi analüüs ja kavandamine, mis hõlmas endas probleemiga seotud kirjanduse analüüsimist, funktsionaalsete ning mittefunktsionaalsete nõuete kirjeldamist ning süsteemiarhitektuuri modelleerimist. Selleks, et püstitatud eesmärgid saavutada sooritas autor allpool loetletud tegevused äri - ja süsteemianalüüsi vallas:

1. sõnastati ettevõtte ärieesmärgid ning strateegia;
2. sõnastati äriprobleem ning hinnati selle äriprobleemi finantsmõju ettevõtte tulemustele;
3. kirjeldati olemasolevat tuulikulabade inspeksiooniandmete analüüsi protsessi ning osutati protsessi puudustele;
4. kirjeldati infosüsteemi peamised funktsionaalsed ning mittefunktsionaalsed nõuded ja prioriseeriti need;
5. pakuti välja uus tuulikulabade inspeksiooniandmete analüüsi protsess;
6. loodi ja kirjeldati IT-strateegiast lähtuvalt tuulikulabade inspeksiooniandmete analüüsi väärtusvoog;
7. koostati uuele tuulikulabade inspeksiooni infosüsteemile ülemineku plaan ning kaardistati IT ning äririskid, mis on lahendusele üleminekuga seotud;
8. loodi kasutusmallid kirjeldamiseks funktsionaalseid nõudeid;
9. loodi andme - ja arhitektuurimudelid ning näidati liidesed teiste süsteemidega;
10. pakuti välja infosüsteemi toimimiseks vajamineva arhitektuuri kavandi (visiooni);
11. kirjeldati lahendusele ülemineku plaan koos vajaminevate ajapuhvritega.

Lõpptulemusena on ettevõttel Enefit Green AS võimalik:

1. lahenduse juurutamisega säästa 298.9 K eur aastas läbi 50% kiirema labainspeksiooni ning ennetava (masinõppe põhise) vigastuste tuvastuse ning sellele järgneva hooldustööde teostamise;
2. likvideerida andmete manuaalsest analüüsist tingitud ebakorrektsused;
3. tuvastada labavigastuste progresseerumist kõikides Enefit Greeni tuuleparkide tuulikutes;
4. parandada hooldustöödega seotud raporteerimiskvaliteeti ning andmepõhise juhtimise taset ettevõttes;
5. tagada kasvava tootmismahdade olukorras selge ülevaade ettevõtte tuulevaldkonna

varade seisukorrast;

6. tagada vähemalt +0,2%<sup>1</sup> parem töökindlus tuuleparkides.

### **Autori hinnangul on püstitatud magistritöö eesmärgid täidetud.**

Autor kirjeldab põgusalt ka potentsiaalseid jätkuanalüüsi suundi, mis ei olnud antud lõputöö fookuses või olid seda magistritöö mahu piirangu tõttu vähe esindatud:

1. Masinõppe mudelite täpsuse hindamine ja valideerimine - selleks et veenduda CNN masinõppe algoritmi sobivuses antud masinõppe protsessi läbiviimisel;
2. Andmetöötlusvõimsuse optimeerimine suurte labainspektsoonipiltide mahtude korral - selleks et tekitada arusaamine, kuidas on võimalik kasvavate labainspektsooni piltide mahtude korral tagada süsteemi kiire ja tõrgeteta töö;
3. UI ja prototüübi koostamine - selleks et oleks parem ülevaade süsteemi funktsionaalsustest ning potentsiaalselt kaardistamaks uusi, antud lõputöös mainimata jäänud, funktsionaalsusi;
4. Teiste EG infosüsteemidega liidestamise analüüs - selleks et liidestus teiste infosüsteemidega sujuks tõrgeteta;
5. Eri inspektsoonidroonide funktsionaalsuste analüüs - selleks, et saada ülevaadet, millised droonid tagavad parima pildikvaliteedi, lennuaja ning lennumugavuse.

---

<sup>1</sup>Arvestades Enefit Greenis kehtivat toodangupõhise töökindluse valemit, mis defineerib, et töökindlus on võrdeline tegeliku tootmisüksuse toodanguga ning pöörvõrdeline tootmisüksuse võimaliku toodanguga ehk tegeliku ja saamata jäänud toodangu summaga. Orienteeruvalt +1 945 MWh lisatoodangut tähendab 2022. andmetel tuulevaldkonna üksuste KPI-le +0.2% rohkem toodangupõhist töökindlust.

## Kasutatud kirjandus

- [1] Liga Rozentale and Dagnija Blumberga. “Cost-Benefit and Multi-Criteria Analysis of Wind Energy Parks Development Potential in Latvia”. In: *Environmental and Climate Technologies* 25.1 (2021), pp. 1229–1240. DOI: <https://doi.org/10.2478/rtuct-2021-0093>.
- [2] *Global Wind Energy Council Annual Report (2021)*. <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf>. Kasutatud: 2023-02-13.
- [3] *Enefit Green 2022. aasta konsolideeritud aruanne*. [https://nasdaqbaltic.com/market/upload/reports/egr/2022\\_q4\\_et\\_eur\\_con\\_00.pdf](https://nasdaqbaltic.com/market/upload/reports/egr/2022_q4_et_eur_con_00.pdf). Kasutatud: 2023-03-05.
- [4] Akshay Iyer, Linh Nguyen, and Shweta Khushu. “Learning to identify cracks on wind turbine blade surfaces using drone-based inspection images”. In: *35th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2021), Sydney, Australia* (2022). DOI: 10.48550/ARXIV.2207.11186.
- [5] N. Dervilis et al. “Machine Learning Applications for a Wind Turbine Blade under Continuous Fatigue Loading”. In: *Key Engineering Materials* 588 (2013), pp. 166–174. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.588.166.
- [6] *Enefit Green 2021. III kvartali aruanne*. [https://nasdaqbaltic.com/market/upload/reports/egr/2021\\_q3\\_et\\_eur\\_con\\_00.pdf](https://nasdaqbaltic.com/market/upload/reports/egr/2021_q3_et_eur_con_00.pdf). Kasutatud: 2023-01-21.
- [7] Mariya Dimitrova et al. “A Survey on Non-Destructive Smart Inspection of Wind Turbine Blades Based on Industry 4.0 Strategy”. In: *Appl. Mech.* 3.4 (2022), pp. 1299–1326. DOI: <https://doi.org/10.3390/applmech3040075>.
- [8] Ki-Yong Oh et al. “A Novel Method and its Field Tests for Monitoring and Diagnosing Blade Health for Wind Turbines”. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 64.6 (2015), pp. 1726–1733. DOI: 10.1109/TIM.2014.2381791.
- [9] *Wind Turbine Blades: The Blade Handbook (2021)*. [https://www.bladena.com/uploads/8/7/3/7/87379536/blade\\_handbook\\_2021\\_v20.pdf](https://www.bladena.com/uploads/8/7/3/7/87379536/blade_handbook_2021_v20.pdf). Kasutatud: 2023-02-13.

- [10] Mike Jeffrey. “Managing Turbine Operating Costs Through Comprehensive and Targeted Rotor Blade Inspections”. In: *CanWEA – Operations and Maintenance Summit*. Complete Wind Corporation, Feb. 2015.
- [11] Casey Martinez et al. “Predicting Wind Turbine Blade Erosion using Machine Learning”. In: *SMU Data Science Review 2.2* (2019). DOI: <https://scholar.smu.edu/datasciencereview/vol2/iss2/17>.
- [12] *Cause and Effect Analysis: Ishikawa method*. <https://www.mindtools.com/a25caig/cause-and-effect-analysis>. Kasutatud: 2023-04-05.
- [13] *Nord Pool Day-Ahead Area Prices*. <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/EE/Hourly/?view=table>. Kasutatud: 2023-02-23.
- [14] *TOGAF® Standard, Version 9.2*. <https://pubs.opengroup.org/architecture/togaf9-doc/arch/>. Kasutatud: 2023-03-16.
- [15] *Guide to the Business Analysis Body of Knowledge (BABOK Guide) Version 3.0*. International Institute of Business Analysis, 2015.
- [16] *WhiteCloud Software. Capability Based Planning*. <https://www.whitecloudsoftware.ca/use-case/capability-based-planning/>. Kasutatud: 2023-03-25.
- [17] *Jibility. Capability Based Planning*. <https://www.jibility.com/what-is-capability-based-planning/>. Kasutatud: 2023-03-25.
- [18] *The Open Group. ArchiMate® 3.1 Specification. Chapter 6*. <https://pubs.opengroup.org/architecture/archimate3-doc/chap06.html>. Kasutatud: 2023-03-25.
- [19] *Kanbanize. Value Stream Mapping: The Definitive Guide*. <https://kanbanize.com/lean-management/value-waste/value-stream-mapping>. Kasutatud: 2023-03-25.
- [20] Himanshu Vasnani et al. “Production Flow Analysis through Value Stream Mapping”. In: (Oct. 2017).
- [21] *Lean Enterprise Institue. Value Stream Mapping*. <https://www.lean.org/lexicon-terms/value-stream-mapping/>. Kasutatud: 2023-03-25.
- [22] *Object Management Group Business Process Model and Notation*. <https://www.bpmn.org/>. Kasutatud: 2023-03-25.
- [23] *Ernst & Young. Avaliku sektori äriprotsessid. Protsessianalüüsi käsiraamat*. <https://dspace.ut.ee/handle/10062/45124>. Kasutatud: 2023-03-25.
- [24] *Six Sigma Daily. What is a SIPOC diagram?* <https://www.sixsigmadaily.com/what-is-a-sipoc-diagram/>. Kasutatud: 2023-03-25.

- [25] Egle Klumbyte, Raimondas Bliudzius, and Paris Foikades. “A SIPOC based model for the sustainable management of facilities in social housing”. In: *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 410 (2020). DOI: doi : 10 . 1088 / 1755 - 1315/410/1/012081.
- [26] Emet Gürel. “SWOT ANALYSIS: A THEORETICAL REVIEW”. In: *Journal of International Social Research* 10 (Aug. 2017), pp. 994–1006. DOI: 10 . 17719 / jisr.2017.1832.
- [27] *SWOT Analysis: How To With Table and Example*. <https://www.investopedia.com/terms/s/swot.asp>. Kasutatud: 2023-03-16.
- [28] *Lean Stack / Lean Canvas*. <https://leanstack.com/lean-canvas>. Kasutatud: 2023-04-01.
- [29] *Mendelow Matrix*. *Oxford College of Marketing*. <https://blog.oxfordcollegeofmarketing.com/2018/04/23/what-is-mendelows-matrix-and-how-is-it-useful/>. Kasutatud: 2023-04-01.
- [30] Mohamed El-Attar. “Evaluating and empirically improving the visual syntax of use case diagrams”. In: *Journal of Systems and Software* 156 (2019), pp. 136–163. ISSN: 0164-1212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2019.06.096>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0164121219301402>.
- [31] *Visual Paradigm. What is Use Case Diagram?* <https://www.visual-paradigm.com/guide/uml-unified-modeling-language/what-is-use-case-diagram/>. Kasutatud: 2023-03-25.
- [32] *SparxSystems. UML Component Model*. <https://sparxsystems.com/resources/tutorials/uml/component-model.html>. Kasutatud: 2023-03-25.
- [33] *IBM Group. Component Model*. [http://walderson.com/IBM/Practices/ScalingAgile/core.tech.common.extend\\_supp-ibm/workproducts/component\\_model\\_46CF8B23.html](http://walderson.com/IBM/Practices/ScalingAgile/core.tech.common.extend_supp-ibm/workproducts/component_model_46CF8B23.html). Kasutatud: 2023-03-25.
- [34] *UML Deployment Diagram*. <https://www.visual-paradigm.com/guide/uml-unified-modeling-language/what-is-deployment-diagram/>. Kasutatud: 2023-04-03.
- [35] *Sparxsystems. Enterprise Architect User Guide*. [https://sparxsystems.com/enterprise\\_architect\\_user\\_guide/15.2/model\\_domains/layered\\_viewpoint.html](https://sparxsystems.com/enterprise_architect_user_guide/15.2/model_domains/layered_viewpoint.html). Kasutatud: 2023-04-03.
- [36] John W. Satzinger. *Systems analysis and design in a changing world*. eng. 6th ed. Boston, MA: Course Technology, Cengage Learning, 2012. ISBN: 9781111534158.

- [37] *TechTarget. Software Quality. What is MoSCoW method?* <https://www.techtarget.com/searchsoftwarequality/definition/MoSCoW-method>. Kasutatud: 2023-04-01.
- [38] *Oracle. What is a Relational Database (RDBMS)?* <https://www.oracle.com/database/what-is-a-relational-database/>. Kasutatud: 2023-04-03.
- [39] *Dimensional Model: data structure technique.* <https://www.guru99.com/dimensional-model-data-warehouse.html>. Kasutatud: 2023-04-05.
- [40] *Enefit Greeni Prospekt.* [https://enefitgreen.ee/.resources/green/webresources/assets/pdf/Prospekt\\_EST.pdf](https://enefitgreen.ee/.resources/green/webresources/assets/pdf/Prospekt_EST.pdf). Kasutatud: 2023-03-05.
- [41] *Enefit Greeni strateegia perioodiks 2022 - 2026.* Ettevõtte sisedokumendid. 2022.
- [42] Toivo Joosua. *Enefit Greeni strateegilised eesmärgid.* Ettevõtte sisedokumendid. 2021.
- [43] Maryna Garan, Khaoula Tidriri, and Iaroslav Kovalenko. “A Data-Centric Machine Learning Methodology: Application on Predictive Maintenance of Wind Turbines”. In: *Energies* 15.3 (Jan. 2022), p. 826. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en15030826. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/en15030826>.
- [44] Lucy Y. Pao and Kathryn E. Johnson. “Control of Wind Turbines”. In: *IEEE Control Systems Magazine* 31.2 (2011), pp. 44–62. DOI: 10.1109/MCS.2010.939962.
- [45] Kehinde Adeseye Adeyeye, Nelson Ijumba, and Jonathan Colton. “The Effect of the Number of Blades on the Efficiency of A Wind Turbine”. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 801.1 (June 2021), p. 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/801/1/012020. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/801/1/012020>.
- [46] Rupp Carriveau. *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*. Rijeka: In-techOpen, July 2011. DOI: 10.5772/731. URL: <https://doi.org/10.5772/731>.
- [47] Dimitris Al. Katsaprakakis, Nikos Papadakis, and Ioannis Ntintakis. “A Comprehensive Analysis of Wind Turbine Blade Damage”. In: *Energies* 14.18 (2021). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en14185974. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/18/5974>.

- [48] Lisa Ziegler et al. “Lifetime extension of onshore wind turbines: A review covering Germany, Spain, Denmark, and the UK”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018), pp. 1261–1271. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.100>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117313503>.
- [49] ASM Shihavuddin et al. “Wind Turbine Surface Damage Detection by Deep Learning Aided Drone Inspection Analysis”. In: *Energies* 12.4 (2019). ISSN: 1996-1073. DOI: [10.3390/en12040676](https://doi.org/10.3390/en12040676). URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/4/676>.
- [50] Long Wang, Zijun Zhang, and Xiong Luo. “A Two-Stage Data-Driven Approach for Image-Based Wind Turbine Blade Crack Inspections”. In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* PP (Mar. 2019). DOI: [10.1109/TMECH.2019.2908233](https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2908233).
- [51] Xiao Chen. “Fracture of wind turbine blades in operation—Part I: A comprehensive forensic investigation”. In: *Wind Energy* 21.11 (2018), pp. 1046–1063.
- [52] Yann LeCun, Yoshua Bengio, and Geoffrey Hinton. “Deep Learning”. In: *Nature* 521 (2015), pp. 436–444.
- [53] Tomasz Chady et al. “Wind Turbine Blades Inspection Techniques”. In: *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY* 1 (May 2016), pp. 3–6. DOI: [10.15199/48.2016.05.01](https://doi.org/10.15199/48.2016.05.01).
- [54] *Flyability. Wind Turbine Drone Inspections*. <https://www.flyability.com/wind-turbine-drone-inspection>. Kasutatud: 2023-04-03.
- [55] *TerralWind. Blade Inspections*. <https://terralwind.com/blade-inspection/>. Kasutatud: 2023-04-03.
- [56] *Enefit Greeni tuulegeneraatoris töötamise ohutusjuhend*. Ettevõtte sisedokumentid. 2022.
- [57] Abhishek Reddy et al. “Detection of Cracks and damage in wind turbine blades using artificial intelligence-based image analytics”. In: *Measurement* 147 (2019), p. 106823. ISSN: 0263-2241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.07.051>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224119306803>.
- [58] Shaoqing Ren et al. “Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks”. In: *CoRR* abs/1506.01497 (2015). arXiv: [1506.01497](https://arxiv.org/abs/1506.01497). URL: <http://arxiv.org/abs/1506.01497>.

- [59] Xiyun Yang et al. “Image recognition of wind turbine blade damage based on a deep learning model with transfer learning and an ensemble learning classifier”. In: *Renewable Energy* 163 (2021), pp. 386–397. ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.125>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120313707>.
- [60] Kartik Chandrasekhar et al. “Damage detection in operational wind turbine blades using a new approach based on machine learning”. In: *Renewable Energy* 168 (2021), pp. 1249–1264. ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.119>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120320590>.
- [61] R.S.Ruth Sara Aguilar-Saven. “Business process modelling: Review and framework”. In: *International Journal of Production Economics* 90.2 (2004), pp. 129–149. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VF8-48WPV50-1/2/46adae8b9ceafa72bb47d4abadc2b2ad>.
- [62] Jan Recker et al. “How Good is BPMN Really? Insights from Theory and Practice”. In: *Proceedings of the 14th European Conference on Information Systems, ECIS 2006* (Jan. 2006).
- [63] Thomas W. Edgar and David O. Manz. “Chapter 6 - Machine Learning”. In: *Research Methods for Cyber Security*. Ed. by Thomas W. Edgar and David O. Manz. Syngress, 2017, pp. 153–173. ISBN: 978-0-12-805349-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805349-2.00006-6>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128053492000066>.
- [64] Ajay Bidyarthi. *The workflow of a Machine Learning / Artificial Intelligence project*. 2020. URL: <https://insights.blackcoffer.com/the-workflow-of-a-machine-learning-artificial-intelligence-project/> (visited on 03/19/2023).
- [65] Alvaro Furlani Bastos and Surya Santoso. “Optimization Techniques for Mining Power Quality Data and Processing Unbalanced Datasets in Machine Learning Applications”. In: *Energies* 14.2 (2021). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en14020463. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/2/463>.
- [66] Mesay Belete Bejiga, Abdallah Zeggada, and Farid Melgani. “Convolutional neural networks for near real-time object detection from UAV imagery in avalanche search and rescue operations”. In: *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2016, pp. 693–696. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729174.



- [67] Vinaychandran Pondenkandath et al. “Exploiting State-of-the-Art Deep Learning Methods for Document Image Analysis”. In: *2017 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*. Vol. 05. 2017, pp. 30–35. DOI: 10.1109/ICDAR.2017.325.
- [68] *Keras. Deep Learning Library. Keras Documentation*. URL: <https://keras.io/> (visited on 03/20/2023).
- [69] Alistair Cockburn. *Writing Effective Use Cases*. Addison-Wesely, 1999.
- [70] *FURPS: Business Analyst Training in Hyderabad – COEPD*. <https://businessanalysttraininghyderabad.wordpress.com/2014/08/05/what-is-furps/>. Kasutatud: 2023-03-31.
- [71] *Apache MxNet: a flexible and efficient library for deep learning*. <https://businessanalysttraininghyderabad.wordpress.com/2014/08/05/what-is-furps/>. Kasutatud: 2023-03-31.
- [72] *GitKraken Features*. <https://www.gitkraken.com/gitlens/features>. Kasutatud: 2023-03-31.
- [73] *AltexSoft: Simple Objects Access Protocol*. <https://www.altexsoft.com/blog/engineering/what-is-soap-formats-protocols-message-structure-and-how-soap-is-different-from-rest/>. Kasutatud: 2023-03-31.
- [74] *Gartner Glossary: Information Architecture*. <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/architecture>. Kasutatud: 2023-04-01.
- [75] *IT Arch: What is IT Architecture Types of Architectures*. <https://www.itarch.info/2020/05/what-is-it-architecture-and-different.html>. Kasutatud: 2023-04-01.
- [76] Toivo Joosua. “Tootmise efektiivistamine läbi digitaliseerimise - hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi äri- ja süsteemianalüüs Enefit Green AS tuuleparkide käideldavuse parendamiseks”. MA thesis. Tallinna Tehnikaülikool, 2021.
- [77] Xishan Wen et al. “Effect of Wind Turbine Blade Rotation on Triggering Lightning: An Experimental Study”. In: *Energies* 9.12 (2016). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en9121029. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/9/12/1029>.
- [78] Jiangyan Yan et al. “A Comparative Study on Damage Mechanism of Sandwich Structures with Different Core Materials under Lightning Strikes”. In: *Energies* 10.10 (2017). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en10101594. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/10/1594>.

- [79] Matthias Schramm et al. “The Influence of Eroded Blades on Wind Turbine Performance Using Numerical Simulations”. In: *Energies* 10.9 (2017). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en10091420. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/9/1420>.
- [80] Charlotte Bay Hasager et al. “Rain Erosion Load and Its Effect on Leading-Edge Lifetime and Potential of Erosion-Safe Mode at Wind Turbines in the North Sea and Baltic Sea”. In: *Energies* 14.7 (2021). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en14071959. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/7/1959>.

# Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>2</sup>

Mina, Konstantin Jefimov

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose “Tuulikulabade inspeksiooniandmete infosüsteemi äri – ja süsteemianalüüs tuulikulabade vigastuste ennetavaks tuvastamiseks Enefit Green AS-i näitel”, mille juhendaja on Taivo Kangilaski
  - 1.1. reprodutseerimiseks lõputöö säilitamine 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.

19.05.2023

---

<sup>2</sup>Lihtlitsents Lisa 1 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 tähtjaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

## Lisa 2 - Tuulikulabade vigastuste kategooriad

Tabelis 22 on esitatud viis kõige levinumat labarikete kategooriat koos tegevustega, mida sooritatakse vastava labarikke avastamisel. Lisaks on näidatud, kas tuulik tuleb seisata või mitte.

Tabel 22: Tuuliku labarikete kategooriad ja rikete ulatus. Allikas: autori koostatud [9] põhjal.

Labavigastuse kategooria	Vigastus (Rike)	Tegevused vigastuse avastamisel	Kas tuulikuga on ohutu jätkata elektritootmist?
1	Kosmeetiline, piksekaitse näidud allpool 50 mΩ	Ei vaja kohest parandamist	Jätkab tootmist
2	Allpool loomulikku kulumist	Parandatakse vaid siis, kui tehakse juba teisi töid labadel	Jätkab tootmist
3	Rikke ulatus ületab loomulikku kulumise määra, piksekaitse näidud üle 50 mΩ	Parandus teostatakse 6. kuu jooksul	Jätkab tootmist
4	Tõsine rike	Parandus teostatakse 3. kuu jooksul. Riket jälgitakse	Jätkab tootmist
5	Kriitiline rike	Vajab kohest sekkumist	Tuulik pannakse seisma rikke kõrvaldamiseni. Tuuliku ohutu tootmine pole seni tagatud

## Lisa 3 - Levinumad tuulikulabade vigastused

Labavigastusi võib jagada neljaks:

1. äikeselöögist tingitud vigastused;
2. labamaterjali loomulikust kulumisest tingitud vigastused;
3. laba esiserva erosioon;
4. tuulikulaba jääumisest tingitud vigastused.

Äikeselöögist tekkinud labarikked tulenevad asjaolust, et tuulikulabal võib olla rikkis piksekaitse ning äikeselök tabab laba, põhjustades erinevaid vigastusi (nt pealmise materjalihi delamineerumine, labatipu murenemine jm). Wen *et al.* [77] järeldasid eksperimentaalselt, et tuulikulabade pöörlemine on äikeselööki soodustav asjaolu. Oluline on välja tuua ka seda, et äikeselöögi tabamuse tõenäosus on sõltuvuses tuulikulaba materjalist. Yan *et al.* [78] analüüsisid, et polüvinüülkloriidist (PVC) ja polüetüleentereftalaadist (PET) tuulikulabad reageerivad kõrgetele rõhkudele erinevalt kui nt balsapuust tehtud tuulikulabad.

Tuulikulabade loomulik kulumine on tingitud peamiselt tuuleerosioonist. Lisaks on loomulik kulumine seotud tuuliku enda vibratsiooniga, mis tekib muuhulgas tuuliku automaatsel äkkpidurdustel, kui mõni tuuliku komponentidest on rikkeline. Lisaks mainitule on oluliseks komponendiks ka keskkonna niiskusesisaldus. [47]

Tuulikulaba esiserva (ing k. *leading edge erosion*) erosioon on omakorda tingitud kahest põhilisest faktorist:

1. õhus lendlev tolm, liiv ning sademed nagu rahe, jäävihm jm;
2. atmosfääris leiduv UV kiirgus ning õhuniiskus.

Laba esiserva erosioon on tuulevaldkonnas tuntud probleem ning laialdaselt uuritud. Probleemi teeb märkimisväärseks asjaolu, et esiserva erodeerumisega kasvab tuulikulaba karedus, mis omakorda vähendab tuulikulaba aerodünaamilisust ning tuuliku aastast energiatoodangut. [79] Lisaks on teada, et labaserva erosiooni tekkimise tõenäosusega peavad tuuleparkide omanikud tegelema juba aasta-paar pärast uue tuulepargi rajamist ehk tegemist on kiiresti tekkiva ning areneva vigastusega labal. [80] Sellist vigastust on näidatud joonisel 29.

Labade jäätumine on viimane tekkemehhanism, mis mõjutab tuulikulabal tekkivaid vi-  
gastusi. Labade jäätumisel kaks peamist probleemi [47]. Esiteks on jääd tuulikulabalt  
keeruline eemaldada ning teiseks mõjutab jää tuulikulaba aerodünaamikat sellisel määral,  
et tuulikusse paigaldatud automaatika paneb masina ohutuskaalutlustest seisma. Viimane  
asjaolu mõjutab tuulepargi käideldavust ning väljastatavat elektrienergia kogust. Lisaks  
sellele kaasneb iga äkkseisakuga vibratsioon, mis mõjutab lisaks labadele ka teisi, gondlis  
olevaid komponente. Jää tekkimisega labadel on seotud ka ohutusaspekt ehk labadelt  
kukkuv jää võib olla märkimisväärseks ohuks hoolduspersonalile kui ka inimestele, kes  
viibivad tuuliku läheduses.



Joonis 29: Esiserva erosioon tuulikulabal. Allikas: Enefit Green.