

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond

Toivo Joosua 192259IAAM

**Tootmise efektiivistamine läbi digitaliseerimise
– hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi äri-
ja süsteemianalüüs Enefit Green AS
tuuleparkide käideldavuse parendamiseks**

Magistritöö

Juhendaja: Taivo Kangilaski

PhD

Tallinn 2021

Autorideklaratsioon

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

Autor: Toivo Joosua

20.05.2021

Annotatsioon

Ennustav hooldus on täna teadaolevalt kõige efektiivsem hooldustegevuse korraldamise viis tuuleparkide elektritootmise sektoris. Ennustava hoolduse kasutamine aitab suurendada tootmistulemust ja vähendada hooldustegevuse kulusid. Mõlemad mainitud tegurid omavad positiivset mõju ettevõtte finantstulemusele ja loovad seega konkurentsieelise nende ettevõtetega võrreldes, kes ennustava hoolduse võimalusi ei kasuta.

Tootmistegevusest tekkinud andmete analüütiline kasutamine annab kindlustunde õigete juhtimisotsuste langetamiseks. Tuulegeneraatori töös hoidmiseks on selle seadmetele paigaldatud sadu andureid, mille mõõdetud signaalid salvestatakse andmebaasi sagedusega üks kord sekundis. Tekib suur hulk andmeid, mille eesmärgipärane kasutamine aitab kaasa toodangu kasvule ja hoolduskulude vähendamisele.

Käesoleva magistritöös tulemusel valmib äri- ja süsteemianalüüs ennustava hoolduse ja analüütika infosüsteem arendamiseks. Loodav infosüsteem saab olema ettevõtte Enefit Green AS üheks oluliseks töövahendiks tagamaks tuuleparkide kõrge käideldavus ja optimaalsed hoolduskulud.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 74 leheküljel, 5 peatükki, 32 joonist, 22 tabelit.

Abstract

Improvement of production efficiency through digitalization – analysis and design of a predictive maintenance information system to improve the availability of Enefit Green AS wind farms

Predictive maintenance has come the most effective wind farms maintenance type in the renewable energy sector. Exploiting the predictive maintenance helps to increase production output and reduce maintenance costs. Both of these factors have a positive effect on a company's financial performance and thus create a competitive advantage over companies that do not utilize the advantage of predictive maintenance.

The analytical use of data generated from production units provides confidence to make the right management decisions. To operate a wind generator, hundreds of sensors are installed inside its equipment and measured signals are stored in a database at a frequency of once a second. Wisely used, this large amount of data can benefit to increase production volume and reduce maintenance costs.

The result of this master's thesis will be the analysis and design of an analytics and predictive maintenance information system. The developed information system will become one of the important tools for the Asset Management Department of the company Enefit Green AS to ensure the high availability of wind farms and optimal maintenance costs.

The thesis is written in Estonian and contains 74 pages of text, 5 chapters, 32 figures, 22 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

KPI	<i>Key Performance Indicator</i> , tulemuslikkuse võtmemõõdik
PBA	<i>Production based availability</i> , toodangupõhine käideldavus
TP3	Kolmanda tehnoloogiaga tuulepargid
GWh	Gigavatt-tund
MWh	Megavatt-tund
M	Miljon
€	Euro
VHS	Varahaldus
IS	Infosüsteem
UC	<i>Use Case</i> , kasutuslugu
MFA	<i>Multi-factor Authentication</i> , mitmeteguriline autentimine
API	<i>Application Program Interface</i> , rakendusliides
REST	<i>Representational State Transfer</i> , tarkvaraarhitektuuri laad
XML	<i>Extensible Markup Language</i> , märgistuskeel dokumendi struktuuri loomiseks
WSDL	<i>Web Service Definition Language</i> , XML põhine veebiteenuste kirjelduskeel
XSD	<i>XML Schema Definition</i> , XML dokumendis elementide kirjeldamise skeem
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i> , avaldamise-tellimise võrguprotokoll sõnumite seadmete vahel edastamiseks
HVT	Hooldusvajaduse tuvastamine
ÜL	Ülesanne
Nr	Number
DB	<i>Database</i> , andmebaas
AS-IS	Olemasolev, eksisteeriv olukord
TO-BE	Loodav, planeeritav olukord
JAR	Juhtimisarvestuse üksus
HAN	Hankekorraldamise üksus
DEV	Äriprojektide arendamise üksus

BPMN	<i>Business Process Model and Notation</i> , äriprotsesside modelleerimise notatsioon
IoT	<i>Internet of Things</i> , asjade internet
Scada	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> , tehniliste protsesside jälgimine ja juhtimine
CMS	<i>Condition Monitoring System</i> , seisundiseire süsteem
LDAPS	<i>Lightweight Directory Access Protocol Secure</i> , lihtsustatud kataloogisirvimise protokoll kataloogiteenustele ligipääsuks ja nende haldamiseks
HTTPS	<i>Hypertext Transfer Protocol Secure</i> , turvaline hüpertexti edastuse protokoll
JDBC	<i>Java Database Connectivity</i> , Java andmebaasi ühenduvuse liides
EE	Eesti Energia
DMZ	<i>Demilitarized Zone</i> , demilitariseeritud tsoon

Sisukord

Sissejuhatus	12
1 Organisatsiooni kirjeldus.....	16
1.1 Ettevõtte tegevusala.....	16
1.2 Organisatsiooni visioon, missioon ja väärtused.....	17
1.3 Organisatsiooni eesmärgid.....	18
1.4 Organisatsiooni igapäevane toimimine ja struktuur.....	19
1.5 Digitaliseerimise ja varahalduse üksus.....	21
1.5.1 Digitaliseerimise ja varahalduse üksuse ametikohad	22
2 Äriprobleemi analüüs.....	23
2.1 Metoodika valik	23
2.2 Üldine äriprobleemi sõnastus.....	26
2.3 Detailne äriprobleemi kirjeldus.....	27
2.4 Äriprobleemi mõju tootmise KPI-le.....	30
2.5 Äriprobleemi seos ettevõtte strateegiaga.....	32
2.6 Äriprobleemi koondülevaade.....	32
3 AS-IS analüüs	33
3.1 Ärianalüüs.....	33
3.1.1 I taseme protsesside ülevaade	33
3.1.2 Ettevõtte teise taseme protsessid – Varahaldus.....	34
3.1.3 SIPOC – Hooldusvajaduse tuvastamine	35
3.1.4 Ennustava hoolduse voodiagramm.....	37
3.1.5 Ennustava hoolduse protsess.....	38
3.2 Süsteemianalüüs.....	38
3.2.1 Varahalduse IT lahenduste arhitektuur.....	39
3.2.2 Operatiivandmete infosüsteemi kasutusmallide mudel	41
3.3 Olemasoleva äriprotsessi puudused	43
4 TO-BE analüüs	45
4.1 Ärianalüüs.....	45
4.1.1 Probleemi ärimudeli lõuend.....	46

4.1.2 Uue hooldusvajaduse tuvastamise tööprotsessi modelleerimine	47
4.1.3 Võimekuste GAP analüüs	49
4.1.4 Soovitused masinõppe mudeli valikul	50
4.1.5 Väärtusvoog	52
4.1.6 Kontekstuaalne andmevoodiagramm	54
4.1.7 I tasandi andmevoodiagramm	55
4.1.8 Ontoloogia mudel	56
4.1.9 Äriinfo mudel	57
4.2 Süsteemianalüüs	58
4.2.1 Kasutusmallide mudel	58
4.2.2 Kasutusmallide kirjeldused	58
4.2.3 Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi funktsionaalsed nõuded	66
4.2.4 Nõuete klassifitseerimine FURPS+ järgi	69
4.3 IT arhitektuur ja disain	72
4.3.1 Motivatsiooni ja strateegia mudel	72
4.3.2 Hooldusvajaduse tuvastamise kihiline mudel	74
4.3.3 Komponentide mudel	75
4.3.4 Komponentide kirjeldused	76
4.3.5 Järgnevusdiagramm	77
4.3.6 Eviitusdiagramm	78
4.3.7 Relatsiooniline andmemudel	80
4.3.8 Dimensionaalne andmemudel	81
5 Projektiplaan	82
5.1 Uuele protsessile ülemineku ajaplaan	82
5.2 Uuele protsessile ülemineku Gantti graafik	84
5.3 IT arendusprojekti riskianalüüs	85
Kokkuvõte	86
Kasutatud kirjandus	88
Lisa 1 – Lihtlitsents	93

Jooniste loetelu

Joonis 1. Enefit Green tootmisvõimsused.....	17
Joonis 2. Enefit Green missioon, visioon ja väärtused.....	18
Joonis 3. Enefit Green strateegilised eesmärgid.....	19
Joonis 4. Enefit Green juhatuse tasandi struktuur.....	19
Joonis 5. Enefit Green domeenid ja divisjonid.....	20
Joonis 6. Tootmis ja varahalduse valdkonna struktuur.....	20
Joonis 7. Digitaliseerimise ja varahalduse üksuse ametikohad.....	22
Joonis 8. Ebasoovitavad ilmingud konflikti diagrammil.....	28
Joonis 9. Probleemi juurpõhjuse analüüs "Viie miksi" meetodiga.....	28
Joonis 10. Ettevõtte I taseme protsessid.....	34
Joonis 11. Ettevõtte varahalduse protsessid.....	35
Joonis 12. Hooldusvajaduse tuvastamise protsessi SIPOC diagramm.....	36
Joonis 13. Ennustava hoolduse AS-IS voodiagramm.....	38
Joonis 14. Ennustava hoolduse AS-IS äriprotsess.....	38
Joonis 15. Varahalduse IT arhitektuur.....	39
Joonis 16. Operatiivandmete infosüsteemi kasutusmallide mudel.....	41
Joonis 18. Automaatse hooldusvajaduse tuvastamise voodiagramm.....	47
Joonis 19. Hooldusvajaduse tuvastamise protsess.....	48
Joonis 17. Hooldusvajaduse tuvastamise väärtusvoog.....	53
Joonis 20. HVT IS kontekstuaalne andmevoodiagramm.....	55
Joonis 21. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi I tasandi andmevoodiagramm.....	55
Joonis 22. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi ontoloogia mudel.....	56
Joonis 23. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi äriinfo mudel.....	57
Joonis 26. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi kasutusmallide mudel.....	58
Joonis 27. HVT IS motivatsiooni ja strateegia mudel.....	73
Joonis 28. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi kihiline mudel.....	74
Joonis 29. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi komponentide mudel.....	75
Joonis 30. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi järgnevusdiagramm.....	78

Joonis 31. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi evitusdiagramm.....	79
Joonis 24. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi relatsiooniline andmemudel.....	80
Joonis 25. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi dimensionaalne andmemudel...	81
Joonis 32. Automatiseeritud HVT protsessile ülemineku Gantt graafik.	84

Tabelite loetelu

Tabel 1. Enefit Green tuuleparkide käideldavus	26
Tabel 2. TP3 tootmiseseadmete käideldavuse kasvu lisaväärtus	31
Tabel 3. Äriprobleemi koondülevaade.....	32
Tabel 4. HVT protsessil osalevate rollide kirjeldused.....	36
Tabel 5. Varahalduse protsesse toetavad infosüsteemid.....	40
Tabel 6. Parameetri trendide jälgimise kasutusloo kirjeldus.....	42
Tabel 7. Hooldusvajaduse tuvastamise gap analüüs.....	49
Tabel 8. Kasutusmalli UC 01 kirjeldus.....	59
Tabel 9. Kasutusmalli UC 02 kirjeldus.....	59
Tabel 10. Kasutusmalli UC 03 kirjeldus.....	60
Tabel 11. Kasutusmalli UC 04 kirjeldus.....	61
Tabel 12. Kasutusmalli UC 05 kirjeldus.....	62
Tabel 13. Kasutusmalli UC 06 kirjeldus.....	63
Tabel 14. Kasutusmalli UC 07 kirjeldus.....	64
Tabel 15. Kasutusmalli UC 08 kirjeldus.....	64
Tabel 16. Kasutusmalli UC 09 kirjeldus.....	65
Tabel 17. Kasutusmalli UC 10 kirjeldus.....	65
Tabel 18. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi funktsionaalsed nõuded.....	66
Tabel 19. HVT IS FURPS+ järgi klassifitseeritud nõuded.....	69
Tabel 20. Komponentide kirjeldused.....	76
Tabel 21. Uuele protsessile ülemineku ajaplaan.....	82
Tabel 22. HVT IS arendusprojekti riskid.....	85

Sissejuhatus

Elektrienergia tootmine taastuvatest energiaallikatest on kasvav trend globaalselt ning kõige enam roheenergiat toodetakse täna tuuleparkides. 16% kogu 2020 aastal tarbitud elektrienergiast Euroopas toodeti tuuleparkides [1]. Tugev kasvutrend viitab tuuleenergia juhtpositsiooni võtmisele lähitulevikus.

Tuuleenergia tasuvuse kasvuks tuleb lahendada mitmeid väljakutseid, üks olulistest on opereerimise ja hoolduskulude optimeerimine. Mittepilaanilised katkestused põhjustavad tavaliselt 10–15% tootmiskadudest, äärmuslikul juhul isegi 30% [2]. Selline tootmiskadu vähendab märkimisväärselt kasumit ja seega on oluline leida lahendusi varade käitamise seotud kulude vähendamiseks. Efektiivsuse leidmiseks tasub rakendada ennekõike meetmeid, mis ei too kaasa suuri investeeringuid. Käimasoleval digiajastul tasub ennekõike keskenduda olemasolevate andmete väärindamisele ning protsesside automatiseerimisele.

Ka Enefit Green AS suurim kogus taastuvenergiat genereeritakse just tuuleparkides. Tootmisvarade mahu kasv muudab varade haldamise kasutusel olevate tööprotsessidega ajamahukaks ja ebatõhusaks ning efektiivsuse suurendamiseks on vajalik protsesside parendamine läbi uute digitaalsete lahenduste.

Antud magistritöö keskendub efektiivsuse suurendamisele Enefit Green AS tuuleparkides. Täpsemalt on eesmärk saavutada efektiivsuse kasv läbi käideldavust mõjutava äriprotsessi parendamise rakendades digitaliseerimise võimekusi. Tootmisseadmete käideldavus on üks ettevõtte KPI mõõdikutest ning omab otsest mõju finantstulemusele. Seega on võimalik digitaliseerimise võimekusi kasutades luua ettevõttele lisaväärtust.

Täna on peamiseks efektiivsuse kasvu takistavaks probleemiks töövahendi puudumine, mis võimaldaks:

- tootmistegevust juhtivatel töötajatel hooldusvajadusi ennetavalt tuvastada ning seeläbi tagada läbi hooldustööde parema planeerimise väiksem tootmiskadu;

- hinnata toimunud seisakute kestuste mõju käideldavusele, et prioriseerida seisakute juurpõhjuste analüüside tegemine ning parenduste elluviimine.

Magistritöö käigus koostatakse probleemi lahendamiseks äri- ja süsteemianalüüs analüütika ja ennustava hoolduse infosüsteemi loomiseks. Äriprobleemi kirjeldamiseks ja mõju hindamiseks tutvub autor ettevõtte tootmistegevuse tulemusi kokku võtva varahalduse aastaaruandega. Seejärel uurib autor äriprobleemiga seotud olemasolevaid äriprotsesse ja kasutusel olevaid infosüsteeme ning viib läbi vestlused tootmisjuhtide ja analüütikutega selgitamaks välja olemasoleva äriprotsessi peamised puudused. Pärast seda töötab autor välja uue parendatud äriprotsessi ja kirjeldab uue protsessi toimimiseks vajalikud võimekused.

Uus loodav võimekus võimaldaks saada ajakohase tootmisinfo koond- kui ka detailse ülevaate ning automatiseerida hooldusvajaduse tuvastamise tööprotsessi.

Magistritöö koosneb viiest osast:

1. organisatsiooni kirjeldus: ülevaade ettevõtte tegevusvaldkonnast, eesmärkidest ja struktuurist. Põhjalikumalt keskendutakse arendatavat infosüsteemi kasutama hakkava osakonna kirjeldamisele. Tutvustatakse ametikoha rollide vastutusala ja nende seost tootmistulemuse mõjutamiseks;
2. äriprobleemi analüüs: meetodika valik, äriprobleemi kaardistus ja selle mõju hindamine tootmistulemusele arendusprojektile rahastuse saamiseks;
3. hetkeolukorra kaardistus: ülevaade varahalduse protsessidest ja olemasoleva käideldavust tagava äriprotsessi kirjeldamine koos protsessi toetavate IT lahenduste arhitektuuri ja infosüsteemide kirjeldamisega. Äriprotsessi puuduste hindamine ja väärtusloome pakkumine läbi uue võimekuse loomise;
4. tulevase lahenduse kaardistus:
 - a. ärianalüüs: uue käideldavust tagava äriprotsessi ja protsessi toimimiseks vajalike võimekuste kirjeldamine;
 - b. süsteemianalüüs: hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi arendamiseks vajalike nõuete ja kasutuslugude koostamine;

- c. IT arhitektuur ja disain: infosüsteemi arendamiseks vajalike arhitektuursete ja disainimudelite koostamine;
5. projektiplaani ülevaade: ajakava uue võimekuse loomiseks ja uuele tööprotsessile üleminekuks ning IT arendusprojekti riskide hindamine.

Magistritöö eesmärk on *automatiseeritud hooldusvajaduse tuvastamise võimekuse planeerimine tuuleparkide käideldavuse kasvuks ja äriprotsessi optimeerimiseks*. Selle **skoopi** kuulub järgnevate tegevuste sooritamine:

- äriprobleemi analüüs ja finantsilise mõju hindamine;
- käideldavust mõjutava olemasoleva tööprotsessi ja selle puuduste kaardistamine;
- käideldavust mõjutava olemasoleva tööprotsessi toetamiseks kasutusel olevate IT lahenduste arhitektuuri kaardistamine;
- uue hooldusvajaduse tuvastamise tööprotsessi välja töötamine;
- uue hooldusvajaduse protsessi toimimiseks vajalike võimekuste *gap* analüüsi¹ ja väärtusvoo kirjeldamine;
- hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi funktsionaalsete nõuete kaardistamine;
- kasutusmallide mudeli koostamine;
- kasutuslugude kirjeldamine;
- äriinfo modelleerimiseks tarvilike mudelite koostamine;
- hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi arhitektuuri välja töötamine;

¹ <https://pubs.opengroup.org/architecture/togaf91-doc/arch/chap27.html>

- projektiplaani ajakava ja riskianalüüsi koostamine uue infosüsteemi ning automatiseeritud äriprotsessi kasutusele võtmiseks.

Lõputöö skooopi ei kuulu arendatava lahenduse turvalisuse nõuete valik, sest neile kehtivad ettevõtte tüüptingimused ja kõik uued IT lahendused peavad olema vastavuses kehtivate põhimõtetega. Skooopi ei kuulu ka IT lahenduse prototüübi loomine ja arendusprojekti realiseerimine. Lisaks ei analüüsita hooldusvajaduse tuvastamise võimekuse loomiseks turul eksisteerivaid karbitooteid, sest antud analüüs on autoril varasemalt tööalaselt sooritatud.

1 Organisatsiooni kirjeldus

Esimeses peatükis antakse äriprobleemi analüüsitavast ettevõttest üldine ülevaade. Kirjeldatakse organisatsiooni tegevusala, strateegia ja struktuur. Detailsemalt vaadeldakse Digitaliseerimise ja varahalduse üksust, kelle vastutusalasse äriprobleemi lahendamine kuulub.

1.1 Ettevõtte tegevusala

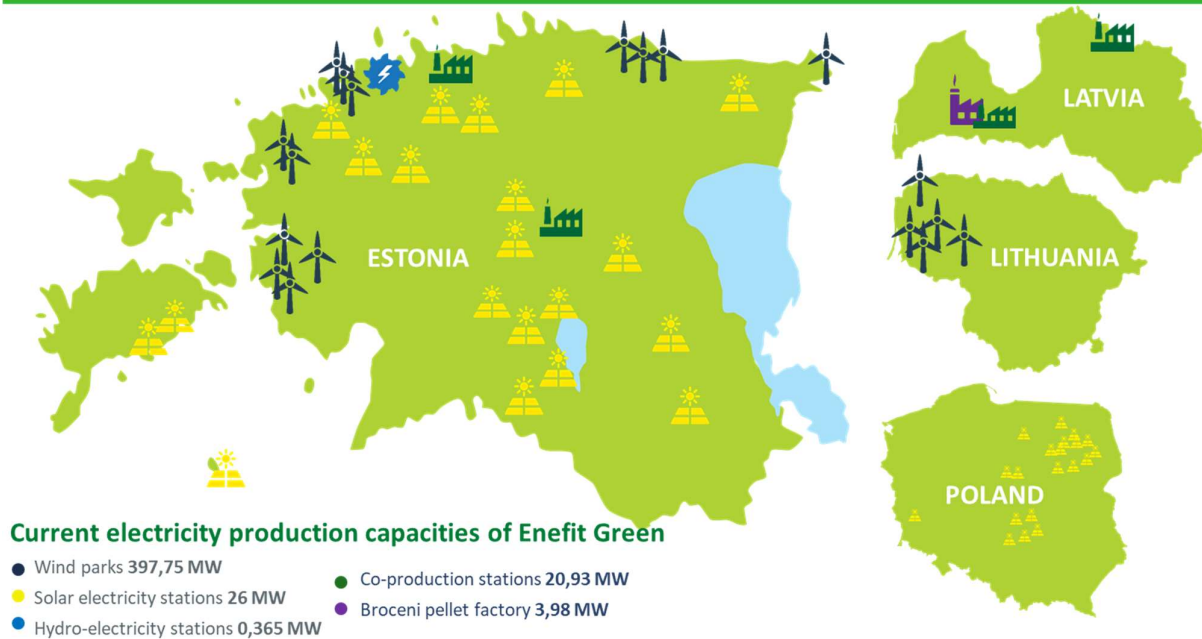
Enefit Green AS asutati 2016. aastal. Ettevõtte on üks Eesti Energia kontserni tütarettevõtetest, mille valdkonnaks on elektrienergia tootmine taastuvatest energiaallikatest. Eesti Energial on taastuvenergia tootmise kogemus alates 2002 aastast, millal paigaldati esimene tuulegeneraator Virtsu poolsaarel. Eraldi ettevõtte moodustamine tulenes eesmärgist keskenduda senisest enam taastuvenergia valdkonnale ja uute taastuvenergia projektide arendamisele [3].

Enefit Green AS koduturgudeks on Eesti, Läti, Leedu, Poola ja Soome. Täna asuvad tootmisüksused Baltikumis ja Poolas ning lähiaastatel on plaanis siseneda tootmistegevusega Soome turule, kus juba täna omatakse arendusprojekti. Ettevõtte laienemise ambitsioonide kohta annab selge märgi Nelja Energia AS, üks toonane Baltikumi suurimaid taastuvenergia tootjaid, omandamine 2018. aastal [3].

Veel täna on Enefit Green AS omanikuks 100% ulatuses Eesti Energia kontsern, kuid lähiaastatel on plaanis kapitali kaasamiseks viia läbi Enefit Green AS vähemusosaluse esmane avalik pakkumine 49% osalusega. Kapitali kaasamise vajadus tuleneb ettevõtte kasvuplaanide ellu viimiseks rahastamise leidmiseks uutele projektidele.

Enefit Green AS keskendub elektrienergia tootmisel tuule- ja päikeseenergiale. 2021 aasta alguse seisuga kasutusel olevad elektrilised tootmisvõimsused valdkondade lõikes on esitatud joonisel 1.

Enefit Green Production Portfolio



Joonis 1. Enefit Green tootmisvõimsused [4].

1.2 Organisatsiooni visioon, missioon ja väärtused

Enefit Green AS **visioon**: Pakume klientidele keskkonnasõbralikku energiat ja aitame muuta maailma puhtamaks. Oleme meie sihtturgudel kõige kiiremini kasvav taastuvenergia ettevõtte.

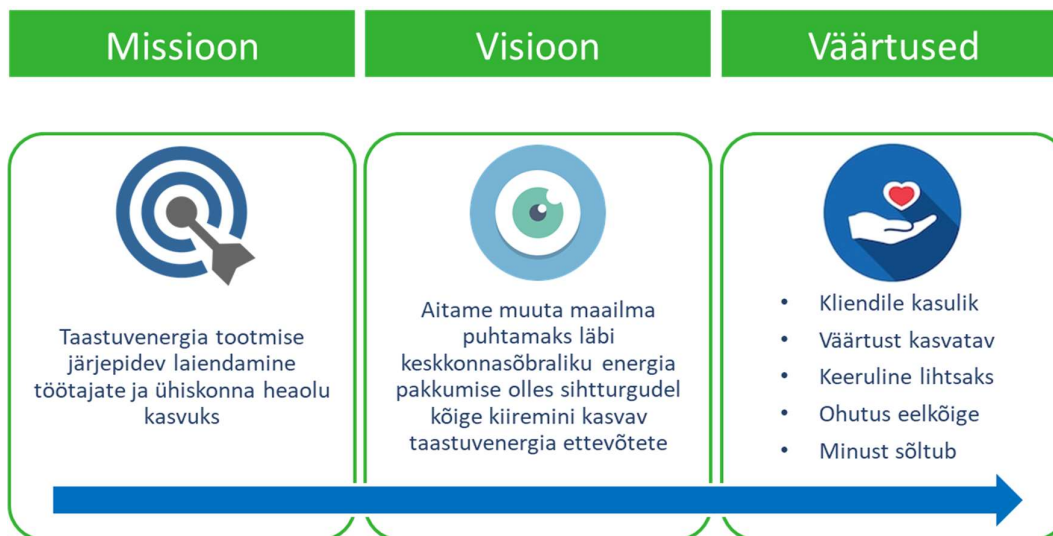
Ettevõtte **missioon**: Taastuvenergia keskkonnahoidlik ja efektiivne tootmine tuulest, veest, biomassist, päikesest ja olmejäätmetest kindlustades ettevõtte tootmise järjepidevat laiendamist ning enda töötajate ja ühiskonna heaolu pidevat kasvu.

Ettevõtte visiooni ja missiooni realiseerimiseks tuginetakse ettevõtte töö korraldamisel järgmistele väärtustele:

- **Kliendile kasulik.** Saame olla edukad ainult siis, kui loome kliendile väärtust.
- **Väärtust kasvatav.** Keskendume ennekõike tegevustele, mis loovad suuremat väärtust.
- **Keeruline lihtsaks.** Muudame keerulise lihtsaks ja arusaadavaks.
- **Ohutus eelkõige.** Meie tegevus on alati seotud riskidega keskkonnale ja inimeste tervisele. Seetõttu arvestame alati tööohutuse, tervise ja keskkonnaga.

- **Minust sõltub.** Minu energia, tahe ja vastutustunne tagavad ühiste eesmärkide saavutamise.

Ettevõtte missioon, visioon ja väärtused on kokku võetud joonisel 2.



Joonis 2. Enefit Green missioon, visioon ja väärtused [5].

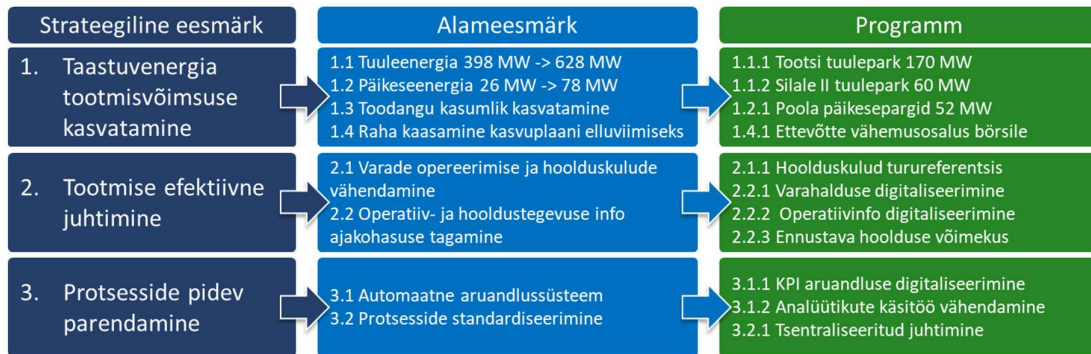
1.3 Organisatsiooni eesmärgid

Ettevõttel on kolm peamist strateegilist suunda:

- taastuenergia toodangu suurendamine ettevõtte koduturgudel läbi uute taastuenergia arendusprojektide;
- olemasolevate tootmisvarade efektiivne juhtimine toodangu suurendamiseks ja hoolduskulude vähendamiseks;
- tööprotsesside ja toimingute pidev parendamine [5].

Ettevõtte strateegilised eesmärgid on esitatud joonisel 3.

Ettevõtte strateegilised eesmärgid

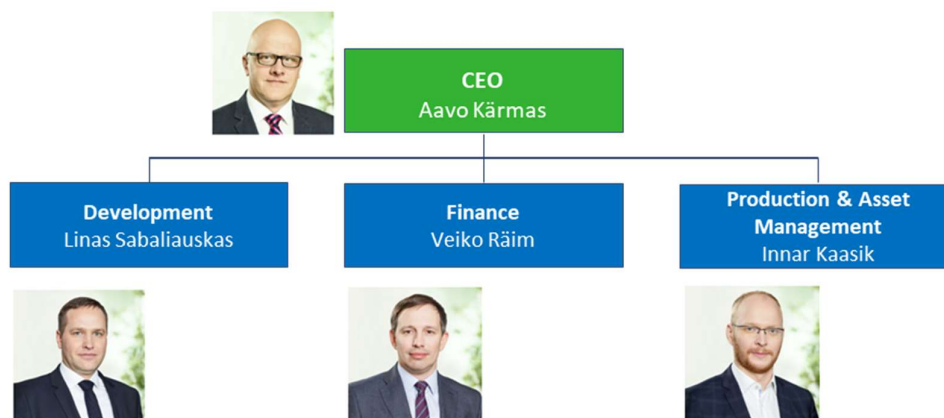


Joonis 3. Enefit Green strateegilised eesmärgid [5].

1.4 Organisatsiooni igapäevane toimimine ja struktuur

Tegemist on peamiselt¹ taastuvatest energiaallikatest elektri- ja soojusenergiat tootva ettevõttega. Kõige olulisemad protsessid ettevõtte jätkusuutlikkuse tagamiseks on olemasolevate tootmisvarade efektiivne toimimine kogu vara elukaare vältel ning uute arendusprojektide realiseerimine. Ettevõtte juhatuse struktuur on toodud joonisel 4.

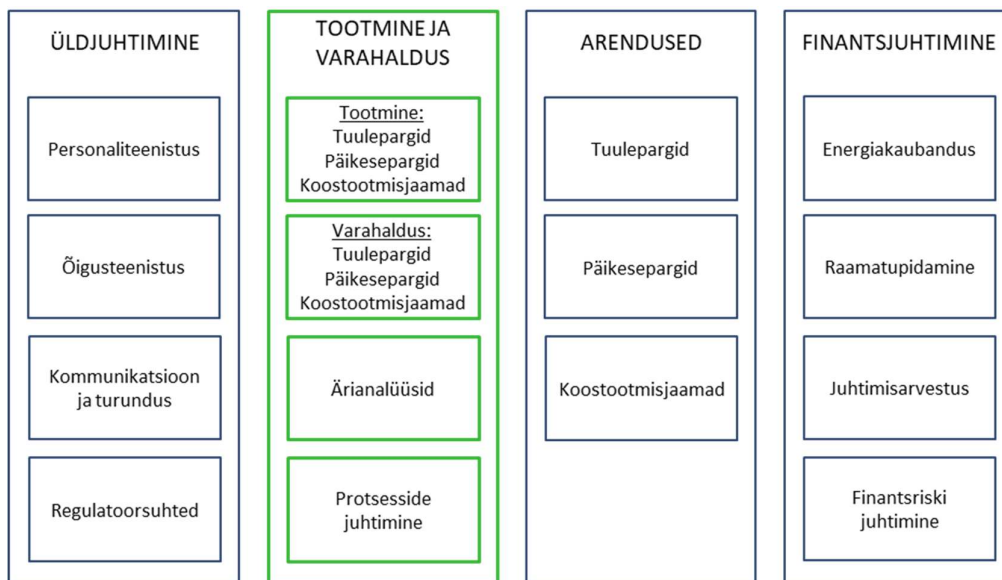
Enefit Green Management



Joonis 4. Enefit Green juhatuse tasandi struktuur [3].

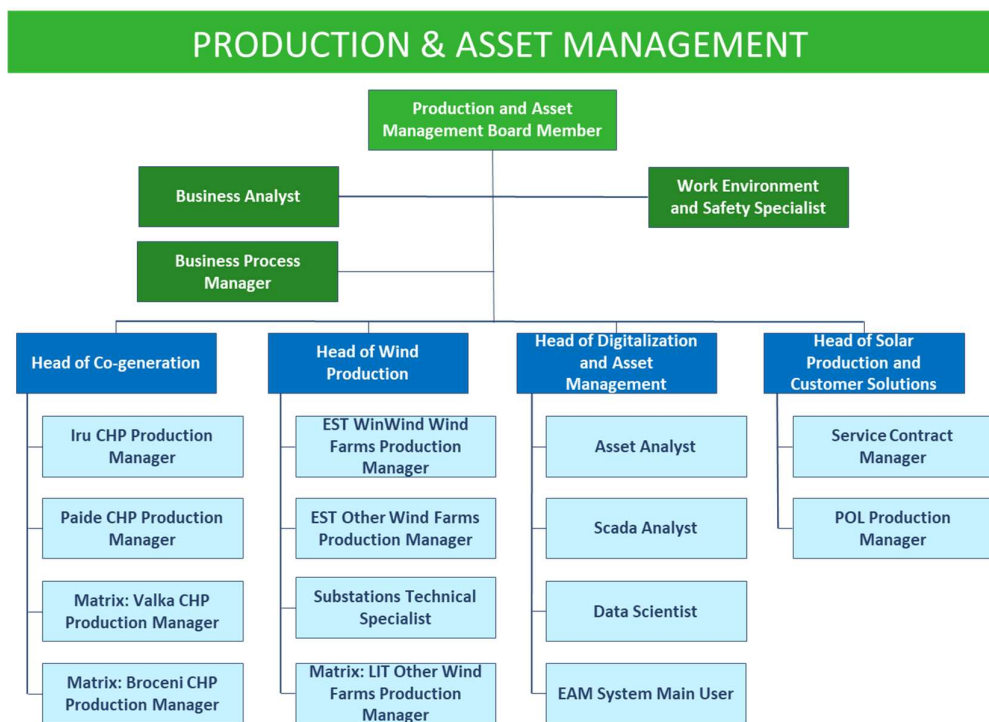
¹ Koostootmisjaamades kasutatakse lisaks taastuvatele energiaallikatele fossiilseid kütuseid.

Tegevusvaldkondadest ülevaate saamiseks vaatleme ettevõtte domeene ja divisjone joonisel 5.



Joonis 5. Enefit Green domeenid ja divisjonid.

Kuna antud tööga on seotud Tootmise ja varahalduse valdkond, siis keskendume üksnes selle valdkonna täpsemale kirjeldamisele. Tootmise ja varahalduse valdkonna struktuur on esitatud joonisel 6.



Joonis 6. Tootmis ja varahalduse valdkonna struktuur.

Minnes veel spetsiifilisemaks on lõputöö seotud tuuleparkide töökindluse parendamisega läbi tootmise digitaliseerimise. Seega on kesksel kohal kahe üksuse, Tuuleenergia tootmine ning Digitaliseerimine ja varahaldus, vaheline koostöö probleemi selgeks püstitamiseks ja analüüsimiseks. Digitaliseerimise lahenduste väljatöötamise vastutus lasub digitaliseerimise ja varahalduse meeskonnal, seega annab autor järgmises punktis ülevaate nimetatud üksusest.

1.5 Digitaliseerimise ja varahalduse üksus

Digitaliseerimise ja varahalduse üksuse peamisi eesmärke on tagada ettevõtte tootlikkuse maksimeerimine kogu elukaare vältel läbi andmepõhise juhtimise. Üksuse vastutusse kuuluvad olulisemad tegevused on varahalduse ja digitaliseerimise strateegia koostamine, varade ja tootmisandmete haldamine ning analüüsimine. Varahalduse üksuse tagada on ka võimaluste leidmine olemasolevate varade toodangu suurendamiseks, hoolduskulude minimeerimiseks ja eluea maksimeerimiseks ettevõtte tootmisvarade portfelli tervikuna käsitledes.

Antud üksuse töötajad peavad tundma väga hästi varahalduse valdkonna äriprotsesse ja olema suutelised juhtima IT arendusprojekte. Seega on multidistsiplinaarsete oskuste omamine ja arendamine tähtsal kohal. Vajalike teadmiste ja oskuste saavutamiseks kasutatakse erinevaid õppeviise, näiteks kolleegide juhendamine, välis- ja sisekoolitused, vajalike erialateadmiste omandamise ülikoolis, erialakirjanduse lugemise ja konverentsidel osalemise. Multidistsiplinaarsete teadmistega töötajate olemasolu võimaldab ettevõttel digitaliseerimisega efektiivsemalt edasi liikuda, sest teatakse paremini, kus asuvad probleemkohad ning milliseid võimekusi on vaja nende lahendamiseks. Koostöö Tootmise üksusega on oluline tootmisvaradega seotud üksikasjade kirjeldamiseks, mille osas veel kompetentsi ei omata.

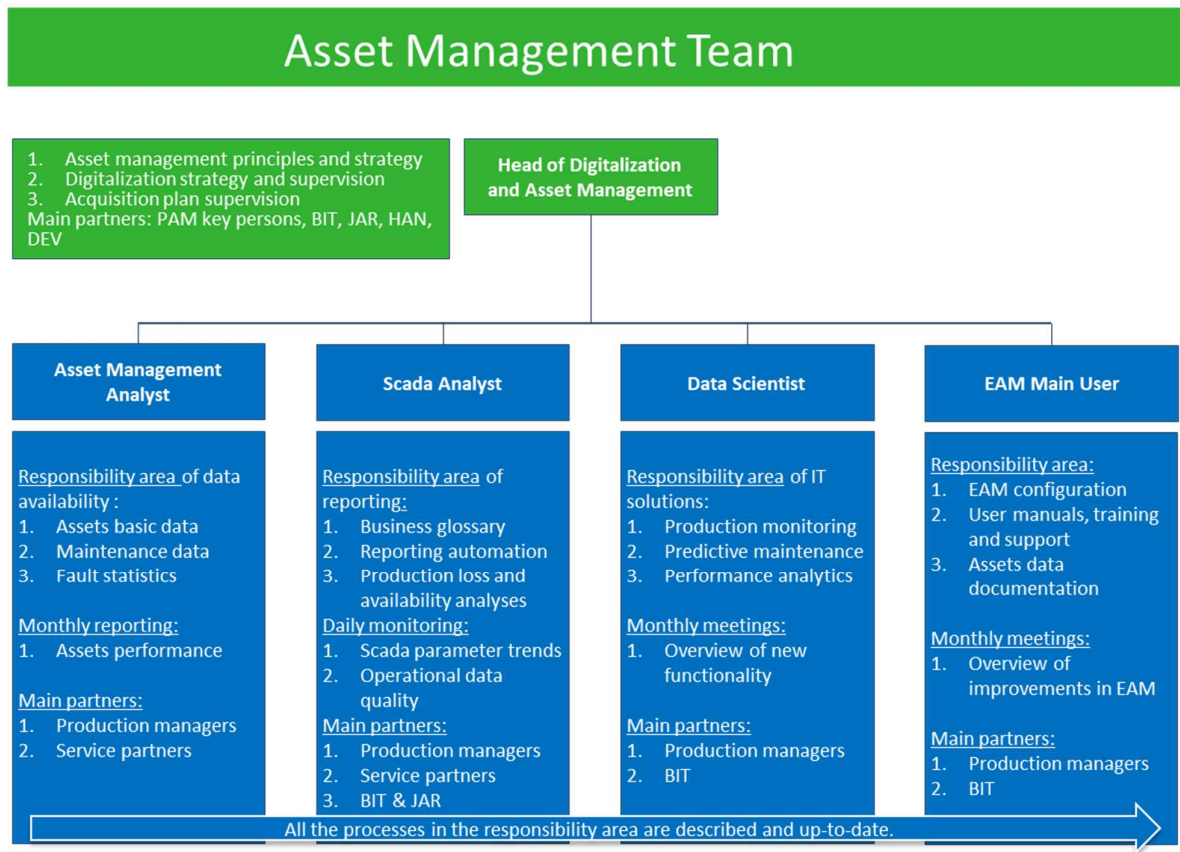
Digitaliseerimise ja varahalduse vastutusvaldkonda kuulub:

- tootmisvaradega seotud andmete digitaliseerimine;
- raporteerimise ja analüüside automatiseerimine käsitöö vähendamiseks;
- ennetava hooldusvajaduse tuvastamine;

- IT võimekuse tagamine hooldustööde efektiivseks korraldamiseks ja kontrollimiseks;
- uute tehnoloogiliste lahenduste leidmine ja kasutuselevõtt tootmistegevuse efektiivistamiseks.

1.5.1 Digitaliseerimise ja varahalduse üksuse ametikohad

Digitaliseerimise ja varahalduse üksuse ametikohad on toodud joonisel 7.



Joonis 7. Digitaliseerimise ja varahalduse üksuse ametikohad.

2 Äriprobleemi analüüs

Peatükk algab lõputöö läbi viimiseks valitud metoodika kirjeldamisega. Seejärel alustatakse äriprobleemi analüüsiga, et kaardistada probleem, millega ettevõtte silmitsi seisab ning piiritleda täpsemalt ära probleemi ulatus. Pärast äriprobleemi kirjeldust analüüsib autor probleemi mõju ettevõtte tootmistulemusele. Selleks koostatakse lihtne finantsanalüüs hindamaks praegust olukorda probleemi lahenduse järgse olukorraga. Finantsanalüüs annab eelhinnangu probleemi suurusele ja mõjule ettevõtte tasandil. Lisaks analüüsitakse probleemi seost ettevõtte strateegiaga.

Kui probleemi lahendamine ei loo majanduslikku lisaväärtust ega panusta ettevõtte strateegiliste eesmärkide saavutamisse, ei klassifitseeru äriprobleem arendusvajaduseks ja tuleb täiendavalt panustada tasuvuskohtade leidmisse. Arendustegevused, mis lisaväärtust ei loo, jäetakse lahendamata ning äriprotsess jätkub olemasolevate vahenditega. Peatükk võetakse kokku äriprobleemi koondülevaate esitamisega.

2.1 Metoodika valik

Tuuliku rikete diagnoosimiseks on pakutud erinevaid meetodeid, mida saab grupeerida kolme kategooriasse: füüsikalistel mudelitel põhinevad meetodid, andmepõhised meetodid ja võimsuskõveral põhinevad mudelid [6]. Artiklis [7] arutati tuuleturbiinide käigukasti rikete tuvastamist füüsilist mudelit kasutades. Füüsiliste mudelite väljatöötamine iga tuuliku komponendi jaoks nõuab üksikasjalikke tehnilisi teadmisi, mis ei ole alati lihtsasti omandatavad [8]. Seevastu andmepõhised meetodid hõlbustavad tõrke diagnoosimist ilma spetsiifiliste tehniliste teadmisteta. Kiire arvutitehnoloogia ja andmeteaduse areng soosib üha rohkem kasutama tehisintellekti tuulikute rikete diagnoosimiseks [9], [10], seda soovitus on ka käesoleva magistr töö autor äriprobleemile lahenduse leidmisel arvesse võtnud.

Magistr töö läbi viimiseks kasutab autor äri- ja süsteemianalüüsi ning lähtub TOGAF raamistiku võimekuste põhisest planeerimisest [11]. Ärianalüüsi koostamisel on aluseks

võetud BABOK [12] ja CBOK [13] juhendite soovitusi ning projektiplaani ja -riskide hindamisel arvestati PMBOK [14] manuaalis toodud põhimõtetega.

Esmalt tuvastatakse äriprobleemi ja hinnatakse selle mõju ettevõtte tootmistulemusele. Seejärel analüüsitakse olemasolevat äriprotsessi ja äriprotsessi tagamiseks kasutusel olevaid IT lahendusi, et tuvastada protsessi puudused ja kitsaskohad. Pärast seda töötatakse välja uus äriprotsess äriprobleemi võimalikuks lahendamiseks ning kaardistatakse ära uue äriprotsessi toimimiseks vajalikud olemasolevad ja puuduvad võimekused. Puuduv võimekus planeeritakse arendada läbi IT lahenduse ja selleks kirjeldatakse loodava IT lahenduse nõuded, arhitektuur ja disain. Viimane tegevus on loodava lahenduse IT projekti riskide hindamine ja ajaplaani koostamine uuele protsessile üleminekuks.

Meetodite valikul on arvestatud sellega, et töö materjalide alusel saaks käivitada ja läbi viia arendusprojekti uue äriprotsessi juurutamiseks. Eeltoodust tulenevalt on valitud ärianalüüsi sooritamiseks meetodid:

- äriprobleemi ja -nõuete analüüs ning projektijuhtimise tööriistad:
 - äriprobleemi tuvastamine (viie miksi meetod [15], ebasoovitavate ilmingute konfliktidiagramm [16]);
 - äriprobleemi finantsmõju hindamine;
 - äriprobleemi ja lahenduse koondülevaade (äri lõuendi diagramm) [17];
 - gap analüüs olemasolevate ja puuduvate võimekuste esitamiseks [11];
 - väärtusvoo kaardistus illustreerimaks, kuidas uus protsess sidusrühmale väärtust loob [18];
 - projektiplaani Gantti graafik ja riskide hindamine [14].

- äriprotsesside analüüs (äriprotsessi SIPOC¹ diagramm, äriprotsessi voodiagramm, äriprotsessi joonised, intervjuud äriprotsessis osalevate töötajatega) peamise käideldavust mõjutava protsessi ja selle protsessi puuduste tuvastamiseks;
- äriprotsesside modelleerimine (BPMN²) uue äriprotsessi kirjeldamiseks;
- kontekstuaalne ja esimese tasandi andmevoodiagramm andmaks ülevaate andmevoogudest süsteemi ja süsteemiga seotud osapoolte vahel;
- ontoloogia ja äriinfo mudel UML³ notatsioonis.

Süsteemianalüüsi meetoditeks on valitud:

- kasutusmallide mudel UML notatsioonis ja kirjeldused;
- MoSCoW⁴ nõuete prioriseerimiseks ja FURPS+⁵ nõuete klassifitseerimiseks;
- IT arhitektuuri mudelid Archimate⁶ (motivatsiooni ja strateegia kihi mudel, kihiline mudel) ja UML notatsioonis (komponentide mudel, järgnevusdiagramm, evitusdiagramm);
- relatsiooniline ja dimensionaalne olemi-suhte mudel UML notatsioonis.

¹ <https://kanbantool.com/kanban-guide/what-is-sipoc>

² <https://www.visual-paradigm.com/guide/bpmn/what-is-bpmn/>

³ <https://www.visual-paradigm.com/guide/uml-unified-modeling-language/what-is-uml/>

⁴ <https://businessanalysttraininghyderabad.wordpress.com/2014/08/05/moscow-prioritization-technique/>

⁵ <https://businessanalysttraininghyderabad.wordpress.com/2014/08/05/what-is-furps/>

⁶ <https://www.opengroup.org/archimate-forum/archimate-overview>

2.2 Üldine äriprobleemi sõnastus

Kuna tuulikud töötavad muutlikes keskkonnatingimustes varieeruvad ka neile mõjuvad koormused pidevalt. Seadmete mehaanilise kulumise tagajärjel tekkinud rikked põhjustavad reeglina pikki seisakuid ja toovad kaasa suured hoolduskulud. See kehtib eriti tuulikutele, mis asuvad raskesti ligipääsetavates kohtades, näiteks avamerel. Paljud rikked ei juhtu äkilise sündmuse tagajärjel, vaid tulenevad pigem pidevast kulumisest. Monitoorides tuuliku erinevate komponentide seisundeid on võimalik tuvastada seadme degradeerumine varases staadiumis ja vältida tõsiste tagajärgedega rikkeid [19], lisaks on see ka üks kõige kulutõhusamaid hoolduse korraldamise tehnikaid [20].

Tuuliku peakomponentide rikete korral esinevad pikad tootmisseisakud ka Enefit Green AS-is, mille tõttu jääb suur kogus toodangut tootmata. Tootmiskadu omab negatiivset mõju ettevõtte tootmistulemusele ja seega mõjutab äritulemust tootmata jäänud toodangu ulatuses. Kuna tootmiskadu on otseselt rahaliselt hinnatav, tuleb see välja arvutada. Probleemi ärimõju suurus on aluseks parendustegevuste projektide prioriseerimisel.

Pikad tootmisseisakud esinevad peamiselt ühe tehnoloogiaga tuuleparkidel, mille käideldavus on teiste tehnoloogiatega võrreldes madalam. Tabelis 1 on toodud ettevõtte tuuleparkide käideldavused tehnoloogiapõhises võrdluses.

Tabel 1. Enefit Green tuuleparkide käideldavus [4].

Tehnoloogia	PBA 2018	PBA 2019	PBA 2020
Tehnoloogia 1	98,6 %	97,8 %	98,9 %
Tehnoloogia 2	96,3 %	97,4 %	96,9 %
Tehnoloogia 3	78,3 %	89,5 %	89,7 %
Tehnoloogia 4	97,1 %	98,7 %	98,0 %
Tehnoloogia 5	98,0 %	99,2 %	98,2 %
Portfelli keskmine	93,2 %	96,0 %	96,1 %
Portfelli keskmine ilma Tehnoloogia 3 tuuleparkideta	97,2%	97,7%	98,0%

Tabelis 1 toodud andmed viitavad kolmanda tehnoloogiaga tuuleparkide oluliselt madalamale käideldavusele teiste tehnoloogiatega võrreldes. Kuigi kolmanda tehnoloogia tuuleparkide käideldavus on 2019 ja 2020 aastal 2018 aastaga võrreldes

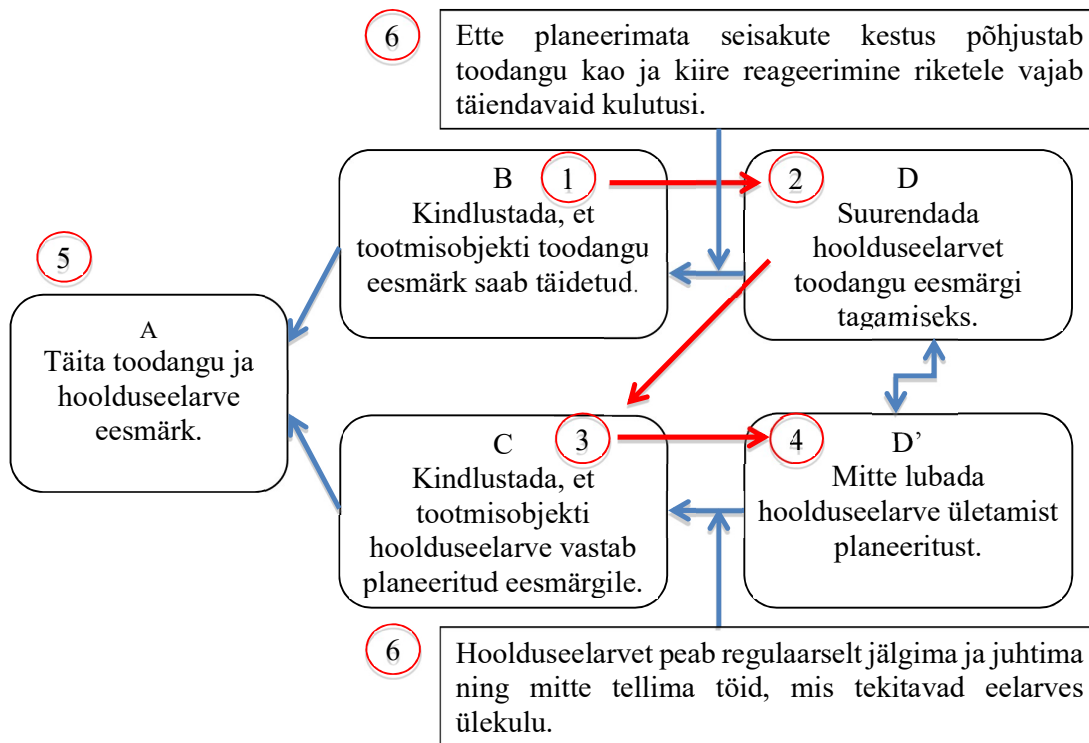
märkimisväärse kasvu teinud, jääb see endiselt alla teiste tehnoloogiate käideldavusele. Täiendavalt on tabelis 1 esitatud tuuleparkide käideldavus ilma tehnoloogia 3 tuuleparke arvestamata ja sellisel juhul on käideldavuse tase üle 97%-i, mis viitab teiste tuuleparkide väga heale käideldavusele. Tuuleenergia tööstuses loetakse standardijärgseks käideldavuse referentsiks 97%.

Magistritöö äriprobleem on *ettevõtte kolmanda tehnoloogi tuuleparkide madalam käideldavus teiste tehnoloogiatega võrreldes* ning **eesmärk** on *leida lahendus käideldavuse kasvuks*. Tuulikute käideldavus on ja jääb üheks oluliseks võtmemõõdikuks tuulikute omanikule, operaatoritele ja tootjatele [21]. Parema tootmistulemuse tagamine läbi seadmete seisundi jälgimise on leidnud kinnitust pöörlevatel masinatel üldistatult [22] ja spetsiaalselt ka tuulikutel [23].

2.3 Detailne äriprobleemi kirjeldus

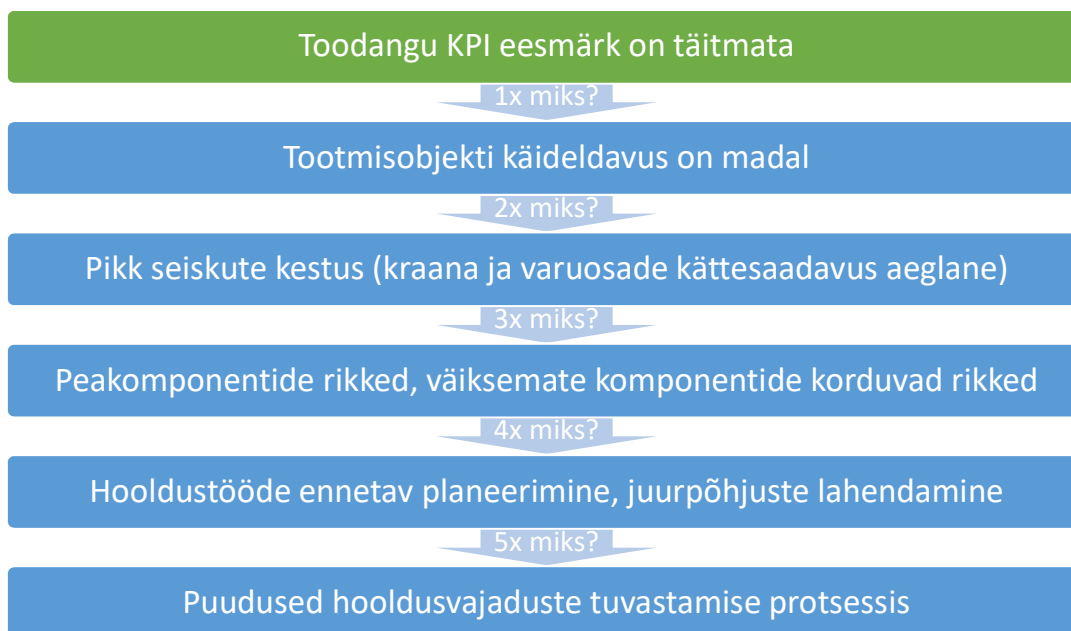
Probleemi detailsemaks kirjeldamiseks on vajalik jõuda selle juurpõhjusteni ja antud tegevuse sooritamiseks kasutab autor kahte probleemi analüüsi meetodit.

- A. Ebasoovitavate ilmingute tuvastamine ja nende analüüsimine konfliktidiagrammi kasutades on esitatud joonisel 8.



Joonis 8. Ebasoovitavad ilmingud konfliktidiagrammil.

B. „Viie miksi“ meetod, mis pärineb Taiichi Ohno poolt kirjeldatud ning täna Six Sigma, Lean ja Kaizen metoodikates laialdaselt kasutatud metoodikaga on esitatud joonisel 9.



Joonis 9. Probleemi juurpõhjuste analüüs "Viie miksi" meetodiga.

Kahe meetodi tulemuste põhjal järeltab autor, et **probleemi algpõhjuseks on ebapiisav hooldusvajaduste tuvastamine**. Probleemi lahendamiseks ei kaaluta hoolduseelarve kasvu, kuna see läheks vastuollu ettevõtte varahalduse eesmärgiga hoolduskulusid vähendada [24]. Lisaks ei oleks hoolduseelarve suurendamine mõistlik ka seepärast, et see vähendaks käideldavuse kasvust loodavat lisaväärtust. Eesmärk on leida probleemile lahendus läbi digitaliseerimise võimekuse.

Peakomponendi reaktiivse hoolduse korral mõjutab seisaku kestust enim varuosade, kraana ja hoolduspartneri kättesaadavus. Hooldustöid ennetavalt planeerides on võimalik seisaku kestust minimeerida kuni hooldustöö tegeliku läbiviimise ajani ehk läbi ennetava planeerimise saab tootmiseadme kättesaadavust suurendada.

Praegu kasutatakse tuuleenergiatööstuses peamiselt regulaarset hooldust [25] ja kui tuuleturbiinis tekib märkimisväärne kahju, mis muudab selle opereerimatuks, reaktiivset hooldust, mis aga ei ole tõhus meede [26]. Hooldusvajadus võiks põhineda tegelikul tuuliku seisukorral. Uued lähenemisviisid, mis pakuvad ennustava hoolduse lahendusi, ongi esile kerkinud nii akadeemilises kui ka tööstuse ringkonnas [27].

Kogu hoolduskuludest umbes 25% ~ 35% on seotud regulaarselt kavandatud ennetava hooldusega ja 65% ~ 75% moodustab plaaniväline korrigeeriv hooldus [28]. Opereerimise ja hoolduse kulud ulatuvad kuni 30%-ni kogu tuuleenergia tootmise kuludest [29]–[31], [32], [33].

Võrreldes tuuleturbiini traditsioonilise soojus- ja hüdroelektrijaamaga on tuuleturbiinide rikke esinemissagedus suhteliselt kõrgem tulenevalt väga muutlikest opereerimistingimustest ja karmimast keskkonnast, millest tulenevalt vajavad tuulikud ka ülevaatusi ja hooldusi sagedamini [29].

Rikkeid prognoositakse tavaliselt CMS abil, mis kasutab vibratsiooni- või õliosakeste taseme andurite mõõteandmeid [33]– [35], [36]. Seda tüüpi süsteemid on olnud edukad ka teistes tööstusharudes võimaldades vähendada hoolduskulusid kuni 20% [37]. Kuna tuulikud töötavad suhteliselt madalal ja muutuval kiirusel on CMS signaale raskem tõlgendada ning korrektse analüüsi saamiseks on vaja kogunud eksperti. Artikli [38] autorid esitasid põhjaliku tuuliku olemasolevate seiretehnikate analüüsi, CMS osas rõhutasid nad peamiste väljakutsetena: finantskulud, tulemuste tõlgendamise mitmekesisus ja integratsioon olemasolevate seiresüsteemidega ning selle skaleeritavus.

Eelnevalt tulenevalt ei ole CMS kasutamine tuulikutes nii tõestatud kui teistes tööstustes [39].

Tuuliku järelejäänud kasuliku eluea kindlaksmääramiseks on kasutatud Scada alarme ja sündmusi [40]. Artiklis [41] analüüsitakse häirete ajalist järjestust, et tuvastada erinevate häirete omavahelisi seoseid, määrates põhjuslikud seosed erinevate sündmuste vahel ja aidates seeläbi tuvastada rikete algpõhjust.

Eelnevalt toodud põhjustel pakuvad Scada andmete kasutamisel põhinevad lahendused suurt huvi just vanemate turbiinide omanikele, kuna puudub täiendavate andurite paigaldamise vajadus [19]. Väärtust luuakse andmebaasi salvestatud Scada andmetest [23], [27].

Vastavalt General Electricu¹ aruandele [42] võib õigeaegselt sooritamata, 5 000 dollarit maksva, laagri asendamine muutuda 250 000 dollari suuruseks projektiks hõlmates kraanasid, eritöid teostavat hooldusmeeskonda, käigukasti vahetamist ja generaatori mähkimist.

Kasvav vajadus hoolduskulude vähendamise järele on küllaldaselt tõestatud. Selle eesmärgi saavutamiseks tuleb hooldusstrateegiad optimeerida. Uus trend viitab seisukorrapõhisele hooldusele, kus seisukorra monitoorimine määrab optimaalse punkti planeeritud ja mitteplaneeritud hoolduse vahel [43].

2.4 Äriprobleemi mõju tootmise KPI-le

Tootmisüksuse kaks olulisemat KPI-d on:

- elektrienergia toodang;
- tootmiseadme käideldavus.

Toodang sõltub peamiselt kahest tegurist:

¹ <https://www.ge.com/>

- valitsevad tuuleolud, mida pole võimalik mõjutada;
- tootmiseadme töökindlus, mida on võimalik mõjutada läbi varahalduse protsesside.

Läbi äriprotsessi täiendamise on võimalik käideldavust mõjutada ning see omakorda tagab suurema toodangu.

Tulenevalt TP3 tootmiseadmete madalast käideldavusest jääb ettevõttel aastas tootmata 9,5 GWh elektrienergiat, mille väärtus 2020 keskmise turuhinna¹ ja taastuenergia toetuse² juures on 0,8 M€ aastas. Viie aasta kohta lisanduks läbi käideldavuse kasvu tekkinud toodangu müügist tulu 4,2 M€. Tulenevalt probleemi suurest mõjust ettevõtte finantstulemusele on probleemile lahenduse leidmine vajalik ja prioriteetne eesmärk. Probleemi väärtusloome hinnang TP3 tootmiseadmetele käideldavuse eesmärgi saavutamise korral on esitatud tabelis 2.

Tabel 2. TP3 tootmiseadmete käideldavuse kasvu lisaväärtus [5].

Mõõdik	2020 tegelik tulemus (referentsaasta)	2021-2025 eesmärk	Lisaväärtus aasta kohta	Lisaväärtus 2021-2025 perioodil kokku
Käideldavus, %	89,7 %	93,7 %	+ 4,0 %	+ 4,0 %
Käideldavusele vastav toodang, GWh	199,581 GWh	209,125 GWh	+ 9,544 GWh	+ 47,720 GWh
Toodangu rahaline väärtus, M€	17,441 M€	18,275 M€	+ 0,834 M€	+ 4,17 M€

¹ 2020 aasta NordPool Eesti piirkonna turuhind 33,69 €/MWh

² Taastuenergia toetuse määr 53,7 €/MWh

2.5 Äriprobleemi seos ettevõtte strateegiaga

Mõistmaks äriprobleemi suurust uurib autor selle seost ettevõtte strateegiaga. Enefit Green AS strateegilised eesmärgid on esitatud joonisel 3. Käesoleva töö äriprobleem on otseselt seotud ettevõtte strateegilise eesmärgi, „Tootmise efektiivne juhtimine“, tagamise panustava programmiga – ennustava hoolduse võimekus. Seega omab äriprobleemile lahenduse leidmine mõju ka ettevõtte strateegia elluviimisel. Märkimist väärib ka ettevõtte tuuleenergia tootmisportfelli üle 50%-ne kasv strateegiaperioodil käesolevaga võrreldes ning seda enam omab äriprobleemile lahenduse leidmine positiivset mõju strateegiale.

2.6 Äriprobleemi koondülevaade

Äriprobleemi koondülevaade on esitatud tabelis 3.

Tabel 3. Äriprobleemi koondülevaade.

Probleemi kirjeldus	Tagajärg	Probleemi finantsmõju
TP3 käideldavus aastas 4% alla eesmärgi	9,5 GWh tootmata toodangut aastas	0,8 M€ väiksem aastane käive

TP3 tuuleparkide 4% eesmärgist madalam käideldavus tähendab 9,5 GWh kaotatud toodangut aasta kohta, mille müügitulu väärtus on 0,8 M€.

3 AS-IS analüüs

3.1 Ärianalüüs

Ennustava hoolduse võimekuse loomine kuulub ettevõtte varahalduse funktsiooni alla ja seega on vaja saada esmalt ülevaade kehtivatest varahalduse protsessidest. Tuleb välja selgitada, millised protsessid omavad mõju tuuleparkide käideldavusele ning mis rollid ja infosüsteemid on nende protsessid toimikseks vajalikud.

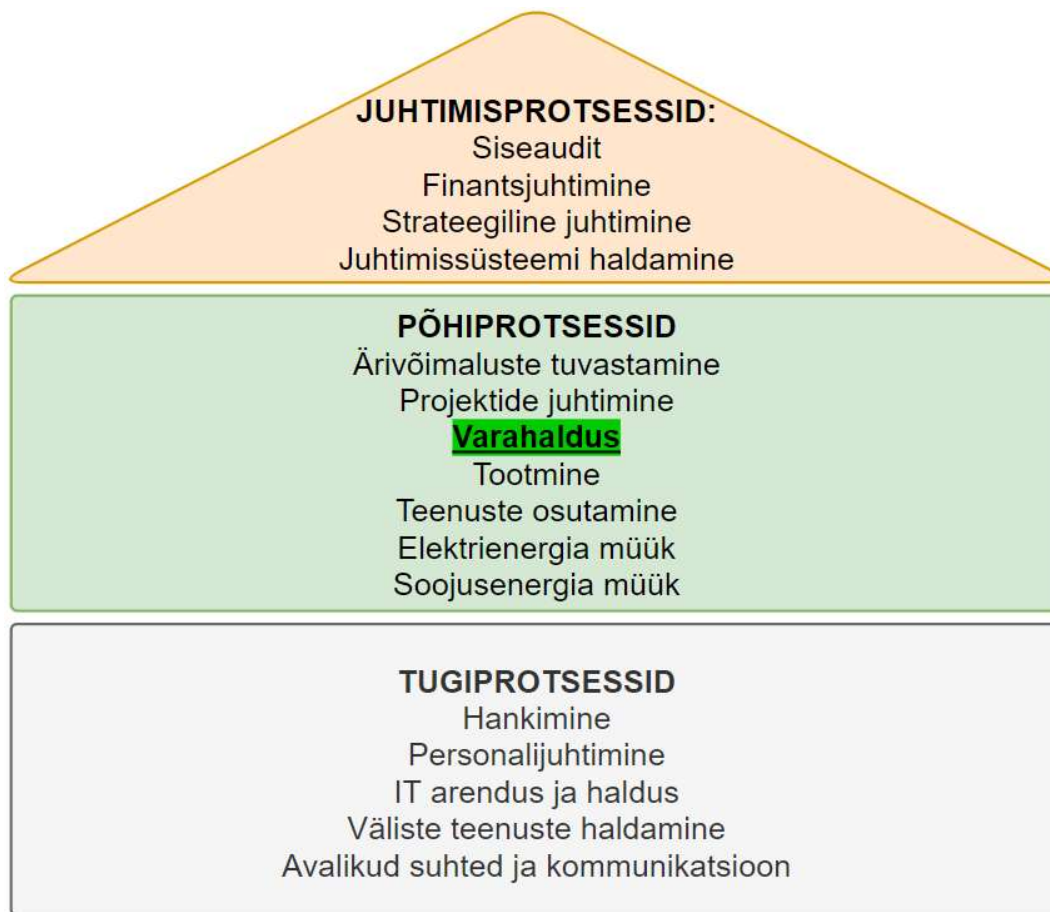
Protsesside kaardistamine on kasulik ühise arusaama tekitamiseks äri ja IT töötajate vahel. Protsess näib mängivat järjest suuremat rolli tulevikuaruteludes äri- ja IT-juhtide vahel [44].

Eksisteerib erinevaid raamistikke ja meetodikaid, mis keskenduvad protsesside analüüsimisele ja parendamisele, näiteks Six Sigma ja Lean. Protsessi analüüsimisel soovitatakse uurida järgmist:

- kuidas protsess lisab või loob organisatsioonile väärtust;
- kuidas protsess joondub organisatsiooni eesmärkide ja strateegiaga;
- millises ulatuses protsess on ja peab olema tõhus, tulemuslik, korduv, mõõdetud, kontrollitud, kasutatud ja läbipaistev;
- kuidas loodava lahenduse nõuded katavad tulevast protsessi ja selle välised sidusrühmi sealhulgas kliente [45].

3.1.1 I taseme protsesside ülevaade

Kõigepealt kirjeldatakse ettevõtte I taseme protsessid, mis on esitatud joonisel 10. Tootmisseadmete käideldavust mõjutab ettevõtte üks põhiprotsessidest – Varahaldus.



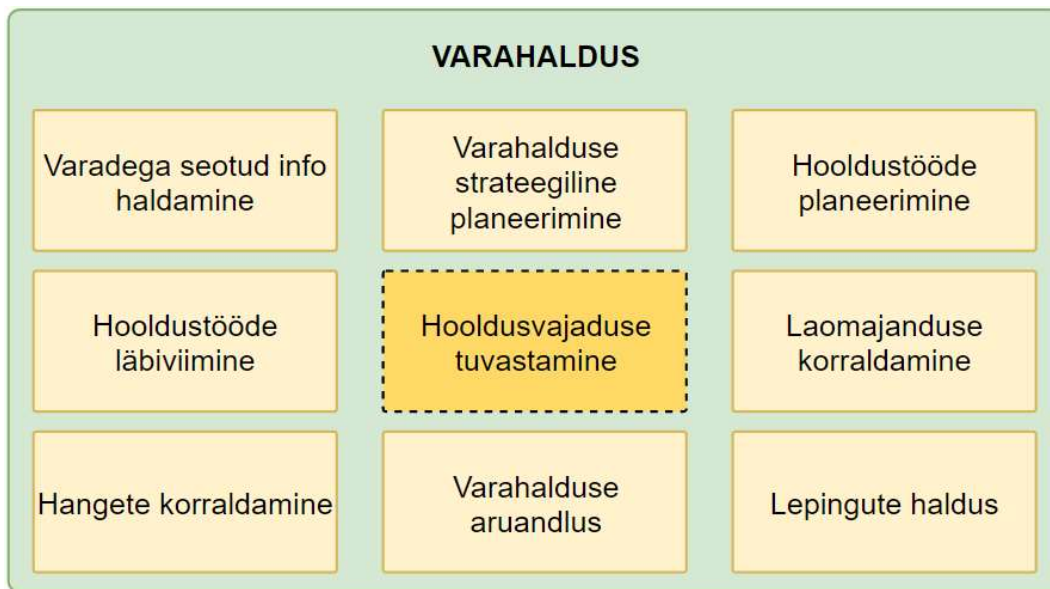
Joonis 10. Ettevõtte I taseme protsessid.

3.1.2 Ettevõtte teise taseme protsessid – Varahaldus

Ettevõtte Varahalduse protsessid on esitatud joonisel 11. Toodud protsessidest omavad käideldavusele mõju Hooldustööde planeerimine ja läbiviimine, Laomajanduse korraldamine ja Hooldusvajaduse tuvastamine. Magistritöös käsitletava probleemi seisukohast omab suurimat mõju viimati nimetatud, Hooldusvajaduse tuvastamine, protsess ja selle sisu selgub antud protsessi täpsemal uurimisel järgmises peatükis. Hooldusvajaduse ennetav tuvastamine võimaldab seisaku kestust lühendada läbi parema planeerimise. Järgmised tegevused võimaldavad vähendada toodangu kadu läbi lühema hoolduse teostamise aja:

- vajalike varuosade hankimine;
- kraana planeerimine tõstetöödeks;
- hooldusmeekonna reserveerimine hoolduse läbiviimiseks.

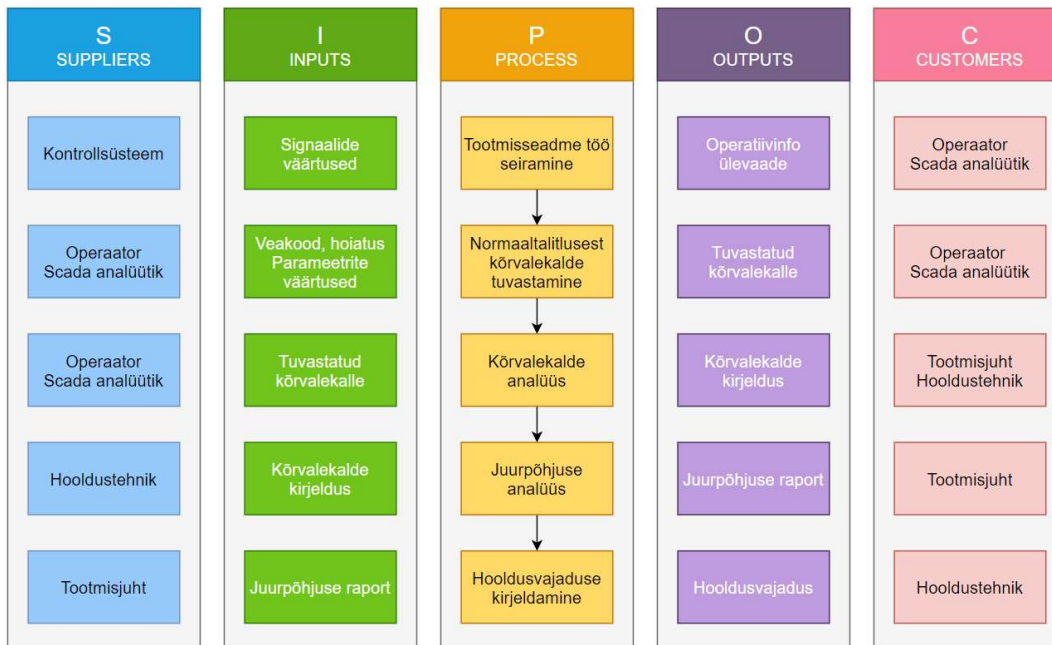
Toodangu kadu aitab lisaks minimeerida hooldustööde sooritamine tuulevaiksel perioodil.



Joonis 11. Ettevõtte varahalduse protsessid.

3.1.3 SIPOC – Hooldusvajaduse tuvastamine

Joonisel 12 on kirjeldatud hooldusvajaduse tuvastamise protsess SIPOC meetodil. Antud tehnika protsessi analüüsimiseks pärineb algselt Six Sigma metoodikast, kuid sagedamini on seda kasutatud protsessianalüüsi meetodina väljaspool Six Sigma. Seda kasutatakse protsessi vaatamiseks ja arusaama tekitamiseks analüüsitava protsessi tarnijatest, sisenditest, protsessi sammudest, väljunditest ja klientidest. SIPOC annab lihtsa ülevaate protsessist, kuid samas näitab ka kes ja mis on seotud protsessi sisendite loomisega ja kes saab kasutada protsessi väljundeid. SIPOC on võimas tööriist, mida kasutatakse dialoogi tekitamiseks probleemide, võimaluste, lünkade, juurpõhjuste, võimaluste ning protsessi alternatiivide analüüsimiseks [45].



Joonis 12. Hooldusvajaduse tuvastamise protsessi SIPOC diagramm.

Täpsemaks protsessi analüüsimiseks on vajalik tutvuda protsessis osalevate rollide kirjeldustega, mis on esitatud tabelis 4.

Tabel 4. HVT protsessil osalevate rollide kirjeldused.

Roll	Rolli kirjeldus
Operaator	Tootmiseseadmete opereerimise tagamine. Tootmiseseadme alarmide ja hoiatuste monitoorimine. Kõrvalekallete esinemisel tootmiseseadmete töös hoidmise hindamine ja hooldusvajaduste edastamine hooldusettevõttele.
Scada analüütik	Tootmiseseadmete mõju analüüsimine tootmistulemusele. Tootmiseseadme parameetri trendide analüüsimine rikete ennetamiseks.
Tootmisjuht	Tootmiseseadmete hooldustegevuse korraldamine (hoolduspõhimõtted, hoolduspartnerite töö kvaliteedi jälgimine, lepingute täitmise jälgimine).
Hooldusettevõtte	Hoolduslepingu täitmine.
Hooldustehnik	Hoolduse teostaja.
Varahalduse analüütik	Varadega seotud info haldamine ja hooldustegevuse aruandlus.

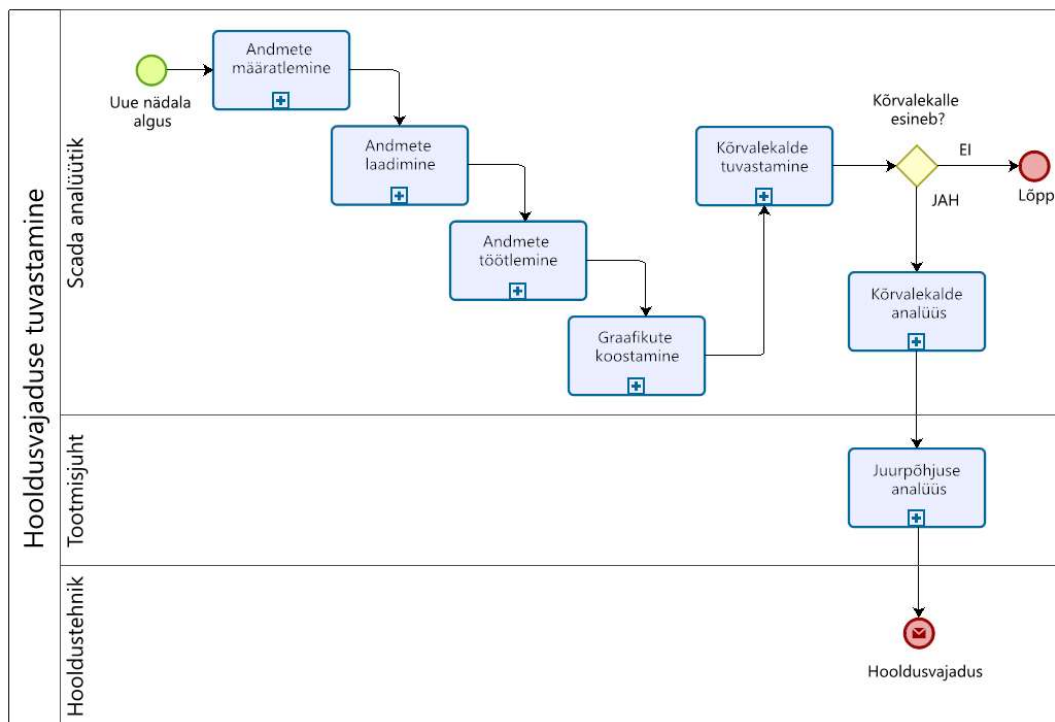
SIPOC diagrammi ja rollide kirjelduste põhjal selgub, et hooldusvajaduse tuvastamisega tegeleb operaator ja Scada analüütik. Operaatori vastutusse kuulub hooldusvajaduse

tuvastamine lühiperioodi alarmide ja hoiatuste logi põhjal. Operaatori peamine eesmärk on kiire reageerimine alarmidele selgitamaks välja kas tuuliku saab kaugjuhtimisega tagasi töösse viia või tuleb saata hooldustehnik tuulikusse seadmete töökorrasoleku kontrolli sooritama. Alarmid tähendavad aga reeglina mitteplaneeritud seisakuid ja nende lahendamist reaktiivselt¹. Kuna operaatori vastutusse parameetri pikaajsete trendide jälgimine ei kuulu, puudub antud rollil trendidel põhineva hooldusvajaduse ennetava tuvastamisega seos.

Seega on hooldusvajaduse ennetav tuvastamine, antud töö skoobist lähtuvalt, Scada analüütiku vastutusalas. Järgnevalt uurime olemasolevat töökorraldust äriprotsessi joonistelt.

3.1.4 Ennustava hoolduse voodiagramm

Ennustava hoolduse põhiprotsessi voodiagramm on esitatud joonisel 13.

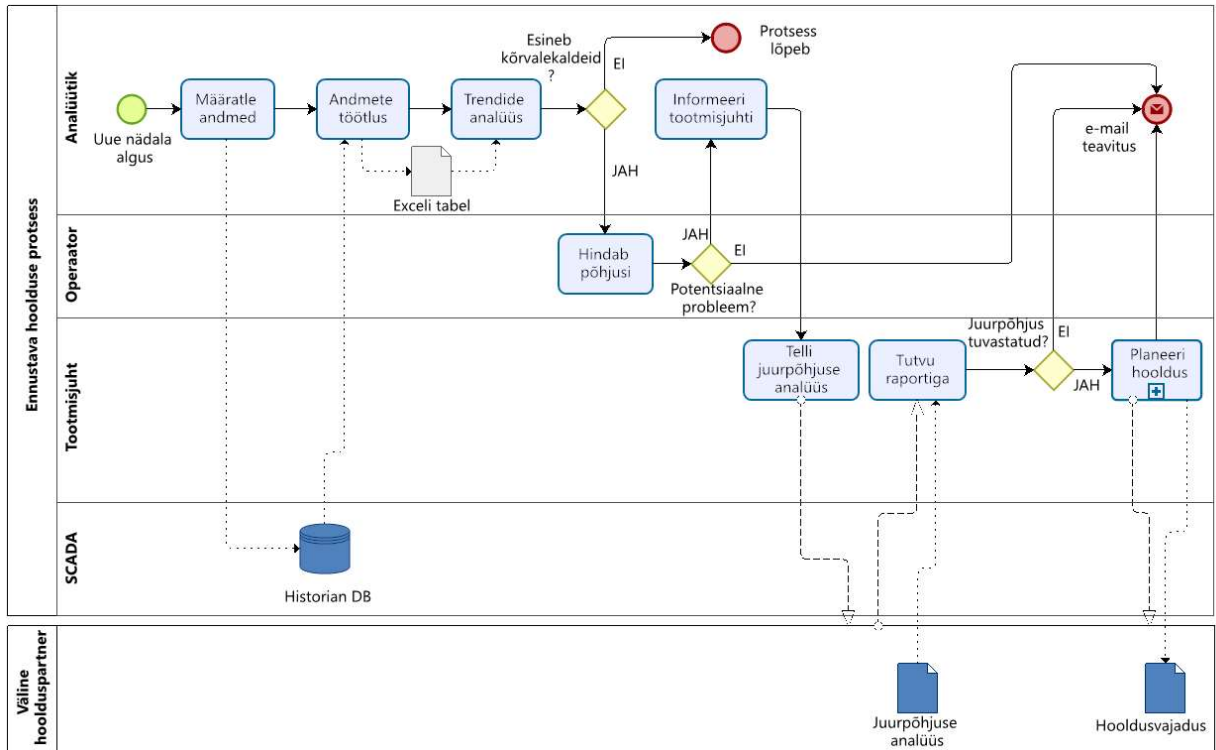


¹ Seisakuga tegeletakse selle ilmumise järgselt ja see ei olnud ette planeeritud.

Joonis 13. Ennustava hoolduse AS-IS voodiagramm.

3.1.5 Ennustava hoolduse protsess

Joonisel 14 on toodud olemasolev Ennustava hoolduse äriprotsess. Protsessi modelleerimiseks on valitud BPMN, sest antud notatsioon on kasutusel nii äri- kui ka infotehnoloogia valdkonnas ja seda võetakse üha enam kasutusele kui valdkonna standard [45].



Joonis 14. Ennustava hoolduse AS-IS äriprotsess.

Enne kui autor asub uurima põhjuseid, millest tulenevalt hooldusvajaduse tuvastamise protsess ei toimi, kaardistatakse lisainfo saamiseks olemasolev varahalduse IT lahenduste arhitektuur ja koostatakse kasutusmallide mudel peamise hooldusvajaduse tuvastamise protsessi toimimiseks kasutusel oleva infosüsteemi kohta koos trendide analüüsi kasutusloo kirjeldamisega.

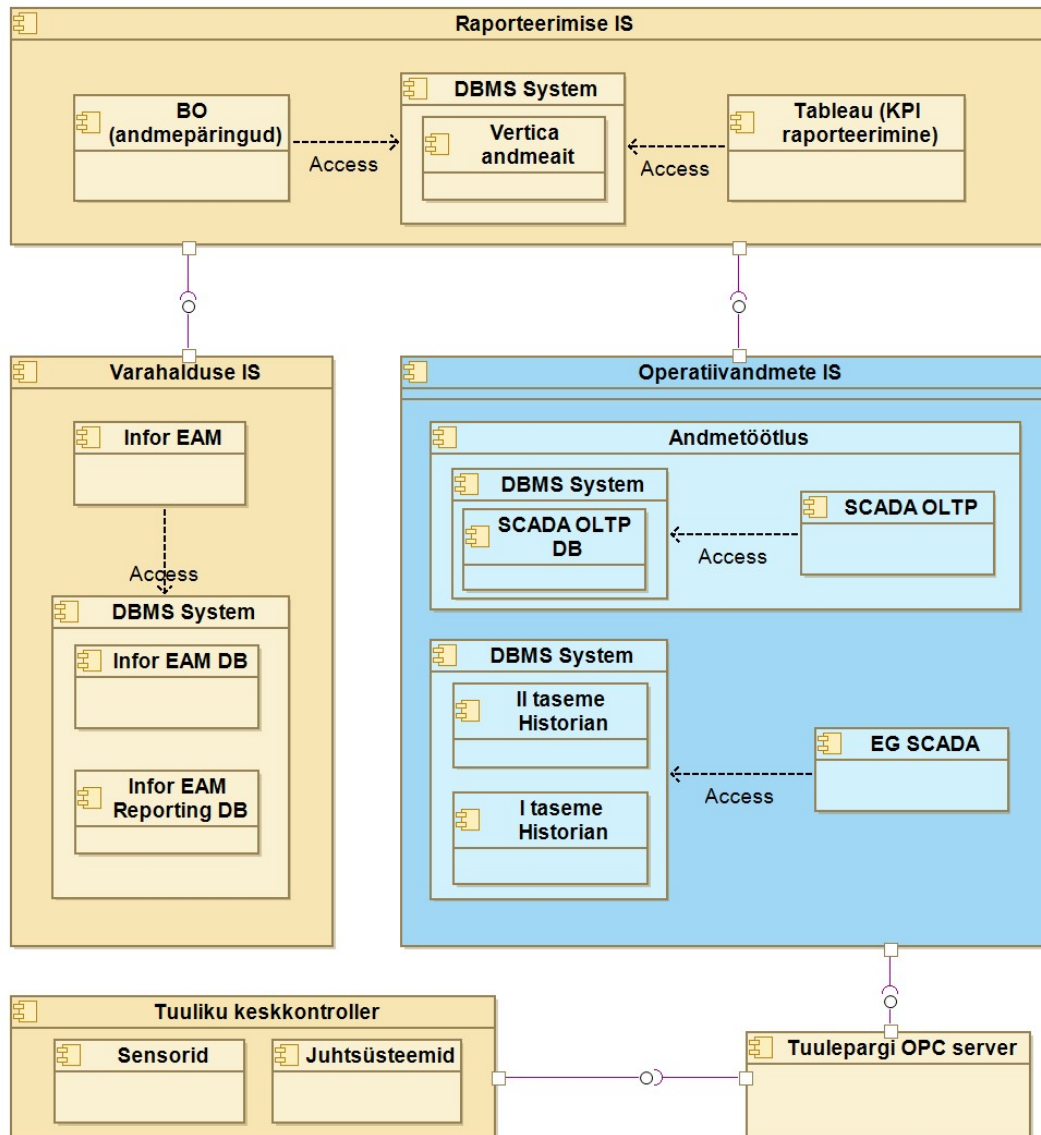
3.2 Süsteemianalüüs

Vajalik äriprotsessi ülevaate on koostatud ja järgmiseks kaardistab autor ettevõttes kasutusel olevad IT lahendused varahalduse protsessi toetamiseks. Esmalt antakse üldine ülevaade kasutusel olevatest IT lahendusest ning seejärel liigutakse detailsemale tasandile

IT süsteemi vaates, mis on oluline hooldusvajaduse tuvastamise protsessi seisukohast. Lisaks koostab autor hooldusvajaduse protsessi toimimiseks vajaliku infosüsteemi kohta kasutusmallide mudeli ja selle kasutusmalli kirjelduse, mis on seotud hooldusvajaduse tuvastamisega.

3.2.1 Varahalduse IT lahenduste arhitektuur

Joonisel 15 on kirjeldatud varahalduse protsesse toetavate infosüsteemide arhitektuur. Infosüsteemide kirjeldused on esitatud tabelis 5.



Joonis 15. Varahalduse IT arhitektuur.

Tabel 5. Varahalduse protsesse toetavad infosüsteemid.

Infosüsteem	Infosüsteemi kirjeldus
Operatiivandmete IS	Keskne tootmiseseadmete operatiivinfo monitoorimise, kogumise ja töötlemise süsteem. Võimaldab reaalajas jälgida seadmete tööparameetreid ja staatuseid ning nende salvestamist toorandmete kujul. Andmete töötlemine ja agregeerimine analüüsimiseks ja ettevalmistus raporteerimiseks.
Varahalduse IS	Tootmisvarade ja seadmete dokumenteerimise ning hooldustegevuse korraldamise ja jäädvustamise infosüsteem. Võimaldab ettevõtte tootmisvarade struktuurset kirjeldamist ja vajaliku info talletamist. Hooldustegevuse planeerimine, läbiviimine ja sooritatud tööde kohta info salvestamine.
Raporteerimise IS	Protsesside võtmemõõdikute ja raportite kuvamise keskkond.

Hooldusvajaduse tuvastamise protsessiga antud töö vaatest on oluline Operatiivandmete IS. Järgnevalt uurime täpsemalt, kuidas seda süsteemi hooldusvajaduse tuvastamiseks kasutatakse. Kuigi Varahalduse IS on ka seotud hooldusvajaduse tuvastamise protsessiga, kasutatakse viimati nimetatud infosüsteemi tuuleparkides planeeritud¹ ja reaktiivse hoolduse korraldamiseks ja ei kuulu antud töö skoopi.

Siinkohal on oluline välja tuua, et kasutusel olev keskne Operatiivandmete IS kogub kokku andmed iga tuulepargi kohalikust Scada süsteemist, mis reeglina eksisteerivad igal tuulikul [33]. Scada andmete olemasolu võimaldab rikete ennustamist läbi olemasolevate andmete kasutamise ja ei vaja täiendavaid investeeringuid riistvarasse [19], [21], [46]. Scada andmete kasutamiseks rikete ennustamisel on tehtud palju jõupingutusi, mille kohta annab põhjaliku ülevaate artikkel [47]. Üks viis seda teha on tuvastada erinevusi turbiini parameetrite trende analüüsides [46]. Parameetri trendide võrdlemine [48] hõlmab tavaliselt ühe tuuliku andmete võrdlemist teise tuulikuga või ühe perioodi võrdlust teise ajavahemiku vastu. Näiteks kui käigukasti temperatuur ühel turbiinil tõuseb

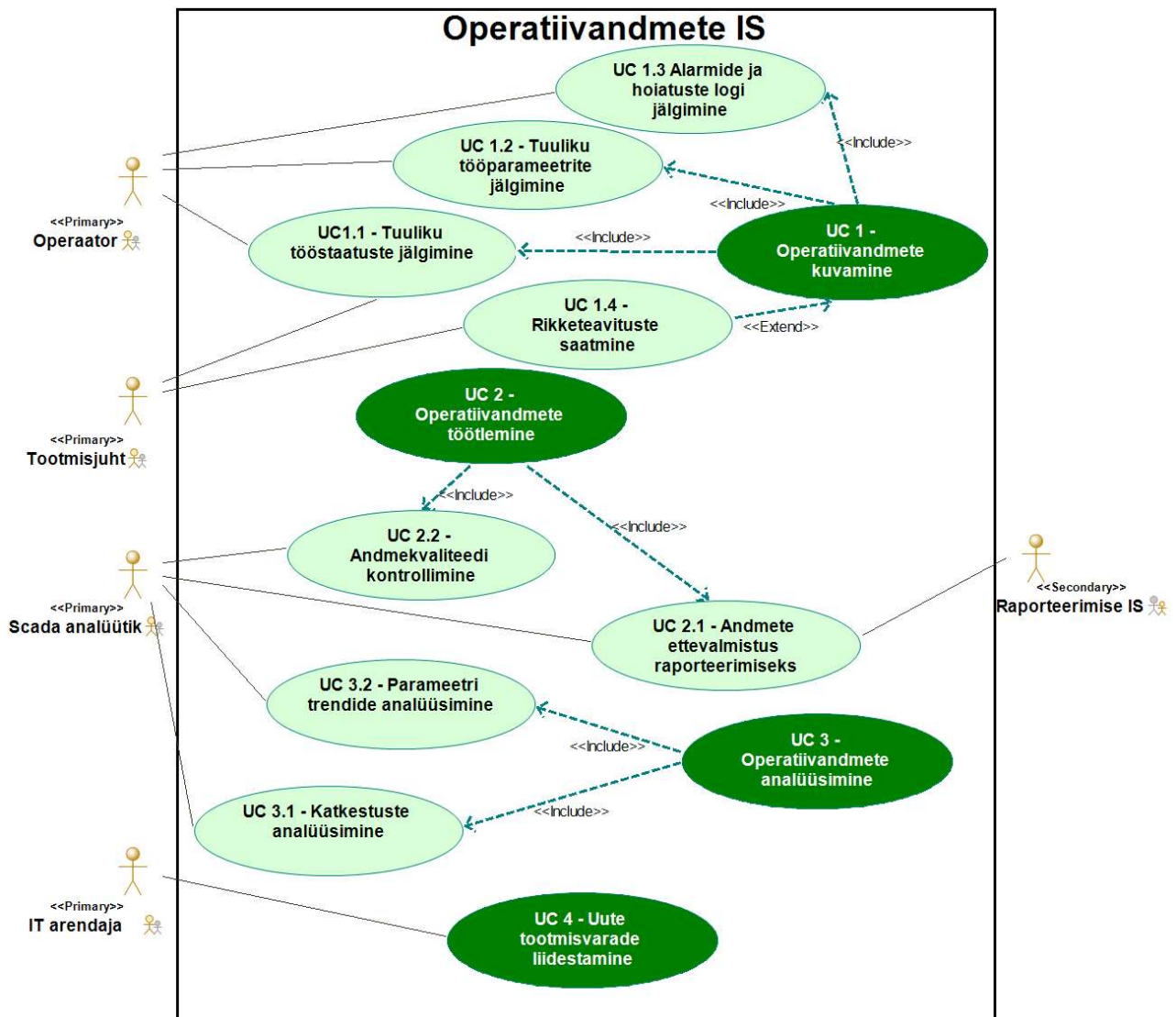
¹ Planeeritud regulaarne hooldus vastavalt tootjatehase soovitudele

võrreldes naabriga, võib see viidata eelseisvale rikkele [21]. Parameetri trendidel põhinevat võrdlust ongi tänaseni Scada analüütik sooritanud.

Artikli [21] kohaselt on üks parimatest võimalustest rikete ennustamiseks kasutada masinõppe algoritme, mis põhinevad tuuliku Scada andmetel [43].

3.2.2 Operatiivandmete infosüsteemi kasutusmallide mudel

Operatiivandmete infosüsteemi kasutusmallide mudel on toodud joonisel 16.



Joonis 16. Operatiivandmete infosüsteemi kasutusmallide mudel.

Operatiivandmete analüüsimisega, mis sisaldab katkestuste analüüsimist ja parameetrite trendide jälgimist, tegeleb Scada analüütik. Ennustava hooldusega on enim seotud UC

3.2. Kuidas parameetri trendide jälgimine täpsemalt toimub, sellest annab ülevaate tabelis 6 toodud UC 3.2 kasutusloo kirjeldus.

Tabel 6. Parameetri trendide jälgimise kasutusloo kirjeldus.

Nimi	UC 3.2 Parameetri trendide jälgimine
Eesmärk	Tuuliku hooldusvajaduse ennetav tuvastamine läbi tootmisseedme parameetrite erinevuse teiste sama tuulepargi tuulikutega võrreldes
Tulemus	Tuuliku hooldusvajadus on enne rikke juhtumist tuvastatud ja info hooldusvajaduse kohta tootmisjuhile edastatud
Eeltingimus	Tuuliku parameetrite andmed on salvestatud andmebaasi ning Scada analüütik omab vajalikul tasemel tuuletehnoloogia kompetentsi
Aktorid	Scada analüütik
Peastsenaarium	<p>Kasutaja (Scada analüütik) valib kasutajaliidese menüüst soovitud parameetrid, perioodi ja andmete granulaarsuse</p> <p>Süsteem kuvab kasutajale valitud parameetrite aegrea väärtused</p> <p>Kasutaja ekspordib päringu tulemused Exceli tabelisse</p> <p>Kasutaja kuvab Exceli tabelis parameetrite väärtused joongraafikul</p> <p>Kasutaja tuvastab parameetri märgatava kõrvalekalde teiste tuulepargi tuulikutega võrreldes</p> <p>Kasutaja edastab leitud kõrvalekalde info vastutava tuulepargi tootmisjuhile e-mailiga, kuhu lisatakse tuuliku number, parameetri nimetus, graafik ja parameetri erinevuse põhjuse kirjeldus</p> <p>Tootmisjuht hindab hooldusvajaduse oluliseks ja edastab hooldustöö tellimuse hooldusettevõttele</p>
Alternatiivne stsenaarium	<p>Kasutaja (Scada analüütik) avab trendide jälgimise mooduli ja valib kasutajaliidese menüüst soovitud parameetrid ja perioodi</p> <p>Trendide moodul kuvab valitud parameetrid joongraafikus</p> <p>Kasutaja tuvastab parameetri märgatava kõrvalekalde teiste tuulepargi tuulikutega võrreldes</p> <p>Kasutaja edastab leitud kõrvalekalde info vastutava tuulepargi tootmisjuhile e-mailiga, kuhu lisatakse tuuliku number, parameetri nimetus, graafik ja parameetri erinevuse põhjuse kirjeldus</p> <p>Tootmisjuht hindab hooldusvajadust oluliseks ja edastab hooldustöö tellimuse hooldusettevõttele</p>
Järelingimus	Scada analüütik teeb logiraamatusse kirje sisestades tuuliku numbriga ja parameetri jälgimise all olevaks. Pärast hooldustööde teostamist kontrollib Scada analüütik parameetri väärtusi, tuvastab parameetri väärtused olevat teiste tuulikutega samal tasemel ning märgib logiraamatus probleemi lahendamiseks.

Nüüd on autoril olemasolev olukord vajalikul tasemel kaardistatud ja saab teha kokkuvõtte olemasoleva äriprotsessi puudustest.

3.3 Olemasoleva äriprotsessi puudused

Miks olemasolev protsess ei anna soovitud tulemust käideldavuse eesmärgi saavutamiseks, selleks analüüsis autor kolmandas peatükis kirjeldatud hooldusvajaduse tuvastamise protsessijooniseid, nendes osalevaid rollide, IT arhitektuuri ning peamise hooldusvajaduse tuvastamist võimaldava Operatiivandmete infosüsteemi kasutamist koos kasutusmallide mudeli ja kasutusloo kirjeldusega.

Autori hinnangul võiks hetkel kasutuses olev protsess toimida väikeste andmemahtude korral. Andmemahu hulk sõltub ettevõtte tootmisportfelli suuruselt ehk mida enam seadmeid, seda rohkem andmeid. Järelikult ei ole olemasoleva protsessi rakendamine suurte andmemahtude korral mõistlik ajakulust tulenevalt, puudub piisav ressurss suurte andmemahtude käsitsi töötlemiseks, kõrvalekallete tuvastamiseks ning nende haldamiseks.

Eelduste kontrollimiseks kasutab autor äriprotsesside analüüsi intervjuerimise meetodit. See on tõhus vahend protsessiosalistelt teabe kogumiseks ja protsessi analüüsi ettevalmistamiseks [49]. Kuigi hooldusvajaduse tuvastamise protsessiga on vahetult seotud ainult Scada analüütik, kaasati intervjuule ka tootmisjuhid. Tulemused on kokku võetud järgmiselt:

- andmete analüüsimine praeguste töövahenditega on ajamahukas ning kõikide seisakute juurpõhjuste väljaselgitamiseks aega ei jätku;
- peakomponentide parameetrite trende jälgitakse periooditi, seegi on hetkel kasutatavaid töövahendeid arvestades ajamahuks ning kuna süvenemiseks ei jää piisavalt aega, ei tuvastata kõike potentsiaalseid arenevaid rikkeid;
- korraga jälgitakse ainult ühe parameetri trende ehk ei võeta arvesse teiste parameetrite trende samal perioodil.

Nende kolme intervjuult saadud tagasiside põhjal on autori eeldused kinnitust leidnud. Üldistatult on probleemiks ressursipuudus vajaliku informatsiooni tuvastamiseks

operatiivandmetest. Lisaks jäävad suurte andmemahtude käsitsi analüüsimisel pahatihti paljud andmete vahelised seosed ja mustrid märkamata.

Tuuleparkide käideldavust on võimalik suurendada vähendades tootmisseisaku kestusi, seiskute esinemissagedust ning planeerides hooldused tuulevaiksele perioodile. Kõik see eeldab mitmete muutujatega põhjalikke analüüse, mille sooritamine olemasolevate vahenditega ei ole teostatav. Protsessi toimimiseks vajalik käsitöö maht on kordi suurem olemasolevast võimekusest ning muudab Scada analüütiku rollile seatud eesmärgi täitmise saavutamatuks. Käideldavuse eesmärgi tagamiseks on vajalik olemasoleva protsessi parendamine ja täiendavate võimekuste kasutusele võtmine. Milline protsess tagaks äriprobleemi lahendamise ning milliseid võimekusi selleks vaja on, kirjeldatakse järgmises peatükis.

4 TO-BE analüüs

Neljandas peatükis viib autor läbi TO-BE äri- ja süsteemianalüüsi ning kirjeldab loodava lahenduse IT arhitektuuri ja disainimudelid äriprobleemile lahenduse välja töötamiseks. Esmalt koostatakse uus äriprotsess, seejärel kaardistatakse protsessi toimimiseks vajalikud olemasolevad ja puuduvad võimekused. Edasi liigutakse äriinfo mudelite kirjeldamisega. Seejärel koostatakse kasutuslood ja nõuded uue infosüsteemi projekteerimiseks ja olemasolevatega liidestamiseks. Peatüki lõpus esitatakse loodava lahenduse IT arhitektuur ning andmebaasi koostamiseks vajalikud olemi-suhte mudelid.

4.1 Ärianalüüs

Ärianalüüsi alustatakse äriprobleemi ja lahenduse koondkokkuvõtte esitamisega ärimudeli lõuendil. Seejärel modelleeritakse välja pakutud lahendusele vastav uus äriprotsess. Pärast uue äriprotsessi koostamist kaardistatakse äriprotsessi toimimiseks vajalikud olemasolevad ja puuduvad võimkused ja antakse ülevaade uue protsessi väärtusvoost. Edasi kirjeldatakse loodava infosüsteemi kasutamisest üldise arusaama tekitamiseks andmevoo diagrammid ning seejärel koostatakse ontoloogia ja äriinfo mudelid.

4.1.1 Probleemi ärimudeli lõuend

PROBLEEM	LAHENDUS	VÄÄRTUSPAKKUMINE	EBAÕIGLANE EELIS	KLIENDISEGMNET
<p>Rikete statistikale ligipääs keeruline ja aeganõudev</p> <p>Pikad katkestused</p> <p>Ennetava hooldusvajaduse osaline tuvastamine</p> <p>Puudulik seire</p> <p>Andmetöötluse käsitöö maht</p>	<p>Ajakohased ja automatiseeritud tootmisseisakute analüüsid</p> <p>Masinõppe ja andmetöötluse kasutamine ennustava hoolduse tuvastamiseks</p> <p>Automaatsed hooldusvajaduse teavitused</p>	<p>5% rohkem toodangut</p> <p>50% vähem käsitööd</p> <p>Töötajate rahulolu kasv</p>	<p>100% automatiseeritud seisakute analüüsid</p> <p>Operatiivandmete ulatuslik väärindamine</p> <p>Motiveeritud meeskond</p> <p>Kompetentsed spetsialistid</p>	<p>Tootmisjuhid</p> <p>Varahalduse analüütikud</p> <p>Finantskontrollerid</p> <p>Ettevõtte juhtkond</p> <p>Riskiosakonna spetsialistid</p> <p>Protsessijuht</p>
<p>OLEMASOLEVAD ALTERNATIIVID</p> <p>Täiendavate mõtteandurite paigaldamine</p> <p>Tagantjärgi ühekordsed analüüsid</p> <p>Andmete käsitsi kogumine ja töötlemine</p> <p>Parameetrite trendide käsitsi jälgimine</p> <p>Lisatöötajate värbamine eesmärkide saavutamiseks</p>	<p>VÕTMEMÕÕDIKUD</p> <p>+4% kõrgem käideldavus</p> <p>+9,5 GWh suurem aastane toodang</p> <p>+0,8 M€ suurem aastane käive</p>	<p>IDEE KONTSEPT</p> <p>Andmetöötluse hooldusvajaduse tuvastamise automatiseerimine</p>	<p>KANALID</p> <p>Juhatus</p> <p>Infopäev</p> <p>Siseveeb</p>	<p>VARASED VASTUVÕTJAD</p> <p>Scada analüütik</p> <p>Tootmisjuhid</p>
<p>KULUDE STRUKTUUR (2021-2025)</p>	<p>Infosüsteemi arendus 0,5 M€</p> <p>Loogika seadistamine 0,1 M€</p> <p>Riistvara ja tarkvara haldus 0,1 M€</p>	<p>TULUVOOD (2023-2025)</p>	<p>Elektrienergia müük 2,4 M€</p> <p>Tööjõukulude vähenemine 0,07 M€</p>	

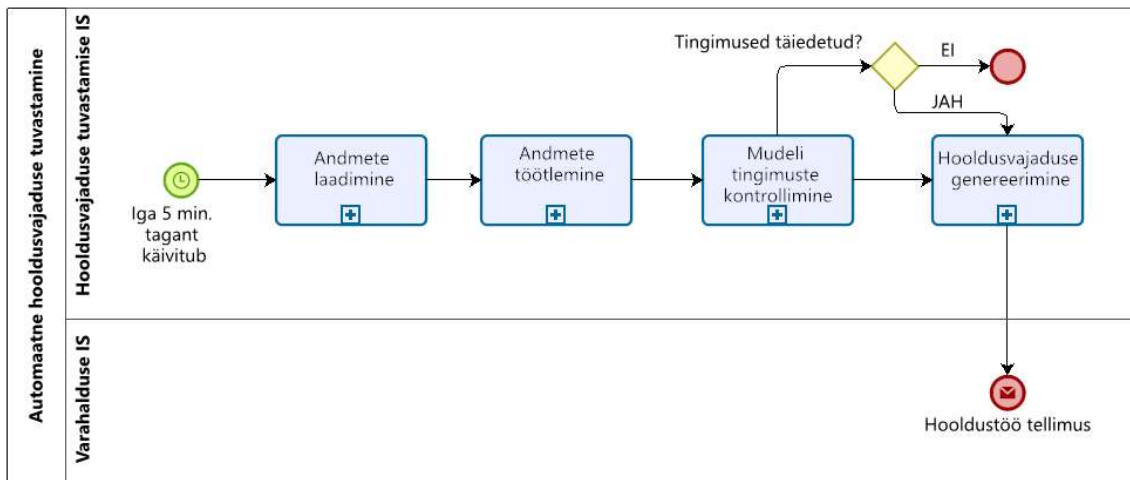
4.1.2 Uue hooldusvajaduse tuvastamise tööprotsessi modelleerimine

Hooldusvajaduse tuvastamise TO-BE protsessi voodiagramm on esitatud joonisel 17.

Hooldusvajaduse automaatse tuvastamise protsess on vajalik:

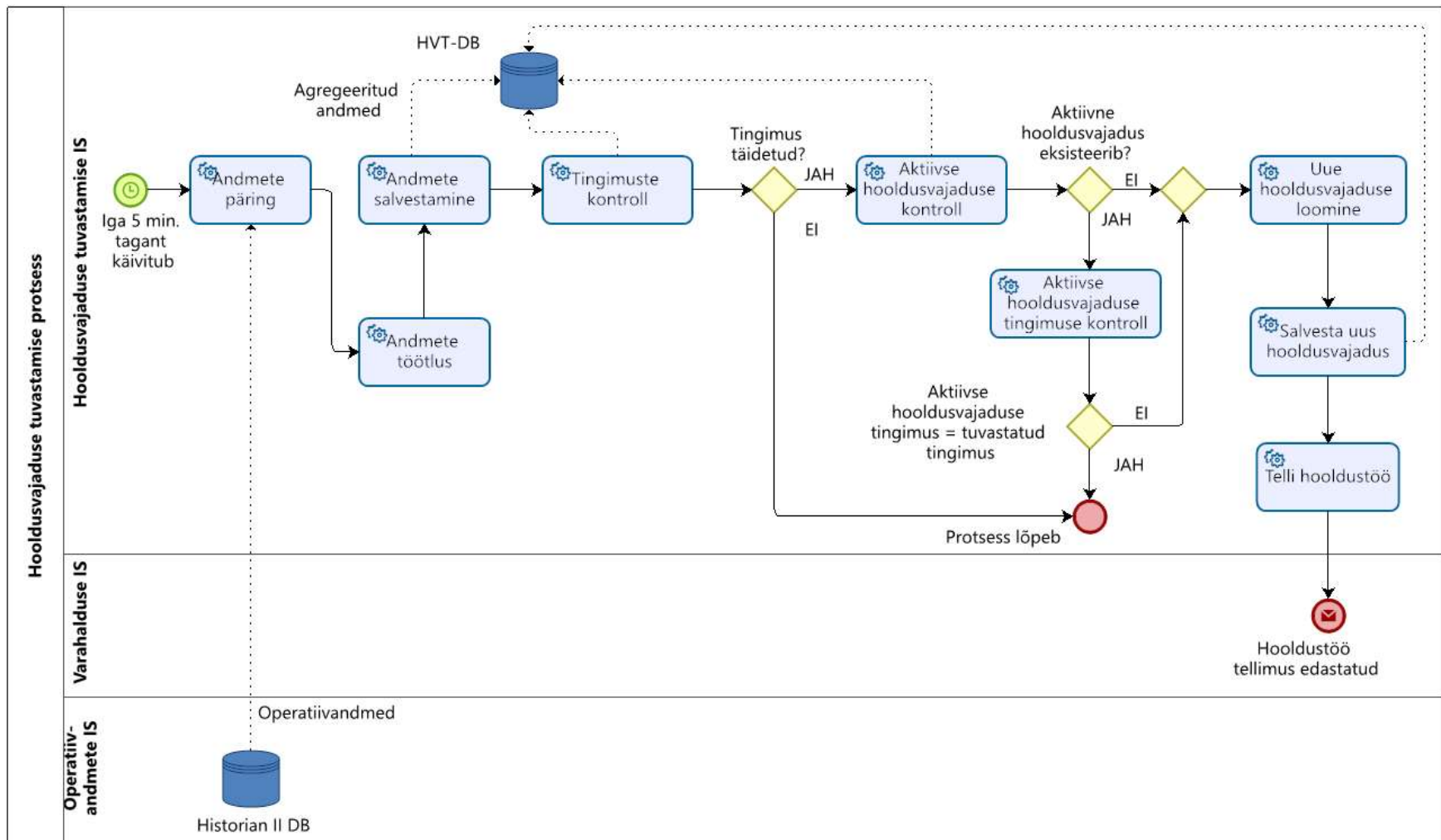
- TP3 tootmiseseadmete käideldavuse kasvuks;
- ülejäänud tuuleparkide kõrge käideldavuse hoidmiseks.

Hetkel on prioriteetsem toodangu kasvu suurendamine madalama käideldavusega tootmisüksustes, kuid arvestades seadmepargi vananemist, on uus protsess tarvilik tagamaks vananevate tootmisvarade täna kehtivate kõrgete eesmärkide hoidmise ka tulevikus.



Joonis 17. Automaatse hooldusvajaduse tuvastamise voodiagramm.

Järgnevalt on esitatud joonisel 18 hooldusvajaduse tuvastamise protsess.



Joonis 18. Hooldusvajaduse tuvastamise protsess.

Järgnevalt kaardistabki autor, millised võimekused juba eksisteerivad ning milliseid täiendavaid võimekusi on juurde vaja hooldusvajaduse tuvastamise protsessi paremaks toimimiseks.

4.1.3 Võimekuste gap analüüs

Võimekuste gap analüüsi skooopi kuulub ülevaade olemasolevatest, uutest ja eemaldatavatest võimekustest, mis on seotud hooldusvajaduse tuvastamise protsessi parendamisega. Gap analüüsi nime all tuntud tehnika on laialdaselt kasutuses TOGAF-i arhitektuuri väljatöötamise meetodis arendatava arhitektuuri kinnitamiseks. Põhieelduseks on tuua välja puudujääk baasarhitektuuri ja sihtarhitektuuri vahel [50]. Gap analüüsi tulemused on esitatud tabelis 7.

Tabel 7. Hooldusvajaduse tuvastamise gap analüüs.

Uued võimekused Olemasolevad võimekused	Operatiiv- andmete lugemise võimekus	Automatiseeritud andmetöötluse võimekus	Tingimuste seadistamise võimekuse	Masinõppe mudelite kasutamise võimekus	Hooldustööde automaatse tellimise võimekus	Eemaldatud võimekused
Operatiiv- andmete lugemise võimekus	100% kattuvus					
Parameetri trendide analüüsi võimekus	Säilib trendide käsitsi analüüsi võimekus					
Rikete analüüsi võimekus	Säilib rikete käsitsi analüüsi võimekus					
Hooldustööde tellimise võimekus					Säilivad hooldustööde tellimise reeglid	
Uued võimekused		Automatiseeritud andmetöötluse võimekus	Tingimuste seadistamine	Masinõppe mudelite kasutamine	Päringute haldus	

Uued loodavad võimekused:

1. **tingimuste seadistamise võimekus** on vajalik automaatseks hooldusvajaduse tuvastamiseks läbi parameetri trendide kõrvalekallete ja alarmkoodide. Tingimused seadistatakse Scada analüütiku poolt uues loodavas tarkvaras;
2. **masinõppe mudelite kasutamise võimekus** on vajalik automaatseks hooldusvajaduse tuvastamiseks läbi masinõppe mudelite tuvastatud parameetrite kõrvalekalleteks uues tarkvaras;
3. **automatiseeritud andmetöötluse võimekus** on vajalik andmete automaatseks töötlemiseks uues tarkvaras;
4. **päringute halduse võimekus** on vajalik andmete vahetamiseks väliste infosüsteemidega, nt hooldustööde edastamiseks Varahalduse infosüsteemi.

Kõik olemasolevad võimekused jäävad alles ning kõige olulisem nendest on operatiivandmete lugemise võimekus. Uutest võimekustest on kõige keerukam masinõppe mudelite kasutamine, täpsemalt mudelite treenimine anomaaliate tuvastamiseks. Masinõppe edukaks rakendamiseks, kasutades olemasolevaid operatiivandmed, uurib autor antud teema läbi viidud uurimistöid.

4.1.4 Soovitused masinõppe mudeli valikul

Tuulikud on reeglina varustatud Scada süsteemiga, mis algselt paigaldati tuuliku töö jälgimiseks ja juhtimiseks, kuid viimasel ajal on hakatud Scada andmeid kasutama ka turbiinide tervisliku seisundi hindamiseks [27].

Anomaaliate tuvastamiseks tuulikutes on kõige edukamates uurimustöodes kasutatud nn. rekonstrueerimispõhised mudelid. Need mudelid töötavad selliselt, et esmalt rekonstrueeritakse üks olemasolevatest Scada signaalidest teisi Scada signaale kasutades. Järgmisena võrreldakse rekonstrueeritud signaali väärtust tegeliku mõõdetud signaali väärtusega. Tavapärasest suurem vahe võib olla tingitud tuuliku sisemise dünaamika muutusest ja seega viidata eelseisvale rikkele [19], [48], [51].

Masinõppe meetodi valimisel võib lähtuda näiteks uurimustööst [52], kus soovitatakse seadmete terviseseisundi tuvastamiseks rakendada süvaõppel põhinevaid mitme klassifikaatoriga ennustamise meetodit, mis kasutab andurite aegjada andmeid

lühiajaliseks oleku monitoorimiseks. Masinõppe mudelite modelleerimiseks võib kasutada näiteks avatud lähtekoodiga, TensorFlow¹, masinõppe tarkvarateeki.

Süvaõppe valdkonna kiire kasv on viinud paljud teadlased rakendama närvivõrke andmeprobleemide lahendamiseks. Anomaaliate tuvastamiseks sobivad eriti hästi autokooderid² [19], [27] mida on edukalt kasutatud näiteks jää tuvastamiseks tuuliku labadel [53], [54] ja sensorite rikete tuvastamiseks [55].

Uurimistöös [27] võrreldi autokooderi kui anomaaliadetektori tulemusi isolatsioonimetsa³ ja ühe klassi tugivektorimasinaga⁴. Tulemused näitasid, et kuigi need kaks algoritmi annavad rahuldavaid tulemusi, tagab autokooderi kasutamine veelgi täpsema ennustuse juhtudel, kus alarmi informatsioon ei aita eristada vigaseid tuulikuid tervetest. Artikli [19] autorid on üsna kindlad, et kui tuulikus toimunud rike jätab jälje Scada andmetesse, siis autokooderi mudel suudab neid tuvastada.

Mudeli parema täpsuse saavutamiseks soovitatakse uurimistöös [48] kohaselt rakendada trendidele dünaamilise läve seadmise meetodit. See põhineb adaptiivsel algoritmil, mis võimaldab vältida äärmusest põhjustatud valehäiret jääkvea väärtuse arvutamisel ning tuvastab areneva vea varem kindlaksmääratud läve seadmisega võrreldes [56].

Mudelite treenimiseks tasub esmalt filtreerida Scada andmekogumist välja tuuliku mittenormaalolukorras töötamise väärtused. Andmepuhastust aitab sooritada hooldusraportite ja -logide olemasolu [57]. Enefit Green AS-is alustati hooldustegevuse andmete struktureeritud salvestamist 2021 aasta kevadel ehk hoolduslogid ei ole varasema perioodi kohta vajalikul kujul kättesaadavad ja seega tuleb andmete puhastamisel esmalt lähtuda üksnes Scada andmetest. Siinkohal väärib mainimist Euroopa tuuleenergia assotsiatsiooni (EAWE) poolt 2016 aastal avaldatud aruanne, kus

¹ <https://www.tensorflow.org/>

² <https://www.jeremyjordan.me/autoencoders/>

³ <https://blog.paperspace.com/anomaly-detection-isolation-forest/>

⁴ <https://www.xlstat.com/en/solutions/features/1-class-support-vector-machine>

toodi välja tuuleenergia pikaajaliste uurimisprobleemide üksikasjalik ülevaade, mille hulgas tuvastati ka standardiseeritud hooldusaruandluse puudumine tuuletööstuses [58].

Masinõppe võimekuse arendamisel on mõistlik valida lähenemine, mis on leidnud varasema tõestuse heale ennustuse täpsusele teaduslike tööde baasil. Võrdlusuuringutes [26], [59]–[61] on närvivõrkudel tõestatud paremad omadused rikketundlikkusele ja hooajalistest erinevustest tulenevatele muutlikele režiimidele tavapäraste polünoomipõhiste mudelitega võrreldes [19]. Sügavaid tehisnärvivõrke on kasutatud tuuleparkides rikete tuvastamiseks uurimistöodes [62], [63].

Uurimistöo [64] tulemused viitavad paremale rikke ennustuse täpsusele 1. sekundi signaalide keskmisi väärtusi kasutades võrreldes 10. minuti keskmiste väärtustega.

Eelnevast tulenevast planeeritakse masinõppe mudelite treenimiseks kasutada süvaõppega närvivõrkude meetodit ning andmetena 1. sekundilisi operatiivandmeid.

4.1.5 Väärtusvoog

Järgnevalt koostab autor väärtusvoo hooldusvajaduse automaatse tuvastamise protsessi kohta. Mainitud protsess võimaldab läbi operatiivandmete kogumise, tingimuste seadistamise, masinõppe rakendamise ja hooldustööde tellimise tagada suurema taastavenergia toodangu ning loob seeläbi väärtust ettevõtte omanikele.

Väärtusvoo diagramm määratleb, kuidas äriprotsess klientidele väärtust loob. Väärtusvoo modelleerimist kasutatakse illustreerimaks, kuidas ärivõimekused väärtusvooga seotud on. Väärtusvoog teeb nähtavaks, mis on iga võimekuse roll ja tähendus ning mis on iga võimekuse tegelik lisaväärtus protsessis. Selline väärtusevoo kirjelduse viis visualiseerib nii kasulikke kui ka ebaproduktiivseid võimekusi [65].

Hooldusvajaduse tuvastamise protsess koosneb viiest alamprotsessist. Järgnevalt on toodud alamprotsessid ja nende jaoks vajalikud võimekused:

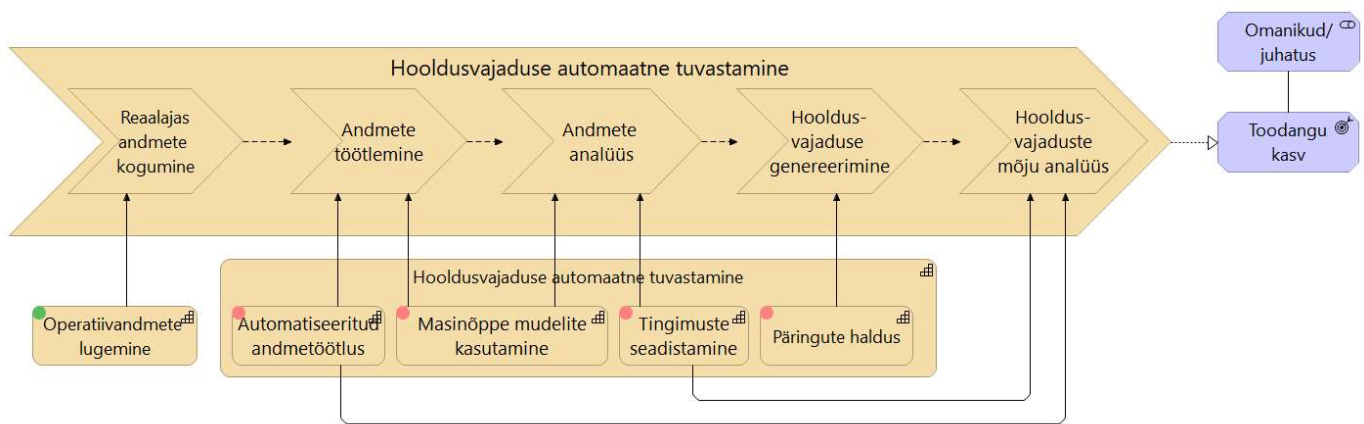
1. reaajas andmete kogumine, vajalik operatiivandmete lugemise võimekus;
2. andmete töötlemine, vajalik automatiseeritud andmetöötamise ja masinõppe mudelite kasutamise võimekus;

3. andmete analüüs, vajalik masinõppe mudelite kasutamise ja tingimuste seadistamise võimekus;
4. hooldustellimuse genereerimine, vajalik päringute halduse võimekus;
5. hooldusvajaduste mõju analüüs, vajalik automatiseeritud andmetöötluse ja tingimuste seadistamise võimekus.

Tegemist on täielikult automatiseeritud protsessiga praeguse olukorra asemele, kus andmete analüüsimine, parameetrite kõrvalekallet tuvastamine ning tööde tellimine toimub manuaalselt. Lisaväärtuse loomine toimub tuuleparkide toodangu kasvust, hoolduskulude kokkuhoiust ja protsesside efektiivsusest järgnevalt:

1. hooldusvajaduse info ajakohasus võimaldab läbi ennetava planeerimise vähendada katkestuse kestust;
2. hooldustööde ette planeerimine võimaldab vähendada hoolduskulusid;
3. läbi protsesside automatiseerimise inimressursi töötundide vähendamine.

Hooldusvajaduse tuvastamise protsess, selle alamprotsessid ja seotud võimekused on esitatud joonisel 19.



Joonis 19. Hooldusvajaduse tuvastamise väärtusvoog.

Uuring [66] näitab, et läbi andmete kaevu ja modelleerimise on võimalik tuulikute rikkeid ennetavalt tuvastada. Ka antud töös on eelduseks, et hooldusvajaduse tuvastamise mudelid toovad probleemid esile ja aitavad seeläbi tõsta seadmete efektiivsust seisakute kestusi vähendades.

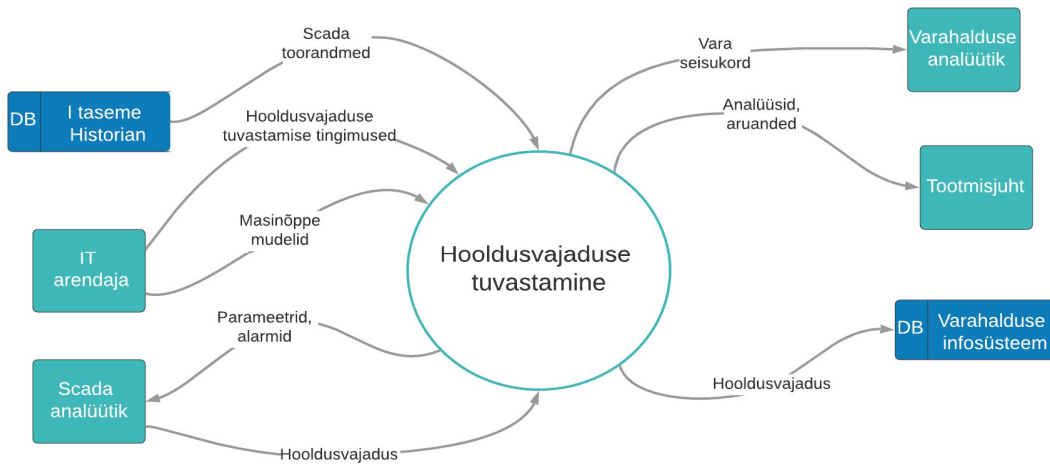
Tootmisettevõtted on aastakümneid panustanud tootmistegevuse efektiivistamisele. Tänu kiirele tööstusliku IoT arengule viimase aastakümne jooksul on arvukad tootjad tootmisseadmetele andureid paigaldanud süsteemi tootluse, seadmete rikete ja talitlushäirete reaalajas tuvastamiseks. Sellised tõrke diagnoosimise ja ennustava hoolduse mehhanismid parandavad tootmisliini kättesaadavust ja vähendavad hoolduskulusid [35].

Ka tuulikute arendajad ja operaatorid on kasutusele võtnud andurid jälgimaks tuulikute seisundit ja tootmist. Enamik praegu kasutusel olevatest tuuleturbiinidest tugineb asjatundlikule juhtimissüsteemile¹, mis on kujundatud inimkogemuste ja akumulatsiooniteadmiste põhjal. Antud süsteem tuuliku rikkeid ja kõrvalekaldeid ei ennusta ning on piiratud ja ettemääratud kasutusvõimalusega. Seevastu ennustava hoolduse mudelitega, mis kasutavad suurel hulgal andurite salvestatud andmeid, on võimalik ennustada ja vältida võimalikke rikkeid ja vähendada hoolduskulusid [35].

4.1.6 Kontekstuaalne andmevoodiagramm

Joonisel 20 on toodud hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi kontekstuaalne andmevoodiagramm. Loodav infosüsteem kasutab hooldusvajaduse tuvastamiseks Scada toorandmeid ning tuvastatud hooldusvajadus edastatakse Varahalduse infosüsteemi. Kuigi hooldusvajaduse tuvastamise protsess automatiseeritakse, selgub andmevoo diagrammilt, et hooldusvajadusi saab infosüsteemi lisada ka Scada analüütik. See võimalus on vajalik jätta selleks, et Scada analüütik saaks käsitsi lisada hooldusvajadused, mida süsteem automaatse loogika alusel ei tuvastanud.

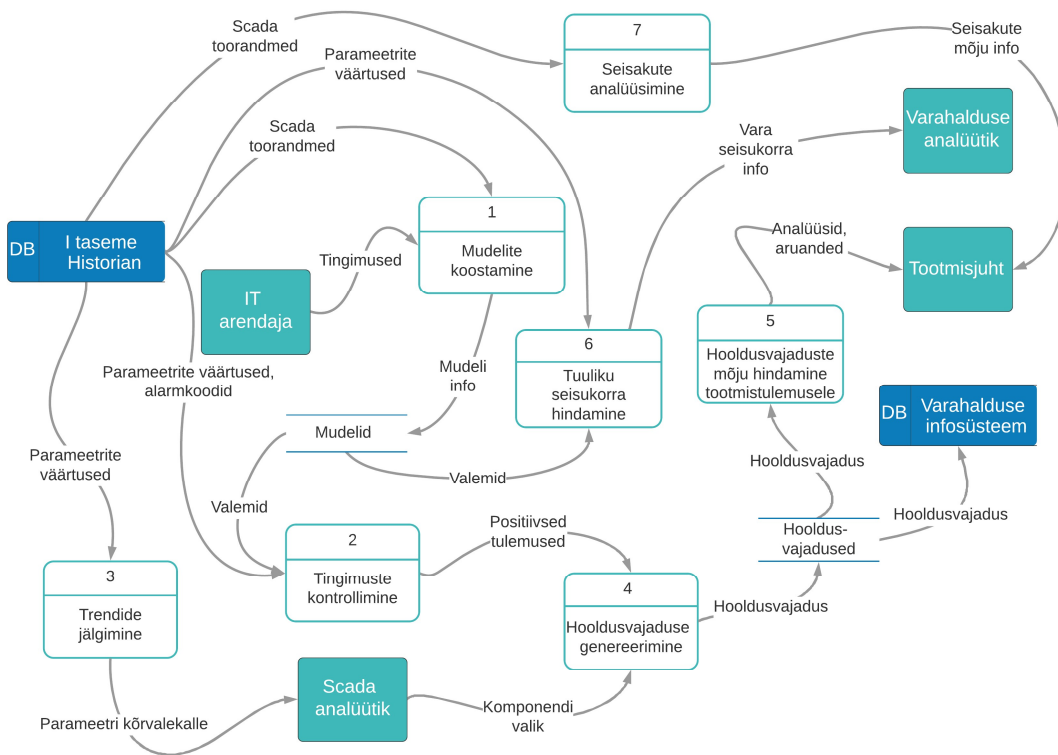
¹ Expert control system, <https://www.accessscience.com/content/expert-control-system/757502>



Joonis 20. HVT IS kontekstuaalne andmevoodiagramm.

4.1.7 I tasandi andmevoodiagramm

Joonisel 21 on esitatud hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi I tasandi andmevoodiagramm. Diagrammil on toodud 7 peamist hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi tegevust, millest esimesed 5 on seotud hooldusvajaduse tuvastamisega. 6. tegevus on tuulikute seisukorra hindamine ning 7. tegevuses toimub esinenud seisakute analüüsimine.



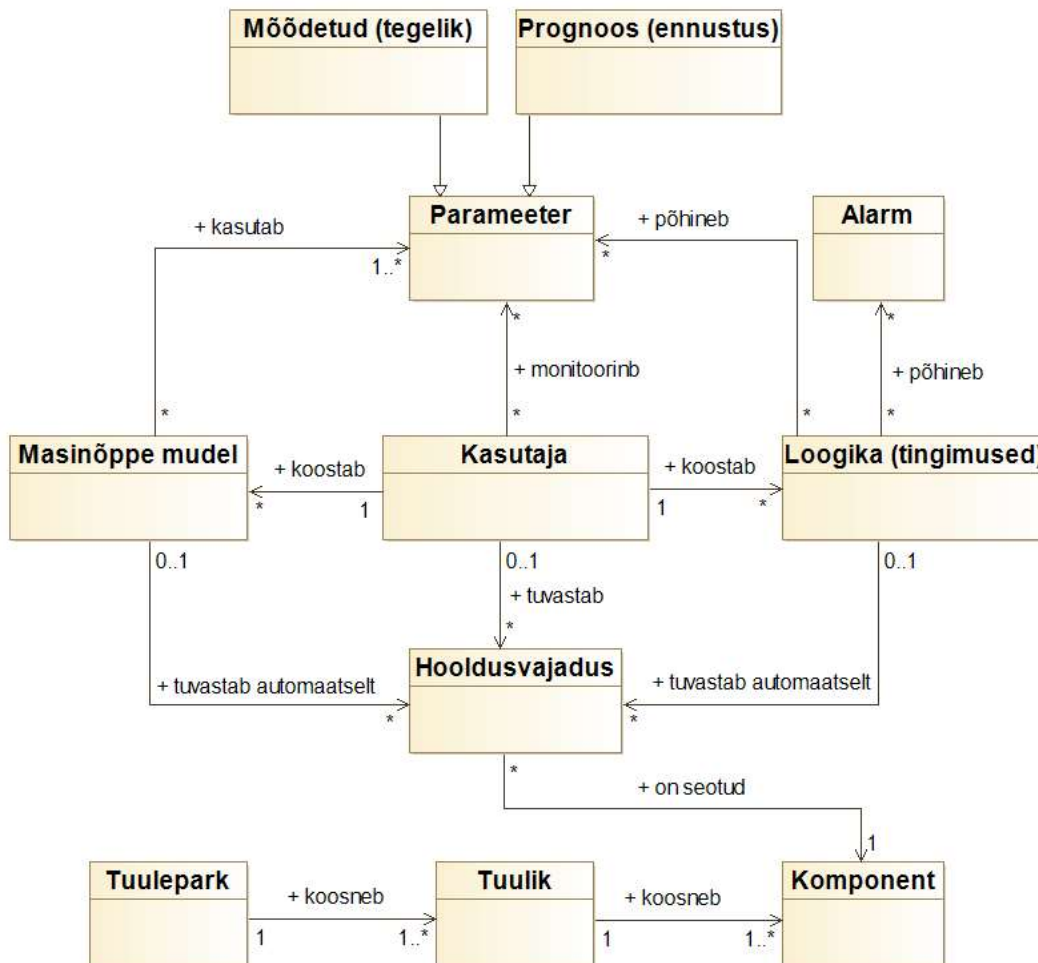
Joonis 21. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi I tasandi andmevoodiagramm.

4.1.8 Ontoloogia mudel

Ontoloogia mudel, esitatud joonisel 22, on hea vahend üldise pildi kirjeldamiseks ehk millised on peamised äriolemid ja olemite vahelised seosed. Hooldusvajaduste tuvastamine toimub tuuliku parameetrite ja alarmide põhjal. Hooldusvajadus tuvastatakse kolmel erineval viisil:

1. automaatselt masinõppe mudeli kaudu;
2. automaatselt kasutaja poolt seadistatud loogikatingimuste täitumise korral;
3. käsitsi kasutaja poolt.

Hooldusvajadus seotakse tuuliku komponendiga.



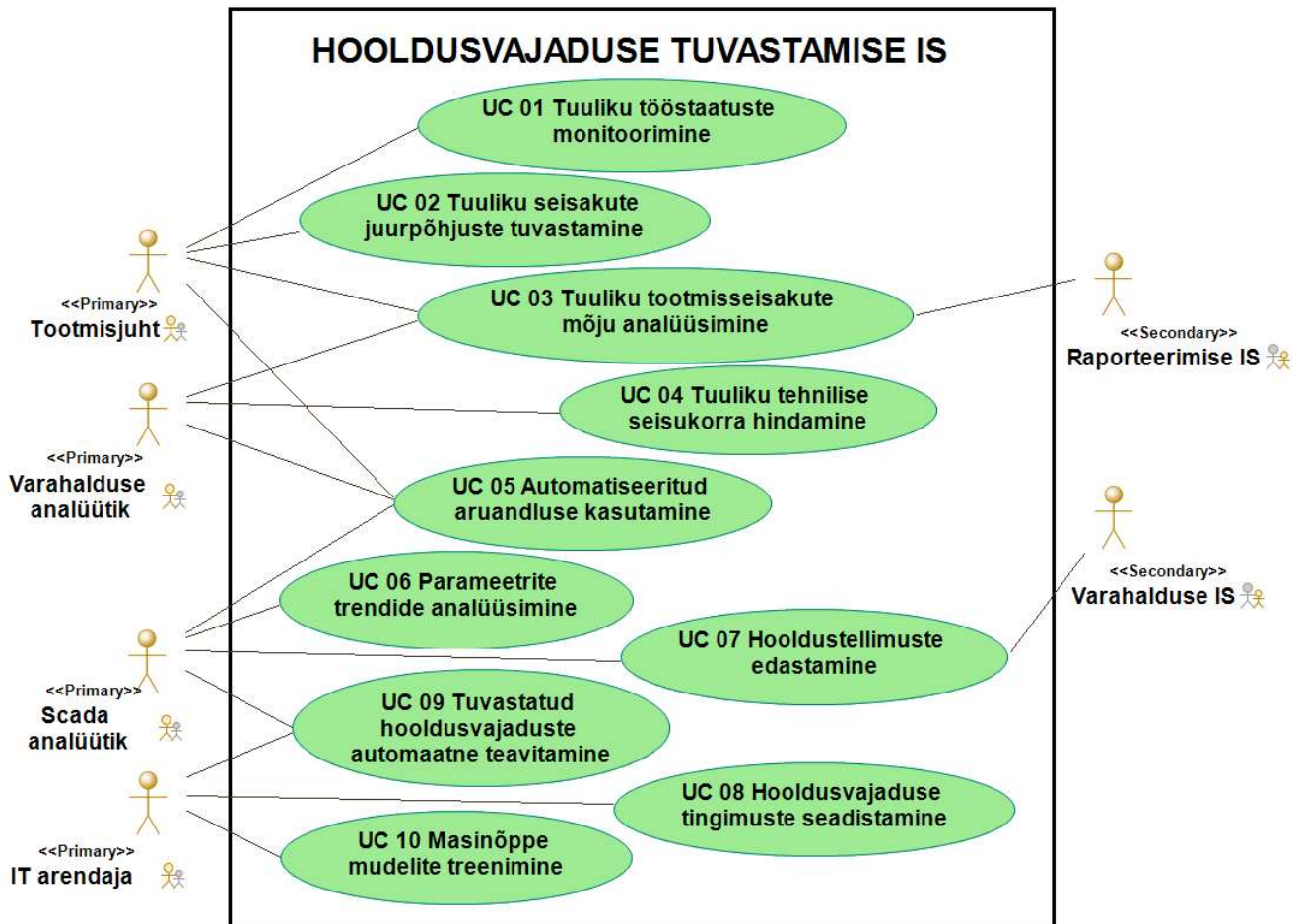
Joonis 22. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi ontoloogia mudel.

4.2 Süsteemianalüüs

Süsteemianalüüsi alustatakse infosüsteemist ja selle kasutajatest üldise ülevaate saamiseks kasutusmallide mudelist, millele järgnevad kasutuslugude täpsemad kirjeldused. Viimasena esitatakse infosüsteemile esitatavad funktsionaalsed ja mittefunktsionaalsed nõuded.

4.2.1 Kasutusmallide mudel

Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi kasutusmallide mudel on esitatud joonisel 24.



Joonis 24. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi kasutusmallide mudel.

4.2.2 Kasutusmallide kirjeldused

Järgnevalt on esitatud tabelites 8–17 Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi kasutusmallide kirjeldused ehk kasutuslood.

Tabel 8. Kasutusmalli UC 01 kirjeldus.

Nimi	UC 01 Tuuliku tööstaatuste monitoorimine
Eesmärk	Kiire ülevaatliku info saamine tuulikute toodangust ja tööstaatustest
Tulemus	Kasutajal on tootmisportfelli ülene ülevaade reaalaja lähedastest tootmisandmetest ja tuulikute tööstaatustest
Eeltingimus	Tuuliku operatiivandmete edastamine Operatiivandmete infosüsteemist oli edukas
Aktorid	Tootmisjuht
Peastsenaarium	<p>Kasutaja käivitab rakenduse</p> <p>Kasutajale kuvatakse avanenud vaates tuuleparkide nimekiri</p> <p>Kasutaja vaatab tuuleparkide tootmisandmeid ja töörežiimis olevate tuulikute arvu</p> <p>Kasutaja tuvastab tuulepargi, kus esineb mittetöörežiimis olevaid tuulikuid</p> <p>Kasutaja avab hiire kursoriga tuulepargis olevate tuulikute nimekirja</p> <p>Kasutaja tuvastab mittetöörežiimis oleva tuuliku ja avab tuulikule vajutades alarmide logi</p> <p>Kasutaja saab teada seisku põhjustanud veateate koodi</p> <p>Kasutaja uurib hoolduspartnerilt, millal saadakse tuulik tagasi töörežiimi</p> <p>Kasutaja sisestab planeeritud töörežiimi algusaja varahalduse infosüsteemis loodud hooldustöö tellimusele</p>
Alternatiivne stsenaarium	<p>Kasutaja käivitab rakenduse</p> <p>Kasutajale kuvatakse avanenud vaates tuuleparkide nimekiri</p> <p>Kasutaja avab kaardivaate</p> <p>Kasutajale kuvatakse tuulikute toodangu ja töörežiimide info riikide tasandile agregeerituna</p> <p>Kasutaja tuvastab riigi, kus esineb mittetöörežiimis olevaid tuulikuid</p> <p>Kasutaja vajutab riigiülel infot kuvavale elemendile ning rakendus muudab kaardivaate mastaabi, kus avanevad valitud riigi tuulepargid</p> <p>Kasutaja tuvastab kaardivaates tuulepargi, kus esineb mittetöörežiimis olevaid tuulikuid ja vajutab tuulepargi infot kuvavale elemendile ning rakendus muudab kaardivaate mastaabi ja avab valitud tuulepargi tuulikute vaate</p> <p>Edasi jätkub peastsenaarium 6–9</p>
Järeltingimus	Tootmisjuht kontrollib kas tuulik läks tagasi töörežiimi hooldusettevõtte poolt informeeritud ajal

Tabel 9. Kasutusmalli UC 02 kirjeldus.

Nimi	UC 02 Tuuliku seisakute juurpõhjuste tuvastamine
Eesmärk	Saada ülevaade tootmisseisakute põhjustest

Tulemus	Kasutajal on tootmisportfelli ülene kokkuvõtte tootmisseisakute põhjustest, mis võimaldab keskenduda enim seisakuid põhjustavate probleemide lahendamisele
Eeltingimus	Tuuliku operatiivandmete edastamine Operatiivandmete infosüsteemist oli edukas Erinevate tuulikute tehnoloogiate Scada tööstaatuste koodid on omavahel võrreldavaks viidud
Aktorid	Tootmisjuht
Peastsenaarium	Kasutaja käivitab rakenduse ja avab seisakute vaate Kasutaja valib seisakute ülevaate saamiseks algus- ja lõppaja Süsteem kuvab kasutajale seisakute kokkuvõtte tuulikute masinapargi üleselt sektordiagrammil Kasutaja avab sektordiagrammil enim katkestusi põhjustava seisakute grupi Süsteem kuvab kasutajale tuuleparkide loendi tulpdigrammil alustades tuulepargist, kus antud grupi seisakuid on enim Kasutaja avab tulpdigrammil kõrgeima seisakute arvuga tuulepargi Süsteem kuvab kasutajale tuulikute loendi tulpdigrammil alustades tuulikust, kus antud grupi seisakuid on enim Kasutaja avab tulpdigrammil kõrgeima seisakute arvuga tuuliku Süsteem kuvab kasutajale seisakute loendi tabelis kronoloogilises järjestuses
Alternatiivne stsenaarium	Kasutaja käivitab rakenduse ja avab seisakute vaate Kasutaja defineerib järgmised valikud: <ul style="list-style-type: none"> • seisaku algus- ja lõppaeg • tuulepark • tuulik • seisaku põhjuse grupp Süsteem kuvab kasutajale seisakute loendi tabelis kronoloogilises järjestuses
Järeltingimus	Tootmisjuht sisestab seisakute algpõhjuse kõrvaldamiseks hooldustöö tellimuse varahalduse infosüsteemi ning märgib endale meeldetuletuse kontrollida sama grupi seisakute kestusi pärast hooldustöö sooritamist

Tabel 10. Kasutusmalli UC 03 kirjeldus.

Nimi	UC 03 Tuuliku tootmisseisakute mõju analüüsimine
Eesmärk	Saada ülevaade tootmisseisakute mõjust tootmistulemusele
Tulemus	Kasutajal on tootmisportfelli põhine ülevaade tootmisseisakute mõjust tootmistulemusele

Eeltingimus	Tuuliku operatiivandmete edastamine Operatiivandmete infosüsteemist oli edukas Elektrienergia tunnihindade NordPool päring oli edukas
Aktorid	Tootmisjuht, Varahalduse analüütik, Raporteerimise infosüsteem
Peastsenaarium	<p>Kasutaja käivitab rakenduse ja avab seisakute vaate</p> <p>Kasutaja aktiveerib seisakute mõju nupu, valib seisakute ülevaate saamiseks algus- ja lõppaja ning määratleb, mille alusel mõju hinnatakse:</p> <ul style="list-style-type: none"> • käideldavus, % • tootmata jäänud toodang, MWh • tootmajata jäänud toodangu rahaline väärtus, € <p>Süsteem kuvab kasutajale seisakute mõju kokkuvõtte tuulikute masinapargi üleselt sektordiagrammil</p> <p>Kasutaja avab sektordiagrammil suurima mõjuga katkestuste grupi</p> <p>Süsteem kuvab kasutajale suurima katkestuste mõjuga tuuleparkide loendi tulpdiaagrammil alustades tuulepargist, kus antud grupi seisakute mõju on suurim</p> <p>Kasutaja avab tulpdiaagrammil kõrgeima seisakute mõjuga tuulepargi</p> <p>Süsteem kuvab kasutajale tuulikute loendi tulpdiaagrammil alustades tuulikust, kus antud grupi seisakute mõju on suurim</p> <p>Kasutaja avab tulpdiaagrammil kõrgeima seisakute mõjuga tuuliku</p> <p>Süsteem kuvab kasutajale seisakute loendi tabelis alates suurima mõjuga seisakust</p>
Alternatiivne stsenaarium	<p>Kasutaja käivitab rakenduse ja avab seisakute vaate</p> <p>Kasutaja aktiveerib seisakute mõju nupu</p> <p>Kasutaja defineerib järgmised valikud:</p> <ul style="list-style-type: none"> • seisaku algus- ja lõppaeg • tuulepark • tuulik • seisaku mõju <p>Süsteem kuvab kasutajale seisakute loendi tabelis alates suurima mõjuga seisakust</p>
Järelingimus	Tootmisjuht kontrollib kas suurima seisaku mõjuga katkestuse juurpõhjuse analüüs on läbi viidud ning teeb süsteemis vastava staatuse muudatuse

Tabel 11. Kasutusmalli UC 04 kirjeldus.

Nimi	UC 04 Tuuliku tehnilise seisukorra hindamine
Eesmärk	Saada ülevaade tuuliku peakomponentide tehnilisest seisukorrast
Tulemus	Kasutajal on tootmisportfelli põhine ülevaade tuuliku peakomponentide tehnilisest seisukorrast

Eeltingimus	Tuuliku operatiivandmete edastamine Operatiivandmete infosüsteemist oli edukas Peakomponentide tehnilise seisukorra hindamise masinõppe mudelid on treenitud ja äriloogika seadistatud
Aktorid	Varahalduse analüütik
Peastsenaarium	Kasutaja käivitab rakenduse ja avab kaardivaate Kasutajale kuvatakse tuulikute toodangu ja töörežiimide info riikide tasandile agregeerituna Kasutaja valib riigi, kus soovib tuulikute peakomponentide tehnilist seisukorda hinnata vajutades riigiülesele infot kuvavale elemendile Rakendus muudab kaardivaate mastaabi, avanevad valitud riigi tuulepargid Kasutaja valib kaardivaates tuulepargi, kus soovib tuulikute tehnilist seisukorda hinnata vajutades tuulepargi infot kuvavale elemendile Rakendus muudab kaardivaate mastaabi ja avab valitud tuulepargi tuulikute vaate, kus iga tuuliku juures on peakomponentide tehnilist seisukorda kirjeldab info valgusfoori värvitoonidest lähtuvalt Kasutaja tuvastab peakomponendi, mille tehniline seisukord ei ole hea Kasutaja uurib peakomponendi hooldusraporteid ning lähtuvalt leitud teeb otsuse kas tellida täiendav hooldus kohe või oodata järgmise planeeritud hoolduseni
Alternatiivne stsenaarium	Kasutaja käivitab rakenduse ja avab kaardivaate Kasutaja suumib sisse kaardivaates kuni tuleb nähtavale tuuliku peakomponentide tehnilise seisukorra dialoogiaken Edasi jätkub peastsenaarium 7–8
Järeltingimus	Kasutaja lisab tuuliku tehnilise seisukorra monitooringu logisse kirje ning märgib antud tuuliku jälgimise all olevaks kuni järgmise hoolduseni

Tabel 12. Kasutusmalli UC 05 kirjeldus.

Nimi	UC 05 Automatiseeritud aruandluse kasutamine
Eesmärk	Võimaldada kasutajal jälgida soovitud kokkuvõtteid
Tulemus	Regulaarsed raportid on automatiseeritud
Eeltingimus	Tuuliku operatiivandmete edastamine Operatiivandmete infosüsteemist oli edukas Raportite genereerimise loogika on seadistatud
Aktorid	Tootmisjuht, Varahalduse analüütik, Scada analüütik
Peastsenaarium	Kasutaja käivitab rakenduse ja avab aruandluse vaate Kasutajale kuvatakse vaikesuure tuuleportfelli tasemele agregeeritud aruanded

	<p>Kasutaja aktiveerib aruandluse seadistamise režiimi</p> <p>Kasutaja seadistab temale vajalikud raportid, võimalikud valikud ja tingimused raporti koostamisel on:</p> <ul style="list-style-type: none"> • periood (aasta, kuu, nädal, päev, tund) • tulemuste esitamise viis (graafik, tabel) • andmete agregeeritus tase (riik, tehnoloogia, tuulepark, tuulik) • andmete filtreerimine (suurem, väiksem, võrdne, sisaldab, ei sisalda) • arvutustehted (liitmine, lahutamine, korrutamine, jagamine) • tulemuste kumulatiivne esitlemine <p>Kasutaja salvestab päringu seadistuse</p> <p>Kasutaja leiab vajaliku informatsiooni koostatud aruandest</p>
Alternatiivne stsenaarium	<p>Kasutaja käivitab rakenduse ja avab aruandluse vaate</p> <p>Kasutajale kuvatakse vaikimisi tuuleportfelli tasemele agregeeritud aruanded</p> <p>Kasutaja leiab vajaliku informatsiooni standardaruandest</p>
Järeltingimus	<p>Kasutaja muudatused on andmebaasis salvestunud ning järgmisel korral avanevad vaatel viimati salvestatud kokkuvõtted</p>

Tabel 13. Kasutusmalli UC 06 kirjeldus.

Nimi	UC 06 Parameetrite trendide analüüsimine
Eesmärk	Võimaldada kasutajal jälgida ja võrrelda erinevate parameetrite väärtusi ühel graafikul
Tulemus	Kõrvalekallete analüüsimine on kiiresti teostatav
Eeltingimus	Tuuliku operatiivandmete edastamine Operatiivandmete infosüsteemist oli edukas
Aktorid	Scada analüütik
Peastsenaarium	<p>Kasutaja käivitab rakenduse ja avab trendide vaate</p> <p>Kasutaja valib tuulepargi, tuuliku(d), parameetri(d) ning perioodi algus- ja lõppaja</p> <p>Süsteem kuvab parameetri(te) väärtused ühisel joograafikul</p> <p>Kasutaja tuvastab võimaliku erinevuse normaaltalitlusest</p> <p>Kasutaja uurib tuuliku hoolduslogi ja hooldustööde tellimusi Varahalduse infosüsteemis, kuid ei tuvasta aktiivseid tellimusi</p> <p>Kasutaja sisestab hooldusvajaduse tellimuse Varahalduse infosüsteemis ning märgib parameetri jälgimise all olevaks tehes tuuliku logisse vastava kirje</p>
Alternatiivne stsenaarium	Algas vastavalt peastsenaariumile 1–4

	Kasutaja uurib tuuliku hoolduslogi ja hooldustööde tellimusi Varahalduse infosüsteemis ning tuvastab aktiivse tellimuse Kasutaja märgib parameetri logisse kirje „Hooldustöö tellitud“
Järeldingimus	Parameetri staatuse muudatus on süsteemi salvestatud

Tabel 14. Kasutusmalli UC 07 kirjeldus.

Nimi	UC 07 Hooldustellimuste edastamine
Eesmärk	Hooldusvajaduste automaatne edastamine Varahalduse infosüsteemi
Tulemus	Automaatne hooldustöö tellimuse genereerimine Varahalduse infosüsteemis
Eeltingimus	Kasutaja poolt defineeritud tingimustele vastavate hooldusvajaduste eksisteerimine Masinõppe mudelid on treenitud ja nende tulemuste täpsus valideeritud Automaatne hooldustöö genereerimise funktsionaalsus on aktiivne
Aktorid	Scada analüütik, Varahalduse infosüsteem
Peastsenaarium	Süsteem töötleb viimati laetud operatiivandmeid Süsteem tuvastab kasutaja poolt defineeritud hooldusvajaduse tingimuste täitumise Süsteem saadab sõnumi Varahalduse infosüsteemi hooldusvajaduse tellimuse genereerimiseks
Alternatiivne stsenaarium	Süsteem töötleb viimati laetud operatiivandmeid Süsteem tuvastab masinõppe mudeli põhjal hooldusvajaduse Süsteem saadab sõnumi Varahalduse infosüsteemi hooldusvajaduse tellimuse genereerimiseks
Järeldingimus	Süsteem deaktiveerib antud tuulikule hooldustööde automaatse genereerimise funktsionaalsuse. Pärast genereeritud hooldustöö lõpetamist aktiveerib süsteem taas automaatse hooldustööde genereerimise funktsionaalsuse

Tabel 15. Kasutusmalli UC 08 kirjeldus.

Nimi	UC 08 Hooldusvajaduse tingimuste seadistamine
Eesmärk	Võimaldada hooldusvajaduste automaatne tuvastamine
Tulemus	Ajakohane nimekiri võimalikest hooldusvajadustest
Eeltingimus	Heal tasemel kompetentsi omamine tuuliku Scada kontroll-loogikast
Aktorid	IT arendaja
Peastsenaarium	Kasutaja käivitab rakenduse ja avab hooldusvajaduse vaate

	<p>Kasutaja aktiveerib hooldusvajaduse tuvastamise tingimuste seadistamise režiimi</p> <p>Kasutaja seadistab hooldusvajaduse tuvastamise tingimused etteantud valikute piires</p> <p>Kasutaja salvestab muudatused ja sulgeb tingimuste seadistamise muutmisrežiimi</p>
Alternatiivne stsenaarium	<p>Algus vastavalt peastsenaariumi etappidele 1–3</p> <p>Kasutaja testib seatud tingimuste tundlikkust „Test“ nupule vajutades</p> <p>Süsteem kuvab kasutajale koondtulemuse ja nimekirja tingimustele vastavatest hooldusvajadustest</p> <p>Kasutaja hindab tulemused heaks ning jätkub peastsenaariumi punkt 4</p>
Järeltingimus	Hooldusvajaduse tuvastamise tingimused on andmebaasi salvestatud

Tabel 16. Kasutusmalli UC 09 kirjeldus.

Nimi	UC 09 Tuvastatud hooldusvajaduste automaatne teavitamine
Eesmärk	Informeerida kasutajat tuvastatud hooldusvajadustest
Tulemus	Kasutajad on hooldusvajadustest informeeritud
Eeltingimus	Hooldusvajaduste teavitused on süsteemis seadistatud
Aktorid	Scada analüütik, IT arendaja
Peastsenaarium	<p>Süsteem tuvastab hooldusvajaduse</p> <p>Süsteem edastab hooldusvajaduse teavituse kasutajale e-maili või SMS-sõnumina</p> <p>Süsteem lisab hooldusvajaduse andmeväljale „Teavitus edastatud“ ajatempli</p>
Alternatiivne stsenaarium	<p>Kasutaja käivitab rakenduse ja avab hooldusvajaduse vaate</p> <p>Kasutaja filtreerib välja aktiivsete hooldusvajaduste nimekirja</p> <p>Kasutaja selekteerib nimekirjast read hiirega hooldusvajaduse peale klikates, süsteem kuvab valitud read eristatult</p> <p>Kasutaja vajutab nuppu „Edasta teavitused“</p>
Järeltingimus	Süsteem salvestab hooldusvajaduse teavituse edastamise ajatempli andmebaasi, samale hooldusvajadusele teistkordset automaatset teavitus ei saadeta

Tabel 17. Kasutusmalli UC 10 kirjeldus.

Nimi	UC 10 Masinõppe mudelite treenimine
Eesmärk	Hooldusvajaduste tuvastamine masinõppe abil
Tulemus	Masinõppe mudelid on eesmärgistatud komponentidele treenitud

Eeltingimus	Operatiivandmete ajaloo olemasolu möödunud 3 aasta kohta
Aktorid	IT arendaja
Peastsenaarium	<p>Kasutaja käivitab rakenduse ja avab mudelite treenimise vaate</p> <p>Kasutaja vajutab nuppu „Train new model“</p> <p>Süsteem kuvab uue mudeli vormi ja palub kasutajal täita nõutud väljad</p> <p>Kasutaja täidab kohustuslikud väljad ning vajutab nuppu „Next“</p> <p>Süsteem palub kasutajal määratleda treeningandmed ja perioodi</p> <p>Kasutaja valib treeningandmed, perioodi, laeb treeningandmed, valib kasutatava(d) masinõppe meetodi(d) ning käivitab treenimisprotsessi</p> <p>Süsteem kuvab kasutajale valitud meetodi(te) tulemuse(d)</p> <p>Kasutaja valib parimaks osutunud meetodi ja salvestab treenitud mudeli</p>
Alternatiivne stsenaarium	<p>Algus vastavalt peastsenaariumi etappidele 1–5</p> <p>Kasutaja teeb valiku „Import training set from external source“</p> <p>Edasi jätkub peastsenaarium 6–8</p>
Järelingimus	Masinõppe mudel on andmebaasi salvestunud

4.2.3 Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi funktsionaalsed nõuded

Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi funktsionaalsed nõuded on grupeeritud moodulitest lähtuvalt ning prioriteetide määramisel on aluseks võetud MoSCoW meetodi kolm esimest prioriseerimise klassi, tulemused on esitatud tabelis 18.

Tabel 18. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi funktsionaalsed nõuded.

Nr	Moodul	Funktsionaalsed nõuded	Prioriteet
1	Kaart	Tootmiseadmete toodangu, töökorras olevate tootmiseadmete arvu ja tuule kiiruse andmete kaardivaates kuvamine.	MUST
2	Kaart	Tuulikute kuvamine kaardil nende asukohtades.	MUST
3	Kaart	<p>Tuuliku peamiste staatuste kuvamine värvidega:</p> <ul style="list-style-type: none"> • tuulik on töökorras ja genereerib elektrit – roheline; • tuulik on töökorras, aga ei tooda elektrit tulenevalt madalast tuule kiirusest – sinine; • tuulik on planeeritud hoolduses – oranž; • tuulik on mitteplaneeritud hoolduses – punane; • tuulikul puudub andmesideühendus – hall. 	MUST

4	Kaart	Tuuliku labade pöörlemise simuleerimine vastavalt tegelikule labade pöörlemise kiirusele.	COULD
5	Kaart	Taustakaardi ning seal olevate objektide ja andmete automaatne skaleerumine mastaabi muutmisel.	MUST
6	Kaart	Ilmastiku parameetrite (tuule kiirus, tuule suund, suhteline õhuniiskus, temperatuur, sademed, pilvisus) prognoosandmete (ühe nädala ulatuses) kuvamine kaardi.	COULD
7	Kaart	Tootmisportfelli toodangu prognoosi kuvamine joograafikuna tunnise täpsusega järgmise 7 päeva kohta.	COULD
8	Kaart	Nord Pool Spot ¹ Eesti ja Leedu elektrienergia turuhinna kuvamine järgmise päeva tundidele tulpgraafikuna.	SHOULD
9	Kaart	Tuuliku komponentide, millele on masinõppe mudelid rakendatavad, tehnilise seisukorra kuvamine värvidega: <ul style="list-style-type: none"> • tuvastatud kõrvalekalded puuduvad – roheline; • tuvastatud vähesed kõrvalekalded – oranž; • tuvastatud märkimisväärsed kõrvalekalded – punane. 	MUST
10	Kaart	Tuuliku viimase staatuse teksti ja algusaja kuvamine.	COULD
11	Seisakud	Seisakute andmete kuvamine vastavalt kasutaja valikule: <ul style="list-style-type: none"> • sektordiagrammina; • tulpgraafikuna; • joograafikuna; • tabelina. 	MUST
12	Seisakud	Seisakute andmete filtreerimine kõikide kasutusel olevate andmepunktide ulatuses.	MUST
13	Seisakud	Seisakute mõju arvutamine: <ul style="list-style-type: none"> • käideldavusele; • toodangule; • tootmata jäänud toodangu rahalisele väärtusele. 	SHOULD
14	Seisakud	Seisakute grupeerimine algpõhjuste lõikes.	MUST
15	Seisakud	Topp 5 mõjuga seisakute kuvamine.	MUST

¹ <https://www.nordpoolgroup.com/>

16	Seisakud	Ennustatud rikete tüübid, asukohad ja ulatused reaajas täpsustuva tõenäosusega	MUST
17	Trendid	Parameetrite omavaheline võrdlemine joograafikul.	MUST
18	Trendid	Graafikul esitatavate parameetrite valik kõikide kasutusel olevate parameetrite hulgast tuulepargi põhiselt.	MUST
19	Trendid	Kuvatavate andmete algus- ja lõppaja määramine.	MUST
20	Trendid	Graafikul peab olema suumimise võimekus.	MUST
21	Aruandlus	Seisakute aruannete genereerimine vastavalt etteantud valikutele: <ul style="list-style-type: none"> • ajaperiood (aasta, kuu, nädal, päev); • riik; • tuuliku valmistaja; • tuulepark; • tuulik; • seisku tüüp; • seisku kestuse pikkus (kuni 1 tund, 1 tund kuni 24 tundi, üle 24 tunni); • seisaku põhjus; • seisaku mõju. 	MUST
22	Aruandlus	Masinõppe mudelite põhjal tuvastatud kõrvalekallete genereerimine vastavalt etteantud valikutele: <ul style="list-style-type: none"> • ajaperiood (aasta, kuu); • tuulepark; • mudeli nimetus; • kõrvalekalde suurus. 	SHOULD
23	Hooldusvajadus	Masinõppe mudelite hooldusvajaduse tuvastamise täpsus kuni kaks kuud ette toimuvatele riketele minimaalselt 75%.	MUST
24	Hooldusvajadus	Masinõppe mudelite täpsus tuuliku parameetrite anomaaliate tuvastamiseks minimaalselt 90%.	COULD
25	Hooldusvajadus	Süsteem kuvab kasutajale nimekirja kuni kolme kuu jooksul toimuvatest potentsiaalsetest riketest.	MUST
26	Hooldusvajadus	Süsteem teavitab kasutajat e-maili või sms-i vahendusel parameetri trendide võrdluses tuvastatud olulistest kõrvalekaltest.	MUST
27	Hooldusvajadus	Süsteem võimaldab ennustada ilmastikuoludest tingitud seisakuid järgneva 3 päeva sees minimaalselt 70% täpsusega.	SHOULD

27	Hooldusvajadus	Süsteem hindab aktiivsete hooldusvajaduste prioriteetsust finantsmõjust lähtuvalt.	SHOULD
28	Hooldusvajadus	Süsteem hindab potentsiaalse tootmiskahju hooldusvajaduse ennetaval sooritamata jätmise korra (hooldus sooritatakse reaktiivselt).	SHOULD
29	Hooldusvajadus	Süsteem võimaldab seadistada hooldusvajadustele tingimusi, mille täitumisel saadetakse kasutajale automaatne teavitus hooldusvajadusest.	MUST
30	Tingimused	Süsteem võimaldab seadistada operatiivandmetele tingimuse, mille täitumisel korral genereeritakse hooldusvajadus. Ühe tingimuse seadistamiseks võib kasutada kuni 10. erinevat parameetrit. Seadistatavateks tingimusteks saab kasutada parameetrite ja alarmkoodide väärtusi järgnevalt: <ul style="list-style-type: none"> • tingimuse esinemise sagedus; • tingimuse esinemise kestus. 	MUST
31	Tingimused	Süsteem võimaldab lisada ja hallata tingimusi puustruktuuri hierarhia põhimõttel (analoogne varade struktuurile Varahalduse infosüsteemis).	MUST
32	Tingimused	Süsteem võimaldab lisada ja hallata minimaalselt 5 000 erinevat tingimust.	MUST
33	Tingimused	Üksikuid tingimusi peab olema võimalik ühendada teiste tingimustega ja/või loogika alusel, et moodustub tingimuste jadast koosnev ahel. Ühte peatingimusse peab saama lisada minimaalselt 10 algingimust.	MUST
34	Tingimused	Tingimuste koostamine ja haldamine toimub läbi graafilise kasutajaliidese.	MUST
35	Liidesed	Süsteem võimaldab andmevahetust väliste rakendustega.	MUST
36	Andmetöötlus	Süsteem võimaldab andmete töötlemist.	MUST

4.2.4 Nõuete klassifitseerimine FURPS+ järgi

FURPS+ järgi on nõuded klassifitseeritud tabelis 19.

Tabel 19. HVT IS FURPS+ järgi klassifitseeritud nõuded.

FURPS+	Nõuded
Funktsionaalsus	Võimaldab reaalaaja lähedaste tootmisandmete vaatamist kaardil. Võimaldab tuulikute parameetrite trendide jälgimist graafikul.

Võimalused, suutlikus	<p>Võimaldab koostada seiskute kokkuvõtteid ja analüüsida seisakute mõju tootmistulemusele.</p> <p>Võimaldab automaatselt tuvastada hooldusvajadusi enne tootmisveisakuid.</p> <p>Võimaldab seadistada tingimusi hooldusvajaduste tuvastamiseks.</p> <p>Võimaldab seadistada teavituste edastamist tuvastatud hooldusvajadustele.</p> <p>Võimaldab seadistada tingimusi automaatsele raporteerimisele.</p>
Kasutajasõbralikkus / kasutatavus	<p>Vaadetes kuvatav info hulk on kasutaja poolt määratletav ning kuvatakse ainult kasutaja poolt valitud info.</p> <p>Süsteem kohandab vaated kasutaja ekraanisuurusest lähtuvalt.</p> <p>Kaardivaates kuvatava info agregeerituse tase peab olema vastavuses valitud mastaabist.</p>
Inimfaktor, UX abiinfo, dokumentatsioon	<p>Vaadete kuvatav info interaktiivsus – esitletud agregeeritud tulemusele klikates avaneb järgmise tasandi info kuni detailse alusinfo välja.</p> <p>Kõigil vaadetes peab olema lisatud „Help“ nupp, milles avaneb inglise keelne kasutusjuhend antud vaate kohta.</p>
Töökindlus/ käideldavus	<p>Teenus peab olema kättesaadav avalikust internetist läbi MFA autentimise.</p> <p>Teenuse käideldavus kuus peab olema minimaalselt 99,5%.</p> <p>Teenuse toimivus peab olema automaatse monitooringu all, mis edastab probleemide teavitused teenusehaldurile. Riketele tuleb reageerida 1h jooksul.</p> <p>Raporteeritavate andmete kvaliteedi peab olema minimaalselt 99,8% aasta andmete kohta.</p>
Vigade tihedus, parandamise võimalus, turvalisus, SLA	
Suutlikkus/ jõudlus	<p>Kaardivaate laadimine ei ületa 5. sekundit, ülejäänud vaadete laadimine ei ületa 3. sekundit.</p>
Vastamise aeg, korrektsus, piirkoormus, kättesaadavus, ressursside kasutamine	<p>Teenuse vaadete laadimise jõudlus peab olema tagatud kuni 25-le samaaegsele kasutajale.</p> <p>Teenus peab suutma teenindada samaaegselt kuni 3 kasutaja andmepäringud ühe miljoni andmepunkti laadimiseks 5 sekundi jooksul.</p> <p>Toorandmete laadimine Operatiivandmete infosüsteemist, töötlemine ja Hooldusvajaduse tuvastamise andmebaasi salvestamine peab olema sooritatud viie minuti jooksul.</p> <p>Kaardivaates kuvatava tootmisinfo laadimine ja töötlemine sooritatakse üks kord minutis ning see toiming peab olema läbi viidud viiele tuhandele andmepunktile maksimaalselt 10 sekundi jooksul.</p>
Toetatavus	<p>Süsteem peab võimaldama uute tootmisvarade ja andmepunktide liidestamist.</p> <p>Süsteem peab olema liidestatav väliste infosüsteemidega läbi API arvestades REST arhitektuuri soovitustega.</p>

Adapteeritus, hooldatavus, rahvusvahelise, konfigureeritavus, laiendatavus	<p>Süsteemi parameetrid peavad olema väliselt konfigureeritavad ning muudatuste tegemine seadistuses ei tohi kaasa tuua rakenduse uuesti kompileerimist.</p> <p>Süsteemi vaated ja funktsionaalne loogika ei tohi olla jäigalt seotud ning kasutajaliidest peab olema võimalik vajadusest lähtuvalt lihtne asendada.</p> <p>Süsteemi arhitektuur peab olema realiseeritud selliselt, et võimaldab lihtsalt tagada süsteemi toimivuse ka 5-kordse andmemahu suurenemise korral tänasega võrreldes.</p> <p>Süsteem jääb kasutatavaks üksnes inglise keeles.</p> <p>Süsteemi toimivuse ja arendustegevuse eest jääb vastutama Varahalduse üksuse IT arendaja.</p>	
+	Disaini piirangud	<p>Andmete salvestamiseks kasutada relatsioonilist andmebaasi.</p> <p>DBMS-iks valida PostgreSQL.</p>
	Implementatsiooninõuded	<p>Kasutada Python programmeerimiskeele põhist veebirakenduste loomise platvormi.</p> <p>Arendamisel lähtuda SOLID¹ disainiprintsiipidest ja 12-tegurilise² tarkvara kui teenusena rakenduste loomise meetodikast.</p> <p>Rakenduse koodibaasi haldamiseks kasutada GitHub³ keskkonda.</p>
	Liideste nõuded	<p>Süsteem peab olema võimeline liidestuma väliste infosüsteemidega. Andmete edastamine toimub XML formaadis.</p> <p>Päringute sooritamiseks peavad eksisteerima ajakohased WSDL ja XSD failid.</p> <p>Tootmiseseadmete operatiivandmed vastuvõtmiseks tuleb kasutada MQTT protokollid.</p>
	Füüsilised piirangud	<p>Süsteemi teenindamiseks kasutatakse standardseid servereid, täiendavad piirangud puuduvad.</p>

¹ <https://adevait.com/software/solid-design-principles-the-guide-to-becoming-better-developers>

² <https://12factor.net/>

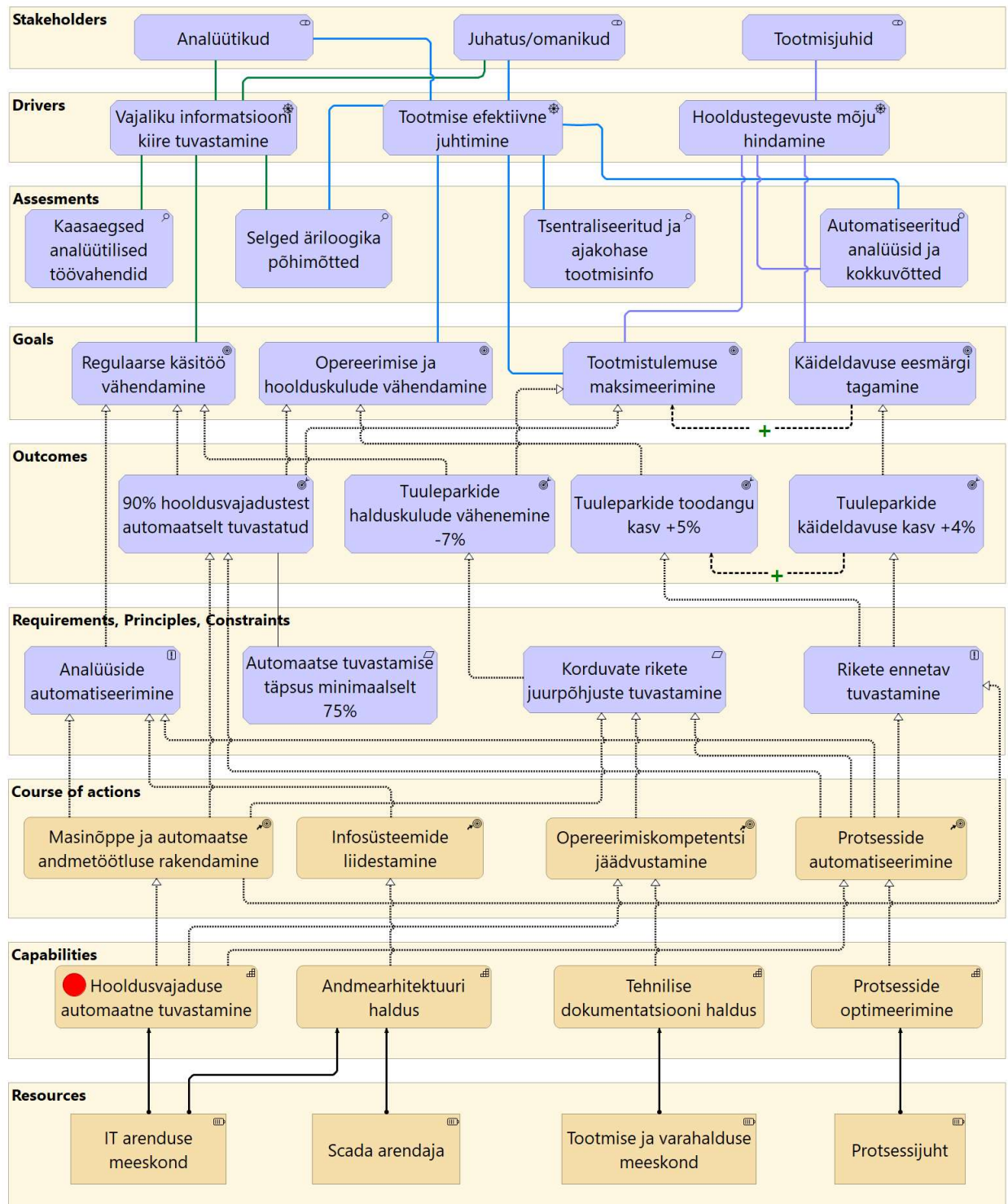
³ <https://github.com/>

4.3 IT arhitektuur ja disain

Käesolevas peatükis kirjeldab autor IT arhitektuuri ja disaini mudelid, mis põhinevad eelneval süsteemianalüüsil. Üldise ülevaate andmiseks uue võimekuse seosest ettevõtte eesmärkidega kasutatakse Archimate motivatsioonivaadet. Seejärel koostatakse Archimate kihiline mudel uue äriprotsessi tegevuste ja loodava rakenduse komponentide vaheliste seosta kuvamiseks läbi rakenduste teenuste. Edasi liigutakse loodava infosüsteemi komponentide, järgnevuse ning evituse mudeli loomisega. Peatüki lõpus esitatakse infosüsteemile loodava andmebaasi relatsiooniline ja raporteerimiseks vajalik dimensionaalne andmemudel.

4.3.1 Motivatsiooni ja strateegia mudel

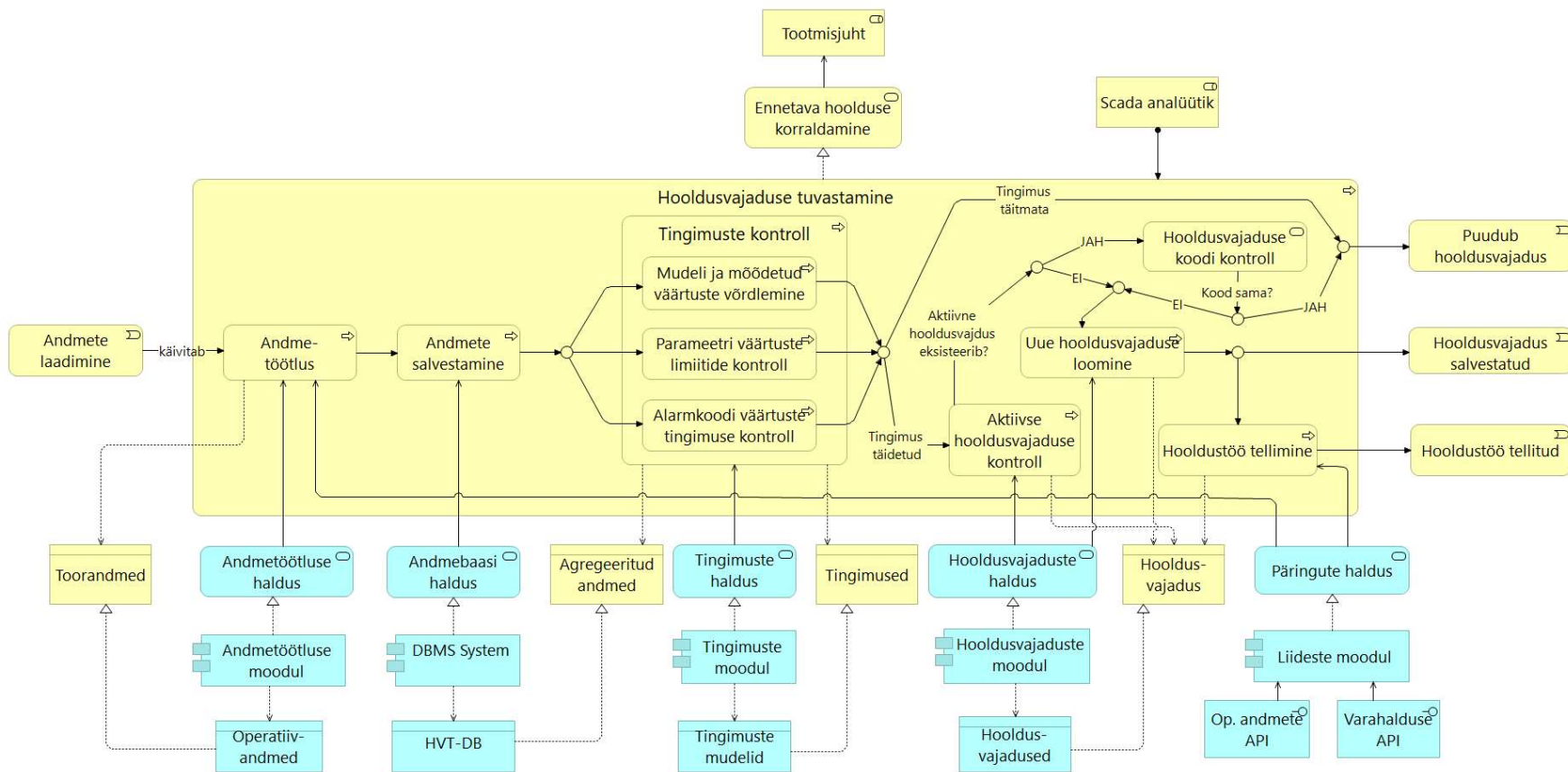
Joonisel 25 on esitatud ettevõtte motivatsiooni ja strateegia mudel Hooldusvajaduse tuvastamise protsessi vaatenurgast. Punase ringiga on tähistatud uus loodav võimekus.



Joonis 25. HVT IS motivatsiooni ja strateogia mudel.

4.3.2 Hooldusvajaduse tuvastamise kihiline mudel

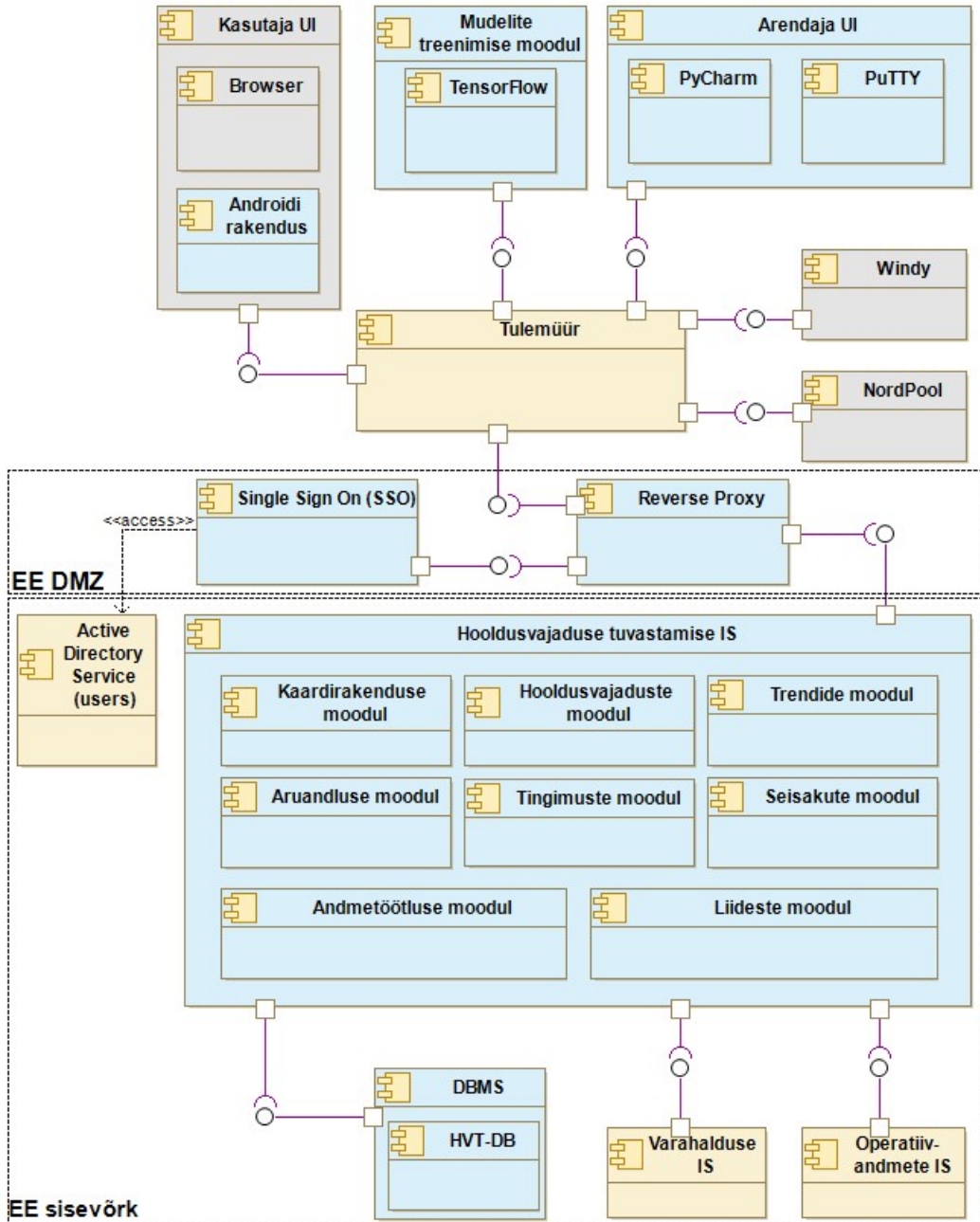
Joonisel 26 on esitatud Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi kihiline mudel.



Joonis 26. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi kihiline mudel.

4.3.3 Komponentide mudel

Järgnevalt on toodud joonisel 27 Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi komponentide mudel. Sinisega on märgitud HVT IS jaoks kasutusele võetavad ja uued loodavad komponendid. Halliga on tähistatud väliste infosüsteemide komponendid ning pruuniga on kuvatud olemasolevad komponendid.



Joonis 27. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi komponentide mudel.

4.3.4 Komponentide kirjeldused

Komponentide kirjeldused on toodud tabelis 20.

Tabel 20. Komponentide kirjeldused.

Komponent	Kirjeldus
Mudelite treenimise moodul	Masinõppe mudelite treenimiseks mõeldud töövahend.
Tensor Flow	Avatud lähtekoodiga masinõppe tarkvarateek, mis kasutab arvutuste tegemiseks andmevoo graafe.
Kasutaja UI	Ühenduslüli kasutaja ja Ennustava hoolduse infosüsteemi vahel selles oleva funktsionaalsuse kasutamiseks.
Arendaja UI	Ühenduslüli arendaja ja Ennustava hoolduse infosüsteemi vahel selles oleva funktsionaalsuse arendamiseks ja haldamiseks.
Tulemüür	Seade, mis takistab mittevajalikele osapooltele juurdepääsu tulemüüri taga olevale arvutivõrgule vastavalt määratud reeglitele.
Reverse Proxy	Komponent, mis võtab vastu kasutaja päringud, edastab need Hooldusvajaduse tuvastamise rakendusele ja saadab päringuvastused kasutajale tagasi.
Single Sign On (SSO)	Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi sisse logimiseks kasutatav autentimislahendus.
Directory Service (users)	IT infrastruktuuri teenus kasutajateabe haldamiseks ja kasutajatele autentimisteenuse pakkumiseks.
DBMS	Andmebaasihaldussüsteem, mis suhtleb andmete määratlemiseks, salvestamiseks, pärimiseks ja haldamiseks rakenduse ja andmebaasidega.
HVT-DB	Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi andmebaas.
Kaardirakenduse moodul	Moodul, milles on loodud taustakaardi vaate funktsionaalsus
Aruandluse moodul	Moodul, milles on loodud aruandluse koostamise ja haldamise funktsionaalsus.
Hooldusvajaduste moodul	Moodul, milles on loodud hooldusvajaduste koostamise ja haldamise funktsionaalsus.
Tingimuste moodul	Moodul, milles on loodud tingimuste koostamise ja haldamise funktsionaalsus.
Trendide moodul	Moodul, milles on loodud trendide kuvamise funktsionaalsus
Seisakute moodul	Moodul, milles on loodud seisakute analüüsimise funktsionaalsus.

Andmetöötluse moodul	Moodul, milles on loodud andmetöötluse loogika.
Liideste moodul	Moodul, milles hallatakse andmete vahetust väliste süsteemidega.
NordPool	Elektrienergia turuhinna edastamise teenus.
Windy ¹	Ilmastikuandmete edastamise teenus.
Operatiivandmete IS	Tootmisvarade operatiivandmete toorandmete infosüsteem
Varahalduse IS	Tootmisvarade ja hooldustööde haldamise infosüsteem

4.3.5 Järgnevusdiagramm

Joonisel 28 on esitatud hooldusvajaduse tuvastamise järgnevusdiagramm tingimustel:

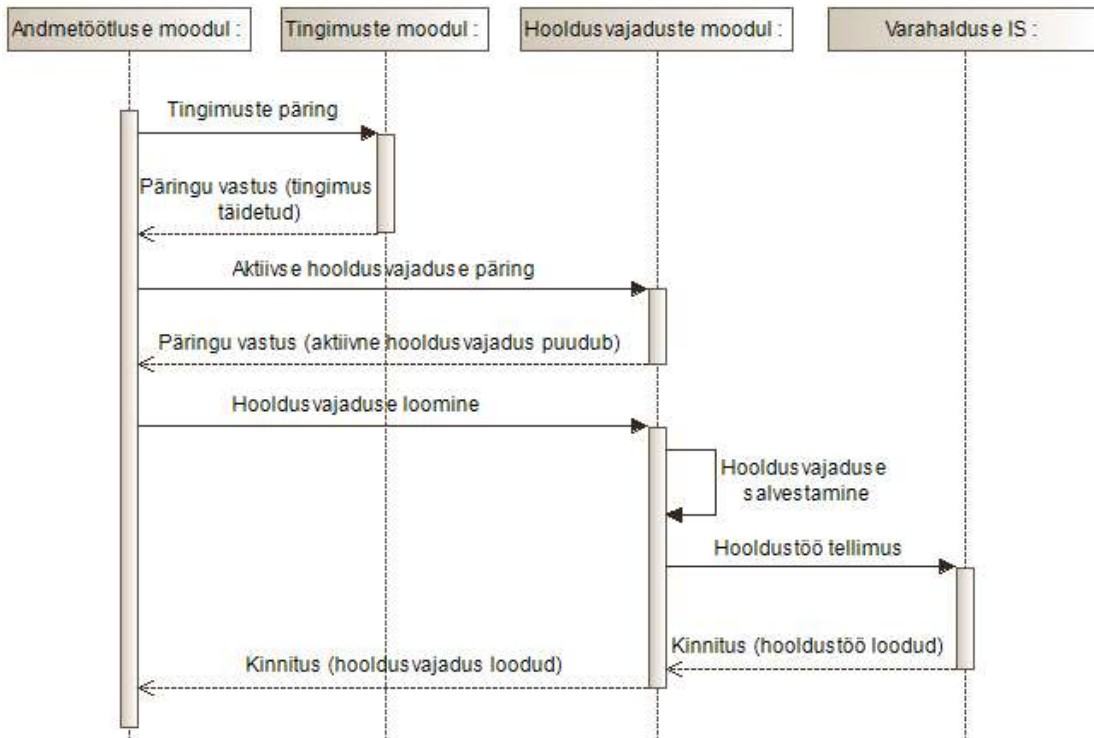
1. mudeli ja tegelikult mõõdetud parameetri väärtuste vahe ületab trendide moodulis seadistatud piirmäära;
2. tuulikul ei eksisteeri aktiivses staatuses olevaid hooldusvajadusi.

Hooldustöö tellimus edastatakse Varahalduse infosüsteemi mõlema tingimuse täitumise korral.

Kui sama tingimuse alusel eksisteerib aktiivses staatuses olev hooldusvajadus, tagastab Hooldusvajaduste moodul päringu tulemuseks „aktiivne hooldusvajadus tuvastatud“ ning edasisi toiminguid ei jätku.

Kui tuulikul eksisteerib aktiivses staatuses olev hooldusvajadus, aga süsteem tuvastab hooldusvajaduse teise tingimuse alusel, siis luuakse uus hooldusvajadus ja edastatakse vajaliku töö tellimus Varahalduse infosüsteemi.

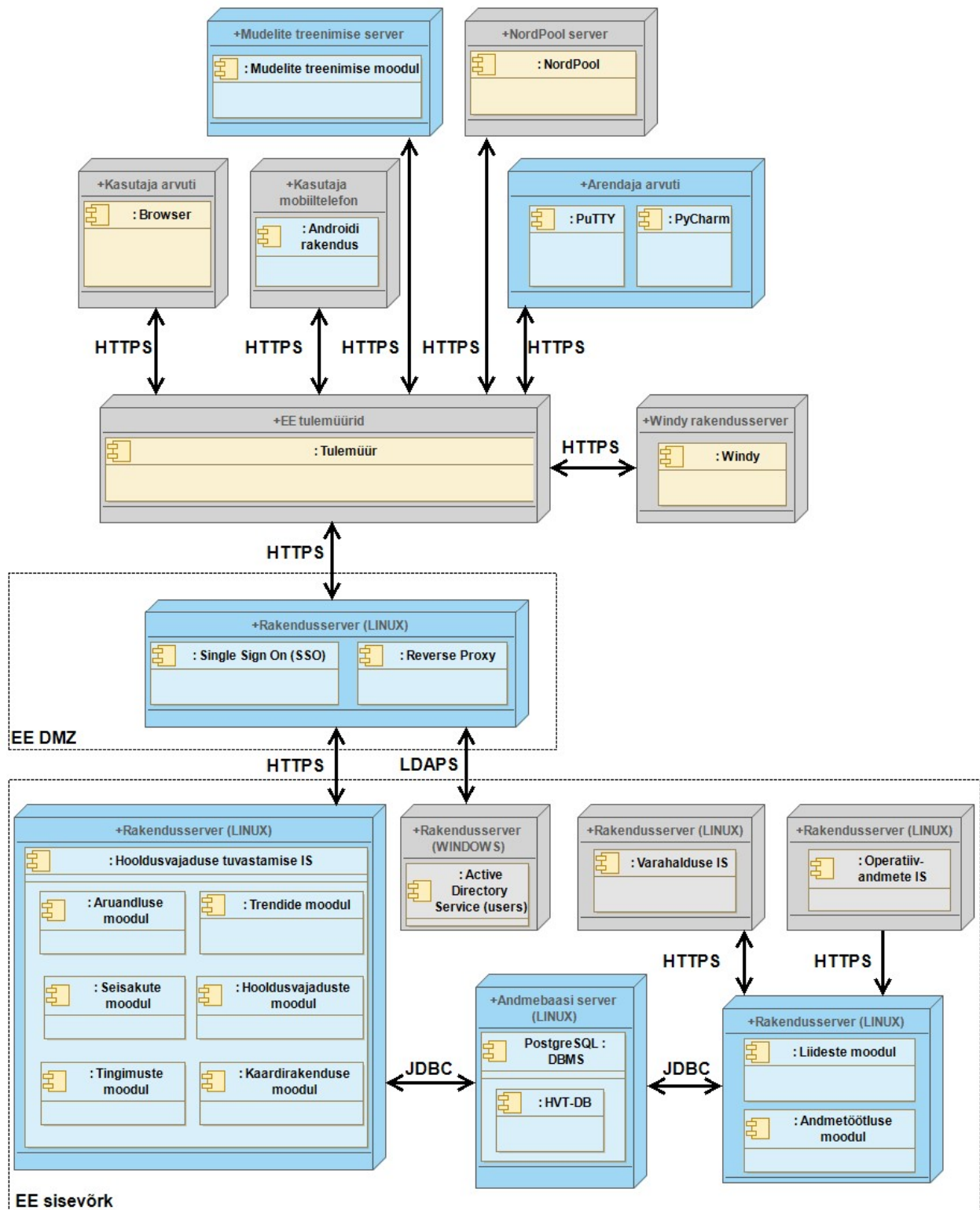
¹ <https://www.windy.com>



Joonis 28. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi järgnevusdiagramm.

4.3.6 Eviitusdiagramm

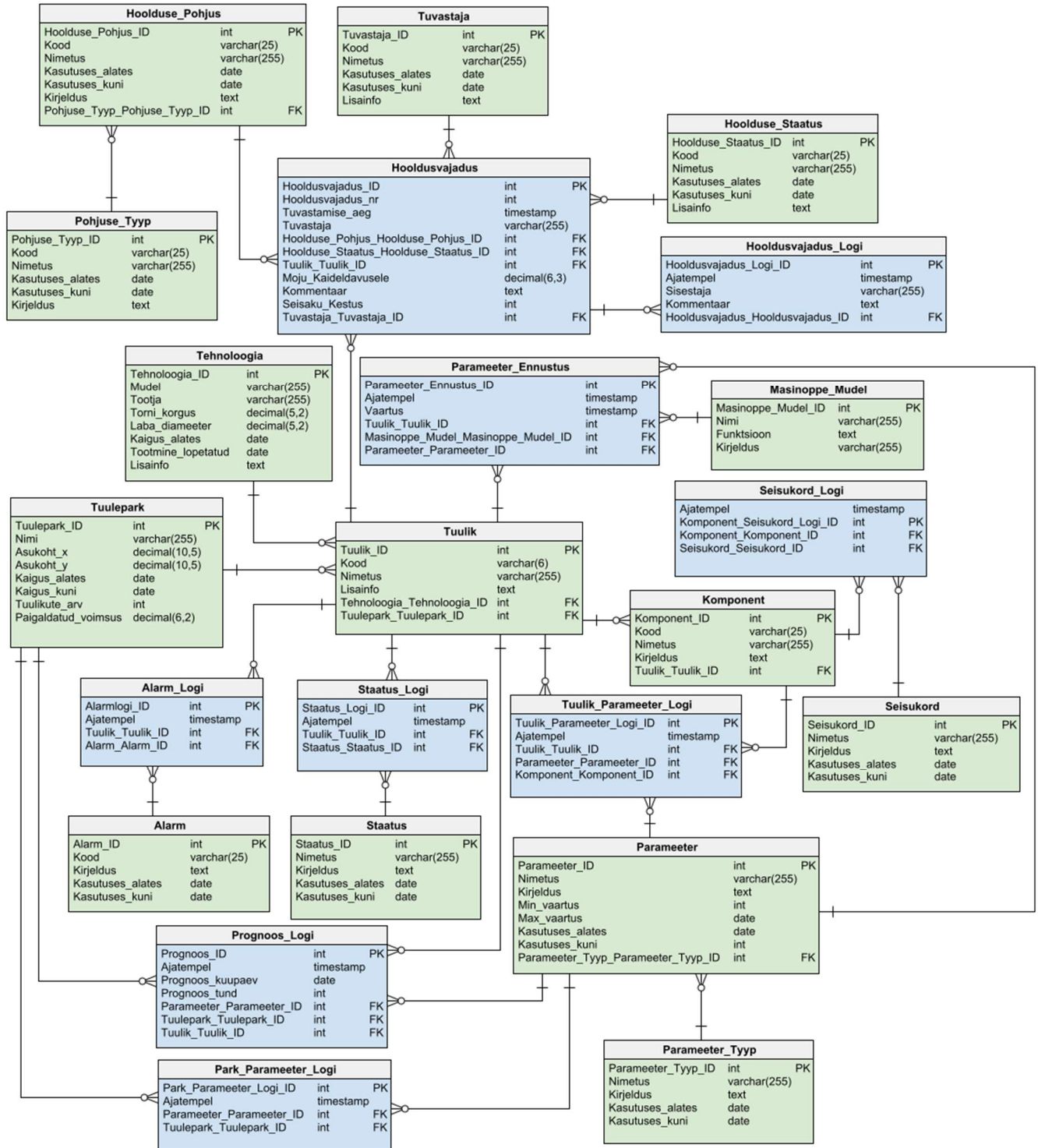
Joonisel 29 on toodud eviitusdiagramm, kus sinise värviga on esitatud uued loodavad Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi sõlmed ning halli värviga on toodud olemasolevate süsteemide sõlmed. Joonisel on kajastatud rakenduse kihi protokollid, mis suhtlevad teiste sõlmedega üle TCP/IP võrguprotokollid.



Joonis 29. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi evitusdiagramm.

4.3.7 Relatsiooniline andmemudel

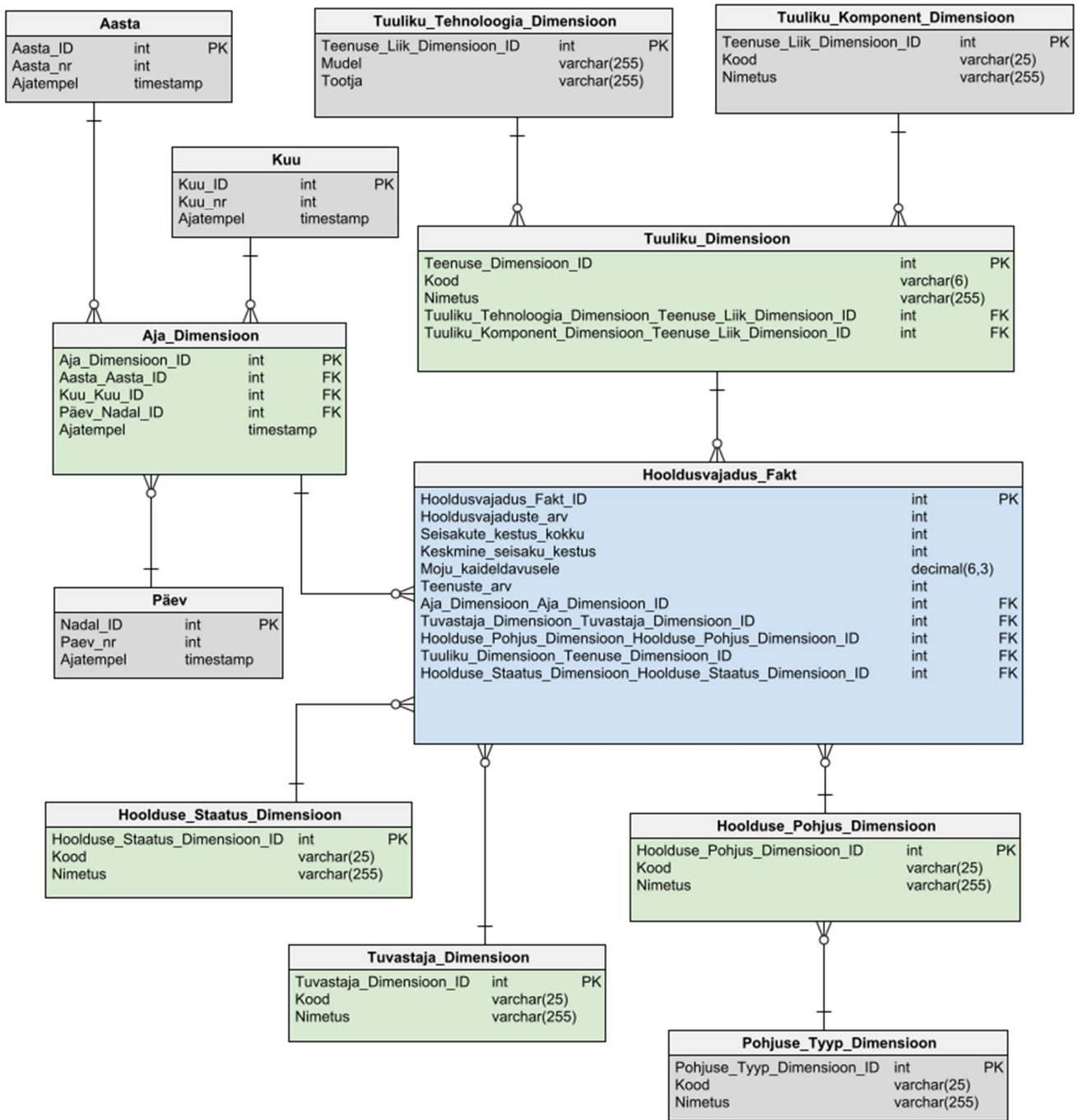
Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi relatsiooniline andmemudel on esitatud joonisel 30.



Joonis 30. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi relatsiooniline andmemudel.

4.3.8 Dimensionaalne andmemudel

Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi dimensionaalne andmemudel on esitatud joonisel 31.



Joonis 31. Hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi dimensionaalne andmemudel.

5 Projektiplaan

Viiendas ja ühtlasi magistritöö viimases peatükis esitab autor uuele protsessile ülemineku ajakava ja viib läbi IT arendusprojekti riskide hindamise.

5.1 Uuele protsessile ülemineku ajaplaan

Tabelis 21 on toodud automatiseeritud hooldusvajaduse tuvastamise protsessile ülemineku ajaplaan koos IT arendustegevustega.

Tabel 21. Uuele protsessile ülemineku ajaplaan.

Projekti nimi		Uuele tööprotsessile ülemineku ajaplaan			
Projektijuht		Toivo Joosua			
Ettevõte		Enefit Green			
Kuupäev		19.04.2021			
ÜL Nr	Ülesande nimi	ÜL omanik	Algus kuupäev	Lõpp kuupäev	Kestus päevades
1	Uue võimekuse arendusvajaduse kinnitamine juhatuses	TJ	01.06.2021	02.06.2021	1
2.0	HVT IT võimekuse arendamine	TJ	02.06.2021	31.10.2021	151
2.1	HVT IT arendusprojekti koostamine	SG	02.06.2021	30.06.2021	28
2.2	HVT IT arendusressursi planeerimine	SG	01.07.2021	09.07.2021	8
2.3	HVT infosüsteemi arendamine	AA	12.07.2021	31.10.2021	111
2.4	Operatiivandmete ja Varahalduse IS liideste arendamine	TJ	15.09.2021	15.10.2021	30
SP	SP 2.4	TJ	16.10.2021	31.10.2021	15
2.5	HVT infosüsteemi testimine	AP	01.11.2021	30.11.2021	29
2.6	HVT digitaalse platvormi täiendamine	AA	01.12.2021	31.12.2021	30
3.0	HVT digitaalse platvormi toodangusse võtmine	TJ	01.01.2022	31.01.2022	30
4.0	Loogika seadistamine hooldusvajaduste tuvastamiseks	AP	01.02.2022	30.06.2022	149

4.1	Masinõppe mudelitel põhinev loogika	AA	01.02.2022	14.04.2022	72
4.1.1	Ajalooliste andmete ettevalmistamine	AA	01.02.2022	28.02.2022	27
4.1.2	Masinõppe mudelite treenimine	AA	01.03.2022	31.03.2022	30
4.1.3	Masinõppe mudelite tulemuste valideerimine	AA	01.04.2022	30.04.2022	29
4.2	Alarmkoodidel põhinev loogika	AP	01.02.2022	28.02.2022	27
4.3	Parameetri trendidel põhinev loogika	AP	01.03.2022	31.03.2022	30
SP	4.2–4.3 suubuv puhver	AP	01.04.2022	30.04.2022	29
4.4	Loogika testperiood	AA	01.05.2022	31.05.2022	30
4.5	Testperioodi tulemuste hindamine	AP	01.06.2022	30.06.2022	29
4.6	Loogika täiendamine	AP	01.07.2022	31.08.2022	61
5.0	Uue tööprotsessi kasutusele võtmine	TJ	01.09.2022	15.09.2022	14
5.1	Kasutajate informeerimine uuest tööprotsessist	TJ	01.09.2022	13.09.2022	12
5.2	Vana tööprotsessi joonise asendamine uuega	JT	14.09.2022	15.09.2022	1
6.0	Projekti puhver	TJ	16.09.2022	30.04.2023	226

5.2 Uuele protsessile ülemineku Gantti graafik

Joonisel 32 on esitatud automatiseeritud hooldusvajaduse tuvastamise protsessile ülemineku Gantti graafik.



Joonis 32. Automatiseeritud HVT protsessile ülemineku Gantti graafik.

5.3 IT arendusprojekti riskianalüüs

Tabelis 22 on kirjeldatud automatiseeritud hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi arendusprojekti riskid koos leevendusmeetmetega.

Tabel 22. HVT IS arendusprojekti riskid.

Nr	Risk	Riski kirjeldus	Mõju (kõrge, keskmine, madal)	Tõenäosus (kõrge, keskmine, madal)	Riski leevendamise meetmed	Vastutaja
1	IT arendusressursi puudus	IT üksusel puudub vaba arendusressurss	kõrge	keskmine	Tellida arendustööd majaväliselt. Värvata projektipõhine arendaja.	SG
2	Projekti skoobi muudatus	Tellija soovib lisafunktsionaalsust, mis ei olnud alguses projekti skoobis	madal	kõrge	Projektijuht peab tagama algse skoobi hoidmise. Regulaarsete steeringute korraldamine.	TJ
3	Riistvara tehnilised probleemid	Riistvara poolt põhjustatud süsteemi probleemid ei võimalda süsteemi kasutamist	kõrge	madal	Pidev kommunikatsioon süsteemiadministraatoriga ning süsteemi jõudluse automaatne monitooring.	SG
4	Projektiliikme haigestumine	Projektimeeskonna liikme pikaajaline töölt eemal viibimine haigestumise tõttu	keskmine	madal	Dokumentatsioon ajakohasena hoidmine. Eelkokkulepped asendajatega.	TJ
5	Projekti lõpptähtaja edasilükkumine	Projekti tegevused on ajakavast maas	keskmine	madal	Eelkokkulepped osaliselt puhkuste edasilükkamiseks kriitilise vajaduse korral.	TJ
6	Arendus-prioriteetide muutus	Uued prioriteetsed projektid vähendavad hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi kasutusele võtmise prioriteeti	keskmine	madal	Agiilne projektiplaani muudatuse kinnitamine nõukogus ja projektimeeskonna informeerimine.	IK
7	Uue süsteemi keerukus	Süsteem on planeeritud keerukam ja vajab rohkem aega kasutajate koolitamiseks	madal	madal	Täiendavate koolituste läbiviimine. Kasutusjuhendite täiendamine.	SG
8	Muudatused projekti-meeskonnas	Projekti võtmeisiku lahkumine projektimeeskonnast	madal	madal	Dokumentatsioon ajakohasena hoidmine. Eelkokkulepped asendajatega.	TJ

Kokkuvõte

Magistritöö eesmärgiks oli automatiseeritud hooldusvajaduse tuvastamise võimekuse planeerimine tuuleparkide käideldavuse kasvuks ja äriprotsessi optimeerimiseks. Läbi viidud äri- ja süsteemianalüüs on aluseks uue infosüsteemi arendamiseks ja uuele protsessile üleminekuks.

Töö eesmärgi saavutamiseks:

- kirjeldati äriprobleem ja analüüsiti selle finantsmõju;
- kaardistati olemasolev hooldusvajaduse tuvastamise äriprotsess ja analüüsiti selle puudusi;
- pakuti välja väärtusvoog tulevasele äriprotsessile ning kaardistati olemasolevad ja puuduvad äriprotsessi toetavad võimekused;
- modelleeriti äriinfo ja koostati IT arhitektuur hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi arendamiseks;
- koostati automatiseeritud hooldusvajaduse tuvastamise protsessile ülemineku ja infosüsteemi arendamise ajaplaan koos IT arendusprojekti riskide hindamisega.

Kõik seatud eesmärgid saavutati ning töö tulemuseks on:

- äriprobleemi lahendamiseks on võimalik ettevõttel teenida täiendavalt 0,8 M€ aastas;
- olemasolev äriprotsess ei taga hooldusvajaduste tuvastamist ennetavalt vajalikus mahus tulenevalt olemasoleva protsessi ressursipuudusest, mis omakorda on põhjustatud suurest käsitöö mahust;
- pakutud välja lahendus äriprobleemi lahendamiseks läbi automatiseeritud hooldusvajaduse tuvastamise võimekuse arendamise ja äriprotsessi automatiseerimise;

- valminud äri- ja süsteemianalüüsi projektdokumentatsioon ennustava hoolduse infosüsteemi arendamiseks ja automatiseeritud protsessile üleminekuks.

Antud töö koostamisega on andnud autor panuse ettevõtte täiendava efektiivsuse kasvu loomiseks läbi digitaliseerimise, mis väljendub tuuleparkide suuremas toodangus ning automatiseeritud tööprotsessis pärast projekti realiseerimist.

Kasutatud kirjandus

- [1] “Wind energy in Europe 2020 Statistics and the outlook for 2021–2025,” WindEurope. [Online]. Available: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-in-2020-trends-and-statistics>. [Kasutatud: 16.05.2021].
- [2] S. Faulstich, B. Hahn, and P. J. Tavner, “Wind turbine downtime and its importance for offshore deployment,” *Wind Energy*, vol. 14, no. 3, lk. 327–337, 2011, doi: 10.1002/we.421.
- [3] Enefit Green AS, ettevõtte kodulehekülj. [Online]. Available: <https://www.enefitgreen.ee/et/ettevottest/avaleht>. [Kasutatud 19.03.2021].
- [4] K. Jefimov, “Asset Management Report 2020”, Enefit Green AS, ettevõtte sisedokumendid, Eesti, Tallinn, 2021.
- [5] T. Joosua, “Asset Management Strategy”, Enefit Green AS, ettevõtte sisedokumendid, Eesti, Tallinn, 2021.
- [6] Y. Li, S. Liu, and L. Shu, “Wind turbine fault diagnosis based on Gaussian process classifiers applied to operational data,” *Renewable Energy*, vol. 134, lk. 357–366, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.10.088.
- [7] A. Kusiak, Z. Zhang, and A. Verma, “Prediction, operations, and condition monitoring in wind energy,” *Energy*, vol. 60, lk. 1–12, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.07.051.
- [8] C. S. Gray and S. J. Watson, “Physics of Failure approach to wind turbine condition based maintenance,” *Wind Energy*, vol. 13, no. 5, lk. 395–405, 2009, doi: 10.1002/we.360.
- [9] A. Kusiak and W. Li, “The prediction and diagnosis of wind turbine faults,” *Renewable Energy*, vol. 36, no. 1, lk. 16–23, 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.05.014.
- [10] A. Kusiak and A. Verma, “Analyzing bearing faults in wind turbines: A data-mining approach,” *Renewable Energy*, vol. 48, lk. 110–116, 2012, doi: 10.1016/j.renene.2012.04.020.
- [11] [11] The TOGAF® Standard, Version 9.2. [Online]. Available: <https://pubs.opengroup.org/architecture/togaf9-doc/arch>. [Kasutatud: 16.05.2021].
- [12] [12] International Institute of Business Analysis, BABOK® v3: A Guide to Business Analysis Body Of Knowledge, version 3.0, 2015, lk. 314–320.
- [13] [13] The Association of Business Process Management Professionals, BPM CBOK® v3: Guide to the Business Process Management Body of Knowledge, 1st ed., version 3.0, 2013, lk. 53.
- [14] [14] Project Management Institute, A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide), 5th ed., 2012, lk. 156-206, 315-357.
- [15] [15] “5 Whys: The Ultimate Root Cause Analysis Tool,” Kanban Software for Agile Project Management. [Online]. Available: <https://kanbanize.com/lean-management/improvement/5-whys-analysis-tool>. [Kasutatud: 18-May-2021].

- [16] [16] C. Hohmann, “Conflict Resolution Diagram / Evaporating Cloud,”. [Online]. Available: <https://hohmannchris.wordpress.com/2014/11/17/conflict-resolution-diagram-evaporating-cloud/>. [Kasutatud: 18-May-2021].
- [17] [17] “Business model canvas - Business design tool,” Business Models Inc., 03-Mar-2021. [Online]. Available: <https://www.businessmodelsinc.com/about-bmi/tools/business-model-canvas/>. [Kasutatud: 18-May-2021].
- [18] [18] A. Blair, J. B. Lail, and S. Marshall, TOGAF® Series Guide Value Streams, Berkshire: The Open Group, 2017.
- [19] [19] N. Renström, P. Bangalore, and E. Highcock, “System-wide anomaly detection in wind turbines using deep autoencoders,” *Renewable Energy*, vol. 157, lk. 647–659, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.04.148.
- [20] [20] C. Sanders, “A guide to vibration analysis and associated techniques in condition monitoring,” DAK Consulting – Chiltern House, 2011. [Online]. Available: http://www.dakacademy.com/newsite/index.php?option=com_k2&Itemid=500&id=94_007cd4b8b347e375bc10dbe5efbcc28&lang=en&task=download&view=item. [Kasutatud: 9.05.2021].
- [21] [21] M. Wilkinson, B. Darnell, T. Delft, and K. Harman, “Comparison of methods for wind turbine condition monitoring with SCADA data,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 8, no. 4, lk. 390–397, 2014, doi: 10.1049/iet-rpg.2013.0318.
- [22] [22] P. Tavner, L. Ran, J. Penman, and H. Sedding, “Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines,” Institution of Engineering and Technology, London, 2008, Series: IET Power and Energy, doi: 10.1049/PBPO145E.
- [23] [23] D. McMillan and G. W. Ault, “Quantification of Condition Monitoring Benefit for Offshore Wind Turbines,” *Wind Engineering*, vol. 31, no. 4, lk. 267–285, 2007, doi: 10.1260/030952407783123060.
- [24] [24] Enefit Green AS, “Varahalduse põhimõtted”, ettevõtte sisedokumentid, 2020.
- [25] [25] H. Link, W. LaCava, J. van Dam, B. McNiff, S. Sheng, R. Wallen, M. McDade, S. Lambert, S. Butterfield, and F. Oyague, “Gearbox Reliability Collaborative Project Report: Findings from Phase 1 and Phase 2 Testing,” 2011, doi: 10.2172/1018489.
- [26] [26] J. J. Nielsen and J. D. Sørensen, “On risk-based operation and maintenance of offshore wind turbine components,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 96, no. 1, lk. 218–229, 2011, doi: 10.1016/j.res.2010.07.007.
- [27] [27] M. Beretta, J. J. Cárdenas, C. Koch, and J. Cusidó, “Wind Fleet Generator Fault Detection via SCADA Alarms and Autoencoders,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 23, p. 8649, 2020, doi: 10.3390/app10238649.
- [28] [28] W. Qiao and L. Qu, “Prognostic Condition Monitoring for Wind Turbine Drivetrains via Generator Current Analysis”, *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 4, no. 3, lk. 80–89, September 2018, doi: 10.23919/cjee.2018.8471293.
- [29] [29] “The Economics of Wind Energy - EWEA.” [Online]. Available: https://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Economics_of_Wind_Energy.pdf. [Kasutatud: 16.05.2021].
- [30] [30] P. Tchakoua, R. Wamkeue, M. Ouhrouche, F. Slaoui-Hasnaoui, T. Tameghe, and G. Ekemb, “Wind Turbine Condition Monitoring: State-of-the-Art Review, New Trends, and Future Challenges,” *Energies*, vol. 7, no. 4, lk. 2595–2630, 2014, doi: 10.1109/ICCAIS.2013.6720561.

- [31] [31] C. R. Bond, V. A. Peters, and A. B. Ogilvie, "Continuous Reliability Enhancement for Wind (CREW) database: wind plant reliability benchmark.," Technical Report, Sandia National Laboratories: Albuquerque, NM, USA, 2012, doi: 10.13140/RG.2.2.15048.72964.
- [32] [32] C. McKinnon, A. Turnbull, S. Koukoura, J. Carroll, and A. McDonald, "Effect of Time History on Normal Behaviour Modelling Using SCADA Data to Predict Wind Turbine Failures," *Energies*, vol. 13, no. 18, p. 4745, 2020, doi: 0.3390/en13184745.
- [33] [33] X. Lei, P. Sandborn, R. Bakhshi, A. Kashani-Pour, and N. Goudarzi, "PHM based predictive maintenance optimization for offshore wind farms," 2015 IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM), Austin, TX, USA, 22–25 June 2015, lk. 1–8, doi: 10.1109/ICPHM.2015.7245027.
- [34] [34] S. T. Kandukuri, A. Klausen, H. R. Karimi, and K. G. Robbersmyr, "A review of diagnostics and prognostics of low-speed machinery towards wind turbine farm-level health management," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, lk. 697–708, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.08.061.
- [35] [35] F. P. García Márquez, A. M. Tobias, J. M. Pinar Pérez, and M. Papaalias, "Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods," *Renewable Energy*, vol. 46, lk. 169–178, 2012, doi: 10.1016/j.renene.2012.03.003.
- [36] [36] Z. Hameed, Y. S. Hong, Y. M. Cho, S. H. Ahn, and C. K. Song, "Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 1, lk. 1–39, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2007.05.008.
- [37] [37] J. L. Godwin and P. Matthews, "Classification and Detection of Wind Turbine Pitch Faults Through SCADA Data Analysis," *International Journal of Prognostics and Health Management*, vol. 4, no. 3, 2020, doi: 10.36001/ijphm.2013.v4i3.2146.
- [38] [38] H. D. de Azevedo, A. M. Araújo, and N. Bouchonneau, "A review of wind turbine bearing condition monitoring: State of the art and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, lk. 368–379, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.032.
- [39] [39] W. Yang, R. Court, and J. Jiang, "Wind turbine condition monitoring by the approach of SCADA data analysis," *Renewable Energy*, vol. 53, lk. 365–376, 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.11.030.
- [40] [40] M. A. Rodríguez-López, L. M. López-González, L. M. López-Ochoa, and J. Las-Heras-Casas, "Development of indicators for the detection of equipment malfunctions and degradation estimation based on digital signals (alarms and events) from operation SCADA," *Renewable Energy*, vol. 99, lk. 224–236, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.06.056.
- [41] [41] E. Gonzalez, M. Reder, and J. J. Melero, "SCADA alarms processing for wind turbine component failure detection," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 753, p. 072019, 2016, doi: 10.1088/1742-6596/753/7/072019.
- [42] [42] B. Lu, Y. Li, X. Wu, and Z. Yang, "A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis," 2009 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, lk. 1–7, 2009, doi: 10.1109/PEMWA.2009.5208325.
- [43] [43] E. Artigao, A. Sapena-Bano, A. Honrubia-Escribano, J. Martinez-Roman, R. Puche-Panadero, and E. Gomez-Lazaro, "Long-Term Operational Data Analysis of an

- In-Service Wind Turbine DFIG,” *IEEE Access*, vol. 7, lk. 17896–17906, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2895999.
- [44] [44] K. Leahy, C. Gallagher, P. O’Donovan, K. Bruton, and D. O’Sullivan, “A Robust Prescriptive Framework and Performance Metric for Diagnosing and Predicting Wind Turbine Faults Based on SCADA and Alarms Data with Case Study,” *Energies*, vol. 11, no. 7, p. 1738, 2018, doi: 10.3390/en11071738.
- [45] [45] J. Tautz-Weinert and S. J. Watson, “Using SCADA data for wind turbine condition monitoring – a review,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 4, lk. 382–394, 2016, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0248.
- [46] [46] B. Boucher, “Lowering the cost of project using simple analysis of SCADA data – a real case example,” *PHM Conf.*, New Orleans, 2013.
- [47] [47] V. J. Brocke and M. Rosemann, *Handbook on Business Process Management 1 Introduction, Methods, and Information Systems*, 2nd edition. Berlin: Springer Berlin, 2015, ö. 143, doi: 10.1007/978-3-642-45100-3.
- [48] [48] P. Marti-Puig, A. Blanco-M., M. Serra-Serra, and J. Solé-Casals, “Wind Turbine Prognosis Models Based on SCADA Data and Extreme Learning Machines,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 2, p. 590, 2021, doi: DOI: 10.3390/app11020590.
- [49] [49] B. Chen, Y. Liu, C. Zhang, and Z. Wang, “Time Series Data for Equipment Reliability Analysis With Deep Learning,” *IEEE Access*, vol. 8, lk. 105484–105493, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3000006.
- [50] [50] Y. Liu, H. Cheng, X. Kong, Q. Wang, and H. Cui, “Intelligent wind turbine blade icing detection using supervisory control and data acquisition data and ensemble deep learning,” *Energy Science & Engineering*, vol. 7, no. 6, lk. 2633–2645, 2019, doi: 10.1002/ese3.449.
- [51] [51] L. Wang, Z. Zhang, J. Xu, and R. Liu, “Wind Turbine Blade Breakage Monitoring With Deep Autoencoders,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 4, lk. 2824–2833, 2018, doi: DOI: 10.1109/TSG.2016.2621135.
- [52] [52] G. Jiang, P. Xie, H. He, and J. Yan, “Wind Turbine Fault Detection Using a Denoising Autoencoder With Temporal Information,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 23, no. 1, lk. 89–100, 2018, doi: DOI: 10.1109/TMECH.2017.2759301.
- [53] [53] Y. Liu, Z. Wu, and X. Wang, “Research on Fault Diagnosis of Wind Turbine Based on SCADA Data,” *IEEE Access*, vol. 8, lk. 185557–185569, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3029435.
- [54] [54] J. Tautz-Weinert, S.J. Watson, “Challenges in Using Operational Data for Reliable Wind Turbine Condition Monitoring,” In *Proceedings of the Twenty-seventh (2017) International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)*, San Francisco, CA, USA, 25–30 June 2017, lk. 613–620.
- [55] [55] G. A. van Kuik, et al., “Long-term research challenges in wind energy – a research agenda by the European Academy of Wind Energy,” *Wind Energy Science*, vol. 1, no. 1, lk. 1–39, 2016, doi: 10.5194/wes-1-1-2016.
- [56] [56] P. Cross and X. Ma, “Model-based and fuzzy logic approaches to condition monitoring of operational wind turbines,” *International Journal of Automation and Computing*, vol. 12, no. 1, lk. 25–34, 2015, doi: 10.1007/s11633-014-0863-9.
- [57] [57] M. Schlechtingen and I. Ferreira Santos, “Comparative analysis of neural network and regression based condition monitoring approaches for wind turbine fault

- detection,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, no. 5, lk. 1849–1875, 2011, doi: 10.1016/j.ymsp.2010.12.007.
- [58] [58] J. Tautz-Weinert and S. J. Watson, “Comparison of different modelling approaches of drive train temperature for the purposes of wind turbine failure detection,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 753, p. 072014, 2016, doi: 10.1088/1742-6596/753/7/072014.
- [59] [59] L. Wang, Z. Zhang, H. Long, J. Xu, and R. Liu, “Wind Turbine Gearbox Failure Identification With Deep Neural Networks,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 3, lk. 1360–1368, 2017, doi: 10.1109/TII.2016.2607179.
- [60] [60] W. Teng, H. Cheng, X. Ding, Y. Liu, Z. Ma, and H. Mu, “DNN-based approach for fault detection in a direct drive wind turbine,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 10, lk. 1164–1171, 2018, doi: 10.1049/iet-rpg.2017.0867.
- [61] [61] Y. Vidal, F. Pozo, and C. Tutivén, “Wind Turbine Multi-Fault Detection and Classification Based on SCADA Data,” *Energies*, vol. 11, no. 11, p. 3018, 2018, doi: 10.3390/en11113018.
- [62] [62] E. Hosiaislouma “ArchiMate Cookbook: Patterns & Examples,” version 1.0, 2019, lk. 9 [Online]. Available: <http://www.hosiaislouma.fi/ArchiMate-Cookbook.pdf>. [Kasutatud: 16.05.2021].
- [63] [63] J.-Y. Hsu, Y.-F. Wang, K.-C. Lin, M.-Y. Chen, and J. H.-Y. Hsu, “Wind Turbine Fault Diagnosis and Predictive Maintenance Through Statistical Process Control and Machine Learning,” *IEEE Access*, vol. 8, lk. 23427–23439, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2968615.
- [64] [64] 8. Conduct a gap analysis. [Online]. Available: http://www.opengroup.org/public/arch/p2/ta/ta_gapan.htm. [Accessed: 18-May-2021].

Lisa 1 – Lihtlitsents

Mina, Toivo Joosua

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Tootmise efektiivistamine läbi digitaliseerimise – hooldusvajaduse tuvastamise infosüsteemi äri- ja süsteemianalüüs Enefit Green AS tuuleparkide käideldavuse parendamiseks“, mille juhendaja on Taivo Kangilaski
 - 1.1. reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.