



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

---

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

KINNISVARA ARENDUSPIIRKONNA  
ENERGIAVARUSTUS (JAANI KINNISTU, HARKU  
VALD)

ESTATE DISTRICT ENERGY SUPPLY (JAANI ESTATE, HARKU PARISH)

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Roman Ivantsov

Üliõpilaskood: 153495 AAVM

Juhendaja: prof. Arvi Hamburg

Tallinn, 2017.a.

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

“.....” ..... 201.....

Autor: .....  
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....  
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....  
/ nimi ja allkiri /

# Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Roman Ivantsov	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Kinnisvara arenduspiirkonna energiavarustus (Jaani kinnistu, Harku vald)	
<i>Kuupäev:</i> 15.05.2017	97 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> prof. Arvi Hamburg	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i> Arbo Reino	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Lõputöös uuritakse konkreetse kinnisvaraarenduse piirkonna optimaalse energiavarustuse planeerimist. Lõputöö baseerub kolme hüpoteesi analüüsil ja tõestusel: kinnisvaraarenduse piirkonna territooriumil tsentraliseeritud energia tootmine on efektiivsem hoonepõhisest ehk hajaenergia tootmisest, tsentraliseeritud tootmine on majanduslikult jätkusuutlik ning tsentraliseeritud tootmine on soodne keskkonna emissioonitegurite suhtes.</p> <p>Lõputöö eesmärk on leida optimaalne tehniline ja majanduslik põhjendus kinnistu energiavarustuse tagamiseks.</p> <p>Lõputöös analüüsitakse uusimaid energiatootmise viise, prognoositakse energiavajadusi, uuritakse energia transporti ning selle jaotust. Uurimismeetoditeks on simulatsioon MS Excel'i ja EnergyPro 4.4 tarkvarade abil. Simulatsiooni tulemuste alusel koostatakse matemaatiline mudel, mille väljundite alusel teostatakse võrdlev analüüs.</p> <p>Lõputöö kaks esimest hüpoteesi tõestati tingimisi ning kolmas hüpotees tõestati täielikult. Samuti leiti optimaalne tehniline ja majanduslik põhjendus kinnistu energiavarustuse tagamiseks, millega täideti lõputöö põhieesmärk.</p>	
<i>Märksõnad:</i> koostootmine, energiatehnoloogia, energiaefektiivsus, arenduspiirkond, emissioonitegurid.	

# Summary of the Diploma Work

<i>Author:</i> Roman Ivantsov	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Estate district energy supply (Jaani estate, Harku parish)	
<i>Date:</i> 15.05.2017	97 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology School of Engineering <i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Associate Professor Arvi Hamburg <i>Consultant(s):</i> Arbo Reino	
<i>Abstract:</i> <p>Thesis examines a particular area of estate development for optimal energy supply planning. The thesis is based on the analysis and proof of the three hypotheses: centralized energy production on the territory of the estate area is more efficient compared to distributed energy production, centralized energy production is economically sustainable and environmentally favourable to emissions factors.</p> <p>The thesis aims to find the optimal technical and economic justification for the property energy supply.</p> <p>The study analyzes the newest methods of energy production, the projected energy needs, investigates the energy transportation and distribution. Research methods are a simulation in the MS Excel and EnergyPro 4.4 software. The simulation results are the basis for the mathematical model. The output of the mathematical model is the basis for the comparative analysis.</p> <p>The thesis first two of the hypothesis have been confirmed conditionally, third hypothesis has been confirmed completely. The optimum technical and economic justification of the property energy supply has been found, thus main purpose of the thesis has been satisfied.</p>	
<i>Keywords:</i> chp, energy technology, energy efficiency, estate area, emission factors.	

# Sisukord

Lõputöö ülesanne.....	7
Teema põhjendus:.....	7
Töö eesmärk: .....	8
Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu: .....	8
Lähteandmed: .....	8
Lõputöö konsultandid:.....	8
Eessõna .....	9
Sissejuhatus .....	10
Hüpotees .....	11
Uurimismeetodid .....	11
1. Energiavajaduse hindamine.....	12
1.1 Detailplaneering.....	12
1.2 Elektrienergiavajaduse hinnang.....	12
1.3 Soojusenergiavajaduse hinnang.....	13
1.4 Tulemused .....	14
2. Energia tootmis- ja tarneviisid.....	16
2.1 Soojatarve algtingimused .....	16
2.2 Soojusenergia hajatootmine.....	17
2.2.1 Soojuspumbad .....	17
2.2.2 Gaasikatlad .....	18
2.2.3 Pelletikatlad .....	18
2.3 Energia tootmine kogu arenduspiirkonnale tsentraliseeritud .....	20
2.3.1 Soojusenergia jaotus .....	21
2.3.2 Kaugküttevõrk .....	24
2.3.3 Koostootmise tehnoloogia valik .....	35
3. Koostootmise simuleerimine .....	43
3.1 Simuleerimine MS Excel´i tarkvara keskkonnas.....	43
3.1.1 Stsenaarium 1: gaasimootoriga koostootmiseseade .....	44
3.1.2 Stsenaarium 2: gaasiturbiiniga koostootmiseseade .....	49
3.1.3 Stsenaarium 3: biomassil töötav siseõlemismootoriga koostootmiseseade ..	55
3.1.4 Stsenaarium 4: biomassil töötav stirlingmootoriga koostootmiseseade.....	59
3.2 Simuleerimine EnergyPro 4.4 tarkvaraga.....	65
3.2.1 Stsenaarium 1: gaasimootoriga koostootmiseseade .....	66
3.2.2 Stsenaarium 2: gaasi mikroturbiiniga koostootmiseseade .....	68
3.2.3 Stsenaarium 3 ja 4: biomassi koostootmistehnoloogiad.....	71
3.2.4 MS Excel´i ja EnergyPro simuleerimise tulemuste võrdlus.....	71

3.2.5	Soojatarve planeerimisel kasutatavad soojasalvestid .....	72
4.	Matemaatiline mudel .....	79
4.1	Etapid.....	79
4.1.1	Projekti kestvus .....	80
4.1.2	Jaani 2 piirkonna soojuskoormus .....	80
4.1.3	Koostootmisjaama tehnilised parameetrid .....	81
4.1.4	Kütused.....	82
4.1.5	Kütuste maksumused.....	82
4.1.6	CO <sub>2</sub> kvootide maksumused .....	83
4.1.7	Tuha utiliseerimiskulu .....	84
4.1.8	Hooldus- ja käidukulud .....	84
4.1.9	Investeeringute maksumus .....	85
4.1.10	Toetused .....	85
4.1.11	Elektrienergia müük .....	87
4.1.12	Soojusenergia müük .....	87
4.1.13	Rahavood.....	88
4.1.14	Muutujad.....	88
4.2	Tulemused .....	89
	Kasutatud kirjandus .....	95
5.	Lisa 1 – Jaani 2 maaüksuse detailplaneering.....	98
6.	Lisa 2 - Kaugküttevõrk. Võrguprojekt. ....	99
7.	Lisa 3 – EnergyPro 4.4 stsenaarium 1 aruanne .....	100
8.	Lisa 4 – EnergyPro 4.4 stsenaarium 2 aruanne .....	101
9.	Lisa 5 – EnergyPro 4.4 stsenaarium 4 aruanne .....	102
10.	Lisa 6 – EnergyPro 4.4 graafiline osa.....	104

# Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	<b>Kinnisvara arenduspiirkonna energiavarustus (Jaani kinnistu, Harkuvald)</b>
Üliõpilane:	<b>Roman Ivantsov, 153495</b>
Eriala:	<b>Elektroenergeetika</b>
Lõputöö liik:	<b>Magistritöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Arvi Hamburg</b>
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>25.05.2017</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppetooli juhataja (allkiri)

## Teema põhjendus:

Kinnisvaraarendaja soovib terve kinnistu kompleksset energiarustuse planeerimist. Kinnistu peaks olema pilootprojektiks järgnevatele analoogsetele planeeringutele. Hoonete energiavajadus moodustab ligikaudu 40% kogu toodetud energia mahust ning hoonete osa CO<sub>2</sub> emissioonides on ligikaudu 36% kogu CO<sub>2</sub> mahust. Käesoleva lõputöö teemaks on arendatava kinnistu kompleksne energiarustuse kavandamine, kasutades selleks taastuvaid energiaallikaid ning uusimaid tehnoloogiaid. Oma panus seisneb kontseptuaalse mudeli loomises. Selle mudeli alusel simuleeritakse tootmisüksuse käitumist reaalajas. Simulatsiooni tulemuste alusel analüüsitakse primaarressursside säästusid, mõju keskkonnale ja tehakse investeerimise otsused.

## **Töö eesmärk:**

Eesmärgiks on leida optimaalne tehniline ja majanduslik põhjendus elamuehituse arenduspiirkondade energiavarustuse tagamiseks.

## **Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

- Elektri- ja soojusenergiavajaduste prognoosimine
- Elamute soojavarustuse moodused
- Taastuvenergia võimalused elektrienergia tootmiseks
- Mini CHP talitluse optimeerimine ja majandusliku tasuvuse analüüs
- Taastuvenergia toetuskeemide kasutamine

## **Lähteandmed:**

Lähteandmed arendajalt, kinnisvaraturu analüüs, tehnilised andmed seadmete tootjatelt, elektrihindade ajalugu Nord Pool Spot elektribörsilt, ilmastiku vaatlusandmed Riigi Ilmateenistuselt.

## **Lõputöö konsultandid:**

Kinnistu arendaja, Arbo Reino kaasjuhendaja.



## Eessõna

Konkreetsed kinnisvaraarenduse piirkonna optimaalne energiavarustuse planeerimine on Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi professori Arvi Hamburgi poolt pakutud lõputöö teema. Kinnisvaraarenduse energia varustus eeldab soojusenergia tootmist ja jaotamist. Selles osas on kaasjuhendajaks saanud Arbo Reino, kes on soojusenergia ettevõtte Adven Eesti AS insener ja Tallinna Tehnikaülikooli doktorant. Soojustehnika ja hüdraulika osas on autor konsultatsiooni saanud Tallinna Tehnikaülikooli energiatehnoloogia instituudi professorilt Andres Siirde ja dotsent Eduard Latõsov'ilt.

Esiõalsed andmed hoonete mahudest on saadud kehtestatud detailplaneeringust.

Lõputöö autor avaldub tänu professor Arvi Hamburgile, kes on olnud lõputöö juhendaja. Professor on abistanud vajalike tehniliste ja energiapoliitiliste teaduskonsultatsioonidega ning on jaganud oma kogemusi ja pidanud kohtumisi teemaga seotud inimistega.

Lõputöö autor avaldub tänu doktorant Arbo Reinole, kes on soovitanud mitmeid sobivaid artikleid ja erinevat teemaga seotud kirjandust. Arbo Reino on jaganud oma kogemusi, mis on aidanud teemat käsitleda erinevatest vaatenurkadest.

Autori andmed:

Roman Ivantsov

Lembitu 6 - 42, Tallinn

roman@glaswer.ee

+372 50 93 585

# Sissejuhatus

Kaasaegne Euroopa energiapoliitika baseerub kahel vektoril – energia efektiivsuse tõstmisel ja keskkonnakaitse poliitika läbiviimisel. Eesti, osana Euroopast, on koostanud oma pikaajalise energiamajanduse arengukava ENMAK 2050 samadel põhisuunadel.

## Teema põhjendus

Hooned moodustavad 40% toodetud energia tarbimisest ning 36% CO<sub>2</sub> emissioonidest. [1] Hoonete efektiivne energiavarustus on üks põhiosadest riiklikust energiamajandusest. Käesoleva lõputöö teemaks on arendatava kinnistu kompleksne energiavarustuse uurimine, kasutades selleks taastuvaid energiaallikaid ja uusimaid tehnoloogiad.

## Töö eesmärk

Töö eesmärk on leida optimaalne tehniline ja majanduslik põhjendus kinnistu energiavarustuse tagamiseks.

## Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu

Töö käigus tuleb lahendada järgmised küsimused:

1. Elektri- ja soojusenergiavajaduste prognoosimine
2. Elamute soojavarustuse moodused
3. Taastuenergia võimalused elektrienergia tootmiseks
4. Mini CHP talitluse optimeerimine ja majanduslik tasuvuse analüüs
5. Soojatarve planeerimisel kasutatavad soojasalvestid
6. Taastuenergia toetuskeemide kasutamine.

## Hüpotees

Käesolev uurimistöö baseerub kolme hüpoteesi analüüsil ja tõestusel:

1. Jaani 2 maaüksuse territooriumil tsentraliseeritud energia tootmine on efektiivsem hoonepõhisest hajaenergia tootmisest, st tsentraliseeritud energia tootmine säästab primaarenergia ressursse ehk loodusvarasid.
2. Jaani 2 maaüksuse territooriumil tsentraliseeritud energia tootmine on majanduslikult jätkusuutlik, st energia lõpptarbija maksavad energia eest vähem.
3. Jaani 2 maaüksuse territooriumil tsentraliseeritud energia tootmine avaldub soodsat mõju Eesti energiasüsteemi keskkonna emissiooniteguritele.

## Uurimismeetodid

Lähteandmed on saadud kehtestatud detailplaneeringust. Hoonete mahud ja energiatõhususe klassid prognoositakse. Koostatakse piirkonna energiavarustuse kontseptuaalne mudel. Uurimiseks valitakse erinevad stsenaariumid.

Stsenaariumid simuleeritakse MS Excel'i tarkvarakeskkonnas. MS Excel'i keskkonnas moodustatakse vastav kontseptuaalne mudel ning loogiliste funktsioonidega simulerritakse Jaani 2 maaüksuse energiabilanssi ehk energia tootmisüksuse koosluse talitlust. Väljunditeks on energiabilanss reaalajas, elektrienergia neto eksport ja import, kütuse sisend, keskkonna emissioonitegurid jm. Simuleerimise tulemuste põhinäitajaid kontrollitakse EnergyPro 4.4 tarkvaraga, mis on seadistatud matemaatiliste algoritmidega.

Kui mõlema tarkvara arvutustulemuste vea ülemmäär ei ületa 2,5%, siis loetakse tulemused matemaatilise mudeli koostamiseks kõlblikuteks. Matemaatiline mudel töötab FCFF (*Free Cash Flow of Firm* – vabade rahavoogude nüüdispuhasväärtus) ja FCFE (*Free Cash Flow on Equity* - vabade rahavoogude väärtus) meetoditel. Matemaatilise mudeli väljundid on aluseks Jaani 2 tsentraliseeritud energia tootmise majandusliku jätkusuutlikuse analüüsiks. Lisaväljundiks on NPV (*Net Present Value* – nüüdispuhasväärtus).

# 1. Energiavajaduse hindamine

Peatükis 1 analüüsitakse rajatava piirkonna ehitusmahtusid ja võimalikke elektri- ja soojusenergia vajadusi. Käesolevas peatükis koostatakse prognoosid tulevasele energia tarbimisele, mis on aluseks energia tootmis- ja jaotamisviisidele.

## 1.1 Detailplaneering

Detailplaneeringuga vt. Lisa 1 moodustatakse 4,9 ha suurusega Jaani 2 maaüksusest 17 krunti, millest 12 krunti on elamumaad (2 ridaelamumaa krunti ja 10 üksikelamumaa krunti) suurusega 1923 m<sup>2</sup> – 4200 m<sup>2</sup>, 3 transpordimaa krunti, 1 transpordi- ja tootmismaa krunt ja üks üldmaa krunt. Elamumaa ehitisealused pinnad on vahemikus 300 - 350 m<sup>2</sup>.

Olemasoleva piirkonna läbiviidud analüüs näitab, et eramute suletud netopinnad varieeruvad keskmiselt vahemikus 200 - 300 m<sup>2</sup> ning ridaelamute ühe korteri suletud netopinnad on 110 m<sup>2</sup> – 140 m<sup>2</sup>. Energiavajaduse hindamise aluseks valitakse ühe elamu suletud netopinnaks 250 m<sup>2</sup> ja ridaelamu korteri suletud netopinnaks valitakse 125 m<sup>2</sup>. Prognoositavad hoonete mahud on kajastatud Tabel 1.1.

**Tabel 1.1 Jaani 2 maaüksuse prognoositavad suletud netopinnad**

Hoone tüüp	Kogus [tk]	Suletud netopind [m <sup>2</sup> ]	Kokku [m <sup>2</sup> ]
Eramu	10	250	2500
Korter	8	125	1000
Kokku	18		3500

## 1.2 Elektrienergiavajaduse hinnang

Elektrienergia vajaduse hinnangul tuleb lähtuda elamu suurusest ja elanike arvust. Elamu suurus määrab tugev- ja nõrkvoolu elektripaigaldiste arvu ja konfiguratsiooni. Elanike arv avaldab mõju elektriseadmete kasutamise intensiivsusele. Prognoosis lähtutakse majandus- ja kommunikatsiooniministri 08.10.2012. määrusest nr 63 „Hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika”. Selle alusel valitakse elektrienergia aastaseks tarbimiseks ühe ruutmeetri kohta

järgmised näitajad: 0,007 MWh/(m<sup>2</sup>a) valgustusele ja 0,0018 MWh/(m<sup>2</sup>a) elektriseadmetele.  
[2] Elektrienergia aastast vajadus kirjeldab Tabel 1.2.

**Tabel 1.2 Jaani 2 maaüksuse aastane elektrienergia prognoositav tarbimine**

Hoone tüüp	Suletud netopind kokku [m <sup>2</sup> ]	Aastane elektrienergiavajadus valgustusele [MWh/(m <sup>2</sup> a)]	Aastane elektrienergiavajadus elektriseadmetele [MWh/(m <sup>2</sup> a)]	Aastane elektrienergia tarbimine [MWh]
Eramu	2500	0,007	0,018	62,5
Korter	1000	0,007	0,018	25,0
Kokku	3500			87,5

### 1.3 Soojusenergiavajaduse hinnang

Tulenevalt Euroopa Liidu Energiatõhususe direktiivist (2010/31/EU) peavad alates aastast 2021 kõik uued hooned, sh ka väike- ja korterelamud vastama liginullenergiahoone nõutele. Aastal 2017 kehtib ehitatava väikeelamu/korterelamu miinimumnõue 0,16/0,15 [MWh/(m<sup>2</sup>a)]. [3]

Tuginedes Harku järve piirkonna turuolukorrale, kus pakutakse uusarendusi hoone energiatõhususega ETA B või C, millest võib järeldada ka Jaani 2 maaüksuse tulevane ETA klass on B või C. Käesolevas töös lähtutakse soojusenergiavajaduse arvutamiseks ETA B klassi ülempiirist, st 0,12 [MWh/(m<sup>2</sup>a)], mida autor peetab turuolukorrale vastavaks.

Arvutusmeetodiks on kirjanduses leitav meetodika. [3] Käesolev lihtsustatud arvutusmeetod on sobiv esialgseks prognoosiks. Aluseks on võetud kraadpäevade arv baasaastas ning kaalumistegur on 1. Hinnanguline sooja tarbevee soojuskasutus on 0,025 [MWh/(m<sup>2</sup>a)], mis on kehtestatud seadusregulatsioonis. [2]

$$ETA = Q_{teg,kyt} + Q_{tsv} + W_{valg} + W_{seadm} \quad (1.1)$$

kus  $Q_{teg,kyt}$  – küttesoojuse kulu aastas MWh/a;

$Q_{tsv}$  – sooja tarbevee soojuskasutus aastas MWh/a;

$W_{valg}$  – valgustuse elektritarbimine aastas MWh/a;

$W_{seadm}$  – seadmete elektritarbimine aastas MWh/a.

millest,

$$Q_{teg,kyt} = ETA - Q_{tsv} + W_{valg} + W_{seadm} = 0,07, [\text{MWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$$

Soojusenergia aastane vajadus Tabel 1.3.

**Tabel 1.3 Jaani 2 maaüksuse aastane soojusenergia prognoositav tarbimine**

Hoone tüüp	Suletud netopind kokku [m <sup>2</sup> ]	Aastane soojusenergiavajadus tarbevee valmistamiseks [MWh/(m <sup>2</sup> a)]	Aastane soojusenergiavajadus küttesoojusele [MWh/(m <sup>2</sup> a)]	Aastane soojusenergia tarbimine [MWh]
Eramu	2500	0,025	0,07	237,5
Korter	1000	0,025	0,07	95,0
Kokku	3500			332,5

## 1.4 Tulemused

Peatükis 1 prognoositud energiavajadused tuginevad kinnisvaraturu majandusliku analüüsile ja viimase aastate ehitustendentsidele. Jaani 2 maaüksuse energia kogutarbimist üldistab Tabel 1.4.

**Tabel 1.4 Jaani 2 maaüksuse aastane energia prognoositav kogutarbimine**

Energia otstarve	Parameeter [MWh/(m <sup>2</sup> a)]	Suletud netopind kokku [m <sup>2</sup> ]	Aastane energia tarbimine [MWh]
Aastane elektrienergiavajadus valgustusele $W_{valg}$	0,007	3500	24,5
Aastane elektrienergiavajadus elektriseadmetele $W_{seadm}$	0,018	3500	63,0
<b>Aastane elektrienergia kokku</b>	<b>0,025</b>	<b>3500</b>	<b>87,5</b>

<b>W</b>			
Aastane soojusenergiavajadus tarbevee valmistamiseks $Q_{tsv}$	0,025	3500	87,5
Aastane soojusenergiavajadus küttesoojusele $Q_{teg.kyt}$	0,07	3500	245,0
<b>Aastane soojusenergia kokku Q</b>	<b>0,095</b>	<b>3500</b>	<b>332,5</b>
<b>Kokku</b>	<b>0,12</b>	<b>3500</b>	<b>420,0</b>

## 2. Energia tootmis- ja tarneviisid

Peatükis 2 analüüsitakse Jaani 2 maaüksuse energia tarnimisviise. Nii elektri- kui ka soojusenergiat saab kas osta börsilt ja tarnijalt või toota kohapeal kas kogu arenduspiirkonna jaoks tsentraalselt või hajutatult ehk hoonepõhiselt. Uurimise eesmärk on luua energia tarbimise ja tootmise kohta erinevaid stsenaariume. Aluseks on võetud peatükis 1 käsitletud baasandmed energia kogutarbimise kohta, mille põhjal on koostatud seitse erinevat stsenaariumi. Stsenaariumid on jaotatud kaheks rühmaks. Esimeses rühmas on kolm stsenaariumi, kus energiat toodab või ostab iga majapidamine iseseisvalt ehk hoonepõhiselt. Teises rühmas on neli stsenaariumi, kus majapidamised toodavad või ostavad energiat kogu arenduspiirkonnale tsentraliseeritult.

### 2.1 Soojatarve algtingimused

Stsenaariumite korrektseks võrdlemiseks tuleb luua soojatarve algtingimused. Selleks tuleb määrata kütteevee temperatuur ja sooja tarbevee temperatuur ning aasta keskmine õhutemperatuur ja kütteperioodi keskmine õhutemperatuur. Käesolevas töös eeldatakse, et tulevased hooned on kas raudbetoonist vahelagedesse sissevalatud küttetorustikuga või kasutatakse madala temperatuuriga radiaatoreid. Eramute kütteevee temperatuuriks valitakse 35,0 °C. Sooja tarbevee temperatuuriks valitakse 55,0 °C. Aasta keskmine õhutemperatuur on uute normide järgi 6,0 °C. [4] Aasta keskmine kütteperioodi õhutemperatuur on 0,2 °C. [5]

Stsenaariumite soojatarbe algtingimusi kirjeldab Tabel 2.1.

**Tabel 2.1 Soojatarve algtingimused**

Kütteevee temperatuur [°C]	35,0
Sooja tarbevee temperatuur [°C]	55,0
Aasta keskmine õhutemperatuur [°C]	6,0
Aasta keskmine kütteperioodi õhutemperatuur [°C]	0,2



## 2.2 Soojusenergia hajatootmine

Selles osas käsitletakse kogu kinnisvara arenduspiirkonna summaarset energiavarustust hajatootmisena, kus iga kinnistu toodab soojust ja ostab elektrit ise.

Majapidamistel on lai valik energia tootmisviisidest. Soojusenergiat saab toota soojuspumbadega või kateldegaga. Soojuspumbad jagatakse õhk-, õhk-vesi ja maasoojuspumpadeks. Katlaid eristatakse kasutatavate kütuste järgi. Energia hajatootmise stsenaariumid on valitud arvestades kaasaegseid ehitustendentse ning tuginedes tehtud kinnisvaraturu majanduslikule analüüsile. Eeldatakse, et küttesüsteemid on automaatsed ning nõuavad vähe hooldust ja jälgimist. Järgnevalt on toodud kolm Eestis levinumat soojusenergia tootmisviisi.

### 2.2.1 Soojuspumbad

Elektri, sh sooja tarbevee tootmiseks, ostab iga kinnistuomanik avaliku elektrivõrgu vahendusel börsilt.

Esimeses hajatootmise stsenaariumis on kirjeldatud olukord, kus soojusenergiat toodetakse soojuspumpadega ja elektrienergiat ostetakse sisse börsilt. Soojuspumba tehnoloogia valik põhineb valikul õhk-vesi ja maasoojuspumpade vahel. Maasoojuspumba COP (COP – *coefficient of performance*, soojuspumba kasutegur) on kõrgem võrreldes õhk-vesi soojuspumbaga. Selle pidamine on lihtsam ja odavam ning see ei tekita müra. Teisalt on maasoojuspumba COP tugevas sõltuvuses maapinnakihi omadustest. Jaani 2 maauksuse pinnakiht on vastavalt geoloogilistele uuringutele liivane ja kuiv. Kuiva liiva soojusjuhtivus on madal, mis teeb maasoojuspumba tehnoloogia kasutamine ebaratsionaalseks. Esimese stsenaariumi soojuspumba tehnoloogiaks valitakse õhk-vesi tüüp.

Eestis on suure turuosa saanud Mitsubishi, Nibe ja Samsung soojuspumpade tootjad. Tuginedes tootjate andmetele, võib järeldada, et õhk-vesi soojuspumpade 2017 mudelitel on  $COP_{\text{tarbevesi}}$  kütisel (ajaperioodi keskmine õhutemperatuur/soojuskandja temperatuur) (6/55 °C) **2,4** ja  $COP_{\text{küttevesi}}$  kütisel (0,2/35 °C) **2,8**. Valemi 1.1 alusel on stsenaarium 1 energiavajadus:

$$\text{Hajatootmise stsenaarium 1} = \frac{Q_{teg,kyt}}{COP_{küttevesi}} + \frac{Q_{tsv}}{COP_{tarbevesi}} + W_{valg} + W_{seadm}$$

Tulemusest selgub, et vajaliku soojusenergia koguse tootmiseks kasutati 124 MWh elektrienergiat.

### 2.2.2 Gaasikatlad

Elektri ostab iga kinnistuomanik avaliku elektrivõrgu vahendusel börsilt.

Teises hajatootmise stsenaariumis on soojusenergia tootmiseks kasutatud gaasikatlad. Gaasikatla kütuseks on maagaas. Gaasikatelde kasutamine nõuab gaasivõrgu olemasolu. Jaani 2 maaüksuse piiiril on olemas gaasivõrguga liitumise võimalus.

Alates 2016 aastast on Euroopa Liidus lubatud müüa ainult kondensatsioon tüüpi gaasikatlad. Kondensatsioon gaasikatla kasutegur  $\eta_{gaasikatel}$  on 98% nii sooja tarbevee valmistamiseks kui ka kütmiseks. Õhutemperatuuri mõju metaani oksüdeerumisele käesolevas töös loetakse tühiseks ning jäetakse arvutustest välja. Maagaasi kütteväärtus on 0,00917 MWh/m<sup>3</sup>.

Valemi 1.1 alusel on stsenaarium 2 energiavajadus:

$$\text{Hajatootmise stsenaarium 2} = \frac{Q_{teg,kyt}}{\eta_{gaasikatel}} + \frac{Q_{tsv}}{\eta_{gaasikatel}} + W_{valg} + W_{seadm}$$

Tulemuseks on 339,3 MWh energiat, mis on muundatud soojusenergiaks gaasikatelde abil. Võttes arvesse maagaasi kütteväärtuse, on gaasikulu aastas 37 tuh. m<sup>3</sup>.

### 2.2.3 Pelletikatlad

Elektri ostab iga kinnistuomanik avaliku elektrivõrgu vahendusel börsilt.

Pelletikatelde arendusele on viimastel aastatel palju rõhku pandud. Süsteemi põhiosadeks on katel, pelletimahuti ja akumulatsioonipaak. Pelletikatelde hooldusintervallid on pikad. Inertsimõju tasandamiseks kasutatakse akumulatsioonipaake, mille abil seade on võimeline tootma oma väikseima erikulu karakteristikuga ehk maksimaalse kasuteguriga. Kaasaegsetel mudelitel on kasutegur  $\eta_{pelletikatel}$  95% nii sooja tarbevee valmistamiseks kui ka kütmiseks. Pelletite kütteväärtus niiskusega kuni 8% on 0,0047 MWh/kg.

Valemi 1.1 alusel on stsenaarium 3 energiavajadus:

$$Hajatootmise\ stsenaarium\ 3 = \frac{Q_{teg,kyt}}{\eta_{pelletikatel}} + \frac{Q_{tsv}}{\eta_{pelletikatel}} + W_{valg} + W_{seadm}$$

Tulemuseks on 350 MWh energiat, mis on muundatud soojusenergiaks pelletikatelde abil. Võttes arvesse pelletite kütteväärtust, tuleb aastas 74468 kg pelletid.

Hajatootmise tulemusi üldistab Tabel 2.2.

**Tabel 2.2 Hajatootmise stsenaariumide primaarenergia ressursside maht ja keskkonna heitmed**

	Soojuspumbad	Gaasikatlad	Pelletikatlad
Energia vajadus aastas [MWh·a]	211,5	426,8	437,5
<b>SOOJUSENERGIA</b>			
Soojusenergia tootmiseks kasutatud energia, [MWh·a]	124,0	339,3	350
Soojusenergia tootmiseks kasutatud kütus	põlevkivi*	maagaas	puidugranuulid
Primaarenergia ekvivalent, [MWh]	261,7**	346,2	368,4
Soojusenergia tootmiseks kasutatud kütuse maht, [t]/[Nm]	112 ***	37000	74,5
Emissioonitegurid, [t]			
Süsinikdioksiid, CO <sub>2</sub> [t]	107,3	69,58	0****
Vääveldioksiid, SO <sub>2</sub> [t]	1,8	0	0
Lämmastikoksiidid, NO <sub>x</sub> [t]	0,09	0,076	0,158
Tahm/tuhk, [t]	50,4	0	0,312
<b>ELEKTRIENERGIA</b>			
Elektrienergia vajadus, [MWh·a]	87,5	87,5	87,5
Elektrienergia tootmiseks kasutatud kütus	põlevkivi*	põlevkivi*	põlevkivi*
Primaarenergia ekvivalent, [MWh]	184,7**	184,7**	184,7**
Elektrienergia tootmiseks kasutatud kütuse maht, [t]	79,3***	79,3***	79,3***
Keskkonna tegurid, [t]			

Süsinikdioksiid, CO <sub>2</sub> [t]	35,9	35,9	35,9
Vääveldioksiid, SO <sub>2</sub> [t]	0,6	0,6	0,6
Lämmastikoksiidid, NO <sub>x</sub> [t]	0,03	0,03	0,03
Tahm/tuhk, [t]	35,7	35,7	35,7
<b>Emissioonitegurid kokku, [t]</b>			
Süsinikdioksiid, CO <sub>2</sub> [t]	143,2	105,48	35,9
Vääveldioksiid, SO <sub>2</sub> [t]	2,4	0,6	0,6
Lämmastikoksiidid, NO <sub>x</sub> [t]	0,12	0,11	0,2
Tahm/tuhk, [t]	86,1	35,7	36,0
<b>Primaarenergia kokku, [MWh]</b>	<b>446,4</b>	<b>530,9</b>	<b>553,1</b>

\*eeldatakse, et elektrienergiat ostetakse Eestist. Aastal 2015 oli põlevkivist toodetud elektrienergia 76% elektrienergia kogutoodangust. Ülejäänud 24% on põlevkivigaasi-, puidu-, hüdro-, turba- ja tuuleenergia osa. [6] [7]

\*\* arvestatakse 76% põlevkivi osa ja 24% taastuva elektrienergia osana. Põlevkivi osa on võetud keskmise kasuteguriga 36% ja taastuva elektrienergia osa lihtsuse mõttes kasuteguriga 100%. [6] [7]

\*\*\* nõutud põlevkivi maht. Kaubapõlevkivi keskmine kütteväärtus varieerub aasta-aastalt. Siin on 2015 aasta alusel võetud 2,33 MWh/tonni kohta.

\*\*\*\* biomass loetakse CO<sub>2</sub> neutraalseks energia ressursiks.

### Tulemused:

Saadud energia hajatootmise tulemused on baasstsenaariumiks kogu arenduspiirkonna tsentraliseeritud energia tootmisega võrdlemiseks, mida käsitletakse järgnevates osades.

## 2.3 Energia tootmine kogu arenduspiirkonnale tsentraliseeritud

Energia tsentraliseeritud tootmine eeldab energia tootmise kontsentreerumist ühete kindlasse kohta, eesmärgiga saavutada mastaabisääst. Soojusenergia puhul on määravaks energia jaotamise ja transportimise kulud, mis on seda kõrgemad, mida pikemad on vahemaad tootmise ja tarbimise vahel.

Arenduspiirkonna energiatootmine on kavandatud CHP (CHP – *Combined Heat and Power*, soojuse ja elektri koostootmine) baasil. Kondensatsioon soojuselektrijaamade kasutegur varieerub 30-42%, st 58-70% energiat haihtub keskkonda. Koostootmise kontseptuaalne idee

on kütuses sisalduva energia tõhusam ära kasutamine, kusjuures on oluline soojatarve olemasolu. Näited:

- linnade, linnaosade või väiksema piirkonna soojusenergia vajadus
- tööstus, tselluloosi- ja paberivabrikud
- põllumajandus, kasvuhooned, kalakasvatus

Piirkonna energiavarustuse plaanimist tuleb alustada koostootmise tehnoloogia valimisega ja dimensioneerimisega. Koostootmise tehnoloogia valik põhineb järgneval:

- piirkonna aasta elektri- ja soojusenergia vajadused
- kütuseressurssi saadavus ja kasutusvõimalused
- seadmete tootja O&M (O&M – *Operation And Maintenance*, käidu- ja hoolduskulud) olemasolu ja kättesaadavuses.

Koostootmiseseade töötab põhireeglina soojusgraafiku alusel. Seega koostootmisüksuse võimsuse korrektsel dimensioneerimisel tuleb aluseks võtta soojusenergia jaotus kuude kaupa ning soojuskoormuse tipud. Lisaks soojuskoormuse jaotusele tuleb arvutada kaugküttevõrgu soojusenergia jaotamise kaod.

### 2.3.1 Soojusenergia jaotus

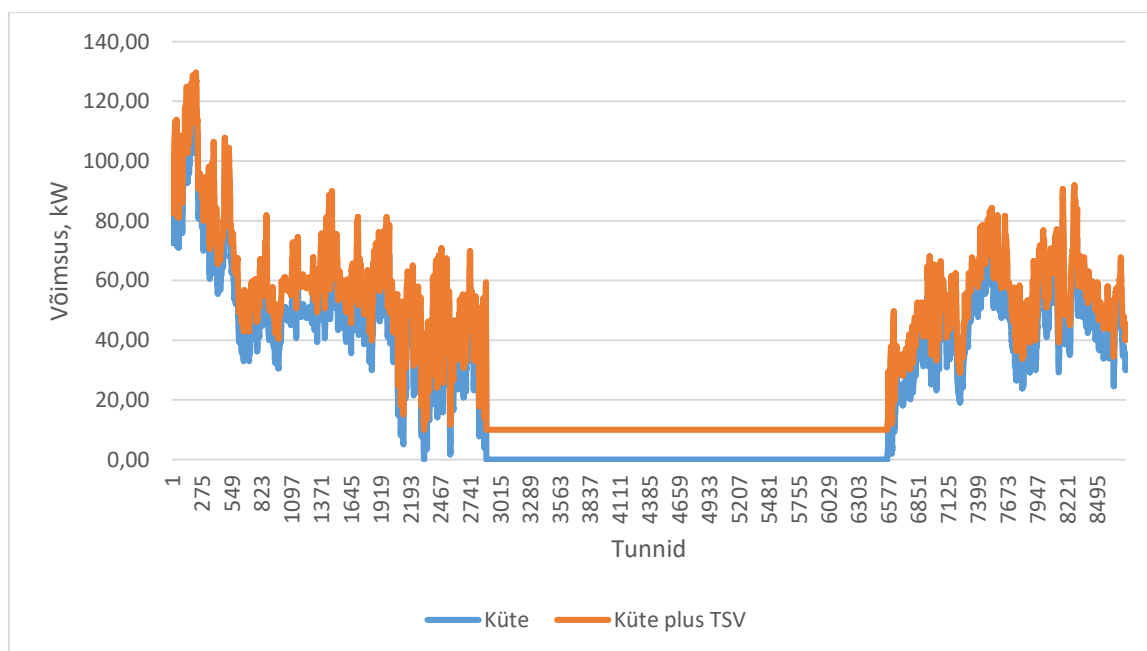
Jaani 2 maaüksuse aastane energiavajadus on käsitletud peatükis 1 (vt Tabel 1.4). Eeldatakse, et kütteperiood on oktoobri algusest kuni aprilli lõpuni. Soojatarbe jaotust aasta 2016 näitel illustreerib Tabel 2.3. Selles on TSV (tarbimise soe vesi) soojuskoormus taandatud aasta tarbimisele tundide kaupa. TSV ööpäeva ja nädala perioodilisuse mõju soojuskoormuse jaotamisele antud töös loetakse tühiseks.

**Tabel 2.3 Jaani 2 maaüksuse kütteenergia jaotus kuude kaupa aasta 2016 näitel**

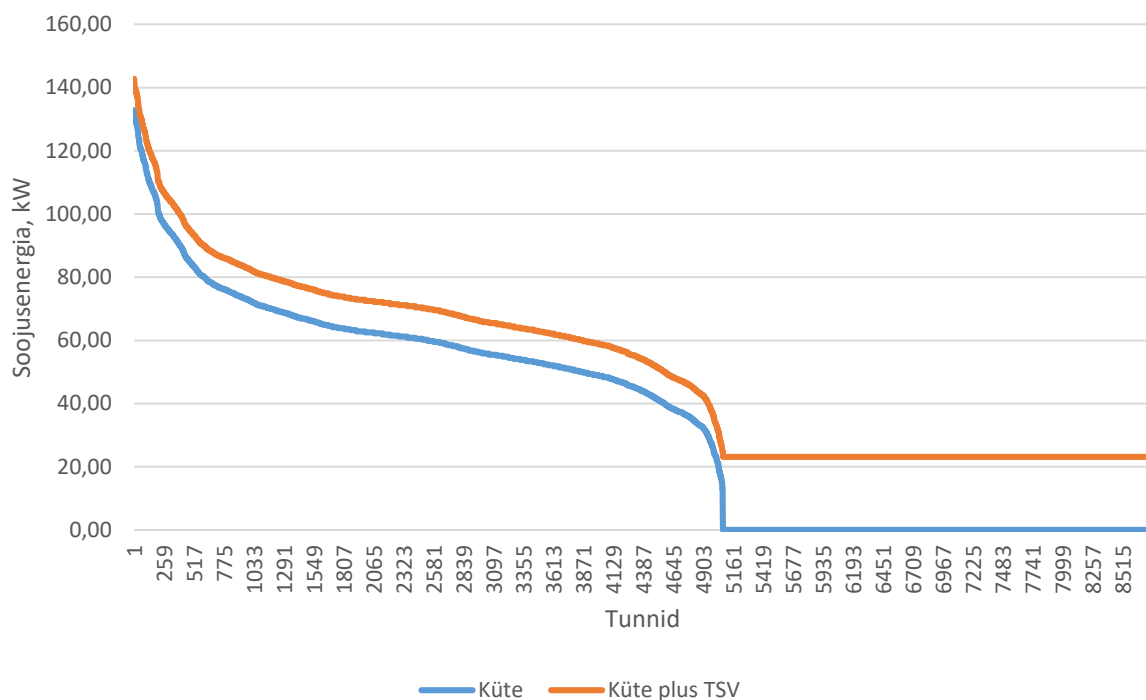
Kuu	Soojusenergia vajadus kütteks, [MWh]	Soojusenergia vajadus kütteks ja TSV-ks, [MWh]
jaanuar	55,52	63,04
veebruar	32,39	39,19

märts	36,41	43,82
aprill	24,36	31,50
mai	0,00	7,44
juuni	0,00	7,20
juuli	0,00	7,44
august	0,00	7,20
september	0,00	7,44
oktoober	24,62	30,55
november	36,33	44,32
detsember	35,32	42,90

Soojuskoormuse tipude määratlemiseks taandatakse Jaani 2 maaüksuse kogu soojusenergia vajadus kütteks kraadpäevadele ja seejärel tundidele aasta lõikes. Muutuvaks temperatuuriks on võetud 15 °C, sest tegu on B-klassi hoonetega, mis on efektiivselt soojustatud. Temperatuuri mõõtmiste andmed tundide kaupa Tallinn-Harku ilmajaamas on saadud taotluse alusel ilmateenistusest. [4] Joonis 2.2 selgub, et soojusenergia tarbimise tipud ulatuvad üle 130 kWh.

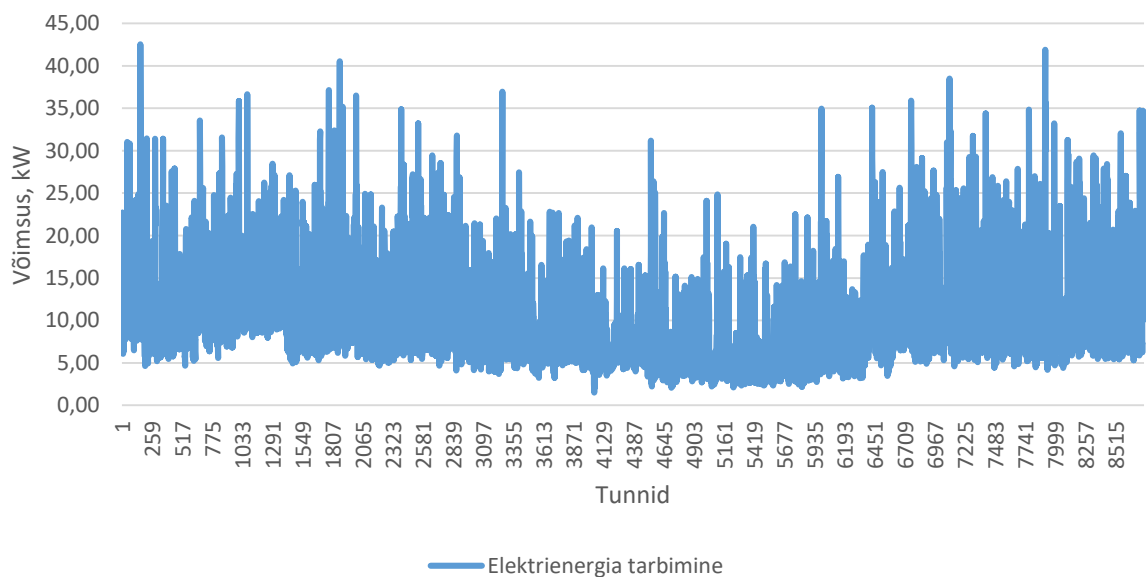


*Joonis 2.1 Jaani 2 soojuskoormuse jaotus*



**Joonis 2.2 Soojusenergia tarbimine aastas**

Elektrienergia vajaduse jaotus on saadud empiirilisel teel vastavalt peatükis 1 püstitatud baastingimustele. Elektrienergia vajaduse jaotust ja tippe aasta lõikes tundide kaupa illustreerib Joonis 2.3.

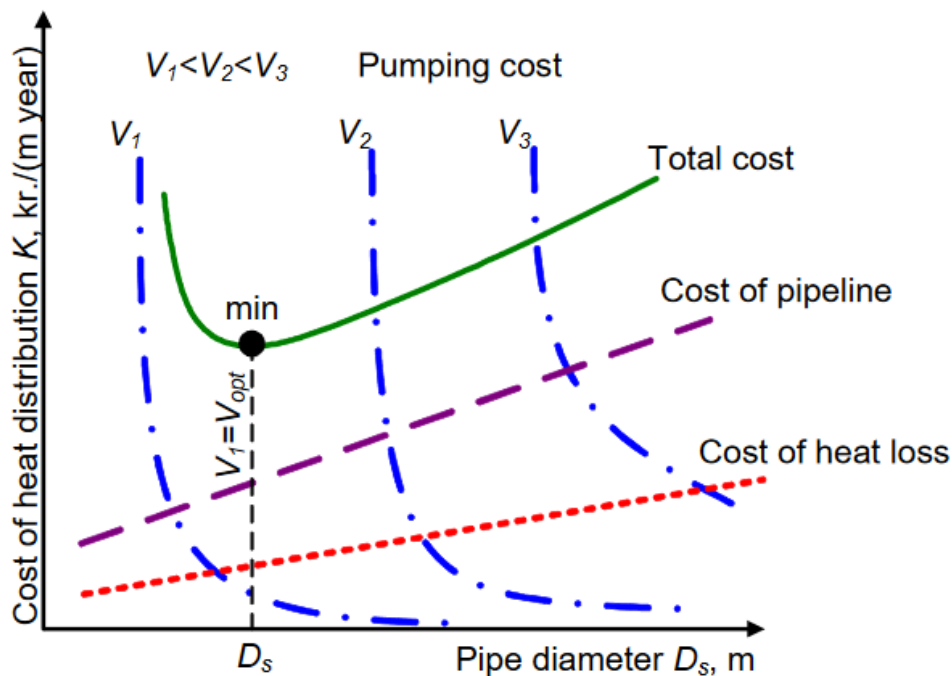


**Joonis 2.3 Jaani 2 elektrienergia tarbimise jaotus**

### 2.3.2 Kaugküttevõrk

Kaugküttevõrk on oluline osa tsentraalsest energiatootmisest. Kaugküttevõrgu projekteerimine on eraldi majanduslik-tehniline ülesanne. Käesoleva punkti eesmärk on uurida võimalikku kaugküttevõrgu seadmete ja toiteliinide kooslust, millega saab soojusenergiat võimalikult efektiivselt transportida ning jaotada.

Soojusenergia kadude algingimuste määramiseks tuleb arvutada kaugküttetorude ja sooja tarbevee optimaalsed diameetrid. Toru diameetri kasvamisel suurenevad soojuskaod ja ehitamiskulud, kuid vähenevad aastased pumpamiskulud. Vastavalt sõltuvust illustreerib Joonis 2.4.



Joonis 2.4 Toru diameetri majanduslik sõltuvus [8]

#### Kütteveeliini dimensioneerimine

Optimaalse diameetri määramisel tuleb arvutada massvooluhulk  $q_m$ , mis avaldub järgmise valemiga: [9]

$$q_m = \frac{\Phi}{\Delta T \times c_p} \tag{2.1}$$



kus  $q_m$  – massvooluhulk kg/s;

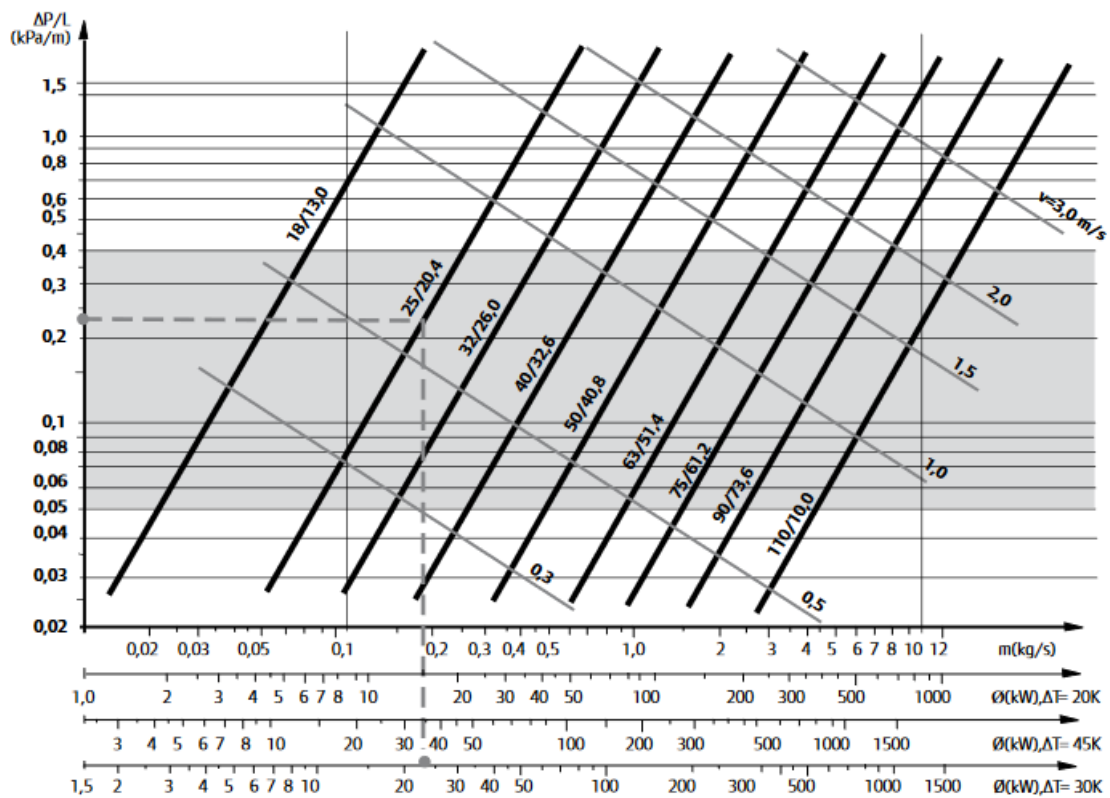
$\Phi$  – võimsus kW;

$\Delta T$  – temperatuuri muutus °C;

$c_p$  – vee nominaalne soojusmahtuvus 4,19 kJ/kgK.

Võimsuse leidmiseks kasutatakse aastast soojusenergia vajadust kütteks, mis on taandatud hoonete kogu mahule. Temperatuuri muutus baseerub praktilistel tulemustel ning on võrdne 20-ga. [10] [9]

Tulemuseks on massvooluhulk 2,92 kg/s. Optimaalse küttetoru diameetri valimiseks kasutatakse rõhukao ja massvooluhulga iseloomustavat diagrammi (vt Joonis 2.5). Edasi on kasutatud Uponor eelisoleeritud torusüsteemide tootja juhendid projekteerimiseks ja paigaldamiseks. [9]



Joonis 2.5 Rõhukao ja massvooluhulga iseloomustav diagramm [9]

Soovituslik rõhukadu on diagrammil tumedamaks värvitud. Soovituslik vee voolukiirus ei pea ületama 2,0 m/s. [11] [10] Kasutades üleval toodud diagrammi, võib järeldada, et optimaalne toru küttevelliini jaoks on **Thermo Single 75/61,2**.

Koostootmisjaama võimsuse määramisel on oluline teada kaugküttevõrgu soojusenergia kadusid. Kaugküttevõrgu soojuskadude arvutamiseks kasutatakse kirjanduses leiduvat meetodikat. [12]

Kogu soojusevool  $P_{hl}$  peale- ja tagasivoolu torudest avaldub valemiga:

$$P_{hl} = P_{so} + P_{ro} = L\pi d * \frac{\theta_s + \theta_r}{R_i + R_g + R_c} \quad (2.2)$$

Soojusevool ainult pealevoolu torust:

$$P_s = P_{so} + P_{sr} = L\pi d * \frac{(R_g + R_i)\theta_s - R_c\theta_r}{(R_g + R_i)^2 - R_c^2} \quad (2.3)$$

Soojusevool ainult tagasivoolu torust:

$$P_s = P_{ro} - P_{sr} = L\pi d * \frac{(R_g + R_i)\theta_r - R_c\theta_s}{(R_g + R_i)^2 - R_c^2} \quad (2.4)$$

Soojusevool pealevoolutorust tagasivoolu torusse:

$$P_{sr} = L\pi d * \frac{R_c * (\theta_s - \theta_r)}{(R_g + R_i)^2 - R_c^2} \quad (2.5)$$

Takistused avalduvad:

$$\text{Isolatsiooni takistus: } R_i = \left(\frac{d}{2\lambda_i}\right) * \ln\left(\frac{D}{d}\right) [m^2K/W]$$

$$\text{Maapinna takistus: } R_g = \left(\frac{d}{2\lambda}\right) * \ln\left(\frac{4h}{D}\right) [m^2K/W]$$

$$\text{Kattuvad temperatuurid: } R_c = \left(\frac{d}{2\lambda}\right) * \left(\left(\frac{2h}{s}\right)^2 + 1\right)^{0,5} [m^2K/W]$$

$$\text{Kogu soojustakistus avaldub: } R_{tot} = R_i + R_g + R_c [m^2K/W]$$

kus  $P_{so}$  – soojuskadu pealevoolu liinis arvestamata tagasivoolu liini mõju W;

$P_{ro}$  - soojuskadu tagasivoolu liinis arvestamata pealevoolu liini mõju W;

$\lambda$  – maapinna soojusjuhtivus W/mK;

$\lambda_i$  – isolatsiooni soojusjuhtivus W/mK;

$$\Theta_s = t_s - t_a \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\Theta_r = t_r - t_a \text{ } ^\circ\text{C};$$

$t_s$  – pealevoolu temperatuur  $^\circ\text{C}$ ;

$t_r$  – tagasivoolu temperatuur  $^\circ\text{C}$ ;

$t_a$  – muutuv temperatuur (õhk/maapind)  $^\circ\text{C}$ ;

$L$  – liini pikkus m;

$d$  – väline toru diameeter m;

$D$  – väline isolatsiooni diameeter m;

$s$  – kaugus torude tsentrite vahel m;

$h$  – kaugus toru tsentrist maapinnast m.

Tehnilised andmed on kogutud standardist EVS-EN 16632 – 1:2009 [13] ning allikatest [9] [11] [4]. Küttevõrgu liini pikkuseks on võetud 507 m. Pikkuse määramiseks koostatakse

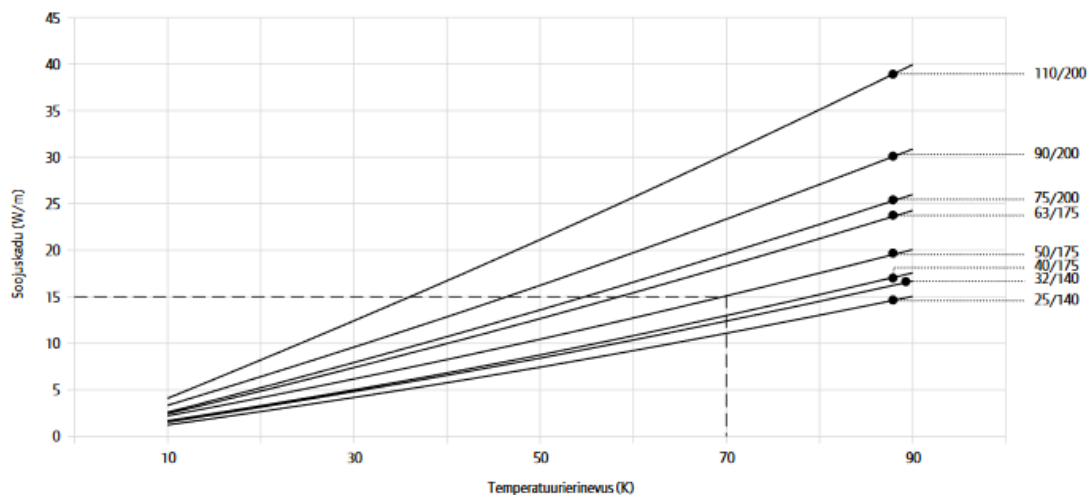
kaugküttevõrgu eelprojekt (vt Joonis 2.10). Peale- ja tagasivoolu soojuskadu on toodud vastaval diagrammil (vt Joonis 2.6). Diagrammi kasutamiseks tuleb arvutada temperatuurierinevus  $\Delta t$ , mis avaldub valemiga:

$$\Delta t = t_1 - t_0$$

kus  $t_1$  – kütteeve temperatuur °C;

$t_0$  – pinnase temperatuur °C.

Kütteeve pealevoolu temperatuur on 60 °C ja tagasivoolu temperatuur on 40 °C. Kütteperioodi keskmine pinnase temperatuur mõõdistatuna Tallinn-Harku ilmajaamas on -1,4 °C. Arvestades torustiku paigaldamise sügavust 1000 mm ja pinna omadusi (kuiv ja liivane,  $\lambda = 1,0 \text{ W/mK}$ ), võib järeldada, et kütteperioodi keskmine pinnase temperatuur sügavusel 1000 mm on keskmiselt 8.0 °C. Temperatuurierinevus  $\Delta t$  pealevoolu liinis on 52 °C ja tagasivoolu liinis 32 °C.



**Joonis 2.6 Thermo Single soojuskaodiagramm [9]**

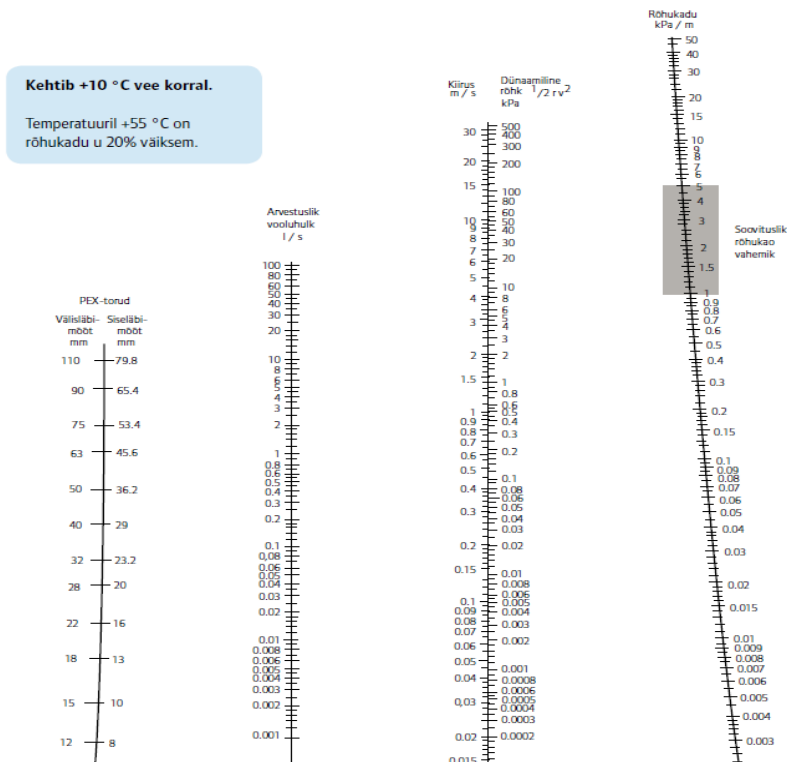
Kaugküttevõrgu soojuskaod iseloomustab Tabel 2.4.

**Tabel 2.4 Thermo Single 75/200 kütтелиini soojuskadud**

Pealevoolu liini soojuskadu [W/m]	14
Tagasivoolu liini soojuskadu [W/m]	7,5
Pealevoolu liinist tagasivoolu liini soojuskadu [W/m]	0,4
Soojuskaod liinis kokku [W/m]	21,9

### Tarbeveeliini dimensioneerimine

Tarbeveeliini dimensioneerimisel kasutatakse eelnevalt toodud meetodikat. Rõhukao ja arvestusliku vooluhulga andmed on võetud standardi EVS-EN 16632 – 1:2009 alusel. [13] Tarbeveetoru diameetri valimisel on kasutatud diagrammi (vt Joonis 2.7). Tumedana on märgitud soovituslik rõhukadu. Voolukiirus ei pea ületama 3 m/s. [11] Tarbeveeliini toruks diagrammi alusel valitakse toru **Aqua 40/29**. Tarbevee tagasivoolu toru on nõutud tarbeveeliini torust aste väiksem. Võttes arvesse üleval toodud andmeid ja seoseid, võib kasutusele võtta **Aqua Twin toru 40x5,5/32x4,4/175**.



**Joonis 2.7 Tarbeveetoru dimensioneerimine [9]**

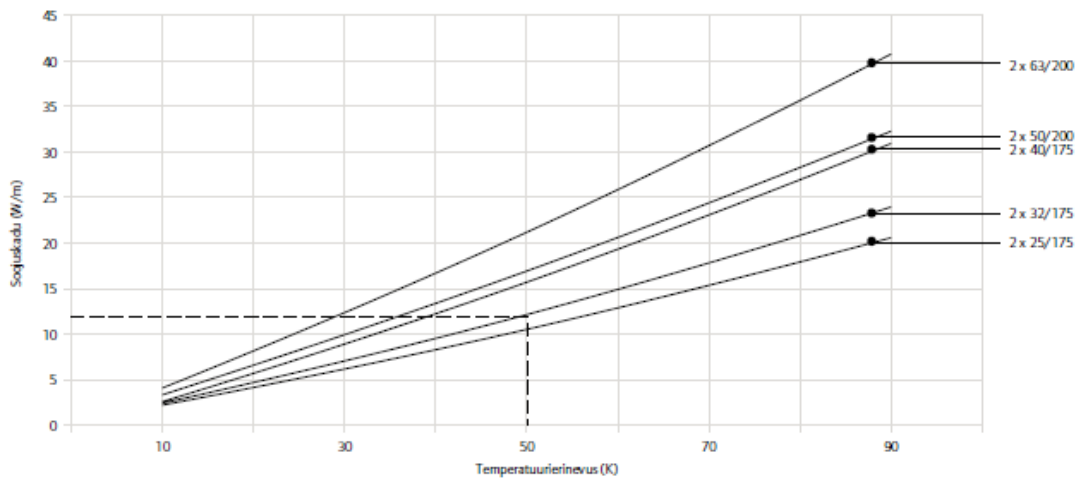
$$\Delta t = (t_1 + t_2)/2 - t_0$$

kus  $t_1$  – tarbevee temperatuur °C;

$t_2$  – tagastuva tarbevee temperatuur °C;

$t_0$  – pinnase temperatuur °C.

Tarbevee temperatuur on 60 °C. Tagastuva tarbevee temperatuur on 35 °C. Aasta keskmine pinnase temperatuur mõõdistatud Tallinn-Harku ilmajaamas on 3,6 °C. Arvestades üleval toodud pinnaseomadusi, siis aasta keskmine pinnase temperatuur 1000 mm sügavusel on 11 °C. Temperatuurierinevus  $\Delta t$  on 36,5 °C. Soojuskadude arvutamiseks kasutatakse sama meetodikat, mis on olnud kasutatud kütteevee soojuskadude arvutamiseks, välja arvatud soojuskaod diagramm. Twin toru soojuskaod diagramm on toodud Joonis 2.8.



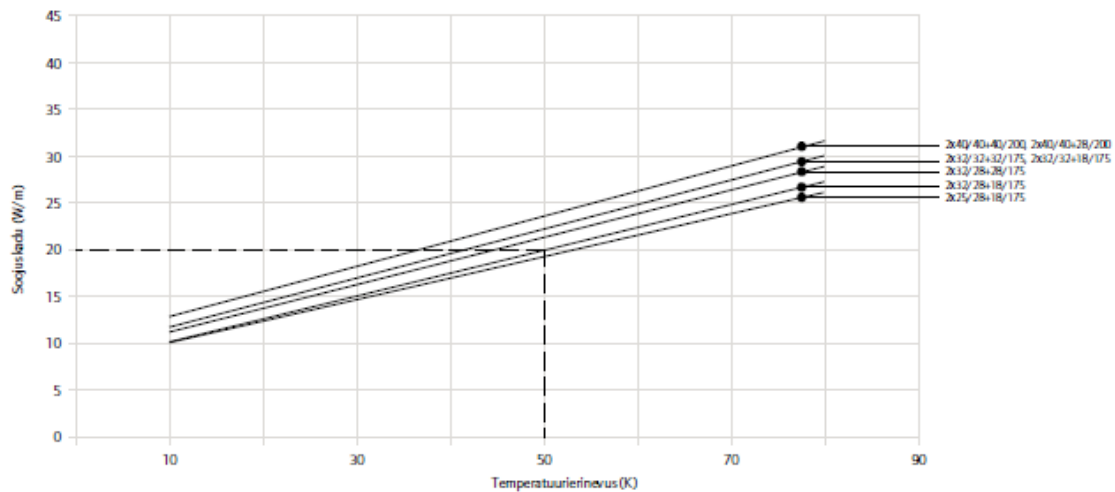
**Joonis 2.8 Twin toru soojuskaodiagramm [9]**

Tarbeveeliini soojuskaod on **10,3 W/m**.

### **Hoonete ühendamine kaugküttevõrguga.**

Hooned tuleb ühendada kaugküttevõrguga. Iga hoone või korteri juurde ehitatakse jaotuskaev, mida kokku tuleb 18. Kütte- ja tarbevee ühendatakse läbi toru quattro süsteemiga

2x40/40+28/200. Eelisolleeritud quattro süsteemis on neli toru: kaks küttevee peale- ja tagasivooluks ning kaks tarbevee peale- ja tagasivooluks. Eramute või korterite ühendamiseks nõutud liinide kogupikkus on 168 meetrit. Quattro soojuskaod võib lugeda soojuskaod diagrammist (vt Joonis 2.9).



*Joonis 2.9 Quattro toru soojuskaod diagramm [9]*

$$\Delta t = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4)/4 - t_0$$

kus  $t_1$  – küttevee temperatuur °C;

$t_2$  – tagastuva küttevee temperatuur °C;

$t_3$  – tarbevee temperatuur °C;

$t_4$  – tagastuva tarbevee temperatuur °C;

$t_0$  – pinnase temperatuur °C;

Küttevee temperatuur on 60 °C ja tagastuva küttevee temperatuur on 40 °C. Tarbevee temperatuur on 60 °C ja tagastuva tarbevee temperatuur on 35 °C. Aasta keskmine pinnase temperatuur on 11 °C. Temperatuurierinevus  $\Delta t$  on 37,75 °C. Quattro liini soojuskaod on **19,8 W/m**.

Jaani 2 maaüksuse kaugküttevõrgu aastaseid soojuskadusid üldistab Tabel 2.5.

**Tabel 2.5 Jaani 2 planeeritava kaugküttevõrgu aastased soojuskaod**

	Thermo Single x 2 kütteliin 75/61,2/200 x2	Aqua Twin tarbeveeliin 40x5,5/32x4,4/175	Quattro kütte- ja tarbeveeliin 2x40/40+28/200
Liini pikkus, [m]	507	507	168
Töötunde aastas, [hr]	5000*	8760	5000/8760**
Soojuskadu, [W/m]	21,9	10,3	11,88/19,8***
Aastane soojuskadu, [MWh/a]	<b>55,52</b>	<b>45,74</b>	<b>9,97/29,14</b>

\*sõltub kraadpäevade arvust

\*\* parameeter võetud küttevee/tarbevee kasutuse järgi

\*\*\* küttesee/kütte- ja tarbevesi

Jaani 2 kaugküttevõrgu eelprojekti illustreerib Joonis 2.10.





- KRUNDIPIIR
- HOONE
- TEEALA
- THERMO SINGLE 75/200 PEALEVOOL
- THERMO SINGLE 75/200 TAGASIVOO
- AQUA TWIN 40x5,5/32x4,4/175
- QUATTRO 2x40/40 + 28/200
- ÜHENDUSKAEV

**Joonis 2.10 Jaani 2 kaugküttevõrgu eelprojekt**

## Pumpamiskulude arvutamine

Pumpamiskulude arvutamine on eraldi soojustehnika hüdrauliline ülesanne. Hüdrauliliste arvutuste abil määratakse rõhukadu liinides, mille alusel omakorda määratakse hüdrauliline võimsus, mis on aluseks vastava pumba valimiseks. Pumpade võimsuste ja töötunde alusel arvutatakse majanduslikud kulud pumpamiseks.

Hüdraulilised arvutused on keerulise iseloomuga. Arvestatakse Reynolds'i arvuga, torude karedusega, voolude turbulentsusega ja laminaarsusega ning muude teguritega. [14] Kuna suure täpsusega arvutatud pumpamiskulud ei avalda märkimisväärset mõju koostootmisjaama majanduslikule mudelile, kasutatakse käesolevas töös lihtsustatud mudelit hüdrauliliste arvutuste tegemiseks. Andmed rõhukao määramiseks illustreerib Tabel 2.6.

**Tabel 2.6 Jaani 2 planeeritava kaugküttevõrgu rõhukaod**

	<b>Kütteeeliin Thermo Single kütteeeliin 2x75/61,2/200; Quattro osa 2x40/31,2/200</b>	<b>Tarbeeeliin Aqua Twin 40x5,5/32x4,4/175; Quattro osa 40/31,2+28/22/200</b>
Liini pikkus, [m]	507/168	507/168
Voolu keskmine temperatuur, [°C]	50	47,5
Massvooluhulk, [kg/s]	2,9	1,2
Vee tihedus, [kg/m <sup>3</sup> ]	998,206	998,206
Dünaamiline viskoossus, [kg/ms]	1001,61*10 <sup>6</sup>	1001,61*10 <sup>6</sup>
Suhteline karedus; k väärtus, [mm] [14]	0,005	0,005
Vool [14]	turbulentne*	turbulentne*
Rõhukadu, [bar]	1,61/1,3**	3,45/0,7**

\* eeldatakse, et vool on turbulentne. Põhjuseks on mitme tarbija liitumisega kaugküttevõrgu

\*\* arvutused on tehtud <http://www.druckverlust.de/Online-Rechner/> [15] elektroonilises keskkonnas

Sobiva pumba valimiseks kasutatakse arvutitarkvara „Grundfos Product Center“. [16] Pärast tabeli 2.6 andmete sisestamisel tarkvara keskkonda, valiti kütteeeliini jaoks pump CRN 10-4

A-P-G-E-HQQE ja tarbeveeliini jaoks pump CM5-5 A-S-I-E-AQQE. Grundfos'i tarkvara arvutab ka aastase elektrienergia kulu, mida iseloomustab Tabel 2.7.

**Tabel 2.7 Kaugküttevõrgu aastased pumpade elektrienergia vajadused [16]**

Pump	CRN 10-4 A-P-G-E-HQQE	CM5-5 A-S-I-E-AQQE
Kogus, [tk]	1	1
Kasutegur, [%]	56,4	40,8
Kasutusaeg, [h]	5000	8760
Aastane elektrienergia vajadus, [MWh]	3,51	4,39

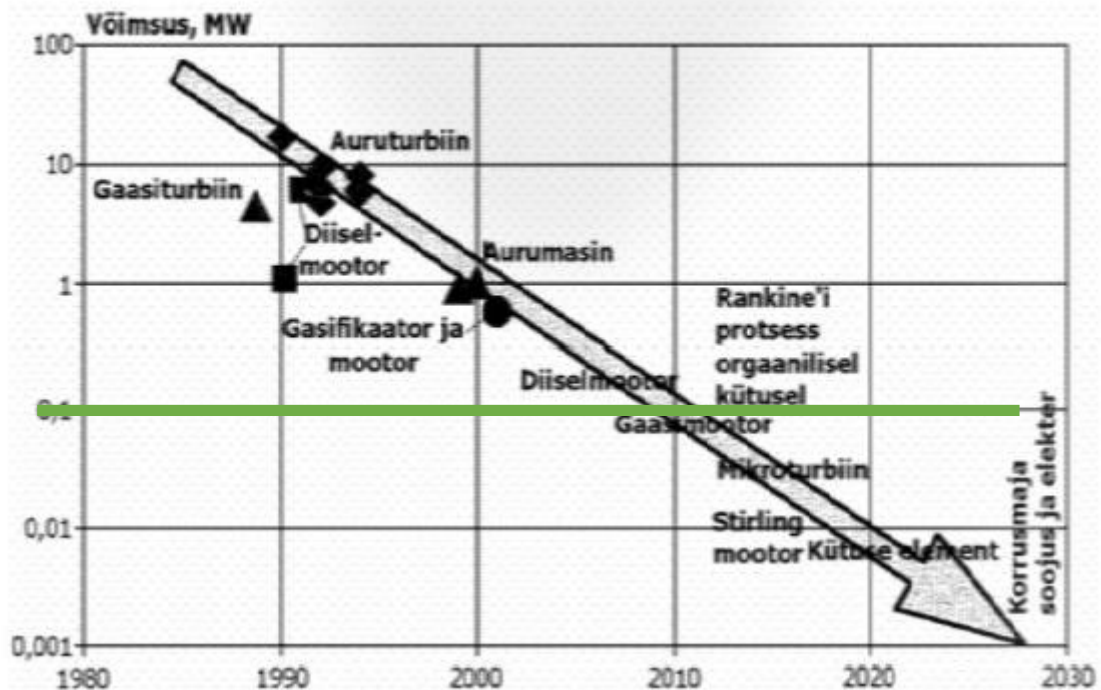
### **Kaugküttevõrgu osa järelused:**

Summaarne aastane kaugküttevõrgu soojuskadu kütteevee liinis on 65,49 MWh, mis moodustab 26,73 % piirkonna kütteenergia vajadusest. Summaarne aastane kaugküttevõrgu soojuskadu tarbevee liinis on 57,39 MWh, mis moodustab 65,59 % piirkonna tarbevee energiavajadusest. Lisades siia aastased pumpamiskulud 4,39 MWh, siis moodustub vastav parameeter üle 70%. Kokkuvõtlikult võib järeldada, et Jaani 2 maaüksuse tingimustega on tarbevee jaotamine eraldi liinina ebaefektiivne ja kulukas. Tarbevett tuleb valmistada kohapealsete soojusvahetite abil. Järgnevas peatükis uuritakse primaarenergiakulu TSV (tarbe soe vesi) valmistamiseks. Selle eesmärgiks on kaugküttevõrgu talitus 8760 tundi aastas. Sellega kaasneb soojuskadu ja pumpamiskulud terve aasta ulatuses, võrreldes ainult küteperioodiga, kus kaugküttevõrku koormatakse ligikaudu 5000 tundi aasta lõikes.

### **2.3.3 Koostootmise tehnoloogia valik**

Koostootmise tehnoloogia valimisel olulisemad faktorid on tootmisüksuse võimsus ja kütuste kättesaadavus, millele lisandub ka hoolduse ja varuosade kiire kättesaadavus. Joonis 2.11 kirjeldab olemasolevad koostootmise tehnoloogiad ning arengusuundi. Arvestades baastingimusi, siis Jaani 2 koostootmisseade soojuslik võimsus ei pea ületama 0,1 MW.

## Koostootmise arengud



Joonis 2.11 Koostootmise tehnoloogiad [12]

Käesoleva töö mudeliks sai valitud järgmised koostootmise tehnoloogiad:

- Maagaasil töötav sise põlemismootoriga varustatud koostootmise seade

Tehnoloogia on levinud ja välja arendatud ning Eestis on maaletoojaid mitu.

- Biomassil töötav sise põlemismootoriga varustatud koostootmise seade

Kütuseks on biomass, mis on taastuv ressurss. Eestis on olemas maaletooja ja vastavad hooldustehnikud.

- Maagaasil töötav mikroturbiiniga varustatud koostootmise seade

Tegu on uue tehnoloogiaga, mille maaletoojat Eestis ei ole. Euroopa turul on tegutsenud kaks aastat. Varuosade tarneahel on hea, kuid hooldust tuleb teostada organiseeritult.

- Biomassil töötav stirlingu mootoriga varustatud koostootmise seade

Uus tehnoloogia, mis on koha sisse võtnud Saksamaa ja Austria turul alates 2017. aastast. Varuosade tarneahel on hea, kuid hooldust tuleb teostada organiseeritult.

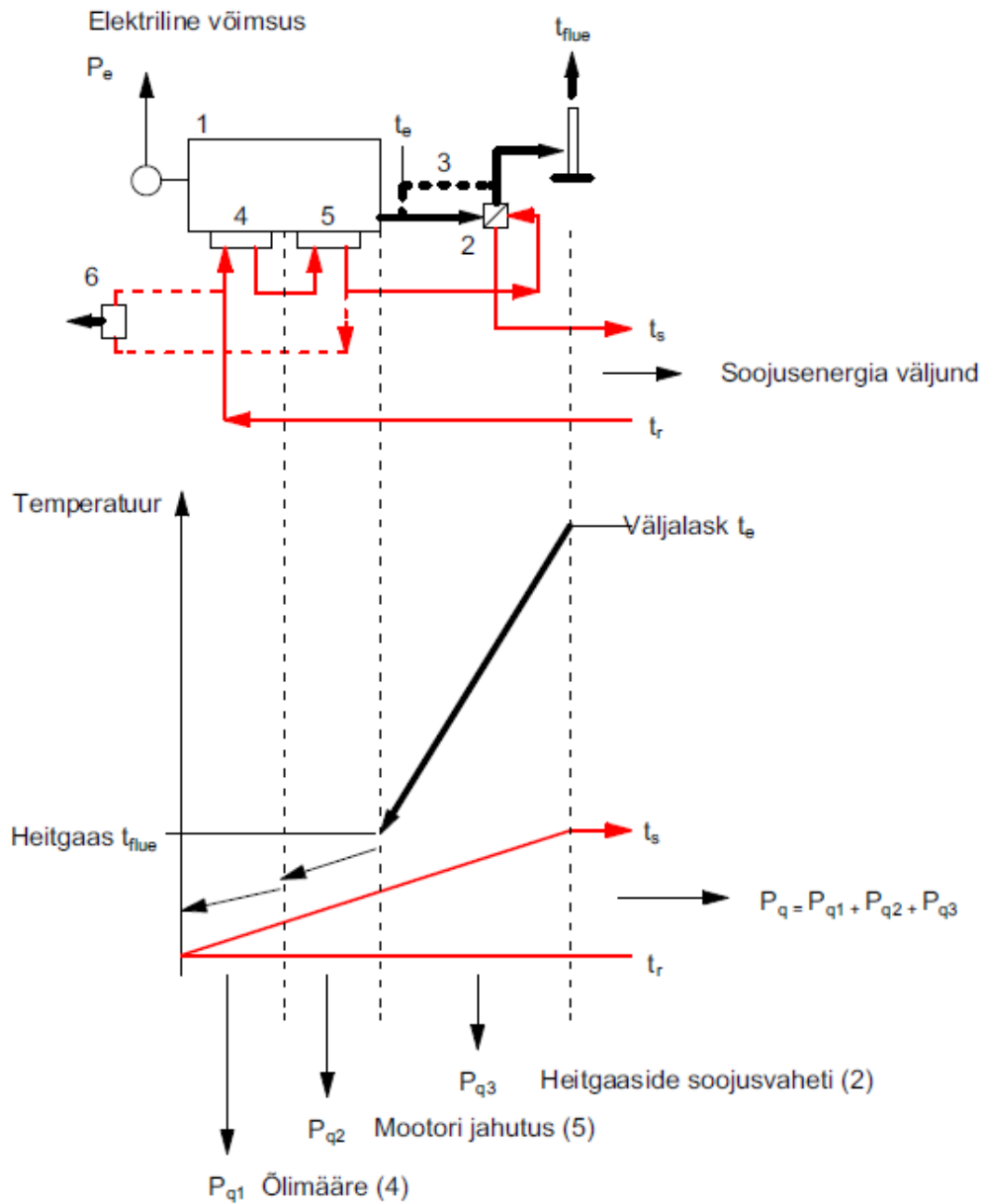
Järgmisena on toodud valitud tehnoloogiate lühikirjeldus ja energia tootmisprotsessi kirjeldus.

### **2.3.3.1 Sisepõlemismootoriga varustatud koostootmisseade**

ICE (*Internal Combustion Engine* - sisepõlemismootor) tüüpi koostootmisseadmed on väga levinud maailmas. Neid kasutatakse nii OFF-GRID kui ka ON-GRID süsteemides, laevadel ja tööstuses. Sisepõlemismootorite võimsused varieeruvad 5 kW-st üle 20MW-ni. Sisepõlemismootorite tehnoloogia näitab tõhusat arengut viimase 20 aastate jooksul. Arengusuunad on mootori töömahu vähenemine ning efektiivsuse kasv. ICE on kiire käivitusajaga, sh võib käivitada ilma vooluta. Kütusena on kasutusel peamiselt diisel, maagaasi ja vedelgaasi. Vastavat koostootmisüksust, mida pakub turul Taani firma EC Power A/S, illustreerib Joonis 2.12.



*Joonis 2.12 EC Power A/S poolt toodetud koostootmisseade*

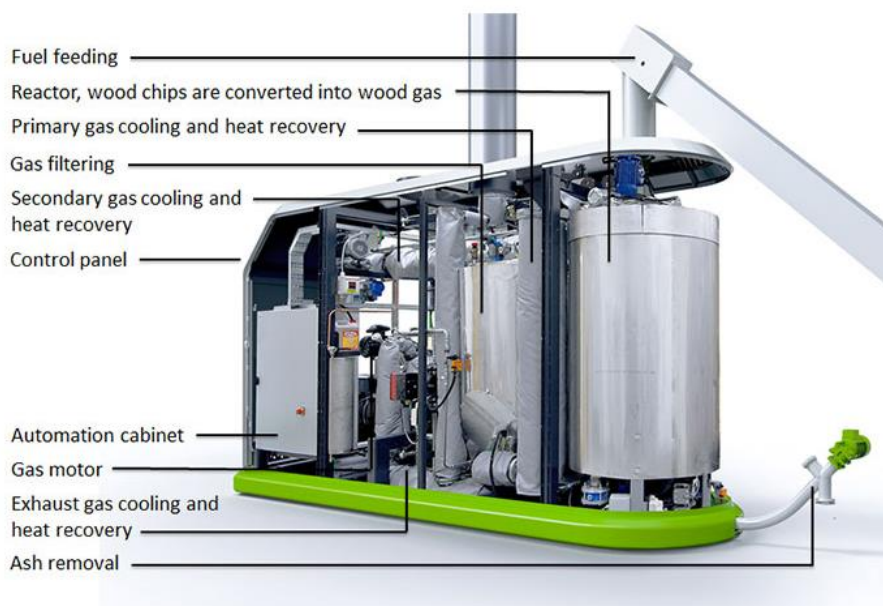


**Joonis 2.13 Sisepõlemismootori diagramm**

ICE koostootmiseseade tööprintsüübi iseloomustab Joonis 2.13. Kasulik soojus saadakse mootorilt (1) ja edastatakse kaugküttevõrku kolmest allikatest: õlimäärest (4), mootori jahutusvedelikust (5) ja heitgaasidest. Heitgaasidest tekkiv soojus kogutakse läbi heitgaaside soojustaastumise boileri (2). Heitgaaside väljalaske juga (3) on mõeldud elektrienergia tootmiseks sõltumata soojusgraafikust. Seade on varustatud radiaatoritega (6) ülekuumenemise riski vältimiseks. [12]

### 2.3.3.2 Biomassil töötav sisepõlemismootoriga varustatud koostootmisseade

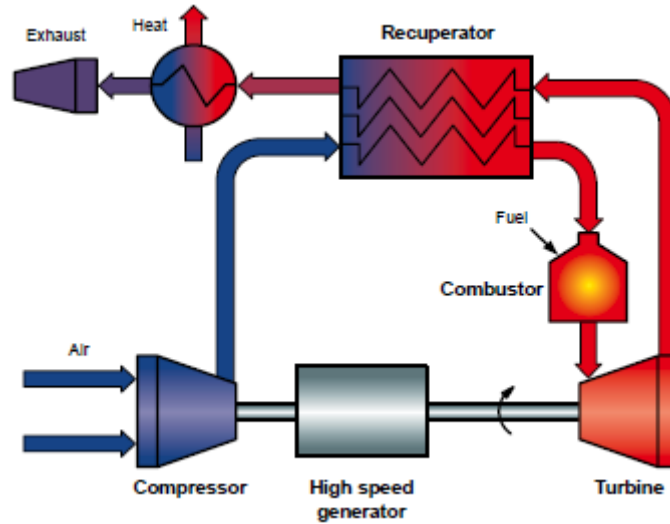
Biomassil töötav sisepõlemismootor on identne maagaasil ja diiselmootoriga töötavatele sisepõlemismootoritele. Kütuseks on puidugaas, mis on saadud reaktoris puiduhakke pürolüüsi teel. Puidugaasi filtreeritakse ja saadetakse põlemiskambrisse. Tööprintsip on sarnane Joonis 2.13 kujutatud diagrammile, kuid erinevus seisneb mootori jahutuses. Selles tehnoloogias mootori jahutusest saadud soojus suunatakse puiduhakke hoidlasse puiduhakete kuivatamiseks. Koostootmisüksust, mida pakub turul Soome firma Volter OY, illustreerib Joonis 2.14.



*Joonis 2.14 Volter OY poolt toodetud koostootmisüksus*

### 2.3.3.3 Gaasi mikroturbiin

Gaasi mikroturbiin on kaasaegne suund koostootmisel. Tehnoloogia on komertsturul alates aastast 2017. Tootmisüksus kasutab kütusena maagaasi. Gaasiturbiinid on kõrge kaalu ja võimsuse suhtega. Turbiin pöörleb kiirusega 240 000 pööret minutis. Generaator on püsimagnetiga integreeritud turbiiniga ühel rootoril (vt Joonis 2.15). Gaasiturbiini töö põhineb Brayton'i ringprotsessil.



*Joonis 2.15 Gaasi mikroturbiin [17]*

Maagaas põletakse põlemiskambris (*Combustor*). Turbiin (*Turbine*), generaator (*High speed generator*) ja kompressor (*Compressor*) pöörlevad ühel rootoril. Kasulik soojus saadakse läbi soojusvaheti (*Recuperator*) väljuvate heitgaaside arvelt. Vastavat koostootmisüksust, mida pakub turul Hollandi firma MTT Micro Turbine Technology BV, on kujutatud Joonis 2.16.

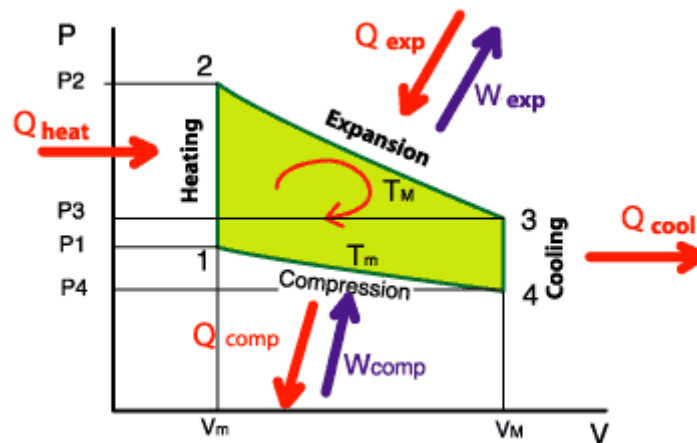


*Joonis 2.16 MTT Micro Turbine Technology BV*



### 2.3.3.4 Biomassil töötav stirlingu mootoriga varustatud koostootmisseade

Tegu on uue tehnoloogiaga, mille südameks on mootor, mis töötab Stirlingu ringprotsessil. Stirlingu mootor on eriti lihtsa ehitusega. See koosneb gaasiga täidetud silindrist ja kolvist, mis taastab mehhaanilist energiat. Tööprintsipi kirjeldab Joonis 2.17. Ringprotsess koosneb neljast faasist, mille kaudu gaas läbib järgmised üleminekud. Esimesel faasil soojusenergia mõjul toimub isohoorne protsess ( $Q_{heat} \downarrow$ ), kus gaasi temperatuur ja rõhk tõusevad. Teisel faasil isotermilise protsessi tõttu suureneb maht ja langeb rõhk ( $Q_{exp} \downarrow$ ,  $W_{exp} \uparrow$ ) ning kolb liigub mehhaanilise energia tõttu. Kolmandas faasis toimub isohoorne jahtumine ( $Q_{cool} \uparrow$ ), kus soojuskandaks on vesi, sh temperatuur ja rõhk langevad. Neljandal faasil toimub isotermiline kokkusurumine ( $Q_{comp} \uparrow$ ,  $W_{comp} \downarrow$ ), gaasi rõhk suureneb samal ajal kui gaasi maht väheneb ning kolb liigub tagasi.



*Joonis 2.17 Stirlingu ringprotsessi diagramm*

Nagu selgub üleval toodud Joonis 2.17, on mootor tundlik konstantsetele peale- ja tagasivoolu temperatuuridele. Teisalt on sel juhul nõutud soojusenergia konstantne iseloom. Võib järeldada, et koostootmisseade saavutab oma maksimaalse efektiivsuse püsitalitlusel nimikoormusega.

Alates aastast 2017 pakub Austria firma Ökofen Austria ja Saksamaa turul koostootmisüksust Pellematic E-Max. Seade kasutab kütusena puidugranuulid ja on varustatud Stirlingu mootoriga. Ökofen'i poolt toodetud seadet illustreerib Joonis 2.18.



*Joonis 2.18 Ökofen koostootmisüksus Pellematic E-Max*

### 3. Koostootmise simuleerimine

Peatükis 3 analüüsitakse koostootmistehnoloogiate jätkusuutlikkust. Jaani 2 maauksuse energia tsentraliseeritud tootmise hindamiseks tuleb luua mudel, kus simuleeritakse tootmisüksuse talitlust aasta lõikes. Simuleerimiseks seadistatakse vastavad mudelid MS Excel'i tarkvara keskkonnas ja EnergyPro 4.4 tarkvara abil.

#### 3.1 Simuleerimine MS Excel'i tarkvara keskkonnas

Koostootmise tehnoloogiate simuleerimiseks luuakse MS Excel'i tarkvara keskkonnas baastingimustele vastav mudel. Baastingimusi üldistab Tabel 3.1. Mudeli eesmärk on jälgida süsteemi (siin süsteem - Jaani 2 maauksuse energia tarbimine/tootmine) energiabilanssi muutust reaalselt.

*Tabel 3.1 Simulatsiooni baastingimused*

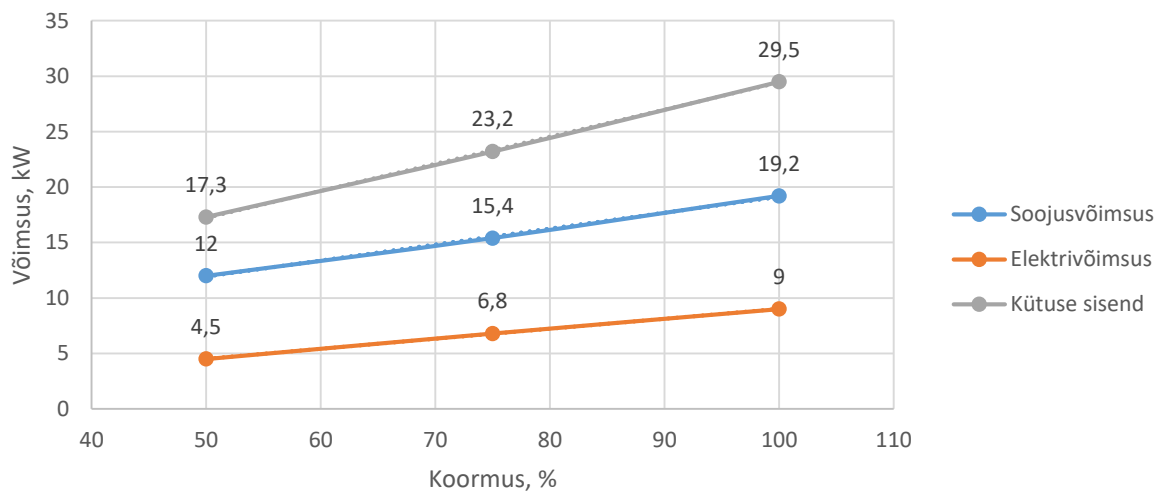
Baastingimus	Viide
Ajaperiood	2016.a
Soojusenergia tarbimine	vt Tabel 1.3
Elektrienergia tarbimine	vt Tabel 1.2
Soojusenergia jaotus aasta lõikes	vt Tabel 2.3, Joonis 2.1
Elektrienergia jaotus aasta lõikes	vt Joonis 2.3
Elektrienergia hinnad aastal 2016 tundide kaupa	Nord Pool Spot historical market data
Kaugküttevõrgu soojuskaod	vt Tabel 2.5
Kaugküttevõrgu pumbamiskulud	vt Tabel 2.7
Õhu temperatuuri andmed aasta lõikes	Ilmateenistus

Mudeli ajaperiood on üks aasta. Andmed õhutemperatuurist ja Nord Pool Spot elektrihindadest on võetud 2016. aasta alusel. Mudel väljastab tulemusi süsteemi energiabilanssi kohta tunnipõhiselt. Mudel simuleerib neli erinevat stsenaariumi. Igas stsenaariumis kasutatakse neli erinevat eelpool käsitletud koostootmise tehnoloogiat. Kirjanduses leitava koostootmise võimsuse määramiseks meetodika [12] põhjal ning Joonis

2.2 alusel võib järeldada, et koostootmise vajalik soojusvõimsus peab asuma vahemikus 60 - 80 kW.

### 3.1.1 Stsenaarium 1: gaasimootoriga koostootmiseseade

Esimeseks stsenaariumiks sai valitud Taani firma EC Power A/S poolt valmistatud koostootmiseseade XGRI9. Selle seadme tehase poolt väljastatud efektiivsuse karakteristikuid kirjeldab Joonis 3.1.



**Joonis 3.1 XGRI9 efektiivsuse karakteristikud**

Tehase poolt väljastatud karakteristikute alusel võib järeldada, et tootmiseade on võimeline talitlema 50 - 100% vahemikus oma nimivõimsusest. Kasutegur püsib terve lõigu ulatuses 95% tasemel ning erikulu ja marginaalkulu karakteristikud on lineaarse iseloomuga. Lähenedes minimaalkoormusele, siis tootmisüksuse *power-to-heat ratio* elektrienergia ja soojusenergia tegelik suhe kandub rohkem soojusenergia poole.

#### Mudeli seadistus:

XGRI9 tootmisüksuse talitluse võrrandid on:

$$C_{XGRI9} = 0,244P_{XGRI9} + 5,033 \quad (3.1)$$

$$P_{XRG19.el} = 0,09P_{XRG19} + 0,0167 \quad (3.2)$$

$$P_{XRG19.Q} = 0,144P_{XRG19} + 4,733 \quad (3.3)$$

kus  $P_{XRG19}$  – XRG19 tootmisüksuse väljund ehk koormus %;

$C_{XRG19}$  – XRG19 tootmisüksuse kütusekulu kWh;

$P_{XRG19.el}$  – XRG19 tootmisüksuse elektriline võimsus kW;

$P_{XRG19.Q}$  – XRG19 tootmisüksuse soojuslik võimsus kW.

Koostootmisjaama esialgsele koosseisule valitakse 4 plokki, kus iga plokk on XRG19 tootmisüksus (vt Joonis 3.1 ja Joonis 2.12). Plokkide optimaalne arv on eraldi optimeerimisülesanne, mida käsitletakse järgnevas peatükis.

Simuleeritav koostoomise kooslus talitleb soojusgraafiku alusel. Soojusgraafiku koormus on summa kolmest muutujast - summeeritakse kütte ja TSV energiavajadused ning kaugküttevõrgu soojuskadu.

#### **Tootmisüksuse koormamine:**

Mudel koormab plokkide nimivõimsusel osade kaupa, jälgides seejuures soojusenergia vajadusi. Esimesena koormatakse esimene plokk nimivõimsusel. Kui puudub olev võimsus vahemikus  $12 < P_Q < 19,2$  kW, siis koormatakse osakoormusega teine plokk. Kui puudub võimsus vahemikus  $0 < P_Q < 12$  kW, siis koormatakse virtuaalset gaasiboilerit. Kui puudub olev võimsus on  $P_Q > 19,2$  kW, siis koormatakse järgmist plokki täisvõimsusel. Gaasiboileri tüüp ja võimsus selgub peale simuleerimist ja optimeerimist. Mudel koormab kuni nelja plokki. Kui kõik neli plokki talitlevad täisvõimsusel, siis puuduolev võimsus toodetakse ainult gaasiboileri arvelt.

#### **Elektrienergia väljund:**

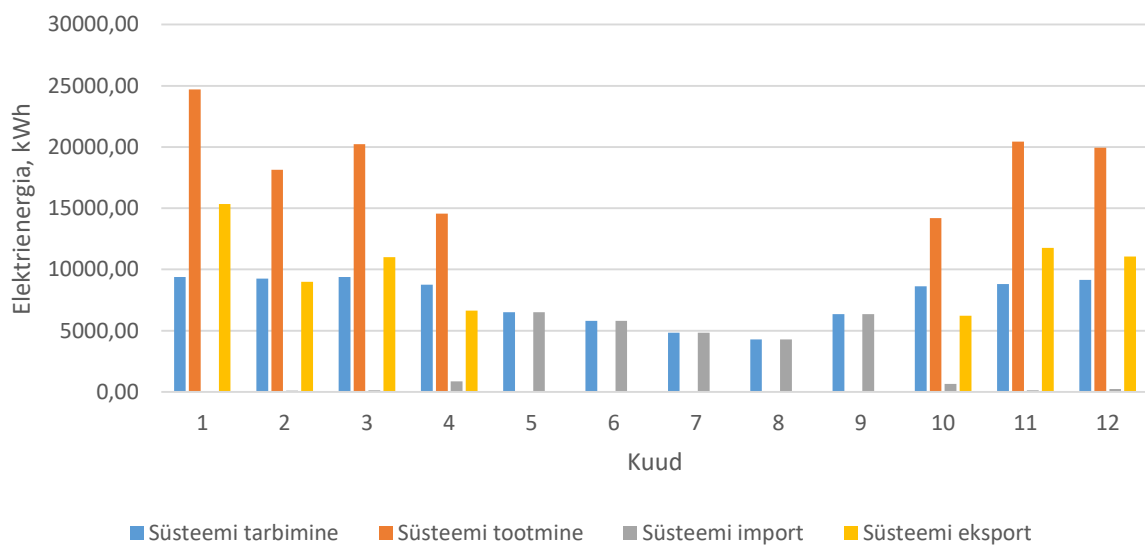
Mudel jälgib plokkide talitlust võrrandi 3.3 alusel ning annab toodetud elektrienergia väljundi võrrandi 3.2 alusel. Mudel võrdleb süsteemi elektrienergia vajadust toodetud elektrienergiaga ning moodustab elektrienergia impordi ja ekspordi lahtri.

### Kütuse sisend:

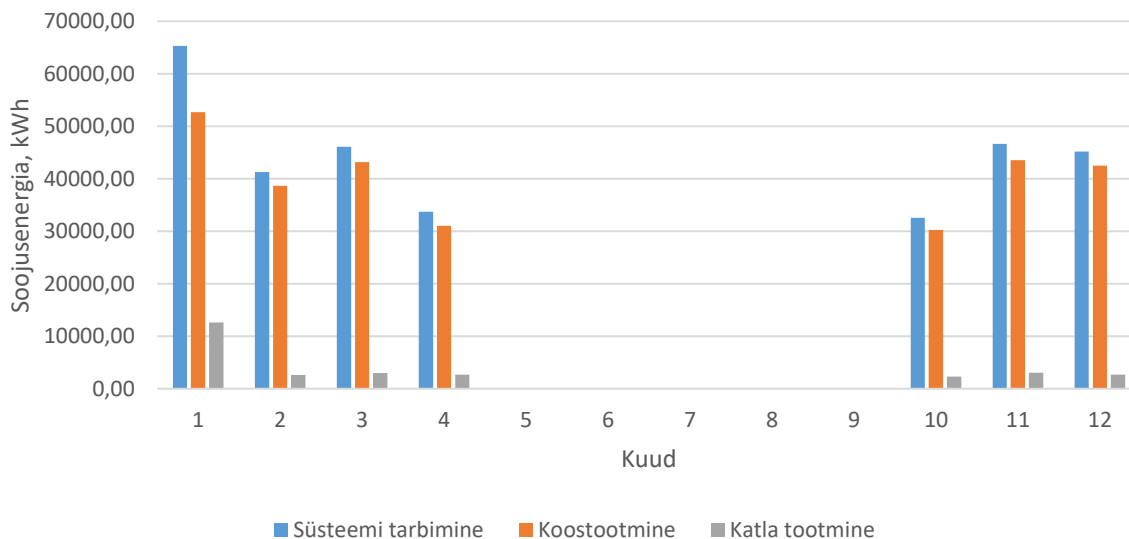
Mudel jälgib plokkide talitlust võrrandi 3.3 alusel ning annab kulutatud kütuse väljundi võrrandi 3.1 alusel ja moodustab kütuse sisendi lahtri.

### Simulatsiooni tulemused:

Esimesena simuleeritakse soojusenergia tarbimine ilma TSV-ta. Kütteperioodiks on määratletud oktoobri algus kuni aprilli lõpuni. Energiabilanssi kajastavad Joonis 3.2 ja Joonis 3.3.

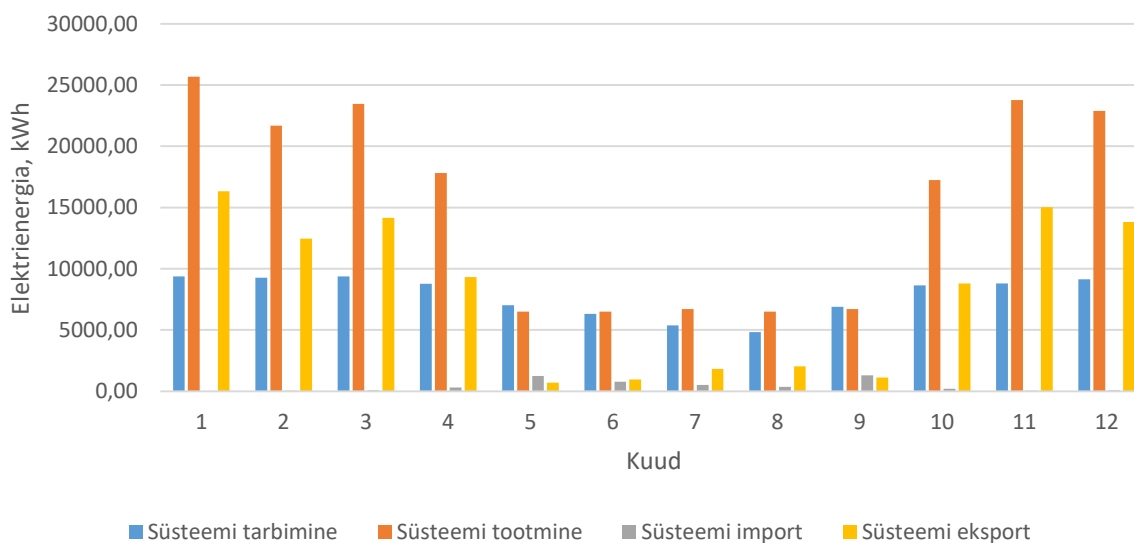


**Joonis 3.2 Elektrienergia bilanss, stsenaarium 1 ilma TSV-ta**

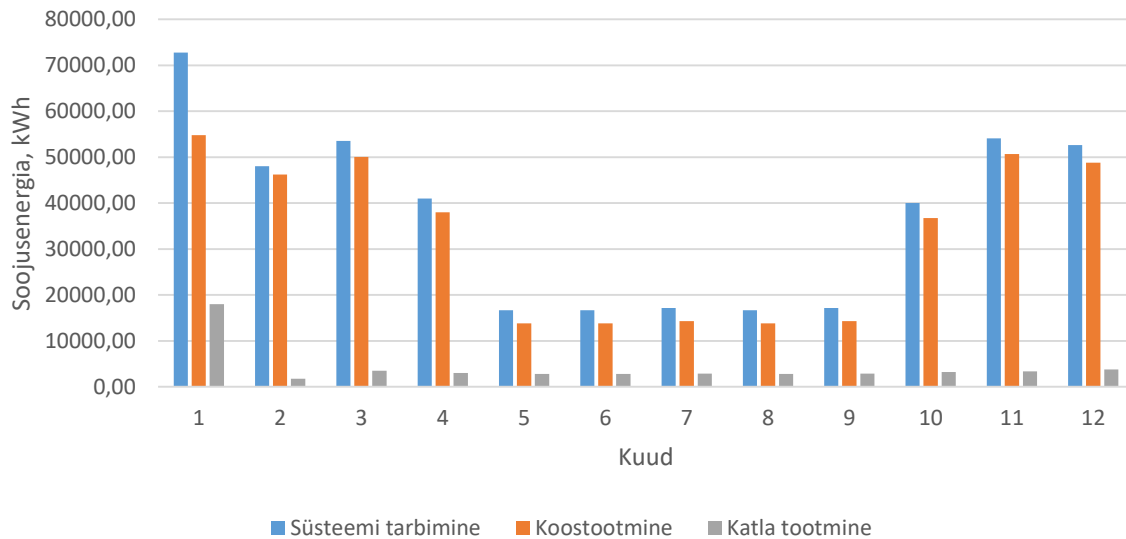


**Joonis 3.3 Soojusenergia bilanss, stsenaarium 1 ilma TSV-ta**

Järgmisena simuleeritakse soojusenergia tarbimist koos TSV-ga. Kütteperioodiks on määratletud oktoobri algus kuni aprilli lõpuni. Võrreldes eelmise simulatsiooniga, siis siin talitleb kaugküttevõrk 8760 tundi aastas. Energiabilanssi kajastavad Joonis 3.4 ja Joonis 3.5.



**Joonis 3.4 Elektrienergia bilanss, stsenaarium 1 koos TSV-ga**



**Joonis 3.5 Soojusenergia bilanss, stsenaarium 1 koos TSV-ga**

### Stsenaarium 1 simulatsiooni tulemuste analüüs:

Simulatsiooni tulemused üldistab Tabel 3.2. Tulemused näitavad, et XRGI 4-plokiline koostootmise kooslus sobib optimaalselt soojusenergia bilanssi täitmiseks. Joonis 3.3 ja Joonis 3.5 alusel võib järeldada, et gaasikatla võimsust kasutatakse enamasti koostootmisüksuse töövälise piirkonna  $0 < P_Q < 12$  kW katmiseks. Erandiks on jaanuar, kus nõutakse oluliselt rohkem soojusvõimsust, mida kõik 4 ploki suudavad toota. Jaanuari soojuskoormuse tipud on aluseks gaasikatla võimsuse määramisel. Mõlemal juhul on elektrienergia bilanss positiivne, st süsteemist eksporditakse rohkem elektrienergiat kui imporditakse. Teisalt on süsteemis elektrienergia tarbimise tipud, mida antud koostootmise üksusega ei ole võimalik katta. Ilma TSV-ta moodustab elektrienergia import 30117 kWh ja koos TSV-ga on vastav näitaja 4960 kWh. Ilma TSV-ta on plokkide summaarne tööaeg tundides aasta lõikes 15011 ja koos TSV-ga on nelja ploki summaarne tööaeg 20923 tundi. Koostootmise süsteem vastab N-1 kriteeriumile, st hoolduse või remonttööde läbiviimisel võib iga plokk eraldi tööst välja lülitada.

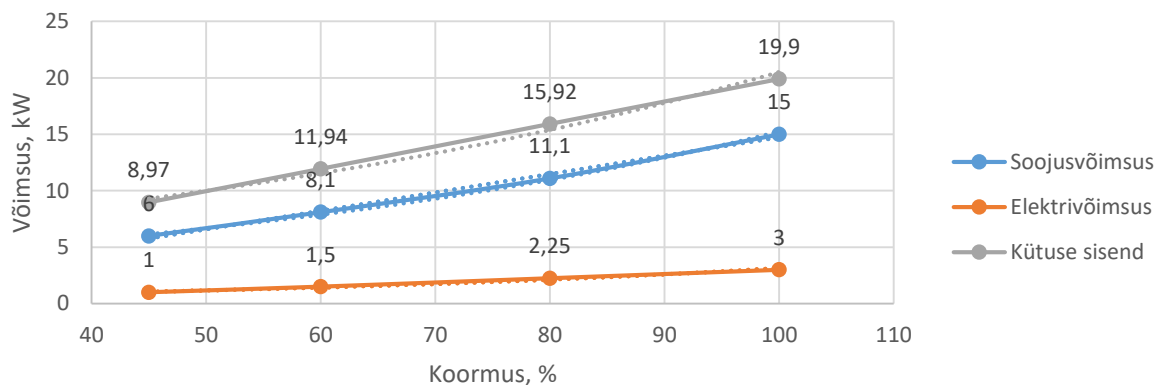


**Tabel 3.2 Stsenaarium 1 MS Excel tarkavara simuleerimise tulemused**

Stsenaarium 1	ilma TSV-ta	koos TSV-ga
Koostootmisel toodetud elektrienergia, [kWh]	132183,70	185416,2
Koostootmisel toodetud soojusenergia, [kWh]	281928,20	395498,20
Soojuskadu kaugküttevõrgus, [kWh]	66443,20	114756,00
Elektrienergia import, [kWh]	29950,42	4913,63
Elektrienergia eksport, [kWh]	71027,70	96540,65
Katla abil toodetud soojusenergia, [kWh]	28958,30	50835,85
Kütuse sisend, [kWh]	464331,70	661393,90
1. ploki tööaeg täis- ja osakoormusel, [tund]	5043	8760
2. ploki tööaeg täis- ja osakoormusel, [tund]	4932	5032
3. ploki tööaeg täis- ja osakoormusel, [tund]	3289	4550
4. ploki tööaeg täis- ja osakoormusel, [tund]	1747	2581
Emissioonitegurid, [t]		
Süsinikdioksiid, CO <sub>2</sub> [t]	93,3	132,94
Vääveldioksiid, SO <sub>2</sub> [t]	0	0
Lämmastikoksiidid, NO <sub>x</sub> [t]	0,102	0,145
Tahm/tuhk, [t]	0	0

### 3.1.2 Stsenaarium 2: gaasiturbiiniga koostootmiseade

Teiseks stsenaariumiks sai valitud Hollandi firma MTT Micro Turbine Technology BV poolt valmistatud koostootmiseade EnerTwin. Selle seadme tootja tehase poolt väljastatud efektiivsuse karakteristikuid kirjeldab Joonis 3.6.



**Joonis 3.6 EnerTwin efektiivsuse karakteristikud**

Tehase poolt väljastatud karakteristikute alusel võib järeldada, et tootmiseade on võimeline talitlema 45-100% vahemikus oma nimivõimsusest. Kasutegur on maksimaalsel täiskoormusel 90%. Erikulu ja marinaalkulu karakteristikud ei ole lineaarse iseloomuga. Gaasiturbiini kasutegur langeb ning tootmisüksuse *power-to-heat ratio* elektrienergia ja soojusenergia tegelik suhe nihkub rohkem soojusenergia poole, kui koormatakse minimaalkoormusele lähenedes.

#### Mudeli seadistus:

EnerTwin tootmisüksuse talitluse võrrandeid kirjeldavad täpsemalt eksponentsiaalse iseloomuga funktsioonid:

$$C_{EnerTwin} = 4,8726e^{0,0144P_{EnerTwin}} \quad (3.4)$$

$$P_{EnerTwin.el} = 0,4326e^{0,0199P_{EnerTwin}} \quad (3.5)$$

$$P_{EnerTwin.Q} = 2,9283e^{0,0165P_{EnerTwin}} \quad (3.6)$$

kus  $P_{EnerTwin}$  – EnerTwin tootmisüksuse väljund ehk koormus %;

$C_{EnerTwin}$  – EnerTwin tootmisüksuse kütusekulu kWh;

$P_{EnerTwin.el}$  – EnerTwin tootmisüksuse elektriline võimsus kW;

$P_{EnerTwin.Q}$  – EnerTwin tootmisüksuse soojuslik võimsus kW;

Koostootmisjaama koosseisu valitakse esialgu 5 plokki. Iga ploki moodustab EnerTwin tootmisüksus (vt Joonis 3.6 ja Joonis 2.16). Plokkide optimaalne arv on eraldi optimeerimisülesanne, mida käsitletakse järgnevas peatükis.

Simuleeritav koostoomise kooslus talitleb soojusgraafiku alusel. Soojusgraafiku koormus on summa kolmest muutujast - summeeritakse kütte ja TSV energiavajadused ning kaugküttevõrgu soojuskadu.

### **Tootmisüksuse koormamine:**

Mudel koormab plokkide nimivõimsusel osade kaupa, jälgides seejuures soojusenergia vajadusi. Esimesena koormatakse esimene plokk nimivõimsusel. Kui puuduolev võimsus on vahemikus  $6 < P_Q < 15$  kW, siis koormatakse osakoormusega teist plokki. Kui puuduv võimsus on vahemikus  $0 < P_Q < 6$  kW, siis koormatakse virtuaalset gaasiboilerit. Kui puuduvolev võimsus on  $P_Q > 15$  kW, siis koormatakse järgmist plokki täisvõimsusel. Gaasiboileri tüüp ja võimsus selgub pärast simuleerimist ja optimeerimist. Mudel koormab kuni viit plokki. Kui kõik neli plokki talitlevad täisvõimsusel, siis puuduolev võimsus toodetakse ainult gaasiboileri arvelt.

### **Elektrienergia väljund:**

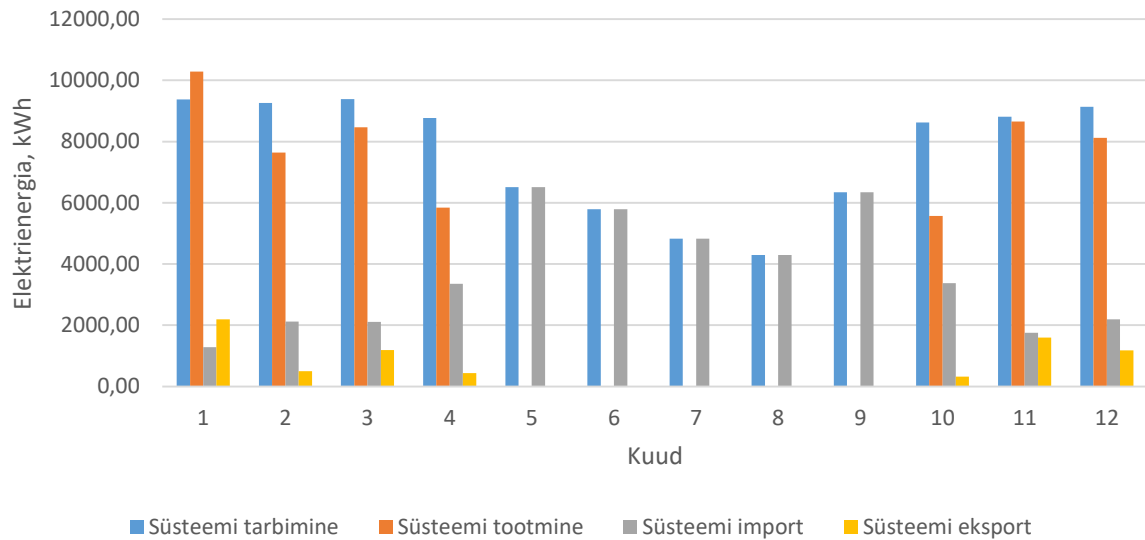
Mudel jälgib plokkide talitlust võrrandi 3.6 alusel ning annab toodetud elektrienergia väljundi võrrandi 3.5 alusel. Mudel võrdleb süsteemi elektrienergiavajadust toodetud elektrienergia väljundiga ning moodustab elektrienergia impordi ja ekspordi lahtri.

### **Kütuse sisend:**

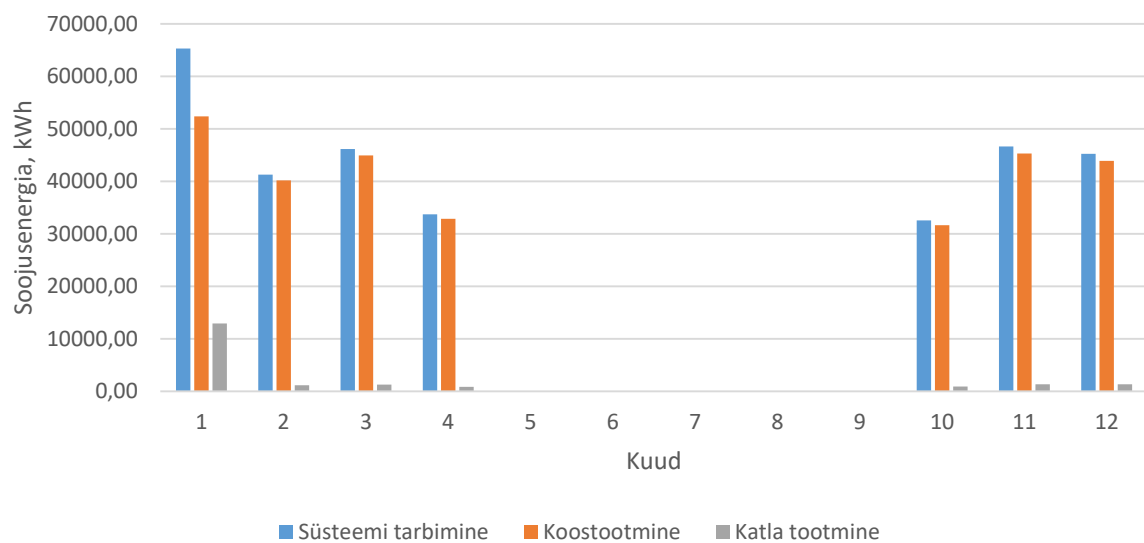
Mudel jälgib plokkide talitlust võrrandi 3.6 alusel ning annab kulutatud kütuse väljundi võrrandi 3.4 alusel ning moodustab kütuse sisendi lahtri.

### **Simulatsiooni tulemused:**

Esimesena simuleeritakse soojusenergia tarbimist ilma TSV-ta. Kütteperioodiks on määratletud oktoobri algus kuni aprilli lõpuni. Energiabilanssi kajastavad Joonis 3.7 ja Joonis 3.8.



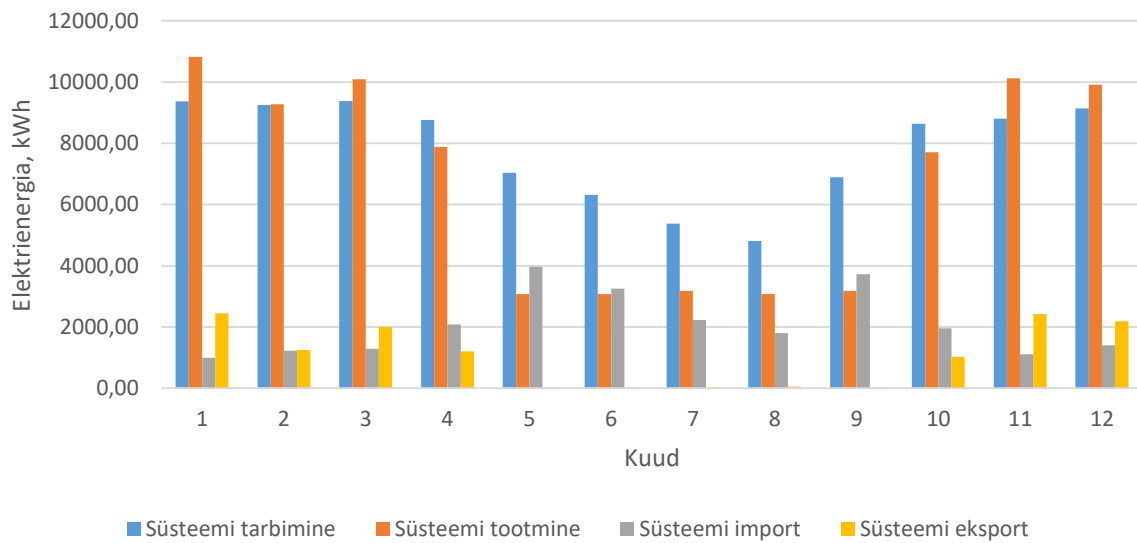
**Joonis 3.7 Elektrienergia bilanss, stsenaarium 2 ilma TSV-ta**



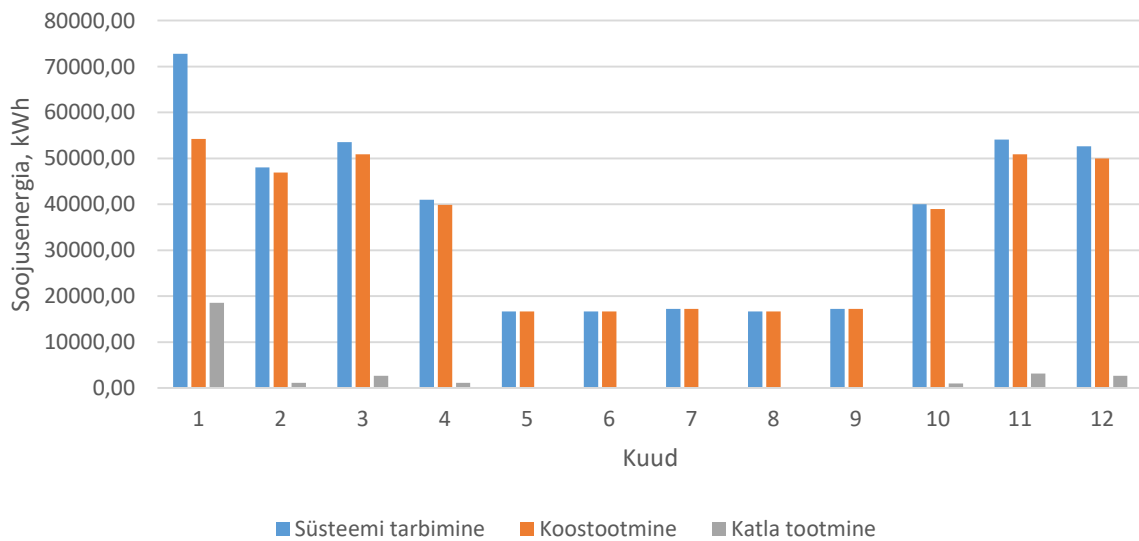
**Joonis 3.8 Soojusenergia bilanss, stsenaarium 2 ilma TSV-ta**

Järgmisena simuleeritakse soojusenergia tarbimine koos TSV-ga. Kütteperioodiks on määratletud oktoobri algus kuni aprilli lõpuni. Võrreldes eelmise simulatsiooniga

funktsioneerib kaugküttevõrk siin 8760 tundi aastas. Energiabilanssi kajastavad Joonis 3.9 ja Joonis 3.10.



**Joonis 3.9 Elektrienergia bilanss, stsenaarium 2 koos TSV-ga**



**Joonis 3.10 Soojusenergia bilanss, stsenaarium 2 koos TSV-ga**

Simulatsiooni tulemusi üldistab Tabel 3.3 Tabel 3.2. Tulemused näitavad, et EnerTwin 5-plokiline koostootmise kooslus sobib optimaalselt soojusenergia bilansi täitmiseks. Joonis 3.8 ja Joonis 3.10 alusel võib järeldada, et gaasikatla võimsust kasutatakse enamasti

koostootmisüksuse töövälise piirkonna  $0 < P_Q < 6$  kW katmiseks. Erandkuuks on jaanuar, kus nõutakse oluliselt rohkem soojusvõimsust kui kõik 5 ploki realselt suudavad toota. Jaanuari soojuskoormuse tipud on aluseks gaasikatla võimsuse määramisel. Esimesel juhtumil, kui koostootmisjaam talitleb ainult küteperioodil, on elektrienergia bilanss negatiivne, st süsteemi imporditakse rohkem elektrienergiat kui eksporditakse. Teisel juhtumil, kui koostootmisjaam talitleb terve aasta lõikes, on elektrienergia bilanss positiivne. Ilma TSV-ta saavutati elektrienergia impordiks 43945 kWh ja koos TSV-ga on elektrienergia import 25019 kWh. Ilma TSV-ta on plokkide tööaeg aasta lõikes 20182 tundi ja koos TSV-ga vastavalt 30038 tundi. Koostootmise süsteem vastab N-1 kriteeriumile, st hoolduse või remonttööde läbiviimisel võib iga ploki eraldi tööst välja lülitada.

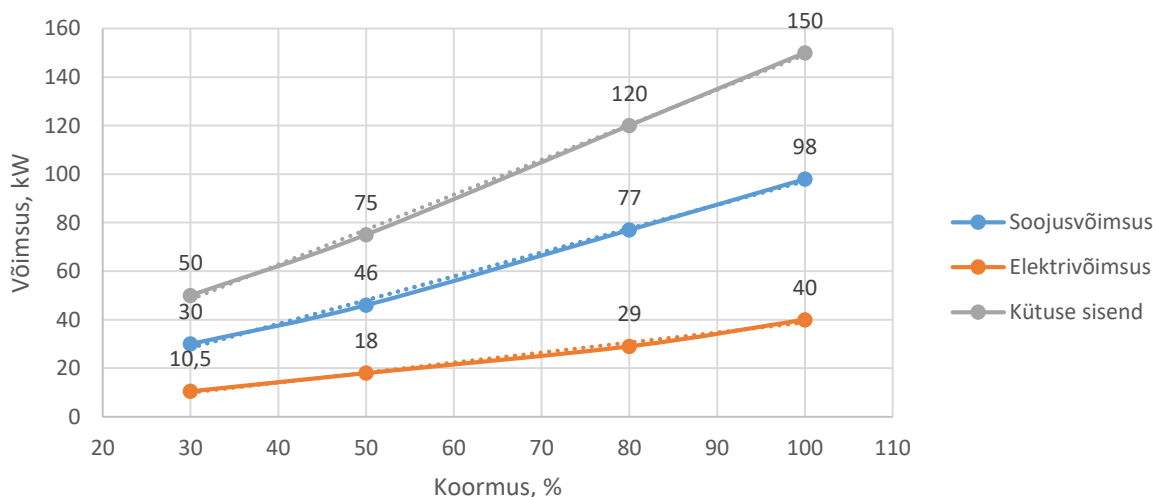
**Tabel 3.3 Stsenaarium 2 MS Excel tarkavara simuleerimise tulemused**

Stsenaarium 2	ilma TSV-ta	koos TSV-ga
Koostootmisel toodetud elektrienergia, [kWh]	54577,38	81388,16
Koostootmisel toodetud soojusenergia, [kWh]	291204,96	416111,9
Soojuskadu kaugküttevõrgus, [kWh]	66443,20	114756,00
Elektrienergia import, [kWh]	43945,45	25019,87
Elektrienergia eksport, [kWh]	7416,27	12618,81
Katla abil toodetud soojusenergia, [kWh]	19681,56	30222,18
Kütuse sisend, [kWh]	418436,05	598891,2
1. ploki tööaeg täis- ja osakoormusel, [tund]	5072	8760
2. ploki tööaeg täis- ja osakoormusel, [tund]	5036	5464
3. ploki tööaeg täis- ja osakoormusel, [tund]	4772	5352
4. ploki tööaeg täis- ja osakoormusel, [tund]	3241	5242
5. ploki tööaeg täis- ja osakoormusel, [tund]	2061	5220

Emissioonitegurid, [t]		
Süsinikdioksiid, CO <sub>2</sub> [t]	84,11	120,38
Vääveldioksiid, SO <sub>2</sub> [t]	0	0
Lämmastikoksiidid, NO <sub>x</sub> [t]	0,092	0,132
Tahm/tuhk, [t]	0	0

### 3.1.3 Stsenaarium 3: biomassil töötav sisepõlemismootoriga koostootmiseseade

Kolmandaks stsenaariumiks sai valitud Soome firma Volter OY poolt valmistatud koostootmiseseade GFE45. Tootja tehase poolt väljastatud efektiivsuse karakteristikuid kirjeldab Joonis 3.11.



**Joonis 3.11 GFE45 efektiivsuse karakteristikud**

Tehase poolt väljastatud karakteristikute alusel võib järeldada, et tootmiseseade on võimeline talitlema 30-100% vahemikus oma nimivõimsusest. Kasutegur on maksimaalsel täiskoormusel 92%. Erikulu ja marinaalkulu karakteristikud on suhteliselt lineaarse iseloomuga. Koostootmiseseadme kasutegur langeb, kui läheneda minimaalkoormuse piirkonda. Kasuteguri kahanemine 81%-ni, kui läheneda minimaalkoormusele, on tingitud reaktori kasutegurist. Reaktor on võimeline tootma puidugaasi maksimaalse efektiivsusega täisvõimsusel. Tootmisüksuse *power-to-heat ratio* elektrienergia ja soojusenergia tegelik suhe nihkub rohkem soojusenergia poole.

## Mudeli seadistus:

GFE45 tootmisüksuse talitluse võrandid on:

$$C_{GFE45} = 1,44P_{GFE45} + 5,172 \quad (3.7)$$

$$P_{GFE45.el} = 0,413P_{GFE45} - 2,466 \quad (3.8)$$

$$P_{GFE45.Q} = 0,981P_{GFE45} - 1,017 \quad (3.9)$$

kus  $P_{GFE45}$  – väljund ehk koormus %;

$C_{GFE45}$  – kütusekulu kWh;

$P_{GFE45.el}$  – elektriline võimsus kW;

$P_{GFE45.Q}$  – soojuslik võimsus kW.

Koostootmisjaama koosseis koosneb ühest tootmisüksusest. Tootmisüksust illustreerib Joonis 2.14 ning efektiivsuse karakteristikuid kirjeldab Joonis 3.11.

Simuleeritav koostoomise kooslus talitleb soojusgraafiku alusel. Soojusgraafiku koormus on summa kolmest muutujast - summeeritakse kütte ja TSV energiavajadused ning kaugküttevõrgu soojuskadu.

## Tootmisüksuse koormamine:

Mudel koormab tootmisüksust vastavalt soojusenergia tarbimisele. GFE45 talitleb soojusvõimsuse vahemikus  $30 < P_Q < 98$  kW. Puuduolev soojusvõimsust toodetakse puiduhakmetel töötava katla arvel. Katla tüüp ja võimsus selgub pärast simuleerimist. Võrreldes 1. ja 2. stsenaariumitega, talitleb tootmisüksus selles stsenaariumis terve aasta ulatuses, välja arvatud hoolduseks nõutud ajaperiood. Kokku on seade tööst väljas 490 tundi aastas. Suveperioodil, kus soojusenergia vajadus on väiksem GFE45 minimaal koormusest, opereerib tootmisüksus oma minimaalsel koormusrežiimis ning soojusenergia ülejääk utiliseeritatakse.



### Elektrienergia väljund:

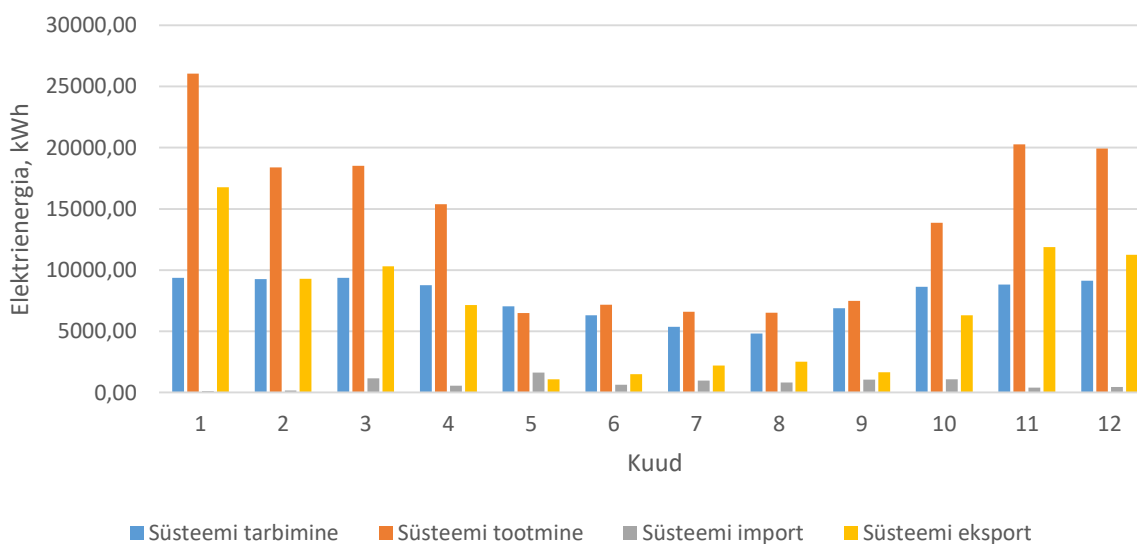
Mudel jälgib tootmisüksuse talitlust võrrandi 3.9 alusel ning annab toodetud elektrienergia väljundi võrrandi 3.8 alusel. Mudel võrdleb süsteemi elektrienergiavajadust toodetud elektrienergiaga ning moodustab elektrienergia impordi ja ekspordi lahtri.

### Kütuse sisend:

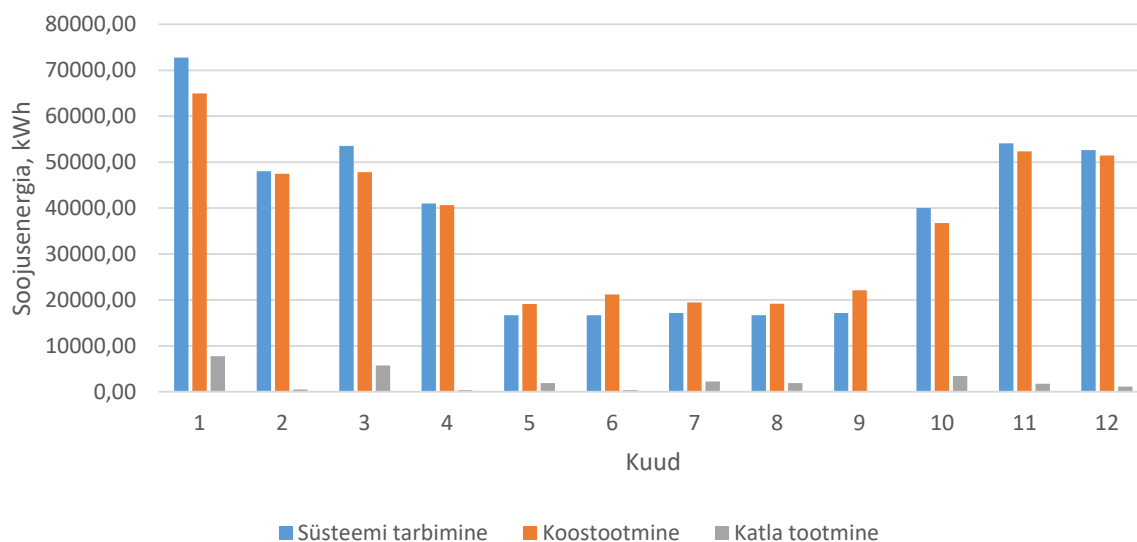
Mudel jälgib plokkide talitlust võrrandi 3.9 alusel ning annab kulutatud kütuse väljundi võrrandi 3.7 alusel ja moodustab kütuse sisendi lahtri.

### Simulatsiooni tulemused:

Kolmandas stsenaariumis simuleeritakse soojusenergia tarbimine koos TSV-ga. Kütteperioodiks on määratletud oktoobri algus kuni aprilli lõpuni. Energiabilanssi kajastavad Joonis 3.12 ja Joonis 3.13.



*Joonis 3.12 Elektrienergia bilanss, stsenaarium 3 koos TSV-ga*



**Joonis 3.13 Soojusenergia bilanss, stsenaarium 3 koos TSV-ga**

Simulatsiooni tulemusi üldistab Tabel 3.4. Tulemused näitavad, et GFE45 tootmisüksus võimaldab täita soojusenergia bilanssi. Joonis 3.13 alusel võib järeldada, et katla võimsust kasutatakse enamasti koostootmisüksuse töövälises piirkonnas  $P_Q > 98$  kW ning seadme hoolduse perioodi soojusevajaduse rahuldamiseks. Jaanuaris nõutakse oluliselt rohkem soojusvõimsust kui tootmisüksus suudab toota. Märtsis ja oktoobris on hooldusest tingituna suurem katlakoormus. Võrreldes esimese ja teise stsenaariumitega, tuleb kolmandas stsenaariumis katla soojusvõimsuse määramiseks kasutada aasta soojusenergia kasutatavust, mis on kajastatud Joonis 2.2. Seda põhjustab N-1 kriteeriumile vastavus, sest on võimalik olukord, kus avari või hoolduse tõttu on GFE45 tootmisüksus tööst väljas ning katlaga tuleb kindlustada kogu maaüksuse soojusenergia vajadus. Elektrienergia bilanss on positiivne, st süsteemist eksporditakse rohkem elektrienergiat kui imporditakse. Elektrienergia import moodustab 9052 kWh ja elektrienergia eksport 81961 kWh. Tootmisüksuse tööaeg on aasta lõikes 8259 tundi. Koostootmise süsteem vastab N-1 kriteeriumile vastava võimsusega katla olemasolul.

**Tabel 3.4 Stsenaarium 3 MS Excel tarkavara simuleerimise tulemused**

Stsenaarium 3	koos TSV-ga
Koostootmisel toodetud elektrienergia, [kWh]	166698,6
Koostootmisel toodetud soojusenergia, [kWh]	442645,8
Utiliseeritud soojusenergia, [kWh]	23649,54
Soojuskadu kaugküttevõrgus, [kWh]	114756,00
Elektrienergia import, [kWh]	9052,21
Elektrienergia eksport, [kWh]	81961,55
Katla abil toodetud soojusenergia, [kWh]	27247,80
Kütuse sisend, [kWh]	697169,9
Ploki tööaeg täis- ja osakoormusel, [tund]	8259
Emissioonitegurid, [t]	
Süsinikdioksiid, CO <sub>2</sub> [t]	0
Vääveldioksiid, SO <sub>2</sub> [t]	0
Lämmastikoksiidid, NO <sub>x</sub> [t]	0,251
Tahm/tuhk, [t]	1,743

#### **3.1.4 Stsenaarium 4: biomassil töötav stirlingumootoriga koostootmiseseade**

Neljandaks stsenaariumiks valiti Austria firma Ökofen poolt valmistatud koostootmiseseade Pellematic E-Max. Vastavalt punktis 2.2.3.4 kirjeldatud tööprintsibile, on Ökofen tehase poolt toodetud koostootmisüksus võimeline talitlema koostootmisrežiimis ainult nimivõimsusel. Sel juhul on talitlus konstantne: soojusvõimuse väljund on 55 kW, elektrivõimsuse väljund on 4,5 kW ja kütuse sisend on 55 kW. Ülejäänud režiimidel elektrienergia väljund välistatud ehk seade talitleb katlarežiimis.

#### **Mudeli seadistus:**

E-Max tootmisüksuse koostootmisrežiimis talitluse võrandid on:

$$C_{E-Max} = 0,65P_{E-Max} \quad (3.10)$$

$$P_{E-Max.el} = 0,045P_{E-Max} \quad (3.11)$$

$$P_{E-Max.Q} = 0,55P_{E-Max} \quad (3.12)$$

kus  $P_{E-Max}$  – väljund ehk koormus %;

$C_{E-Max}$  – kütusekulu kWh;

$P_{E-Max.el}$  – elektriline võimsus kW;

$P_{E-Max.Q}$  – soojuslik võimsus kW.

Simuleeritav koostoomise kooslus talitleb soojusgraafiku alusel. Soojusgraafiku koormus on summa kolmest muutujast - summeeritakse kütte ja TSV energiavajadused ning kaugküttevõrgu soojuskadu.

### **Tootmisüksuse koormamine:**

Iga tootmisüksus E-Max talitleb koostootmise püsirežiimis soojusvõimsusega 55 kW. Puuduolev soojusvõimsust toodetakse pelletidel töötava katla arvelt. Katla tüüp ja võimsus selgub pärast simuleerimist. Mudel koormab kahte E-Max tootmisüksust. Võrreldes 1. ja 2. stsenaariumitega, siis siin tootmisüksused talitlevad terve aasta ulatuses. Suveperioodil, kui soojusenergia vajadus on väiksem E-Max koostootmise nimikoormusest, jätkab tootmisüksus talitlust katlarežiimis.

### **Elektrienergia väljund:**

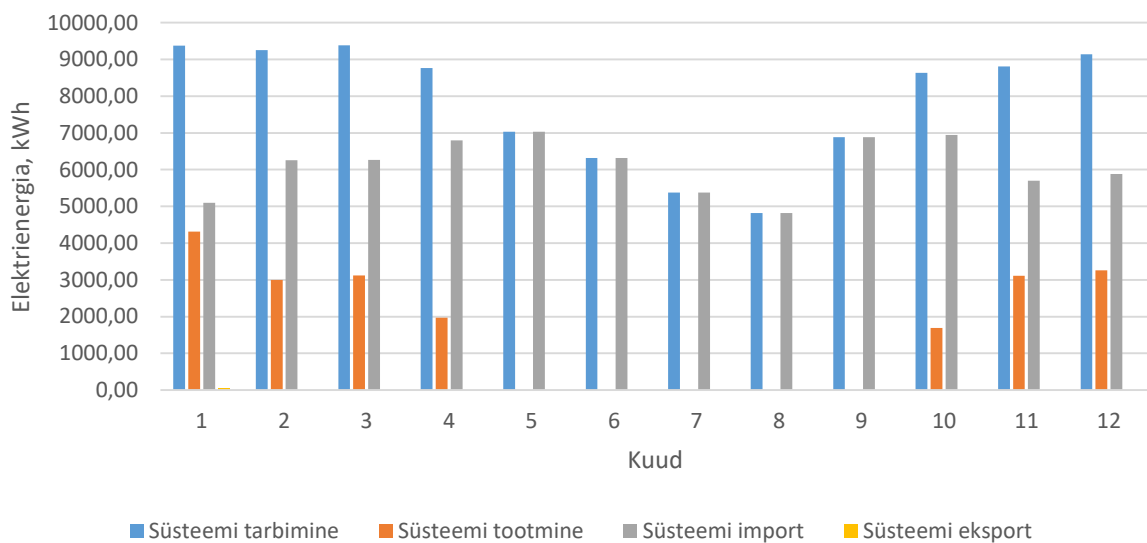
Mudel jälgib tootmisüksuse talitlust võrrandi 3.12 alusel ning annab toodetud elektrienergia väljundi võrrandi 3.11 alusel. Mudel võrdleb süsteemi elektrienergia vajadust toodetud elektrienergiaga ning moodustab elektroenergia impordi ja ekspordi lahtri.

### **Kütuse sisend:**

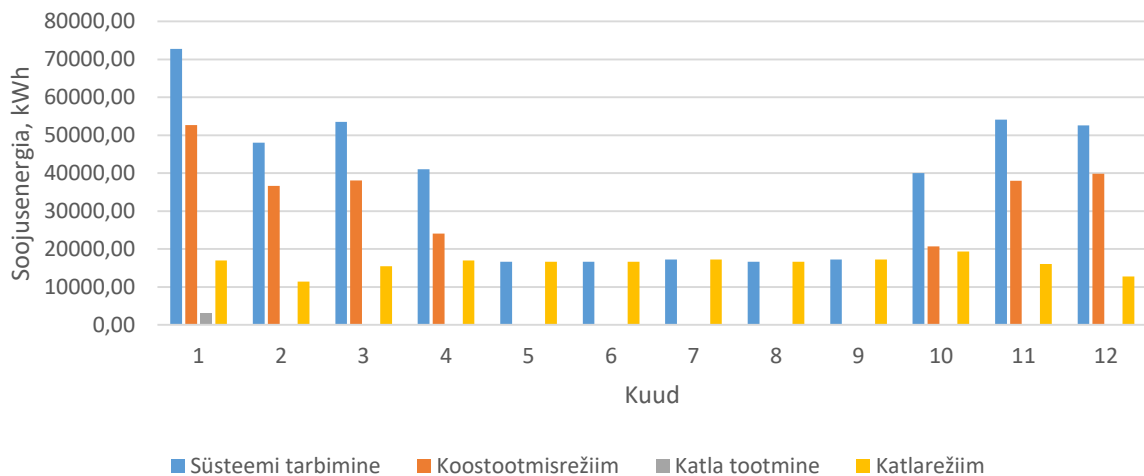
Mudel jälgib plokkide talitlust võrrandi 3.12 alusel ning annab kulutatud kütuse väljundi võrrandi 3.10 alusel ja moodustab kütuse sisendi lahtri.

### Simulatsiooni tulemused:

Neljandas stsenaariumis simuleeritakse soojusenergia tarbimine koos TSV-ga. Kütteperioodiks on määratletud oktoobri algus kuni aprilli lõpuni. Energiabilanssi kajastavad Joonis 3.14 ja Joonis 3.15.



**Joonis 3.14 Elektrienergia bilanss, stsenaarium 4 koos TSV-ga**



**Joonis 3.15 Soojusenergia bilanss, stsenaarium 4 koos TSV-ga**

Simulatsiooni tulemusi üldistab Tabel 3.5. Tulemused näitavad, et E-Max kaks tootmisüksust võimaldavad täita soojusenergia bilansi. Joonis 3.15 alusel võib järeldada, et katla võimsust kasutatakse enamasti kahe koostootmisüksuse töövälises piirkonnas  $2P_Q > 110$  kW. 1. ja 2. stsenaariumiga võrreldes tuleb neljandas stsenaariumis katla soojusvõimsuse määramiseks kasutada aasta soojusenergia kasutatavust, mida kajastab Joonis 2.2. Selle põhjuseks on N-1 kriteeriumile vastavus, kuna on võimalik olukord, kus avarii või hoolduse tõttu on E-Max tootmisüksus tööst väljas ning katlaga tuleb kindlustada ühe tootmiseseadme soojusvõimsus. Elektrienergia bilanss on negatiivne ehk süsteemi imporditakse rohkem elektrienergiat kui eksporditakse. Kahe plokiga skeemil elektrienergia import moodustab 20452 kWh ja elektrienergia eksport kõigest 35 kWh. 1.plokki tööaeg koostootmisesrežiimis 4333 tundi ja katlarežiimis 4429 tundi. 2. plokki tööaeg koostootmisesrežiimis 213 tundi ja katlarežiimis 4118 tundi. Kokku talitleb koostootmisesrežiimis jaam 4544 tundi, mis avaldab mõju elektrienergia bilansile. Koostootmise süsteem vastab N-1 kriteeriumile vastava võimsusega katla olemasolul.

**Tabel 3.5 Stsenaarium 4 MS Excel tarkavara simuleerimise tulemused**

Stsenaarium 4	2 plokki koos TSV-ga
Koostootmisel toodetud elektrienergia, [kWh]	20452,5
Koostootmisel toodetud soojusenergia, [kWh]	249920,0
Soojuskadu kaugküttevõrgus, [kWh]	114756,00
Elektrienergia import, [kWh]	73372,1
Elektrienergia eksport, [kWh]	35,39
Plokkide katlarežiimis toodetud soojusenergia, [kWh]	193517,2
Katla abil toodetud soojusenergia, [kWh]	3125,41
Kütuse sisend, [kWh]	513601,7
1. ploki tööaeg täiskoormusel, s.t koostootmisesrežiimis [tund]	4331
1. ploki tööaeg osakoormusel, s.t katlarežiimis [tund]	4429
2. ploki tööaeg täiskoormusel, s.t koostootmisesrežiimis [tund]	213
2. ploki tööaeg osakoormusel, s.t katlarežiimis [tund]	4118
Emissioonitegurid, [t]	
Süsinikdioksiid, CO <sub>2</sub> [t]	0
Vääveldioksiid, SO <sub>2</sub> [t]	0

Lämmastikoksiidid, NO <sub>x</sub> [t]	0,185
Tahm/tuhk, [t]	0,469

Kõiki koostootmise stsenaariumite energiabilansse võtab kokku Tabel 3.6. Selle mõju Eesti keskkonnale üldistab Tabel 3.7.

**Tabel 3.6 MS Excel tarkavara stsenaariumite energiabilanssi üldistav tabel**

	Stsenaarium 1, maagaasil sisepõlemismootor		Stsenaarium 2, maagaasil mikroturbiin		Stsenaarium 3, biomassil gaasimootor	Stsenaarium 4, biomassil strirlingumootor
	TSV-ta	TSV-ga	TSV-ta	TSV- ga	TSV-ga	TSV-ga
Koostootmisel toodetud soojusenergia, [MWh]	281,9	395,5	291,2	416,1	442,6	249,9/193,5*
Koostootmisel toodetud elektrienergia, [MWh]	132,2	185,4	54,6	81,4	166,7	20,45
Toodetud soojusenergia, [MWh]	28,9	50,8	19,7	30,2	27,2	3,1
Elektroenergia import võrgust, [MWh]	29,95	4,9	43,9	25,1	9,1	73,37
Elektroenergia eksport võrku, [MWh]	71,1	96,5	7,5	12,6	81,9	0,35
<b>Süsteemi kütuse sisend, [MWh]</b>	<b>464,3</b>	<b>661,4</b>	<b>418,4</b>	<b>598,9</b>	<b>697,2</b>	<b>513,6</b>
Elektroenergia impordist tingitud primaarenergia kulu, [MWh]**	63,2	10,3	92,6	52,9	19,2	154,8
Elektroenergia impordist tingitud primaarenergia sääst, [MWh]**	150,1	203,6	15,8	26,6	172,8	0,74
<b>Süsteemi primaarenergia kulu kokku, [MWh]****</b>	<b>377,4</b>	<b>468,1</b>	<b>495,2</b>	<b>625,2</b>	<b>543,6</b>	<b>667,7</b>

\*koostootmis/katlarežiimis simuleerimise tulemused.

\*\*süsteemi imporditud ja eksporditud elektrienergia taandatakse primaarenergiasse Tabel 2.2 käsitletud analoogiaga

\*\*\*süsteemi primaarenergia kulu arvutatakse järgmise meetodiga: süsteemi kütuse sisend - primaarenergia sääst tingitud elektrienergia ekspordist võrku + primaarenergia kulu tingitud elektrienergia impordist võrgust.

Tulemustest selgub, et soojusgraafiku alusel talitleb maksimaalse efektiivsusega gaasi mikroturbiinidega kooslus (stsenaarium 2), omades kütuse sisendit ilma TSV-ta 418,4 MWh ja koos TSV-ga 598,9 MWh. Teise stsenaariumi süsteemi elektrienergia import ja eksport moodustab 43,9/7,5 MWh TSV-ta ja 25,1/12,6 MWh TSV-ga. Arvestades süsteemi elektrienergia vajadusi, talitleb efektiivsemalt gaasimootoriga koostootmisjaama kooslus (stsenaarium 1). Võrreldes teise stsenaariumiga on selle süsteemi elektrienergia impordi ja ekspordi näitajad palju paremad, olles vastavalt 29,95/71,1 MWh TSV-ta ja 4,9/96,5 MWh TSV-ga.

Biomass kütustel põhinevad tehnoloogiad on väiksema paindlikusega. GFE45 minimaalne koormus on tunduvalt suurem süsteemi soojuskoormusest küteperioodi välisel ajal, seega koostootmisjaama talitlemine suvisel ajal eeldab soojusenergia utiliseerimist. GFE45 koostootmisjaama kütuse sisend moodustab 697,2 MWh ja utiliseeritud soojusenergia 23,64 MWh ning süsteemi elektrienergia import ja eksport on võrreldavad esimese stsenaariumiga, olles vastavalt 9,1/81,9 MWh. Puidugraanulitel töötav E-Max tehnoloogia nõuab püsitalitlust nimivõimsusel, töötades ülejäänud ajal katlarežiimis. E-Max koostootmisjaama kütuse sisend on 513,6 MWh ning selle süsteemi elektrienergia import ja eksport 73,37/0,35 MWh, mis on nõrgim näitaja neljast stsenaariumitest.

Süsteemi primaarenergia kulu näitab süsteemi primaarenergia tarbimist, kus arvestatakse mõju Eesti energiasüsteemile. Elektrienergia impordist tingitud energia maht eeldab elektrienergia ostmist võrgust. Võrgust ostetakse elektrienergiat, mis on toodetud Eestis. Eesti elektrienergia toodanguportfell koosneb 76% põlevkivist ja 24% taastuvatest ja muudest energia allikatest. Primaarenergia säästu võib leida lahutades taastuenergia osa kogu toodanguportfelligist, arvestades aasta keskmise kondensatsioonjaamade kasutegurit. Vastavad andmed on käsitletud peatükis 2. Simuleerimise tulemused näitavad, et kõrgeim efektiivsus on saavutatud esimeses stsenaariumis 468,1 MWh koos TSV-ga. Kasutades süsteemi



primaarenergia kulu näitajaid, on võimalik määrata TSV valmistamise ja jaotamise kulud, mis moodustavad vastavalt 90,7 MWh esimeses stsenaariumis ja 130 MWh teises stsenaariumis.

**Tabel 3.7 MS Excel tarkavara stsenaariumite emissioonitegurite üldistav tabel**

Emissioonitegurid	Stsenaarium 1, maagaasil sise põlemismootor		Stsenaarium 2, maagaasil mikro turbiin		Stsenaarium 3, biomassil gaasimootor	Stsenaarium 4, biomassil strirlingumootor
	TSV-ta	TSV-ga	TSV-ta	TSV-ga	TSV-ga	TSV-ga
Süsinikdioksiid, CO <sub>2</sub> [t]*	57,7	53,7	115,6	131,2	-62,9	63,2
Vääveldioksiid, SO <sub>2</sub> [t]*	-0,59	-1,31	0,52	0,18	-1,05	1,05
Lämmastikoksiidid, NO <sub>x</sub> [t]*	0,07	0,07	0,12	0,14	0,25	0,13
Tahm/tuhk, [t]*	-16,8	-37,3	14,8	5,1	-27,9	30,2

\*arvutatud koos elektrienergia impordist ja ekspordist tingitud emissiooniteguritega

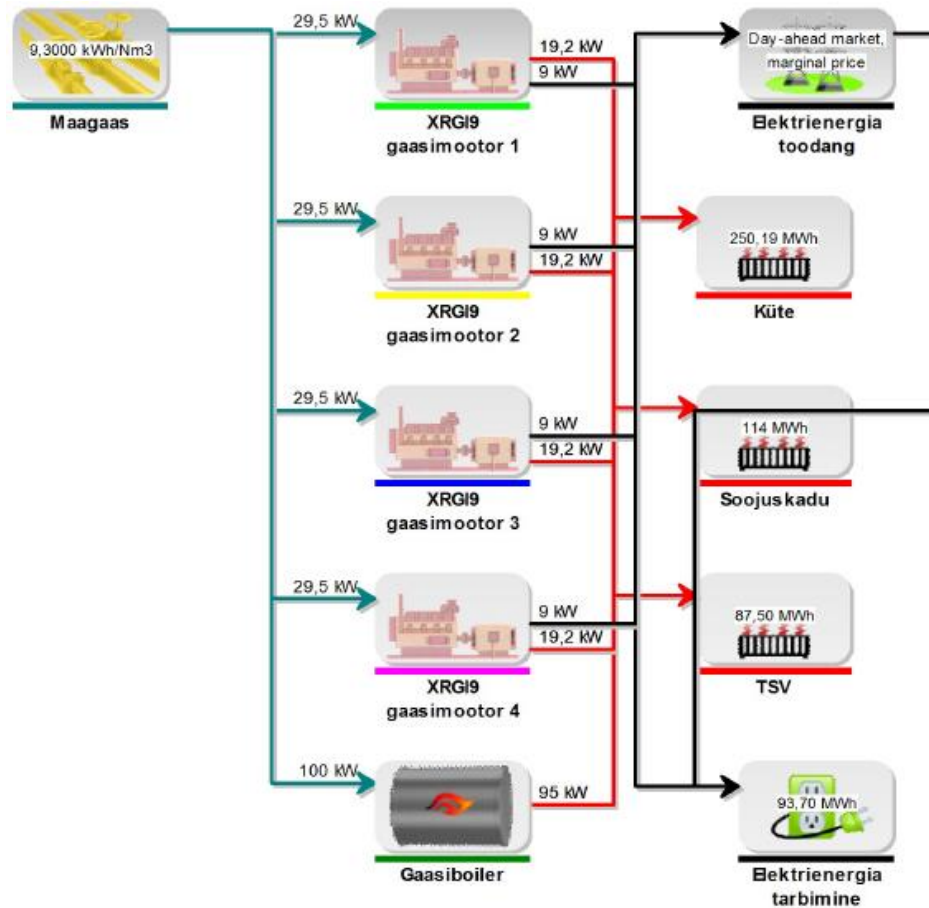
Kõrvutades Tabel 3.7 ja Tabel 2.2 tulemusi võib järeldada, et esimene, kolmas ja neljas stsenaariumid avaldavad positiivset mõju Eesti keskkonnale. Teine stsenaarium on emissioonitegurite suhtes samal tasemel hajatootmise soojuspumpade ja gaasikatelde stsenaariumitega. Suurim CO<sub>2</sub> ja SO<sub>2</sub> sääst on saavutatud kasutades GFE45 tehnoloogiat. Puidugaasil töötav sise põlemismootor on kõiki näitajaid aluseks võttes keskkonnasõbralikum tehnoloogia.

### 3.2 Simuleerimine EnergyPro 4.4 tarkvaraga

EnergyPro on arenenud ning paindlik energia tootmise ja tarbimise modelleerimise tarkvara. Tarkvara töötab oma matemaatilistel algoritmidel, kasutades *online* saadaval olevaid ajafunktsioone (NordPool Spot, GIS, PVGIS, jt.). EnergyPro võimaldab luua integreeritud tootmise ja tarbimise mudeleid, majanduslikke ja keskkonna mudeleid.

### 3.2.1 Stsenaarium 1: gaasimootoriga koostootmiseseade

Stsenaariumis simuleeritakse baastingimustel (vt Tabel 3.1). Mudel talitleb soojusgraafiku alusel. Vastava koostootmisjaama skeemi illustreerib Joonis 3.16.



Joonis 3.16 Stsenaarium 1 skeem

#### Mudeli seadistus:

Mudeli operatsiooni strateegia – soojuskoormus. Koostootmisüksuse koormamine osakoormusel – lubatud. Gaasikatla osakoormus – lubatud.

Iga koostootmisüksus seadistatakse eraldi. Määratakse minimaal- ja nimikoormus, soojus- ja elektrienergia võimsus ning kütuse sisend ja kütuse tüüp. Gaasiboiler on lineaarse koormusega. Mudel jälgib soojusenergia bilansi ja koormab esialgu kõik koostootmisüksused ning seejärel gaasiboileri. Gaasiboilerit koormatakse ka koostootmisüksuse töövälise piirkonna katmiseks, mis on kirjeldatud punktis 3.1.1.

Soojuskoormuse määramiseks seadistatakse muutuvaks temperatuuriks 15 °C ja määratakse vastav asukoht maailmakaardil. Mudel impordib õhutemperatuuri andmed ning teeb soojuskoormuse jaotust aasta lõikes tundide kaupa. Stsenaariumis simuleeritakse soojusenergia tarbimine koos TSV-ga. Kütteperiood kestab oktoobri algus kuni aprilli lõpuni.

Elektrienergia vajadused määratakse kuude kaupa. Toodetud elektrienergiat kasutatakse süsteemis, kuid ülejääv elektrienergia eksporditakse.

Joonis 3.17 sekundeerib Joonis 3.5. Gaasikatelt koormatakse enamasti jaanuaris, kui kõik neli plokki ei võimalda toota vajaliku soojusvõimsust, ning kütteperioodi väliselt, kus kaetakse ploki tööväline piirkond.

### Märkus:

Seoses EnergyPro 4.4 piiratud graafilise osa eksportimise võimalusega, on joonistel legendi osa loetamatu. Seega kasutatav legend on järgmine:

**heleroheline, kollane, sinine, roosa ja akvamariin** – plokkide koormused;

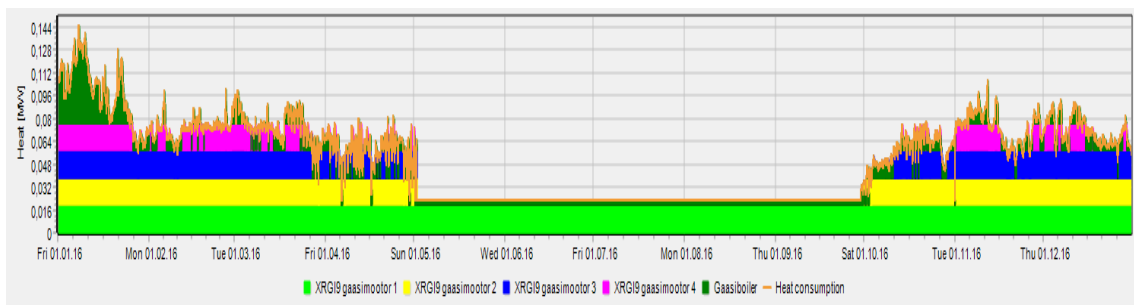
**tumeroheline osa** – katla koormus;

**oranž koverjoon** – elektri- või soojusenergia tarbimine sõltuvalt graafikust;

**aksiial** – tunnid aasta lõikes;

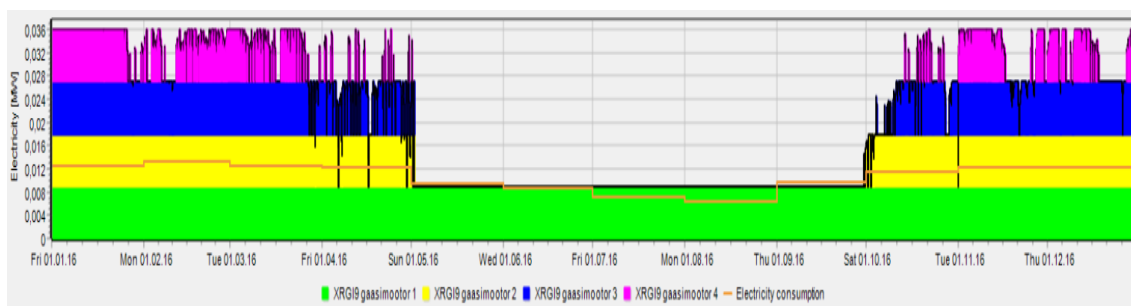
**radiaal** – võimsus, kW.

Täisformaadis EnergyPro tarkvara keskkonnast eksporditud joonised on toodud eraldi A3 formaadis lisana Lisa 6-s.



**Joonis 3.17 Stsenaarium 1 soojuse tarbimine ja tootmine (A3 formaadis Lisa 6 leht 1/4)**

Joonis 3.18 selgub, et süsteemi elektrienergia tootmine ületab süsteemi tarbimist ning seda eriti kütteperioodil, kus koostootmisel on pidevalt 3 - 4 plokki töös.



**Joonis 3.18 Stsenaarium 1 elektrienergia tarbimine ja tootmine (A3 formaadis Lisa 7 leht 1/4)**

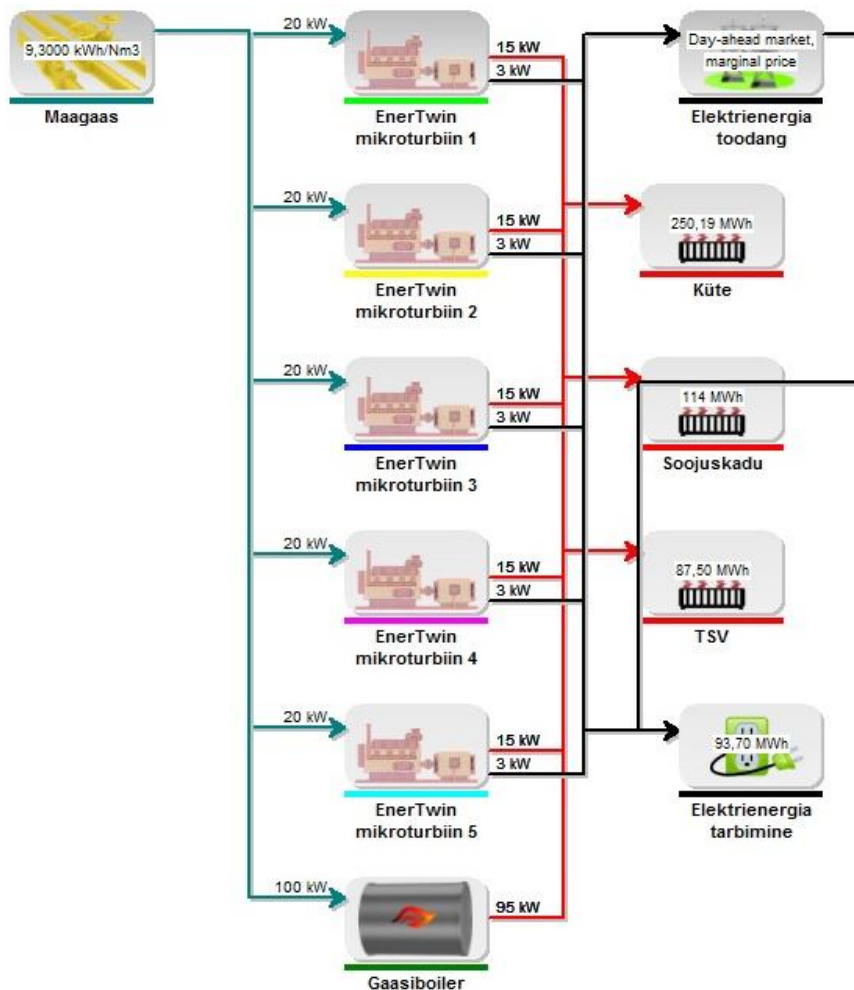
**Tabel 3.8 Stsenaarium 1 EnergyPro tarkvara simuleerimise põhitulemused**

Stsenaarium 1	koos TSV-ga
Koostootmisel toodetud elektrienergia, [kWh]	187800,0
Koostootmisel toodetud soojusenergia, [kWh]	402553,8
Soojuskadu kaugküttevõrgus, [kWh]	114756,0
Katla abil toodetud soojusenergia, [kWh]	49246,2
Kütuse sisend, [kWh]	669400,0

Tabel 3.8 kajastab EnergyPro stsenaarium 1 simuleerimise põhitulemused. Simuleerimise põhjalik aruanne leidub Lisa 3-s.

### 3.2.2 Stsenaarium 2: gaasi mikroturbiiniga koostootmisseade

Stsenaarium simuleeritakse baastingimustel (vt Tabel 3.1). Mudel talitleb soojusgraafiku alusel. Koostootmisjaama skeemi illustreerib Joonis 3.19.



*Joonis 3.19 Stsenaarium 2 skeem*

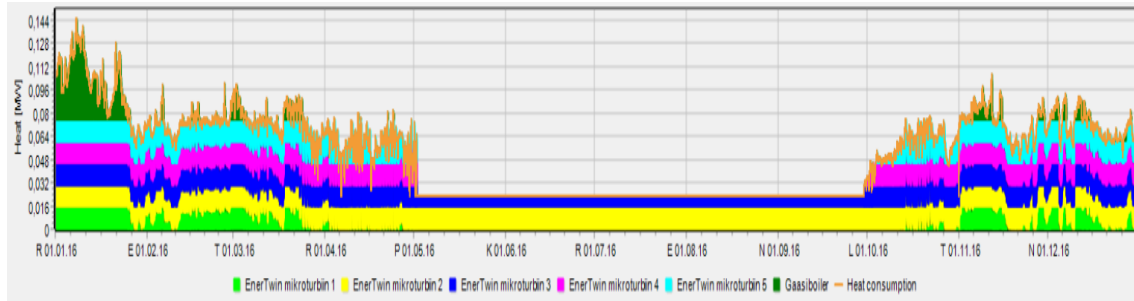
### Mudeli seadistus:

Mudeli operatsiooni strateegia – soojuskoormus. Koostootmisüksuse koormamine osakoormusel – lubatud. Gaasikatla osakoormus – lubatud.

Mikroturbiinidega koostootmisjaama seadistatakse vastavalt punktis 3.1.2 **Error! Reference source not found.** kirjeldatud põhimõtetele. Gaasiboilerit koormatakse koostootmisüksuse töövälise piirkonna katmiseks.

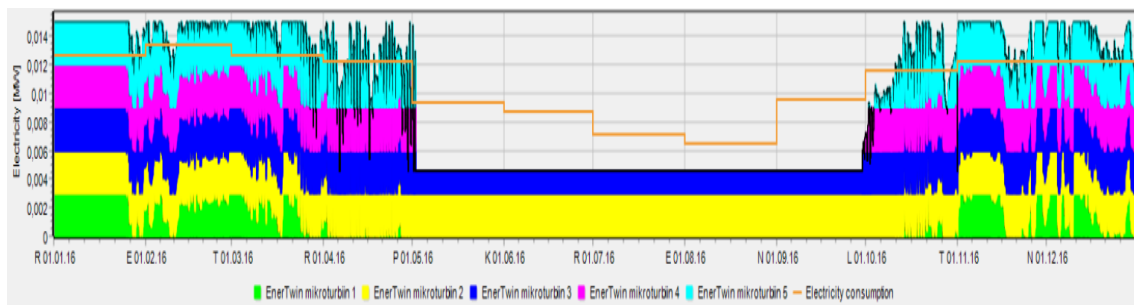
Soojusenergia tarbimine ja jaotamine ning elektrienergia tarbimine toimub analoogselt punktis 3.1.2 kirjeldatud seadistustele.

Joonis 3.20 sekundeerib Joonis 3.10. Gaasikatelt koormatakse enamasti jaanuaris, kui kõik viis plokki ei võimalda toota vajaliku soojusvõimsust. Kütteperioodi väliselt töötavad kaks plokki – üks töötab täiskoormusel ja teine osakoormusel.



**Joonis 3.20 Stsenaarium 2 soojuse tarbimine ja tootmine (A3 formaadis Lisa 6 leht 1/4)**

Joonis 3.21 selgub, et süsteemi elektrienergia tootmine ületab süsteemi tarbimist kütteperioodil. Kütteperioodi väliselt elektrienergiat imporditakse. See on tingitud mikroturbiini tehnoloogia elektrienergia ja soojusenergia tegelikust suhest.



**Joonis 3.21 Stsenaarium 2 elektrienergia tarbimine ja tootmine (A3 formaadis Lisa 6 leht 1/4)**

**Tabel 3.9 Stsenaarium 2 EnergyPro tarkvara simuleerimise põhitulemused**

Stsenaarium 2	koos TSV-ga
Koostootmisel toodetud elektrienergia, [kWh]	85200,0
Koostootmisel toodetud soojusenergia, [kWh]	426047,4
Soojuskadu kaugküttevõrgus, [kWh]	114756,0
Katla abil toodetud soojusenergia, [kWh]	25752,6
Kütuse sisend, [kWh]	595100,0

Tabel 3.9 kajastub EnergyPro stsenaarium 2 simuleerimise põhitulemused. Simuleerimise põhjalik aruanne leidub Lisa 4-s.

### 3.2.3 Stsenaarium 3 ja 4: biomassi koostootmistehnoloogiad

Stsenaariumeid 3 ja 4 ei võimalda EnergyPro simuleerida määratud tingimustega. Stsenaariumis 3 talitleb GFE45 seade küteperioodi väliselt oma minimaalkoormusel  $P_Q = 30$  kW, seega vajalik on 23,8 kW. Tarkvara ei võimalda seadistada osa toodetud soojusenergia utiliseerimiseks kasutamist. Tulemuseks lülitatakse koostootmisüksus välja ning küteperioodi väliselt talitleb ainult katel.

Stsenaariumis 4 ei võimalda tarkvara seadistada koostootmisüksust E-Max nii, et nimivõimsusel koostootmisüksus talitleks koostootmisrežiimis ning muudel tingimustel katlarežiimis.

Nende piirangute tõttu pole võimalik korrektselt võrrelda saadud simuleerimise tulemusei MS Excel'i keskkonnas koostatud mudeliga. Selle asemel võrreldakse stsenaariumite 1 ja 2 MS Excel'i ja EnergyPro simuleerimise tulemusi.

### 3.2.4 MS Excel'i ja EnergyPro simuleerimise tulemuste võrdlus

MS Excel'i ja EnergyPro simuleerimise tulemused üldistab Tabel 3.10.

**Tabel 3.10 MS Excel ja EnergyPro simuleerimise tulemused**

	MS Excel'i mudel		EnergyPro mudel	
	Stsenaarium 1	Stsenaarium 2	Stsenaarium 1	Stsenaarium 2
Koostootmisel toodetud elektrienergia, [kWh]	185416,2	81388,16	187800,0	85200,0
Koostootmisel toodetud soojusenergia, [kWh]	395498,20	416111,9	402553,8	426047,4
Katla abil toodetud soojusenergia, [kWh]	50835,85	30222,18	49246,2	25752,6
Katla tööaeg kokku, [tund]	7177	2135	7074	1758
Kütuse sisend, [kWh]	661393,90	598891,2	669400,0	595100,0
Plokkide tööaeg kokku, [tund]	20923	24796	21279	26713

Tabel 3.10 alusel võib järeldada, et stsenaariumi 1 koostootmisel toodetud elektrienergia maht erineb 2,4 MWh võrra (1,2%) ja stsenaariumi 2 3,8 MWh võrra (4,4%). Koostootmisel toodetud soojusenergia maht erineb stsenaariumis 1 7,1 MWh võrra (1,7%) ja stsenaariumis 2 9,9 MWh võrra (2,3%). Simuleerimise tulemustest selgub, et EnergyPro mudel koormab katlaid vähem kui MS Excel'i mudel. Seda kinnitab ka plokkide tööaeg - EnergyPro mudelis on plokkide tööaeg suurem võrreldes MS Excel'i mudeliga. Kütuse sisend on EnergyPro stsenaariumis 1 suurem 8 MWh võrra (1,1%) ja stsenaariumis 2 on 3,8 MWh võrra väiksem (0,6%). Samas EnergyPro soojuse tarbimine on suurem 5 MWh võrra (2%).

Saadud EnergyPro simuleerimise tulemuste alusel võib järeldada, et käesoleva töö autori poolt koostatud mudel MS Excel'i tarkvara keskkonnas väljastab korrektseid tulemusi koostootmisjaamade talitlustest, seega matemaatilise mudeli koostamisel, mida käsitletakse peatükis 4, võib tugineda saadud tulemustele. Erinevused kahe mudeli vahel on suure tõenäosusega tingitud soojuse tarbimise erinevusest ning erinevatest matemaatilistest algoritmistest.

### **3.2.5 Soojatarve planeerimisel kasutatavad soojasalvestid**

Piirkonna soojatarve planeerimisel leidub võimalusi soojasalvestite kasutamiseks. Soojasalvestite kasutamine annab võimalust optimeerida koostootmisüksuste talitlust. Koostootmisüksused talitlevad oma nimivõimsusel maksimaalse kasuteguriga, kogudes soojusenergiat soojasalvestisse. Kogutud soojusenergia mõjutab katla töörežiimile. Soojuskoormuse tipud kaetakse kogutud soojusenergia arvelt. Selle tulemusena koostootmisüksused koormatakse rohkem koostootmisrežiimis. Soojasalvestite tagajärjeks on soojuskadu.

Mudeli operatsiooni strateegia – soojuskoormus. Koostootmisüksuse koormamine osakoormusel – lubatud. Gaasikatla osakoormus – lubatud. Koostootmisüksuse tootmine soojasalvestisse – lubatud. Katla tootmine soojasalvestisse – ei ole lubatud.

Soojasalvestite mõju koostootmisjaama talitlusele simuleeritakse EnergyPro tarkvara abil. Tarkvara sees on integreeritud algoritmid soojasalvestite modeleerimiseks. Tarkvara

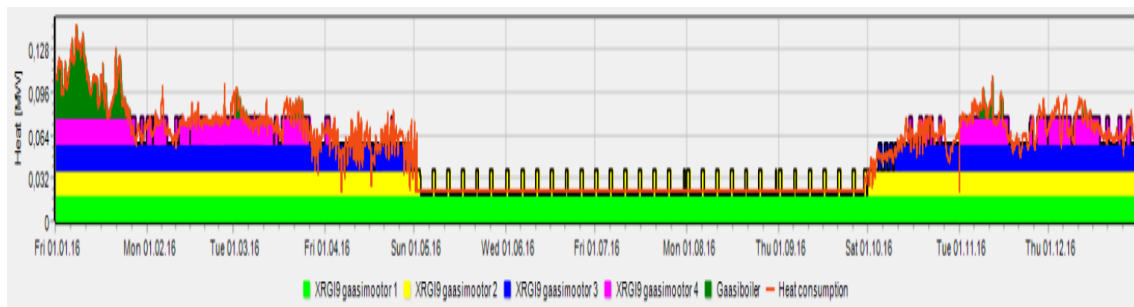


arvestatab inertsiga ja soojuskadudega. Simuleeritakse stsenaariumid 1 ja 2. Soojasalvesti tehnilised parameetrid on kirjeldatud Tabel 3.11.

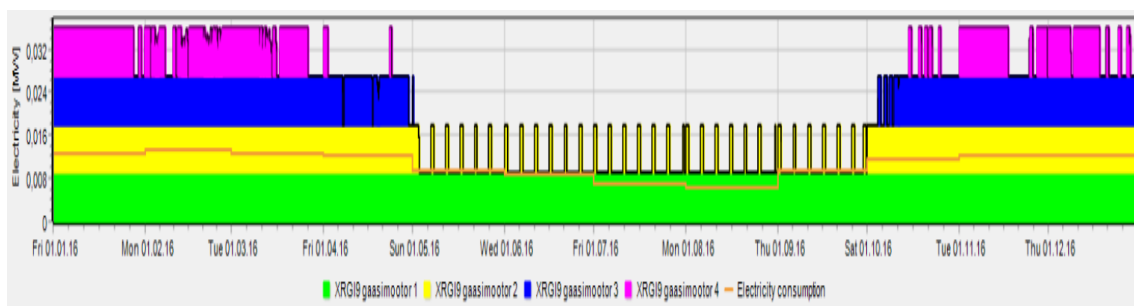
**Tabel 3.11 Soojasalvesti tehnilised parameetrid**

Parameeter	
Maht, [m <sup>3</sup> ]	10,0
Ülemine temperatuur, [°C]	90
Alumine temperatuur, [°C]	50
Muutuv temperatuur, [°C]	20
Soojasalvesti kõrgus, [m]	3,1
Isolatsiooni paksus, [mm]	300
Isolatsiooni soojusjuhtivus $\lambda$ , [W/(m°)]	0,037

Stsenaarium 1 soojasalvestiga soojuskoormuse graafikut illustreerib Joonis 3.22, elektrienergia tarbimist ja tootmist Joonis 3.23 ja soojasalvesti talitlust Joonis 3.24.



**Joonis 3.22 Stsenaarium 1 soojasalvestiga soojuskoormuse graafik (A3 formaadis Lisa 6 leht 2/4)**



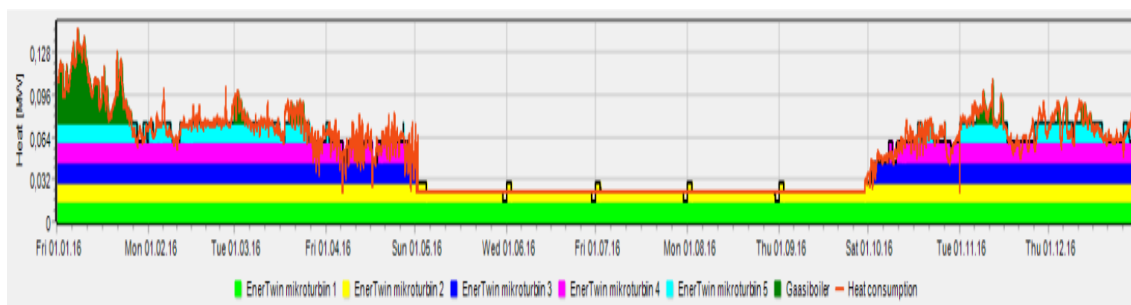
**Joonis 3.23 Stsenaarium 1 soojasalvestiga elektrienergia tootmine ja tarbimine (A3 formaadis Lisa 6 leht 2/4)**



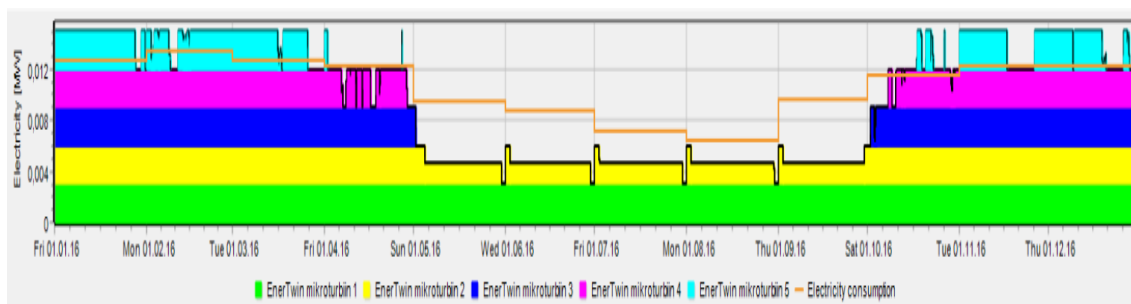
***Joonis 3.24 Stsenaarium 1 soojasalvesti talitus (A3 formaadis Lisa 6 leht 2/4)***

Ülaloodud joonistest selgub, et katelt koormatakse peamiselt jaanuaris, kui kogu nelja koostootmisüksuse soojusvõimsus osutub ebapiisavaks. Ülejäänud ajaperioodil soojusevajadus kaetakse põhiliselt soojasalvesti kasutamise arvelt ning seda eriti küteperioodi välisel ajaperioodil. Joonis 3.24 näitab, millistes perioodides kasutatakse katla võimsust. Mida pikem joon asub x-teljel, seda kauem katelt koormatakse.

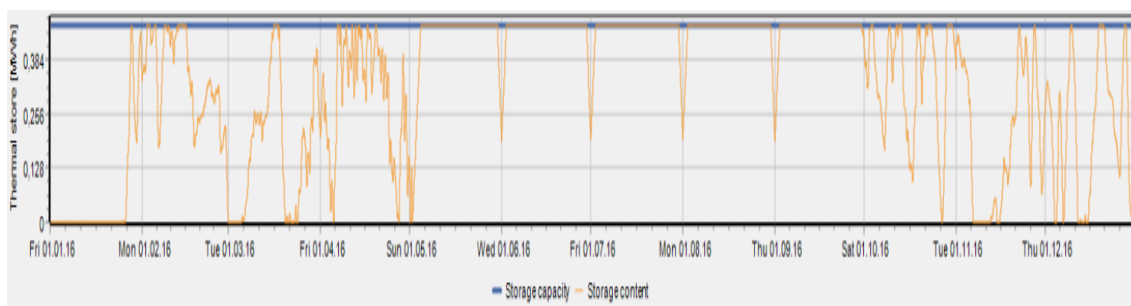
Stsenaarium 2 soojasalvestiga soojuskoormuse graafikut illustreerib Joonis 3.25, elektrienergia tarbimist ja tootmist Joonis 3.26 ja soojasalvesti talitlust Joonis 3.27.



***Joonis 3.25 Stsenaarium 2 soojasalvestiga soojuskoormuse graafik (A3 formaadis Lisa 6 leht 3/4)***



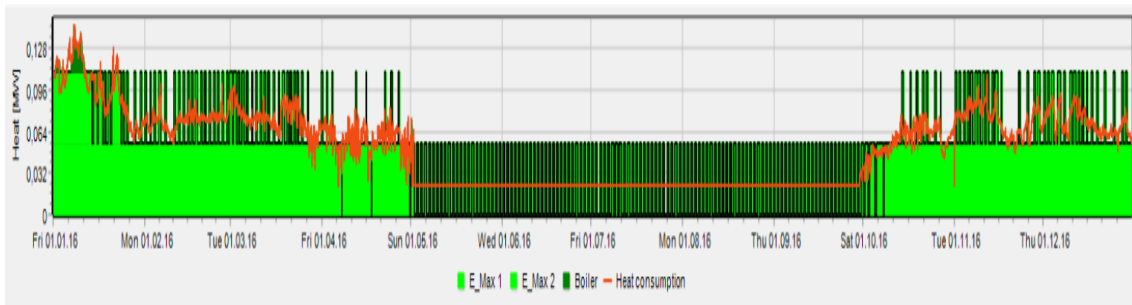
**Joonis 3.26 Stsenaarium 2 soojasalvestiga elektrienergia tootmine ja tarbimine (A3 formaadis Lisa 6 leht 3/4)**



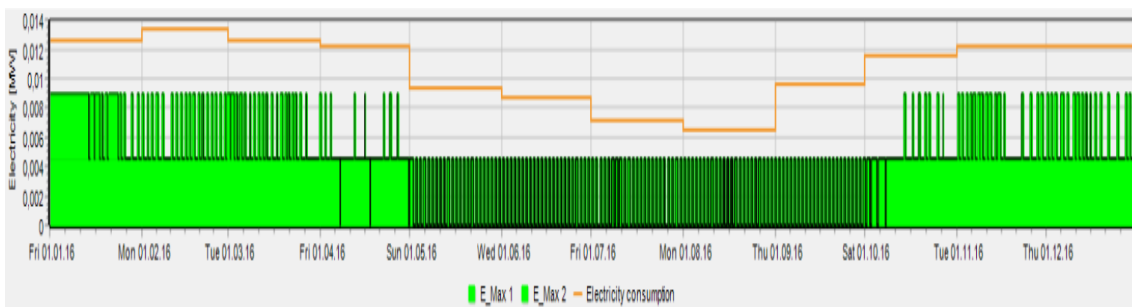
**Joonis 3.27 Stsenaarium 2 soojasalvesti talitus (A3 formaadis Lisa 6 leht 3/4)**

Ülaltoodud joonistest selgub, et stsenaariumis 2 esineb erinevusi võrreldes esimese stsenaariumiga. Need erinevused on tingitud mikro turbiinide ning koostootmisjaama koosluse paindlikusest. Soojasalvestit kasutatakse vähem ja turbiinide koormusrežiimid võimaldavad talitleda nõutud võimsuse väljundiga.

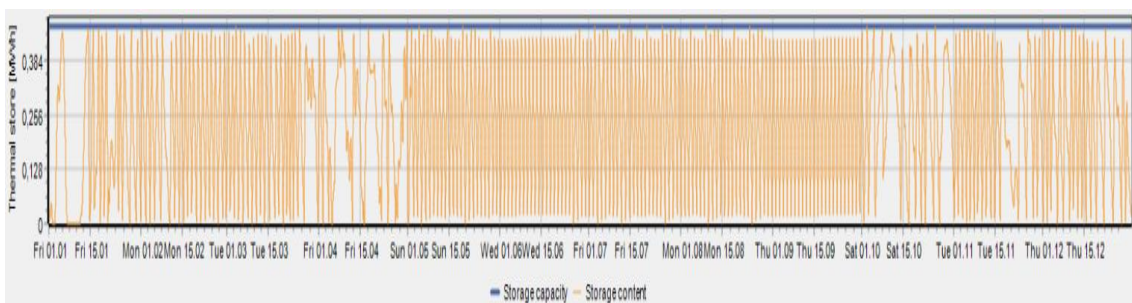
Stsenaarium 4 soojasalvestiga soojuskoormuse graafikut illustreerib Joonis 3.28, elektrienergia tarbimist ja tootmist Joonis 3.29 ja soojasalvesti talitlust Joonis 3.30.



**Joonis 3.28 Stsenaarium 4 soojasalvestiga soojuskoormuse graafik (A3 formaadis Lisa 6 leht 4/4)**



**Joonis 3.29 Stsenaarium 4 soojasalvestiga elektrienergia tootmine ja tarbimine graafik (A3 formaadis Lisa 6 leht 4/4)**



**Joonis 3.30 Stsenaarium 4 soojasalvesti talitus graafik (A3 formaadis Lisa 6 leht 4/4)**

Ülaltoodud joonistest selgub, et katelt koormatakse ainult jaanuaris, kui kahe koostootmisüksuse soojusvõimsus osutub ebapiisavaks. Ülejäänud ajaperioodil soojusevajadus kaetakse soojasalvesti kasutamise arvelt ning seda eriti küteperioodi välisel ajaperioodil.

Stsenaariumite 1, 2 ja 4 simuleerimise tulemused koos soojasalvestiga illustreerib Tabel 3.12.

**Tabel 3.12 EnergyPro simuleerimise tulemused koos ja ilma soojasalvestiga**

	EnergyPro mudel					
	Stsenaarium 1 ilma soojasalvestita	Stsenaarium 1 koos soojasalvestiga	Stsenaarium 2 ilma soojasalvestita	Stsenaarium 2 koos soojasalvestiga	Stsenaarium 4 ilma soojasalvestita*	Stsenaarium 4 koos soojasalvestiga
Koostootmisel toodetud elektrienergia, [kWh]	187800,0	203300,0	85200,0	85300,0	20452,50	36900,0
Koostootmisel toodetud soojusenergia, [kWh]	402553,8	453200,0	426047,4	426500,0	249920,0	451000,0
Katla abil toodetud soojusenergia, [kWh]	49246,2	19200,0	25752,6	26100,0	196642,6	2000,0
Katla tööaeg kokku, [tund]	7074	973	1758	1771	8760	196
Kütuse sisend, [kWh]	669400,0	686800,0	595100,0	596100,0	513601,7	535100,0
Plokkide tööaeg kokku, [tund]	21279	22661	26713	26717	4544	8200
Soojasalvesti soojuskadu, [kWh·a]	0	1400	0	700	0	1200

\*MS Excel'i simuleerimise tulemused

**Järeldused:**

Soojasalvestite simuleerimise tulemuste alusel võib väita, et mikroturbiini stsenaariumis on soojasalvestite kasutamine ebaefektiivne. Mikroturbiinid on paindliku koormus karakteristikuga. Nendest on moodustatud 5-plokkiline kooslus, mis ei nõua soojasalvesti olemasolu oma talitluse efektiivsemaks muutmiseks. Soojasalvesti talitluse alusel, mida illustreerivad Joonis 3.24, Joonis 3.27 ja Joonis 3.30, võib järeldada, et kõige efektiivsemalt soojasalvestit kasutatakse neljandas stsenaariumis.

Gaasimootori stsenaariumis on koostootmisjaama efektiivsus tõusnud 95%-st 98%-ni, kaasarnatud soojuskadu soojasalvestite kasutamisest. Katla tööaeg on langenud 86% võrra 7074 tunnilt 973 tunnini, st energia tootmine toimub rohkem koostootmisrežiimis. Plokkide tööaeg on tõusnud 1382 tunni võrra. Elektrienergia toodang on kasvanud 15,5 MWh võrra.

Neljandas stsenaariumis on jaama efektiivsus tõusnud 90,9%-st 91,6%-ni. Katla tööaeg on langenud 97,8 %. Siin tuleb arvestada, et E-Max nimikoormuse välisel talitlusel elektrienergia toodang puudub ehk koostootmisüksus talitleb katlarežiimis. Elektrienergia toodang on kasvanud 16,5 MWh võrra.

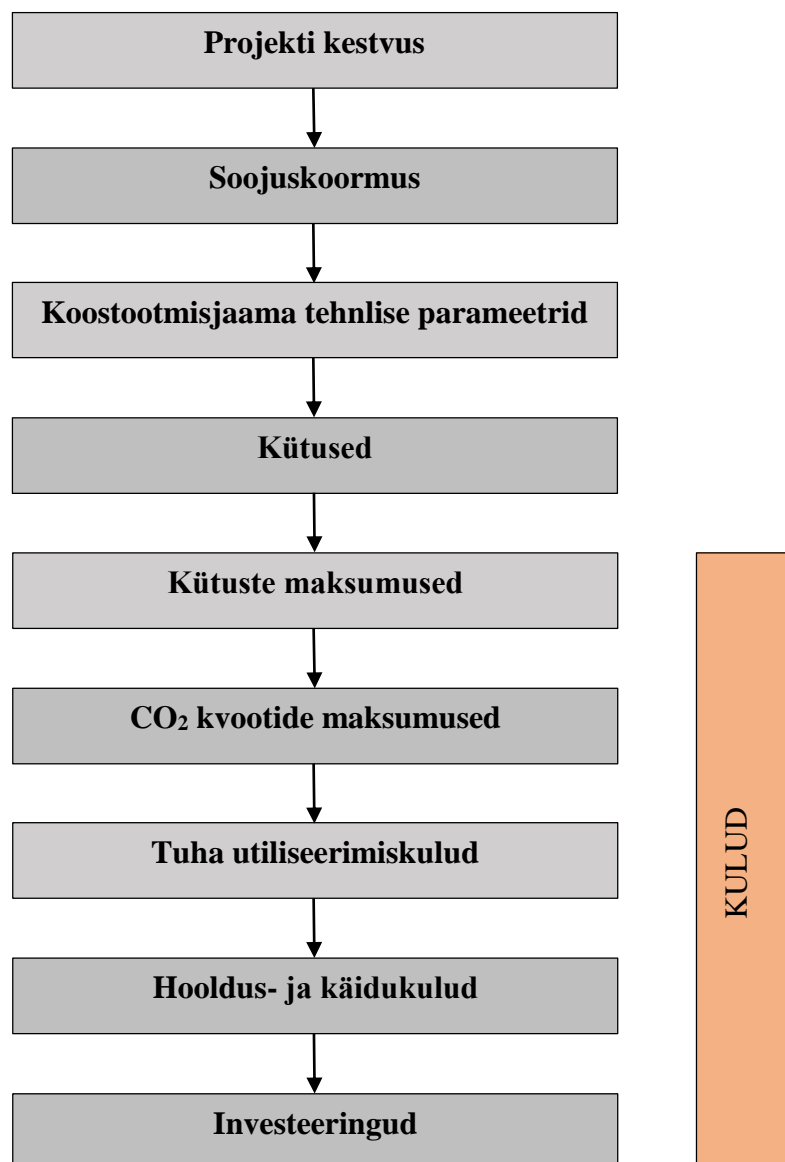
Kokkuvõtvalt võib väita, et kui kasutada antud baastingimustel XRG19 gaasimootorit või E-Max biomassil töötava strilingumootori tehnoloogiat, muutub soojasalvesti olemasolu koostootmisjaama talitlust efektiivsemaks, seda eriti E-Max tehnoloogial puhul.

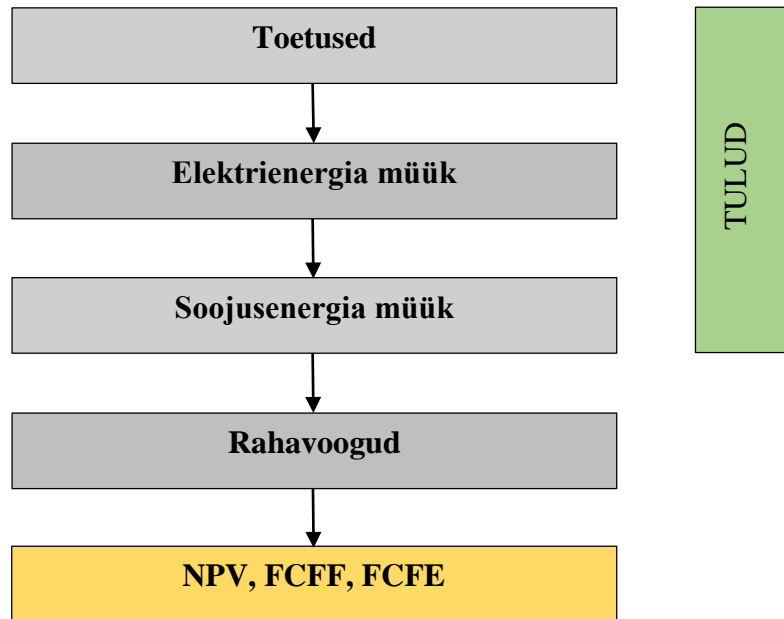
## 4. Matemaatiline mudel

Peatükis 4 koostatakse matemaatiline mudel peatükis 3 loodud lihtsustatud kontseptuaalse mudeli alusel. Matemaatilise mudeli sisendid on peatükis 3 saadud stsenaariumite simuleerimise tulemused. Matemaatilise mudeli väljundid annavad hinnangu koostootmisjaama efektiivsusele ja investeeringute otstarbekusele.

### 4.1 Etapid

Matemaatilise mudeli etapid on tehtud kirjanduses leitava analoogiaga. [18]





#### 4.1.1 Projekti kestvus

Projekti kestvus on oluline majanduslike näitajate NPV ja IRR määramiseks. Projekti kestvust tuleb arvesse võtta ka seadmete eluea määramisel. Käesolevas töös valitakse projekti kestvuseks 15 aastat. See on sobiv ajaperiood nii hajatehnoloogiatele kui ka koostootmistehnoloogiatele, st 15 aastat ei ületa ühegi tehnoloogia eluiga. Projekti algusaastaks on 2018.

$$T_{kestvus} = \sum_{n=1}^{15} (T_n + \dots + T_{n+14})$$

(5.1)

kus  $T_{kestvus}$  – projekti kestvus aeg aastates;

$T_n$  – aasta järjestikunumber;

$n$  – projekti toimimise aasta.

#### 4.1.2 Jaani 2 piirkonna soojuskoormus

Soojuskoormus on aluseks koostootmisjaama talitlusele ning avaldavad mõju kliimatingimused.



Uusehitiste puhul eeldatakse, et soojusenergia tarbimise harjumused on konstantne iseloomuga terve projekti kestvuse vältel, kuid omavad sõltuvust ilmastikust.

Aasta keskmist õhutemperatuuri funktsiooni *trendline* demonstreeb 0,5% kasvutrendi. Sellele sekundeerib kraadpäevade arvu funktsioon, mis on langus trendis 0,46%. Seega matemaatilises mudelis kasutatakse soojuskoormuse prognoosiks 0,5% langust, mis on kliimast tingitud.

$$P_{Q,T} = \sum_{n=1}^{15} (P_{Q,n} * (1 + i)^n)$$

(5.2)

kus  $P_{Q,T}$  – soojusenergia vajadus projekti kestvuse ajal MWh;

$i$  – prongoositud soojuskoormuse langus %.

#### 4.1.3 Koostootmisjaama tehnilised parameetrid

Koostootmistehnoloogiate tehnilisi parameetreid iseloomustab Tabel 4.1.

,kus

$F_i$  – kütuse sisend kW;

$P_h$  – soojusvõimsus kW;

$P_{el}$  – elektriline võimsus kW;

*n.a* – andmed puuduvad.

**Tabel 4.1 Koostootmistehnoloogiate tehnilised parameetrid**

Koormus, [%]	XRG19			EnerTwin			GFE45			E-Max		
	$F_i$ , [kW]	$P_h$ , [kW]	$P_{el}$ , [kW]	$F_i$ , [kW]	$P_h$ , [kW]	$P_{el}$ , [kW]	$F_i$ , [kW]	$P_h$ , [kW]	$P_{el}$ , [kW]	$F_i$ , [kW]	$P_h$ , [kW]	$P_{el}$ , [kW]
100	29,5	19,2	9	19,9	15	3	150	98	40	65	55	4,5
80	n.a	n.a	n.a	15,92	11,1	2,25	120	77	29	n.a	n.a	n.a

75	23,2	15,4	6,8	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a
60	n.a	n.a	n.a	11,94	8,1	1,5	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a
50	17,3	12	4,5	n.a	n.a	n.a	75	46	18	n.a	n.a	n.a
45	n.a	n.a	n.a	8,97	6	1	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a
30	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	50	30	10,5	n.a	n.a	n.a

#### 4.1.4 Kütused

Energia tootmiseks kasutatavate kütuste tehnilisi parameetreid iseloomustab Tabel 4.2.

**Tabel 4.2 Kütuste tehnilised parameetrid**

	Maagaas, [Nm]	Puiduhake, [Nm]	Puidugranuulid, [t]
Kütteväärtus, [MWh/Nm]; [MWh/t]*	0,0093	0,8	4,6
Tahmisisaldus, [kg/MWh]	0	1,93	0,91
CO <sub>2</sub> , [t/MWh]	0,201	0	0
SO <sub>2</sub> , [t/MWh]	0	0	0
NO <sub>x</sub> , [t/MWh]	0,00022	0,00036	0,00043

\*kütteväärtused on võetud Majandus- ja kommunikatsiooniministri 8. oktoobri 2012. a määrusest nr 63 „Hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika” Lisa 4

#### 4.1.5 Kütuste maksumused

Eesti Statistikaameti andmebaasile tuginedes olid Eestis aastatel 2010 - 2015 maagaasi hinnad keskmiselt iga aastase kasvutrendiga 3,5%, puiduhakke hinnad olid langustrendis -3,4% ja puidugranuulite hinnad kasvutrendis 1,4%.

Kütuste hindasid ja kasvutrende iseloomustab alljärgnev Tabel 4.3. 15 aastase kasvutrendide määramiseks arvestati maailma energiapoliitika arengusuundi ja trende.

**Tabel 4.3 Kütuste hinnad ja kasvutrendid**

Kütus	Kütuse maksumus projekti algus aastal T <sub>2018</sub> , eur/MWh*	Kasvutrend <i>i</i> , %
Maagaas	48,5	1,5

Puiduhakmed	13,5	0
Puidugranuulid	27,2	1,4

\*toodud hinnad ei sisalda käibemaksu

Kütuse hinnad projekti perioodiks avalduvad:

$$F_{hind.maagaas,T} = \sum_{n=1}^{15} (F_{hind.maagaas,n} * (1 + i)^n) \quad (5.3)$$

$$F_{hind.puiduhakmed,T} = \sum_{n=1}^{15} (F_{hind.puiduhakmed,n} * (1 + i)^n) \quad (5.4)$$

$$F_{hind.puidugranuulid,T} = \sum_{n=1}^{15} (F_{hind.puidugranuulid,n} * (1 + i)^n) \quad (5.5)$$

kus  $F_{hind,T}$  – kütuse maksumus projekti kestvuse ajal eurodes;

$i$  – prongoositud kütuste maksumuse kasvtrend %.

#### 4.1.6 CO<sub>2</sub> kvootide maksumused

Biomassil töötavad tehnoloogiad loetakse CO<sub>2</sub> neutraalseks, st biomass kasutab kasvamisel põlemisel eraldunud süsinikdioksiidi. Maagaasi põletamisel eralduvat CO<sub>2</sub> kirjeldab Tabel 4.2.

CO<sub>2</sub> kvootide maksumus avaldub:

$$CO2_{maksumus.T} = \sum_{n=1}^{15} [(F_{i,n} \cdot F_{co2} \cdot CO2_n^{kvoodi.maksumus}) + (F_{i,n+1} \cdot F_{co2} \cdot CO2_{n+1}^{kvoodi.maksumus}) + \dots + (F_{i,n+14} \cdot F_{co2} \cdot CO2_{n+14}^{kvoodi.maksumus})] \quad (5.6)$$

kus  $CO2_{maksumus.T}$  – kvootide maksumus projekti perioodi kohta eurodes;

$F_{i,n}$  – kütuse sisend aastal  $n$  MWh;

$F_{co2}$  – CO<sub>2</sub> eraldumine põletamisel t/MWh;

$CO2_n^{kvoodi.maksumus}$  – CO2 kvoodi maksumus aastal  $n$  euro/t.

#### 4.1.7 Tuha utiliseerimiskulu

Tuhka eraldub biomassi põletamisel ning selle kogust kirjeldab Tabel 4.2.

Tuha utiliseerimiskulu avaldub:

$$Tuhk_{maksumus.T} = \sum_{n=1}^{15} [(F_{i,n} \cdot F_{tuhk} \cdot tuhk_n^{utiliseerimis.maksumus}) + (F_{i,n+1} \cdot F_{tuhk} \cdot tuhk_{n+1}^{utiliseerimis.maksumus}) + \dots + (F_{i,n+14} \cdot F_{tuhk} \cdot tuhk_{n+14}^{utiliseerimis.maksumus})] \quad (5.7)$$

kus  $Tuhk_{maksumus.T}$  – tuhka utiliseerimise maksumus projekti perioodi kohta eurodes;

$F_{i,n}$  – kütuse sisend aastal  $n$  MWh;

$F_{tuhk}$  – tuha eraldumine põletamisel kg/MWh;

$tuhk_n^{utiliseerimiskulus}$  – tuhka utiliseerimise maksumus aastal  $n$  euro/t.

#### 4.1.8 Hooldus- ja käidukulud

Hooldus- ja käidukulud arvutatakse ploki töötundide põhisel. Eeldatakse, et plokke koormatakse ühtlaselt. Perioodiks on projekti kestvus ehk 15 aastat. Hoolduskulud on koostatud tootjate poolt kogutud andmete alusel ning neid illustreerib Tabel 4.4.

**Tabel 4.4 Tehnoloogiate hooldus- ja käidukulud**

Tehnoloogia	Hooldusmaksumus, eur/töötund
XRGI9	0,15
EnerTwin	0,07
GFE45	1,55
E-Max	0,04

Hoolduse maksumus avaldub:

$$Hooldus_{maksumus.T} = \sum_{n=1}^{15} [(t_n \cdot Hind_{hooldus.n}) + (t_{n+1} \cdot Hind_{hooldus.n+1}) + \dots + (t_{n+14} \cdot Hind_{hooldus.n+14})] \quad (5.8)$$

kus  $Hooldus_{maksumus.T}$  – hoolduse maksumus projekti perioodi kohta eurodes;

$t_n$  – töötunde aastal  $n$  tund;

$Hind_{hooldus.n}$  – hoolduse maksumus aastal  $n$  euro/töötund;

#### 4.1.9 Investeeringute maksumus

Projektis eeldatakse, et investeeringud tehakse ilma omafinantseeringuta. Kogu investeeringu jaoks võetakse laen, mida makstakse tagasi annuiteediga.

Aastased laenu tagasimaksed avalduvad:

$$Makse_n = \frac{Laen \cdot Laen_{intress}}{1 - (1 + Laen_{intress})^{(-Laen_T)}} \quad (5.9)$$

kus  $Makse_n$  – laenu aastane tagasimakse annuiteediga eurodes;

$Laen$  – laenu summa eurdeso;

$Laen_{intress}$  – laenu intress %;

$Laen_T$  – laenu period aastad;

Kogu investeeringute maksumus avaldub:

$$Makse_T = \sum_{n=1}^{15} (Makse_n + Makse_{n+1} + \dots + Makse_{n+14}) \quad (5.10)$$

kus  $Makse_T$  – investeeringute maksumus eurodes.

#### 4.1.10 Toetused

Koostootmise toetuseks on seadusandluses välja töötatud algoritmid. Toetuse saamiseks peab koostootmisjaam vastama tõhuse koostootmise nõuetele. Koostootmine loetakse tõhusaks, kui

aruandluse perioodi (12 kuud) üldkasutegur on vähemalt 75% ja primaarenergia sääst on vähemalt 10%. [19] Primaarenergia sääst avaldub valemiga:

$$PES = \left\{ 1 - \frac{1}{\frac{CHP_{H\eta}}{REF_{H\eta}} + \frac{CHP_{E\eta}}{REF_{E\eta}}} \right\} \cdot 100\% \quad (5.11)$$

kus  $PES$  – primaarenergia sääst

$CHP_{H\eta}$  – kasuliku soojuse kasutegur – viimase 12 kuu kasuliku soojuse toodang jagatud kütuseenergiaga, mis kulus kasuliku soojuse ja elektri koostootmiseks

$REF_{H\eta}$  – soojuse eraldi tootmise viiteväärtus

$CHP_{E\eta}$  – koostoodetud elektrienergia kasutegur – koostoodetud elektrienergia viimase 12 kuu kogus jagatud kütuseenergiaga, mis kulus kasuliku soojuse ja elektri koostootmiseks

$REF_{E\eta}$  – elektrienergia eraldi tootmise viiteväärtus

Kui  $PES > 10\%$ , siis väljastatakse toetus iga koostoodetud elektrienergia MWh eest tariifide alusel:

$Tariif_1 = 32,0$  euro/MWh<sub>el</sub>, kui sisend kütus on maagaas;

$Tariif_2 = 53,7$  euro/MWh<sub>el</sub>, kui sisend kütus on biomass;

Toetussumma perioodi jooksul avaldub:

$$Toetus_{T.maagaas} = \sum_{n=1}^{15} [(W_{el.n} \cdot Tariif_1) + (W_{el.n+1} \cdot Tariif_1) + \dots + (W_{el.n+14} \cdot Tariif_1)] \quad (5.12)$$

$$Toetus_{T.biomass} = \sum_{n=1}^{15} [(W_{el.n} \cdot Tariif_2) + (W_{el.n+1} \cdot Tariif_2) + \dots + (W_{el.n+14} \cdot Tariif_2)] \quad (5.13)$$

kus  $Toetus_{T.maagaas}$  – saadud toetus projekti perioodi kohta, kui sisend kütus on maagaas eurodes;

$Toetus_{T.biomass}$  – saadud toetus projekti perioodi kohta, kui sisend kütus on biomass eurodes;

$W_{el.n}$  – koostoodetud elektrienergia n perioodi jooksul MWh.

#### 4.1.11 Elektrienergia müük

Koostoodetud elektrienergia arvelt säästetakse kulusid elektrienergiale ning ülejääk müüakse võrku. Siinkohal on sääst samaväärne tuluga.

Elektrienergia müük avaldub:

$$Tulud_{el.T} = \sum_{n=1}^{15} [(W_{el.eksport.n} \cdot Hind_{el.n}) + (W_{el.eksport.n+1} \cdot Hind_{el.n+1}) + \dots + (W_{el.eksport.n+14} \cdot Hind_{el.n+14})] \quad (5.14)$$

kus  $Tulud_{el.T}$  – tulud elektrienergia müügist võrku projekti perioodil eurodes;

$W_{el.eksport.n}$  – eksporditud elektrienergia n perioodi jooksul MWh;

$Hind_{el.n}$  – elektrienergia turuhind n perioodil euro/MWh;

Süsteemi sääst koostoodetud elektrienergia arvelt avaldub järgmiselt:

$$Sääst_{el.T} = \sum_{n=1}^{15} [(W_{el.tarbitud.n} \cdot Hind_{el.n}) + (W_{el.tarbitud.n+1} \cdot Hind_{el.n+1}) + \dots + (W_{el.tarbitud.n+14} \cdot Hind_{el.n+14})] \quad (5.15)$$

kus  $Sääst_{el.T}$  – tulud elektrienergia müügist võrku projekti perioodil eurodes;

$W_{el.tarbitud.n}$  – tarbitud elektrienergia n perioodi jooksul MWh;

$Hind_{el.n}$  – elektrienergia turuhind n perioodil euro/MWh.

#### 4.1.12 Soojusenergia müük

Koostoodetud soojusenergia müüakse oma süsteemi võrku.

Soojusenergia müük avaldub valemiga:

$$Tulud_{h.T} = \sum_{n=1}^{15} [(Q_{h.n} \cdot Hind_{h..n}) + (Q_{h.n+1} \cdot Hind_{h..n+1}) + \dots + (Q_{h.n+14} \cdot Hind_{h..n+14})] \quad (5.16)$$

kus  $Tulud_{h.T}$  – tulud soojusenergia müügist võrku projekti perioodi kohta eurodes;

$Q_{h.n}$  – müüdud soojusenergia n perioodi jooksul MWh;

$Hind_{h.n}$  – soojusenergia hind n perioodil euro/MWh.

#### 4.1.13 Rahavood

Vabade rahavoogude nüüdispuhasväärtus FCFF avaldub:

$$FCFF_T = Tulud_{el.T} + Sääst_{el.T} + Tulud_{h.T} + Toetus_T - (F_{hind.T} + CO2_{maksumus.T} + Tuhk_{maksumus.T} + Hooldus_{maksumus.T}) \quad (5.17)$$

Vabade rahavoogude väärtus FCFE avaldub:

$$FCFE_T = Tulud_{el.T} + Sääst_{el.T} + Tulud_{h.T} + Toetus_T - (F_{hind.T} + CO2_{maksumus.T} + Tuhk_{maksumus.T} + Hooldus_{maksumus.T}) - Makse_T \quad (5.18)$$

#### 4.1.14 Muutujad

Matemaatilise mudeli talitlemiseks määratakse muutujaid: elektrienergia hind, elektrienergia transport, aktsiis ja taastuenergia tasu ning soojusenergia hind. Muutujaid projekti kestvuse ajal kirjeldab Tabel 4.5.

**Tabel 4.5 Matemaatilise mudeli muutujad**

Periood	Elektrienergia hind, [eur/MWh]*	Võrguteenus, elektriaktsiis, taastuenergia tasu, [eur/MWh]*	Soojusenergia hind, [eur/MWh]**
2018	55,49	55,85	50,8
2019	59,96	57,03	51,8
2020	64,43	58,24	52,9
2021	65,23	59,44	53,9



2022	66,03	60,62	55,0
2023	66,39	61,83	56,1
2024	66,74	63,02	57,2
2025	67,3	64,19	58,4
2026	67,86	65,39	59,5
2027	68,12	66,56	60,7
2028	68,39	67,7	61,9
2029	67,49	68,87	63,2
2030	66,52	70	64,4
2031	67,22	71,16	65,7
2032	67,84	72,34	67,0
2033	68,45	73,54	68,4

\*perioodide andmed on võetud Balmorel-Liberal prognoosi alusel

\*\*perioodide andmed on võetud Tallinna küte aasta 2017 hinna alusel kasvutrediga 2% aastas

## 4.2 Tulemused

Matemaatilise mudeli arvutuste tulemused võtab kokku Tabel 4.6. Tulemustest selgub, et nii haja- kui ka tsentraliseeritud energia tootmise projektide NPV on negatiivne. Käesolevas töös on NPV diskontomääraks valitud 5%. (*Audiitfirma Deloitte hinnangul on Eesti tingimustel tööstusprojektide minimaalne võimalik diskontomäär 5%.*) NPV positiivseks muutmiseks, tuleb lisada rahavoogude esimesel perioodil investeeringu summa, teisisõnu kinnistu arendajale peab investeeringu summa katma müüdavate kruntide ruutmeetri hinnaga. Sel juhul NPV ja FCFE väärtused muutuvad positiivseks.

Antud baastingimustel maagaasi kütusel koostootmisjaama projektidel on rahavoogude nüüdispuhasväärtus negatiivne Seda mõjutab kogu perioodi kütuse maksumus, mis on tunduvalt kõrgem biomassi koostootmisjaama projektide kütuse maksumusest. Siit võib järeldada, et maagaasi kütusel koostoomine ei ole majanduslikult jätkusuutlik antud arendupiirkonnas.

Biomass kütusel koostootmisjaamad on majanduslikult efektiivsed antud arenduspiirkonnas. GFE45 tehnoloogial on rahavoogude nüüdispuhasväärtus suurem kui E-Max tehnoloogial, kuid GFE45 nõuab oluliselt suuremaid investeeringud, mida võib järeldada rahavoogude puhasväärtuse alusel.

**Tabel 4.6 Matemaatilise mudeli arvutuste tulemused**

	Arenduspiirkonna tsentraliseeritud				Haja/hoonepõhiselt		
	Stsenaarium 1, gaasimootor	Stsenaarium 2, mikroturbiin	Stsenaarium 3, biomass gaasimootor	Stsenaarium 4, biomass stirling	Gaasikatlad	Soojuspumbad	Pelletikatlad
<b>Investeeringud, [euro]</b>	275012	286316	462418	226045	110475	164880	162000
<b>NPV, [euro]</b>	-445210	-480312	-326762	-166796	-175506	-235200	-168917
Kogu perioodi kütuse maksumus, [euro]	574527	501247	145161	241724	264238	238681	166891
Kogu perioodi hoolduse maksumus, [euro]	52394	26754	197319	5056	16775	33551	41938
<b>FCFF kogu period, [euro]</b>	-28415	-111924	256207	123844	16756	30430	93833
<b>FCFE kogu period, [euro]</b>	-452345	-552811	-455980	-224554	-153539	-223728	-155886

Matemaatilise mudeli arvutuste tulemustel võib prognoosida Eesti energiasüsteemile ja keskkonnale kogu perioodi avaldatud mõju sõltuvalt kasutatavast tehnoloogiast. Tulemused on esitatud Tabel 4.7. Tulemustest selgub, et maagaasi koostootmisjaamad säästavad Eesti loodusvarasid, peamiselt põlevkivi, kuid sellega kaasneb CO<sub>2</sub> teke. Biomassil töötav sisepõlemismootoriga koostootmisjaam säästab samuti loodusvara kuid lisaks on arvestuslikult CO<sub>2</sub> emissioonivaba.

**Tabel 4.7 Mõju Eesti energiasüsteemile ja keskkonnale**

	Arenduspiirkonna tsentraliseeritud				Haja/hoonepõhiselt		
	Stsenaarium 1, gaasimootor	Stsenaarium 2, mikroturbiin	Stsenaarium 3, biomass gaasimootor	Stsenaarium 4, biomass stirling	Gaasikatlad	Soojuspumbad	Pelletikatlad
Kogu perioodi süsteemis toodetud	3134	1255	2571	569	0	0	0

<b>elektrienergia,</b> [MWh]							
Kogu perioodi süsteemi imporditud <b>elektrienergia,</b> [MWh]	76	387	139	780	1349	3399	1349
Kogu perioodi <b>põlevkivi</b> kasutamine, [t] (-) on sääst	-1320	-412	-1058	10	440	1109	440
Kogu perioodi tekitatud <b>CO<sub>2</sub>,</b> [t] (-) on sääst	857	1462	-1011	10	1399	1059	420
Kogu perioodi tekitatud <b>SO<sub>2</sub>,</b> [t] (-) on sääst	-18,59	-6,53	-16,77	0,16	6,97	17,56	6,97
Kogu perioodi tekitatud <b>NO<sub>x</sub>,</b> [t] (-) on sääst	1,22	1,69	2,98	3,56	1,44	0,93	2,82

# Kokkuvõte

Antud lõputöö eesmärgiks oli leida optimaalne tehniline ja majanduslik põhjendus elamuehituse arenduspiirkondade energiavarustuse tagamiseks. Lõputöö baseerub kolme hüpoteesi analüüsil ja tõestusel: kinnisvaraarenduse piirkonnas tsentraliseeritud energia tootmine on efektiivsem haja/hoonepõhise energia tootmisest, tsentraliseeritud energia tootmine on majanduslikult jätkusuutlik ning on madalamate keskkonna emissiooniteguritega .

Esimeses peatükis prognoositi rajatava piirkonna võimalikke elektri- ja soojusenergiavajadusi. Hoonete ehitusmahude analüüs viidi läbi Jaani 2 maaüksuse kehtestatud detailplaneeringu ja kinnisvaraturu alusel. Analüüsi tulemuseks saadi 3500 m<sup>2</sup> suletud netopinda. Suletud netopinna ja seadusregulatsiooni alusel määrati elektri- ja soojusenergiavajadused. Lähtudes eeltoodust tulevase elamurajooni prognoositav energiavajadus on 87,5 MWh elektrienergiat ja 332,5 MWh soojusenergiat aastas.

Teises peatükis analüüsiti Jaani 2 maaüksuse energia tootmis- ja tarneviise. Energia tootmisviisid jagati kahte rühma: haja ehk hoonetepõhiseks ja tsentraliseeritud ehk kogu piirkonnale ühiseks energiatootmiseks. Esimeses rühmas analüüsiti hoonete soojatootmisviise Eesti turul levinud moodustega nagu gaasikatlad, soojuspumbad ja pelletikatlad. Määrati soojatarve algingimused, soojuskoormuse jaotus aasta lõikes ning TSV parameetrid. Teises rühmas analüüsiti piirkonna tsentraliseeritud energia tootmise võimalusi kasutades koostoomise erinevaid tehnoloogiad. Selleks koostati kaugküttevõrgu eelprojekti ning projekti alusel uuriti kaugküttevõrgu talitlust, soojuskadusid ja pumpamiskulusid. Euroopa tendentsidele tuginedes valiti neli erinevat koostootmise tehnoloogiat: gaasimootor, gaasi mikroturbiin, biomassil sisepõlemismootor ja biomassil strilingumootor.

Kolmandas peatükis simuleeriti koostootmisjaama talitlust eelnevalt valitud tehnoloogiate alusel. Simuleerimiseks koostati MS Excel'i tarkvara keskkonnas vastav kontseptuaalne mudel. Mudeli eesmärk oli jälgida süsteemi energiabilansi muutust reaalajas. Mudeli väljunditeks olid koostootmisel toodetud elektri- ja soojusenergia, katla abil toodetud soojusenergia, kütuse sisend, plokkide tööaeg, süsteemi elektrienergia neto import ja eksport ning lisaks emissioonitegurid. Tulemuste

kontrollimiseks ja võrdlemiseks koostati analoogne mudel EnergyPro 4.4 tarkvara keskkonnas. Tulemuste erinevus ei ületanud 2,5%, seega simuleerimise tulemusi võib lugeda korrektseks. EnergyPro tarkvara abil simuleeriti ka soojasalvestite talitlust erinevate tehnoloogiatega. Tulemuseks oli suurenenud efektiivsus gaasimootoriga-, biomassil sise põlemismootoriga- ja biomassil stirlingu mootoriga koostootmisjaamadel. Mikroturbiini koostootmisjaamal efektiivsus langes.

Neljandas peatükis loodi matemaatiline mudel kolmandas peatükis käsitletud kontseptuaalse mudeli alusel. Matemaatilise mudeli väljund annab ülevaate erinevate koostootmistehnoloogiate majandusliku jätkusuutlikuse kohta. Selgus, et kinnisvara arenduspiirkonnas rajataval elamurajoonil on majanduslikult kõrgeima efektiivsusega biomasskütusel töötav stirling mootoriga koostootmisjaam.

Kokkuvõtlikult võib väita, et esimene hüpotees tõestati tingimisi:

- Jaani 2 maaüksuse territooriumil tsentraliseeritud energia tootmine on efektiivsem hajaenergia tootmisest. Teisisõnu tsentraliseeritud energia tootmine säästab primaarenergia ressursse ehk loodusvarasid.

Teine hüpotees tõestati tingimisi:

- Jaani 2 maaüksuse territooriumil tsentraliseeritud energia tootmine on majanduslikult jätkusuutlik, s.t energia lõpptarbijad maksavad energia eest vähem.

Kolmas hüpotees sai tõestatud täies mahus:

- Jaani 2 maaüksuse territooriumil tsentraliseeritud energia tootmine avaldub positiivset mõju Eesti energiasüsteemi keskkonna emissioonitegurite suhtes.

Lõputöö tulemustele tuginedes on autoril kolm soovitus arendajale:

1. Investeerida biomassil töötava stirlingu mootori koostootmisjaama ja kaugküttevõrgu projekteerimiseks ja ehitamiseks. Biomass on kohalik ja taastuv kütus. Sõltuvus kütuse impordist puudub. Biomass on ka CO<sub>2</sub> neutraalne. Eeldades, et müüdavate kruntide ruutmeetri hinnale õnnestub lisada koostootmisjaama ja energijaotusvõrgu investeerimiskulu (suurendab ruutmeetri hinda ca 11%), siis NPV arvutamisel rahavoogude esimese perioodi

laekub 206 000 euro lisaks, mis omalt poolt muudab kogu perioodi NPV positiivseks.

2. Kinnisvara arenduspiirkonna tsentraalsel energavarustusel kasutada lisaks tsentraalseid PV paneele, energia salvestamist, energiatootmise ja- tarbimuse monitooringut ja juhtimist ning andmetöötlust– ehitada kinnisvara piirkonna „Tark energiavõrk“.

Tarkvõrgu pilootprojekti rakendus peaks pakkuma huvi ka suurtele võrguettevõtjatele ning riigile. Partnerite ja ka ühekordse investeringutoetuse kaasmine peaks olema võimalik arvestades mittejuhitavate toomisüksuste hooga kasvuga seonduvate probleemide ennetamisvajadust.

3. Propageerida keskkonnasäästlikku energiatootmist ja minimaalsete kadudega energia.

Kokkuvõttes on optimaalne tehniline ja majanduslik põhjendus kinnistu energiavarustuse tagamiseks leitud, millega lõputöö põhieesmärk on täidetud.

## Kasutatud kirjandus

- [1] European Commission, „Energy,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings/nearly-zero-energy-buildings>. [Kasutatud 21 02 2017].
- [2] Majandus- ja taristusminister, „Määrus 63 Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika,“ 01 07 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/109062015021>. [Kasutatud 21 02 2017].
- [3] E. Abel, H. Voll ja T. Tark, Hoonete energiatarve ja sisekliima, Tallinn: OÜ Presshouse, 2014.
- [4] Ilmateenistus, „Ilm.ee,“ 20 01 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ilm.ee/?513278>. [Kasutatud 01 03 2017].
- [5] Energiatalgud, „Välisõhu temperatuuri mõju energiatarbimisele,“ Energiatalgud, 22 03 2016. [Võrgumaterjal]. Available: [https://energiatalgud.ee/index.php?title=V%C3%A4lis%C3%B5hu\\_temperatuuri\\_m%C3%B5ju\\_energiatarbimisele#cite\\_ref-KAUR\\_7-1](https://energiatalgud.ee/index.php?title=V%C3%A4lis%C3%B5hu_temperatuuri_m%C3%B5ju_energiatarbimisele#cite_ref-KAUR_7-1). [Kasutatud 01 03 2017].
- [6] Statistikaamet KE032 2015, „<http://pub.stat.ee/>,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://pub.stat.ee/px-web.2001/Dialog/Saveshow.asp>. [Kasutatud 03 03 2017].
- [7] Statistikaamet KE033 2015, „<http://pub.stat.ee/>,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://pub.stat.ee/px-web.2001/Dialog/Saveshow.asp>. [Kasutatud 02 03 2017].
- [8] A. Hlebnikov, A. Siirde ja A. Paist, „Basics of optimal design of district heating pipelines diameters and desing examples of Estonia old non-optimesed district heating networks,“ 15 01 2007. [Võrgumaterjal]. Available: [http://egdk.ttu.ee/files/kuressaare2007/kuressaare2007\\_149hlebnikov-siirde-](http://egdk.ttu.ee/files/kuressaare2007/kuressaare2007_149hlebnikov-siirde-)

paist.pdf. [Kasutatud 13 03 2017].

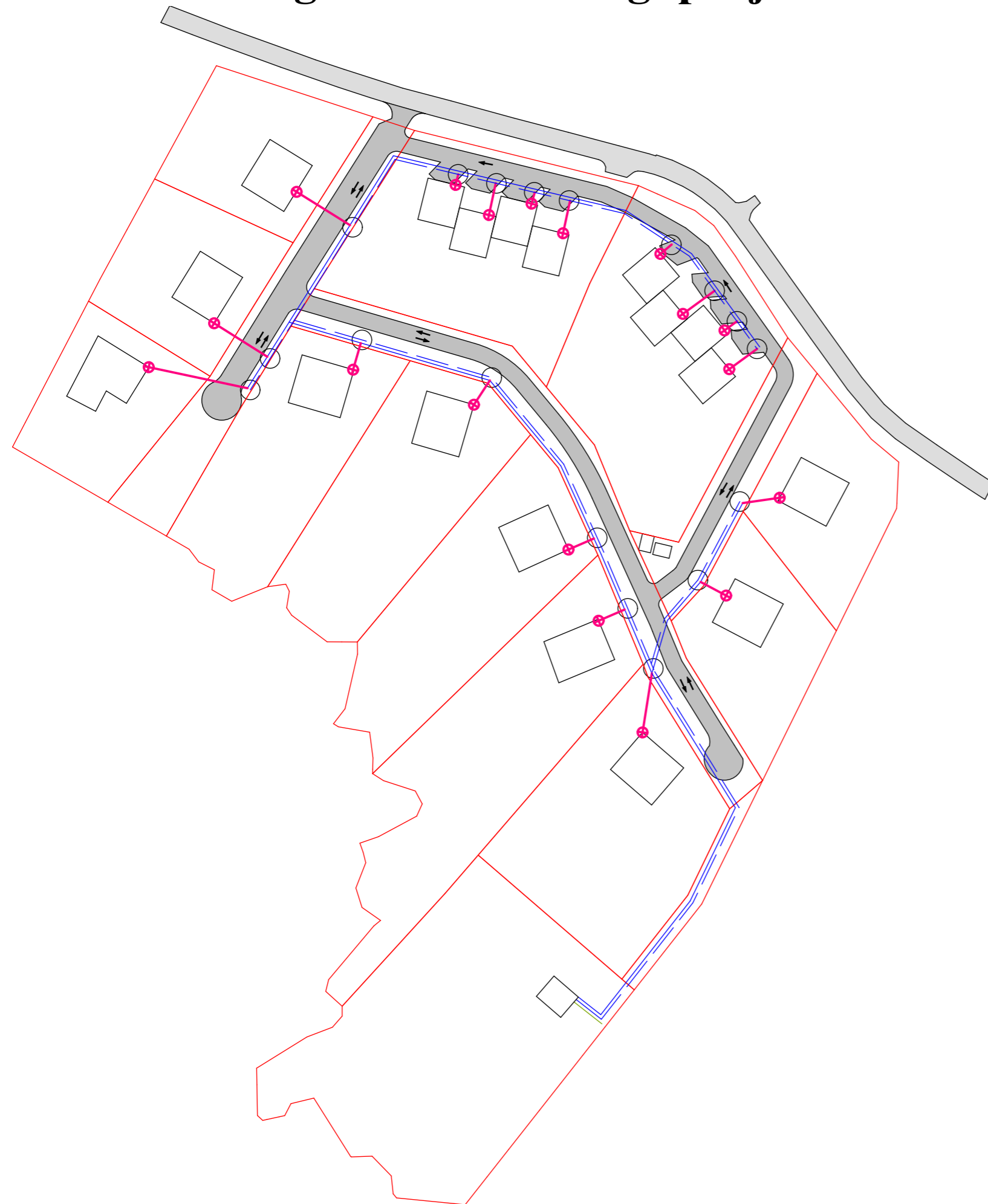
- [9] Uponor, *Uponor eelisoleeritud torusüsteemid. Projekteerimine ja paigaldamine.*, Helsinki, 2012.
- [10] H. Kristjansson ja B. Bohm, „<http://heating.danfoss.com/>,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://heating.danfoss.com/pcmpdf/technical\\_article\\_optimumdesign\\_lores.pdf](http://heating.danfoss.com/pcmpdf/technical_article_optimumdesign_lores.pdf). [Kasutatud 17 03 2017].
- [11] „Ympäristöministeriön asetus kiinteistöjen vesi- ja viemärlaitteistoista,“ SUOMEN RAKENTAMISMÄÄRÄYSKOKOELMA, Helsinki, 2007.
- [12] S. Frederiksen ja S. Werner, *District Heating and Cooling*, Lund: Studentlitteratur, 2013.
- [13] Eesti Standardikeskus, *EVS-EN 15632-1:2009*, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2009.
- [14] A. Rant, „Küttesüsteemid ja soojussõlmed,“ 13 02 2014. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.ttu.ee/public/t/Taiendusoppijale/Kuttesusteemid\\_ja\\_soojussolmed\\_2014\\_Aivar\\_Rant.pdf](https://www.ttu.ee/public/t/Taiendusoppijale/Kuttesusteemid_ja_soojussolmed_2014_Aivar_Rant.pdf). [Kasutatud 24 03 2017].
- [15] Druckverlust Online-Rechner, „Druckverlust,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.druckverlust.de/Online-Rechner/>. [Kasutatud 24 03 2017].
- [16] Grundfos Product Center, „<https://product-selection.grundfos.com/>,“ Grundfos, 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://product-selection.grundfos.com/>. [Kasutatud 24 03 2017].
- [17] MTT, „MTT - Micro Turbine Tecnology bv,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.mtt-eu.com/>. [Kasutatud 24 03 2017].



- [18] E. Latõsov, Model for Analysis of Combined Heat and Power Production, Tallinn: TUT Press, 2011.
- [19] Majandus- ja taristuminister, „Soojus- ja elektrienergia tõhusa koostootmise nõuded,“ 01 01 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/116122016010>. [Kasutatud 26 04 2017].



# 6. Lisa 2 - Kaugküttevõrk. Võrguprojekt



- Tingmärgid**
- KRUNDIPIIR
  - HOONE
  - TEEALA
  - THERMO SINGLE 75/200 PEALEVOOL
  - THERMO SINGLE 75/200 TAGASIVOOL
  - THERMO TWIN 2x25x2,3/175
  - ÜHENDUSKAEV
  - ⊕ SOOJUSSÕLM Cetetherm Mini Plus

# 7. Lisa 3 (leht 1/2)

energyPRO 4.4.340

## energy\_pro\_gaasimootor.epp

Maagaasil töötav sise põlemismootor  
XRG19 tehnoloogia

Printed/Page

21.04.2017 14:11:29 / 1

Licensed user:

Tallinn University of Technology, Department of Electrical Power Engineering  
This license is ONLY to be used for educational purposes

--

+372 620 3769

## Energy conversion, annual

Calculated period: 01.2016 - 12.2016

### Heat demands:

Küte	250,2 MWh
Soojuskadu	114,1 MWh
TSV	87,5 MWh
Total	451,8 MWh

Max heat demand 0,1 MW

### Heat productions:

XRG19 gaasimootor 1	168,7 MWh/year	37,3 %
XRG19 gaasimootor 2	98,0 MWh/year	21,7 %
XRG19 gaasimootor 3	88,5 MWh/year	19,6 %
XRG19 gaasimootor 4	47,3 MWh/year	10,5 %
Gaasiboiler	49,4 MWh/year	10,9 %
Total	451,8 MWh/year	100,0 %

### Electricity demands (not including electricity consumed by energy units):

Elektrienergia tarbimine 93,7 MWh

Max electricity demand 0,0 MW

### Electricity produced by energy units:

Elektrienergia toodang:

	All periods [MWh/year]	Of annual production
XRG19 gaasimootor 1	79,1	42,1%
XRG19 gaasimootor 2	45,9	24,4%
XRG19 gaasimootor 3	41,3	22,0%
XRG19 gaasimootor 4	21,6	11,5%
Total	187,8	100,0%
Of annual production	100,0%	

### Peak electric production:

XRG19 gaasimootor 1	9,0 kW-elec.
XRG19 gaasimootor 2	9,0 kW-elec.
XRG19 gaasimootor 3	9,0 kW-elec.
XRG19 gaasimootor 4	9,0 kW-elec.

### Electricity exchange:

Elektrienergia toodang:

	Total [MWh/year]
Exported electricity, Elektrienergia toodang	94,9
Imported electricity, Elektrienergia toodang	0,8

### Hours of operation:

Elektrienergia toodang:

	Total [h/Year]	Of annual hours
XRG19 gaasimootor 1	8 784,0	100,0%
XRG19 gaasimootor 2	5 117,0	58,3%
XRG19 gaasimootor 3	4 685,0	53,3%
XRG19 gaasimootor 4	2 693,0	30,7%
Out of total in period	8 784,0	

# 7. Lisa 3 (leht 2/2)

energyPRO 4.4.340

## energy\_pro\_gaasimootor.epp

Maagaasil töötav sise põlemismootor  
XRG19 tehnoloogia

Printed/Page

21.04.2017 14:11:29 / 2

Licensed user:

Tallinn University of Technology, Department of Electrical Power Engineeri

This license is ONLY to be used for educational purposes

--

+372 620 3769

## Energy conversion, annual

Production unit(s) Not connected to electricity market:

	Total [h/Year]	Of annual hours
Gaasiboiler	7 074,0	80,5%
Out of total in period	8 784,0	

### Turn ons:

XRG19 gaasimootor 1	0
XRG19 gaasimootor 2	10
XRG19 gaasimootor 3	43
XRG19 gaasimootor 4	66
Gaasiboiler	240

### Fuels:

#### By fuel

	Fuel consumption
Maagaas	71 981,0 Nm3

#### By energy unit

XRG19 gaasimootor 1	259,1 MWh	=27 863,2	Nm3
XRG19 gaasimootor 2	150,5 MWh	=16 181,9	Nm3
XRG19 gaasimootor 3	135,7 MWh	=14 591,2	Nm3
XRG19 gaasimootor 4	72,1 MWh	=7 754,7	Nm3
Gaasiboiler	52,0 MWh	=5 590,0	Nm3
Total	669,4 MWh		

# 8. Lisa 4 (leht 1/2)

energyPRO 4.4.340

## energy\_pro\_mikroturbiin.epp

Maagaasil töötav mikroturbiin  
EnerTwin tehnoloogia

Printed/Page

21.04.2017 12:53:15 / 1

Licensed user:

Tallinn University of Technology, Department of Electrical Power Engineeri

This license is ONLY to be used for educational purposes

--

+372 620 3769

## Energy conversion, annual

Calculated period: 01.2016 - 12.2016

### Heat demands:

Küte	250,2 MWh
Soojuskadu	114,1 MWh
TSV	87,5 MWh
Total	451,8 MWh

Max heat demand 0,1 MW

### Heat productions:

EnerTwin mikroturbiin 1	44,1 MWh/year	9,8 %
EnerTwin mikroturbiin 2	131,8 MWh/year	29,2 %
EnerTwin mikroturbiin 3	106,1 MWh/year	23,5 %
EnerTwin mikroturbiin 4	75,7 MWh/year	16,8 %
EnerTwin mikroturbiin 5	68,2 MWh/year	15,1 %
Gaasiboiler	25,9 MWh/year	5,7 %
Total	451,8 MWh/year	100,0 %

### Electricity demands (not including electricity consumed by energy units):

Elektrienergia tarbimine 93,7 MWh

Max electricity demand 0,0 MW

### Electricity produced by energy units:

Elektrienergia toodang:

	All periods [MWh/year]	Of annual production
EnerTwin mikroturbiin 1	8,8	10,4%
EnerTwin mikroturbiin 2	26,4	30,9%
EnerTwin mikroturbiin 3	21,2	24,9%
EnerTwin mikroturbiin 4	15,1	17,8%
EnerTwin mikroturbiin 5	13,6	16,0%
Total	85,2	100,0%
Of annual production	100,0%	

### Peak electric production:

EnerTwin mikroturbiin 1	3,0 kW-elec.
EnerTwin mikroturbiin 2	3,0 kW-elec.
EnerTwin mikroturbiin 3	3,0 kW-elec.
EnerTwin mikroturbiin 4	3,0 kW-elec.
EnerTwin mikroturbiin 5	3,0 kW-elec.

### Electricity exchange:

Elektrienergia toodang:

	Total [MWh/year]
Exported electricity, Elektrienergia toodang	6,9
Imported electricity, Elektrienergia toodang	15,4

# 8. Lisa 4 (leht 2/2)

energyPRO 4.4.340

## energy\_pro\_mikroturbiin.epp

Maagaasil töötav mikroturbiin  
EnerTwin tehnoloogia

Printed/Page

21.04.2017 12:53:15 / 2

Licensed user:

Tallinn University of Technology, Department of Electrical Power Engineeri

This license is ONLY to be used for educational purposes

--

+372 620 3769

## Energy conversion, annual

### Hours of operation:

Elektrienergia toodang:

	Total [h/Year]	Of annual hours
EnerTwin mikroturbiin 1	4 021,0	45,8%
EnerTwin mikroturbiin 2	8 784,0	100,0%
EnerTwin mikroturbiin 3	8 784,0	100,0%
EnerTwin mikroturbiin 4	5 124,0	58,3%
EnerTwin mikroturbiin 5	4 926,0	56,1%
Out of total in period	8 784,0	

Production unit(s) Not connected to electricity market:

	Total [h/Year]	Of annual hours
Gaasiboiler	1 758,0	20,0%
Out of total in period	8 784,0	

### Turn ons:

EnerTwin mikroturbiin 1	73
EnerTwin mikroturbiin 2	0
EnerTwin mikroturbiin 3	0
EnerTwin mikroturbiin 4	9
EnerTwin mikroturbiin 5	27
Gaasiboiler	72

### Fuels:

#### By fuel

	Fuel consumption
Maagaas	63 990,2 Nm3

#### By energy unit

EnerTwin mikroturbiin 1	58,8 MWh	=6 319,3	Nm3
EnerTwin mikroturbiin 2	175,7 MWh	=18 890,3	Nm3
EnerTwin mikroturbiin 3	141,5 MWh	=15 215,1	Nm3
EnerTwin mikroturbiin 4	100,9 MWh	=10 853,3	Nm3
EnerTwin mikroturbiin 5	90,9 MWh	=9 776,2	Nm3
Gaasiboiler	27,3 MWh	=2 936,1	Nm3
Total	595,1 MWh		

# 9. Lisa 5 (leht 1/2)

energyPRO 4.4.340

## energy\_pro\_biomass\_stirling.epp

Puidugranuulid stirlingumootor  
E-Max tehnoloogia

Printed/Page  
25.04.2017 14:09:32 / 1

Licensed user:  
**Tallinn University of Technology, Department of Electrical Power Engineering**  
This license is ONLY to be used for educational purposes  
--  
+372 620 3769

## Energy conversion, annual

Calculated period: 01.2016 - 12.2016

### Heat demands:

Küte	250,2 MWh
Soojuskadu	114,1 MWh
TSV	87,5 MWh
Total	451,8 MWh

Max heat demand 0,1 MW

### Heat productions:

E_Max 1	364,2 MWh/year	
E_Max 2	86,8 MWh/year	
Boiler	2,0 MWh/year	
Heat Storage Loss (total for site)	-1,2 MWh/year	
Total	451,8 MWh/year	100,0 %

### Electricity demands (not including electricity consumed by energy units):

Elektrienergia tarbimine 93,7 MWh

Max electricity demand 0,0 MW

### Electricity produced by energy units:

Elektrienergia toodang:	All periods [MWh/year]	Of annual production
E_Max 1	29,8	80,7%
E_Max 2	7,1	19,3%
Total	36,9	100,0%
Of annual production	100,0%	

### Peak electric production:

E_Max 1	4,5 kW-elec.
E_Max 2	4,5 kW-elec.

### Electricity exchange:

Elektrienergia toodang:	Total [MWh/year]
Exported electricity, Elektrienergia toodang	0,0
Imported electricity, Elektrienergia toodang	56,8

### Hours of operation:

Elektrienergia toodang:	Total [h/Year]	Of annual hours
E_Max 1	6 621,0	75,4%
E_Max 2	1 579,0	18,0%
Out of total in period	8 784,0	



# 9. Lisa 5 (leht 2/2)

energyPRO 4.4.340

## energy\_pro\_biomass\_stirling.epp

Puidugranuulid stirlingumootor  
E-Max tehnoloogia

Printed/Page  
25.04.2017 14:09:32 / 2

Licensed user:  
**Tallinn University of Technology, Department of Electrical Power Engineering**  
This license is ONLY to be used for educational purposes  
--  
+372 620 3769

## Energy conversion, annual

Production unit(s) Not connected to electricity market:

	Total [h/Year]	Of annual hours
Boiler	196,0	2,2%
Out of total in period	8 784,0	

### Turn ons:

E_Max 1	122
E_Max 2	93
Boiler	5

### Fuels:

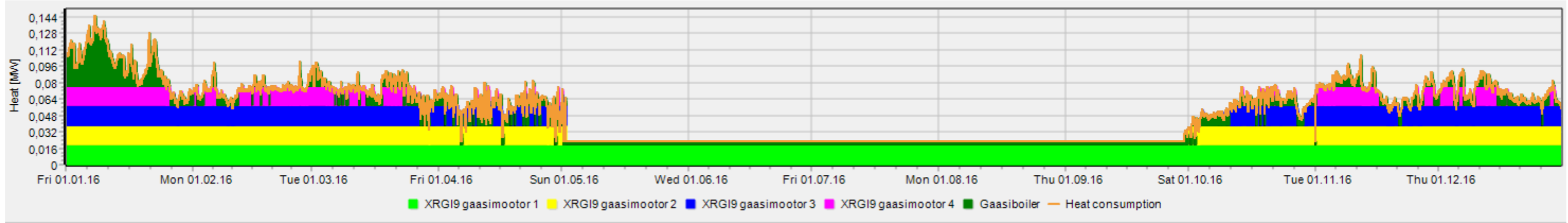
#### By fuel

	Fuel consumption
Puidugranuulid	116 333,1 kg

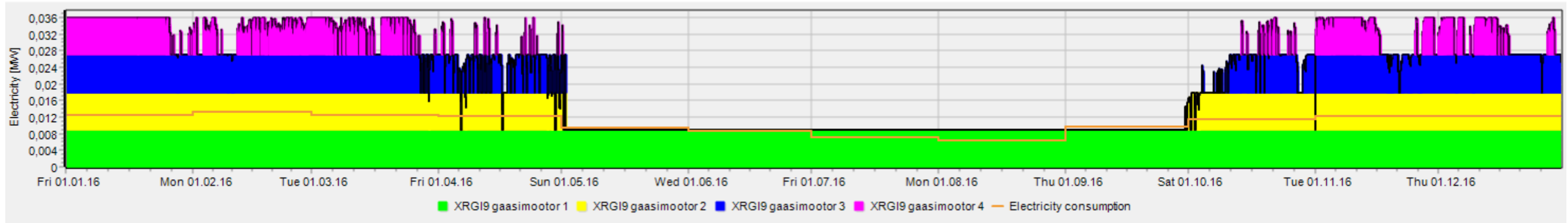
#### By energy unit

E_Max 1	430,4 MWh	=93 557,6	kg
E_Max 2	102,6 MWh	=22 312,0	kg
Boiler	2,1 MWh	=463,5	kg
Total	535,1 MWh		

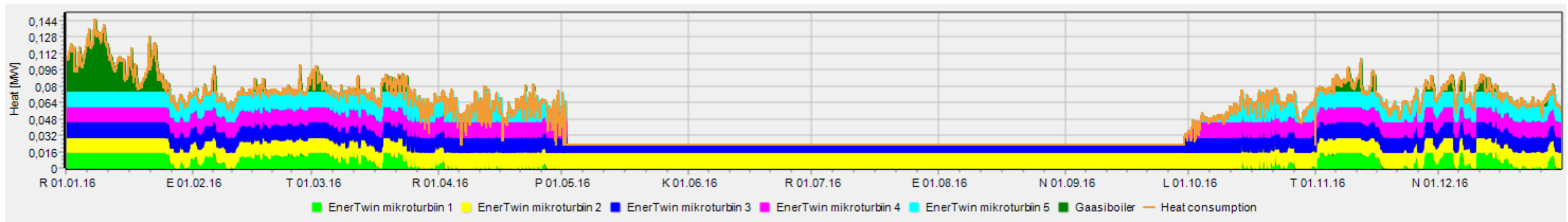
# 10. Lisa 6 (leht 1/4)- EnergyPro 4.4 graafiline osa



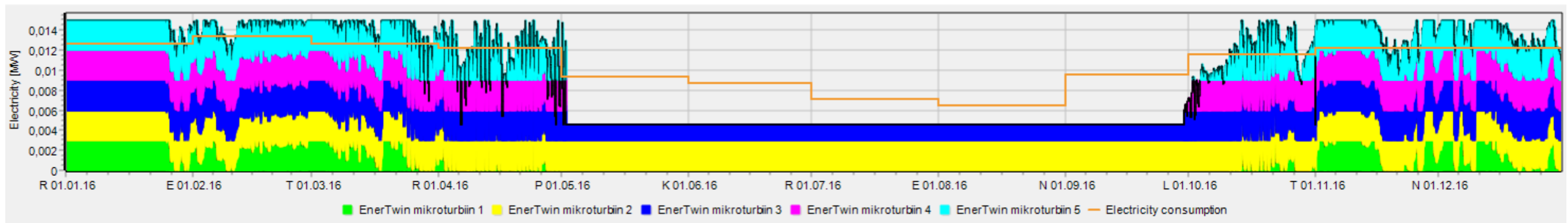
*Stsenaarium 1 soojuse tarbimine ja tootmine*



*Stsenaarium 1 elektrienergia tarbimine ja tootmine*

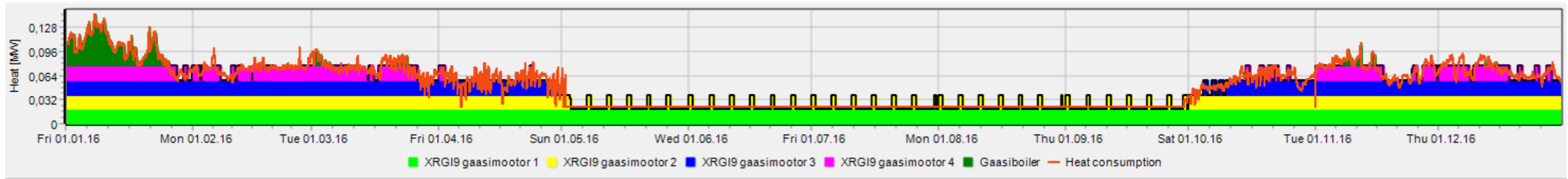


*Stsenaarium 2 soojuse tarbimine ja tootmine*

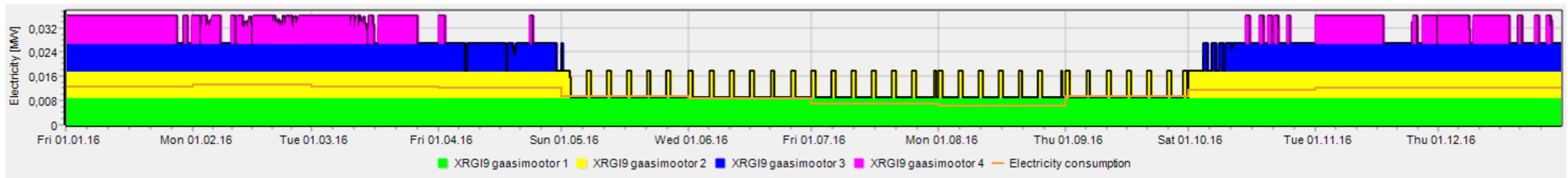


*Stsenaarium 2 elektrienergia tarbimine ja tootmine*

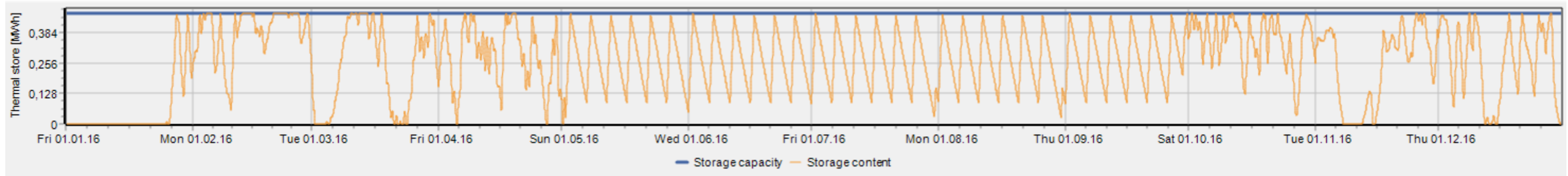
# 10. Lisa 6 (leht 2/4)- EnergyPro 4.4 graafiline osa



*Stsenaarium 1 soojasalvestiga soojuse tarbimine ja tootmine*

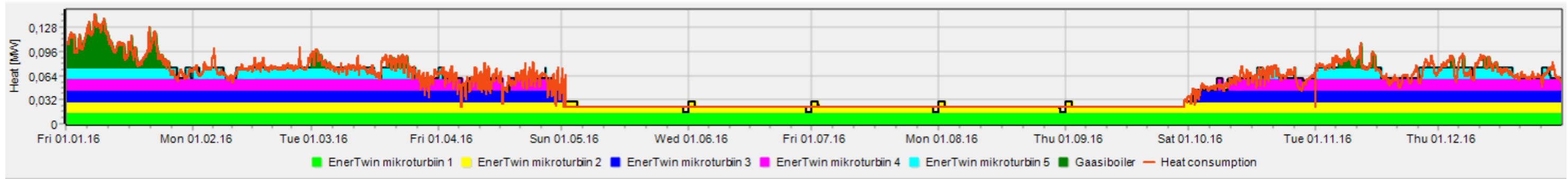


*Stsenaarium 1 soojasalvestiga elektrienergia tarbimine ja tootmine*

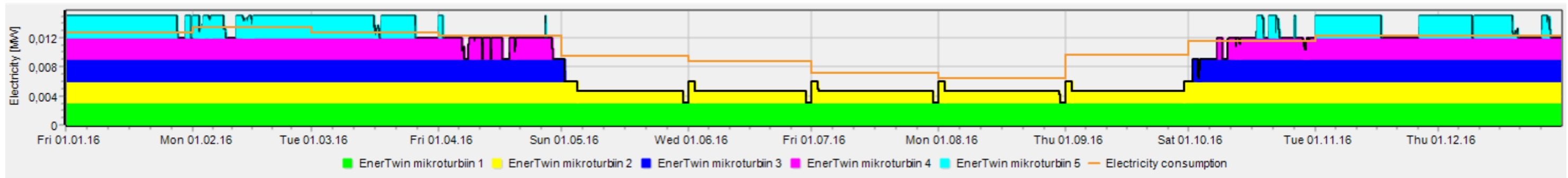


*Stsenaarium 1 soojasalvesti talitus*

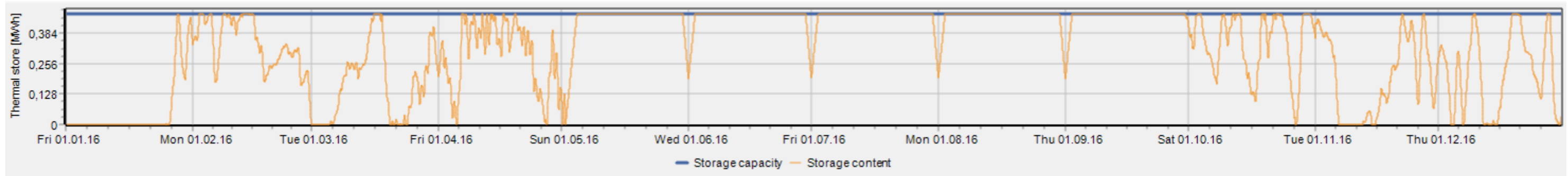
# 10. Lisa 6 (leht 3/4)- EnergyPro 4.4 graafiline osa



*Stsenaarium 2 soojasalvestiga soojuse tarbimine ja tootmine*

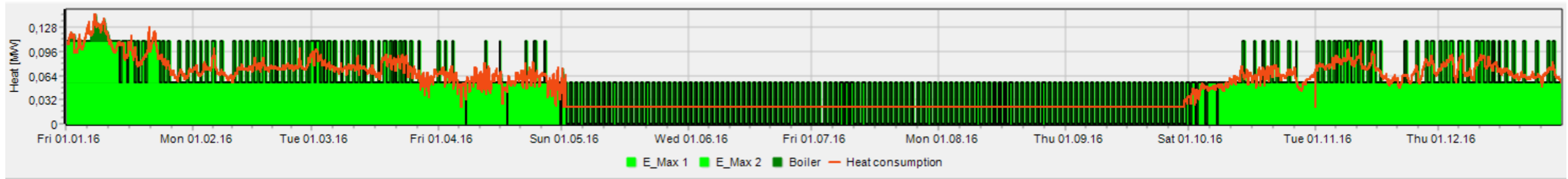


*Stsenaarium 2 soojasalvestiga elektrienergia tarbimine ja tootmine*

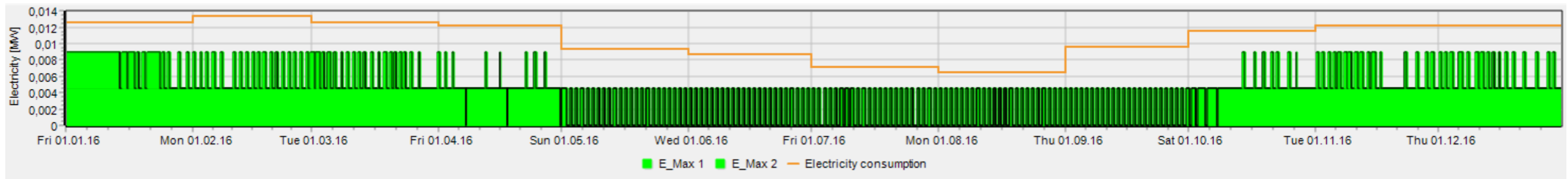


*Stsenaarium 2 soojasalvesti talitus*

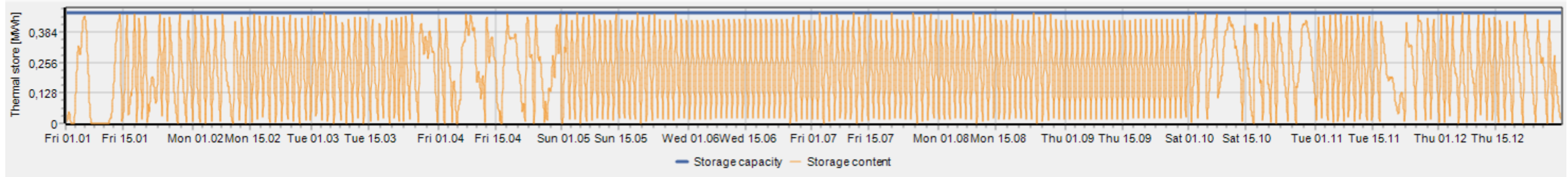
# 10. Lisa 6 (leht 4/4)- EnergyPro 4.4 graafiline osa



*Stsenaarium 4 soojasalvestiga soojuse tarbimine ja tootmine*



*Stsenaarium 4 soojasalvestiga elektrienergia tarbimine ja tootmine*



*Stsenaarium 4 soojasalvesti talitus*