



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

## **Eramu elektri- ja soojusenergia tootmislahenduste analüüs energiatõhususnõuete saavutamiseks energyPRO tarkvara abil**

Analysis of electricity and heat production options for private household to meet energy efficiency requirements with energyPRO software

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Taisto Roosipuu

Üliõpilaskood: 179769EAAB

Juhendaja: Reeli Kuhi-Thalfeldt,  
vanemlektor

Tallinn 2021

# 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.

"....." ..... 202.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 202.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Taisto Roosipuu

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

Eramu elektri- ja soojusenergia tootmislahenduste analüüs energiatõhususnõuete saavutamiseks energyPRO tarkvara abil,

mille juhendaja on Reeli Kuhi-Thalfeldt,

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

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

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

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

18. mai 2021

---

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

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Taisto Roosipuu

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Eramu elektri- ja soojusenergia tootmislahenduste analüüs energiatõhususnõuete saavutamiseks energyPRO tarkvara abil

*Kuupäev:* 18.05.2021

58 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* vanemlektor Reeli Kuhi-Thalfeldt

*Sisu kirjeldus:*

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on uurida Pärnu linnas asuva vanema eramaja energiatõhusust ning analüüsida energiatõhususnõuete saavutamise võimalusi taastuvenergiat kasutavate tootmislahenduste abil. Töö teostamiseks kasutati energyPRO tarkvara, kus modelleeriti hoone tunnipõhist elektri- ja soojusenergia tarbimist ning päikesepaneelide, päikesekollektori, maasoojuspumba ja elektrituuliku toodangut. Mudeli tulemuste põhjal hinnati, milline lahendus on kõige efektiivsem ja kulutõhusam hoone energiatõhususe tõstmiseks.

Töös käsitletud tootmislahendustest tõstis eramu energiatõhusust kõige efektiivsemalt maasoojuspump. Elektrituulik oli ka efektiivne, kuid selle lahenduse investeeringu maksumus oli teistest oluliselt kõrgem. Päikesepaneelide paigaldamise efekt hoone energiatõhususe tõstmiseks oli keskpärane ning ka hinna ja energiatõhususe parandamise suhe oli märgatava suurusega. Kõige vähem tõstis energiatõhusust päikesekollektoriga lahendus, kuid võrreldes teiste lahendustega oli investeeringu maksumus kordades väiksem. Eramu kuulus enne tootmislahenduste rakendamist kaalutud energiaerikasutuse põhjal halvimasse ehk H-energiaklassi. Maasoojuspumbaga lahendusega saavutati eramu parim energiaklass ehk A-klass, elektrituulikuga F-klass, päikesepaneelidega G-klass ja päikesekollektoriga H-klass.

*Märksõnad:* energiatõhusus, energiamärgis, energiaklassid, tootmislahendused, päikesepaneel, päikesekollektor, maasoojuspump, elektrituulik

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Taisto Roosipuu	<i>Type of the work:</i> Bachelor
<i>Title:</i> Analysis of electricity and heat production options for private household to meet energy efficiency requirements with energyPRO software	
<i>Date:</i> 18.05.2021	58 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Senior Lecturer Reeli Kuhi-Thalfeldt	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>The aim of this bachelor's thesis is to study energy efficiency of an older private house in Pärnu and to analyze the possibilities of achieving energy efficiency requirements with the help of renewable energy production solutions. The work was carried out using energyPRO software, in which the building's hourly electricity and heat consumption is modeled with the addition of the production of solar panels, solar collector, geothermal heat pump and a wind turbine. Based on the results of the model, it was assessed which solution is the most efficient and cost-effective for increasing the energy efficiency of the building.</p> <p>Of the production solutions discussed in the work, the geothermal heat pump increased energy efficiency of the house most efficiently. The wind turbine was also efficient, but the investment cost of this solution was significantly higher than the others. The effect of installing solar panels to increase the energy efficiency of a building was mediocre, and the relationship between improving energy efficiency and the price was also significant. The solution with a solar collector increased energy efficiency the least, but compared to other solutions, the investment cost was several times lower. The house belonged to the worst or H-energy class based on the energy efficiency calculations before the implementation of the production solutions. With the ground source heat pump solution, the best energy class or A-class was achieved, with the wind turbine F-class, with solar panels G-class and with a solar collector H-class was achieved.</p>	
<i>Keywords:</i> energy efficiency, energy label, energy classes, production solutions, solar panel, solar collector, ground source heat pump, wind generator	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Eramu elektri- ja soojusenergia tootmislahenduste analüüs energiatõhususnõuete saavutamiseks energyPRO tarkvara abil
Lõputöö teema inglise keeles:	Analysis of electricity and heat production options for private household to meet energy efficiency requirements with energyPRO software
Üliõpilane:	Taisto Roosipuu, 179769EAAB
Eriala:	Elektroenergeetika ja mehhatroonika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Reeli Kuhi-Thalfeldt
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	20.06.2021
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2021

  Taisto Roosipuu    
Üliõpilane (allkiri)

  Reeli Kuhi-Thalfeldt    
Juhendaja (allkiri)

  Lauri Kütt    
Õppekava juht (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Ühiskonna liikumine rohelise maailmavaate poole nõuab uutelt eramatelt ja ehitistelt head energiatõhusust ning seetõttu tuleb uurida variante energiatõhusa ehitise poole püüdluseks. Alates 2020. aastast peavad kõik uued hooned olema liginullenergiahooned ehk vastama A-energiaklassi nõuetele ning hoone olulisel rekonstrueerimisel C-klassi nõuetele. Vastavaid nõuded aga uuendatakse iga 5 aasta tagant, seega oleks tark sihtida miinimumnõutest kõrgemale. Võttes arvesse neid seadusi, analüüsitakse vanema eramaja elektri- ja soojusenergia lahendusi, mille abil saavutatakse energiatõhus maja.

## 2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on koostada õppeaine Haja- ja taastuvenergeetika tarbeks eramaja elektri- ja soojusenergia tootmise harjutusülesanne ning teha see harjutus läbi ühe konkreetse eramu näitel. Harjutusülesande abil saab uurida, kuidas on võimalik muuta vanemaid eramaju energiatõhusaks, kasutades alternatiivina hoone soojustamise asemel taastuvenergiat põhinevaid tootmislahendusi ning uurida nende tasuvust.

### **3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

Millised on eramajale esitatavad energiatõhususe nõuded ja aruvutusmetoodika?

Millised eramaja elektri- ja soojusenergia tootmislahendused võimaldavad kõige paremini täita energiatõhususe eesmärke?

Mil määral on võimalik maasoojuspumbaga pakkuda paindlikkusteenust (tarbimise juhtimist)?

### **4. Lähteandmed**

energyPRO mudeli sisendandmeteks on 20 aasta vanuse eramu andmed ning analüüsitavate tehnoloogiate maksumused. Täiendavateks sisenditeks on tunnipõhised mõõteandmed välistemperatuuri, päikesekiirguse, tuulekiiruse, elektrituruhinna kohta ning elektri ja soojuse tootmisseadmete toodangu modelleerimiseks vajalikud tehnilised andmed.

### **5. Uurimismeetodid**

Töö teoreetilise osa koostamiseks kasutatakse kirjanduse analüüsi. Töö tulemusteni jõudmiseks modelleeritakse hoone elektri- ja soojusenergia tarbimist ning erinevate tootmislahenduste elektri- ja/või soojusenergia toodangut energyPRO tarkvaras. Harjutusülesande ja andmete analüüsiks kasutatakse täiendavalt Excelit.

### **6. Graafiline osa**

Peamisteks graafikuteks elektri- ja soojusenergia tunnipõhine tarbimine, päikesepaneelide, elektrituuliku, päikesekollektori ja maasoojuspumba tunnipõhine energiatoodang, elektrienergia ost elektrivõrgust. Võrdlevad tabelid tulemuste kohta.

### **7. Töö struktuur**

Tiitelleht

Autorideklaratsioon

Referaadid

Sisukord

Lõputöö ülesanne

Eessõna

Sissejuhatus

Põhiosa

- Energiamärgis ja energiatõhususe nõuded
  - Miinimumnõuded
  - Madalenergia- ja liginullenergiahoone
  - Energiamärgis

- Modelleerimistarkvara EnergyPRO
- Eramu andmed
- Elektri- ja soojusenergia tootmislahendused
  - Päiksepaneelid
  - Elektrituulik
  - Maasoojuspump
  - Päikesekollektor
- Tootmislahenduste tasuvuse analüüs
- Maasoojuspumpaga paindlikkusteenuse pakkumise analüüs
- Järeldused

Kokkuvõte

Kasutatud kirjandus

Lisad

## 8. Kasutatud kirjanduse allikad

Peamiseks töös kasutatavateks kasutatud kirjanduse allikateks on seadusandlikud aktid ja juhendid, ministeeriumide ja Euroopa Liidu kodulehed, arengukavad, ajalehe artiklid, teadusartiklid ning aruanded.

- Hoone energiatõhususe miinimumnõuded: <https://www.riigiteataja.ee/akt/113122018014>,
- Nõuded energiamärgise andmisele ja energiamärgisele <https://www.riigiteataja.ee/akt/106052015002>,
- Hoonete energiatõhusus <https://www.mkm.ee/et/eesmargid-tegevused/ehitus-ja-elamumajandus/hoonete-energiatohusus>,
- <https://rohe.geenius.ee/rubriik/pikk-lugu/spetsialist-teeb-puust-ja-punaseks-energiatohusus-ei-tahenda-ainult-vaikest-kuttearvet/>
- Energy efficient buildings [https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings\\_en](https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings_en)

## 9. Lõputöö konsultandid

Konsultandid hetkel puuduvad.

## 10. Töö etapid ja ajakava

- Kirjanduse läbitöötamine ja lähteandmete kogumine (21. November)
- Teoreetilise osa kirjutamine (15. Jaanuar)
- Arvutuste ja modelleerimise teostamine (15. Veebruar)
- Uuringu tulemuste kirjeldamine (1. Märts)
- Järelduste kirjutamine (7. Märts)
- Kokkuvõtte koostamine (14. Märts)
- Töö esimene versioon valmis ja juhendajale läbilugemiseks saatmine (1. Aprill)
- Paranduste sisseviimine ja juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (15. Aprill)
- Töö lõplik versioon valmis (1. Mai)



# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	4
ABSTRACT .....	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	6
SISUKORD .....	9
Lühendite ja tähiste loetelu .....	11
SISSEJUHATUS .....	12
1. HOONETE ENERGIATÕHUSUS, ENERGIAMÄRGIS JA MIINIMUMNÕUDED .....	13
1.1 Energiatõhusus .....	13
1.2 Kaalutud erienergiakasutus .....	14
1.3 Energiamärgis ja miinimumnõuded .....	16
1.4 Liginullenergia- ja Madalenergiahooned .....	18
2. Tootmislahenduste analüüs energiatõhususnõuete täitmiseks .....	19
2.1 Päikesepaneel .....	19
2.2 Päikesekollektor .....	21
2.3 Elektrituulik .....	21
2.4 Maasoojuspump .....	22
2.5 Tootmislahenduste analüüsi kokkuvõte .....	22
3. Paindlikkuslahendus kasutades maasoojuspumpa .....	25
4. Modelleerimistarkvara EnergyPRO mudel .....	27
4.1 Eramu kirjeldus .....	28
4.1.1 Energiatõhusus hetkel .....	29
4.2 Päikesepaneeli sisendandmed ja selgitus .....	31
4.2.1 Päikesepaneelide valik .....	33
4.3 Päikesekollektori sisendandmed .....	34
4.3.1 Päikesekollektori valik .....	35
4.4 Elektrituuliku sisendandmed ja selgitus .....	36
4.4.1 Elektrituuliku valik .....	38
4.5 Maasoojuspumba sisendandmed ja valik .....	40
4.6 Majanduslikud sisendid .....	41
5. Tulemused ja analüüs .....	42
5.1 Tulemused .....	42
5.2 Tulemuste analüüs .....	44
5.2.1 Päikesepaneelidega lahenduse analüüs .....	45
5.2.2 Päikesekollektoritega lahenduse analüüs .....	46
5.2.3 Elektrituulikuga lahenduse analüüs .....	48
5.2.4 Maasoojuspumba lahenduse analüüs .....	49

5.2.5 Tootmislahenduste analüüsi kokkuvõte.....	51
KOKKUVÕTE.....	52
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	54
LISAD .....	56

## **Lühendite ja tähiste loetelu**

ETA – energiatõhusuarv, millega määratakse energiamärgis tulevasele hoonele

KEK – kaalutud energiaerikasutus, millega määratakse energiamärgis olemasolevale hoonele

kWh/(m<sup>2</sup>a) – kilovatt-tundi ruutmeetri kohta aastas, energiatõhusarvu ja kaalutud energiaerikasutuse ühik

## SISSEJUHATUS

Mure globaalse soojenemise ja fossiilkütuste üha kasvava nappuse tõttu on käima pannud liikumise rohelise maailmavaate poole. Energia on hetkel ühiskonnas üks olulisemaid ressursse ning kogu maailm praktiliselt toetub energia olemasolule. Umbes neljandik Euroopas ja ligi kolmandik Eestis kulutatud energiast kulub just kodumajapidamistes. Selle sektori protsentuaalne osa Eesti kogutarbimisest on jäänud aastate jooksul praktiliselt muutumatuks ning otsitakse lahendusi kodumajapidamiste energiatarbimise osakaalu vähendamiseks. Seetõttu mängib eramute ja hoonete energia kasutuse tõhusus ehk energiatõhusus kasvuhoonegaaside ja energiatarbimise vähendamise poliitikas võtmerolli. Viimase tõttu nõutakse uutelt eramutelt ja ehitistelt head energiatõhusust ning seetõttu tuleb uurida variante püüdluseks energiatõhusa ehitise poole. [1]

Pidevalt karmistuvate nõuete tõttu on oluline uurida, kuidas on võimalik energiatõhususe miinimumnõudeid kõige efektiivsemalt täita. Eesmärk on uurida eramus alternatiivina hoone soojustamise asemel taastuenergiaal põhinevaid tootmislahendusi nagu päikesepaneelid, päikesekollektor, elektrituulik ja maasoojuspump. Tootmislahenduste juures on oluliseks teada saada, kui hästi need lahendused energiatõhususele kaasa aitavad ning ka, milline lahendus on maksumuselt kõige tasuvam ja efektiivsem. Tulemusteni jõudmiseks modelleeritakse arvutitarkvaras energyPRO eramu tarbimine ning lisatakse sellele ühekaupa tootmislahendused. Uuritav kahekorruseline puitmaja on Pärnus asuv suure energiatarbimisega eramaja. Suurem osa tarbimisest kulub kütteenergiaks, kuid ka olmeelektrikulu moodustab arvestatava osa.

Töö koosneb viiest peatükist. Esimeses peatükis on antud ülevaade energiatõhususest ning sellega kaasneva energiamärgise ja energiaklasside selgitus. Teises peatükis on antud ülevaade taastuenergiaal põhinevatest tootmislahendusdest ning analüüsitud, kuidas need hinnanguliselt energiatõhusust parandada suudavad. Kolmandas peatükis on käsitletud maasoojuspumba tarbimise juhtimist ehk paindlikkuslahendust, mille abil on võimalik saavutada rahalist kokkuhoidu. Neljandas peatükis on kirjeldatud energyPRO tarkvara ja seal loodud mudelite ülesehitus ning kasutatavad lähteandmed. Viiendas peatükis on analüüsitud tarkvara abil saadud tulemusi ning leitud nende abil tootmislahenduse efektiivsus energiatõhususe parandamiseks. Lisades on välja toodud mudelite tööskeemid.

# 1. HOONETE ENERGIATÕHUSUS, ENERGIAMÄRGIS JA MIINIMUMNÕUDED

Käesoleva peatüki eesmärgiks on anda ülevaade energiatõhususest. Energiatõhusust väljendatakse energiamärgisega, mis väljastatakse, kas energiatõhususarvu või kaalutud energiaerikasutuse põhjal. Energiatõhususarv on tulevase hoone energiakasutuse prognoos ja kaalutud energiaerikasutus on hinnang olemasolevate mõõtetulemuste põhjal. Energiamärgis jaguneb energiaklassidesse, mis määratakse miinimumnõuete järgi.

## 1.1 Energiatõhusus

Energiatõhusus ehk energiaerikasutuse tõhusus on kasuliku ja kulutatud energia suhe. Kasulikuks saab lugeda lokaalselt taastuvast energiaallikast toodetud energiat, kuid Eestis praeguse seaduse järgi rakendatakse suhte arvutamisel vaid lokaalselt tarbitud osa sellest. Kulutatud energia alla ei lähe ainult hoone kütteks kuluv energia, vaid ka kõik ülejäänud energiakulutused majapidamises, näiteks tarbevee soojendamine, valgustus ja muud elektritarbijad ehk kogu hoone energiaerikasutus määrab ära hoone energiatõhususe. [2]

Lihtsustatult öeldes tähendab energiatõhusus seda, et sama töö jaoks tarbitakse teadlikult vähem energiat või tõstetakse efektiivsust nii tarbimise kui toodangu aspektis. Efektiivsuse tõstmine saavutatakse enamasti energia raiskamise kõrvaldamisega, energiasäästlikumate seadmete ja/või taastuenergia lahenduste rakendamisega. Kui efektiivselt aga seda kõike tehtud on, saab kindlaks määrata kasutades energiatõhususarvu. Energiatõhususarv on prognoos standardtingimustel, mis tehakse oluliselt rekonstrueeritavale hoonele või uuele ehitatavale hoonele. Selle arvutamisel lähtutakse pelgalt eelduslikust energia tarbimisest ja tootmisest. Energiatõhususarv väljendab, kui palju energiat tarbitakse hoones köetava pinna ruutmeetri kohta. Viimase arvutamisel võetakse arvesse ka, millist küttesüsteemi on kasutatud. Kütteenergia liigist sõltuvalt kasutatakse energiakandja kaalumistegureid, mis suunavad rakendama vähem keskkonda saastavaid lahendusi. Energiatõhususarv on leitav järgnevalt:

$$\text{Energiatõhususarv} = \frac{(Q_{\text{aasta}} - Q_{\text{toodetud}} + Q_{\text{võrku müüdüd}}) \cdot C_k}{A}, \quad (1.1)$$

kus  $Q_{\text{aasta}}$  – Hoone aastane energiatarbimine (kWh/a);

$Q_{\text{toodetud}}$  – hoone aastane lokaalselt toodetud taastuenergia (kWh/a) ;

$Q_{\text{võrku müüdüd}}$  – hoone aasta jooksul lokaalselt toodetud taastuenergiast võrku müüdüd energiahulk (kWh/a);

$C_k$  – energiakandja kaalumistegur;

$A$  – hoone köetav pinna suurus (m<sup>2</sup>). [3]

Lihtsamalt saab energiatõhususarvu valemit kasutada ka järgnevalt:

$$\text{Energiatõhususarv} = \frac{Q_{\text{tarnitud}} \cdot C_k}{A}, \quad (1.2)$$

kus  $Q_{\text{tarnitud}}$  – Võrgust tarnitud energia (kWh/a);

Mida väiksem on tõhususarv, seda tõhusam on ka hoone. Energiatõhususarvu väljendatakse enamasti kilovatt-tundi ruutmeetri kohta aastas ehk kWh/(m<sup>2</sup>a).

Rakendatavad energijakandja kaalumistegurid on järgmised:

- 1) taastuvtoormel põhinev kütus, puit ja puidupõhine kütus ning muu biokütus, välja arvatud turvas ja turbabrikett – 0,65;
- 2) kaugküte – 0,9;
- 3) tõhus kaugküte – 0,65;
- 4) kaugjahutus – 0,4;
- 5) tõhus kaugjahutus – 0,2;
- 6) vedelkütus, kütteõli ja vedelgaas – 1,0;
- 7) maagaas – 1,0;
- 8) tahke fossiilkütus – 1,0;
- 9) turvas ja turbabrikett – 1,0;
- 10) elekter – 2,0.

Eelneva loendi põhjal on näha, et elekter kui energiakandja on kõige suurema kaalumisteguriga ning enamik teisi energiakandjaid omavad kaalumistegurit 1,0. Vaid tõhusamate ja taastuvtoormel põhinevate lahenduste kaalumistegurid on väiksemad kui 1,0. Näiteks hoone, mis tarbib elektrikütel 1000 kWh on samaväärne energiatõhususe poolest hoonega, mis tarbib tõhusa kaugküttega umbes 3075 kWh. Võttes arvesse, et hooned on sama suure köetava pinnaga ja kumbki hoone energiat ei tooda, siis on see võrdlus tõestatav energiatõhususarvu valemi 1.1 abil. [4]

## 1.2 Kaalutud erienergiakasutus

Kaalutud erienergiakasutus (edaspidi KEK) erinevus energiatõhususarvust on see, et viimase puhul tehakse prognoos standardtingimustel tulevasele hoonele. KEK puhul kasutatakse reaalseid mõõtetulemusi ja arvutatakse mineviku või oleviku olukorra kohta. Lisaks on KEK taandatud ka normaalaasta õhutemperatuuride järgi, sest aastate temperatuurid on väga kõikumad. Kuna Eestis on ka piirkonniti suured ilmastiku

erinevused, siis on välja pakutud lahendus, kus on Eesti on jagatud kuueks piirkonnaks (vt joonis 1.2). Igas piirkonnas on kasutatud võtmepiirkonna mõõtetulemusi, mille järgi normaalaasta kraadpäevi arvutustes kasutatakse. KEK arvutamine käib järgnevalt:

- 1) Määratakse köetava pinna suurus ehitisregistri andmete alusel
- 2) Määratakse hoone asukoha järgi piirkond (vt joonis 1.2)
  - I piirkond, kuhu kuuluvad Ida-Viru ja Lääne-Viru maakond;
  - II piirkond, kuhu kuuluvad Järva, Jõgeva, Rapla, Tartu ja Viljandi maakond;
  - III piirkond, kuhu kuulub Harju maakond;
  - IV piirkond, kuhu kuuluvad Põlva, Valga ja Võru maakond;
  - V piirkond, kuhu kuuluvad Lääne ja Pärnu maakond;
  - VI piirkond, kuhu kuuluvad Hiiu ja Saare maakond.
- 3) Määratakse aasta kraadpäevad joonisel 1.1 näidatud ilmajaamades mõõdetud ööpäeva keskmiste välisõhu temperatuuri andmete alusel;
  - Energiamärgise andmisel võetakse hoone tasakaalutemperatuuriks alati 17 °C.
- 4) See järel arvutatakse:
  - küttesoojusekulu, taandades keskmise normaalaasta kraadpäevade arvu alusel ja korrutades läbi punktis 1.1 toodud energikandjate kaalumisteguriga:

$$Q_{\text{tan, küte}} = (Q_{\text{teg, küte}} \cdot \frac{S_N}{S_{\text{teg}}}) \cdot C_k \quad (1.3)$$

kus  $Q_{\text{tan, küte}}$  – küttesoojuse taandatud kulu (MWh/a);

$Q_{\text{teg, küte}}$  – küttesoojuse kulu vaadeldaval täisaastal (MWh/a);

$S_N$  – normaalaasta kraadpäevade arv;

$S_{\text{teg}}$  – kraadpäevade arv vaadeldaval täisaastal;

$C_k$  – energiakandja kaalumistegur;

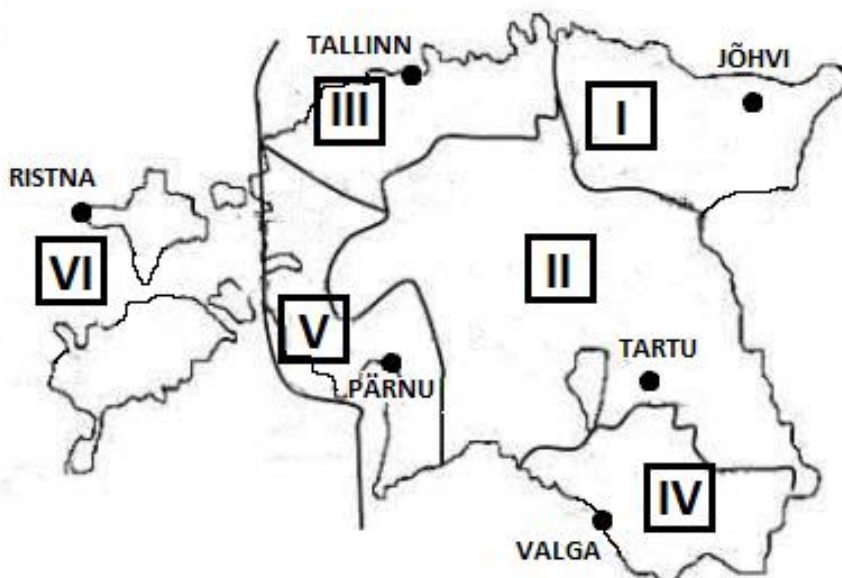
- soojusenergia kulu tarbevee soojendamiseks  $Q_{\text{tarbevesi}}$ , korrutades läbi energiakandja kaalumisteguriga (MWh/a);
- keskmine elektrienergia kulu  $Q_{\text{el.e}}$ , korrutades läbi energiakandja kaalumisteguriga (MWh/a);
- keskmine gaasi kulu  $Q_{\text{gaas}}$ , mida ei ole tarbitud küttesoojuse saamiseks, korrutades läbi energiakandja kaalumisteguriga (MWh/a);
- keskmine kaalutud normaalaasta energiakasutus (MWh/a), liites kõik eelnevad kokku:

$$Q_{\text{sum}} = Q_{\text{tan, küte}} + Q_{\text{tarbevesi}} + Q_{\text{el.e}} + Q_{\text{gaas}} \quad (1.4)$$

- keskmine kaalutud energiaerikasutus  $q_{\text{sum}}$ , jagades eelneva teisendatud tulemuse köetava pinnaga kWh/(m<sup>2</sup>a):

$$q_{\text{sum}} = 1000 \cdot \frac{Q_{\text{sum}}}{A_{\text{köetav}}}, \quad (1.5)$$

kus  $A_{\text{köetav}}$  – köetava pinna suurus. [3]

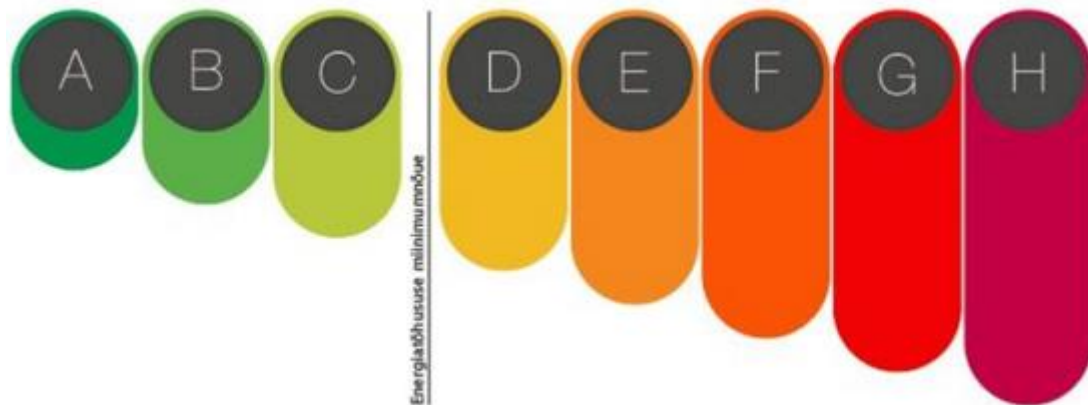


Joonis 1.1 Eesti erinevate piirkondade jaotumine kliimaatiliste tingimuste alusel [5]

### 1.3 Energiamärgis ja miinimumnõuded

Energiatõhususarvu või kaalutud erienegiakasutuse põhjal väljastatakse kindla hoone või selle osa kohta dokument, mida nimetatakse energiam rgiseks. Olemasolevale hoonele, millele ei ole planeeritud olulist rekonstrueerimist, antakse energiamärgis kaalutud erienegiakasutuse põhjal. Energiamärgis koosneb kaheksast energiaklassist (A-st kuni H-ni, joonis 1.2), mis näitavad, kui energias astlik antud objekt on. Elamute puhul on kasutatakse seitset klassi (A-G), muude hoonete puhul kaheksat (A-H). A-klassi märgis antakse kõige vähem kulutuvale hoonele ja H-klass kõige energiakulukamale hoonele. Energiam rgist väljastatakse ka seadmetele, et näidata nende t o energia kasutamise efektiivsust, kuid viimasel juhul kasutatakse seadmete energiatõhususe paranemisega seoses lisaklasse A+++ , A++ ja A+. Enamikel juhtudel enam klassid E,F ja G seadmete puhul kasutusel ei ole. [2]





Joonis 1.2 Hoonete energiaklassid värviliselt koos miinimumnõudejoonega [6]

Hoone energiaklassi määramisel võetakse arvesse mitte ainult energiatõhusarvu, vaid ka hoone otstarvet. Hoone otstarbest sõltuvalt muuvad ka energiaklasside nõuded. Määruse "Nõuded energiamärgise andmisele ja energiamärgisele" lisa 3 järgi on toodud allolevasse tabelisse 1.1 väikeelamu köetava pinnaga 120–220 m<sup>2</sup> energiaklasside jagunemine, mis algab 120 kWh/m<sup>2</sup> kohta ja tõuseb kuni C klassini 20 võrra klassi kohta ja sellest järgnevad klassid 50 kWh kaupa.

Tabel 1.1 Väikeelamu köetava pinnaga 120–220 m<sup>2</sup> ja ridaelamu energiatõhususarvu (ETA) või kaalutud energiaerikasutuse (KEK) klassi skaala [6]

ETA või KEK	Energiaklass
ETA või KEK ≤ 120	A
121 ≤ ETA või KEK ≤ 140	B
141 ≤ ETA või KEK ≤ 160	C
161 ≤ ETA või KEK ≤ 210	D
211 ≤ ETA või KEK ≤ 260	E
261 ≤ ETA või KEK ≤ 330	F
331 ≤ ETA või KEK ≤ 400	G
ETA või KEK ≥ 401	H

Näiteks A-klassi nõuete täitmiseks peab hoone energiakasutus olemasõltuvalt hoone tüübist vahemikus 65-170 kWh/m<sup>2</sup>.a Joonisel 1.2 on ka näha C ja D-klassi vahel energiatõhususe miinimumnõude joont, mis kehtib oluliselt rekonstrueeritavatele hoonetele. Joonest vasakule jäävad aksepteeritavad klassid ja paremale miinimumnõuetele mittevastavad klassid, mis tähendab, et hoone ehitust või olulist rekonstrueerimist ei hinnata mõistlikuks ning seetõttu ei väljastata ehitusluba. [2]

## 1.4 Liginullenergia- ja Madalenergiahooned

Alates 2020. aastast peavad kõik uued ehitatavad hooned olema liginullenergiahooned ehk vastama A-energiaklassi nõuetele ning hoone olulisel rekonstrueerimisel C-klassi nõuetele. Oluline aspekt, mida tuleb arvestada väikeeramute juures, on see, et alates 2020. rakendatakse A-klassi nõuet ainult üle 220-ruutmeetristele väikeelamutele ja nendest väiksematele kehtib B-klassi nõue. Vastavaid määruseid aga uuendatakse iga 5 aasta tagant ning tulevikus tõenäoliselt nõutakse ka renoveeritavatelt objektidelt madalenergiahoone ehk B-klassi märgist. Viimasest madalamaid klasse võib mõista vähem energiatõhusamatena. [2]

Madalenergiahoonet kirjeldatakse definitsiooni järgi kui energiatõhusate ja taastuenergiatehnoloogia lahendustega tehniliselt mõistlikult ehitatud hoone, mille puhul ei eeldata lokaalset elektri tootmist taastuvast energiaallikast. See tähendab, et B-klassi miinimumnõude täitmiseks ei ole kohustuslik toota elektrit, millest aga järeldeb, et hoone energiatarbimine on madal ja/või hoone ise ja kasutatavad lahendused on väga energiasõbralikud. [2]

Liginullenergiahoone ehk A-klassi energiamärgisega hoone kohta kehtib nõue, et antud krundil või kruntide kompleksis (energiaühistu põhimõte) toodetakse taastuvallikal põhinevat energiat. Lisaks tuleb arvestada, et liginullenergiahoone all mõistetakse ka hoonet, mis tarbib kinnistuvälist energiat ja/või on ka ühenduses näiteks elektri- või gaasivõrgus. Liginullenergiahoonet ise võib kirjeldada kui energiatõhusate ja taastuenergiatehnoloogia lahendustega tehniliselt mõistlikult ehitatud hoonet. [3]

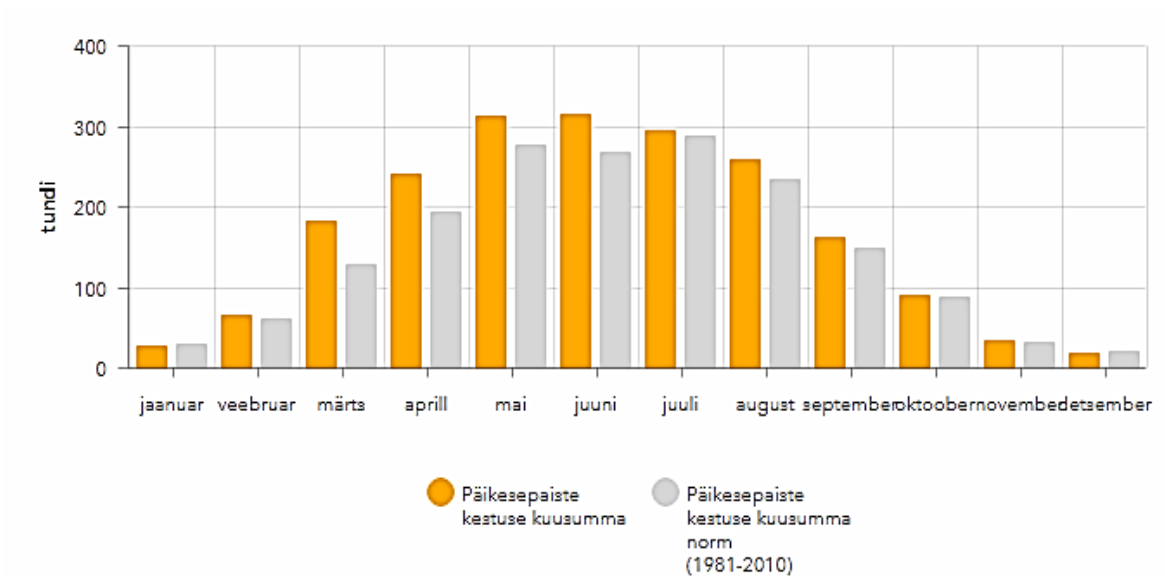
## **2. Tootmislahenduste analüüs energiatõhususnõuete täitmiseks**

Saavutamaks energiatõhusat maja on vaja, kas toota ja tarbida sellest toodetavast energiast ligilähedale energiakuluga ja/või vähendada hoone energiakulu ehituslikke lahendustega, näiteks parem soojustus, soojapidavamad aknad jm. Liginullenergiahoonet ehk A-energiaklassi hoonet ei ole praktiliselt võimalik saavutada ilma lokaalse taastuenergia lahendusel toimivat tootjat kasutamata, sest taastuenergiast tarbitud energiat ei arvestata energiatõhusarvu või kaalutud energiaerikasutuse arvutamisel. Seetõttu on ka uurimise alla võetud neli järgnevat taastuenergiat põhinevat lahendust, mida on ka kodumajapidamises võimalik efektiivselt rakendada:

- Päikesepaneelid
- Päikesekollektor
- Elektrituulik
- Maasoojuspump

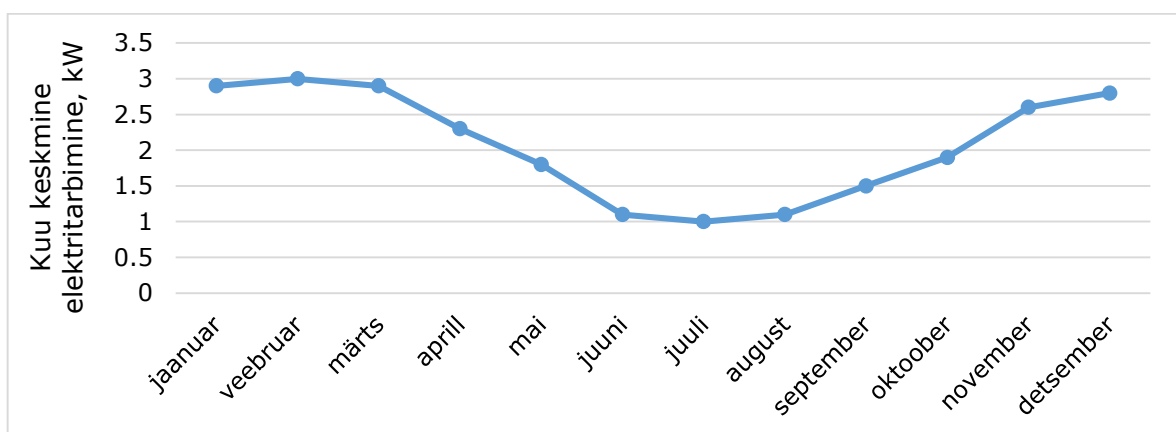
### **2.1 Päikesepaneel**

Päikeseenergiat ehk päikeseikiirguse energiat kasutatakse nii soojuse kui elektri tootmiseks, sest see on üks võimsam ja suurima energiahulgaga taastuenergia lahendus. Eestis jõuab selge taeva korral jõuab maapinnani sekundis ligikaudu 1 kilovatt ruutmeetri kohta, tunnis teeb see 1 kWh/m<sup>2</sup>. Küll aga suudab päikesepaneel temale langevast päikeseikiirgusest vaid väikest osa elektrienergiaks muundada, umbes 20%,. Jooniselt 2.1 on näha Eesti 2020. meteoroloogia aastaraamatu päiksepaikse kestuse kuusumma graafikuid ja kui neid võrrelda tavapärase elamu aastase koormusgraafikuga (joonis 2.2), siis on näha, kuidas tegelikkuses graafikud on kohati üksteisele vastandlikud. [7]



Joonis 2.1 Eesti keskmised 2020. aasta päikesepaiste kestuse kuusummad koos 1981-2010 aastate keskmisega [8]

Suvel on päikest rohkem ning siis on võimalik ka rohkem elektrienergiat toota, aga seetõttu tekib ka probleem, sest suviti on elektrienergia tarbimine enamasti oluliselt väiksem. Seetõttu varasemalt kirjeldatud energiatarbimise nõuete täitmiseks ei ole päikesepaneeli lahendus kõige parem lahendus. Põhjuseks on see, et arvestati tehakse võrgust tarnitud energiakoguse põhjal ja sealt ei arvestata maha lokaalselt toodetud ning võrku müüdud energiat. Seega päikesepaneelid katavad edukalt ainult suve ja mõne eelneva ja järgneva kuu päevase tarbimise. Seega aastane tarnitud energiakogus väheneb ainult mõne kuu päevase tarbimise võrra ning selle arvelt ka energiatarbimise väga ei tõuse.



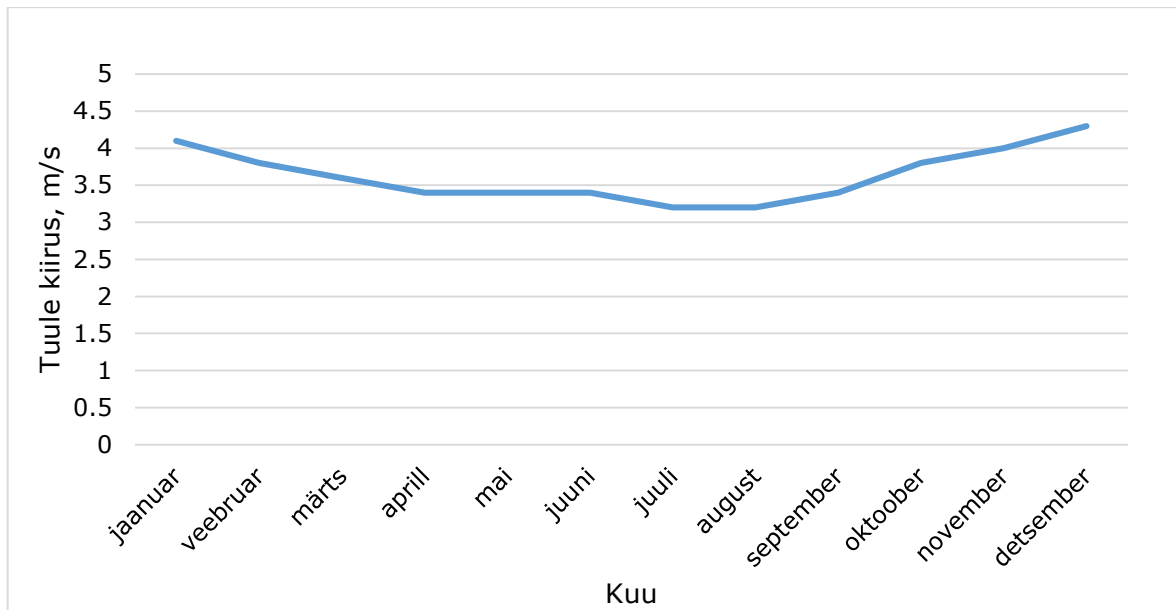
Joonis 2.2 Eramaja 2020. aasta koormusgraafik kuude keskmise löikes. [9]

## 2.2 Päikesekollektor

Päikesekollektor on seadeldis, millega päikeselt neelduva soojuseenergia köetakse seadmes olevat soojuskandjat ja viimase abil köetakse ka vett. Kollektor on oma tootmistehnoloogia poolest väga sarnane päikesepaneelidega ja energiatõhususe vaatevinklist omab üsnagi sama probleemi. Erinevus tuleb sisse sellest, et kollektor toodab soojusenergiat, mis tähendab, et võrreldes päikesepaneelidega ei tule energiat muundana elektrienergiaks, vaid saab kasutada kohe neeldumisel tekkivat soojusenergiat. Soojusenergia kohta saab öelda ka, et seda energialiiki on lihtsam ja soodsam salvestada. Tegelikuses toimub päikesekollektoritega salvestamine pidevalt, sest soojusülekanne kollektorilt õhku toimub aeglaselt. Lisaks kasutatakse kollektoritega koos akumulatsioonipaake ehk akupaake, mis on disainitud just selle eesmärgiga, et salvestada sooja tarbevee temperatuuri, mis saadakse kollektori soojuskandjalt. Võrreldes päikesepaneelidega ongi päikesekollektorid efektiivsemad energiatõhususe kasvatajad, sest lisandub salvestusvõimalus. Samas suure elektritarbimisega hästi soojustatud hoonetes päikesekollektoriga elektritarbimist katta ei saa ning energiatõhusust vähendatakse minimaalselt.

## 2.3 Elekrituulik

Teine efektiivne taastuenergia lahendus põhineb tuuleenergial. Eesti, kui mereäärne riik, on optimaalne asukoht, kus tuuleenergiat ära kasutada. Võrreldes päikeseenergiaga on siinkohal võimalik pidevam energiavoog kätte saada, kuid tegelikuses on ka siin nõ. tõusud ja mõõnad. Takistuseks ei ole enam vaid päevane energiaallikas, mis tähendab, et ka osa öisest tarbimisest saab kaetud. Suureks probleemiks elekrituuliku paigaldamisel on asukoha valik, sest tuult ei ole kõikjal ning linnaoludes on väga palju tuuletakistusi erinevate hoonete näol. Võrreldes eramaja aastast koormusgraafikut (joonis 2.2) ja allolevat keskmise tuulekiiruse graafikut (joonis 2.3), siis on näha, et graafikud on üsna samasuguse kõveraga. Eramu energiatarbimine kui ka tuulekiirus on talvistel perioodidel suurem, mis tähendab, et tuuleenergiat saab kasutada otseselt tarbimisvajaduste katteks. See toob kasu ka omakorda energiatõhususele, sest võrgust elektrienergia tarne väheneb kõvasti. Elekrituuliku paigaldamise puhul aga tuleb arvestada, et asukoht peab olema selline, kus on pidev ja piisavalt kiire tuul. Heaks keskmiseks kiiruseks võib lugeda 5 m/s, millega sõltuvalt tarbimisest peaks vastava elekrituulikuga enamuse katmine võimalik olema. [10] [11]



Joonis 2.3 Pärnu keskmine tuulekiirus aastatel 1991-2020 [12]

## 2.4 Maasoojuspump

Geotermaalenergia ehk maapõueenergia on maa sisemuses leviv soojusenergia, mida kasutatakse kütte- ja tarbevee soojendamiseks. Võrreldes kõigi eelnevate lahendustega on maasoojus alati kättesaadav ja praktiliselt ei sõltu keskkonnatingimustest. Lisaks viimasele saab nimetada sellist tootmist ja tarbimist nõ. roheliseks, sest maapõues toimub pidevalt ainete lagunemine ja soojuse tekkimine ehk kasutatud energia toodetakse tagasi. Viimase tõttu loetakse seda ka taastuvaks energiaallikaks ja kogu soojuspumpade toodang arvestatakse täielikult taastuenergia alla. Geotermaalenergia abil soojusenergia tootmine on väga keskkonnasäästlik, stabiilne ja jätkusuutlik. Suurim erinevus maasoojuspumbal teiste lahendustega on see, et ta vajab töötamiseks elektrienergiat. Kuigi maasoojuspumbaga toodetud energiat loetakse roheliseks, siis pumba töötamiseks vajaminev energia arvestatakse ikkagi energiatõhususe arvutustes. Maasoojuspumpade soojustegur, mis näitab millise suhtega suudab pump elektrienergiast soojusenergiat toota, jääb vahemikku umbes 4-5. See tähendab, et varasemalt kütteks või tarbevee soojendamiseks kuluv 5 kWh suudetakse ära teha 1-1,25 kWh elektrienergiaga. Suureks boonuseks on võimalus töötada iga kell, kaotamata oma suurt efektiivsust, aga nagu päikesekollektori puhul pole võimalik elektritarbimist katta.

## 2.5 Tootmislahenduste analüüsi kokkuvõte

Kõik eeltoodud lahendused omavad mingil määral kasu energiatõhususe parandamiseks. Kõik on lokaalsed tootmisallikad ja kogu energia, mis on kohapeal toodetud ja ära tarbitud, parandab energiatõhususe arvutustulemusi. Päikesepaneeli,

päikesekollektori ja elektrituuliku toodang sõltub vastava sisendenergia olemasolust (vt. tabel 2.1) ja seetõttu ei ole võimalik pidevalt energiat toota. Maasoojuspumbaga aga seda probleemi ei esine, sest kasutatakse geotermaalenergia, mis on alati kättesaadav. Pumba miinuseks on võrreldes teistega see, et vajab sisendenergiana elektrienergiat ehk täielikult kulutusi nullida pole võimalik.

Tabel 2.1 Tootmislahenduste võrdlus erinevates aspektides

<b>Lahendus</b>	<b>Päikesepaneel</b>	<b>Päikesekollektor</b>	<b>Elektrituulik</b>	<b>Maasoojuspump</b>
<b>Sisendenergia</b>	Päike	Päike	Tuul	Maasoojus ja elekter
<b>Väljundenergia</b>	Elekter	Soojus	Elekter	Soojus
<b>Toodang</b>	Päikse olemasolul	Päikse olemasolul	Tuule olemasolul	Alati
<b>Toodangu kattuvus tarbimisega</b>	Väike (suviti)	Väike (suviti), aga lisaks salvasetamine	Üsna hea	Alati, vastavalt vajadusele
<b>Energiakulu</b>	Ainult taastuvenergia ehk praktiliselt puudub	Ainult taastuvenergia ehk praktiliselt puudub	Ainult taastuvenergia ehk praktiliselt puudub	Elektrikulu, umbes viiendik soojusenergia tarbimisest
<b>Paigaldamine</b>	Praktiliselt kõikjale	Praktiliselt kõikjale	Ainult tuulerohketesse ja hajaasustuse piirkondadesse	Praktiliselt kõikjale
<b>Soojustarbimise katmine</b>	Halvim	Natuke	Päris hea	Parim
<b>Elektritarbimise katmine</b>	Natuke	Väga väike	Parim	Väga väike

Kui aga võrrelda tavamajapidamise aastast tarbimisgraafikut aastase toodangu ja/või sisendenergia aastase graafikuga, siis kindlad juhid selle valdkonnas on elektrituulik ja maasoojuspump. Seda seetõttu, et aasta keskmise tuulekiiruse graafik on väga sarnane tarbimisgraafikuga ning soojuspumba tööks vajaminev maasoojus on alati kättesaadav. Selle põhjal võib järeldada, et maasoojuspump on parim lahendus, sest vastava lahendusega on võimalik katta kogu soojuse tarbimine. Väga hea tulemuse energiatõhususe vähendamiseks annab ka elektrituulik ning seejärel tulevad päikesekollektor ja viimaseks päikesepaneel. Kui aga tegemist on suure elektritarbimisega ja väikse soojustarbimisega hoonega, siis pole päikesekollektoris ja maasoojuspumbast väga kasu, sest viimastega elektrienergiat toota ei saa. Siinkohal oleks väga hea jällegi kasutada elektrituulikut, mis suudab üsna hästi ära katta

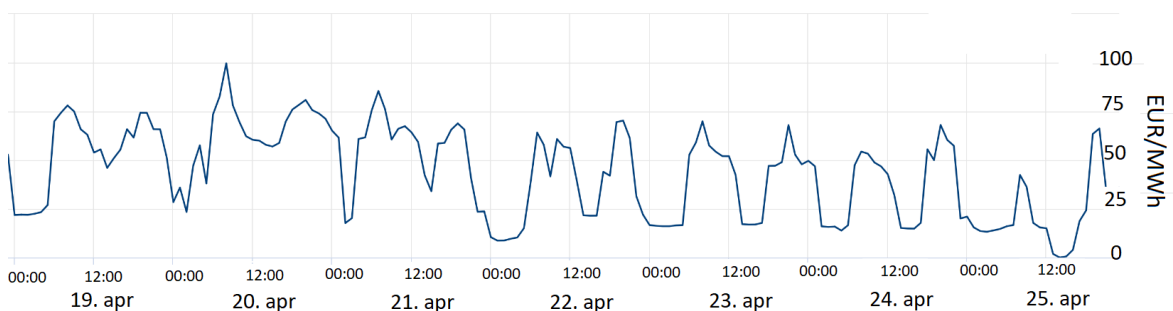
tarbimisvajadused ja tõstab seeläbi energiatõhusust kõvasti. Päikesepaneelid suudavad katta mingil määral suvist päevast elektritarbimist ning seetõttu väga energiatõhusust ei tõsta. Kuna aga elektrituuliku paigaldamisel mängib asukoht väga suurt rolli, siis võrreldes teistega see valikusse ei pruugigi kuuluda. Näiteks visuaalse reostuse, müra või kohaliku omavalitsuse määruste tõttu on väga keeruline linnaruumi elektrituulikut paigaldada.



### 3. PAINDLIKKUSLAHENDUS KASUTADES MAASOOJUSPUMPA

Energiatõhususe uurimisel on arvesse võetud ka tarbija jaoks väga olulist finantsilist aspekti ning seetõttu mängivad ka lahenduste maksumused ja tasuvused suurt rolli. Maasoojuspump on ainuke välja toodud lahendustest, mis vajab töötamiseks sisendenergiat, milleks on elektrienergia. Seetõttu pole võimalik maasoojuspumbaga ühelgi ajahetkel kulusi täielikult nullida ilma paindlikkuslahendust kasutamata.

Paindlikkuslahendus kujutab endast mitut kombineeritud lahendust, kuidas vähendada elektrikulusid. Üks variant selleks on kasutada elektribörsi paketti. See tähendab, et elektri hind sõltub Nordpoolspot elektribörsist, mitte ei ole fikseeritud teenuspakkuja poolt. Elektribörsi hind on tunnis muutuv ja see tähendab, et sama energiakulu eest võib hind kallim olla. Aga ainult elektri börsihinnaga kauplemist ei piisa, vaid oluline on ka suunata oma energiatarbimine aega, kus elektri hind on odavam ning tänu sellele rahalist kokkuhoidu saavutada. Kõigi seadmete kasutusaegu ei ole küll võimalik muuta, aga näiteks pesumasinat ja kuivatit on võimalik tööle rakendada just siis, kui on teada, et elektri hind on odavam. Viimase teeb eriti lihtsaks asjaolu, et kauplemine börsiturul toimub põhiliselt päev ette põhimõttel. See tähendab, et järgmise päeva elektri hinnad väljastatakse eelmisel päeval kell 15.00. Jooniselt 3.1 on näha 2020. aasta aprillikuu viimase nädala elektri hind Nordpoolspoti elektribörsil. Jooniselt on näha, et hinnad langevad öötundidel ja ka peale lõunat umbes poole võrra olenemata päevast. Vahemikus kell 23-05 ja päeval kell 14-16 on elektri hind tavaliselt alla 0,025 €/kWh. Ülejäänud ajal, millal tarbimine on hommikutundidel ja lõunal suurem, on kilovatt-tunni hind umbes 0,06€. Sellist hinna muutumise trendi on näha ka teistel nädalatel. Seega on võimalik, teatud tarbijate töö eest maksta üle poole vähem.[13]



Joonis 3.1 Nordpoolspoti elektribörsi nädala (19.04-25.04.2020) elektri hind (€/MWh) [14]

Enamik turul olevatest maasoojuspumpadest on varustatud targa kontrolleri-ga, mis võimaldab võrgust juhtimist ja muid lisafunktsioone. Näiteks on võimalik maasoojuspump panna töötama teatud ajavahemikes. Targematele süsteemidele on sisse programmeeritud ka moodul, mis järgib elektri börsihinda. Antud süsteem saab

eelneval päeval börsihinnad tundide lõikes ning oskab suunata oma tarbimist odavamatesse perioodidesse. Sellega kaasneb aga kohustus kütta soojuspumbas ja akupaagis temperatuur tavapärasest kõrgemaks, et ka eesolev küttevajadus saaks täidetud salvestatud energia abil. Antud lahendus toimib ja toob kasu maasoojuspumba võimel hoida kütte- ja tarbevee temperatuuri väikesema energiakuluga võrreldes kütmiseks vajamineva suurema energiahulgaga olukorras, kus elektri hind on kallim. Kütmistemperatuuri tõstmine tähendab küll suuremat tarbimist aga odavama hinnaga ning seeläbi on võimalik saavutada, mingil määral rahalist võitu. Sellist lahendust on võimalik kasutada ka koostöös teiste taastuvenergia tootmislahendustega. Näiteks päikesepaneelide kasutamisega saab maasoojuspumba tööaega suunata päevasesse aega, kui paneelid tavaliselt rohkem toodavad kui hoones hetketarbimine on. See toob kasu ka energiatõhususe aspektist, sest soojusenergia tootmist suunatakse aega, kus toimub lokaalne tootmine ning seeläbi vähendatakse võrgust tarnitud elektrihulka. [15]

## 4. MODELLEERIMISTARKVARA ENERGYPRO MUDEL

Eramu energiatõhususe parandamise uurimiseks on vaja teada taastuenergia põhinevate tootmislahenduste tunnipõhist toodangut aasta lõikes. Lisaks sellele on eesmärk ühildada toodangu- ja tarbimisgraafikuid, et oleks võimalik teada, kui palju toodetud energiast tarbitakse lokaalselt ära. Arvutuste ja tulemuste saamise lihtsustamiseks ja kiirendamiseks tuleb kasutada arvutitarkvara. Tarkvara valikuks osutus energyPRO, sest see on Tallinna Tehnikaülikoolis õppetöös kasutatav ning antud uurimise jaoks väga sobilik. Seda seetõttu, et programmiga on võimalik simuleerida kõiki uurimises olevaid tootmislahendusi ning analüüsida lahenduste aasta-, kuu- ja tunnipõhist toodangut, samamoodi ka elektri- ja soojusenergia tarbimist ning rahavooge.

EnergyPRO on Windowsi operatsioonisüsteemis kasutatav modelleerimise tarkvarapakett, mida kasutatakse tehnilis-majanduslike analüüside teostamiseks erinevate energiatootmisviiside jaoks. Programmiga on võimalik optimeerida keerulisi energiaprojekte ja samuti modelleerida kõikvõimalike taastuenergia lahendusi. Kasutades väga paljusid sisendandmeid saab luua mudeli võimalikult ligilähedasele tegelikkusele. Tarkvara on väga paindlik ning võimaldab tootmislahenduste töö juhtimist vastavalt soovidele, et luua majanduslikult ja/või energia toodangu poolest parim lahendus. EnergyPRO tarkvara väljastab mudelite arvutustulemusi nii graafikutena kui ka tabelitena. [16]

Antud töös on uurimise alla võetud eramu, millele on modelleeritud neli erinevat mudelit nelja varasemalt analüüsitud tootmislahenduse kohta:

- päikesepaneelid;
- päikesekollektor salvestiga;
- elektrituulik;
- maasoojuspump salvestiga.

Keskkonna sisendandmeteks on kasutatud programmi poolt arvutatud tunnise vahega lähteandmed, mis on arvutatud eelnevate aastate põhjal. Arvesse on võetud projekti koostamisel järgnevaid parameetreid:

- päikesekiirguse aegrida 2020. aastal;
- õhutemperatuuri aegrida 2020. aastal;
- tuulekiiruse aegrida 2020. aastal;
- eramu elektri ja soojuse tarbimine;
- seadmete tehnilised parameetrid;
- seadmete maksumused ilma käibemaksuta;

- elektri börsihinna ja võrguteenuse 2020. aasta aegrida ning muud elektrienergiaga seotud maksed.

## 4.1 Eramu kirjeldus

Uuritav hoone asub Pärnu linnas Ülejõe linnaosas aadressil Lubja 22a/2 (edaspidi eramu, joonis 4.1). Eramu on ehitatud aastatel 1999-2000 ja on kahekorruseline. Alumistel korrustel on tööruum, puukuur, saun ja garaaž. Teiselt korruselt leiab eluruumid, milleks on kolm magamistuba, elutuba, köök, tualett ja esik. Eramu pind on kokku 138,9 m<sup>2</sup>, millest köetav osa hetkel eluruumide ja saunaga on 94,2 m<sup>2</sup>. Jooniselt 4.1 punase piirdega nähtava krundi suurus on 1457 m<sup>2</sup>.



Joonis 4.1 Lubja 22a/2 eramu ja krunt. [17]

Esimene korrus on ehitatud kiviseintest ja soojustamisel on kasutatud vahtpolüstüreeni ehk tavakeeli penoplasti. Teisel korrusel on pool eramu välisseintest soojustatud kivivillaga ja ülejäänud saepuruga. Mõlemal juhul on kasutatud ka tuuletõket ja puitvoodrit. Vastav soojustus võiks küll oma omaduste poolest olla piisav, aga tegelikkuses on paigaldatud soojustuskihid liiga õhukesed ning seetõttu toatemperatuur tavapärasest rohkem sõltuv välistemperatuurist. Majas on nüüdseks kasutatud kütmiseks maasoojuspumpa, kuid uurimise teostamiseks võetakse periood kui kasutati

elektriradiaatoreid, mis tähendab, et kütmiseks kasutati vaid elektrit. Majas on ka kamin, kuid vähese kasutamise tõttu ei arvestata seda kui kütteallikat antud uuringus. Tulevikus on soov kogu eramut kütma hakata, mis tähendab, et köetav pind tõuseks 94,2 ruutmeetrit 138,9 ruutmeetriks. Arvutuste tegemisel võetakse viimast arvesse.

Uurimise alla on võetud eramu 2014. aasta elektri- ja soojusenergia tarbimine. Hoone aastane elektritarbimine oli antud aastal ligikaudu 23,2 MWh. Eelneval aastal oli tarbimine 23,9 MWh ja järgneval aastal 21 MWh, mille põhjal saab järeldada, et üsna tavapärane aasta, sest eelnev aasta oli pisut külmem ja järgnev pehmem. Eramu aastane elektritarbimine langes peale maasoojuspumba paigaldamist 9200 kWh-ni ja tänu maasoojuspumba ette paigaldatud elektriarvestele on teada, et maasoojuspumba tarbimine oli kogutarbimisest umbkaudset 5 MWh. See tähendab, et olmeelekter ehk püsitarbijad nagu külmkapp ja vahelduvad tarbijad nagu valgustid ja praeahi, moodustavad energiatarbimisest aastas 4,2 MWh. Kuna olmeelektri tarbimises suuri muutusi toimunud ei ole, saab arvutuslikult leida 2015. aasta hoone kütteks kuluva energia.

*Kütteks kuluv energia = kogu aastane elektri tarbimine - olmeelektriks kuluv energia*

$$\text{Kütteks kuluv energia} = 23,2 - 4,2 = 19 \text{ MWh}$$

Võttes arvesse, et kogu maja on nõrgalt soojustatud ja toetub vaid elektriradiaatoritele, moodustas eramu kütteks kuluv energia hinnanguliselt pea 5/6 energia tarbimisest. Umbes 80% sõltuvalt aastast kulub just hoone kütmisele ja tarbevee soojendamisele ning see on koht, mille arvelt on võimalik energiatarbimist tõsta, kas langetades energiakulusid või tootes lokaalselt taastuvenergia allikal põhineva lahendusega energiat. Tõenäoliselt elektri tarbimise muutust lähi aastakümnetel ei toimu, sest kõik vajalikud elektriseadmed on olemas ja töökorras ning valgustus on üle viidud LED-idele. Eelmises punktis mainitud köetava pinna tõusuga arvestatakse juurde ka protsentuaalselt (+47,5%) kütmisskulude tõusu. Sama kütteleahenduse kasutamine tõstaks soojustarbimise umbes 28 MWh-ni, mis tähendaks, et kogu energiatarbimine tõuseb lausa 32,2 MWh-ni.

#### **4.1.1 Energiatõhusus hetkel**

Alapeatükis 1.2 välja toodud tingimuse kohaselt tuleb olemasolevale hoonele energiamärgise andmiseks kasutada arvutamisel kaalutud erienergiakasutust (edaspidi KEK). Määrus "Hoone energiatarbimise miinimumnõuded" paragrahv 9. järgi rakendatakse elektri kasutamisele kaalumistegur 2,0, sest elektrienergiaga hoone kütmist vaadeldakse keskkonnale kahjulikumana kui teised energiakandja liigid. See tähendab, et kogu elektrienergia, mis eramus kulutatakse kütteks ja kasutuseks tuleb

korrutada kahega. Antud eramu juhul tähendab see soojustarbimist KEK leidmisel ligi 56 MWh ja elektritarbimist 8,4 MWh. Eramu KEK leidmiseks esmalt taandatakse soojustarbimine normaalaasta kraadpäevade arvu alusel. Kraadpäev väljendab ühe kraadi erinevust arvestusliku sisetemperatuuri (tavaliselt võetakse selleks 17 °C, sest osa küttevajadusest saavutatakse inimeste, elektriseadmete ja muude soojust eritavate abil) ja ööpäeva keskmise välisõhu temperatuuri vahel. Kliima erinevuste tõttu ei saa kogu Eestis rakendada valemis sama normaalaasta kraadpäevade arvu ning seetõttu on Eesti jagatud kuueks piirkonnaks. Eramu asub Pärnu tsoonis ehk V piirkonnas. KEK arvutamisel võetakse tasakaalutemperatuuriks alati 17 °C. Tallinna Tehnikaülikooli uurimistöö "Eesti kraadpäevad" kohaselt on Pärnu normaalaasta kraadpäevade arv on 17 °C juures 4070. KredExi kodulehelt leitava kraadpäevade statistikast on näha, et 2014. aastal oli Pärnu kraadpäevade arv 17 °C juures 3824. Normaalaasta kraadpäevade arvu alusel taandatud küttesoojuse kulu (MWh/a) arvutatakse valemi 1.3 põhjal: [5] [18]

$$Q_{\text{tan, küte}} = Q_{\text{teg, küte}} \cdot \frac{S_N}{S_{\text{teg}}},$$

kus  $Q_{\text{tan, küte}}$  – küttesoojuse taandatud kulu (MWh/a);

$Q_{\text{teg, küte}}$  – küttesoojuse kulu vaadeldaval täisaastal (MWh/a);

$S_N$  – normaalaasta kraadpäevade arv;

$S_{\text{teg}}$  – kraadpäevade arv vaadeldaval täisaastal.

$$Q_{\text{tan, küte}} = 56 \cdot \frac{4070}{3824} \approx 59,6 \text{ MWh/a,}$$

Küttesoojuse taandatud kulule liidetakse veel juurde energiakandja kaalumisteguriga läbi korrutatud elektritarbimine ning seejärel leitakse KEK järgnevate valemiga (valemid 1.4 ja 1.5).

$$Q_{\text{sum}} = Q_{\text{tan, küte}} + Q_{\text{elekter}},$$

$$q = 1000 \cdot \frac{Q_{\text{sum}}}{A_{\text{köetav}}},$$

kus  $q$  – Hoone aastane kaalutud energiaerikasutus ehk KEK (kWh/m<sup>2</sup>a);

$Q$  – Hoone keskmine kaalutud normaalaasta energiakasutus (MWh/a);

$A_{\text{köetav}}$  – Hoone köetav pindala.

$$Q_{\text{sum}} = 59,6 + 8,4 = 68 \text{ MWh,}$$

$$q = 1000 \cdot \frac{68}{138,9} \approx 496,76 \text{ kWh/m}^2\text{a,}$$

Eramu KEK arvutuslikult on umbes 497 kWh/m<sup>2</sup>a. Sama lahenduskaiguga oli eelneva aasta põhjal KEK 485 kWh/m<sup>2</sup>a ja järgneva aasta põhjal KEK 479 kWh/m<sup>2</sup>a. Valitud

aasta KEK on küll pisut kõrgem kui teised, aga üsna väikse erinevusega. Tabeli 1.1 põhjal kuulub eramu energiaklassi H, mis on tagant poolt viimane ehk väga kehva energiatõhususega hoone.

## 4.2 Päikesepaneeli sisendandmed ja selgitus

Päikesepaneelide modelleerimisel (plokk skeem lisas 1.) on kaks keskkonnast sõltuvat parameetrit, mille sisendandmed saadakse tarkvara poolt:

- päikeseikiirgus, mille abil toodetakse elektrienergiat;
- õhutemperatuur, millest sõltub paneeli kasutegur.

Mudeli päikesepaneelide modelleerimine nõuab veel mitut sisendit. Suurem osa on paneelide tehnilised andmed ja lisaks mooduli koguvõimsus ehk kui palju paneele tegelikkuses on:

- Nimivõimsus, W;
- Optimaalne töötemperatuur, °C;
- Võimsuskoefitsient ühe kraadi erinevusel optimaalsest töötemperatuurist, %/°C;
- Protsentuaalsed võimsuskaod inverteris ja kaablites kokku;
- koguvõimsus, kW (paneelivõimsus korda paneelide hulk).

Viimaseks tuleb lisada ka päikesepaneelide suund päikese suhtes, mis määravad ära, kui tõhus neeldumine paneelil on:

- Kaldenurk maapinna suhtes;
- Nurk lõuna suhtes.

Lisaks tuleb ära märkida ka paneelide tööjuhistes, et on lubatud osalise koormusega töötamine. EnergyPRO tarkvara arvutusvalem on järgnev:

$$P_{pv} = P_{max} \cdot \frac{I_s}{I_{STC}} \cdot [1 - \gamma_s \cdot (T_{cell} - T_{STC})], \quad (4.1)$$

kus  $P_{pv}$  – võimsus ajahetkel, kW;

$P_{max}$  – paigaldatud koguvõimsus, kW;

$I_s$  – päikeseikiirgus, W/m<sup>2</sup>;

$I_{STC}$  – päikeseikiirgus normaaltingimustes, W/m<sup>2</sup>;

$\gamma_s$  – Võimsuskoefitsient ühe kraadi erinevusel optimaalsest töötemperatuurist, %/°C;

$T_{cell}$  – töötemperatuur, °C;

$T_{STC}$  – töötemperatuur normaaltingimustes, °C;

$S_{teg}$  – kraadpäevade arv vaadeldaval täisaastal.

Päikesepaneelide tavaliselt linnaruumis maapinnale ei paigaldada, sest need võtavad ära palju ruumi ning paigaldades katusele on võimalik lihtsamalt saavutada paneelide tööks optimaalsemad kaldenurgad. Soovituslik on päikesepaneelid paigaldada katusele suunaga lõuna poole. Lõunasse suunatud päikesepaneel on efektiivsem, sest siis saavutatakse maksimaalne toodang. Päikesekiirguse hulk on suurim keskpäeval, mitte hilisel pärastlõunal või varahommikul, ja seeläbi on vajalik, et paneelid oleksid paigutatud risti päikesega. Ükskõik millise objekti risti olekul päikesekiirtega tagab suurema soojuse neeldumise võrreldes nurga all oleva objektiga. Viimasest tuleb ka soovituslik nõue kasutada paneelide kaldenurka maa suhtes, sest ka tänu sellele saavutatakse pisut suurem toodang. Joonisel 4.2 on näha, et antud eramu katused ei ole täpselt suunaga lõunasse, vaid väiksem katuse pind on +25 kraadi nihkes ja suurema katuse pind -65 kraadi lõunasihist. See tähendab, et väiksema katuse päikesepaneelid toodavad hommiku poole efektiivsemalt, kuid ei jäävad siiski alla paneelidele, mis oleks paigutatud täpselt lõuna suunas, sest hommikune kiirgus pole nii suur. Suurema katuse puhul on olukord praktiliselt samasugune, kuid ennelõunase efektiivsema perioodi asemel on viimane nüüd pärast lõunat.



Joonis 4.2 Eramu katuse kõrvalekalle lõunast [17]

Joonisel 4.3 on Maa-ameti 3D kaardirakenduse abil ära mõõdetud katuse maksimaalne pindala päikesepaneelide jaoks, et teada mitu paneeli on võimalik paigaldada. Päikesepaneelide tavaline pindala on ligi 2 m<sup>2</sup>, kus külgede suhe on 1 : 2, ehk lühem külg on 1 meeter ja pikem 2 meetrit. Kui arvestada, et paneeli kõrgus on 1 meeter ja



laius 2 meetrit, siis väiksemale katusele mahub paneele kõrvuti kolm tükki ja ülevalt alla saab paigaldada neli paneeli kõrvuti. See tähendab, et väiksemale katusele mahub 12 paneeli. Suuremale katusele mahub üksteise kõrvale kuus paneeli ja ülevalt alla mahub 3 paneeli. Kokku mahub suuremale katusele 18 paneeli.



Joonis 4.3 Päikesepaneelidega kaetavate katusepindade mõõdud. [17]

#### 4.2.1 Päikesepaneelide valik

Päikesepaneeli valik tehakse tavaliselt nimivõimsuse ja hinna alusel. Lisaks määrab rolli ka paneeli suurus ja kasutegur. Mudelisse on valitud monokristall päikesepaneel: WST-375MG Gemini 375 W. Antud päikesepaneel on hea efektiivsusega ning sobib mõõtmetelt hästi katusele. Lisaks on hind üks parimaid turul. Valitud päikesepaneeli tehnilised andmed on järgnevad:

- Hind: 173,23€/tk
- Nimivõimsus: 375 W;
- Optimaalne töötemperatuur: 44 °C;
- Võimsuskoeffitsient ühe kraadi erinevusel optimaalsest töötemperatuurist: -0,35 %/°C;
- Protsentuaalsed võimsuskadod inverteris ja kaablites kokku: 10%;
- paneeli võimsuse langus aastas: 4%
- Mõõtmed: 1,759 x 1,034 x 35 mm [19]

Katuste koguvõimsus ja maksumus on arvatav korrutades paneelide arv vastavalt paneeli nimivõimsuse ja maksumusega.

$$\text{Väiksema katuse võimsus} = 12 \cdot 375\text{W} = 4,5 \text{ kW}$$

$$\text{Suurema katuse võimsus} = 18 \cdot 375\text{W} = 6,7 \text{ kW}$$

$$\text{Väiksema katuse maksumus} = 12 \cdot 173,23 \text{ €} = 2078,76 \text{ €}$$

$$\text{Suurema katuse maksumus} = 18 \cdot 173,23 \text{ €} = 3118,14 \text{ €}$$

- Koguvõimsus: 11,25kW (väiksem katus 4,5 kW ja suurem katus 6,7 kW).
- Paneelide maksumus: 5196,9 € (väiksem katus 2078,76 € ja suurem katus 3118,14 €), ilma käibemaksuta 4330,75 €.

Päikesepaneelid on võimelised tootma alalisvoolu, mis tähendab, et ühendada neid Elektrilevi võrku või kasutada enamuste seadmete toiteks, tuleb kasutusele võtta ka inverter ehk vaheldi. Inverter muundab alalisvoolu võrgule ja seadmetele sobivaks vahelduvvooluks. Inverteri valik toimub paigaldatud võimsuse põhjal ning tavaliselt peab päikesepaneelide eluea jooksul ühe korra vahetama, seega on arvestatud päikesepaneelide lahenduse kogumaksumusse kahekordne inverteri hind. Antud mudelisse sobib Fronius Symo 12.5-3-M, mille maksimaalne väljundvõimsus on 12,5 kW, mis on rohkem kui päikesepaneelide koguvõimsus. Antud inverter pakub kõrget efektiivsust ka madalatel võimsustel, mis on päikesepaneelide toodangut arvestades väga kasulik.

- Kahe inverteri maksumus käibemaksuta:  $1911\text{€} \cdot 2 = 3822 \text{ €}$ .

Lisades paneelide ja inverterite maksumusele veel järgnevad kulud, mis on saadud sarnase eramu liitumislepingust, kuid võivad olla väga erinevad sõltuvalt eramu asukohast ja võrgutingimustest:

- paigalduskulud 1000 €;
- kilbitööde materjali hind 60 €;
- kahesuunalise kagulugemisega arvesti koos paigaldusega 285 €;
- kaitselahutuslüüti paigaldus 150 €;
- projektijuhtimise, planeerimise ja liitumisakti tasud 100 €;

Kõigi kulude kokku liitmisel tuleb päikesepaneelide lahenduse kogumaksumuseks 9747,75 €.

### **4.3 Päikesekollektori sisendandmed**

Päikesekollektori mudeli plokk skeem on välja toodud lisas 2. Võrreldes päikesepaneelidega on päikesekollektori modelleerimisel samad järgnevad sisendandmed:

- päikesekiirgus, mille abil toodetakse elektrienergiat;
- õhutemperatuur, millest sõltub paneeli kasutegur;

- Kaldenurk maapinna suhtes;
- Nurk lõuna suhtes.

Päikesekollektori mudelleerimisel on erinevad päikesepaneelidest nõutud tehnilised andmed, sest ka töö põhimõte on seadmetel erinev. Sisendiks nõutud on:

- Kollektori pindala, mis näitab ära päikesekiirgust neelava pinna, m<sup>2</sup>;
- Kasutegur;
- Kaks kadude koefitsienti, mis määravad temperatuuri muutusega võimsuse kao ruutmeetri kohta, W/(m<sup>2</sup>·°C) ja W/(m<sup>2</sup>·°C)<sup>2</sup>;
- Päikesekiirguse langusnurga muutuse koefitsient;
- Protsentuaalsed võimsuskadod torudes, %;
- Kollektori sisend ja väljundtemperatuur.

Lisaks tuleb jällegi ära märkida ka kollektori tööjuhistes, et on lubatud osalise koormusega töötamine ja salvestamine. Päikesekollektori paigutuse puhul kehitvad samad reeglid nagu ka päikesepaneelidel. EnergyPRO tarkvara arvutusvalem on järgnev:

$$P_{sc} = A \cdot [I \cdot n_o - a_1 \cdot (t_m - t_a) - a_2 \cdot (t_m - t_a)^2] \cdot L_p \quad (4.2)$$

kus  $P_{sc}$  – võimsus ajahetkel, kW;

$I$  – päikesekiirgus, W/m<sup>2</sup>;

$T_m$  – kollektori temperatuur, °C;

$T_a$  – õhutemperatuur, °C;

$n_o$  – kasutegur;

$a_1$  – kadude koefitsient number 1;

$a_2$  – kadude koefitsient number 2;

$L_p$  – kaod torudes, %.

### 4.3.1 Päikesekollektori valik

Päikesekollektori valik tehakse tavaliselt nimivõimsuse ja hinna alusel. Lisaks määrab rolli ka kollektori suurus ja kasutegur. Mudelisse on valitud tasapinnaline päikesekollektor Regulus KPG1 ALC, mille kasutegur on väga kõrge ning hind soodne. Päikesekollektori tehnilised andmed on järgnevad:

- Kollektori pindala: 2,517 m<sup>2</sup>. Joonise 4.4 põhjal on võimalik hinnata, et mahub kaks kollektorit ehk pindala umbes 5 m<sup>2</sup>;
- Kasutegur: 0,794;
- Kadude koefitsient 1.: 3,639 W/(m<sup>2</sup>·°C);
- Kadude koefitsient 2.: 0,0168 W/(m<sup>2</sup>·°C)<sup>2</sup>;

- Päikesekiirguse langusnurgast sõltuv koefitsient: 4;
- Protsentuaalsed võimsuskaod torudes: 5%;
- Kollektori sisendtemperatuur: 32 °C;
- väljundtemperatuur: 39 °C;
- Kahe kollektori maksumus käibemaksuta:  $526 \text{ €} \cdot 2 = 1052 \text{ €}$ . [20]

Lisaks tuleb arvestada juurde kollektori maksumusele paigalduskulud 250 € ja 400 liitrise akumulatsioonipaagi ja tsirkulatsioonipumba maksumused, mis jäävad kokku umbes 500 € ringi. Päikesekollektor lahenduse kogumaksumus on 1802 €.



Joonis 4.4 Päikesepaneelidega (punaselt) ja päikesekollektoriga (rohelist) kaetavate katusepindade mõõdud. [17]

#### 4.4 Elektrituuliku sisendandmed ja selgitus

Elektrituuliku modelleerimisel (plokk skeem lisa 3.) on üks keskkonnast sõltuv parameeter, mille sisendandmed saadakse tarkvara poolt:

- tuulekiirus, mille abil toodetakse elektrienergiat;

Mudeli päikesepaneelide modelleerimine nõuab veel nelja sisendit, milleks on:

- tuulekiiruse mõõtekõrgus;
- rummu ehk masti kõrgus;
- Hellmanni eksponent, mis määratakse vastavalt keskkonnale ning mõjutab mudeli tulemusi;

- elektrituuliku võimsuskõver, mis näitab tootja poolt määratud elektrituuliku võimsust kindla tuulekiiruse juures.

Lisaks tuleb ära märkida ka elektrituuliku tööjuhistes, et on lubatud osalise koormusega töötamine. EnergyPRO tarkvara arvutab tuuliku võimsuse ajahetkes tuulekiiruse ja võimsuskõvera põhjal, võttes arvesse ka mõõtekõrgust, rummu kõrgust ja Hellmanni eksponenti. Tuule kiirus rummu kõrgusel leitakse järgnevalt:

$$WS_c = WS_m \cdot \left(\frac{H_h}{H_m}\right)^a, \quad (4.3)$$

kus  $WS_c$  – kalkuleeritud tuulekiirus, m/s;

$WS_m$  – mõõdetud tuulekiirus, m/s;

$H_h$  – mõõtekõrgus, m;

$H_m$  – rummu kõrgus, m;

$a$  – Hellmanni eksponent;

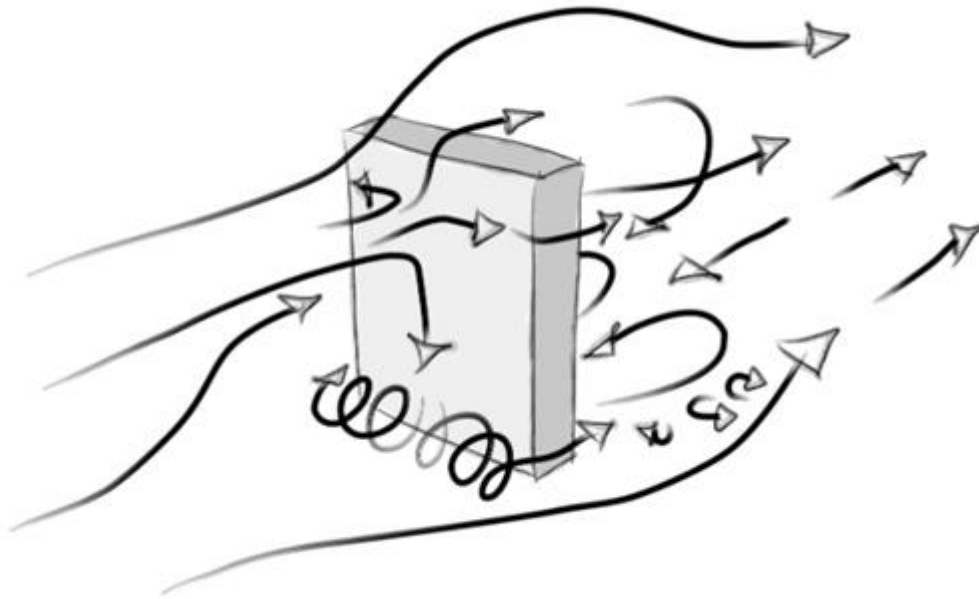
Elektrituuliku võimsus ajahetkes leitakse alloleva valemiga:

$$P = PC \cdot WS_c, \quad (4.4)$$

kus  $P$  – elektrituuliku võimsus ajahetkes, kW;

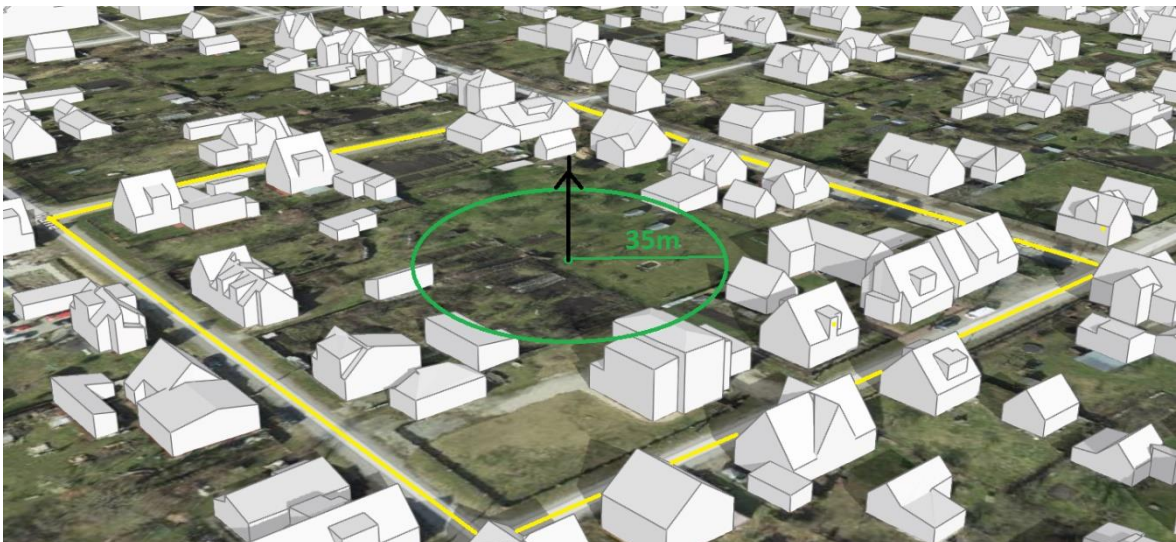
$PC$  – elektrituuliku võimsuskõveralt saadud võimsus, mis vastab kalkuleeritud tuulekiirusele, kW.

Linnaruumis on efektiivse elektrituuliku paigaldamine üsna keeruline, sest arvesse tuleb võtta ka hoonete, puude ja muude takistuste mõju tuulekoridoride ja tsentrifugaaltuulte tekkimistele. Allolevalt jooniselt 4.5 on näha, kuidas tuul liigub ümber takistuse ja vahetab suunda takistuse ümber. Elektrituuliku asukoha valimisel on kõige lihtsam lahendus paigaldada generaator kerge varuga kõrgemale kui ümbruses olevad hooned. Elektrituulik sellistel tingimustes praktiliselt töötada ei suuda. [21]



Joonis 4.5 Tuule liikumisel ümber takistuse tekivad tsnetrifugaaltuuled ehk tuulekeerised. [22]

Seetõttu on uuritud ka kvartalis paiknevate hoonete asetsust (joonis 4.6) ja plaanitud elektrituuliku paigutus hoonetest võimalikult kaugemale. Lisaks on vaadeldud kvartali hoonete kõrguseid, et selle põhjal valida elektrituuliku rummu kõrgus umbes kaks korda kõrgem kui hoonete kõrgused. Alloleva joonise 4.6 abil saab hinnata elektrituulikule parimat paigutust sõltuvalt lähedal asetsevate hoonete kõrgusest ja kaugusest



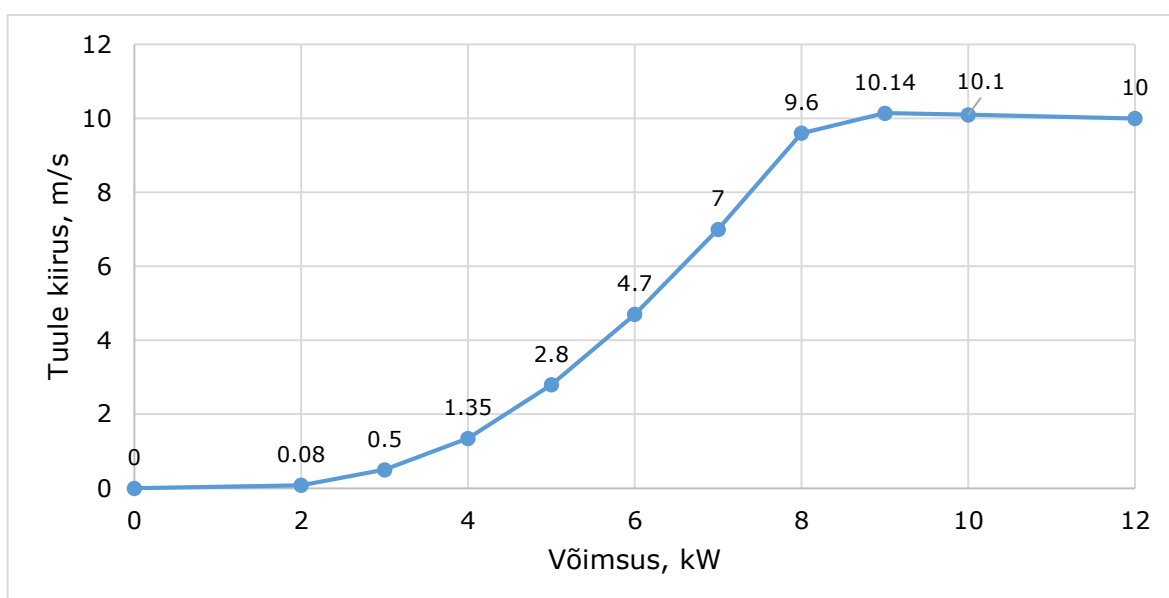
Joonis 4.6 Eramu kvartali 3D joonis (rohelisega elektrituuliku ümber oleva vaba maa ring) [17]

#### 4.4.1 Elektrituuliku valik

Elektrituuliku valik tehakse tavaliselt nimivõimsuse ja hinna alusel. Lisaks määrab rolli ka võimsusgraafik, mille abil on võimalik näha, kuidas elektrituulik erinevates

tuuletingimustes käitub. Mudelisse on valitud elektrituulik ENAIR 200L, mis on üks vähestest Eesti turul olevatest 10 kW võimsusega elektrituulik. Nimivõimsus peab olema nii suur, et katta talvine tarbimine. Lisaks on võimsuskõveralt (joonis 4.7) näha, et valitud elektrituulik hakkab tööle ka madalate tuulekiiruste juures. Elektrituuliku tehnilised andmed on:

- Nimivõimsus: 10 kW;
- Rummu ehk masti kõrgus: 27 m;
- Mõõtekõrgus: 35 m;
- Hellmanni eksponent: 0,34 (neurtaalne õhk linna kohal);
- Võimsuskõver:



Joonis 4.7 Elektrituuliku võimsuskõver, mis kujutab elektrituuliku võimsust kilovattides teatud tuulekiirustel (m/s) [23]

Ka elektrituuliku puhul on tarvilik kasutada inverterit ning vastava elektrituulikule sobib täpselt sama inverter, mis päikesepaneelidele. Täpselt sama maksumus võetakse ka siin kasutusele ehk 3822 € (vt punkt 4.2.2). Elektrituuliku enda maksumus koos inverterite ja paigaldusega on võetud hinnanguliselt 28000 €, sest tegelikkuses sõltub see väga palju keskkonna tingimustest ja paigalduskeerukusest. Juurde võib arvestada vundamendi rajamise 1000 €, elektritööde ja elektrimaterjali kulu ning päikesepaneelide juures seletatud liitumiskulud umbes 1000 €. Elektrituuliku mudelile on juurde arvestatud ka igaaastased hoolduskulud 150€, mis kulub liikuvate osade hooldusele.

## 4.5 Maasoojuspumba sisendandmed ja valik

Maasoojuspump on modelleeritud energyPRO tarkvaras kasutades elektrisoojuspumpa (plokk skeem lisas 4.), mille modelleerimisel on sisendiks ainult pumba tehnilised andmed ja süsteemis kasutatavad temperatuurid:

- Küttevõimsus, valitakse vastavalt tarbimisvõimsusele;
- minimaalne küttevõimsus;
- soojusstegur, soojuspumba töö efektiivsustegur;
- küttevee sisendtemperatuur;
- küttevee väljundtemperatuur.

Lisaks tuleb ära märkida ka soojuspumba tööjuhistes, et on lubatud osalise koormusega töötamine ja lubatud on salvestamine. EnergyPRO tarkvara arvutab töötemperatuuride põhjal uue soojusteguri vastavalt soojusenergia tarbimisvajadustele. Valem on järgnev:

$$COP = \frac{T_{high}}{T_{high}-T_{low}}, \quad (4.5)$$

kus  $COP$  – kalkuleeritud soojustegur;

$T_{high}$  – küttevee väljundtemperatuur, °C;

$T_{low}$  – küttevee sisendtemperatuur, °C.

Maasoojuspumba valik sõltub kõige rohkem soojusenergia tiputarbimisest. Maasoojuspumba küttevõimsus peaks olema sellest suurem. Lisaks valitakse soojusteguri ja juhtimisomaduse põhjal. Mudelisse on valitud inverteri ja veeboileriga mudel NIBE FIGHTER S1255-12 R EM INVERTER 12 kW, mis ületab soojusenergia tiputarbimise, milleks antud eramus oli pisut üle 8 kW. Pump on valitud koos veeboileriga, et tõsta salvestamise efektiivsust. Inverteriga maasoojuspump on võimeline töötama osakoormusega ehk vastavalt soojusenergia tarbimise vajadusele, mis vähendab omakorda sisse-väljalülitusi, mis on seadmele kahjulikud. Maasoojuspumba tehnilised andmed on:

- Küttevõimsus: 12 kW;
- minimaalne küttevõimsus: 3 kW;
- soojusstegur: 4,87;
- küttevee sisendtemperatuur: 32 °C;
- küttevee väljundtemperatuur: 42 °C. [24]

Linna tingimustes kasutatakse tavaliselt maasoojuspumbaga vertikaalset puurauku, mille maksumuseks on mudelis võetud 5000 €. Maasoojuspumba maksumus on 8133 €. Maasoojuspumbaga tuleb ka mitmeid lisaseadmeid muretseda, näiteks paisupaake,



akumulatsioonipaak ja veeradiaatorid. Nende maksumuseks on arvestatud 2500 €. Maasoojuspumbaga lahenduse kogumaksumus on 15633 €.

## 4.6 Majanduslikud sisendid

Eramu puhul on arvesse võetud võimekus teha kõigi eelnevalt nimetatud lahenduste investeeringud ehk laenu võtmise kohusutust ei ole töös arvestatud. 2020. aastal taastuvenergia toetuse lõppemisega ei ole ka toetusi mudelisse modelleeritud. Lisaks on kõik kulud ja tulud käibemaksuta. Eramu elektripaketiks on valitud Elektrumi BÖRSI KLÕPS, mis põhineb muutuval elektri hinnal ehk elektri hind sõltub täielikult börsihinnast. Võrguteenuse maksumused on võetud Elektrilevi võrguteenuse hinnakirja võrk 2 põhjal, kus on fikseeritud võrguteenuse hind senti/kWh kohta päeval ja öösel. EnergyPRO mudelisse on juurde modelleeritud kuus sissetulekuallikat:

- elektrienergia müük (elektri börsihinna aegreast sõltuv): ülejääv elektrienergia müüakse võrku tagasi börsihinnaga
- ostmata jäänud elekter (elektri börsihinna aegreast sõltuv): tänu tootmislahendustele ostmata jäänud elektrikogus ehk kui palju vähenes tarnitud elektrienergia korrutatud börsihinnaga;
- ostmata jäänud võrgutasu (võrgutasu aegreast sõltuv): ostmata jäänud elektrikoguse pealt makstav võrgutasu ehk kui palju vähenes tarnitud elektrienergia korrutatud võrgutasu hinnaga;
- vähem makstav taastuvenergia tasu (fikseeritud – 0,0133 €/kWh): ostmata jäänud elektrikoguse pealt makstav taastuvenergia tasu;
- vähem makstav elektriaktsiis (fikseeritud – 0,001 €/kWh): ostmata jäänud elektrikoguse pealt makstav elektriaktsiisi tasu;
- vähem makstav ostumarginaal (fikseeritud – 0,0021 €/kWh): ostmata jäänud elektrikoguse pealt makstav ostumarginaali tasu.

Lisaks tuleb ka juurde arvestada võrku müüdava elektrienergia müügitasumarginaal, mis tuleb kulude juurde modelleerida:

- lisanduv müügitasumarginaal (fikseeritud 0,0021 €/kWh) [25]

## 5. TULEMUSED JA ANALÜÜS

Käesolevas peatükis on välja toodud energyPRO tarkvara mudelites saadud tulemused iga lahenduse kohta. Mudelite tulemuste juures vaadeldakse tarkvara poolt arvatud tulemusi 25 aasta lõikes, sest elektrituuliku ja päikesepaneelide eluiga on ligi 25 aastat. Päikesekollektori ja maasoojuspumba eluiga võib pisut pikem olla, kuid parema ülevaate saamiseks on kasutatud sama mudeli pikkust. Tulemuste abil on leitud ka energiatõhususe parandamine ning seejärel analüüsitud lahenduste tootmisgraafikuid.

### 5.1 Tulemused

Olulisemad tulemused, millest on võetud 25 aasta keskmine, analüüsimiseks on:

- tootmislahenduse toodetud energia;
- tootmislahenduse toodetud energiast lokaalselt tarbitud energia ehk kui palju väheneb võrgust tarnitud elektrienergia;
- tootmislahenduse tarbitud energia;
- võrku müüdud elektrienergia;
- aastane tootmislahenduse kulu ja tulu;

Vastavad ümardatud tulemused on iga lahenduse kohta toodud allolevas tabelis:

Tabel 5.1 Mudelite abil saadud tootmislahenduste olulisemad tulemused

Lahendus	Päikesepaneel, 11 kW	Päikese- kollektor, 5 m <sup>2</sup>	Elektrituulik, 10 kW	Maasoojus- pump, 12 kW
Keskmine toodetud energia aastas, kWh	12000	1900	19500	26700
Energia tarbimise vähenemine aastas, kWh	6500	1900	14000	22500
Seadme elektrienergia tarbimine aastas, kWh	0	0	0	5500
Võrku müüdud elektrienergia aastas, kWh	5500	0	5500	0
Tulu aastas, €	822	196	1465	2152
Kulu aastas, €	14	0	161	0
Kasum aastas, €	808	196	1304	2,152
Lahenduse kogumaksumus, €	9747	1802	30 000	15 633
Lahenduse tasuvus	12 aastat	9 aastat ja 2 kuud	23 aastat	7 aastat ja 3 kuud

Energiatõhususe aspektist on kõige olulisem tulemus vähenenud tarnitud energiahulk aastas, mille põhjal saab välja arvutada iga lahendusega eramu uue energiatõhususarvu. Mida rohkem tarnitud elektrienergia vähenes, seda energiatõhusamaks eramu muutub. Selle põhjal saab määrata eramule uue energiaklassi ning analüüsida selle põhjal ka rahalise investeeringu väärtust energiatõhususe eesmärgil. Energiatõhususarvu leidmiseks kasutatakse valemit:

$$\text{Energiatõhususarv} = \frac{(Q_{aasta} - Q_{vähenenud.en}) \cdot C_k}{A}$$

kus  $Q_{aasta}$  – Hoone aastane energiatarbimine (kWh/a);

$Q_{vähenenud.en}$  – hoone aasta jooksul lokaalselt toodetud taastuvenergiast tarbitud energiahulk ehk vähenenud tarnitud energiahulk (kWh/a);

$C_k$  – energiakandja kaalumistegur;

$A$  – hoone köetav pinna suurus (m<sup>2</sup>).

Leitakse päikesepaneeli lahenduse energiatõhususarv, elektrienergia kaalumistegur on 2,0:

$$\text{Energiatõhususarv} = \frac{(32200 - 6500) \cdot 2,0}{138,9} \approx 370$$

Päikesepaneelidega lahendusega eramu kuulub tabel 4.1 põhjal energiaklassi G.

Samasuguse lahenduskäiguga leitakse ka teiste lahenduste energiatõhususarvud ja määratakse energiaklassid. Tulemused on toodud allolevas tabelis:

Tabel 5.2 Tootmislahendustega eramu energiatõhususarvud ja energiaklassid. Lisaks on toodud kõrvale ka kogumaksumused ja tasuvused

Lahendus	Energiatõhususarv	Energiaklass	Kogumaksumus, €	Tasuvus
<b>Päikesepaneel, 11 kW</b>	370	G	9747	12 aastat
<b>Päikese-kollektor, 5 m<sup>2</sup></b>	436	H	1802	9 aastat ja 2 kuud
<b>Elektrituulik, 10 kW</b>	262	F	30 000	23 aastat
<b>Maasoojuspump, 12 kW</b>	68	A	15633	7 aastat ja 3 kuud

Lisaks saab välja arvutada energiatõhususarvu vähenemise ja kogumaksumuse põhjal, kui palju läheb maksma ETA vähendamine 1 kWh/m<sup>2</sup>a võrra. Selleks võetakse algne KEK, milleks oli 497 kWh/m<sup>2</sup>a, ja lahutatakse sellest uus ETA ning jagatakse lahenduse kogumaksumusega. Päikesepaneelide arvutuskäik näeb välja järgnevalt:

$$1 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) \text{ vähendamise maksumus} = \frac{\text{kogumaksumus}}{\text{algne KEK} - \text{uus ETA}}$$

$$1 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) \text{ vähendamise maksumus} = \frac{9152,75}{497 - 370} \approx 77 \text{ €}$$

Samasuguse lahenduskäiguga on leitud ka teiste lahenduste tulemused ja lisaks ETA protsentuaalne vähenemine on leitud mitu protsenti moodustab ETA vähenemine varem aruvalatud KEK tulemusest. Tulemused on kantud allolevasse tabelisse.

Tabel 5.3 Tootmislahenduste energiatõhususarvu vähenemine ja 1 kWh/m<sup>2</sup>a vähendamise maksumus.

Lahendus	ETA vähenemine	ETA vähenemine, %	1 kWh/m <sup>2</sup> a vähendamise maksumus, €
<b>Päikesepaneel, 11,25 kW</b>	127	25	77
<b>Päikese-kollektor, 5 m<sup>2</sup></b>	61	12	30
<b>Elektrituulik, 10 kW</b>	235	47	128
<b>Maasoojuspump, 12 kW</b>	429	86	36

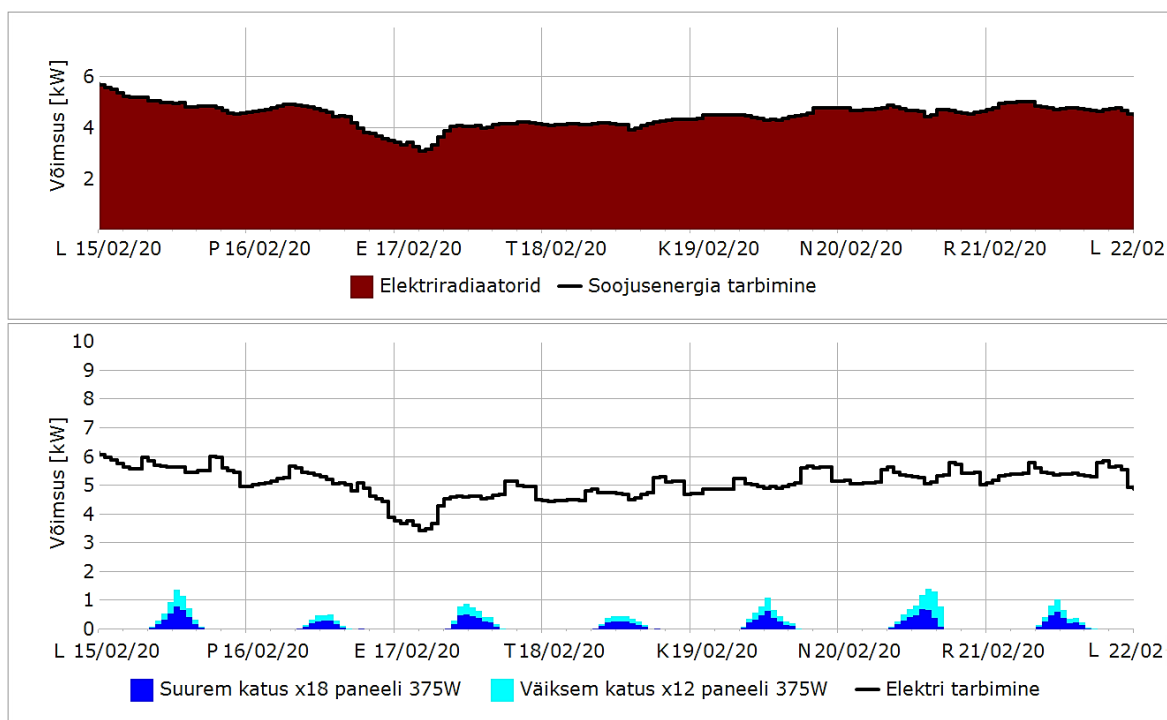
Eelnevast tabelist on, et maasoojuspump vähendab kõige paremini energiatõhususarvu suurust ning seeläbi tõstab energiatõhusust 86 protsendi võrra, mis on väga hea. Elektrituulik suudab tõsta energiatõhusust peaaegu 50%, aga nagu näha viimasest veerust, kulub iga kilovatt-tunni vähendamisele arvuarvutes 128 eurot, mis on võrreldes teiste lahendustega kordades suurem. Päikesepaneelidega lahendus suudab parandada energiatõhusust 25%, kuid energiatõhususarvu vähendamise maksumus kilovatt-tunni võrra on siiski üsna suur. Parima tulemuse tõhususarvu vähendamise maksumusega tegi päikesekollektor, sest ühe kilovatt-tunni vähendamiseks kulus vaid 30 €. Kollektori probleemiks on aga väike energiatõhususe parandamine.

## 5.2 Tulemuste analüüs

Iga lahenduse juures on välja toodud energyPRO tarkvaras modelleeritud talvine ja suvine tarbimis- ja tootmisgraafik, mille põhjal saab hinnata, kui võrd suur kasu tootmislahendus eramule toob. Seda saab hinnata, selle põhjal, kui palju toodangust tarbitakse koha peal ära ja kui palju võrku müüakse. Viimane on kõik see osa toodangust, mis ületab elektrienergia tarbimiskõvera. Lisaks analüüsitakse peatükis 5 välja toodud ja arvutatud tulemusi.

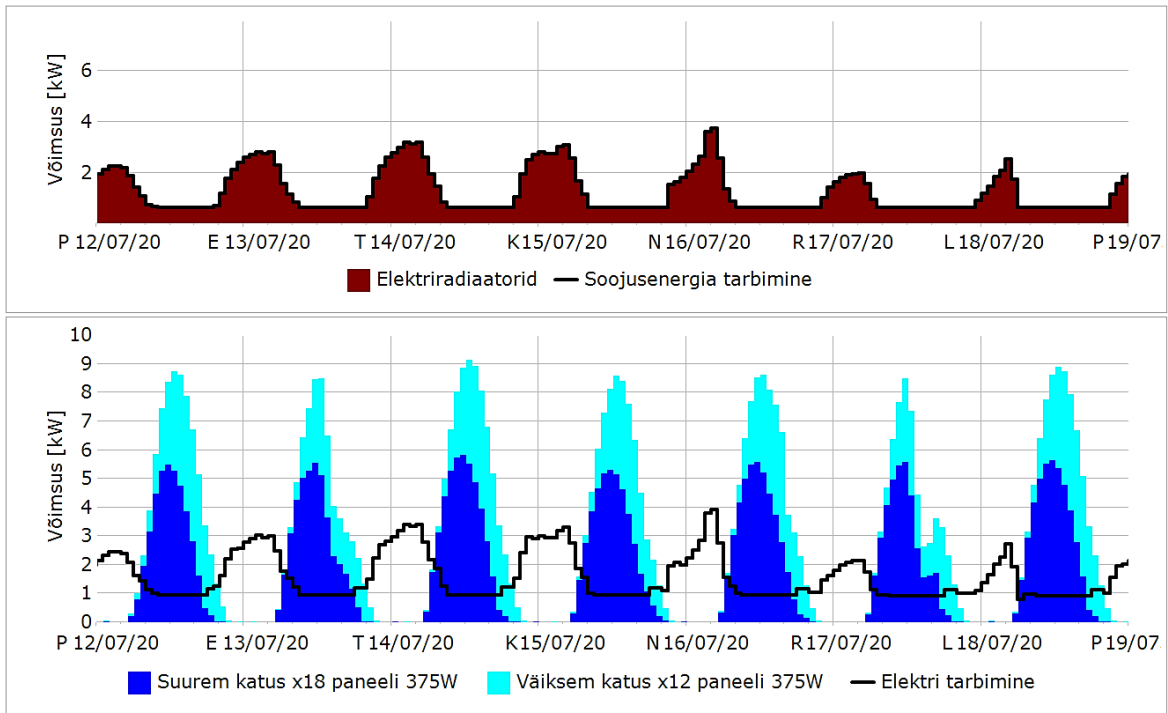
## 5.2.1 Päikesepaneelidega lahenduse analüüs

Päikesepaneelide talvisest graafikust (joonis 5.1) on näha, kuidas päikesepaneelid suudavad toota päikselisel talvekuu päeval tipuvõimsusega umbes 3 kW ja tööaeg on umbes 3 tundi. Tarbimine on aga elektriradiaatorite tõttu pidevalt ehk nii päeval kui öösel umbes 5 kW. Isegi kui päikesepaneelide koguvõimsus oleks suurem, siis tarbimishõudlus täidetak vaid päevasel ajal mõneks tunniks ning seetõttu koguvõimsuse suurendamisest kasu ei oleks. Joonise 5.1 põhjal saab hinnata, kui vähe talvel päikesepaneelid tarbimist katta suudavad ja seeläbi energiatõhususe tõstmine on üsna ebaefektiivne.



Joonis 5.1 EnergyPRO tarkvaras genereeritud eramu talvenädala tarbimis- ja tootmisgraafikud kasutades päikesepaneeli lahendust

Suviselt jooniselt 5.2 on näha, kuidas soojusenergia tarbimise tõttu on ka elektrienergia tarbimiskõver kõvasti madalam ja päikesepaneelid suudavad päeval kergelt katta tarbimise. Kõik, mis rohkem toodetakse läheb võrku müügiks, kuid selle arvelt energiatõhusus ei tõuse.

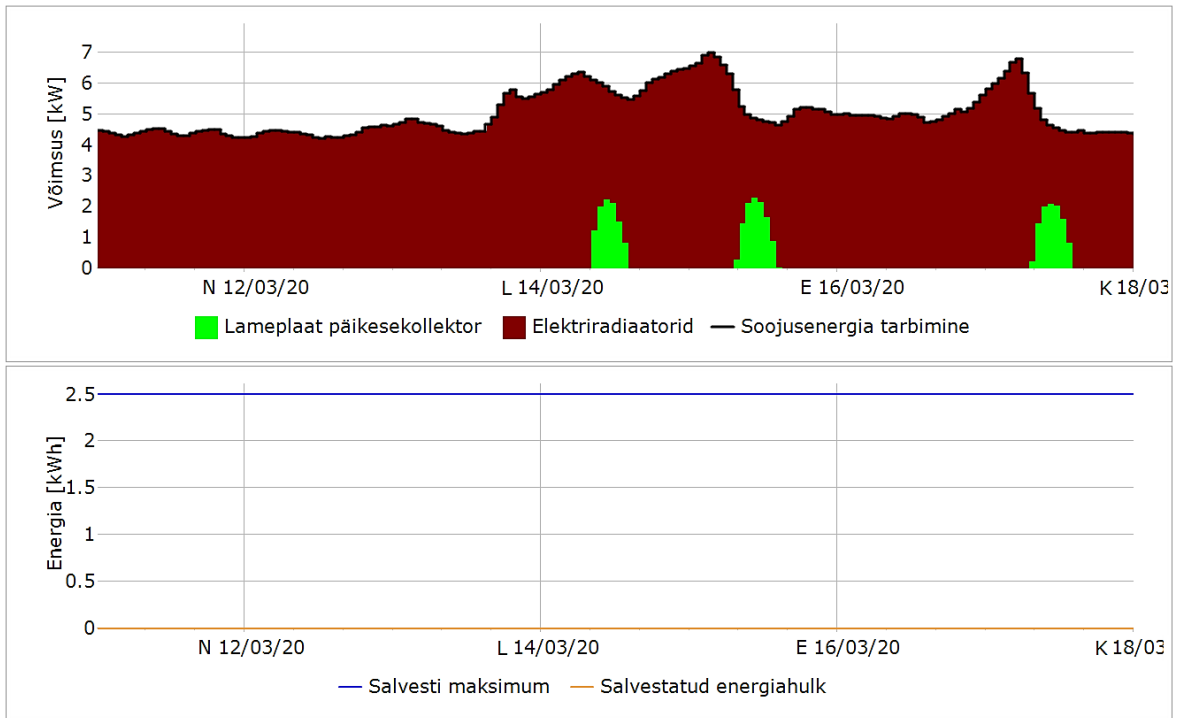


Joonis 5.2 EnergyPRO tarkvaras genereeritud eramu suvenädala tarbimis- ja tootmisgraafikud kasutades päikesepaneeli lahendust

Päikesepaneelid on oma tasuvusajaga üsna konkurentsivõimselised teiste lahendustega. Miinuseks on aga see, et tootmine toimub suurel määral suvel ja ainult päevasel ajal, kus tarbimine väiksem, ning seetõttu energiatõhusut väga efektiivselt tõsta ei suuda. ETA väheneb 25% ja ETA 1 kWh/m<sup>2</sup>a võrra langetamiseks kulub 77 €, mis on lahendustest kolmas (tabel 5.3). Investeeringu poolest on päikesepaneelide lahendus tubliil teisel kohal. Kokkuvõttes päikesepaneelidega antud eramu energiatõhususe tõstmine ei ole parim lahendus ja üleüldiselt pole päikesepaneelid kõige sobilikumad energiatõhususe kasvatajaid just nende kindla tööaja tõttu.

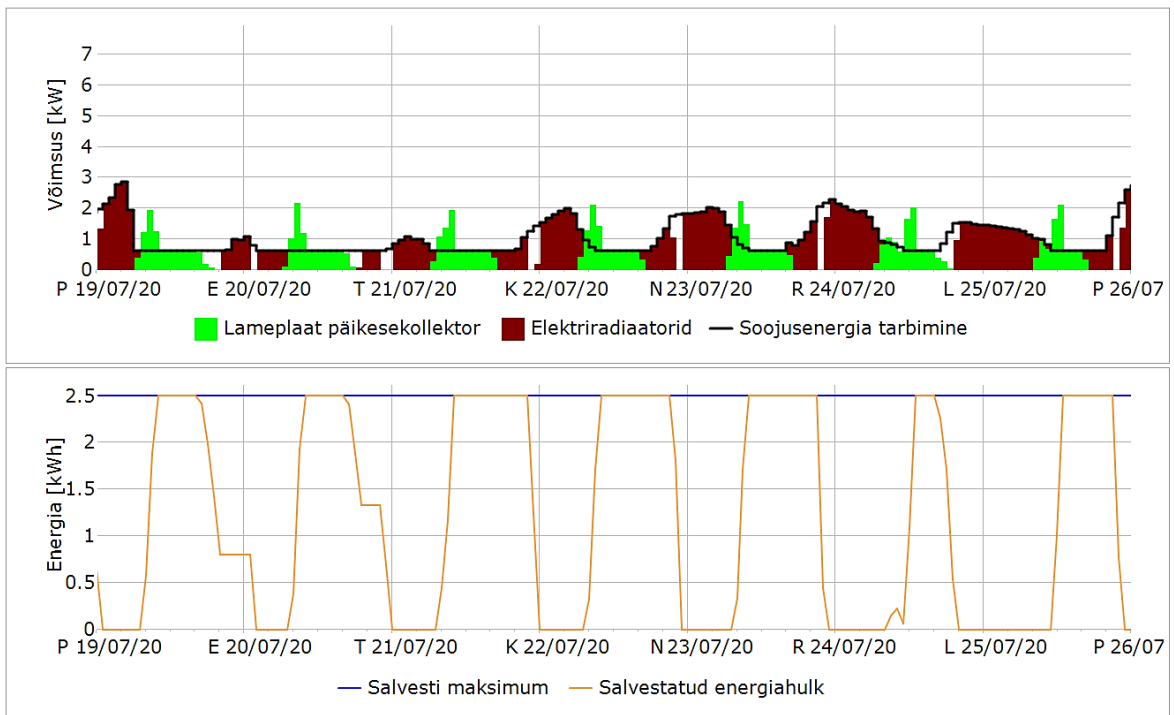
### 5.2.2 Päikesekollektoritega lahenduse analüüs

Päikesekollektorite talvisest graafikust (joonis 5.3) on näha täpselt samasugune olukord nagu päikesepaneelide puhul. Kollektorid suudavad maksimaalselt katta 50% soojusenergia tarbimisest ja seda ka ainult paari tunnises tööaknas. Päikesekollektori lahendusega on sisse arvestatud ka akumulatsioonipaak, millega on võimalik natuke soojusenergiat salvestada. Kuna aga talvisel ajal kollektorite toodang ei ületa tarbimist, siis seetõttu salvestamist ei toimu. Ülejäänud soojusenergiatarbimise katavad vastavalt vajadusele elektriradiaatorid. Ka päikesekollektorite võimsuse suurendamine ei tooks väga suurt kasu, sest üleliigset soojusenergiat saab salvestada vaid vähesel määral ja võrku seda müüa ei saa. Joonise 5.3 põhjal saab hinnata, kui vähe talvel päikesekollektorid tarbimist katta suudavad ja seeläbi energiatõhususe tõstmine on üsna väike.



Joonis 5.3 EnergyPRO tarkvaras genereeritud eramu talvenädala tarbimis- ja tootmisgraafikud kasutades päikesekollektori lahendust

Suviselt jooniselt 5.4 on näha, kuidas soojusenergia tarbimine on kõvasti madalam ja päikesekollektorid suudavad oma päevases töövahemikus tarbimise katta. Ülejääv toodetud energia salvestatakse akumulatsioonipaaki ning tarbitakse siis, kui päikesekollektorid enam soojusenergiat ei tooda.

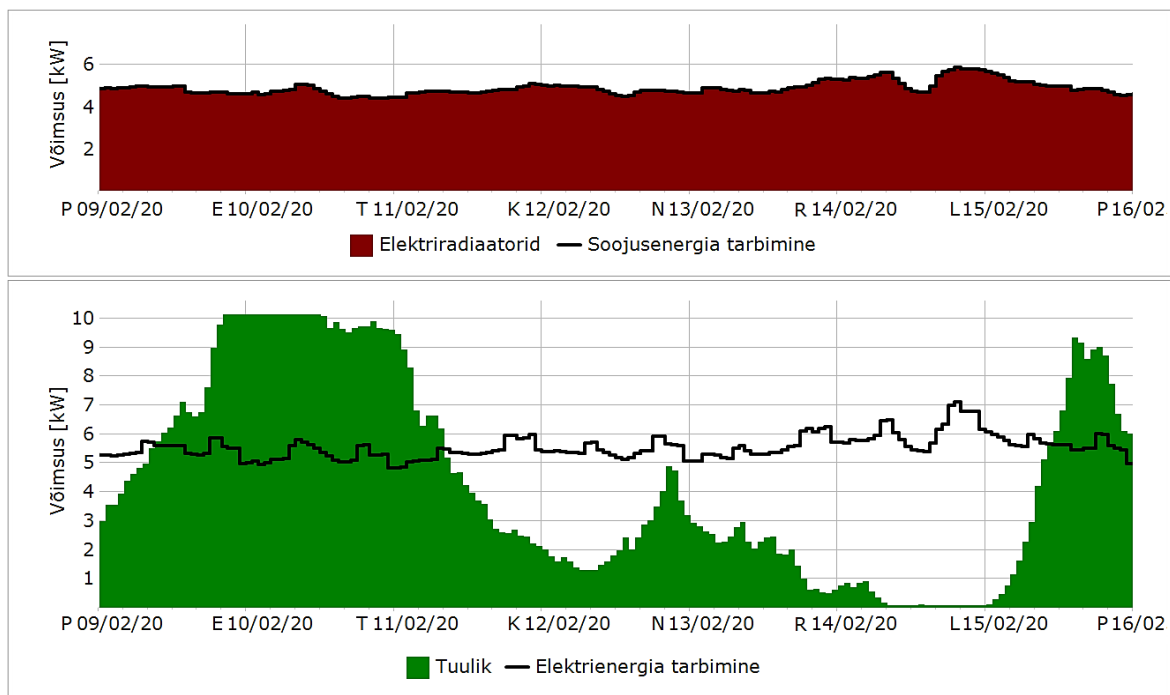


Joonis 5.4 EnergyPRO tarkvaras genereeritud eramu suvenädala tarbimis- ja tootmisgraafikud kasutades päikesekollektori lahendust

Päikesekollektorite tasuvusaeg on üsna väike (9 aastat ja 2 kuud) ning suureks plussiks on see, et investeringu maksumus on kordades väiksem teistest. Miinuseks on jällegi, et päikesekollektori tööaeg jääb päevasesse aega ning suuremal määral suvekuudele, just siis kui ka tarbimine väiksem on. Siiski suudavad päikesekollektorid antud eramu energiatõhusarvu vähendada 12,2% ja ETA 1 kWh/m<sup>2</sup>a võrra langetamiseks kulub vaid 29,5 €, mis on parim tulemus võrreldes teiste lahendustega (tabel 5.3). Kokkuvõttes päikesekollektoritega antud eramu energiatõhusust tõstetakse väga vähe, aga investeringu poolest on see lahendus üle viie korra odavam järgmisest. Üleüldiselt pole päikesekollektorid kõige sobilikumad energiatõhususe tõstjad antud eramu puhul just nende piiratud tööaja tõttu, aga hinna poolest tasub lahendust kindlasti kaaluda.

### 5.2.3 Elekrituulikuga lahenduse analüüs

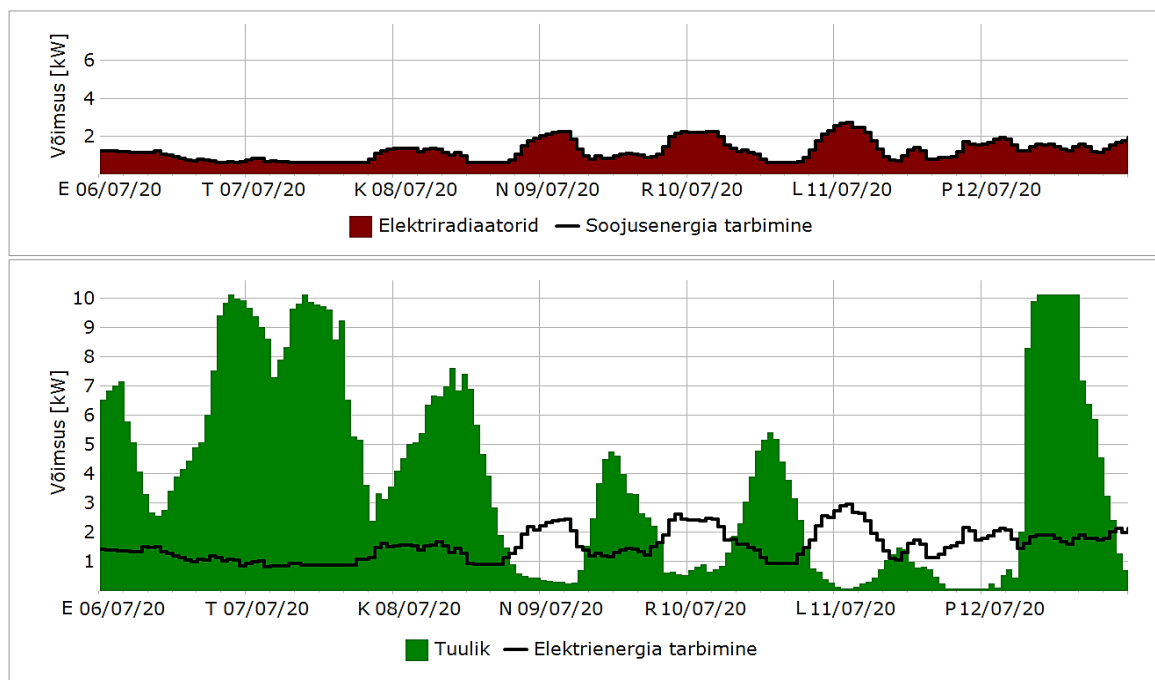
Elekrituuliku lahenduse puhul on talvise tarbimis- ja tootmisgraafikult (joonis 5.5) näha suurt erinevust võrreldes päikeseenergiaal töötavate lahendustega. Elekrituuliku võimsus pürgib tipuvõimsusega üle 10 kW ja vastavalt tuulele suudab toota ka öösiti. Kuna aga ka tuult pole alati, siis on näha ka tuulevaiksemaid perioode. Jällegi üleliigne toodetud elektrienergia müüakse võrku. Elekrituuliku suureks boonuseks võrreldes päikeseenergiaal põhinevate lahendustega on see, et ka talvisel perioodil toimub märkimisväärne tootmine. Elekrituuliku võimsuse suurendamine tõstaks küll energiatõhusust, kuid investeringu suurus läheks väga suureks. Joonise 5.5 põhjal saab hinnanguliselt öelda, et elekrituulik katab talvel umbes 50% tarbimisest.



Joonis 5.5 EnergyPRO tarkvaras genereeritud eramu talvenädala tarbimis- ja tootmisgraafikud kasutades elekrituuliku lahendust



Suviselt jooniselt 5.6 on näha üsna sarnast olukorda talveperioodiga, kus elektrituuliku töö erineb tarbimiskõverast. Kuna aga tarbimine on kõvasti väiksem, siis ka väikeste tuulekiiruste juures suudab elektrituulik katta ligikaudu 70% ning seeläbi vähendatakse ka energiatõhusust vastavalt nii palju.



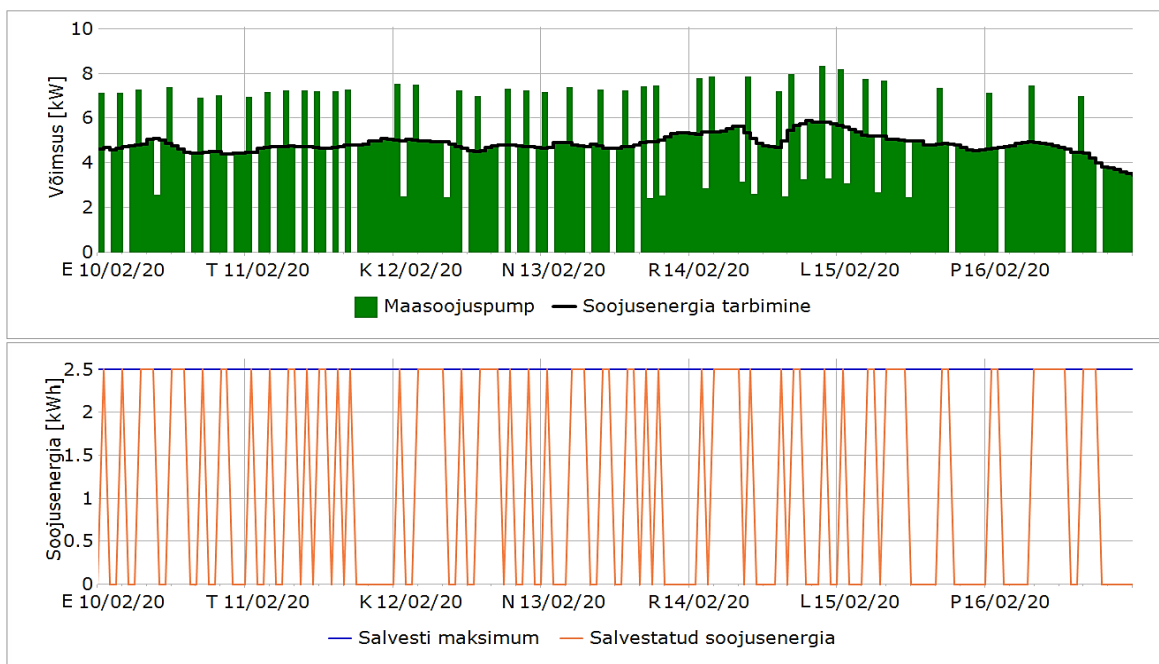
Joonis 5.6 EnergyPRO tarkvaras genereeritud eramu suvenädala tarbimis- ja tootmisgraafikud kasutades elektrituuliku lahendust

Elektrituuliku suurimaks miinuseks on lahenduse tasuvusaeg, mis on teistest lahendustest umbes 2-3 korda pikem (23 aastat). Ka investeeringu suurus on väga suur ja võrreldes maksumuselt järgneva lahendusega kaks korda suurem. Selle arvelt suudab aga elektrituulik antud eramu energiatõhusarvu vähendada 48%, aga ETA 1 kWh/m<sup>2</sup>a võrra langetamiseks kulub 128 € (tabel 5.3). Kokkuvõttes energiatõhuse tõstmise poolest on elektrituulik juba üsna efektiivne, tõstes energiatõhusust peaaegu poole võrra. Suurte tarbimiste tõttu sobib antud lahenduse eramule üsna hästi, aga hinna poolest on see halvim lahendus.

## 5.2.4 Maasoojuspumba lahenduse analüüs

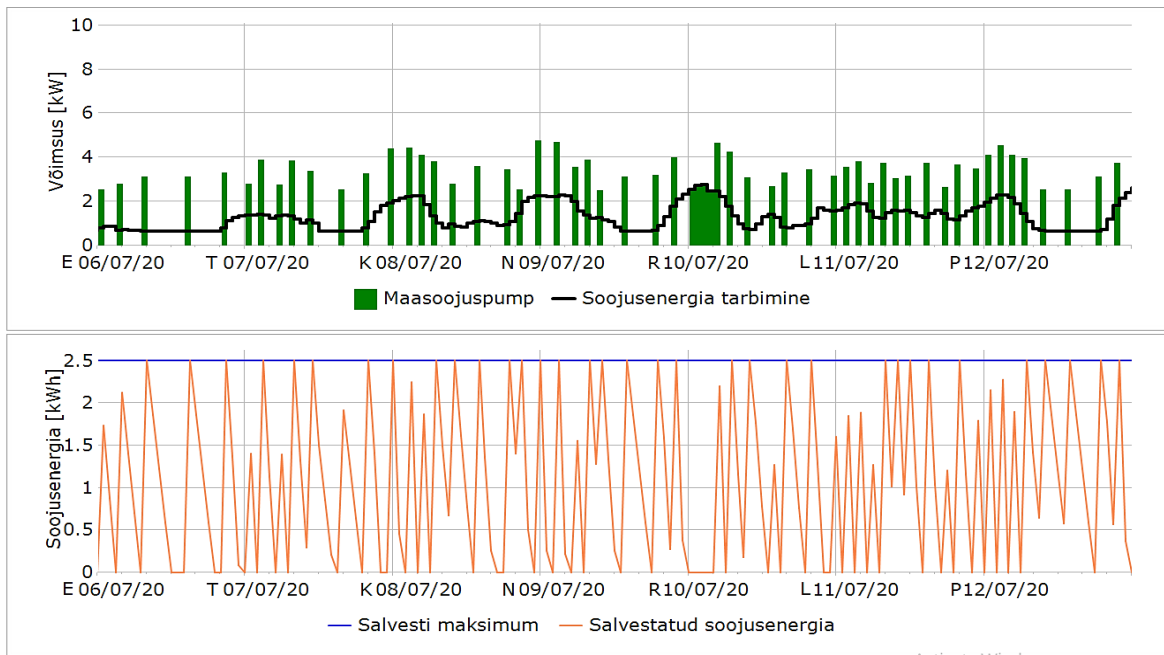
Maasoojuspumba erinevus eelnevatest lahendustest on tema sõltumatus keskkonna tingimustest, aga kasutab selle tõttu lisaelektrienergiat. Talvise tarbimis- ja tootmisgraafikult (joonis 5.7) on näha, kuidas lahendus täidab soojusenergia tarbimisvajaduse alati ära ning kasutab ära ka akupaagi salvestamisomadused. Selle põhjal on näha, kuidas maasoojuspumbaga on võimalik mingil määral pakkuda paindlikkuslahendust. Suunates tarbimist just sellistesse aegadesse, kus on elektri

börsihind odavam. Akumulatsioonipaaki on võimalik 2,5 kWh energiat salvestada ning kasutada seda olukorras, kus börsihind on kõvasti kallim.



Joonis 5.7 EnergyPRO tarkvaras genereeritud eramu talvenädala tarbimis- ja tootmisgraafikud kasutades maasoojuspumba lahendust

Jooniselt 5.8 on näha, kuidas ka suvel kasutatakse maasoojuspumba paindlikkust ära. Maasoojuspump lülitatakse tööle suurema võimsusega kui on soojusenergia tarbimine ning salvestatakse koheselt akupaaki. Niimoodi töötades on pumba töövahemikud väiksed ning väga hästi ajaliselt juhitavad olukorda, kus elektri hind on odavam. Päevas peab maasoojuspump tänu salvestusvõimalusele töötama ainult 8 tundi ehk kolmandiku päevast ning targa kontrolleri abil on võimalik suunata tööaega, et saavutada rahalist kokkuhoidu.



Joonis 5.8 EnergyPRO tarkvaras genereeritud eramu suvenädala tarbimis- ja tootmisgraafikud kasutades maasoojuspumba lahendust

Investeering on suuruselt teine, aga tasuvusaeg see eest kõige väiksem (7 aastat ja 3 kuud). Pideva maasoojuse abiga suudab maasoojuspump vähendada energiatõhusuarvu 86% ja ETA 1 kWh/m<sup>2</sup>a võrra langetamiseks kulub vaid 36 €, mis on väga lähedal päikesekollektori parimale tulemusele (tabel 5.3). Kokkuvõttes on maasoojuspumba lahendus parim energiatõhususe tõstja antud eramu juures ning ka hinna poolest üsna konkurentsivõimeline teiste lahendustega.

### 5.2.5 Tootmislahenduste analüüsi kokkuvõte

Parimaks lahenduseks kujunes praktiliselt kõikide parameetrite poolest maasoojuspump. Teistest kõvasti suurema ETA vähenemisega ning parima tasuvusajaga lahendus jäi alla vaid pisut päikesekollektori 1 kWh/m<sup>2</sup>a vähendamise maksumusele. Päikesekollektor on hinnatud antud eramu puhul hinna tõttu ka efektiivseks lahenduseks, suutes 1800 € eest langetada energiatõhususarvu 13%. Energiatõhususe tõstmine on küll väike aga kogumaksumus on 5-16 korda väiksem. Kolmandaks lahenduseks on hinnatud elektrituulik, mis on oma investeeringu suuruse poolt kõige suurem. Suutes küll langetada energiatõhusuarvu 47% võrra, kulus antud eramus 1 kWh/m<sup>2</sup>a langetamiseks 128 €, mis on umbes 4 korda suurem parimatest lahendustest. Lisaks on elektrituuliku tasuvusaeg 2-3 korda pikem teistest lahendustest. Kõige kehvemaks lahenduseks antud eramu puhul loetakse päikesepaneel, sest energiatõhususarvu langetatakse vaid 26%, kuid selleks kulub 9150 €, mis tähendab, et 1 kWh/m<sup>2</sup>a langetamiseks kulub üsna suur 77 €.

## KOKKUVÕTE

Bakalaureusetöö käigus uuriti Pärnu linnas asuva eramaja energiatõhusust ning sellega seoses analüüsiti energyPRO tarkvara abil nelja taastuvenergia lahendust. Nendeks olid päikesepaneelid, päikesekollektor, elektrituulik ja maasoojuspump. Selleks modelleeriti eramu tunnipõhine elektri- ja soojusenergiatarbimine ning vaadeldi eelnevalt nimetatud lahenduste mõju energiatarbimisele. Tarkvaras loodud mudelite abil saadi vastused püstitatud uurimusküsimustele.

Alates 2020. aastast kehtib uutele ehitatavatele eramajadele suurusega üle 220-ruutmeetrit A-energiaklassi nõue, väiksematele B-klassi nõue. Hoone olulisel rekonstrueerimisel on kohustuslik saavutada C-energiaklass, vastasel juhul ehitusluba ei väljastata. Energiatõhususe leidmiseks ja energiaklassi määramiseks leitakse lihtsustatult hoone võrgust tarnitud energia ja kätava pinna suhte abil, kusjuures tarnitud energiale rakendatakse vastavalt energiakandja liigist ka kaalumistegur. Töös uuritud eramu kuulub H-energiaklassi.

Energiatõhususnõudeid suutis antud eramu juures kõige paremini täita maasoojuspump, saavutades A-energiaklassi. Parandades küll energiatõhusust väga palju, 86 protsenti, oli investeering üsna suur – ligikaudu 15000 eurot. Maasoojuspumba tasuvusaeg oli ka antud uurimuses parim – vaid pisut üle seitsme aasta. Lisaks on tarkvara abil näha, et maasoojuspumbaga oleks võimalik kasutada paindlikkuslahendust ehk akumulatsioonipaagi abil soojusenergia salvestamist ning maasoojuspumba tarbimise juhtimist vahemikku, kus elektrihind on odavam. Maasoojuspumba tööaeg on suvel ainult kolmandik päevast ning targa kontrolleri abil juhitud pumbaga on võimalik saavutada rahalist kokkuhoidu. Väga madala investeeringu ja rahaliselt kõige kokkuhoidvamalt energiatõhususe tõstmise tõttu on ka päikesekollektor hinnatud heaks lahenduseks. Vaid 1800 euro eest langetades energiatõhusarvu küll ainult 12,5 protsenti, suutis antud lahendus tõsta energiatõhusust kordades odavamalt kui järgnevad lahendused. Eramu energiaklass ei paranenud, aga väga väike investeering ja lühike tasuvusaeg (9 aastat) on suureks plussiks antud lahenduse juures. Paremuselt kolmandaks lahenduseks on hinnatud elektrituulik, mis suutis tõsta energiatõhusust peaaegu 50 protsenti ning saavutades seeläbi F-energiaklassi. Suurimaks miinuseks antud lahenduse juures on maksumus, mis küündib 30000 euronit ning teistega võrreldes väga pikk tasuvusaeg. Elektrituuliku tasuvus 23 aastaga on üle kahe korra pikem kui ülejäänud lahendustel. Halvimaks lahenduseks energiatõhususnõuete täitmisel on hinnatud päikesepaneeli lahendus, mis tõstis eramu G-energiaklassi. Energiatõhususe 25 protsendiline parandamine on küll kaks korda

suurem kui päikesekollektoril, aga lahenduse maksumus on see eest viis korda suurem, ligi 9000 eurot.

Bakalaureusetöö tulemused on üsna realistlikud ning vastavad ootustele, kuid tuleb arvestada, et saadud tulemused kehtivad antud eramu kohta ning saab kasutada sarnase energiatarbimisega hoone jaoks. Elektrituuliku lahenduse puhul tuleb arvestada, et tarkvara poolt genereeritud tuuletingimused võivad antud eramu puhul tegelikkuses oluliselt erineda, sest linnaruumis võivad tekkida tuulekeerised, mis pärsivad elektrituuliku tööd.

Antud töö jätkuks tuleks tulevikus uurida eelnevalt nimetatud lahenduste koostoime efektiivsust ehk millised lahendused töötavad omavahel kõige paremini energiatõhususnõuete täitmisel. Lisaks on vajalik uurida elektrituuliku ja maasoojuspumba mõju ümbritsevale keskkonnale. Maasoojuspump võib rikkuda pinnase mikrofloorat ja elektrituulik tekitab ebameeldivat müra ning visuaalset reostust. Tuuletingimusi tuleks reaalsuses kontrollida, sest esineb tuulekeeristeohtu. Lisaks võivad kohalikud omavalitsused rakendada piiranguid elektrituulikute ehitamiseks.

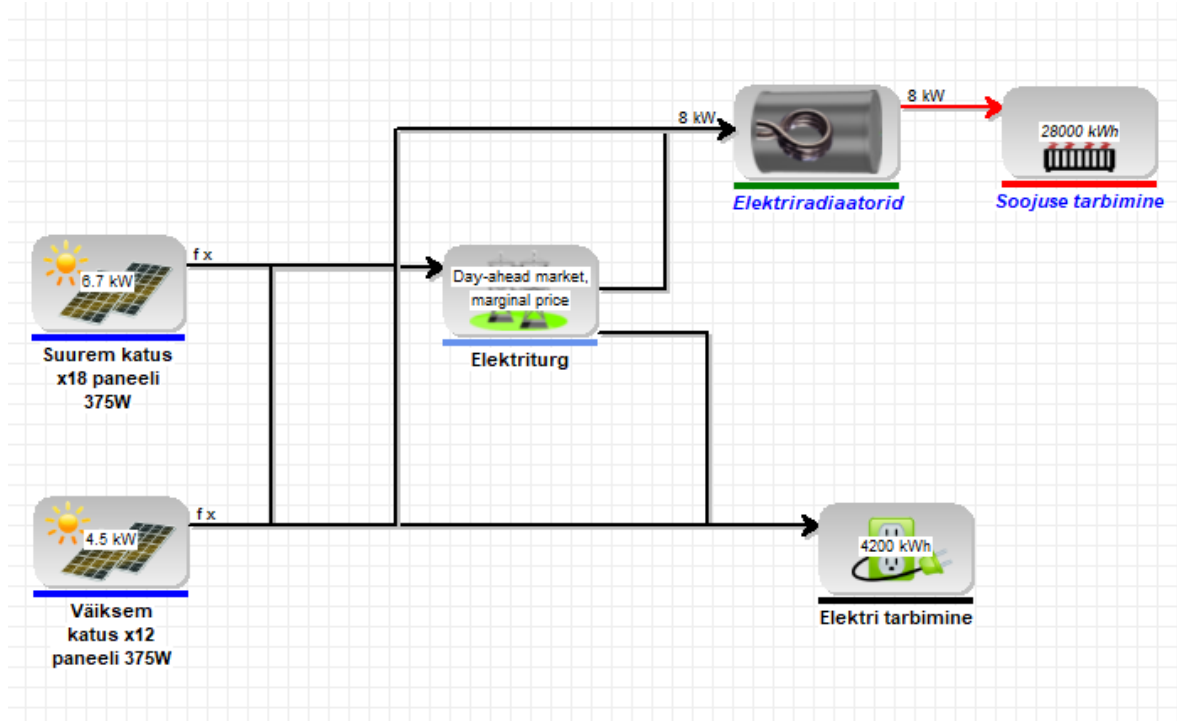
## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] „Eesti Statistika Kvartalikirj; 1:2013“, Eesti statistikaamet. Võrgumaterjal: <https://www.digar.ee/arhiiv/nlib-digar:278641> (vaadatud mai 10, 2021).
- [2] „Spetsialist teeb puust ja punaseks: energiatõhusus ei tähenda ainult väikest küttearvet“, *Rohegeenius*. Võrgumaterjal: <https://rohe.geenius.ee/rubriik/pikk-lugu/spetsialist-teeb-puust-ja-punaseks-energiatohusus-ei-tahenda-ainult-vaikest-kuttearvet/> (vaadatud märts 17, 2021).
- [3] „Hoonete energiatõhusus“, Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium. Võrgumaterjal: <https://www.mkm.ee/et/eesmargid-tegevused/ehitus-ja-elamumajandus/hoonete-energiatohusus> (vaadatud märts 17, 2021).
- [4] „Energiatõhusus - Tööriistad energiatõhususe mõõtmiseks“, *KredEx*. Võrgumaterjal: <https://www.kredex.ee/et/energiatohusus/tooriistad-energiatohusususe-mootmiseks> (vaadatud apr 22, 2021).
- [5] „Nõuded energiamärgise andmisele ja energiamärgisele – Riigi Teataja“. Võrgumaterjal: <https://www.riigiteataja.ee/akt/106052015002> (vaadatud märts 17, 2021).
- [6] „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“, Riigi Teataja. Võrgumaterjal: <https://www.riigiteataja.ee/akt/113122018014> (vaadatud märts 17, 2021).
- [7] R. Perälä, *Päikeseelekter*. Tallinn: Ehitame kirjastus, 2017.
- [8] „Eesti meteoroloogia aastaraamat 2020. aasta kohta“, Riigi Ilmateenistus. Võrgumaterjal: <https://www.ilmateenistus.ee/2021/03/ilmus-eesti-meteoroloogia-aastaraamat-2020-aasta-kohta/> (vaadatud apr 29, 2021).
- [9] „Tarbijaportaali“, Elering AS. Võrgumaterjal: <https://e.elering.ee/#/> (vaadatud apr 29, 2021).
- [10] „E-koolikott“. Võrgumaterjal: <https://e-koolikott.ee/oppematerjal/14367-Tuuleenergia> (vaadatud märts 31, 2021).
- [11] KKT, „Tuuleenergia väiketarbijale“, *Ajakiri Keskkonnatehnika*, okt 08, 2019. Võrgumaterjal: <https://keskkonnatehnika.ee/tuulik-tuuleenergia-vaiketarbijale/> (vaadatud apr 29, 2021).
- [12] „Tuul“, *Riigi Ilmateenistus*. Võrgumaterjal: <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimanormid/tuul/> (vaadatud apr 29, 2021).
- [13] „Nord Pool Spot“, *Imatra Elekter*. Võrgumaterjal: <https://www.imatraelekter.ee/elektrimuuk/nord-pool-spot/> (vaadatud apr 29, 2021).
- [14] „Elektribörsi ajalugu“, Nord Pool Spot. Võrgumaterjal: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/SYS1/Monthly/> (vaadatud apr 29, 2021).

- [14] „Maasoojuspump ja elektri börsihinna järgimine“, *Ait Nord*, aug 27, 2018.  
Võrgumaterjal: <https://ait-nord.ee/maasoojuspump-ja-elektri-borsihinna-jargimine/> (vaadatud apr 29, 2021).
- [15] „energyPRO kasutusjuhend“, EMD International. Võrgumaterjal:  
<https://www.emd.dk/energypro/> (vaadatud apr 22, 2021).
- [16] „Maa-amet 3D kaardirakendus“, Maa-amet. Võrgumaterjal:  
<https://3d.maaamet.ee/kaart/> (vaadatud apr 30, 2021).
- [17] „Energiatõhusus - Tööriistad energiatõhususe mõõtmiseks“, *KredEx*.  
Võrgumaterjal: <https://www.kredex.ee/et/energiatohusus/tooriistad-energiatohususe-mootmiseks> (vaadatud apr 21, 2021).
- [19] „Eesti\_kraadpäevad\_2006.pdf“. Võrgumaterjal:  
[http://www.kalesi.ee/pdf/kalkulaator/Eesti\\_kraadp%C3%A4evad\\_2006.pdf](http://www.kalesi.ee/pdf/kalkulaator/Eesti_kraadp%C3%A4evad_2006.pdf)  
(vaadatud aprill 28, 2021).
- [20] „WINAICO\_Datasheet\_WST-MG\_GEMINI\_EU\_0121.pdf“. Võrgumaterjal:  
[https://www.abckliima.ee/data/Intranet/TOOTED/WINAICO/Failid/2020/WINAICO\\_Datasheet\\_WST-MG\\_GEMINI\\_EU\\_0121.pdf](https://www.abckliima.ee/data/Intranet/TOOTED/WINAICO/Failid/2020/WINAICO_Datasheet_WST-MG_GEMINI_EU_0121.pdf) (vaadatud aprill 26, 2021).
- [21] „Päikesepaneel-Regulus-KPG1-ALC-paigaldusjuhend-eng.pdf“. Vaadatud: apr 28, 2021. Võrgumaterjal:  
<https://www.cerbos.ee/img/cms/paikesekute/paikesekollektor-paikesepaneel-Regulus-KPG1-ALC-paigaldusjuhend-eng.pdf> (vaadatud aprill 28, 2021).
- [22] H. Jaup, J. Raamets ja A. Soon, „Sobivaim taastuenergia lahendus Puiestee 80a õppehoone jaoks“, juuni 2019. Võrgumaterjal:  
<https://digikogu.taltech.ee/et/item/5719bc04-b10b-403f-9b69-03a797eec5c7>  
(vaadatud märts 31, 2021).
- [23] „BuildWind - Architectural and Environmental Fluid Dynamics“, *BuildWind*.  
Võrgumaterjal: <https://www.buildwind.net/> (vaadatud apr 30, 2021).
- [24] „Small Wind Turbine E200L - The latest technology“, Enair. Võrgumaterjal:  
<https://www.enair.es/en/small-wind-turbines/e200l> (vaadatud apr 30, 2021).
- [25] A. K. OÜ, „Inverteriga veeboileriga mudel: FIGHTER S1255-12 R EM INVERTER 12 kW“. <https://www.abckliima.ee> (vaadatud apr 30, 2021).
- [26] „Elektrilevi võrguteenuse hinnakiri“, Elektrilevi. Võrgumaterjal:  
[https://www.elektrilevi.ee/-/doc/8644141/kliendile/Elektrilevi\\_hinnakiri\\_vorguteenuse\\_hinnad\\_alates\\_1\\_jaanuarist\\_2020\\_EST.pdf](https://www.elektrilevi.ee/-/doc/8644141/kliendile/Elektrilevi_hinnakiri_vorguteenuse_hinnad_alates_1_jaanuarist_2020_EST.pdf) (vaadatud apr 30, 2021).

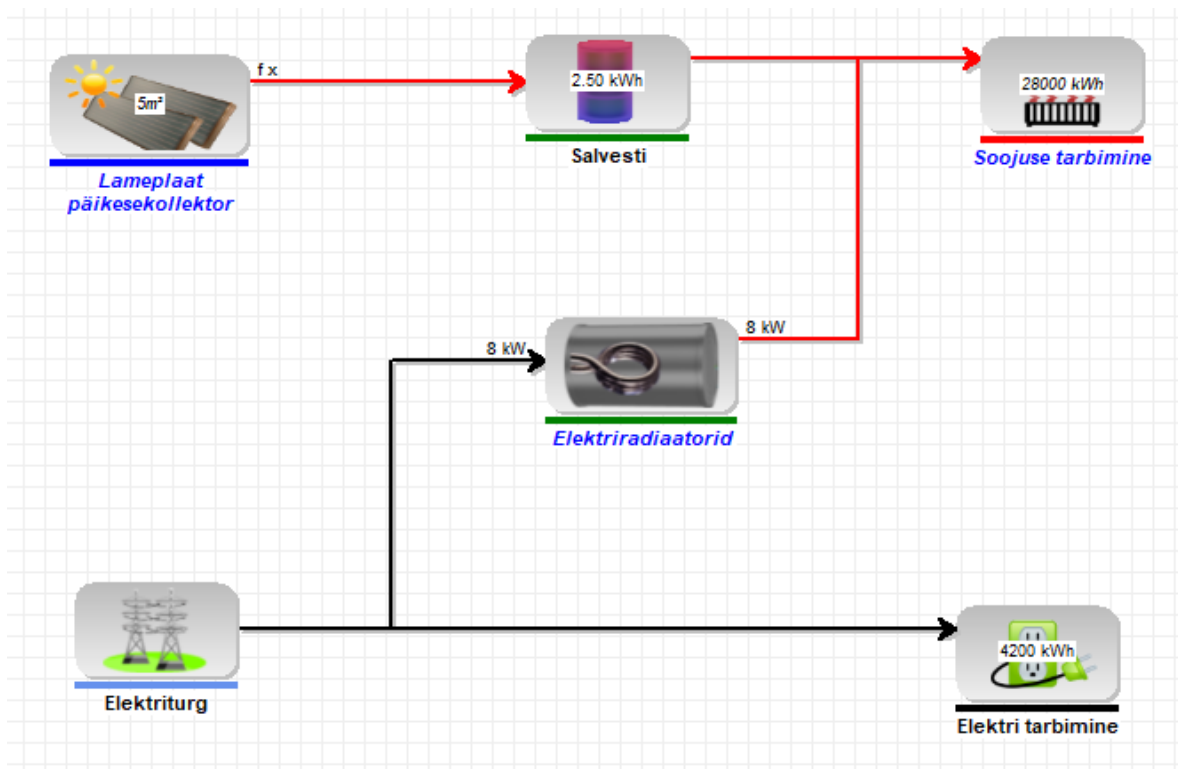
# LISAD

Lisa 1. EnergyPRO tarkvaras loodud päikesepaneelide lahenduse plokk skeem

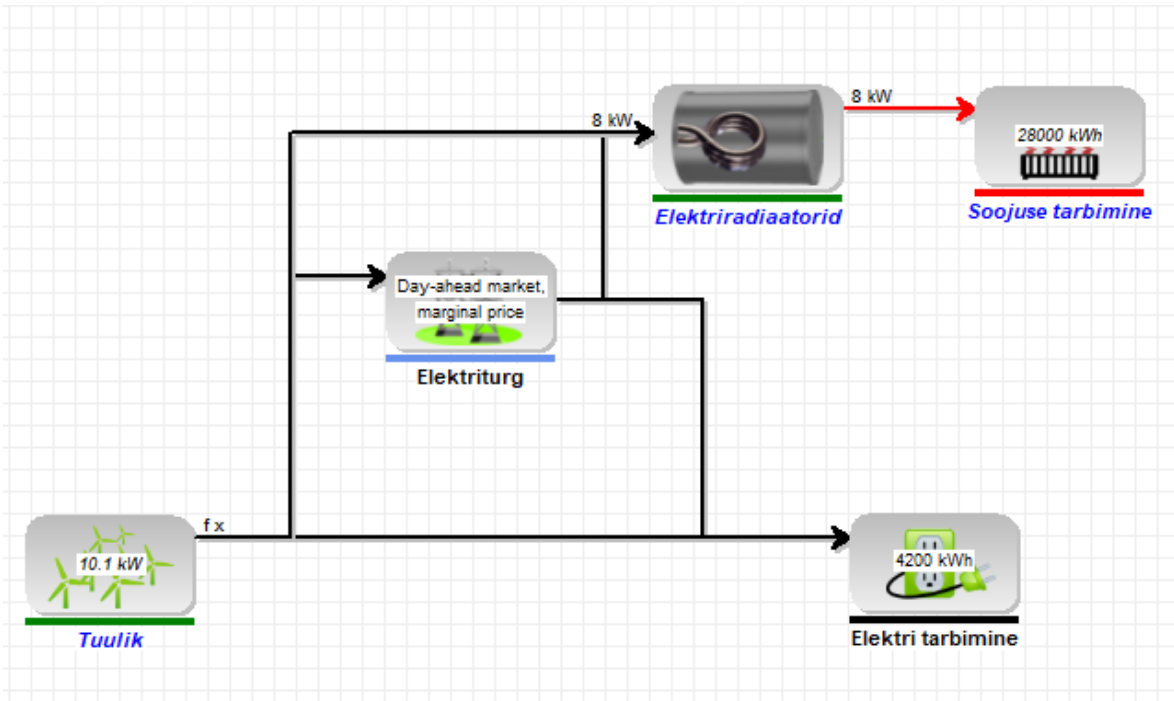




## Lisa 2. EnergyPRO tarkvaras loodud päikesekollektori lahenduse plokkiskeem



Lisa 3. EnergyPRO tarkvaras loodud väiketuuliku lahenduse plokk skeem



Lisa 4. EnergyPRO tarkvaras loodud maasoojuspumba lahenduse plokk skeem

