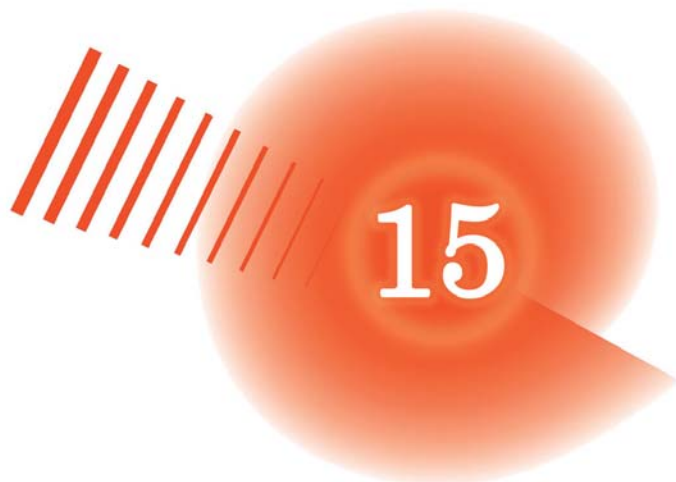


# **TEUK XV**

## **TAASTUVATE ENERGIAALLIKATE UURIMINE JA KASUTAMINE**

VIIETEISTKÜMNENDA KONVERENTSI KOGUMIK



**INVESTIGATION AND USAGE OF  
RENEWABLE ENERGY SOURCES**  
FIFTEENTH CONFERENCE PROCEEDINGS

TARTU, ESTONIA, 2013

Toimetajad / Compiled by: Elis Vollmer Alo Allik, Erkki Jõgi,  
Jaanus Uiga  
Keeleline toimetis: Karin Veske, Margit Lehis

Toimetis on toetuse eest tänulik / Editorial staff is very grateful for the support:



Eesti Taastuvenergia Koda



Eesti Teadusagentuur  
Estonian Research Council

Trükitud: OÜ Paar  
Printed by: Paar Ltd

Kirjastaja: Eesti Maaülikool  
Publisher: Estonian University of Life Sciences

© 2013

Eesti Maaülikool  
Estonian University of Life Sciences  
All Rights Reserved

ISBN: 978-9949-536-05-4

## Sisukord

Eessõna

### TAASTUVENERGIA MIKROTOOTMISE TASUVUS KODUMAJAPIDAMISELE EESTIS PV-JAAMA NÄITEL

Andres Meesak ..... 6

### LEIGO TALU ENERGIAVARUSTUS TAASTUVATE ENERGIALLIKATE KASUTAMISEL

Tõnu Tamm, jt. .... 24

### PROTEIINRIKASTE LOOMSETE KÕRVALSAADUSTE KOOSKÄÄRITAMINE VEISELÄGAGA: RESSURSS, BIOGAASI TOODANGU TÕUS JA KÄÄRITUSJÄÄGI OMADUSED

Peep Pitk..... 33

### BIOMETAANI AVALIKUD HÜVED AASTAS ON 271 MILJONIT EUROT

Ahto Oja, Peep Siitam..... 44

### TAHKEL KÜTUSEL TÖÖTAVATE KOHTKÜTTESEADMETE SEISUKORD JA ARENG EESTIS NING NAABRUSES

Mart Hovi, Annes Andresson ..... 55

### TEHNIKAINSTITUUDI KATUSEL ASUVA TASAPINNALISE PÄIKESEPANEE- LI TÖÖ 2013. AASTA KEVAD-SUUISEL PERIOODIL

Veli Palge, Margus Arak, Erkki Jõgi ..... 66

### MAKROÖKONOOMIKA MEETODITE KOHANDAMINE HOONE ELEKTRISÜSTEEMI UUENDUSTE PROGNOOSIMISEL. PROGNOOSIMISEPROTSESSI KIRJELDUS. KONKREETSE ELEKTRIPAIGAIGALDISE UUENDUSE ANALÜÜS

Valeri Saikovski, Raivo Teemets ..... 77

### HAJUKIIRGUS EESTIS

Teolan Tomson ..... 86

### KAS JÄTTA PUIT METSA LAGUNEMA VÕI TOOTA SELLEST ENERGIAT?

Johannes Valk ..... 96

## EESSÕNA

2013. aastal toimub konverents "Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine" juba 15 korda. TEUK on läbi aastate olnud üks põhilisi taastuvenergia valdkonna teadurite, praktikute, poliitikute ja lihtsalt huviliste kohtumispaiku.

Juubelikonverentsi põhifookuses on sel korral väike- ja hajaenergeetika, et peegeldada paremini ühiskonnas arenevaid olulisi teemasid. Tavapärastele teadlaste ettekannetele on sel korral lisaks antud rohkem sõna ka ettevõtjatele ja praktikutele, et tutvustada edukaid kogemusi taastuvenergia väikelahenduste vallas. Lisaks suulistele ettekannetele on esindatud ka posterettekanded väga laia teemaderingiga, alates hajusast päikesekiirgusest Eestis kuni hoonete elektrisüsteemi innovatsioonide ja metsandusest saadava puidu potentsiaalse kasutamiseni energeetikas.

Juubelikonverentsi programm on sel korral jagatud kolmeks teemadeblokiks: "Visioon - väikelahenduste päralt tulevik?", "Tuule- ja päikeseenergia väikelahendused" ning "Biokütustel põhinevad lahendused". Päeva lõpetusena toimub Eesti taastuvenergia sektori hetkeseisu ja arenguid käsitlev paneeldiskussioon „Taastuvenergia väikelahendused igapähele - kas ja kuidas on see võimalik?“, mis võtab kokku eelnevates ettekannetes käsitletud teemad. Arutelu all on väikelahenduste potentsiaal ning tulevikuväljavaated, seda nii Euroopa mastaabis kui ka lähiajal valmiva Eesti pikaajalise energiamajanduse arengukava taustal. Diskussioon võimaldab poliitikutel, teadlastel ja praktikutel ühiselt arutleda ees ootavate arengusuundade üle.

Huvitavaid ettekandeid ja head lugemist!

Elis Vollmer

Eesti Maaülikooli taastuvenergia keskuse asejuhataja

## **FOREWORD**

Annual conference Investigation and Usage of Renewable Energy Sources is being held already 15th time. The conference has been throughout its history the main meeting point for renewable energy sector politicians, scientists and practitioners.

The main focus of this years jubilee conference will be small scale renewable energetics, to reflect the current important topics in the community. In addition to the regular scientific presentations, this year we also focus on best practices from the entrepreneurs. Besides oral presentations we also exhibit poster presentations with very diverse topics ranging from studies on diffuse solar radiation in Estonia to macroeconomic innovations in building electricity systems and potential use of forestry biomass for energy production.

The program of the jubilee conference is divided into three main sections: 'Vision - are small scale renewable energetics the future?'; 'Small-scale solutions for solar and wind energy' and 'Solutions for biomass based energy production'. Day is summarised with open discussion themed "Small scale renewable energy solutions - If and how it is possible?", bringing together all the ideas from previous presentations. Discussion will focus on development potential and future of small-scale renewable energy both in the context of European policies and Estonian long-term energy management plan that will be completed in the near future. The discussion enables politicians, scientists and practitioners to debate on oncoming development possibilities.

Enjoy the presentations and have a wonderful reading!

Elis Vollmer

Deputy manager of the Centre of Renewable Energy of Estonian University of Life Sciences

# TAASTUVENERGIA MIKROTOOTMISE TASUVUS KODUMAJAPIDAMISELE EESTIS PV-JAAMA NÄITEL

Andres Meesak  
andres.meesak@eesti.ee

## **Annotatsioon**

Kodumajapidamiste kasvavad kulutused elektrienergiale ning erinevate taastuvatest allikatest elektri mikrotootmise tehnoloogiate areng ja odavemine ning mikrotootjate võimalus liituda üldvõrguga on tinginud suureneva huvi mikrotootmisseadmete paigaldamiseks. Investeerimisotsuse tegemisel nähakse peamiste takistustena majanduslikke (liiga pikk tasuvusaeg või liiga kõrge toodetava energiaühiku hind), informatsioonilisi (puudub tõepärane arusaam võimalustest) ja tehnilisi (võrguga liitumise keerukus, erinevate kooskõlastuste ja tegevuslubadega seotud keerukas asjaajamine). Mikrotootmise laiemaks levikuks peavad kõik need takistused olema kõrvaldatud. Käesolevas artiklis on analüüsitud majanduslikke takistusi ja pakutud lahendusi nende kõrvaldamiseks. Analüüsis kasutatakse ühe reaalset tegutseva 9 kW netootmisvõimsusega PV-jaama esimese aasta tootmisnäitajaid. Samuti analüüsitakse ühe teoreetilise 6 kW netootmisvõimsusega PV-jaama näitel mikrotootmisseadmesse investeerimise majanduslikku põhjendatust kodumajapidamisele ning selgitatakse välja tasuvust mõjutavad tegurid.

Märksõnad: mikrotootmine, tasuvusaeg.

## **Sissejuhatus**

Mitmesuguste taastuvenergialahenduste tasuvusest rääkides ja võrreldes nende tasuvust tänaste, fossiilset päritolu konventsionaalsete energiaallikatega, tuleb selgeks teha, kas silmas peetakse tasuvuse makro- või mikro- tasandit ning kas tegu on lühi- või pikaajalise arvutusega.

Makrotasandi arvestustes tuleb võtta energiaühiku kogukulu arvestusel arvesse koormus keskkonnale nii tootmise hetkel kui ka tulevikus ja arvestada toorainega seotud püsikulude pideva kasvuga (Scheer 2012).

Mikrotasandil aga seisavad pidevalt kasvavate energiahindadega silmitsi kodumajapidamised ja väikeettevõtted. Tõusvad energiahinnad ühelt ja taastuvenergia mikrotootmiseks sobilike erinevate tehnoloogiate kiire areng ning seadmete odavnemine teiselt poolt tingib järjest suurema hulga kodumajapidamiste ning mikro- ja väikeettevõtete huvi uudsete energiatootmise võimaluste vastu ja, veendununa nende tasuvuses, ka nende kasutuselevõtu vastu. Statistikaameti andmeil on 2013. a Eesti kodumajapidamiste eluasemekulutusi enim mõjutanud teguriks elektriinna hüppeline tõus (Statistikaamet 2013), mida on seotud elektri reguleeritud hinnapoliitika lõppemisega ja elektrituru liberaliseerimisega kõigile tarbijaile alates 1. jaanuarist 2013.

### **Mikrotootmise definitsioon**

Energia mikrotootmine on kodumajapidamise või väikeettevõtte tarbimiskohas kas ainult elektrienergia tootmine või elektri- ja soojusenergia koostootmine, mis on integreeritud majapidamise või väikeettevõtte energiasüsteemi ja mille eesmärk on katta tootja vajadusi. Süsteem võib olla nii autonoomne kui võrguühendusega ja sisaldada endas nii energia kohapealse salvestamise võimalust kui kohapealsest tarbimisest ülejääva energia üldvõrku müügi võimalust võrguühenduse olemasolul. Mikrotootmisena saab käsitleda ka rühmade või ühistute väikesemahulise energiatootmise eri vorme, mille eesmärk on toota kogukonnatasandil ja kohalike vajaduste katteks (Euroopa Parlament 2013).

Erinevad mikrotootmislahendused võimaldavad toota kas kogu või osa majapidamises vajaminevast energiast kohapeal. Mitmesugused tehnoloogiad rahuldavad erinevaid lõpptarbija vajadusi, pakkudes majapidamise seisukohalt eelkõige rahalist kokkuhoidu ja ühiskonna seisukohalt vähenenud keskkonnasaastamist ning ressursi efektiivset kasutamist.

Peamised energia mikrotootmise tehnoloogiad on: päikesepaneelid elektri tootmiseks, mikro-elektrituulikud, päikese termokollektor, maasoojuspumbad, mikro- koostootmisseadmed ning lisaks mikrotootmises vähemlevinud biogaasigeneraatorid ja mikro-hüdrojaamad.

Mikrotootmiseseadmetega (edaspidi lühendatult MTS) toodetud elektri tarbimine tootmispaiga lähedal vähendab elektri ülekandekulusid ja mikroostootmisjaamades elektri tootmisest vallanduvat soojust on võimalik kasutada eluruumide kütteks või tarbevee soojendamiseks. Euroopa Parlament rõhutab oma mikrotootmise, väikesemahulise elektri- ja soojatootmise resolutsiooni ettepanekus, et positiivse sotsiaalse aspektina vähendab mikrotootmine järjest kasvavat kütteostuvõimetust. (Euroopa Parlament 2013).

Erinevates riikides kasutatakse mikrotootja määratlemisel erinevaid netootmisvõimsusi. Eestis puudub termin „mikrotootja“ hetkel kehtivates asjakohastes seadusandlikes aktides, Elektrituruseaduses ja Võrgueeskirjas. Ainsad dokumendid, mis määratlevad mikrotootja, on võrguettevõtete kehtestatud regulatsioonid elektritootjate liitumiseks võrguga. Eesti suurim jaotusvõrgu ettevõtja – Elektrilevi, kelle väljatöötatud regulatsiooni on üle võtnud ka teised võrguettevõtjad, on jaganud elektritootjad vastavalt tootmiseseadme netootmisvõimsusele. Tootjad, kelle tootmiseseadme tootmisvõimsus on kuni 11 kW, on mikrotootjad, 11–200 kW on pisitootjad, 201 kW kuni 5 MW on väiketootjad ja tootmisvõimsusega üle 5 MW on suurtootjad.

Artikli kirjutamise ajal on enamlevinud mikrotootmise tehnoloogiateks elektri tootmine kas elamu katusele või maapinnale paigaldatud PV-paneelide või mikrotuulikute abil.

### **Kodumajapidamise motivaatorid ja takistused mikrotootmiseseadmetesse investeerimisel**

Taastuvatest energiaallikatest elektri mikrotootmise levikul on mitmeid positiivseid aspekte, mis viitavad selle olulisele rollile säästva energiasüsteemi arengus. Neist olulisemad on kaasaaitamine CO<sub>2</sub> heitmete vähendamisele, fossiilsete kütuste tarbimise vähendamisele ja energiajulgeoleku suurendamisele. Mikrotootmise levikut takistavad tegurid ja puudused võib jagada tehnilisteks, majanduslikeks ja informatsioonilisteks. Takistuste ja puuduste kõrvaldamiseks saab kasutada erineva ajalise kestusega meetodeid. Selleks, et mikrotootmine saaks elektritootmisel märkimis-



väärselt panustada, peavad kõik taksitused ja puudused olema kõrvaldatud (Allen jt 2008).

Mitmetes riikides tehtud tarbijauuringute (Balcombe jt 2013, Palm jt 2011) tulemuste põhjal võib välja tuua peamised tegurid, mis mõjutavad kodumajapidamiste taastuvenegia mikrotootmiseseadmetesse investeerimise otsust.

Finantsmajanduslikud tegurid on valdavad, kui küsimus on takistustes. Liiga kõrge kapitalikulu ja pikk tasuvusaeg ning toetusmeetmete puudumine olid erinevates vaadeldud uuringutes peamised. Rootsis, kus ühiskondlik energiatootmine on laialt levinud, nähti alternatiivina investeerimise kogukondlikku energiatootmise projekti (Palm jt 2011). Suurbritannias aastatel 2007 ja 2009 tehtud uuringutes selgus, et kodumajapidamised on nõus maksma MTSi eest vaid veerandi kuni kolmandiku tollastest hindadest ja süsteemi tasuvusajaks eeldatakse 9–12 aastat (Balcombe jt 2013). Samas uuringu autorid märgivad kokkuvõttes, et vahemikus detsember 2010 kuni detsember 2012 on PV-süsteemide hinnad umbes 50% alanevad ja võrgust ostetava elektrienergia hind on samal perioodil ca 15% tõusnud, seega valitsuse kehtestatud tootmispõhised toetuskeemid on viinud mõne aastaga kodumajapidamise ootusliku ja reaalse tasuvusaja vahelise lõhe olulise vähenemiseni (Balcombe jt 2013).

Keskkonnasääst oli üheks peamiseks motivaatoriks mikrotootmiseseadmetesse investeerimisel. Uuringute põhjal olid aga vaid vähesed majapidamised nõus tegema investeerimise üksnes keskkonnasäästu silmas pidades ning mitte arvestama paigaldusega kaasnevat kapitalikulu (Balcombe jt 2013)

Rootsis on küsitletud majapidamised takistusena välja toonud ka halduslikud takistused – võrguettevõtete huvi ja selgete protseduuride puudumine mikrotootjate liitmisel võrguga. Samuti ebamõistlikult kõrged liitumistasud. Viidati ka kompetentsi puudumisele kohalike omavalitsuste ametnike seas, kelle pädevusse kuulub mikrotootmise rajatiste paigaldamiseks lubade väljastamine. Rootsi uuringus toodi tuulikute puhul eraldi

takistusena välja naabrite võimalik pahameel seoses tuuliku paigaldamisega (Palm jt 2011).

Tehnoloogia arenedes ja mikrotootmiseseadme poolt toodetava energiaühiku tootmise kogukulu alanedes ning elektrienergia turuhinna ja ülekandetasude tõustes kaob potentsiaalsete mikrotootmiseseadmetesse investeerida soovivate kodumajapidamiste teelt peamine takistus – kõrge kapitalikulu toodetava energiaühiku kohta. Seega peamiste takistustena pikemas perspektiivis saab vaadelda eelkõige informatsioonilisi takistusi, mida on oluliselt kergem kõrvaldada, kui majanduslik tasuvus on tõestatud kodumajapidamisele aktsepteeritaval tasemel.

### **Mikrotootmise tasuvusarvestuse meetodid**

Taastuvatest allikatest elektri suurtootmise kohta on tehtud hulgaliselt tasuvusarvestusi nii Eestis kui teistes riikides, arvestatud on kapitali hinda, elektri hinna dünaamikat, taastuenergia toetusi ning muid tehnoloogilisi ja majanduspoliitilisi komponente. Samas hajutatud elektri mikro- ja pisi-tootmine kodumajapidamistes ja väiksemates kogukondades on hakanud laiemalt levima alles viimastel aastatel ja erinevaid tasuvusanalüüsi meetodeid on välja pakutud alles kõige värskemates töödes (Colmenar-Santos jt 2012, Li jt 2012).

Käesolevas töös on tasuvusarvutuste fookus mikrotasandil, st üksikute projektide tasuvuse mõõtmise erinevatel meetodidel, arvestades võimalike muutujaid. Käsitlemist ei leia makrotasandil ehk taastuvatest allikatest elektri mikrotootmise mõju riigi tasandil. Kui MTSi investeering tehakse riigi kaasfinantseerimise abil, on tasuvusanalüüs võimalik nii riigi (arvestades kogu projekti maksumust) kui MTSi paigaldava üksiku majapidamise tasandil lähtudes. Majapidamise seisukohalt lähtudes tuleb tasuvusanalüüsis investeeringuna arvesse võtta vaid majapidamisepoolne panus alginvesteeringusse (Nofuentes jt 2002). Eesti näite puhul, kus MTSid paigaldati SA Kredexi 70%-lise kaasfinantseeringu abil, tuleks tasuvusarvestus teha vaid majapidamise 30%-list omafinantseeringut arvestades. Nagu suurtootmises, nii on ka mikrotasandil iga potentsiaalse investori jaoks olulised investeeringu tootlus ehk sisemine tulumäär (*internal rate*

of return, edaspidi IRR) ja investeringu tasuvusaeg.

Iga majapidamine peab MTSi investeerimise otsustamisel lähtuma oma energiatarbe kontekstist, arvestades kliimaatilisi tingimusi, riigi pakutavaid finantsmehhanisme ja tehnilisi võimalusi MTSi paigaldamisel (Kelleher jt 2009). Põhjalik tasuvusanalüüs, mis arvestab kõiki nimetatud mõjureid, suurendab potentsiaalsete investorite usaldust.

### Süsteemi optimaalne dimensioneerimine

Kuna nii päikesekiirgusest kui tuulest genereeritav energia on perioodilise iseloomuga, ei ole majanduslikult tasuv dimensioneerida MTSi võimsust nii, et see kataks igal ajahetkel majapidamise elektrivajaduse 100%-liseselt. Seda põhjusel, et kui MTS rahuldab kliimaatilisel ebasoodsaimal hetkel kogu majapidamise vajaduse, on ta ülejäänud osal aastast üledimensioneeritud ja suurem osa toodangust suunatakse üldvõrku. Süsteemi optimaalseks suuruseks on tarbimisvajaduse täielik rahuldamine parimate kliimaatiliste tingimuste korral ja ülejäänud ajal puudujääva energia ostmine üldvõrgust (Kalogirou 2009).

Planeeritava MTSi maksimaalne hetke tootmisvõimsus  $P_{peak}^0$  sõltub majapidamise elektritarbest ja tootmise asukohas olemasolevast energiaresursist (päike ja tuul).

$$P_{peak}^0 = \frac{E_{load}}{E_{gen}(P_{peak}=1kW)} \cdot 1 kW$$

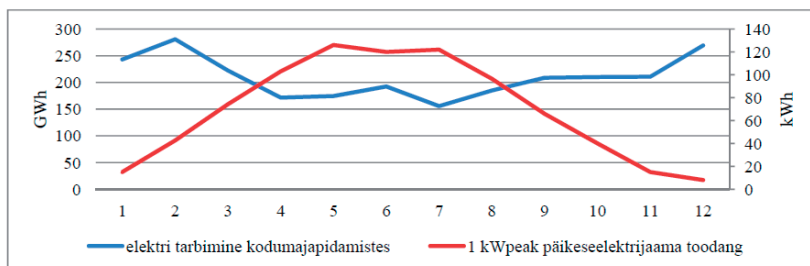
Kus  $E_{load}$  tähistab majapidamise aastast elektritarvet ja  $E_{gen}(P_{peak}=1kW)$  teoreetilise, optimaalselt paigaldatud 1 kW netootmisvõimsusega MTSi toodangut aasta jooksul. Investeringu maksimaalse tootluse toovad süsteemid, mille maksimaalne hetkevõimsus on  $P_{peak}^0$  lähedal. Selle punktini tekib tulu peamiselt elektrisäästust, mis väljendub elektri ostuhinnana. MTSide puhul, mille tootlikkus on märkimisväärselt kõrgem kui  $P_{peak}^0$ , ei kata ülejääva elektri müügist tekkiv tulu süsteemi paigalduskulusid. Süsteemi tootlust  $P_{peak}^0$  lähedal tuleb pidada optimaalseks (Colmenar-Santos 2012).

## Elektrihind

Investeeringu tasuvus sõltub järgnevatest teguritest: alginvesteeringu suurus, jooksvad kulud remondile, hooldusele ja paigaldise kindlustusele, võimalik finantskulu juhul, kui investeering tehakse pangalaenu abil ja rahavoog tagatakse tootmisest. Tootmisest tekkiv rahavoog sõltub omakorda tuleviku elektrihinnast ja võimalikest riiklikest taastuvenergiatootestest.

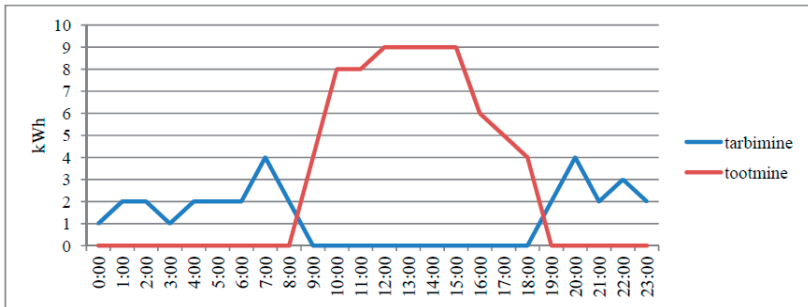
Elektrienergia hinna dünaamika hindamiseks saab aluseks võtta ajaloolised andmed ühelt ja analüütikute soovitusel elektrihinna dünaamika kohta tulevikus teiselt poolt. Eestile lähimas ja ühenduste kaudu seotud Nord Pool Spot Soome hinnatsoonis on peale sealse turu täielikku avanemist 2000. aastal elektri kWh hind kerkinud aastas keskmiselt 14%. Euroopa Liidu keskmisena on kodutarbijatele müüdava elektri hind ajavahemikus 2000–2007 kasvanud keskmiselt 2,6% aastas, vahemikul 2008–2010 2,9% aastas ja EPIA prognoosib perioodiks 2011–2020 keskmiselt 3,5%-list aastast juurdekasvu (EPIA 2011). Sellest EPIA prognoosist lähtudes on tehtud ka käesoleva töö tasuvusarvutused.

PV-jaama puhul tuleb arvestada jaama tootlikkuse langemist aasta lõikes ajale, kui kodumajapidamiste elektritarbimine on madalseisus ja jaam puhkab laiuskraadist tingitud valgusaugu tõttu kuudel, mil kodumajapidamiste elektritarbimine on tipus.



Joonis 1. Eesti kodumajapidamiste kogu elektritarbimine (GWh) kuude kaupa ja Eesti laiuskraadil asuva optimaalselt paigaldatud teoreetilise 1 kW netovõimsusega PV-jaama toodang (kWh). Allikas: Statistikaamet, 2013 ja PV GIS, 2013  
Figure 1. Monthly electricity consumption of Estonian households (GWh) and theoretical production of optimally located 1 kWp rooftop PV-installation on Estonian latitude (kWh). Source: Statistikaamet, 2013 ja PV GIS, 2013

Keskmisel kodust väljas tööl käival perel tekib tootmise-tarbimise nihe ka ööpäeva piires – kui pere hommikul ärkab ja on tarbimise hommikune tipp, pole PV-jaam tootmist veel alustanud või on toodang tasemel, mis ei kata ära tarbimisvõimsust. Jaam saavutab maksimaalse tootmisvõimsuse ligikaudu keskpäevaks ja tootmisvõimsus hakkab kahanema tööpäeva lõputundidel ning pere koju saabudes jaam lõpetab tootmise ja õhtune tarbimise tipp langeb ajale, kui PV-jaam enam ei tooda.



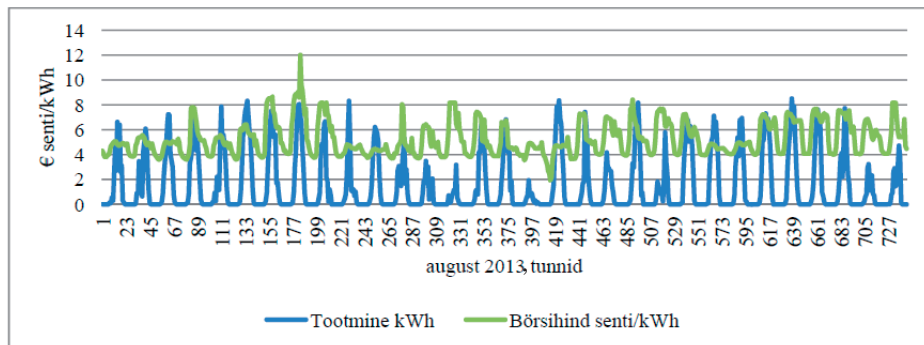
Joonis 2. Tootmise ja tarbimise nihe ööpäeva piires. Allikas: autori mõõtmised mõõtepunkti vaadatuna – st tarbimine on kaetud omatoodanguga ja seetõttu ei kajastu graafikul

Figure 2. Deviation of household's consumption and production of PV-installation within 24h period. Measured at meter – i.e. consumption is covered with production and thus not shown Source: author's measurements

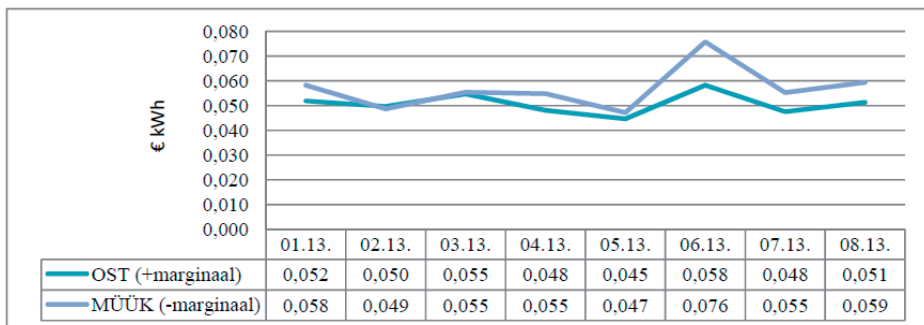
Tootmise-tarbimise langemine erinevatele aegadele ööpäeva piires mõjub aga positiivselt ostetava-müüdava elektri hinna suhtele. Nagu graafikult (joonis 3) selgelt välja joonistub, langeb tootmise tipp kokku päeva kõrgeimate tunnihindadega NPS-i elektribörsil.

Eestis kasutatakse mikrotootjate tarbitud ja toodetud elektrienergiakoguste mõõtmiseks tunnipõhiseid kaugloetavaid arvesteid ja nii tarbimise kui tootmise hind on börsihinnapõhised. Tarbimise puhul lisatakse konkreetse tunni börsihinnale bilansihalduri marginaal ja omatarbest ülejääva ning võrku müüdava toodangu puhul lahutatakse see tunni börsihinnast.

Elektrituruseaduse järgi on mikrotootjal õigus saada taastuenergiatootust. Toetust makstakse lisaks elektri müügihinnale võrku müüdüd saldeeritud koguselt, mis tähendab, et iga tunni võrku müüdüd elektrikogusest

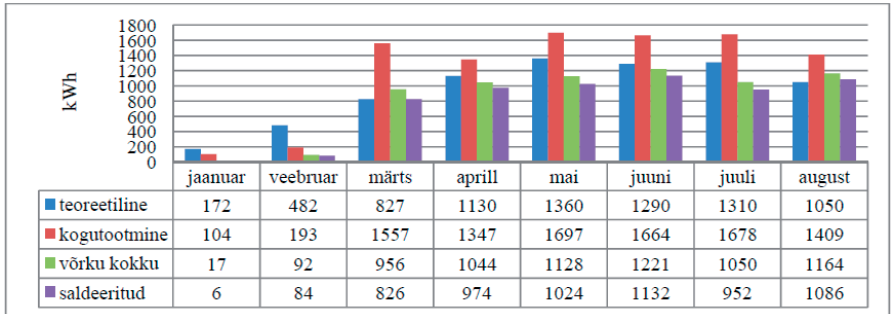


Joonis 3. NPSi elektri tunnihind ja PV-jaama toodang (august 2013). Allikas: autori mõõtmised ja <http://www.nordpoolspot.com>  
 Figure 3. Spot price of electricity on NPS electricity exchange and production of PV installation (August 2013). Source: author’s survey and <http://www.nord-poolspot.com>



Joonis 4. Kuude keskmised elektri ostu- ja müügihind PV-jaamaga mikrotootjale 2013. a NPSi elektribörsil. Allikas: OÜ 220Energia e-teenindus  
 Figure 4. Average monthly purchase and sales price of electricity for household including margins of utility company in 2013. Source: 220Energia OÜ web-service

lahutatakse maha samal tunnil võrgust ostetud elektrienergiakogus. Saldeerimine mõjutab eelkõige neid tunde, kui jaam ei tööta täisvõimsusel ja osadel faasidel on majapidamise tarbimine suurem kui tootmine. Seaduse järgi ei saa toetust elektrituulikutega tootjad, kes on saanud samale tootmis- seadmele ka investeeringutoetust. Tuult energiaallikana kasutatavate jaamade puhul on piiritletud ka aastane maksimaalne tootmislamiit, mille puhul riik toetusi maksab. PV-jaama puhul saab toetust olenemata investeeringutoetustest ja aastasest PV-jaamade tootmismahust. Vastupidiselt



Joonis 5. PV GIS-kalkulaatori prognoositud ja MTSi tegelikud tootmiskogused ning üldvõrku müüdüd saldeeritud ja saldeerimata elektrikogused. Allikas: PV GIS, 2013 ja autori mõõtmised

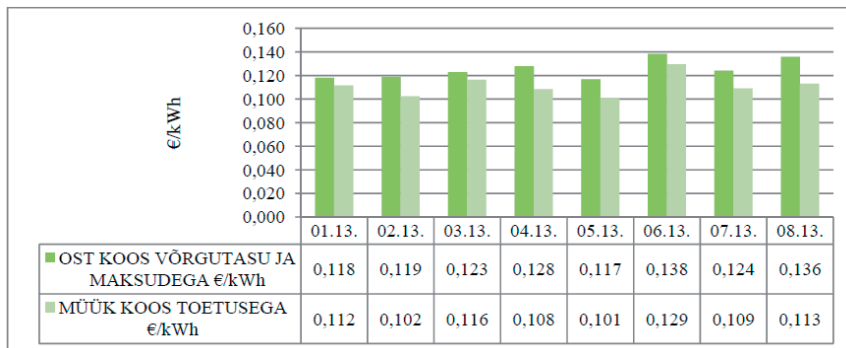
Figure 5. Theoretical production of installation by PV GIS-simulator compared to actual production of PV-installation and electricity fed to grid (un-balanced and balanced). Source: PV GIS, 2013 and author's measurements

paljudele riikidele ei erista Eesti seadus taastuvatest allikatest energia tootjaid tootmisvõimsuse alusel, st ühed ja samad reeglid kehtivad nii mikrotootjaile kui suurte tuuleparkide omanikele.

Eesti kodumajapidamise elektriarvest moodustab elekter vaid ligikaudu kolmandiku. Ülejäänud osa koosneb ülekande- ja võrgutasudest, elektriaktsiisist, taastuvenegiastust ja kogu arvele lisandub ka käibemaks.

Ka võrgutasude osa on mudelis järgitud dünaamilisena. Võrgutasud koosnevad Eestis liitumisvõimsusest lähtuvatest püsitasudest (võimsusepõhine ampritasu ja võrguühenduse kasutamise kuutasu) ning tarbimisest sõltuvast ülekandetasust. Käesolevas analüüsis on arvutusteks võrgutasu püsitasu ning muutuvad osad on summeeritud ja jagatud tarbitud elektrienergia ühikule ning arvutatud aasta keskmine võrgutasu kWh kohta. Konkurentsiameti ja tema eelkäija, Energiaturu Inspeksiooni poolt Eesti suurimale võrguettevõtjale (Jaotusvõrk OÜ ja tema õigusjärglane Elektrilevi OÜ) kinnitatud kuni 63A peakaitsemega kodutarbijale on võrgutasud alates 2004. aastast tõusnud keskmiselt 4% aastas (Konkurentsiamet 2013). See on võetud ka koostatud mudelis võrgutasude dünaamika aluseks. 2013. a autori koostatud ostu-müügi hindade võrdlusest selgub, et MTSi toodetud elektri ühe kWh müügihind koos toetusega moodustab

keskmiselt 89% sama elektrikoguse ostuhinnast koos kõigi tasude ja maksudega.



Joonis 6. Elektri ostuhind koos riiklike tasude ja maksudega kodumajapidamisele ning omatarbest ülejäänud MTSi toodetud elektri müügihind koos taastuvenergiatoetusega 2013. aastal. Allikas: autori mõõtmised

Figure 6. Purchase price of electricity for household including all taxes and fees compared to sales price of produced energy including RE support. Source: author's survey

Elektriarve muude komponentide – aktsiismaksu, taastuvenergiatasu ja käibemaksumäära muutusi tulevikus arvestatud ei ole.

### **Teoreetilise 6 kWp PV-jaama tasuvus 5 MWh aastas tarbivale perele**

Analüüsitud süsteem on võrguühendusega nn *on-grid* PV-jaam. Mikrotootmiseadmega toodetud elektrit kasutatakse majapidamise elektritarbe rahuldamiseks. Kuna puudub kohapealne hetketarbimisest ülejääva energia salvestamise võimalus, tuleb juhul, kui tootmine ületab hetketarbimise, suunata ülejääk üldvõrku ning kui tarve ületab tootmise, osta puuduv elekter üldvõrgust.

Elektri liikumise suunda majapidamise ja üldvõrgu vahel mõõdab kahe-suunaline voolumõõtja. Kuna taastuvatest allikatest elektri tootmine on kõikumine nii sesoonselt kui ööpäeva piires – tuulikud toodavad tingimusel, et on piisava tugevusega tuul ja PV-paneelid tingimusel, et on piisavalt päikesevalgust, siis tuleks võtta tasuvusarvestustes arvesse süsteemi aastane toodang (Colmenar-Santos jt 2012).



Kui vaadeldava perioodi (aasta) vältel on majapidamise elektritarbe rahuldamiseks tulnud lisaks omatoodangule tarbida elektrit lisaks ka üldvõrgust, on tuluna käsitletav sääst, mis tekib MTSi toodetud elektri kasutamisest. Säästetav elekter on hinnatud sama perioodi keskmise börsihinna alusel, millele on juurde liidetud kodutarbijale rakenduvad võrgutasud ja riiklikud maksud.

Kui perioodi jooksul on omatoodang rahuldanud kogu majapidamise elektrivajaduse ja on tekkinud ülejääk, tuleb tulu üldvõrku tagasimüüdud elektrist. Kuna üldvõrku müüdiv elekter toodetakse aastase perioodi jooksul, on tuluks ülejääva energia eest saadava tasu aasta keskmine väärtus.

Vastavalt eeltoodud valemile oleks sellise majapidamise mikrotootmis-seadme optimaalseks netovõimsuseks:

$$P_{peak}^0 = \frac{5000}{821} \cdot 1 \text{ kW} = 6,09 \text{ kW}$$

Eesti laiuskraadil optimaalselt hoone katusele paigaldatuna toodab selline jaam käikuandmise esimesel aastal vähemalt 5040 kWh elektrit (PV GIS 2013). Võrdlus autori võimsama paigaldisega näitab, et kasutatav PV GIS-kalkulaator on pigem konservatiivne ja reaalne toodang on kalkulaatori pakutavast pigem suurem kui väiksem.

Jaama eeldatav tööiga on 30 aastat ja vanusest tingitud tootlikkuse vähenemine 0,5% aastas, alates käikuandmise teisest aastast. Paigaldatava jaama kogutoodang 30-aastase elutsükli jooksul on seega 140,7 MWh. Arvestuslikult on jaama väärtus elutsükli lõpus null eurot. Süsteemi hoolduskuluks arvestame 1% jaama paigaldusväärtusest (Kalogirou 2009).

Artikli kirjutamise ajal on autori küsitluste kohaselt kapitalikulu PV-jaama paigalduseks kodumajapidamisele vahemikus 1,6–1,7 €/W, sisaldades nii mikrotootmise seadmeid, nende paigaldust kui ka liitumisega seotud kulusid. Iga projekti puhul erineb kulu mingil määral, tingituna paigalduse keerukusest ja liitumise kuludest, mis on iga objekti puhul kulupõ-

hised. Võttes mudelis aluseks paigaldushinna 1,7 €/W, on analüüsitava projekti alginvesteeringuks 10 200 eurot.

Kui analüüsitav teoreetiline majapidamine tarbiks 30 aasta jooksul vaid võrguvoolu, siis oleks selle majapidamise kulutused elektrile, arvestades eeltoodud algandmeid elektri hinna ja võrgutasude tõusu kohta 32 819 eurot. See teeks ühe kWh hinnaks majapidamisele koos võrgutasu ja maksudega 30 aasta keskmisena 0,22 €/kWh.

MTS, mis esimesel aastal toodaks 5040 kWh elektrit, annab 30-aastase eluea jooksul kogutoodanguks 141 MWh elektrienergiat. Eeldusel, et investeering tehakse säästudest ja laenukapitali ei ole kaasatud, on toodetava elektrienergia ühiku omahinnaks 0,094 €/kWh. See hind sõltub vaid alginvesteeringust, jaama hoolduskuludest ja kogutoodangust eluea jooksul. Nagu selgub, on MTSiga toodetava elektri ühikuhind juba täna hetkel ligi 20% odavam majapidamise poolt üldvõrgust ostetavast elektrienergiast koos kõigi tasude ja maksudega.

Jaama võimsus on dimensioneeritud katma majapidamise aastase elektrivajaduse, kuid arvestades tootmise ja tarbimise sesoonsust kuude lõikes ning ööpäeva piires, ei õnnestu kogu toodetavat elektrit efektiivselt kohapeal ära tarbida, st samavõrra üldvõrgust ostetava elektri kogust vähendada. Vähesese päikesega talvekuudel tuleb tarbimisvajadus katta peamiselt üldvõrgust ostetava elektriga ja aktiivse tootmisega kuudel tuleb võrguvooluga katta tarbimine õhtust kuni hommikuni, kuhu langeb suure tõenäosusega tavalise, kodust väljas töötava majapidamise tipptarbimise aeg – hommikul enne tööleminekut ja õhtul peale töölt saabumist. Sellest lähtudes tuleb aastase säästu leidmiseks arvestada osa toodetava elektri müügiga bilansihalduri vahendusel börsil. Omatarbimisest ülejääva elektrienergia kogus sõltub majapidamise tarbimisharjumustest. Autori paigaldatud jaama esimese tööaasta bilansiks kujunes, et toodetud 11400 kWh-st 58% (6650 kWh) läks võrku ja 42% tarbiti ära kohapeal.

Võttes mikrotootmiseseadme esimese tegevusaasta elektri keskmiseks müügihinnaks koos mahaarvatud bilansihalduri marginaaliga 0,0576 €

kWh, mis on autori jaama puhul olnud 2013. a kaalutud keskmine ja kasutades omatarbe-üldvõrku müügi suhet 40/60, saame esimese aasta säästuks elektrikuludelt, arvestades ka jaama tegevuskulusid, 569,72 eurot ning jaama kogu elutsükli jooksul elektriarvetelt akumuleeruvaks säästuks 21 685,50 eurot. 60/40 võrku müügi ja omatarbe suhte korral on akumuleeruvate säästudega alginvesteering kaetud jaama tegutsemise 16. aastal, kuid investeeringu sisemiseks tootluseks on -0,4%, seega majanduslikult mõtleval majapidamisel tasuks investeerida säästud pigem mõnda teise projekti.

Kui aga sama majapidamine suudab muuta oma tarbimisharjumusi viisil, et toodetavast elektrienergiast tarbitakse kohapeal ära pool, samavõrra vähendades üldvõrgust ostetava elektrienergia kogust, kujuneks esimese aasta säästuks 585,05 eurot ja jaama elutsükli kogusäästuks 21 909,17 eurot. Sellisel juhul oleks alginvesteering säästudest genereeruva rahavooga kaetud jaama tegutsemise 15. aastal ja investeeringu sisemine tulumäär juba 5,3%. Selline tootlus oleks säästude investeerimise seisukohalt juba mõistlik, kuna pakub selgelt suuremat tootlust kui pikaajaline pangadeposiit. Samas näitab see, et kui investeerida pangalaenu abil, millise keskmiseks intressimääraks vastavalt autori küsitlustele Eesti suuremates kommertspankades on ligikaudu 5%, oleks investeeringul jällegi vaid majapidamise ökoloogilist jalajälge vähendav efekt, kuid puuduks majanduslik põhjendus.

Saavutamaks majapidamisele ootuslikku kümneaastast tasuvusaega, peaks alginvesteering alanema 50% võrra ja jaama maksumus koos paigalduse ja liitumistega ei tohiks ületada 1,1 €/kW, *ceteris paribus*. See on võimalik kas tehnoloogia odavnemise või investeeringutoetuse abil. Kuna peale alginvesteeringu peaksid muud tingimused samaks jääma, ei tohiks mikrotootja jaoks ebasoodsamaks muutuda ka riiklikud taastuvenergia toetuskeemid.

## **Kokkuvõte**

Analüüsi tulemusena selgus, et elektri mikrotootmiseseadmete paigaldamise tasuvuse arvutamisel peab majapidamine enne investeerimisotsuse

tegemist võtma arvesse mitmeid erinevaid väliseid tegureid: kliimatilised tegurid, mis mõjutavad jaama tootlikkust, majanduslikud tegurid, mis mõjutavad elektrienergia kodutarbijale tulevikus ning tehnoloogilised tegurid, mis mõjutavad seadmete eluiga ja jooksvaid hoolduskulusid.

Uuringus kasutatud reaalse PV-jaama tööiga on veel liiga lühike, et teha mingeid kaugeleulatuvaid järeldusi jaama tootlikkuse kohta Eesti laiuskraadil ning vananemisest ja kliimatilistest väliskeskkonna tingimustest tulenevatest kõikumistest ja tootlikkuse vähenemisest aja jooksul. Samuti on väga hüpoteetiline jaama või selle üksikute komponentide tegelik eluiga ja jooksvad hoolduskulud.

Majanduslikust aspektist on elektri ja võrgutasude hinnatõus äärmiselt hüpoteetiline, kuid samas tasuvust oluliselt mõjutav tegur. Ka riiklikust poliitikast lähtuv taastuvenergiatoetuse suurus ja selle maksmise põhimõtted võivad, arvestades ühiskonnas toimuvat diskussiooni, muutuda. Investeerimisotsuse tegemise hetkel oleks, nii nagu igale tavalisele investorile, oluline teadmine, et riik ei muudaks tasude-toetuste põhimõtteid kiirustades ja mis veelgi hullem, tagasiulatuvalt.

Nagu selgus, mõjutavad tasuvust ja investeeringu tulukust ka mikrotootmisega tegeleva majapidamise tarbimisharjumused. Mida enam suudetakse toodetavast elektrist efektiivselt kohapeal ära tarvitada, suurendamata seejuures majapidamise kogu elektrikulu, seda kiiremini tasub investering ennast akumuleeruva säästuna ära. Koos mikrotootmiseseadme paigaldusega oleks otstarbekas läbi viia majapidamise energiatarbeaudit, et teha kindlaks, millal ja mis on majapidamise kõige suuremad elektritarbijad ning kas nende tööd oleks võimalik mingite lisainvesteeringute abil nihutada ajale, kui MTS töötab. Sellised lahendused võivad olla investeeringud erinevatesse targa kodu seadmetesse, mis oleks võimelised majapidamisseadmete tööd juhtima vastavalt tootmiseseadme tööle ja elanike tarbimismustrile nii, et oleks tagatud maksimaalne energiasääst.

Kui majanduspoliitiline keskkond on stabiilne ja mikrotootmise tehnoloogiate hinnad alanevad veelgi, tuues seadmete investeeringu tasuvusaja

majapidamisele kümne aasta kaugusele ka laenukapitali kasutades, muutub taastuvatest energiaallikatest elektri mikrotootmine kindlasti paljudel majapidamistele atraktiivseks kodukulude kokkuhoiu viisiks.

### **Kasutatud kirjandus**

- Allen, S.R., Hammond, G.P., McManus, M.C. 2008. Prospects and barriers to domestic micro-generation: A United Kingdom perspective. *Applied Energy*. vol. 85. pp. 528–544.
- Balcombe, P., Rigby, D., Azapagic A. 2013. Motivations and barriers associated with adopting microgeneration energy technologies in the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. vol. 22. pp. 655–666.
- Colmenar-Santos, A. Campiñez-Romero, S., Pérez-Molina, C., Castro-Gil, M. 2012. Profitability analysis of grid-connected photovoltaic for household electricity self-sufficiency. *Energy Policy*. vol. 51. pp. 749–764.
- Euroopa Parlament. Resolutsiooni ettepanek RE\1002326ET. 06.09.2013.
- European Photovoltaic Industry Association (EPIA). 2011. Solar Photovoltaics. Competing in the energy sector. On the road to competitiveness. Brussels, 33p.
- Kalogirou, S.A. 2009. Solar energy engineering. Processes and systems. San Diego, London: Academic Press, 760 p.
- Kelleher, J., Ringwood, J.W. 2009. A computational tool for evaluating the economics of solar and wind microgeneration of energy. *Energy*. vol. 34, pp. 401–409.
- Konkurentsiamet, autori teabenõue kodutarbijate võrgutasude kohta 28.05.2013.
- Li, Z., Boyle, F., Reynolds, A. 2012. Domestic application of micro wind turbines in Ireland: Investigation of their economic viability. *Renewable Energy*. vol. 41, pp. 64–74.
- Nofuentes, G., Aguilera, J., Muñoz, F.J. 2002. Tools for the Profitability Analysis of Grid-Connected Photovoltaics. *Progress in Photovoltaics*. vol. 10, pp. 555–570.
- Palm, J., Tengvard, M. 2011. Motives for and barriers to household adoption of small-scale production of electricity: examples from Swe-

den. Sustainability: Science, Practice & Policy. vol. 7, pp. 6–15.  
Scheer, H. 2012. Energy Autonomy. The economic, social and technological case of renewable energy. Earthscan. London, 299 pp.  
Statistikaamet, 2013 <http://www.stat.ee/65321>

## **PAYBACK PERIOD AND PROFITABILITY OF RENEWABLE ENERGY MICROGENERATION FOR HOUSEHOLD IN ESTONIA. AN EXAMPLE OF ROOFTOP PV-INSTALLATION**

Andres Meesak

The sharp increase in electricity retail pricing after market liberalization in Estonia at the beginning of 2013 has been one key factor for sharp increase of consumer price index. This factor along with the decrease of prices on domestic micro generation equipment, especially on PV-equipment, has started lively debate among consumers and also energy professionals on positive and negative sides of wider penetration of distributed renewable energy micro generation.

On macro level the benefits and disadvantages are different than for households planning the investment. For household the main argument is possibility to fight back the increasing spending on energy. The main barrier on the other hand is uncertainty regarding payback-time of the installation and the cost of energy generated by the installation.

The article analyzes on example of one 9 kWp PV rooftop-installation and one 6 kWp hypothetical rooftop PV-installation and average annual consumption of electricity by an average household living in single-family dwelling the economic aspects of microgeneration. Analyzed are cost of energy generated by the installation and impact of generated electricity on the household's annual electricity bill under Estonian legislative conditions.

Key finding is that alongside with investment into microgeneration installation the household should audit its whole energy consumption to exploit as much of energy generated by the installed station as possible. Under current market conditions and properly dimensioned PV- installation the payback for household generates from savings from electricity bill depending on consumption/grid sales ratio in about 15-16 years. As according to any scenario some of the generated electricity is sold to grid, the payback time for household is also dependent on governmental initiatives to develop renewable energy penetration. It is important that these governmental initiatives are stable and not changed retroactively.

# LEIGO TALU ENERGIAVARUSTUS TAASTUVATE ENERGIAALLIKATE KASUTAMISEL

Tõnu Tamm<sup>1</sup>, Andres Annuk<sup>2</sup>, Jaak Lokk<sup>3</sup>, Veli Palge<sup>2</sup>, Valdur Tiit<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Leigo talu, leigo@leigo.ee, <sup>2</sup>Eesti Maaülikool, Andres.Annuk@emu.ee, <sup>2</sup>Eesti Maaülikool, Veli.Palge@emu.ee, <sup>3</sup>Greentech Energy OÜ, kilko@gmail.com, <sup>4</sup>Estonian Euromanagement Institute, vtii@neti.ee

## Annotatsioon

Käesolevas artiklis kirjeldatakse energiamahuka talu energiavajaduse katmist täielikult taastuvate energiaallikate – tuule, otsese päikesekiirguse ja puiduhakke – abil. Projekt näeb ette talu stabiilse energiavarustuse nii autonoomse süsteemina kui ka võrku ühendatuna. Stabiliseerimiseks ehk energia salvestamiseks tuulevaikuse perioodideks kasutatakse lisaks akupangale esmakordselt Eestis pump-hüdroelektrijaama. Lähtudes vee mahust, nivoode vahest ja ööpäevasest energiavajadusest kasutatakse lihtsat valemit leidmaks, mitmeks ööpäevaks konkreetne pump-hüdrojaam energiat salvestab. Lokaalsel elektrienergia tootmisel kasutatakse aruka elektrivõrgu elemente.

Märksõnad: taastuvad energiaallikad, päikesepaneel, päikesekollektor, elektrituulik, stabiliseerimine, automaatjuhtimine, pump-hüdroelektrijaam.

## Sissejuhatus

Leigo talu, mis paikneb kaunis Lõuna-Eestis metsade ja järvede vahel, kasutab elektrit riiklikust võrgust ja soojuse saamiseks puitu oma metsast. Projekti eesmärgiks seati kasutada elektrienergia tootmiseks taastuvaid allikaid. Nende kasutamisel on põhiprobleemideks stabiilsuse puudumine ja seadmete kõrge hind. Positiivseks küljeks on tasuta energiavoogude kasutamine ja keskkonnasõbralikkus. Kirjeldatud olukorras on mõistlik valida vastavalt tarbimisele optimaalse võimsusega seadmed – tuulegeneraator 20 kW ja päikesepaneelid 2 kW kombinatsioonis vajalikku energiahulka salvestava akupargi ning hüdroakumulatsiooni jaamaga (vt joonis 1 ja 2). Lihtsustatud arvutuskeemi ja programmi HOMER tulemuste



erinevuse põhjused selgitab edasine töö. Kavandatud süsteem võimaldab lühiajaliselt kasutada võimsust kuni 30 kW. Mahukaks energia salvestamiseks ja taaskasutamiseks mitme nädala jooksul loovad eelduse Leigo talu läheduses olevad järved, mille kõrguste vahe on kuni 26 m.



Joonis. 1. Vaade Leigo talu hüdroakumulatsiooni järvele  
Figure 1. View of the Leigo hydro accumulation lake

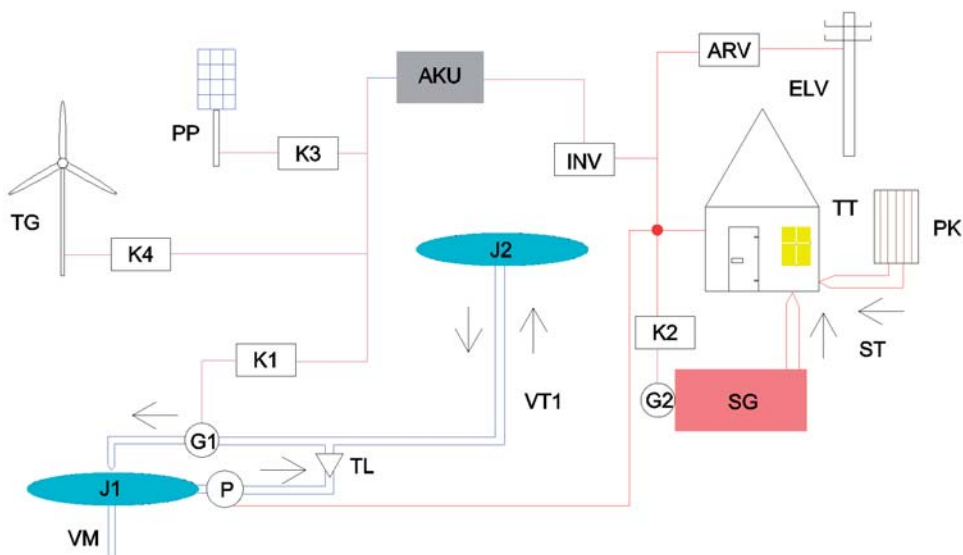
### **Leigo talu energiavajaduse iseloomustus**

Kütteks on seni kasutatud halupuid, mida kulub umbes 100 rm aastas. Automiseerimise eesmärgil on kavas edaspidi minna üle hakkpuidu kasutamisele. Tarbevee soojendamiseks, olmetehnika ja tööstuslike elektriseadmete (tööpingid, saekaater, halumasin jm) käivitamiseks kasutati seni võrguelektrit peakaitsemega 50 A. Elektriarved ületavad talvekuudel 1000 eurot. Maksimaalne võimsustarve oleks koos küttega kuni 350 kW. Kui elektriga küte ja tarbevee soojendamine maha arvata ning vältida suure võimsusega seadmete (saekaater, puiduhakkur, keevitus) samaaegset kasutamist, siis ei ületaks vajalik elektrivõimsus 30 kW. Seega oleks talu toimimiseks vajalik keskmine võimsus 2 kW ja energiahulk ööpäevas umbes 50 kWh. Võimsamate seadmete kasutamisel, mis töötaksid tööpäevadel ja lühiajaliselt, kuluks ööpäevas kuni 70 kWh elektrit. Aastane arvestuslik elektritarve on seega

$$E_a = 19\,000 \text{ kWh.} \quad (1)$$

## Leigo talu uus energiasüsteem

Leigo talul on eesmärk viia elektrivarustus ja suvine soojatarbimine üle tuule- ja päikeseenergia kasutamisele, kavandades ja ehitades vajaliku tervikliku süsteemi, mida nimetame lühidalt projektiks Leigo100TE. Sobivate tehniliste lahenduste jaoks võib leida palju üldist informatsiooni, näiteks linkidelt (Energy.gov 2013) ja (Energogen OÜ 2013) või raamatust „Elekter päikesest ja tuulest“ (Pinn, R. ja Pinn, M. 2012). Konkreetset juhul on ülesandeks leida sobivaim lahendus. Kogu kompleksi põhimõteline skeem on toodud joonisel 2.



Joonis 2. Leigo talu uue energiasüsteemi üldskeem. TG – tuulegeneraator; PP – päikesepaneelid; J1 – alumine järv; J2 – ülemine järv; K1, K2, K3 ja K4 – muundurid; VT1 – järvi ühendav veetoru; G1 – veeturbiin koos generaatoriga; G2 – kombijaama elektrigeneraator; P – veepump; TL – tagasivooluklapp; VM – vee äravool; AKU – akupark (energialadu); INV – inverter; SG – kombijaama soojusenergia generaator; ARV – elektrienergia arvesti; ELV – elektrivõrk; PK – päikesekollektor; TT – energia tarbijad

Figure 2. Principal scheme of Leigo farm new energy system. TG – wind generator; PP – PV-panels; J1 – lower lake; J2 – upper lake; K1, K2, K3 and K4 – controllers; VT1 – pipe connecting the lakes; G1 – hydro turbine and generator; G2 – CHP generator; P – water pump; TL – backflow valve; VM – drainpipe; AKU – energy storage batteries; INV – inverter; SG – CHP heat generator; ARV – electric meter; ELV – electric network; PK – solar collector; TT – consumers

Eeltoodud energiavajaduse kirjeldusest näeme, et piisab 20 kW elektri-  
tuulikust koos 2 kW päikesepaneeliga, mis koos toodavad aastas eelda-  
tavalt

$$E_{pr} = E_p + E_t = 35\,540 \text{ kWh} \quad (2)$$

elektrit. Arvestades paratamatuteks kadudeks (peamiselt pumbajaamas)  
kuni 25%, on kasulik jääk

$$E_o = 26\,655 \text{ kWh} \quad (3)$$

siit saame, et elektrienergia netotoodang ületab kalkuleeritud tarbimise

$$K = E_o / E_a = 1,4 \quad (4)$$

korda, millest piisab süsteemi häireteta tööks.

Arvestame, et tuul ja päike laevad 50 kWh mahtuvusega akuparki, mis  
koosneb tavapäraest akudest ja innovaatilistest superkondensaatoritest  
ning millest saaks inverteriga võtta võimsust kuni 30 kW. Kui akupark  
saab täis ja tuulik ning paneelid toodavad rohkem elektrit, kui talu het-  
kel tarbib, siis kasutatakse ülejäävat energiat vee pumpamiseks alumisest  
järvest ülemissse järve. Pump-hüdroelektrijaama käivitamiseks on turbiini  
veega toitvas torus elektriga reguleeritav ventiil ja pumbast väljuvas torus  
tagasivooluklapp, mis juhtimist ei vaja. Kui ka ülemine järv saab täis või  
energiat jääb pumpamisest üle, siis müüakse ülejääk võrku. Tuulevaiksel  
ja pimedal ajal, kui elektrit ei toodeta ning akupargist on tarbitud umbes  
20% selles olevast energiast, pannakse tööle kuni 5 kW võimsusega Pel-  
ton-tüüpi hüdroturbiin. See katab talu tarbimise ja vajadusel laeb akupar-  
ki. Niisugune variant võib osutada kasulikuks ka vee aereerimisel, kuna  
alumine, 10 ha suurune järv, kus arendatakse kala- ja vähikasvatust, kipub  
talvel ummuksisse jääma. Kogu süsteemi tööd juhib vastava programmi  
alusel arvuti ja olukorda saab eemalt kontrollida sidevahenditega.

Päikeseenergiat on otstarbekas kasutada suvel ka vee soojendamiseks,  
sest siis ei ole vaja puudukatelt kütta. Vee soojendamiseks on sobiv kasu-  
tada 5 kW võimsusega päikesekollektoreid (Tomson 2012).

Talule vajaliku soojuse tootmisel puitküttest on automatiseerimiseks ka-  
vas hakata kasutama hakkpuitu. Seejuures väärib tähelepanu kavandatav  
kombijaama ehitamine, et kasutada seal toodetavat elektrit soojuspumpa-

de abil täiendava soojuse tootmiseks. Samas on kombijaama suvekuudel mõtet kasutada ainult siis, kui sel ajal leitakse soojusele hea rakendus (nt puidu kuivatamiseks, biogaasi tootmiseks).

### **Pump-hüdroelektrijaam**

Pump-hüdroelektrijaam (vt joonis 2) koosneb kahest eri tasemetel olevast järvest, mille veepindade kõrguste vaheks on käesolevas projektis arvestatud 26 m. Alumiseks reservuaariks kasutatakse ära olemasolev umbes 10,5 ha suurune järv. Ülemine, 1 ha pindalaga 2 m sügavune veehoidla tuleb veel rajada. See mahutaks 20 000 m<sup>3</sup> vett. Sinna pumbatakse energia ülejäägi korral vesi alumisest järvest 90 m pikkuse ja 272 mm sise-diameetriga toru kaudu. Energia vajadusel pannakse sama toru alumises otsas tööle Pelton-tüüpi 5 kW turbiin. Ülemise järve täielikul täitumisel või tühjenemisel kõigub alumise järve veetase 20 cm, mis on väiksem ilmastikust tingitud muutusest. Kui mõne pikema põua järel peaks veetase rohkem langema, saab seda kompenseerida kõrgemal asuvate järvede arvelt. Nende kogupindala on üle 20 ha.

Ööpäevade arvu, milleks jätkub varutud energiast, on mugav arvutada valemi (5) järgi:

$$t = V \cdot h / (E \cdot 367), \quad (5)$$

kus  $t$  on aeg ööpäevades,  $V$  – ülemise veehoidla maht (m<sup>3</sup>),  $h$  – kõrguste vahe (m) ja  $E$  – keskmine ööpäevane energiatarbimine (kWh) (üks kWh energiat kulub 367 m<sup>3</sup> vee tõstmiseks ühe meetri kõrgusele). Seega on poole ülemise järve vee mahu, 10 000 m<sup>3</sup> potentsiaalne energia 26 m allpool asuva järve suhtes 708 kWh. Sellisest kogusest jätkub teoreetiliselt Leigo talu kahe nädala keskmise elektritarbe katmiseks, kadusid (peamiselt turbiini kasutegurit) arvestades aga umbes 12 päevaks.

### **PV-paneelide ja tuulegeneraatoriga süsteemi toimivus aasta soojal perioodil programmi HOMER järgi**

Eeldame, et soojal ja suurima päikesekiirguse perioodil, mis on aprillist septembrini võiks talu elektrienergiavarustus tugineda peamiselt päikese- ja tuuleelektrienergiale. Koormuse ning tootmisseedmete andmed oleme

võtnud samad, mis eespool toodud. Tuulekiiruste andmed 2011. a kohta Tõraveres on saadud EMHl-st. See aasta ja koht on tüüpilised meie kliima ning sisemaa jaoks. Saadud tuuleandmed on tunnikeskmised mõõdetuna 10 m kõrgusel, artikli autorid on teisendanud need 30 m kõrgusele, kasutades logaritmilist valemit. Maapinna karedusklassiks  $z_0 = 0,25$  (Annuk jt 2013). Päikesekiirguse  $W_v$  – võrgust saadav või võrku antav elektrivõimsus (kW);  $W_p$  – PV-paneelide väljundvõimsus (kW);  $W_a$  – akude salvestuv või akudest saadav elektrivõimsus (kW);  $W_{kaod}$  – võimsuskaod, konverteris, akudes, juhtmetes jne (kW).  $W_v$  ja  $W_a$  – võivad olla nii miinus- kui plussmärgiga. Akude ülesanne on suurendada taastuenergia osakaalu energiaportfellis ning suurendada energia varustuskindlust.

Taastuenergia osakaal  $R_f$  väljendab antud juhul taastuenergia suhtelist osa kogu saadavasse energiasse, k.a võrgust saadav:

$$R_f = (E_t + E_p) / (E_t + E_p + E_v). \quad (6)$$

Võrgust saadavat energiat loeme fossiilseks, võrku antav energia ei lähe arvesse kui kohapeal kasutatav taastuenergia. Taastuenergia ülejäägil laaditakse akusid ning vastavalt puudujäägile võetakse energia sealt. Süsteemi toimimiseks on vaja teatud ajahetkedel võtta võrgust energiat ning vastavalt ka anda võrku energiat selle ülejäägi korral. Tabelis 1 on need energiakogused arvestatud ka vastavalt saadava energia ning tarbimise juurde.

*Tabel 1. Süsteemi energiavoogude andmed kuuekuulise arvestatud aasta sooja perioodi kohta*

*Table 1. Data of energy flows of the system for six month annual warm period*

Saadav energia			Tarbimine		
Allikas	Kogus, kWh	Osakaal, %	Allikas	Kogus, kWh	Osakaal, %
Päike	1410	9	Tarbija	9490	61
Tuul	6844	44	Kaod	1832	12
Võrgust	7401	47	Võrku	4333	27
Kokku	15 655	100	Kokku	15 655	100

Tabelist 1 näeme, et tuulegeneraatorist ja päikesepaneelidest saadav energia ei kata ära tarbimist. Keskmise arvutuslik tuulekiirus 30 m kõrgusel oli vaadeldud ajavahemikul 2,94 m/s, mis on liiga madal. Kui oletada, et tegelik tuulekiirus antud paigas on suurem, siis oleks võimalik katta talu elektrienergiavajadus ainult tuule- ja päikeseenergiast soojal perioodil, kuid sealjuures tuleks ka täpsustada akude kasutusrežiimid. Maksimaalvõimsuse kasutustegurid tuulegeneraatori ja PV-paneelide puhul olid vastavalt 7,81% ja 16,1%. Akudes salvestunud ja tagasi antud energiakogus ilma kadudeta oli arvutuste läbiviimisel 3530 kWh, arvestatuna aasta peale on see kogus 7060 kWh. Nende akude ressurss on 22 000 kWh energiakäivet (Energy... 2013), mis tähendab, et antud akude elueaks antud süsteemis on kolm aastat.

Modelleerimise tulemusena saime süsteemi taastuenergia osakaaluks  $R_f=0,53$ . Ligikaudu pool tarbitavast energiast saame antud juhul ainult taastuenergiaallikatest. Kaod akudes ja inverteeris on suured, töö jätkamisel oleks vaja keskenduda akude töörežiimidele ja nende mahtuvuse valikule. Tuulegeneraatori püstitamisel tuleks hästi valida kohta, tehes enne vajalikud tuulekiiruse mõõtmised.

### **Kokkuvõte**

Leigo taastuenergiaprojekt Leigo100TE võimaldab suhteliselt väikese võimsusega agregaatidega (kokku 22 kW) pikema aja jooksul hüdroakumulatsiooni teel koguda suurt energiavaru, kuni 1300 kWh. See tagab ka autonoomse süsteemi korral stabiilse elektriga varustamise umbes kaheks nädalaks. 50 kWh akupark koos inverteriga võimaldab lühiajaliselt ka suuri võimsusi tarvitada, näiteks 14 kW koos saekaatriga. Tugeva tuule korral saaks ülemine järv vett täis kolme ööpäevaga, isegi samal ajal 50 kWh ööpäevas tarbides.

Pump-hüdroelektrijaamade rajamiseks vajalikke kõrguste vahesid esineb Eestis peamiselt kõrgustikel (Otepää, Karula, Haanja). Laugete nõlvadega Pandiverel ja Vooremaal on vaja tunduvalt pikemaid ühendustorusid. See aga suurendab kadusid. Väikese majapidamise korral (tarbimine 15 kWh ööpäevas) võimaldab ka väiksem tiik (pindala 50 x 50 m<sup>2</sup> sü-

gavusega 2 m) 5 m kõrgusel varuda energiat nädalaks. Ööpäevade arvu annab valem (5). Kasutada saaks ka 5–10 m sügavusi ammendatud karjääre. Ka paljud jõed sügavates orgudes sobivad vee ülespumpamiseks, kui vaid üleval tiigiks ruumi jätkub. Pankrannikul oleks nii kõrgust kui ruumi. Kavandatava projekti Leigo100TE eripäraks on hüdroakumulatsiooni kasutamine mahuka energiasalvestina, mistõttu see on teadaolevalt Eestis teedrajav. NASA andmete alusel programmi HOMER järgi arvutades on vaid soojal perioodil aastas võimalik katta talu elektrienergia vajadus antud konfiguratsiooni juures ainult tuule- ja päikeseenergiaga, kuid määravaks osutub siin tuuliku asukoha valik. Täiendavad uuringud selleks on vajalikud.

Kavandatav töö annab praktilisi kogemusi analoogilisteks ettevõtmisteks mujal (sh mitme talu peale) ja on taastuenergia kasutamise alal eksperimenteerimis- ning praktikabaasiks esmajoones Eesti Maaülikooli üliõpilastele.

### **Kasutatud kirjandus**

- Annuk, A., Allik, P., Pikk, P., Uiga, J., Tammoja, H., Toom, K., Olt, J. 2013. Increasing Renewable Fraction by Smoothing Consumer's Power Curves in Grid Connected Wind-Solar Hybrid Systems. – Oli Shale, 2S, 257–267.
- Energy Modeling Software for Hybrid Renewable Energy Systems. <http://www.homerenergy.com>, 20.09.2013.
- Energy.gov. <http://energy.gov/energysaver/articles/planning-home-renewable-energy-systems>, 27.09.2013.
- Energogen OÜ. <http://energogen.ee/>, 27.09.2013.
- Rein Pinn ja Merike Pinn. 2012. Elekter päikesest ja tuulest. MTÜ Kolm Kobrastr. Trükikoda Ecoprint. Tallinn: 155.
- Tomson, T. 2012. Soojuslike heliokollektorite valikust. – Kogumik Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine, Tartu, 118–121.

## **ENERGY SUPPLY OF LEIGO FARM BASED ON RENEWABLES**

Tõnu Tamm, Andres Annuk, Jaak Lokk, Veli Palge, Valdur Tiit

In this paper the energy supply of Leigo farm by solar-, wind- and wood (wood chips) energy is described. The energy system is designed to work either in grid connected or autonomous mode. The average needed power capacity is 2 kW and the peak load is 30 kW. Modelled capacity of wind- and PV solar devices is 20 kW and 2 kW respectively. As storage elements, power banks and a hydro-pumping station are used. The latter is the first of the kind in Estonia. The need for energy storage and with the use of hydro-pumping station can be calculated by a formula. An option for summer time in grid connected mode – energy supply of the farm only by wind and solar PV panels with back-up batteries shows the importance for the right choice of wind generator location. The above situation has been modelled by the programme HOMER.



# **PROTEIINIRIKASTE LOOMSETE KÕRVALSAADUSTE KOOSKÄÄRITAMINE VEISELÄGAGA: RESSURSS, BIOGAASI TOODANGU TÕUS JA KÄÄRITUSJÄÄGI OMADUSED**

Peep Pitk  
TTÜ Keemiainstituut  
peep.pitk@ttu.ee

## **Annotatsioon**

Biogaasist kui alternatiivsest taastuvenergiaallikast on Eestis räägitud aktiivselt viimase kümnendi jooksul. Siiani on biogaasi tootmist eelkõige käsitletud elektri ja soojuse koostootmise aspektist, kuid viimaste aastate jooksul on üha enam keskendunud biogaasi kasutusvõimalustele transportkütusena. Samas tuleb mõista, et biogaasi tootmisel on tehnoloogia südameks tootmisprotsess ja selle efektiivsus ning biogaasi lõpptarbimise valikud sõltuvad majanduspoliitilistest otsustest. Arvestades potentsiaalsete biogaasi tootmise tooraine voogudega, on selge, et biogaasi tootmine Eestis, mis võimaldaks kasvõi 1–2% ulatuses täita 10% taastuvate energiaallikate osakaalu saavutamist transpordisektoris, saab baseeruma lägal, tahesõnnikul ning rohtsel biomassil. Oma doktoritöös on autor keskendunud aga läga kooskääritamisele proteiini ja rasvarikaste tapamajajäätmetega ning sellest lähtuvatele võimalustele ning probleemidele, sest liha tarbimine ja sellest tulenevate tapamajajäätmete hulk maailmas on ajas vaid suurenev ning efektiivset lahendust vajav probleem. Lisaks suurendab tapamajajäätmete ja läga kooskääritamine kääritusjäätis erinevate makro- ja mikrotoitainete sisaldust, mis annab olulist lisaväärtust kääritusjäätis kasutamisel väetisena.

Märksõnad: anaeroobne kääritamine, biogaas, kääritusjäätis, kääritusjäätis väetusomadused, ammoniumi inhibitsioon.

## **Sissejuhatus**

Anaeroobne kääritamine ehk biogaasi tootmine on üks efektiivsemaid tehnoloogiaid erinevate biolagunevate jäätmete käitlemiseks. Põllu-

majandussektoris võimaldab biogaasi tehnoloogia samaaegselt toota energiat (elektri, soojuse või transportkütusena), taaskasutada mikro- ja makrotoitaineid väetisena, hävitada umbrohuseemneid ning vähendada kasvuhoonegaaside emissioone läga ja tahesõnniku käitlemisel/hoiustamisel. Erinevate jäätmete lägaga kooskäiritamisel tõuseb makro- ja mikrotoitainete sisaldus kääritusjäägis, mis tõstab oluliselt kääritusjäägi väärtust kunstväetiste asendajana.

Loomsete kõrvalsaaduste käitlemist reguleerib Euroopa Liidus „Animal-by-Products Regulation EC No. 142/2011“ (European Parliament and Council 2011), mille alusel loomset kõrvalsaadused on jagatud kolme erinevasse kategooriasse. Esimese kategooria jäätmete kasutamine ka peale regulatsioonis nõutud kuumtöötlemist on rangelt piiratud ja võimalik vaid spetsiaalsetes põletusahjudes, samas teise ja kolmanda kategooria jäätmete kasutamine vastavalt peale steriliseerimist või hügieniseerimist on lubatud ka biogaasijaama toorainena. Tapamajajäätmed on valdavalt kõrge proteiini ja rasvasisaldusega, mis teeb neist atraktiivse biogaasi tootmise tooraine, sest proteiini teoreetiline metaani ( $\text{CH}_4$ ) tootlikkus on  $496 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$  orgaanilise aine (OA) kohta, rasva puhul on see  $1014 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$  OA ja süsivesikute puhul  $415 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$  OA (Angelidaki ja Sanders 2004). Loomset päritolu proteiinide ja rasvade lagundatavus on üldjuhul ka suhteliselt kõrge, mis võimaldab biogaasi tootmisel teoreetiliste arvutustega võrdväärseid tootlikkusi saavutada. Eelnevat arvesse võttes tuleks täiendavalt analüüsida, kui suurt lisaväärtust võimaldaks toota esimese kategooria jäätmete sorteerimine ja muust jäätmevoost eraldi käitlemisliini rajamine AS Vireen kompleksis, kui arvestada perspektiivis loomsete kõrvalsaaduste mahtude suurenemist. Eraldi käitlusliin võimaldaks teise ja kolmanda kategooria jäätmetest tuleneva steriliseeritud massi kasutuselevõttu energia tootmiseks lägal baseeruvates biogaasijaamades ja toitainete taaskasutamiseks taimeväetisena.

Teise ja kolmanda kategooria loomsete kõrvalsaaduste töötlemisel on enim levinud kuiv kuumtööstustehnoloogia (*dry rendering* ehk steriliseerimine), mille tulemusel tekib kõrge kuivaine (KA) sisaldusega steriliseeritud mass (SM), mis omakorda separeeritakse kolmeks fraktsiooniks:

lihakondijahu (LKJ), tehniline rasv ja dekantermuda. Nimetatud fraktsioonid on patogeenidevabad ja kõrge energiasisaldusega, mis muudavad need atraktiivseteks tooraineteks biogaasijaamadele, kuid nende kasutamist piiravad ühelt poolt lokaalne kättesaadavus ning teisalt proteiinide ja rasvade lagundamisega seotud bioloogilise protsessi juhtimise probleemid. Lämmastikku sisaldavate ühendite (nagu proteiinid) anaeroobse kääritamise käigus tekib ammoniumioon ( $\text{NH}_4^+$ ), mis ioniseerimata kujul ( $\text{NH}_3$ ) võib põhjustada protsessi inhibitsiooni. Inhibitsiooni ulatus on omakorda sõltuvuses  $\text{NH}_4^+$  kontsentratsioonist, protsessi temperatuurist, pH-st, orgaanilisest koormusest ja inokulumi adaptatsioonist (Yenigün ja Demirel 2013). Samas konkreetne inhibitsiooni mehhanism on siiani selgusetu, sest inhibeerivaks ammoniumi kontsentratsiooniks peetakse erinevate allikate andmetel vahemikku 1,7–14 g/l (Chen jt 2008, Nakashimada jt 2008). Ühtlasi järeldub, et tegu ei ole  $\text{NH}_3$  puhul otsese protsessi inhibitsiooniga, vaid ajutise protsessi efektiivsuse langusega koosluse koosseisu muutuse ajal, mille käigus muutuvad atsetoklastiliste metanogeenide asemel domineerivaks süntroofsed atsetaadi oksüdeerijad ja hüdrogantroofsed metanogeenid. Rasvade kääritamisel on peamised protsessi opereerimise probleemid seotud flotatsiooni, vahutamise ja rasvade laguproduktide ehk pika ahelaga rasvhapete (LCFA) akumulatsiooni ning nende negatiivse mõjuga mikrobiaalsele aktiivsusele (Alves jt 2009, Edström jt 2003).

Käesolev artikkel võtab kokku kahe eksperimendi tulemused, millest üks käsitleb teise ja kolmanda kategooria loomsete kõrvalsaaduste ressursi ja biogaasi potentsiaali steriliseerimise tehnoloogia produktide alusel Eestis (Pitk jt 2012). Teise eksperimendi alusel antakse ülevaade lihakondijahu ja lehmäläga kooskääritamise võimalustest siiani avaldamata katseandmete alusel.

### **Tahkete tapamajajäätmete ressurss ja biogaasi potentsiaal**

2009. aastal tekkis Eesti tapamajades kokku 22 709 tonni loomseid kõrvalsaaduseid (Pitk jt., 2012) millest 1. kategooria jäätmed moodustasid vaid 7,8%. Läga ja seedetrakti sisu, mis ei vaja enne biogaasijaamas kasutamist kuumtöötlemist, moodustasid teise kategooria jäätmetest 85%

(tabel 1). Kuigi suurema osa tapamajajäätmetest moodustavad kolmanda kategooria jäätmed, mis vajavad vaid hügieniseerimist (70 °C, 1 h), siis Eestis on olemas tehnoloogiline võimekus kogu tekkiva jäätmevoo steriliseerimiseks (133 °C, 20 min, 3 bar). Steriliseerimise protsessi käigus muundatakse tahked tapamajajäätmed SM-iks, mis omakorda fraktsioneeritakse. SMi ja separeeritud fraktsioonide (LKJ, tehniline rasv ja dekanterjääde) koostis on esitatud tabelis 2. Kõiki fraktsioone iseloomustab kõrge KA- ja toitaineesisaldus. Erandiks on tehniline rasv, milles on vaid erinevate makro- ja mikrotoitainete jääkkontsentratsioonid. Toitainetesisalduse võrdluseks on esitatud ka Torma lüpsilehmade läga koostis. Üks tonn steriliseeritud massi on N- ja P-sisalduse poolest võrdne ~14 tonni lüpsilehmade lägaga. Tahkete tapamajajäätmete steriliseerimisel tekkivate produktide massibilanss ja CH<sub>4</sub> potentsiaalid on esitatud joonisel 1 ja tabelis 3. Teise ja kolmanda kategooria tahkete tapamajajäätmete steriliseerimisel tekib 450 kg SMi ja 550 kg kondensaati, mis suunatakse edasiseks töötlemiseks reoveepuhastisse. Peale tsentrifugmist separeeritakse SM kolmeks fraktsiooniks. CH<sub>4</sub> potentsiaal on kõigi fraktsioonide puhul kõrge ja varieerub ajas sõltuvalt proovide proteiini- ja rasvasisaldusest. Joonis 2 näitab selgelt, et peale steriliseerimist on tahked tapamajajäätmed anaeroobselt kiirelt lagundatavad ja juba 10 päeva jooksul saavutatakse ~95% CH<sub>4</sub> lõpp-potentsiaal. Kokkuvõtvalt saab öelda, et teise ja kolmanda kategooria tahkete tapamajajäätmete eraldi steriliseerimisel ja SMi kasutamisel biogaasijaama toorainena oleks võimalik ühe tonni jäätmete kohta toota 308,25 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>, mis vastab 3,1 MWh primaarenergiale.

*Tabel 1. Eesti lihatööstustes veiste, sigade ja lindude töötlemisel tekkivate kõrvalsaaduste kogused kategooriate kaupa, 2009. aasta andmete alusel*

*Table 1. Slaughterhouse waste amounts generated in Estonia in 2009*

Kogus, t/aasta	Veis	Siga	Linnud	Kokku loomseid kõrvalsaaduseid
Kategooria 3	7055	5906	4350	17 311
Kategooria 2	2049	1184	400	3633
Läga/seedetrakti sisu	1965	1143	0	3108
Kategooria 1	1765	0	0	1765
Kokku	10 869	7090	4750	22 709

Tabel 2. Teise ja kolmanda kategooria tahkete tapamajajäätmete steriliseerimise produktide keemiline koostis

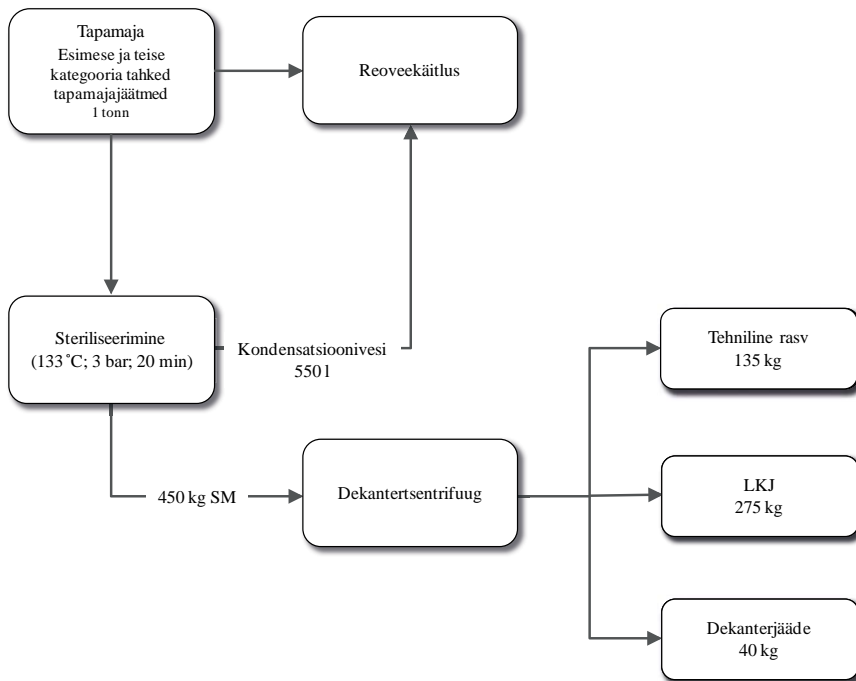
Table 2. Second and third category sterilized mass fractions' chemical composition

Parameeter (mg/kgKA)	SM	Dekanterjääde	LKJ	Tehn. Rasv	Lehmaläga
KA (%)	96	99	99	99	12
OA (%)	87	76	66	100	83
N <sub>üld</sub>	59 800	67 600	78 600	2080	35 700
P	22 250	43 725	61 410	40	12 900
TOC	553 000	484 000	416 000	773 000	450 000
C:N suhe	9	7	5	372	13
S	2400	2800	3100	<25	4900
Cd	<1	<1	<1	<1	<1
K	3793	4531	5153	15	22 490
Ca	34 567	60 000	92 398	54	19 915
Cr	<1	<1	<1	<1	2
Mg	1133	2116	2527	7	10 875
Na	4543	7194	8444	51	5370
Ni	<1	<1	<1	<1	1
Pb	<2	<2	<2	<2	<2
Zn	68	107	99	<1	173
Cu	21	14	15	3	27

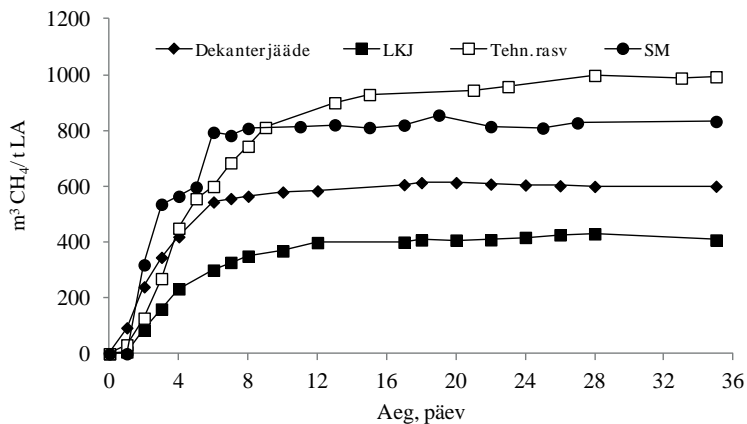
Tabel 3. Teise ja kolmanda kategooria tahkete tapamajajäätmete steriliseerimise produktide metaani potentsiaal.

Table 3. Second and third category sterilized solid slaughterhouse waste methane potential.

Tooraine	Metaanitoodang (CH <sub>4</sub> , m <sup>3</sup> /t LA)	Metaanitoodang (CH <sub>4</sub> , m <sup>3</sup> /t)
Steriliseeritud mass	834	685
Dekanterjääde	607	459
Lihakondijahu	390	259
Tehniline rasv	978	966



Joonis 1. Tahkete tapamajajäätmete steriliseerimise massibilanss  
Figure 1. Mass balance of solid slaughterhouse waste rendering process



Joonis 2. Teise ja kolmanda kategooria steriliseeritud tahkete tapamajajäätmete metaanipotentsiaali katsete kumulatiivsed toodangukõverad  
Figure 2. Second and third category sterilized solid slaughterhouse waste methane potential cumulative curves

Lisaks energia tootmisele tuleb arvestada ka makro- ja mikrotoitainete sisaldust, millega on võimalik asendada tehisväetiste kasutamist. Kõike eelnevat arvesse võttes on vaja kriitiliselt üle hinnata perspektiivis loomsete kõrvalsaaduste käitlemise riiklik süsteem, kus hetkel käideldakse kõikide kategooriate loomseid kõrvalsaaduseid ühel liinil, mistõttu steriliseeritud massi kasutamine on piiratud esimese kategooria jäätmetele kehtestatud normide alusel.

### **Lehmaläga ja lihakondijahu kooskäiritamine**

Steriliseeritud tapamajajäätmete fraktsioonidega teostati kokku viis erinevat läbivoolu katset (katsete kestvus oli 6–12 kuud), mis kõik viidi läbi erinevate protsessi parameetritega, et võrrelda erinevate faktorite mõju protsessi efektiivsusele ja määrata inhibitsiooni põhjused ning mehhanism. Käesoleva artikli raames käsitletakse vaid ühe reaktori süsteemi tulemusi, milles toimus lehmaläga ja lihakondijahu kooskäiritamine, sest teiste katsete ülesseade ja analüüside tulemused on TEUKi kontekstis liialt spetsiifilised. Lehmaläga ja lihakondijahu kooskäiritamise katse teostati ühe-astmelisel 5L laboratoorsel katseseadmel mesofiilsel temperatuuril (37 °C). Süsteemi viibeaeg oli 45 päeva, mis võimaldas reaktori orgaanilise koormuse hoida alla 2,5 kg LA/m päev ja samas suurendada järk-järgult lämmastiku koormust ja ammooniumi kontsentratsiooni süsteemis. Katses kasutatud lögast eemaldati pikad kõrred, et vältida probleeme segamisega ja tagada tooraine homogeensus. Katse käigus jälgiti järgnevaid parameetreid: pH, kuivaine, orgaaniline aine, makro- ja mikrotoitainete, rasvhapete ja pika ahelaga rasvhapete kontsentratsioonid, ammooniumi ja ammoniaagi kontsentratsioonid ning tasakaal, biogaasitoodang, gaasi koostis ja metanogeenide koosluse muutused.

Käesoleva katse peamine eesmärk oli hinnata suureneva  $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$  kontsentratsiooni mõju protsessi efektiivsusele ning samaaegselt analüüsida kääritusjäägi koostist ja väetusomadusi. Lihakondijahu lisati lehmaläga kahes astmes, 3% ja 7% sisestatava tooraine mahust. Läga, lihakondijahu ja kääritusjäägi omadused ning metaani tootlikkus erinevatel LKJi lisamise koormustel on esitatud tabelis 4. Olulised on selle tabeli puhul kaks fakti. Esiteks metaanitoodangu tõus 2,33 korda (7% LKJi lisamisel lehma-

*Tabel 4. Toorainete ja käärtsusjäägi koostis, ammooniumi osakaal üldlämmastikust ja metaanitoodang erinevatel protsessi koormustel*  
*Table 4. Substrates and digestate composition, ammonia proportion of total nitrogen and methane production at different process loadings*

	KA, %	OA, %	Rasva g/kg	N <sub>üüp</sub> g/ kg	NH <sub>4</sub> -N, g/kg	NH <sub>4</sub> -N/ Nüüd, %	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t OA	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t	% LKJ arvutusli- kust potentsiaalst
Lihakondijahu	98,05	71,34	198,7	68,85	-	-	-	-	-
Lehmaläga	6,05	6,87	3,52	4,68	2,47	52,75	270,80	12,60	91,3
Käärtsusjääk (3% LKJ)	4,39	62,95	0,92	5,25	3,77	71,81	297,27	19,78	87,4
Käärtsusjääk (7% LKJ)	5,67	63,56	1,19	7,95	5,7	71,7	322,86	29,44	88,1



lägale) võrreldes vaid lehmäläga kääritamisega. Kuna LKJi veesisaldus on minimaalne ja orgaaniline aine on hästi lagundatav, siis on nimetatud metaani toodangu tõus võimalik saavutada sisuliselt reaktorite töömahtu muutmata. Teine oluline faktor on see, et kooskääritamise tulemusel suureneb kääritusjäägi  $N_{\text{uld}}$  sisaldus võrreldes lehmäläga 1,7 korda ning taimedele kiirelt omastatava  $NH_4\text{-N}$  osakaal tõuseb 52,75% -lt 71,7%-ni. See on märkimisväärne väetusomaduste kvantitatiivne tõus, mis annab kääritusjäägi kasutamisele väga olulist positiivset majanduslikku mõju. Kääritusjäägi kõrge pH tõttu on selle ilma katteta hoiustamisel  $NH_3$  kergemini lenduvam kui lehmäläga puhul (eriti sooja ja tuulise ilmaga), kuid need on faktorid, mida tuleb digestaadi hoiustamisel ja laotamisel arvestada, et N kadusid minimeerida ja kääritusjäägis sisalduvad toitained maksimaalse efektiivsusega ringlusesse suunata.

Katse üks eesmärke oli hinnata ka suureneva  $NH_3$ -kontsentratsiooni inhibeerivat mõju protsessi metaanitoodangu efektiivsusele, kuid kuna metanogeenidele jäeti piisavalt aega  $NH_3$ -kontsentratsiooni tõusuga adapteerumiseks, siis 7% LKJi lisamisel metaanitoodangu efektiivsus sisuliselt ei langenud. Samas tuleb rõhutada, et metanogeenne protsess on koosluse adaptatsiooni osas suhteliselt aeglane (lõplik mikroobikoosluse adaptatsiooniks vajalik aeg võib olla kaks kuud või isegi rohkem) (Rajagopal jt 2013), siis seetõttu on oluline protsessi puudutavate muudatuste osas aega varuda. Mida kõrgem on biogaasijaama orgaaniline koormus ja mida suurem on tootlikkus reaktori mahuihiku kohta, seda tundlikum on protsess ja põhjalikumalt jälgimist ning optimeerimist nõudev on protsessi juhtimine.

## **Kokkuvõte**

Globaalsel tasandil on inimeste liha tarbimine ajas vaid kasvav, mille tulemusel suurenevad ka loomsete kõrvalsaaduste kogused, mis vajavad käitlemist ja maksimaalselt suure lisandväärtusega taaskasutamist. Üheks alternatiiviks on steriliseeritud tahkete tapamajajäätmete kasutamine biogaasi tootmise toorainena kooskääritamisel lägaga. Doktoritöö raames on hinnatud Eesti tapamajades tekkivate loomsete kõrvalsaaduste ressursi, selle biogaasi potentsiaali ja kääritusjäägile lisanduvat toitainete sisaldust. Ühest tonnist teise ja kolmanda kategooria tapamajajäätmetest on

peale steriliseerimist võimalik toota 308,25 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>, mis vastab 3,1 MWh primaarenergiale. Väetusomadustelt on tonn steriliseeritud massi võrdne ~14 tonni lehmäläga ja 7% lihakondijahu lisamisel lehmälägaale kooskääritamise protsessis tõuseb metaanitoodang 2,33 korda ning lämmastikusisaldus kääritusjäägis võrreldes lehmäläga suureneb 1,7 korda. Taimedele kiirelt omastatava lämmastiku osakaal suureneb 52,5%-ni lehmälägas ja 71,7%-ni digestaadis, mis on oluline aspekt väetusplaanide optimeerimisel.

### **Tänuavaldused**

Uurimistöö läbiviimist toetas Euroopa Liidu Euroopa Sotsiaalfond programmi DoRa raames, mida viib ellu Sihtasutus Archimedes. Autor tänab SA Archimedest finantseeringu eest läbi Eesti Energiatehnoloogia programmi projekti „Anaeroobsel kääritamisel põhinevate biogaasi energia- tehnoloogiatega biokeemiliste protsesside optimeerimine ning monitoorin- gu ja juhtimismeetodite arendamine“ (projekti nr 3.02.0501.10-0020).

### **Kasutatud kirjandus**

- Alves, M. M., Pereira, M. A., Sousa, D. Z., Cavaleiro, A. J., Picavet, M., Smidt, H., Stams, A. J. M. 2009. Waste lipids to energy: how to optimize methane production from long-chain fatty acids (LCFA). *Microb. Biotechnol.* 2(5), 538–50.
- Angelidaki, I., Sanders, W. 2004. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 3, 117–129.
- Chen, Y., Cheng, J. J., Creamer, K. S. 2008. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresour. Technol.* 99, 4044–4064.
- Edström M., Nordberg A., Thyselius L. 2003. Anaerobic treatment of animal byproducts from slaughterhouses at laboratory and pilot scale. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 109, 127–138.
- European Parliament and the Council. 2011. Regulation (EC) No 142/2011 of the European Parliament and of The Council of 25 February 2011, implementing Regulation (EC) No 1069/2009 of the European Parliament and of the Council ... . Brussels. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ>:

- Nakashimada, Y., Ohshima, Y., Minami, H., Yabu, H., Namba, Y., & Nishio, N. 2008. Ammonia–methane two-stage anaerobic digestion of dehydrated waste-activated sludge. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 79, 1061–1069.
- Pitk, P., Kaparaju, P., Vilu, R. 2012. Methane potential of sterilized solid slaughterhouse wastes. *Bioresour. Technol.* 116, 42–46.
- Rajagopal, R., Massè, D.I., Singh, g., 2013. A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia. *Bioresour. Technol.* 143, 632–641.
- Yenigün , O., Demirel, B. 2013. Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review. *Process Biochemistry.* 48, 901–911.

### **PROTEIN RICH ANIMAL BY-PRODUCTS CO-DIGESTION WITH MANURE: RESOURCE, BIOGAS PRODUCTION INCREASE AND DIGESTATE FERTILIZER VALUE**

Peep Pitk

Biogas production as an alternative for renewable energy production resource has been under public attention in Estonia for a last decade. Until now, mostly it has been considered as electricity and heat co-generation option, but recent years have highlighted more bio-methane production as a vehicle fuel. But it is important to understand that core of the technology is biological biogas production process itself and end use of the biogas is just a matter of political-economical decisions and strategical preferences. Considering available resources for biogas production in Estonia, then it is obvious that even if we want to cover only 1–2% of the renewables requirement in the transport sector with bio-methane, then it has to be based on liquid manure, solid manure and green biomass. In my PhD thesis though I have focused on protein and lipids rich solid slaughterhouse waste co-digestion process with manure, because meat production, consumption and animal by-products production are only increasing in time and require efficient solutions for getting maximum value out of the secondary resource. Besides, slaughterhouse waste co-digestion with manure increases macro- and micronutrients content in digestate that increases significantly its fertilizer value for agricultural use.

# BIOMETAANI AVALIKUD HÜVED AASTAS ON 271 MILJONIT EUROT

Ahto Oja<sup>1</sup>, Peep Siitam<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Eesti Arengufond & Mõnus Minek OÜ

<sup>2</sup>Eesti Arengufond, rohemajanduse suunajuht

## Annotatsioon

Biometaani tootmise ja tarbimisega kaasnevad mitmed avalikud hüved, nagu kohaliku taastuvenergia tootmine hajaenergeetikas; energiajulgeoleku suurenemine; sõltumatus kliimast (tuulest, päiksest ja veetasemest); regionaalne tasakaalustatud areng; 700-800 töökohta lisandumine; põllumajanduse mitmekesistamine; sõnniku kääritusjäägi haisuvaba levitamine; pinnase, pinna- ja põhjavee väiksem reostamine; väiksem iseeneslik metaaniheide; väiksemad õhuheitmed võrreldes fossiilsete kütustega, kääritusjäägi loodussõbralikkus väetisena. Kui need avalikud hüved arutada rahalises vääringus, siis ühiskond saab kaudselt 380 mln Nm<sup>3</sup> biometaani tootmisest kasu 271 mln eurot aastas, kogu potentsiaali kasutusele võtmiseks on vajalik 50% investeeringutoetus 600 miljonit eurot. Biometaani potentsiaali kasutamine võimaldab asendada poole viimaste aastate maagaasi tarbimisest või kolmandiku vedelate importfossiilkütuste tarbimisest.

## Sissejuhatus

Eestil on transpordivallas probleeme üleminekuga fossiilsetelt kütustelt taastuvatele kütustele. Eesti on võtnud eesmärgi, et aastaks 2020 peaksid taastuvatest allikatest pärinevad transpordikütused moodustama kogutarbimisest 10%. Üks efektiivsemaid biokütuste II põlvkonna toorainete kasutamise viise on nendest anaeroobsel kääritamisel biogaasi tootmine ja selle puhastamine biometaaniks, mis kütteväärtuselt on samalaadne maagaasiga. Biometaan on hetkel ainuke väljakujunenud tehnoloogiaga kohaliku taastuva biokütuse tootmise võimalus Eestis. Biometaani sarnasusest maagaasiga johtub ka selle tootmise turutõke. Biometaani tootmiseks on vaja teha investeeringuid, mistõttu tema omahind kujuneb suuremaks kui surumaagaasi hind. Biometaani tootmist tuleb toetada, kuid mida saab ühiskond vastu? Ühiskond saab kaudselt kasu, mida nimetame

biometaani avalikeks hüvedeks. Biometaani tootmisega kaasnevad sellised avalikud hüved, nagu väiksem metaani, nitraatide ja muude ühendite eraldumine õhku, vette ja pinnasesse; oluliselt väiksem hais kääritusjäägi põllule levitamisel, kontrollitud jäätmekäitlus, tasakaalustatud regionaalne areng, põllumajanduse mitmekesistamine, kasutamata maade harimine, lisandunud töökohad, taastuveneergetika arendamine, energiajulgeoleku suurenemine.

### **Eesmärk ja metoodika**

Käesoleva artikli eesmärk on kaardistada Eesti biometaani avalikud hüved ühiskonnale. Artikkel põhineb vastaval Arengufondi rakendusuurin gul (Oja 2013).

### **Tulemused**

Biogaasi saab biomassi anaeroobse käärimise teel vähemalt 37 °C juures. Biogaasis on keskmiselt 60% metaani (CH<sub>4</sub>). Biometaan on puhastatud biogaas, kus metaani sisaldus on 90–99%. Biometaan ja maagaas on sarnase koostise ja kütteväärtusega: 10 kWh/Nm<sup>3</sup>, 37 MJ/Nm<sup>3</sup>. Reaalselt kasutatav biogaasi hulk aastas on 633 mln Nm<sup>3</sup>, sellele vastav biometaani potentsiaalne kogus on 380 miljonit Nm<sup>3</sup>/a, millest 9 miljonit Nm<sup>3</sup> moodustab prügilagaas. (Tabel 1)

Eeldame, et aastal 2050 kasutatakse transpordis 80% biometaani potentsiaalset (304 mln Nm<sup>3</sup>/a). See moodustab 30% 2011. a vedelkütuste aastasest tarbimisest. Metaankütuste soodustamiseks transpordis tuleb välja töötada biometaani kvaliteedi standard (95% metaanisaldusega), luua tasuta parkimise võimalus metaanisõidukitele, säilitada ja tagada kütuseaktsiisi vabastus biometaanile ning säilitada aktsiisierisus transpordikütusena kasutatavale surumaagaasile (CNG). Näidisjaama biometaani omahinnaks silohinnaga 30 €/t kujunes 0,88 €/Nm<sup>3</sup>. Samaväärse surumaagaasi hind tanklas on 0,46 €/Nm<sup>3</sup> (ilma käibemaksuta). Kogu biometaani potentsiaali kasutusele võtmiseks (380 mln Nm<sup>3</sup>) vajaminev investeeringutoetuse maht (50% CAPEXi juures) on suurusjärgus 550–600 mln eurot.

*Tabel 1. Eestri biogaasi kasutatav potentsiaal allikate kaupa  
Table 1. Estonian biomethane potential according to the sources*

Substraat	ha, t	tonni/ha	tonni/a	Biogaasi Nm <sup>3</sup> /t VM	Teoreetiline biogaas Nm <sup>3</sup>	90% on reaalselt	Reaalselt kasutatav	Biogaasi potentsiaal (60% CH <sub>4</sub> )	Biometaanii potentsiaal (CH <sub>4</sub> 98%)
Silo kasutamata maadelt	177 385	15,00	2 660 775	155,00	412 420 125	371 178 113	100,00%	371 178 113	222 706 868
Silo 5% põllumajandusmaalt	53 917	15,00	808 755	155,00	125 337 025	112 821 323	100,00%	112 821 323	67 692 794
Silo/hein poollooduslikelt aladelt	100 000	9	900 000	119,00	107 100 000	96 390 000	25,00%	24 097 500	14 458 500
Veiseläga	163 135		3 870 378	25,00	96 759 447	87 083 502	72,00%	62 700 122	37 620 073
Sealäga	360 990		395 284	29,40	11 621 351	10 459 216	65,00%	6 798 490	4 079 094
Muud põllumajanduslikud jäätgid	32 124		32 124	155,00	4 979 241	4 481 317	90,00%	4 033 185	2 419 911
Bioloogunevad jäätgid toidunäetööstusest	42 667		42 667	300,00	21 333 333	19 200 000	80,00%	15 360 000	9 216 000
Eraldi kogutud bioloogunevad köögri- ja söökläätmed	24 000		24 000	166,00	3 984 000	3 585 600	80,00%	2 868 480	1 721 088
Reoveeete	466 975		466 975	15,00	7 004 619	6 304 157	80,00%	5 043 326	3 025 995
Tööstusjäätgid	25 000		-	-	14 600 000	13 140 000	100,00%	13 140 000	7 884 000
Kokku (ilma prügilagaasita)					805 159 141	724 643 227		618 040 538	370 824 323
Prügilad					21 000 000	18 900 000	80,00%	15 120 000	9 072 000
<b>Kokku (koos prügilagaasiga)</b>					<b>826 159 141</b>	<b>743 543 227</b>		<b>633 160 538</b>	<b>379 896 323</b>

## Maa väärtuse muutumine selle kasutusele võtmisel

Table 2. Maa väärtuse muutus selle kasutusele võtmisel rohelise biomassi tootmiseks biometaaniga jaoks

Table 2. The value of the land increases as result of it's cultivation for biomass production

Eeldus	Ühik	Tulemus
Rohtse biomassi saagikus 1 ha kohta (värsk mass)	t/ha	15
Biogaasi took 1 tonni värsk rohtse biomassi kohta	Nm <sup>3</sup> /t VM	150
Biometaaniga took 1 tonni värsk rohtse biomassi kohta	Nm <sup>3</sup> /t VM	90
Biometaaniga kogus 1 ha kasutusse võetud maalt	Nm <sup>3</sup> /ha	1350
Biometaaniga hind	€Nm <sup>3</sup>	0,88
Biometaaniga hinna müügist saadav tulu ha kohta	€ha	1188
Biometaaniga hinna kasumimarginaal	%	5%
Biometaaniga müügist saadav kasum 5% marginaaliga aastas	€ha	59,4
Biometaaniga müügist saadav kasum 50 aasta jooksul	€	2970
Kasutusse võetud maa hind 2013. a	€m <sup>2</sup>	0,30
Kasutusest väljas oleva maa hind 2013. a	€m <sup>2</sup>	0,10
Maa hinna tõus	€m <sup>2</sup>	0,20
Maa väärtuse suurenemine ha kohta	€ha	1970
Kasutamata maa pindala, mis aastaks 2050 kasutusele võetakse (50% kasutamata põllumajanduslikust maast 2012. a)	ha	177 385
Igaaastane maaomanike kasum 5% täiendava lisandväärtuse juures 177 385 ha kasutusse võtmisel	milj €a	10,54
Keskmine maaomandi suurus	ha	10
Maaomanike arv	in	17 739
Maa koguväärtus kasutusse võtmisel (lisandunud maa väärtus)	milj €	349
- ühekordne maa väärtuse kasv	€	19 700
Tuua välja ha kohta		1 970

Energiakultuuride kasvatamine biogaasi tootmiseks tänapäeval (mai 2013) mittekasutataval põllumajandusmaal suurendab Eesti maamajanduse mitmekesisust. See intensiivistab **maakasutust** ja annab mõningal määral täiendavat **tööhõivet** ning suurendab riigisest põllumajanduse konkurentsivõimet. Rahaliselt saab hinnata maa väärtuse muutust: kui võtta põllumajanduslikult mittekasutatav maa kasutusse, siis maa väärtus tõuseb. Ühekordne kasu maa väärtuse hinna tõusust (10 eurosendilt 24 eurosendini m<sup>2</sup> kohta) keskmisele maaomanikule (10 ha) on 23 750 eurot ja iga-aastane tulu 12 miljonit eurot aastas, mis jääb selle maa mittekasutamisel saamata. (Tabel 2)

### **Kasutamata maade biometaani müügist 5% ulatuses saamata jäänud kasum**

Olukorras, kus üleilmselt on põllumajanduslike maade defitsiit, võiks olla Eesti strateegiline eesmärk kõikide vähemväärtuslike maade kasutusele võtmine tooraine ehk rohelise biomassi tootmiseks. Kasutamata maade tarvitamist võivad takistada nende asukoht (st paiknemine teedest ja gaasitrassidest liiga kaugel) ja madal mullaviljakus ehk boniteet. EN-MAKi biogaasi puudutavas prognoosis on võetud sihiks, et aastaks 2030 on 50% kasutamata maadest ja niidetud rohumaadest, mille omanikel ei ole loomi, võetud kasutusse rohelise biomassi tootmiseks. 177 385 ha kasvatatud rohelisest biomassist (nt päideroog) toodetud biogaasist saab 222,7 mln m<sup>3</sup> biometaani (tabel 1), millest 80% realiseerimisel keskmise omahinnaga on kogutulu 174 mln eurot aastas. Nende maade mitteharamisel ja niidetud heina mittekasutamisel jääb 5% kasumimarginaali juures 17 mln eurot aastas kasumit saamata. (Tabel 3)

Peente osakeste ööpäeva keskmise piirväärtuse<sup>1</sup> (50 µg/m<sup>3</sup>) ületamisi registreeriti Tallinnas 2011. a viiel korral vaid kesklinnas. Eeldame, et pooled välisõhu heitmetest pärinevad transpordist. Kaotatud elude arv õhusaaste tõttu on aastas ca 4000, ühe inimese aastane panus sisemajanduse koguprodukti on eelduslikult 20 000 eurot. Tahked osakesed pärinevad põhiliselt diislikütuste põletamisest: 2011. a põletati seda 673 mln liitrit. Transpordis saab kasutada 80% ulatuses biometaani ehk 304 mln Nm<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Saastatuse taseme piirväärtus (SPV) – saasteaine lubatav kogus välisõhu ruumalühikus.



*Tabel 3. Saamata jäänud kasum kasutamata maade rohelisest biomassist tootmata jäänud biometaanist*  
*Table 3. Loss of profits when biomass is not produced on uncultivated land for biomethane production*

Eldus	Ühik	Tulemus
Biometaani (CH <sub>4</sub> 98%) aastane kogus	mln Nm <sup>3</sup> /a	380
Biometaani hind	€Nm <sup>3</sup>	0,88
Biometaani hinna müügist saadav tulu aastas	mln €a	334
Biometaani hinna kasumimarginaal	%	5%
<b>Saamata jäänud kasum tootmata jäänud biometaanist</b>	<b>mln €a</b>	<b>16,7</b>

aastas, mis asendaks 30% diislikütuseid. See omakorda vähendaks 30% diislikütuste kasutamist, mis omakorda vähendab 30% kaotatud elude arvu aastas ehk 1200 kaotatud eluaastat. Biometaani mittekasutamisel transpordis jääb ühiskonnal kaotatud eluaastate tõttu saamata nende aastane kogupanus SKT-sse summas 24 mln eurot. (Tabel 4)

*Tabel 4. Õhusaastest tulenevalt kaotatud eluaastate tõttu vähenenud panus SKT-sse*  
*Table 4. Air pollution causes the loss of years of life, which reduces the contribution to GDP*

Eldus	Ühik	Tulemus
Transpordist pärineva õhusaaste tagajärjel kaotatud eluaastate arv aastas	eluaastat/a	4000
Fossiilse diislikütuse tarbimine aastas (2011. a)	mln l/a	673
Biometaani maksimaalne osakaal fossiilse diislikütuse asendamisel	%	30%
Diislikütuse kogus aastas, mida on võimalik asendada biometaaniga (moodustab 66% biometaani kogupotentsiaalset transpordikütusena (304 mln Nm <sup>3</sup> /a))	l/a	202
30% fossiilse diislikütuse asendamisel biometaaniga väheneb transpordist pärineva õhusaaste tagajärjel kaotatud eluaastate arv aastas	eluaastat/a	1200
Ühe inimese aastane panus SKT-sse	€a	20 000
<b>Kaotatud eluaastate tõttu saamata jäänud panus SKT-sse</b>	<b>mln €a</b>	<b>24</b>

Põlevkivist elektri tootmisega kaasneb CO<sub>2</sub> heide 1,05 tonni 1 MWh<sub>el</sub> kohta. 20% biometaani potentsiaali kasutamisel SEK-is on selle primaarenergia kogus 760 000 MWh/a. Sama koguse primaarenergia saamiseks põlevkivist on CO<sub>2</sub> heide 798 000 t/a. Biometaani põletamisel eralduv CO<sub>2</sub> on süsinikuneutraalne, kuna see on taastuvkütus ja biomassi tekkimisel on see süsinik atmosfäärist seotud. Võttes CO<sub>2</sub> tonni hinnaks 20 eurot, hoitakse aastas ära 16 mln euro väärtuses CO<sub>2</sub> heitmeid (tabel 5). Asendades transpordis fossiilsed kütused metaankütustega, väheneb CO<sub>2</sub> heide maardlast–paagini–metoodikal (WTW) 97%. Statistikaameti andmetel tarbiti 2011. a Eestis 261 000 tonni bensiini (348 miljonit liitrit) ja 572 000 tonni diislikütust (673 miljonit liitrit). Ühe liitri bensiini põlemisel eraldub 2370 grammi CO<sub>2</sub> ja ühe liitri diislikütuse põlemisel eraldub 2650 grammi CO<sub>2</sub>, seega eraldub aastas bensiini põlemisel 825 000 tonni CO<sub>2</sub> ja diisli põlemisel 1,78 miljonit tonni CO<sub>2</sub>. Asendades fossiilkütuste tarbimise biometaaniga, oleks kokkuhoid 753 000 tonni CO<sub>2</sub> aastas.

*Tabel 5. Põlevkivi asendamisel biometaaniga ära hoitud CO<sub>2</sub> kulu aastas*

*Table 5. Reduction of CO<sub>2</sub> emission while replacing oil shale with biomethane in energy production*

<b>Eeldus</b>	<b>Ühik</b>	<b>Tulemus</b>
Biometaani kogus, mida kasutatakse SEK elektri ja soojuste koostootmiseks	mln Nm <sup>3</sup> /a	76
Biometaani primaarenergia sisaldus 1 Nm <sup>3</sup> -s	kWh/Nm <sup>3</sup>	10
Biometaani (20%) primaarenergia kogus aastas	MWh/a	760 000
CO <sub>2</sub> teke põlevkivi põlemise MWh kohta	t CO <sub>2</sub> /MWh	1,05
CO <sub>2</sub> teke kokku aastas 20% biometaani energiakoguse saamiseks põlevkivi põletamisel	t/a	798 000
Biometaani puhul fossiilse CO <sub>2</sub> heite vähenemise osakaal	%	100%
Põlevkivi asendamisel biometaaniga ära hoitud CO <sub>2</sub> heide aastas	t/a	798 000
CO <sub>2</sub> hinnaprognos (perioodi keskmine) IEA 2012	€/t	20
<b>Põlevkivi asendamisel biometaaniga ära hoitud CO<sub>2</sub> kulu aastas</b>	<b>€/a</b>	<b>15 960 000</b>

Tabel 6. Fossiilsete kütuste asendamisel biometaaniga transpordis ära hoitud CO<sub>2</sub> kulu aastast

Table 6. Replacement of fossil fuels with biomethane in transport avoids cost of CO<sub>2</sub> per year

Eeldus	Ühik	Tulemus
Biometaani kogus (80%), mida transpordis kasutatakse (Nm <sup>3</sup> ~1 liiter)	mln Nm <sup>3</sup> /a	304
Aastas tarbitud diislikütuse kogus (2011. a)	mln l/a	673
Aastas tarbitud bensiini kogus (2011. a)	mln l/a	348
Vedelate fossiilkütuste aastane kogutarbimine	mln l/a	1021
Bensiini osakaal kogutarbimises	%	34%
Diislikütuse osakaal kogutarbimises	%	66%
Diislikütuse põlemisel õhku eralduva CO <sub>2</sub> kogus liitri kohta	kg CO <sub>2</sub> /l	2,65
Bensiini põlemisel õhku eralduva CO <sub>2</sub> kogus liitri kohta	kg CO <sub>2</sub> /l	2,37
CO <sub>2</sub> teke diislikütuse aastasel kasutamisel	t/a	1 783 450
CO <sub>2</sub> teke bensiini aastasel kasutamisel	t/a	824 760
Biometaan asendab proportsionaalselt bensiini tarbimist aastast	mln l/a	104
Biometaan asendab proportsionaalselt diislikütuse tarbimist aastast	mln l/a	200
CO <sub>2</sub> teke bensiini asendamisel biometaaniga aastast	t/a	245 570
CO <sub>2</sub> teke diislikütuse asendamisel biometaaniga aastast	t/a	531 017
CO <sub>2</sub> teke vedelate fossiilkütuste asendamisel biometaaniga aastast kokku	t/a	776 588
Fossiilsete mootorikütuste asendamisel biometaaniga tekib WTW-metoodika alusel vähem kasvuhoonegaase	%	97%
Ärahoitud kasvuhoonegaaside kogus fossiilsete mootorikütuste asendamisel biometaaniga	t/a	753 290
CO <sub>2</sub> hinnaprognos (perioodi keskmine) IEA 2012	€/t	20
<b>Fossiilsete kütuste asendamisel biometaaniga ära hoitud CO<sub>2</sub> kulu</b>	<b>€/a</b>	<b>15 065 798</b>

## Tööhõive maal

Biogaasi tootmine aitab luua või hoida täiendavaid töökohti nii otse jaamas kui ka lisatööhõive näol põllumajanduses roheline biomassi või energiakultuuride kasvatamisel. Otsene töökohtade loomine biogaasijaamas on suhteliselt väike, 1-3 inimest, aga kaudne mõju põllumajandusele on suurem. Samuti võib väita, et elukeskkonna parandamine (väiksem hais, odavam soojus) soodustab kaudselt ettevõtlust ja tagab maaelu jätkusuutlikkuse. Maksutulu 380 mln Nm<sup>3</sup> biometaanitootmisel on 5 mln eurot aastas (tabel 7).

*Tabel 7. Maksutulu 380 mln Nm<sup>3</sup> biometaanitootmise puhul aastas*  
*Table 7. Tax revenues of labour taxes of production of 380 million Nm<sup>3</sup> of biometane per year*

Eeldus	Ühik	Tulemus
Töökohti 1 mln Nm <sup>3</sup> biometaanitootmiseks	töökoht/1 mln Nm <sup>3</sup> BM	2
Biometaanitootmise maksimaalne toodetav kogus aastas	mln Nm <sup>3</sup> /a	380
Biometaanitootmisega seotud otsesed ja kaudsed töökohtad	töökohtade arv	760
Maksutulu on ühe töötaja kohta 41%, keskmine brutopalk 900 €/k	€/kuus	493
Maksutulu biometaanitootmisest aastas ühe töötaja kohta	€/a	5919
<b>Maksutulu 380 mln Nm<sup>3</sup> biometaanitootmise puhul aastas</b>	<b>€/a</b>	<b>4 498 476</b>

Ruumipuudusel ei ole käesolevas artiklis toodud kõikide biometaanitootmise avalike hüvede arvutusi, need on avaldatud Arengufondi rakendusuuringu "Biometaanitootmise avalikud hüved", mille käesolev artikkel põhineb. 380 mln Nm<sup>3</sup> biometaanitootmisega kaasnevad avalikud hüved on kokku 271 mln eurot aastas ning on esitatud tabelis 8.

## Kokkuvõte

Biometaanitootmise avalike hüvede tõttu tasub biometaanitootmist toetada, kuna ühiskond saab biometaanitootmisest kaudselt kasu 271 mln eurot aastas ja 50% investeringutoetuse vajadus 500–600 mln eurot kaetakse kolme aastaga. Lisaks rahaliselt mõõdetavatele avalikele hüvedele kaasneb bio-

Table 8. Biometaani tootmise avalikud hüved aastast (mln €)  
 Table 8. Total annual public benefits of 380 Nm<sup>3</sup> biomethane production

Miljonit €				
Biometaani potentsiaali kasutamise osakaal maksimaalsest, 2030. a tasemest	25%	50%	75%	<b>100%</b>
<b>Biometaani potentsiaali kasutuselevõtu aasta</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>
Umbrohu seemnete vähenemisega kääritusjäätis kokku hoitud kulu fossiilsetele taimekaitsevahenditele	1,8	3,5	5,3	<b>7,0</b>
Igaaastane maaomanike kasum kokku 5% täiendava lisandväärtuse juures 177 385 ha kasutusse võtmisel	2,6	5,3	7,9	<b>10,5</b>
Saamata jäänud kasum tootmata biometaanist	4,2	8,4	12,5	<b>16,7</b>
50% kasutamata maa harimisest saamata jäänud tööjõumaksud	2,5	4,9	7,4	<b>9,8</b>
Kaotatud eluaastate tõttu saamata jäänud panus SKT-sse	6,0	12,0	18,0	<b>24,0</b>
Metaaniheite vähenemine	0,1	0,1	0,2	<b>0,3</b>
Kulu CO <sub>2</sub> -le väheneb biometaani 20% kasutamisel SEK (CO <sub>2</sub> 20 €/t) võrreldes põlevkivi põletamisega	4,0	8,0	12,0	<b>16,0</b>
Fossiilsete kütuste asendamisel biometaaniga ära hoitud CO <sub>2</sub> kulu aastas	3,8	7,5	11,3	<b>15,1</b>
Biometaanist toodetud sooja müügist saamata jäänud tulu	3,2	6,4	9,6	<b>12,8</b>
10% võrgukadude vähenemine 20% BM SEKis tootmisel (40 €/MWh)	0,3	0,6	0,9	<b>1,2</b>
BM asendab 20% maagaasi (74 mln Nm <sup>3</sup> /a), maagaasi hind 0,33 €/Nm <sup>3</sup>	6,3	12,5	18,8	<b>25,08</b>
80% BM asendab fossiilsete kütuste kasutamise transpordis mln 304 Nm <sup>3</sup> /a, bensiini hind ilma maksudeta 0,4 €/l	30,4	60,8	91,2	<b>121,6</b>
Maksutulu 380 mln Nm <sup>3</sup> biometaani tootmise puhul aastas	1,1	2,2	3,4	<b>4,5</b>
Soojahinna vähenemine keskmiselt 20 €/MW/h	1,6	3,2	4,8	<b>6,4</b>
<b>Kokku €mln</b>	<b>67,7</b>	<b>135,4</b>	<b>203,2</b>	<b>270,9</b>

metaani tootmisega mitmeid kvalitatiivseid avalikke hüvesid, nagu vähenenud haisureostus, hajutatud energiatootmine, sõltumatus ilmastikoludest, võimalus toota ööpäevaringselt biometaani. Biometaani avalikud kvantitatiivsed ja kvalitatiivsed hüved on aluseks biometaani tootmise toetamiseks ja soodsa ärikliima loomiseks, ühtlustades sh maksudega biometaani omahinna maagaasi hinnaga selliselt, et lõpptarbijale oleks metaankütus sama hinnaga, jäädes vedelkütustest vähemalt 30% odavamaks.

### **Kasutatud kirjandus**

Oja, A. 2013. Biometaani avalikud hüved. Eesti Arengufond. [www.energiatalgud.ee](http://www.energiatalgud.ee).

## **PUBLIC BENEFITS OF 380 MILLION NM<sup>3</sup> BIOMETHANE PRODUCTION ARE 271 MILLION €IN ESTONIA**

Ahto Oja, Peep Siitam

Public benefits from 380 Nm<sup>3</sup> biomethane are 271 million €in year, the investment support to produce such amount of biomethane is 500-600 million €in total, thus society earns back the needed financial support in less than 3 years.

# TAHKEL KÜTUSEL TÖÖTAVATE KOHTKÜTTESEADMETE SEISUKORD JA ARENG EESTIS NING NAABRUSES

Mart Hovi, Annes Andresson

EMÜ, OÜ Ahjutarve

## **Annotatsioon**

Kohtkütte kasutamise võimalused võivad olla rahalises mõttes väga erinevad. Arvestada tuleks mitte ainult primaarenergiaallika kättesaadavust, vaid ka seadmete maksumust ning eluiga. Autorid vaatlevad Eesti oludes soojuspumba ja elekterkütte alternatiivina erinevaid ahikütte võimalusi. Meie oludega võrdluseks on mõõdetud naaberpiirkondades Soomes, Venemaal ja Austrias levinud ahjutüüpe.

Märksõnad: pottahi, tellisahi, soojusväljastus, mõõtmine, kasutegur.

## **Sissejuhatus**

20. sajandi sajandi lõpul, kui gaasi ja kütteõli hinnad järsult tõusid, tekkis vajadus alternatiivsete kütuste kasutamise järele. Riikides, kus ei leidunud fossiilseid kütuseid, hakati otsima olemasoleva kütuste baasil paremaid alternatiivseid lahendeid. Euroopas tegelesid sellega eelkõige Austria, Saksamaa ja Šveits. Ahjude ökonoomsust ja puhtamat põlemist hakati uurima laboratooriumites, mille tulemusel töötatakse jätkuvalt välja norme ja soovitusi. 1. jaanuarist 2010. a kehtib Euroopa Liidus norm (EN 15544), mis määrab pottseppade ehitatavate ja tahkel kütusel töötavatele kütteseadmetele esitatavad nõuded. Selle aasta septembris oli Brüsselis hääletusel uus norm, seekord juba direktiiv (direktiiv on kohustuslik kõigile EL riikidele, sõltumata rahvuslikust normist). See püstitab tööstuslikult ehitatavatele kütteseadmetele väga ranged normid energia efektiivsuse, CO, NO, põlemata orgaaniliste osakeste ja lenduha kohta. Normidele vastavust kontrollitakse katsestendis. Normidest kõrvalekaldumise korral järgneb uus kontroll ning kui esinevad samad probleemid, siis informeeritakse kuu jooksul kõiki liikmesriike ja Euroopa komisjoni. Nõuded, mida nimetatakse ruumide kütteseadmete ökodisainjooneks, hakkavad kehtima 1. jaanuarist 2018. Pottseppade ehitatavatele kütteseadmetele kehtivad

normid senini nii ranged ei ole.

Puu ja sellest valmistatud puidubrikett ning pelletid on praegu odavamad kui teised energiaallikad. Mitmed Kesk-Euroopa riigid toetavad puidukütteil töötavate kütteseadmete rajamist. Näiteks Austria valitsus toetab uute kütteseadmete ehitust, makstes kuni 1500 eurot kütteseadme kohta. Puit on ju kodumaine toode, mille kasutamine loob riigile töökohti, vähendab importi ja hooldab kodumaa metsi.

### Kütteseadmete ja kütuste hinnast

Eestis on ahjusid ehitatud sajandeid. Viimasel 20 aastal on müügile tulnud väga palju tööstuslikult ehitatud kütteseadmeid ja pottsepad on kütteseadmeid ehitanud vähem. Selgitamaks välja, millised on meil ehitatud ahjude ökonoomsuse ja põlemisel tekkivate suitsugaaside ja lendtuha näitajad, alustasime Eestis ahjude mõõtmisi. Katsetuste läbiviimiseks on olemas ELis oma meetodika, norm EN 15250, mille alusel tuleb määrata põlemisel tekkinud CO, NO, põlemata orgaanilise aine ja lendtuhakogused. Arvestades ka kasutegurit, saame leida energia efektiivsuse indeksi (EEI).

*Tabel 1. Eestis enamlevinud kütuste kütteväärtusi ja sellest tulenevaid energiaühiku hindasid. Allikas: Ebert ja Beimgraben 2011*  
*Table 1. Common fuel properties in Estonia and the costs of energy unit that arise from it*

Andmed seisuga 1.IX 2013 Tartu	Elektter	Kütteeõli	Maagaas	Pelletid	Puidubrikett	Okaspuu kuiiv 20% mänd, kuusk	Lehtpuu kuiiv 20% lepp
Ühik	kWh	liiter	m <sup>3</sup>	kg	kg	rm	rm
Ühiku hind	0,11	1,07	0,490	0,188	0,16	40,00	40,00
kWh/ühik	1	10	9,6	4,7	4,8	1400	1500
Kasutegur	1	0,95	1,0	0,85	0,85	0,8	0,8
Kütuse hind EUR/kWh	0,11	0,102	0,068	0,047	0,039	0,035	0,033

Vaatame konkreetse näite põhjal ühe maja korteri kütmist. Maja on ehitatud 1940. aastal, kütteseadme ehitajaks oli Tartu pottsepp Jakob Hermann. Ahju mõõdeti 2013. a kevadel ning parameetrid osutusid tänapäeva mõistes üllatavalt headeks. Lähtudes kütteperioodi jooksul kulutatud kü-





Joonis 1. Kingu tn ahi, mille valmistas 1940. a pottseppmeister Jakob Hermann  
Figure 1. Stove in Kingu street Build by master Jakob Hermann in 1940

tuse (lehtpuud) kogusest ja kütteväärtusest 1500 kWh/rm, saime kütteseadme keskmiseks kasuteguriks 70% ning 210 küttepäeval keskmiseks küttekuluks 30,4 W/m<sup>2</sup>.

Kesk-Euroopas ja Rootsis on hakatud kasutama kombineeritud küttesüsteeme, kus suurem osa ajast köetakse näiteks soojuspumbaga ja ahjuküte on varuks. Eestis võib juba samuti kohata sellelaadseid katsetusi. Kombineeritud süsteem õigustab ennast seal, kus kliima on mõõdukam. Vaatleme üht Eesti varianti. Korterite köetava pinnala suurus on 100 m<sup>2</sup>, selle

pinna keskmine soojavajadus kütteperioodi jooksul on  $30,4 \text{ W/m}^2$ . Vana maja puhul võtame maksimaalseks soojavajaduseks  $100 \text{ W/m}^2$ , mille alusel arvutame ka teiste kütteseadmete maksumused ja energiakulu nende ruumide kütmiseks. Vaatluse alla võtame õhksoojuspumba, pottkiviahju ja telliskiviahju, et selgitada välja, kuidas toodetud soojusenergia on kõige soodsam. Saamaks täielikku ülevaadet, arvestame nii kütuste hinda, investeeringukuludid kui ka amortisatsiooni, lähtudes iga seadme reaalsest kasutusajast.  $100 \text{ m}^2$  pinna kütmiseks tuleb ehitada kaks pottkiviahju või kolm telliskiviahju. Pottkiviahju maksimaalseks võimsuseks võetakse  $650 \text{ W/m}^2$ , meil ehitatud telliskiviahju võimsus on väiksem, ca  $350 \text{ W/m}^2$  kohta. Telliskiviahju seina paksus on suurem ja ta ei kuumene nii palju. Maksimaalne lubatav ahju pinna temperatuur on 80 kraadi. Õhksoojuspumba maksimaalseks tööpiirkonnaks loetakse välistemperatuuri kuni  $-15$  kraadi, alla selle muutub tema kasutamine raskeks, sest soojust toodetakse elektrist, mis on kallis. Madalama temperatuuri korral tuleb kasutada lisaks ahjukütet. Kombineeritud kütte korral planeerime kahte soojuspumpa ja ühte ahju, et kütta ka kõige külmemal ajal ära  $100 \text{ m}^2$ . Jaotame kogu keskmise vajamineva soojuskoguse kaheks nii, et osakaalud on võrdsed. See võimaldab neid omavahel asendada.

Tingimuste ühtlustamiseks eeldame glasuuritud pottkiviahju tööiga vähemalt 30 aastat, tellisahjul 15 aastat ja soojuspumbal 15 aastat. Seega 30 aasta jooksul tuleb nii tellisahjud kui õhksoojuspumbad 15 aasta pärast uuendada. Firma garantiiage soojuspumbale on ca 50 000 töötundi. Tabelist 1 näeme kütuse hindu. Vähe räägitakse aga kütteseadme ehituse, eksploatatsiooni ja hoolduse kuludest.

Vaatame järgnevalt maja, kuhu tuleb installeerida  $10 \text{ kW}$  võimsusega kütteseadet.

Vaja on ehitada kaks suurt glasuurpottkiviahju, külgpindalaga  $\acute{a}$   $8,8 \text{ m}^2$ , seega ahi, mille põhjapindala on  $0,9 \cdot 1,12 \text{ m}$ , kõrgus  $2,2$  meetrit ning kogukaal üle kolme tonni. Tellisahi peaks olema mõnevõrra suurem, sest tema keskmine soojuslik võimsus on väiksem.

Vaadeldaval 30-aastasel perioodil vajame nelja soojuspumpa á 1600 euro, kahte glasuurpottkiviahju á 5000 eurot ja kuut telliskiviahju á 3500 eurot. Lihtsuse mõttes eeldame, et hinnad selle perioodi jooksul on püsivad. Kui tõus kõikides positsioonides on ühtlane, siis pilt ei muutu oluliselt.

*Tabel 2. Erinevate kütteseadmete võrdlus*  
*Table 2. Differences of heating devices*

Kütus	Soojuspump	Glasuurpottkivi-ahi koos soojuspumbaga töötades	Ainult glasuurpottkiviahjud	Ainult telliskivi-ahjud
Vajaminev energia aastas	7660 kWh	7660 kWh	15 320 kWh	15 320 kWh
Seadme kasutegur	COP 3	0,75	0,75	0,75
Toodetud energia aastas	7660 kWh	10 213	20 426 kWh	20 426 kWh
Kütuse kogus aastas	2300 kWh	6,8 rm	13,6 rm	13,6 rm
Kütuse keskmine ühiku hind	0,12 EUR	40 EUR/rm	40 EUR/rm	40 EUR/rm
Kütuse aastane maksumus (eurodes)	276,00	27,00	544,00	544,00

*Tabel 3. Investeeringud kütteseadmetesse*  
*Table 3. Investments into heating devices*

Kütteseadme liik	Soojuspump	Glasuurpottkivi-ahi	Glasuurpottkivi-ahi	Telliskivi-ahi
Investeeringu suurus seadmete 30-aastaseks kasutuseks (eurodes)	6400	5000	10 000	21 000
Aastane hooldus, korstnapühkimine, elekter (eurodes)	276	25	50	75
Aasta keskmine püsikulu (eurodes)	213	166	383	700
Ekspluatatsiooni-, kütuse- ja hoolduse kulu aastas (eurodes)	489	438	877	1319
Energia ühiku hind senti/kWh	6,38	4,29	4,53	6,46

Tabelist nähtuv energia ühikuhind on mõnevõrra üllatav. Sageli on iga uuringu tellija püüdnud näitajaid oma kasuks, eksitakse kütuse kütteväärtusega, kaaluga, jäetakse ära seadme kasutuse iga jne, aga rõhutatatakse kaasaegset välimust, väikest ruumivajadust, madalat müra, kerget hooldust.

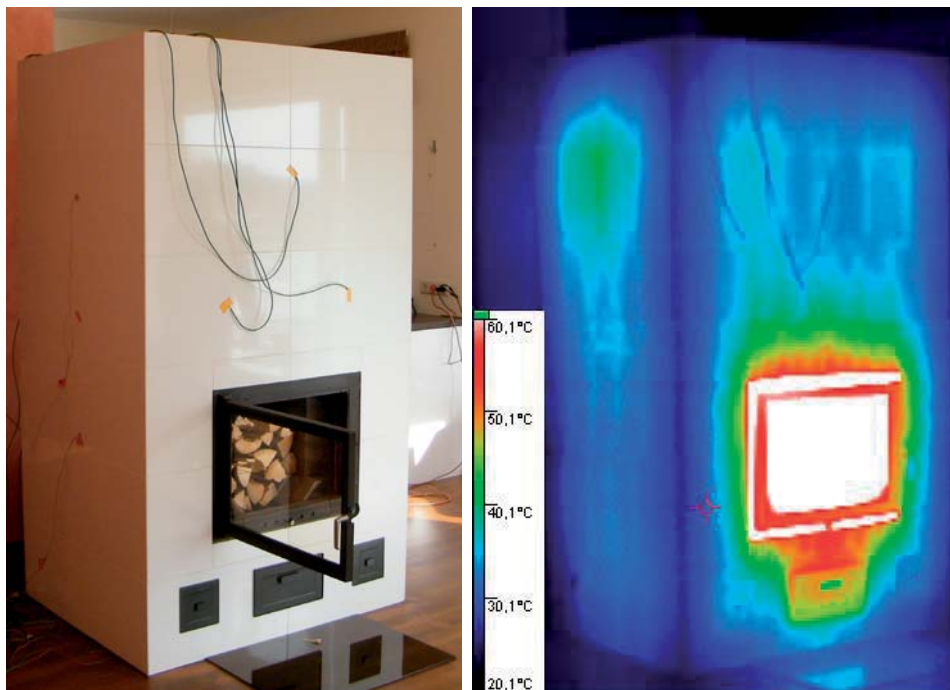
Ruume, mille pindala on 100 m<sup>2</sup>, on kõige soodsam kütta kahe glasuuri-  
tud pottkiviahjuga. Kui niisugust ahju korralikult hooldada (kontrollida,  
pühkida) ja jooksvalt vead parandada, on sellise ahju iga üle 30 aasta.  
Glasuuriatud ahjupott on suurema pinnavõimsusega, ta on kõrgemal tem-  
peratuuril põletatud kui glasuurimata ahjupott ning tema pinnatempera-  
tuur on seega mõnevõrra kõrgem. Sama suure pinna kütaks ära ka lihtpo-  
tiahi, kuid selle välispinna hooldus on keerulisem. Meil levima hakanud  
tellisahju võimsus on väiksem, paks telliskivisein ei kuumene nii palju.  
Seetõttu vajame nende ruumide kütmiseks kolme ahju. Tellisahju iga on  
Eesti kogemustel väiksem kui pottkividest ahjul, sest telliskivide vahel  
olev vuuk ei hoia kive piisavalt omavahel koos ja need liiguvad eemale.

Juhul, kui valida lihtsamalt ja kiiremini paigaldatav õhksoojuspump, siis  
külmade ilmadega selle võimsusest ei jätku ning teda saab kompenseeri-  
da pottkiviahjuga. Koostöös annab süsteem häid tulemusi ja välistab ka  
elektri kadumisel tekkida võivad probleemid.

### **Tellisahjude katsetused**

15. ja 16. aprillil tehti proovikütmine tellisahjule Tartu lähedal Eerikal.  
Ahju mõõtmed on 0,92 · 1,18 · 2,08, külgpindala on 7,82 m<sup>2</sup>. Ahi on alt  
aheneva restkoldega. Ees on suur ühekordse klaasiga uks ja tagaküljel  
leivaküpseti. Ahi on kaetud valgete plaatidega. Kolde mõõdud 0,6 · 0,39  
· 0,50 m, rest mõõtudega 0,4 · 0,11 m, mis on selle kolde jaoks väike.  
Arvutuslikult peaks see olema ca 2 korda suurem.

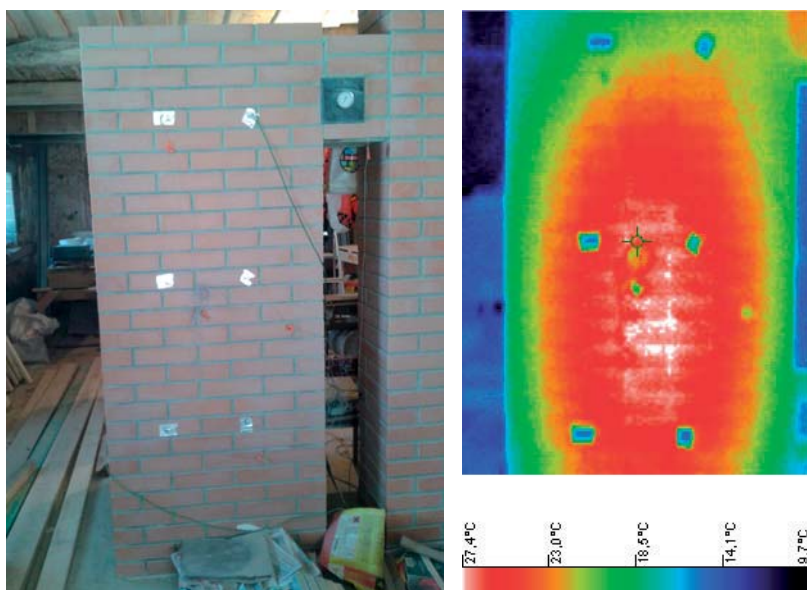
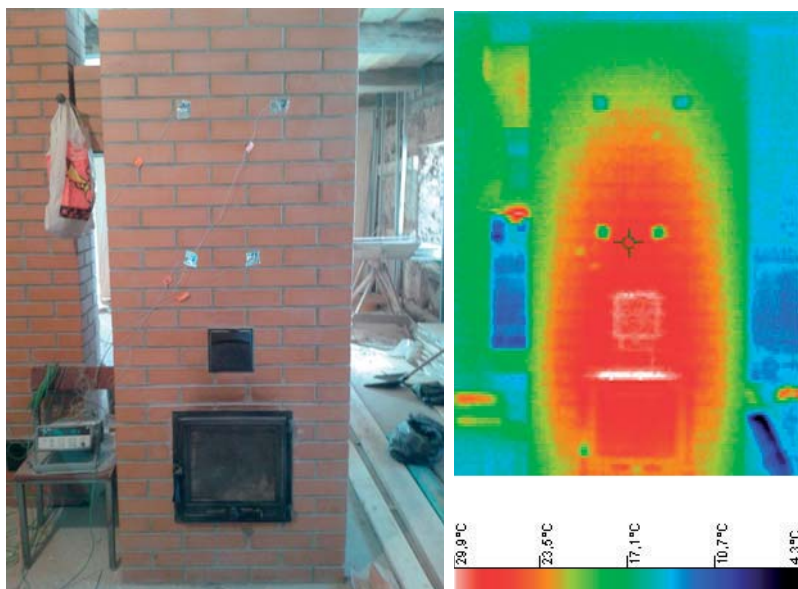
Ahju pinnale kleebiti temperatuuriandurid nii, nagu on kujutatud joonisel  
2. Kütmine algas kell 16.40 ja kell 18.15 suleti siiber. Kell 22.15 on tehtud  
termopildid. Andurid eemaldati järgmisel päeval kella nelja paiku. Küt-  
miseks valmistati 12,5 kg okaspuitu, mille niiskus oli 10,5% kogumassist.  
Mõõtmistulemused näitavad, et suitsugaaside temperatuur korstna sees  
siibri peal oli vahemikus 150–200 kraadi. Sellel ahjul paikneb siiber  
korstnas, mis on harva kasutatav lahendus. Korsten ise soojeneb vähe,  
kuid selle võttega võib näiliselt suurendada ahju kasutegurit ja mõnevõrra  
suureneb küttekehalt saadav sooja kogus.



Joonis 2. Erika ahju üldvaade enne kütmist ja termopilt 4 h pärast siibri sulgemist  
Figure 2. The general view of the stove in Erika before heating and thermal picture

Ööpäeva möödudes ei olnud ahi veel andnud ära kogu soojust. Tuginedes gaasianalüüsile võib väita, et põlemiskeemia oli korras. Optimaalne põlemisrežiim õnnestus saavutada primaarõhu ava ahendamisel võimaliku miinimumväärtuseni. Puidus sisalduv soojakogus oli ligikaudu 207 MJ. Vaatlusperioodi keskmine energiaväljastus köetavasse ruumi oli 9,38 MJ/m<sup>2</sup>. Ahju külgpindala oli 7,82 m<sup>2</sup>, seega esimese ööpäeva vältel eraldus ligikaudu 73,4 MJ energiat. Esimesel ööpäeval, 24 tunniga eraldus ca 36% energiast, mis on väga vähe ja kinnitab, et antud ahi ei soojene piisaval. Et kütuse kogus 12,5 kg on üle 50% lubatud kütusekogusest, siis peaks sooja eraldumine olema suurem. Kasutegurit on raske välja tuua, kuid teoreetiliselt peaks see olema ca 75–78%.

Teine vaatlusalune tellistest laotud ahi mõõtudega 0,9 · 1,1 · 2,2 meetrit on valminud käesoleva aasta jaanuaris ning kasutusel lisakütteallikana. Põhiküte toimub soojuspumbaga, mis hoiab ruumide õhutemperatuuri ligikaudu 15 kraadi juures.



Joonis 3. Termofotod ahju eest- ja tagantvaatest on tehtud 20 tundi pärast ahju kütmist  
 Figure 3. Thermophotos of the front and behind of the stove were made 20 h after heating

25. märtsil umbes kella 11 paiku paigaldati temperatuuriandurid ahju pinnale. Andurid asetati ka suitsutermomeetri juurde ja toas umbes meetri kõrgusele põrandast. Hilisemad mõõtmised näitasid, et õhutemperatuuri erinevus lae vahetus läheduses ja põrandal on umbes neli kraadi.

Mõõtmised näitasid, et ahju pinnalt eralduv keskmine soojusvoog kütmise algusest 26. märtsil 2013 kell 12.05 kuni andurite eemaldamiseni järgmisel päeval kell 10.19 oli  $92,5 \text{ W/m}^2$ . See tähendab, et ruumi õhku eraldus selle aja jooksul ahju külgsinna ühelt ruutmeetrit ligikaudu  $7,4 \text{ MJ}$  soojusenergiat, mis teeb kogu ahju pinda,  $8,8 \text{ m}^2$  arvestades  $65,12 \text{ MJ}$ . Kui võtta arvesse, et kütmisel kasutati  $11,8 \text{ kg}$  puitu, mille kütteväärtus oli  $15 \text{ MJ/kg}$ , siis selgub, et proovikütmisel oli otsesel meetodil mõõdetud kasutegur  $36,8\%$ . Võiks arvestada ka ahju jääktemperatuuri, kuna ahju võimsus katse lõppedes erines keskmisest ainult  $20 \text{ W/m}^2$  võrra. Sellest tulenevalt võib loota, et ülejäänud soojus väljub ajapikku ahju pinnalt. Katsele eelnev pinnatemperatuur oli  $5,7$  kraadi võrra õhutemperatuurist kõrgem. Kõrgema pinnatemperatuuri korral on ahi intensiivses kiirgussoojusvahetuses hoone välispiiretega, mistõttu arvutuslik kasutegur peaks paranema. Katse näitas ka seda, et suitsugaasi temperatuur väljumisel korstnasse oli kütmise ajal lubamatult kõrge – ulatudes korra isegi  $400$  kraadini. Ahjust tehtud termofotod joonisel 3 näitavad selle ühtlast soojenemist. Fotod on tehtud  $20$  tundi pärast kütmist.

### **Meil ja mujal**

Jaanuari lõpus toimus Austriaas Welsi linnas järjekordne kaminatete ja ahjudele pühendatud mess, millest võttis osa ka Eesti pottseppade ühingu delegatsioon. Kahe päeva vältel oli võimalik tutvuda selle valdkonna tehnikaga ja tehnoloogiaga tippsaavutustega. Palju oli kasutusel arvjuhtimisega põlemisprotsessi kontrollereid kolde töö juhtimiseks. Valdav osa koldeid on umbse põhjaga ning külgedel paiknevate õhukanalitega. Kolde ja suitsukäigu projekteerimine toimub spetsiaalse programmiga, mis väljastab süsteemi optimaalsed mõõdud, tagamaks kõrge efektiivsuse ja puhta põlemise.





Joonis 4. Eesti delegatsioon Welsi messil (foto autor Niina Lõhmus)  
Figure 4. Estonian delegation in Wels exhibition



Joonis 5. Kursustel valminud pliidi katsetused (foto autor Raivo Koppel)  
Figure 5. Experimental stove from course



2013. a märtsis toimus Tartus Eesti Maaülikoolis rahvusvaheline pottse-pakoolitus. Osalejaid oli Saaremaalt kuni Venemaani. Kolme päeva vältel kuulati loenguid ning toimusid õpetlikud töötodad. Ürituse raames valmis kaks harjumuspärasest erineva konstruktsiooniga pliiti. Selliseid pole Eestis varem tõenäoselt tehtud. Kasutatud keraamilise kolde eeliseks on kõrgem põlemistemperatuur, mis peaks tagama keemiliselt täielikuma põlemise. Seega on tulemuseks kõrgem kasutegur ja puhtamad suitsugaasid. Soojust akumuleeriv osa on ehitatud pliidi sisse. Septembris toimunud katsetused näitasid väljuva suitsugaasi head koostist ja sobivalt madalat temperatuuri ka ilma täiendava truubi ehk soemüürita.

### **Kasutatud kirjandus**

EVS-EN 15544:2009 Kahhelahjud / krohvitud pinnaga ahjud. Dimensio-neerimine.

EVS-EN 15250:2007 Tahkel kütusel töötavad aeglaselt soojust eraldavad kütteseadmed. Nõuded ja katsetoodika.

Ebert, H.-P., Beimgraben, T. 2011. Heizen mit Holz: in allen Ofenarten.

## **THE CONDITION AND DEVELOPMENT OF LOCAL SOLID-FUEL HEATING DEVICES IN ESTONIA AND IT'S NEIGHBOURHOOD**

Mart Hovi, Annes Andresson

The possibilities for local heating can be fairly different in monetary terms. Not only the availability of primary energy source should be considered, but also the cost and life-span of the devices. Authors observe different stoveheating possibilities as alternatives to heat pumps and electricity heating. As a comparison the measurements of different stove types from neighbouring (Finland, Russia and Austria) have been indicated.

Artikkel on valminud Interreg IV A projekti ECOHOUSING toetusel



# TEHNIKAINSTITUUDI KATUSEL ASUVA TASAPINNALISE PÄIKESEPANEELI TÖÖ 2013. AASTA KEVAD-SUVISEL PERIOODIL

Veli Palge<sup>1</sup>, Margus Arak<sup>2</sup>, Erkki Jõgi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Eesti Maaülikool, veli.palge@emu.ee; <sup>2</sup>Eesti Maaülikool, margus.arak@emu.ee;

<sup>3</sup>Eesti Maaülikool, erkki.jogi@emu.ee

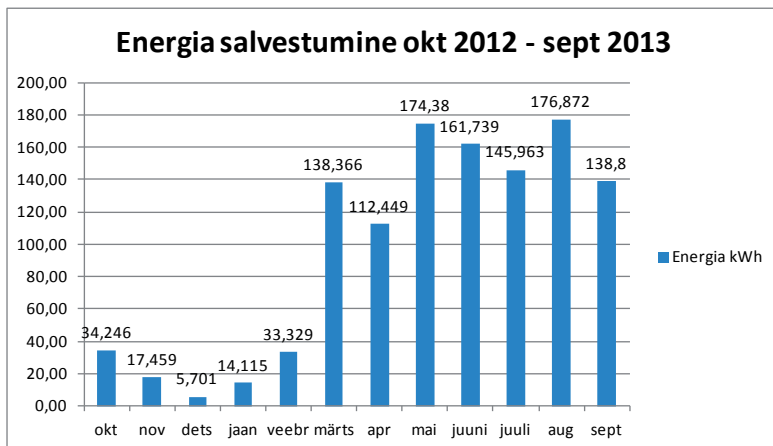
## Annotatsioon

Käesolevas artiklis kirjeldatakse Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi katusel asuva tasapinnalise päikesepaneeli töötulemusi 2013. aasta kevad-suvisel perioodil. Mõnes aspektis on esitatud töötulemusi ka talvise olukorra tingimustes. Töötulemuste alusel saab teha järeldusi päikesepaneeli ratsionaalsete tööviiside valikuks.

Märksõnad: taastuvad energiaallikad, päikesepaneel, päikeseenergia akumulierimine.

2013. aasta kevad-suvine periood oli keskmisest soojem ja kuivem ning sellest tulenevalt ka üsna päikeseküllane. Allpool on esitatud tehnikainstituudi katusel olevas 2,5 m<sup>2</sup> päikesepaneelis neeldunud energia salvestus akupaaki ajavahemikul 01. okt 2012 kuni 26. sept 2013. Graafikult on näha, et kõige vähem salvestus energiat detsembris. Terve detsembri keskel salvestunud energia moodustab natuke üle poole suvise päikesepaistelise päeva salvestunud energiast (see oli 9,5–10,0 kW·h), terves novembris ja jaanuaris vastavalt 1,7 ja 1,4 korda ning oktoobris ja veebruaris vaid 3,4 ja 3,3 korda rohkem suvise päikesepaistelise päeva salvestunud energiast. Paremaks muutus olukord alates märtsikuust. Vaadeldaval perioodil salvestati 1153,42 kW·h.

Viimastel aastatel räägitakse päikesepaneelidest sagedamini ja alati tuleb juttu ka teemal, kuidas kasutada paneeli tiheda pilvitusega kaetud taeva korral. Teema on aktuaalne, sest pilvist taevast esineb meil sagedamini kui selget ja seda ka suvekuudel, aga eriti sügisel ja talvel. Selgitusi paneelide töövõime kohta pilvise taeva korral võib küll leida paljudest allikatest, aga küsimus tõstetakse ikka ja jälle üles. Siinkohal saame selgituseks esi-



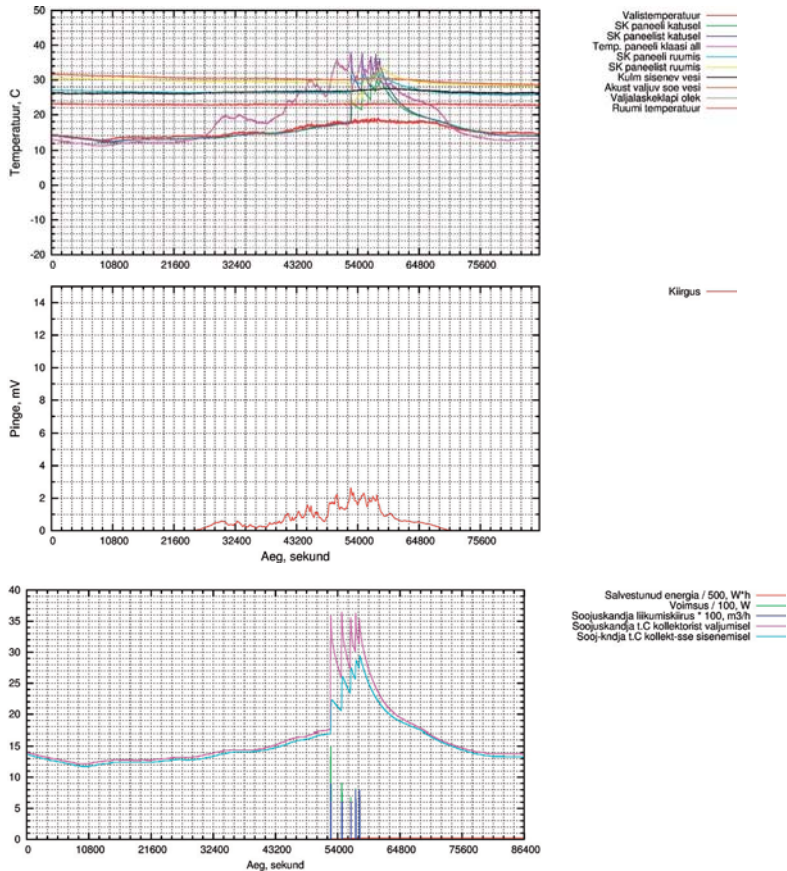
Joonis 1. Tehnikainstituudi katusel olevas 2,5 m<sup>2</sup> päikesepaneelis neeldunud energia salvestus akupaaki 1. okt 2012 kuni 26. sept 2013

Figure 1. Accumulation of solar energy at the solar panel located on the roof of the Technical Institute of Estonian University of Life Sciences in the time period from 1st October 2012 to 26th September 2013

tada graafikuid (<http://en209.eau.ee/picolog/>), kus lugeja võib võrrelda Tartus viimasel suvel mõõdetud päikeselt pärinevaid kiiritustihedusi ja energia salvestust üleni pilvedega kaetud taeva korral (20. septembril vaid 0,25 kW·h), vahelduva pilvituse korral (15. septembril 5,5 kW·h) ja selge taeva korral (8. juunil 9,2 kW·h) (vt jooniseid 2, 3 ja 4).

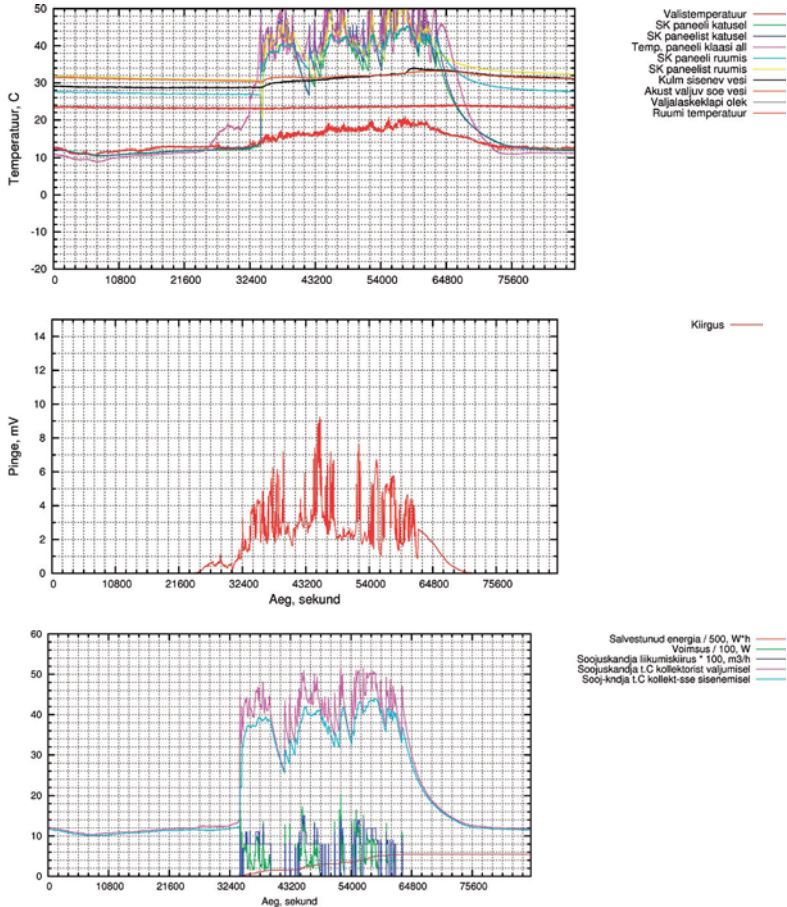
Graafikutelt on näha, et pilvedega kaetud taeva korral on kiiritustihedus kordades väiksem kui selge taeva korral. Ka siis tõuseb paneeli klaasi-alune temperatuur ümbritsevast temperatuurist kõrgemale, kuid sellest ei piisa akus oleva vee temperatuuri tõstmiseks soovitud väärtuseni (katse-objektil kuni 50 °C) ja tsirkulatsioonipumba tööshoidmiseks (vt jooniseid 2 ja 3).

Torustikus ja akupaagis oleva vee kvaliteedi tagamiseks (vees alati leiduvate bakterite paljunemise ja bakteritega reostuse vältimiseks) on vaja temperatuuri hoida kas madalamal kui +20 °C või kõrgemal kui +50 °C. Eriti kiiresti arenevad bakterid +35...40 °C vahemikus, üle +50 °C juures bakterid hukuvad. Mainitud põhjusel püüdsime sellel, 2013. a suvel



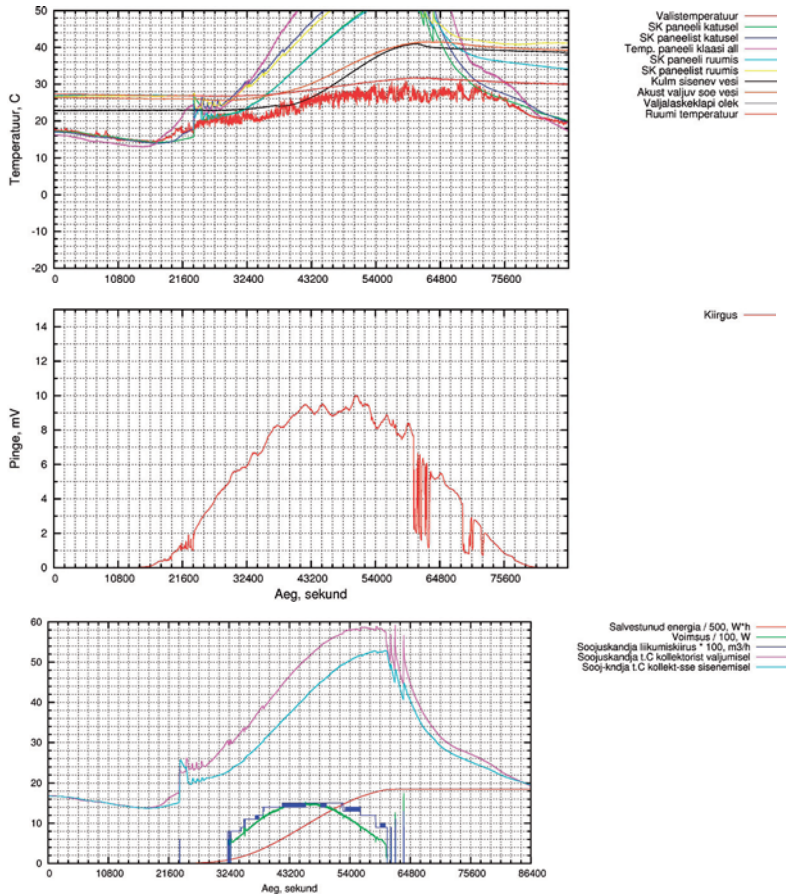
Joonis 2. Päikesepaneeli tööd iseloomustavad graafikud pilvise taeva korral.  
 Figure 2. Graphs describing the operation of the solar panel when the skies are cloudy.

hoida akus vee temperatuuri võimalikult sagedamini üle  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Selge taeva korral tõuseb algtemperatuur akupaagis kiiresti üle  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja akupaagis ei teki vee bakteriaalset reostust (vt joonis 3). Kõrge temperatuuriga seostub aga teine piirang: akupaagi regulaator ei luba akus vee temperatuuril tõusta mingist piirtemperatuurist kõrgemale. Selle piirtemperatuuri väärtus valitakse kahest aspektist lähtudes: toore, kareda vee soojendamisel eraldub soojendavale pinnale (akus olev soojuskandja siugtoru) katlakivi. Eriti intensiivseks muutub katlakivi eraldumine kuumale pinnale



Joonis 3. Päikesepaneeli tööd iseloomustavad graafikud vahelduva pilvitusega taeva korral  
 Figure 3. Graphs describing the operation of the solar panel when the skies are partly cloudy

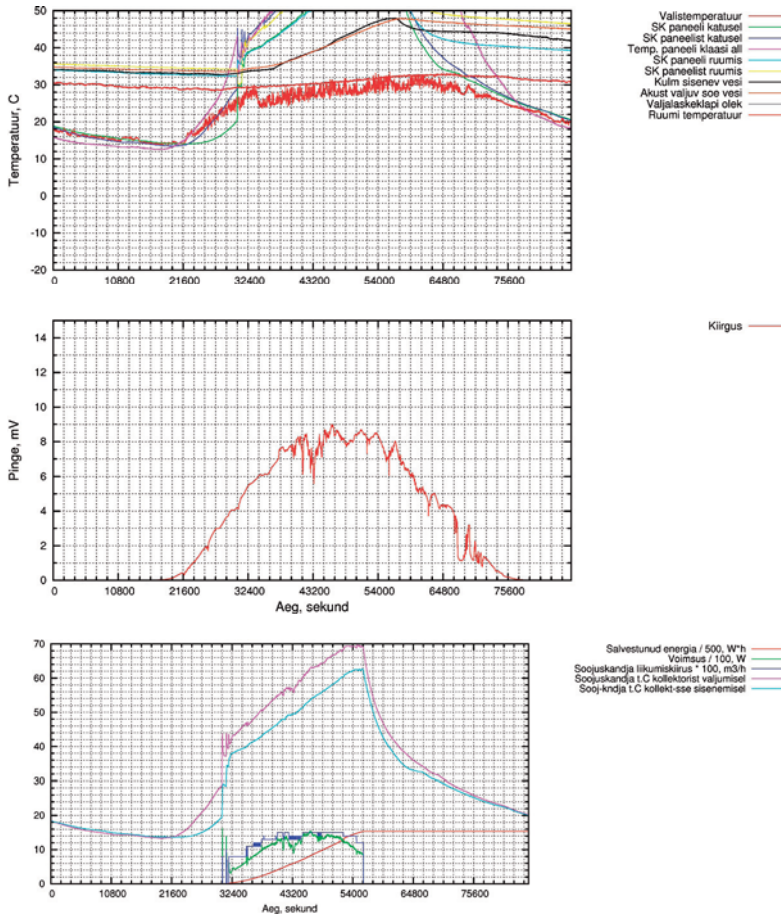
kõrgematel temperatuuridel kui +65 °C. Teisest küljest ei tohiks ohutuse seisukohast kraanist väljuva vee temperatuur olla üle +60 °C. Mõlema temperatuuri ületamise vältimiseks tuleks vee temperatuuri akupaagis hoida madalamal eespoolnimetatud väärtustest. Vaatlusaluse akupaagi korral peaks päikesepaneeli tööd juhtiv regulaator lülitama soojuskandja tsirkulatsioonipumba välja temperatuuril 60 °C. Tegelikku pumba seis-



Joonis 4. Päikesepaneeli tööd (08.06.2013) iseloomustavad graafikud selge taeva korral  
 Figure 4. Graphs describing the operation of the solar panel when the skies are clear

kamise temperatuuri väärtust ei õnnestunud eksperimentaalsel teel tuvastada. Probleemiks oli, et regulaator katkestas soojuskandja tsirkulatsioonipumba töö erinevatel veetemperatuuridel. Kuna täpselt pole teada reguleerimissüsteemi algoritm, siis pumba peatamise põhjus erinevates olukordades vajab veel välja selgitamist. Kirjeldatud piirangust tingituna

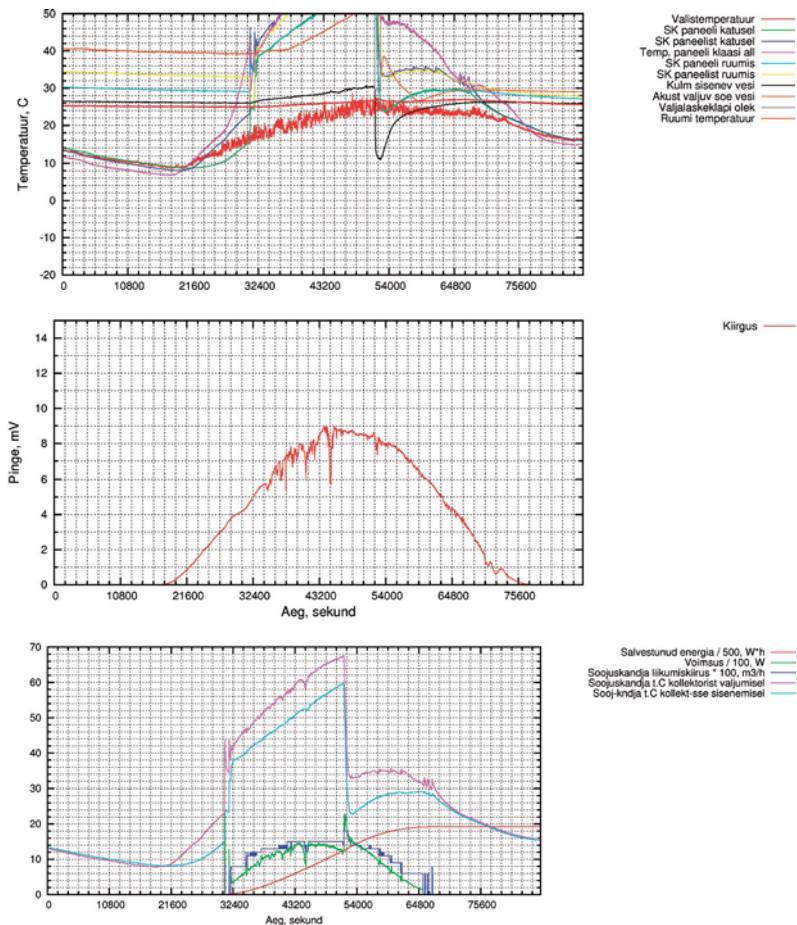




Joonis 5. Päikesepaneeli tööd iseloomustavad graafikud (04.08.2013) selge taeva korral, tsirkulatsioonipump lõpetab töö juba kell 15.30

Figure 5. Graphs describing the operation of the solar panel when the skies are mostly cloudless and the circulation pump has stopped at 15:30

lühenes tsirkulatsioonipumba töötamise aeg akupaagis vee temperatuuri tõusmisel lubatud piirini, vt joonis 4. Kui päeva alguses oli akupaagis oleva vee temperatuur kõrge (04.08.2013), siis salvestus akupaaki vähem energiat, võrreldes juhuga, kui päeva alguses oli akupaagis vee temperatuur madalam (9,2 kW·h joonisel 4 ja 7,7 kW·h joonisel 5).



Joonis 6. Päikesepaneeli tööd iseloomustavad graafikud (08.05.2013) selge taeva korral. Päeva keskel lisandub madalatemperatuuriline vesi, tsirkulatsioonipump lõpetab alles 18.30, akupaaki salvestub 9,7 kW•h

Figure 6. Graphs describing the operation of the solar panel when the skies are mostly cloudless (2013 05 08). At noon cold water is added, the circulation pump stops at 18:30 and 9,7 kW•h of energy is stored in the heat accumulator.

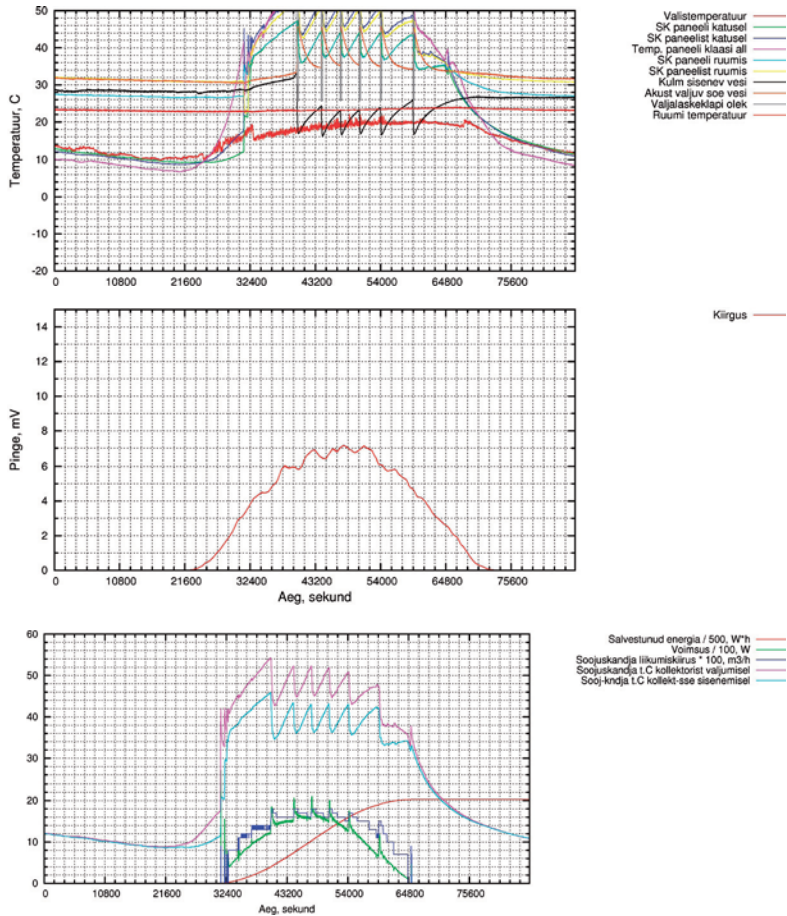
Kõrguses ei ole temperatuur akupaagis ühesugune ja temperatuurijaotus on ajas muutuv. Kui akupaagist ei võeta pika ajavahemiku kestel sooja vett, siis vee temperatuur paagi alumises ja ülemises osas erineb vaid 2 K, kui aga sooja vett kasutatakse (vt joonis 5), siis asemele tuleb külm vesi



siseneb akupaagi alumisse ossa ja natukese aja kestel on alumise ja ülemise osa temperatuuride erinevus maksimaalne. Kuna ka soojuskandja siugtoru asub akupaagi alumises osas, siis seda juurdetulnud külma vett hakatakse päikesepaistelisel päeval kohe soojendama. Kuna soojuskandja siugtoru ja akupaagi alumises osas oleva vee temperatuuri erinevus on suur, siis ülekanduv energia on maksimaalne (vt joonis 5, võimsuse maksimaalväärtus 2,3 kW ületab tunduvalt keskmist, 1,3 kW väärtust), samuti kasutegur. Akupaagi tööd juhtiva regulaatori tabloolt võib sellisel juhul näha, et pump töötab maksimaalkiirusega (100%) ja arendab keskmisest suuremat võimsust. Pumba maksimaalkiiruse korral ületas võimsus keskmist, intensiivse päikesepaiste ja soodsate tingimuste korral esinevat võimsust.

Kui akupaagis vahetub vesi päeva kestel sageli (vt joonis 7), siis soojuskandja siugtoru asub pidevalt madalamas temperatuuripiirkonnas. Vee ja siugtoru temperatuuride vahe on suurem ja sellest tingitult suureneb siugtorult akupaaki ülekantav soojuslik võimsus. Niisugust olukorda kirjeldab joonis 7. Vaatamata asjaolule, et päeva alguses on akupaagis juba üsna soe vesi, tõuseb akupaaki kanduv võimsus kiiresti ja päeva keskel on see 1,6 kW, maksimaalsed tipud isegi 2–2,5 kW. Sellisel töörežiimil salvestus 06.09.2013 akupaaki energiat 10,2 kW·h.

Kokkuvõtteks saab mõõtetulemustest järeldada, et tasapinnalistest päikesepaneelidest ja soojusakumulaatorist koosneva süsteemi võime salvestada energiat sõltub mitmest asjaolust. Neid võib liigitada süsteemivälisteks (kiirguse olemasolu), süsteemiga seostuvateks (konstruktsiooni iseärasused) ja eksploatatsioonilisteks (kasutusviisiga seostuvad). Kui soovitakse parandada võimalusi päikesekiirguse soojusena salvestamiseks, siis saame muuta kas konstruktsiooni või kavalamini kasutamist korraldada. Juba valmis tehtud süsteemide korral saame muuta vaid kasutusviisi. Mõõtmistulemused näitavad kindlalt, et mida rohkem ja sagedamini kasutatakse akupaagis olevat vett, seda rohkem soojust salvestub akupaaki. Võimaluse korral tuleks kasutada madalama temperatuuriga vett või kasutada päikesekollektoreid juhtudel, kus pole vaja kasutada kõrget tem-



Joonis 7. Päikesepaneeli tööd iseloomustavad graafikud (06.09.2013) selge taeva korral. Päeva keskel lisandub sageli madalatemperatuuriline vesi, tsirkulatsioonipump lõpetab alles 18.30, akupaaki salvestub 10,2 kW·h

Figure 7. Graphs describing the operation of the solar panel when the skies are mostly cloudless (2013 09 06). At noon cold water is often added, the circulation pump stops at 18:30 and 10,2 kW·h of energy is stored in the heat accumulator.

peratuuri – näiteks võib keskkütteradiaatorites kasutada madalamat küttevee temperatuuri, kuid siis tuleb suurendada radiaatorite soojusvahetavat pinda sama küttevõimsuse saavutamiseks. Efektiivsed on päikesepaneelid basseini vee soojendamiseks.

## **Kokkuvõte**

Artiklis on esitatud Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi katusele paigaldatud 2,5 m<sup>2</sup> tasapinnalise päikesekollektori töötulemuste kokkuvõte ajavahemiku 01. okt 2012 kuni 26. sept 2013 kohta. Andmetest selgub, et ajavahemikul 01. okt 2012 kuni 01. märts 2013 oli akupaaki salvestunud energia väga väike, vaid 104,85 kW·h. See on vähem kui ükskõik millise järgneva vaatlusaluse kuu kestel salvestunud energia. Kokku salvestus vaatlusalusel perioodil 1153,42 kW·h. Vaatlusaluse perioodi mõõtetulemuste alusel saame veelkord väita, et süsteemi efektiivsusele mõjub peale paljude muude faktorite ka süsteemist vee tarbimise režiim. Mida rohkem vett kasutada, seda madalam on akupaagis asuva vee temperatuur, seda rohkem salvestub akupaaki energiat. Põhjuseks on soojusülekanne iseärasus – mida suurem on akupaagis asuva soojuskandja siugtoru temperatuuri (sõltub paneelist saabuva soojuskandja temperatuurist) ja seda ümbritseva vee temperatuuri erinevus, seda suurem on soojendatavasse vette ülekanduv soojushulk. Sellest lähtuvalt saab soovitada akupaagist sooja vee kasutusviise, mis põhjustavad akupaagis vee temperatuuri alenemist vastuvõetavale, madalale väärtusele.

## **OPERATION OF THE SOLAR PANEL LOCATED ON THE ROOF OF THE ESTONIAN UNIVERSITY OF LIFE SCIENCES IN 2013**

Veli Palge, Margus Arak, Erkki Jõgi

In this paper, we present data that summarizes the operation of the solar panel located on the roof of the Estonian University of Life Sciences in the time period between 1 October 2012 to 26 September 2013. We show that in the period from 1 October 2012 to 1 March 2013, the amount of energy saved in the collector was very small, 104.85 kW·h in total. This is less than the amount of energy saved over any other month during later observations. The total amount of energy saved during all observations comprises 1153.42 kW·h. Based on the data collected at observations we claim that among other factors the efficiency of the system is influenced by how water is being consumed. The more water is being used, the lower the temperature of the water in the collector, which leads to more energy being saved in the collector. This is due to the peculiarity of energy transfer — the larger the difference between the temperature of the pipe in the collector and the water surrounding it, the larger the amount of energy transferred to the water that is being heated. Based on this one can recommend that water be used in a manner that leads to the decrease of the temperature to a desired value.

# **MAKROÖKONOOMIKA MEETODITE KOHANDAMINE HOONE ELEKTRISÜSTEEMI UUENDUSTE PROGNOOSIMISEL. PROGNOOSIMISEPROTSESSI KIRJELDUS. KONKREETSE ELEKTRIPAIGAIGALDISE UUENDUSE ANALÜÜS**

Valeri Saikovski<sup>1</sup>, Raivo Teemets<sup>2</sup>

<sup>1</sup>doktorant, TTÜ elektrotehnika instituut, AS Caverion Eesti (endine YIT Emico) käidujuht;

valeri.saikovski@caverion.ee

<sup>2</sup>TTÜ elektrotehnika instituudi dotsent, raivo.teemets@ttu.ee

## **Annotatsioon**

Autorid arendavad edasi Valeri Saikovski artiklit „Innovatiivsed lahendused hoone elektrisüsteemis“ TEUK-XIII konverentsilt ja autorite ühiselt kirjutatud artiklit „Hoone elektrisüsteemi innovatsioonid ja aruka võrgu arendus“ TEUK-XIV konverentsilt. Käesolevas artiklis käsitletakse konkreetse uuenduse tulemuse prognoosimise meetodit elektrisüsteemi konfiguratsiooni alusel. Kirjeldatakse ka prognoosimise protsessi uut meetodit.

Märksõnad: uuenduste prognoosimine, uuenduste analüüs, innovatsioonide efektiivsus, efektiivsuse faktorid, maksumuse proportsioonid, makroökoonoomika meetodid, innovatsioonide uuringud, tasuvusaeg, uuenduse vaheetapid.

## **Sissejuhatus**

Uuenduste kasutamise otstarbekuse üle otsustatakse tänapäeval enamasti iga uue projekti ja üksikasjaliku eelarve koostamise järel. See on töömahukas protsess ja käesolevas artiklis pakuvad autorid välja võimalusi selle vältimiseks. Olemasoleva elektripaigaldise andmete või väikese eelprojekti põhjal on võimalik analüüsida paigaldise konfiguratsioone ja konkreetse süsteemi uuendamise võimalusi. Üksikasjalikumad arvutused tehakse seejärel ainult eelnevalt valitud otstarbekate uuenduse jaoks.

## **Elektrisüsteemide konfiguratsioonid ja makroökonomika meetodite kasutamine**

Makromajanduses on võimalik konkreetse riigi majanduse struktuuri ja olemasoleva investeringute struktuuri kaudu innovatsioonivõimalusi prognoosida, kaasnevaid raskusi ennustada ja soovitada arengustenaariume või algoritme. Sarnast meetodit pakutakse kasutamiseks ka hoone elektrisüsteemi (ESi) uuenduste kavandamisel.

Makromajanduses on innovatsiooni aluseks kolm tegevussuunda: riigi majanduse struktuuri kirjeldamine, uuenduste eestvedajate motiveerimine ja riigi innovatsiooniseisundi (indeks) hindamine. Vastavalt makromajanduse meetoditele hinnatakse riigi innovatsioonitaset nelja innovatsioonis osaleva grupi kaudu: innovatsiooniliidrid (*innovation leaders*), kaasatulijad (*catching-up*), jäljendajad (*followers*), mahajääjad (*trailing*). (Hamburg 2010).

Kohandame ülaltoodud meetodi elektripaigaldisele alljärgneval viisil:

1. Kirjeldame elektripaigaldise olemasolevat seisundit erinevate osade maksumuse proportsioonide kaudu.
2. Leiame innovatsioonide kasutamise võimalused (draiverid). Pakume maksumuse proportsioonide alusel uuenduste kasutamise variante.
3. Arvutame valitud uuendusvariantide parameetrid.
4. Hindame erinevaid variante põhiparameetrite alusel (tasuvus, elektritarbimise vähenemine, käidufunktsioonide parenemine ja aruka võrgu parameetrid) ning täpsustame uuenduste otstarbekust täiendavate faktorite alusel (töökeskond, energiatariifide võimalik muutus).
5. Valime realiseerimiseks kõige sobivama variandi.

Järel doktorantuuris on planeeritud käesoleva doktoritöö teemaarendusena määrata igale elektripaigaldise tüübile tavaseadme kasutamise proportsioonid ja innovatsiooniindeks ning täpselt kirjeldada konkreetsele tüübile sobivat uuendust. Käesoleva artikli ja doktoritöö teema on uute põhimõtete, meetodite ja nende praktikas kasutamise kirjeldamine.

## **Innovatsioonide efektiivsuse täiendavad faktorid**

*Elektritarbimise režiimi mõju.* Objekti või objekti osa 8-, 16- või 24-tunnise talitlusega kaasneb erinev elektritarbimine. See hoone osa või elektriseade, mis on kasutusel pikemat aega, mõjutab hoone hoolduskulusid oluliselt rohkem. See tähendab, et just selles ESi osas on innovatsiooni kasutamine efektiivsem, tagab kiirema tasuvuse ja seetõttu on otstarbekam kasutada uuendusi just seal.

*Tariifide mõju.* Tasuvuse arvutus on seotud tariifide pikaajalise prognoosiga. Täpne tasuvuse arvutus peab sisaldama analüüsi, kuidas tariifide muutmine ühes või teises suunas korrigeerib majanduslikke näitajaid. Olulised muudatused võivad mõjutada konkreetse uuenduse otstarbekust.

*Muud faktorid.* Mõnes situatsioonis tuleb uuenduste valikul arvestada töökeskkonna võimalike muutustega, automatiseerimisvõimaluste ja käidufunktsioonide parendamise vajadusega.

## **Objekti ESi uuenduste analüüs ja prognoosimine**

Kasutame ülalkirjeldatud algoritmi, parameetreid ja mudeleid objektil Tallinnas Punane 73, mis on toodud 2011. a artiklis (TEUK-XIII, Tartu). Viime läbi konkreetse objekti ESi mudeli koostamise koos proportsiooni-diagrammiga ja ESi eelneva analüüsiga

Kasutame mudelit, mis on toodud 2011. a artiklis (TEUK-XIII, Tartu). Seda mudelit on kirjeldatud eelpool nimetatud artiklis (tabel 1).

Lähtudes elektrisüsteemi struktuurist ja osade maksumusest, on andmed vormistatud uues tabelis.

*Tabel 1. Hoone Esi maksumuse komponendid*

*Tabel 1. ES cost components*

Osa A

Elektrisüsteemi osad	TSM (EUR)	%
1. Jaotusseade	2036	11
2. Kaabeldussüsteemid	7668	43
3. Valgustus	6601	37
4. Tarbija installatsioon	1481	8
5. Muud kulud	227	1
Kokku	18 013	

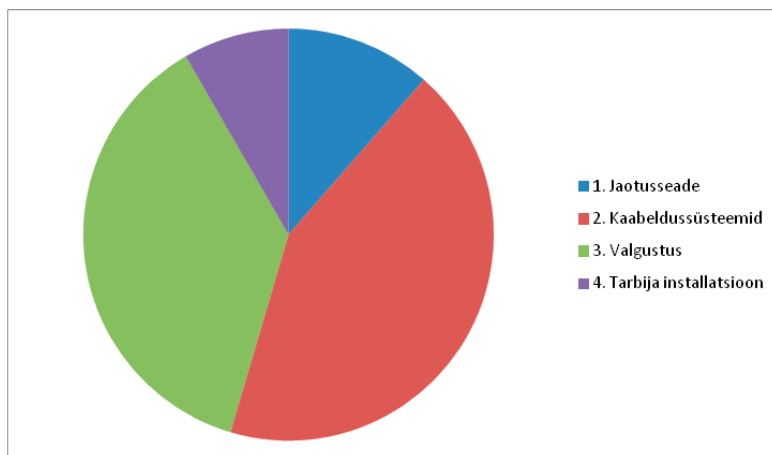
Osa B

Elektrisüsteemi osad	TSM (EUR)	%
1. Jaotusseade	2036	11
2. Kaabeldussüsteemid	7668	43
3. Valgustus	6601	37
4. Tarbija installatsioon	1481	8
Kokku	17 786	

Vaadeldavas konkreetses situatsioonis on muudel kuludel kulud väga väike osa maksumusest ja see ei muutu erinevate uuenduste variantide korral. Meie analüüsi ja prognoosimise eesmärgi jaoks ignoreerime muid kulusid.

Korrigeeritud variant on esitatud tabeli 1 B osas ja diagrammi kujul joonisel 1.

Esmane analüüs näitab, et kõige olulisemad ESi osad on valgustus ja kaabeldussüsteemid.



Joonis 1. ESi osade maksumuse diagramm

Figure 1. ES cost pie

Kaabeldussüsteemide maksumuses on suur seotud hoone suurusega või standardse büroo- ja tootmisosa kaabeldusega. Oletame, et see ei muutu oluliselt iga uuenduse korral. Sarnane situatsioon on jaotussüsteemidega, need ei muutu samuti iga uuendusega, kuid nende osa üldmaksumuses on väiksem.

Esimesel etapil otsustame, et otstarbekas uuendusvariant on valgussüsteemi uuendamine.

Praegusel perioodil on mõistlik valgustuse uuendus LED-tehnoloogia baasil. Artiklis (TEUK-XIII, Tartu) on esitatud uuendatud ESi leedvalgustussüsteemi kirjeldus 2010. a andmete alusel koos kasutatavate seadmete ja tööde maksumusega. Järgnevalt hindame käesolevat uuendust.



Selleks koostame diagrammid, et võrrelda maksumusi ja elektritarbimise muutusi tavavalgustuse ja leedvalgustuse kasutamise korral.

Analoogiliselt tavaseadmetega esitame andmed pärast konkreetse uuenduse realiseerimist.

Tabel 2. Uuendatud hoone ESi maksumuse komponendid

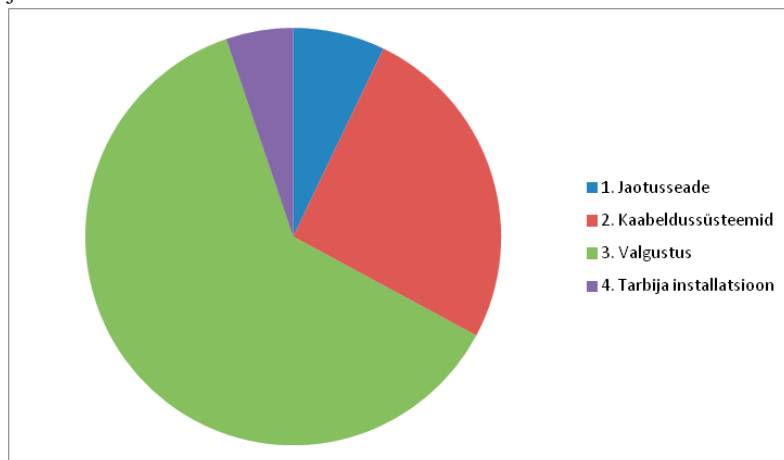
Tabel 2. Renovable ES cost components

Tabel A

Elektrisüsteemi osad	TSM (EUR)	%
1. Jaotusseade	2031	7
2. Kaabeldussüsteemid	7326	26
3. Valgustus	17626	62
4. Tarbija installatsioon	1481	5
Kokku	28 464	100

Esmane analüüs näitab, et konkreetse uuenduse realiseerimine toob kaasa olulised muutused valgustuse osas ESi maksumuses suureneb. Samal ajal jaotussüsteemide osa ja kaabeldussüsteemide osa maksumuses väheneb.

Uuenduse realiseerimise maksumused on esitatud ka diagrammi kujul joonisel 2.



Joonis 2. Uuendatud ESi osade maksumuse diagramm

Figure 2. Renovated ES cost pie

Ülaltoodud uuenduse realiseerimine toob kaasa üldmaksumuse olulise kallinemise. (valgustuse osas kuni 2,7 korda). Muud ESi osad ei muuda maksumust oluliselt. Käesoleva uuenduse realiseerimise otstarbekus on seotud ESi tehniliste ja majanduslike näitajate muutusega. analüüsi-me neid komplekselt, et aru saada uuenduse mõju ka pika ajavahemiku jooksul.

Teeme seda hoone osade lõikes, sest erinevates hoone osades on kasutusel erinevad valgustid ja erinev tarbimise režiim. Vajalikud andmed on esitatud (TEUK XIII, Tartu) artiklis tabel 3 (siin mõnevõrra muudetud).

*Tabel 3. ESi osade majanduslikud ja tehnilised parameetrid*  
*Tabel 3. ES parts costs and technical parameters*

Kompleksi ESi osa nimetus	Maksumus tavavalgustusega EUR	LED-valgustuse maksumus EUR	Pa kW	Pa (LED) kW	Vähene-mine %
Büroo	2120	5057	180	164	8,9
Ladu	2373	9747	157,2	98,3	37,6
Tänavavalgustus	619	1410	11,2	4,4	60

Ülaltoodud andmed näitavad, et erinevatel osad on põhiparameetrite muutused erinevad. Büroovalgustuse maksumus on sarnane laovalgustuse maksumusega, kuid elektritarbimise väheneb ca 4 korda. Veel efektiivsem on see näitaja tänavavalgustuses. Proovime aru saada kirjeldatud tulemuste põhjustest. Kasutame selleks erinevate valgustuste konstruktsiooni ja maksumuse eripärasid. Büroovalgusti jaoks on tähtis disain ja seetõttu on sama võimsuse ja valgusvooga valgusti oluliselt kallim töös-tusvalgustist. Teine oluline komponent on tarbimisrežiim. Büroo suhte-liselt kalleid valgusteid kasutatakse väiksema intensiivsusega. Seda on kirjeldatud (TEUK XIII, Tartu) tabelis 4. Konkreetse uuenduse täielik analüüs tähendab reaalse elektritarbimisrežiimi määramist ja kõigi hool-duskulude arvutust, sealhulgas ka tasuvuse määramist. Eelmainitud artik-lis see ka teostati.

Täielikud arvutused näitavad, et uuenduse realiseerimine büroos toob

kaasa pika tasuvusajaga investeringu, 25 aastat. Laos tehtavate uuenduste tasuvusaeg on kolm korda lühem, 8,7 aastat. Kogu kompleksi valgustuse uuenduse tasuvusajaks kujuneks 10,4 aastat. Kasulikku infot annab meile tänavavalgustuse uuenduse analüüs, millest selgub, et seal on uuenduse efektiivsus arvutusliku võimsuse Pa osas veelgi suurem võrreldes büroo- või lao tööstusvalgustuse renoveerimisega. see tulemus on seletatav sellega, et leedvalgustid on oluliselt energiasäästlikumad võrreldes siseruumides kasutatavate tavavalgustitega.

On võimalikud ka muud prioriteedid (nt tarbitava võimsuse vähenemine, töökeskkonna parenemine, käidufunktsioonide areng jne), kuid tavaliselt on just investeringute tasuvusaeg põhifaktor uuenduse otstarbekuse hindamisel.

Kasutatud meetod (uuenduse analüüs erinevates ESi osades) toob kaasa veel ühe tulemuse. On võimalik välja selgitada mõistliku konkreetse uuenduse realiseerimise etapid ja piiratud rahalise vahendite juhul loobuda mingi osa uuendusest või realiseerida see hiljem. eelkirjeldatud uuenduse realiseerimist on tasuvusaja kriteeriumi järgi otstarbekas ellu viia hoone osade kaupa järgmistes etappides:

- 1) tänavavalgustuse uuendamine,
- 2) laovalgustuse uuendamine,
- 3) büroovalgustuse uuendamine.

Sama meetodi kasutamisel hoone osade uuendamisel veel üksikasjalikuma stsenaariumiga kaasnevad alljärgnevad vaheetapid:

- 1) laos on mõistlik uuendamist alustada osas, kus on intensiivsem töörežiim,
- 2) büroos sobib esimesel etapil alustada trepivalgustuse uuendamisest, sest seal on valguse kasutamise intensiivsus oluliselt suurem.

### **Prognoosimisprotsessi kirjeldus**

Ülaltoodud meetodite kokkuvõte ja prognoosimise protsessi lühikirjeldus.

Koostame konkreetse hoone elektrisüsteemi mudeli.

1. Arvutame hoone ESi parameetrid tavaseadmete kasutamise korral. Need võivad olla ka olemasoleva hoone elektrisüsteemi andmed, mis tuleb adapteerida konkreetse aasta ehitusturu situatsiooni (TSM).
2. Eelnevalt analüüsime ESi ja võimalikke innovatsioone .
3. Valime võimalikud uuendused, mida on otstarbekas kasutada konkreetse hoone elektrisüsteemis.
4. Võrdleme diagrammide parameetreid ja analüüsime disproportioone.
5. Teostame valitud uuendusvariandi tehniliste ja majanduslike parameetrite üksikasjaliku arvutuse.
6. Lisaks arvutame majanduslikud parameetrid erinevate talitluste ja tariifide jaoks.

Kirjeldatud protsessi eesmärk on vältida igale uuendusele keerulise tehnilise projekti ja eelarve koostamist. Kirjeldatud algoritmi on otstarbekas kasutada ka olemasolevate hoonete uuendusplaanide valikul. Pakutav algoritm on oluliselt lihtsam ja vähem mahukas võrreldes praktikas kasutatavate arvutustega. Uue objekti projekteerimisel piisab tavaseadmete eelprojekti koostamisest. Enne põhi- või tööprojekti koostamist on võimalik suhteliselt lihtsate arvutusega valida sobiv uuenduste variant, mille alusel koostada hiljem üksikasjalik projekt. Perspektiivse arenduse korral, kui realiseerimisaeg on teadmata ja üksikasjalik projekt pole vajalik, annab pakutav variant võimaluse vältida tavalist projekteerimist.

Käesoleva artikli ja doktoritöö uuringute objekt on hoone elektrisüsteem, kuid nähakse ette võimalus, et väikese kohandamise korral saab seda meetodit kasutada ka teiste tehnosüsteemide kavandamisel.

### **Kokkuvõte**

Makroökonomika meetodit on võimalik kohandada nii, et sellega saab prognoosida hoone elektrisüsteemi (ES) või muu tehnosüsteemi uuenduste tulemusi ja valida selle alusel otstarbekaim variant. ESi osadeks jagamine elektritarbimise režiimi ja erinevate seadmete kasutamise ise-

ärasuste järgi toob kaasa võimaluse koostada ka otstarbekad uuenduse realiseerimise vaheetapid. Täiendavate faktorite arvestamine annab võimaluse mõningaid tekkida võivaid probleeme ennetada ja riske maandada.

### **Kasutatud kirjandus**

- Saikovski, V., 2011. Innovatiivsed lahendused hoone elektrisüsteemis: struktuuri modelleerimine, lahenduse realiseerimise majanduslikud ja tehnilised aspektid. Lõpliku variandi valiku algoritm. TEUK XIII, Tartu, Eesti, Nov 8, 2010. Tartu, 143–156
- Saikovski, V., Teemets, R., 2012. Hoone elektrisüsteemi innovatsioonid ja aruka võrgu arendus. TEUK XIV, Tartu, Eesti, Nov 14, 2010. Tartu, 88–97
- Hamburg, A. 2010. „Analysis of Energy Development Perspectives“, TTÜ (doktoritöö)

## **MACROECONOMICS METHODS OF MATCHING ELECTRIC SYSTEMS OF BUILDINGS RENOVATION PREDICTS. PREDICT PROCESS DESCRIPTION. REAL BUILDING ELECTRICAL SYSTEM RENEWAL ANALYSIS**

Valeri Saikovski, Raivo Teemets

It is possible to adapt the method of macroeconomics for electrical system or other technical system innovation results to predicte and most reasonable option to choose. Electrical System parts sharing power consumption mode or various devices particularity leads to create a meaningful upgrade to the realization of the intermediate stanges. Consideration of additional factors provides the opportunity to prevent some of the problems and manage risk.

# HAJUKIIRGUS EESTIS

Teolan Tomson

Tallinna Tehnikaülikooli materjaliteaduse instituut  
Ehitajate tee 5, 19086, Tallinn, e-mail: [Teolan.Tomson@ttu.ee](mailto:Teolan.Tomson@ttu.ee)

## Annotatsioon

Eesti aktinomeetrilisest päikeseenergia ressursist moodustab hajukiirgus ~50%. Suvesesoonile (mis on tehnoloogiliselt kasutatav apr–sept) langeb 82% kogu päikeseenergiast ja 77% hajukiirguse energiast. Seega on hajukiirgus Eestis oluline ressurss ja vajab täpsemat uurimist. Lauspilvituse puhul on pädev traditsiooniline isotroopse taeva mudel, mis lubab horisontaalpinnal mõõdetud aktinomeetrilisi andmeid (tehnoloogilisele) kaldpinnale ümber arvutada. Ettekandes tutvustatakse uurimisel kasutatud originaalset dünaamilises režiimis tehtud meetodikat, mis teadaolevalt on esimene selletaoline maailmas ja tõestab vajadust lahkpilvisuse puhul kasutada komplitseeritumat ja senisest erinevat arvutusmudelit.

Märksõnad: pilved, hajukiirgus, kaldpind.

## Sissejuhatus

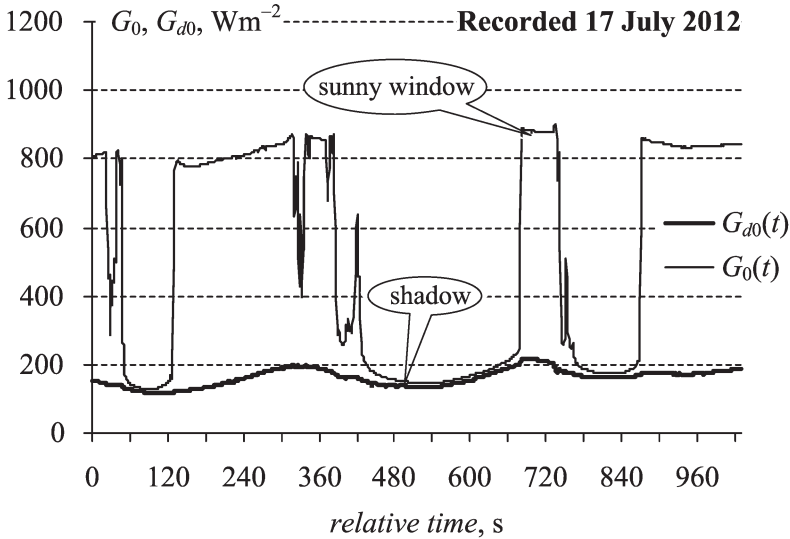
Eesti, aga ka kogu Põhja-Euroopa aktinomeetrilisest päikeseenergia ressursist moodustab hajukiirgus ~50% (Tooming 2003). Suvesesoonile (apr–sept), mis on päikeseenergia kasutamiseks sobiv, langeb 82% kogu päikeseenergiast ja 77% hajukiirguse energiast. Seega on hajukiirgus Eestis oluline ressurss ja vajab täpsemat uurimist. Hajukiirgus tekib päikesekiirguse hajumisest atmosfääris ja peegeldumisel pilvedelt ning esineb alati. Selge ilmaga on tema osatähtsus 10–20%, aga lauspilvituse ja lahkpilvede (*Cumulus*) varjude puhul on kogu kiirgus hajukiirgus. Aktinomeetriliselt (mille kohta on pikaajased ja usaldusväärsed andmed) mõõdetakse hajukiirgust varjurõnga või (sünkroon)sirmi abil horisontaalpinnalt. Kõik tehnilised päikeseenergiat muundavad seadmed ehitatakse aga kaldu. Seega tuleb toodangu prognoosimisel (ja/või seadmete optimeerimisel) hajukiirgus kaldpinnale ümber arvutada. Hajukiirgusele on pühendatud arvukalt uurimusi, mis käsivad hajukiirguse määramist lihtsamalt mõõdetava kogukiirguse kaudu ja tema ümberarvutamist hori-



Joonis 1. Kogu- ja hajukiirguse sünkroonne mõõtmine  
Figure 1. Recording the global radiation and its diffuse fraction

sontaalpinnalt suvalisele kaldpinnale. Senised uurimused on tehtud staatiliste (keskmiste) andmete järgi ja ei ole pädevad vahelduva pilvituse olukorras.

Käesolev uurimus vahelduva pilvituse juures on tehtud dünaamilises režiimis ja on teadaolevalt esimene selletaoline. Tõravere aktinomeetria-jaama (TOR) kolme (1999–2000) suve üheminutilise sampsimisintervalliga mõõteandmete alusel on Eestis vahelduv pilvitus 33% valgest ajast. Lauspilvist (mis on iseloomulik tuntud isotroopse taeva mudelile) on samavõrra, nagu ka pilvitut (üksikute pilvedega) aega. Joonisel 1 on näidatud mõõtestend kogukiirguse  $G_0(t)$  ja hajukiirguse  $G_{d0}(t)$  sünkroonseks mõõtmiseks. Joonis 2 esitab mõõtmistulemuse näite.



Joonis 2. Kiiritustihedus vahelduva Cumulus-pilvituse puhul  
 Figure 2. Recorded irradiance in conditions of alternating Cumulus clouds

Kogukiirgus  $G_0(t)$  on mõõdetud (üleval) vaba ja hajukiirgus  $G_{d0}(t)$  on mõõdetud (all) teise püranomeetriga, millele langeb varjurõnga segmenti vari ja mis katab otsekiirguse. Näeme, et  $G_0(t)$  ja  $G_{d0}(t)$  on vaid nõrgalt korreleeritud ning  $G_{d0}(t)$  varjus või päikesepaistel oluliselt ei muutu. See lubab hajukiirgust vahelduva pilvituse puhul lugeda konstantseks (mitte sõltuvaks valgusest või varjust).

### Hajukiirgus lauspilvituse puhul

Lauspilvitus (*Stratocumulus perlucidus*, *Stratus nebulosus*) katab kogu taeva võrdlemisi ühtlaselt (joonis 3).

Kiiritustihedus sõltub pilvekihtide arvust ja paksusest ( $50 < G_{d0} < 250 \text{ Wm}^{-2}$ ), aga selle absoluutväärtusest sõltumatult on tema suhteline väärtus kaldpinnal kaldenurgaga  $\beta$  hästi kirjeldatav isotroopse taeva mudeliga (1).

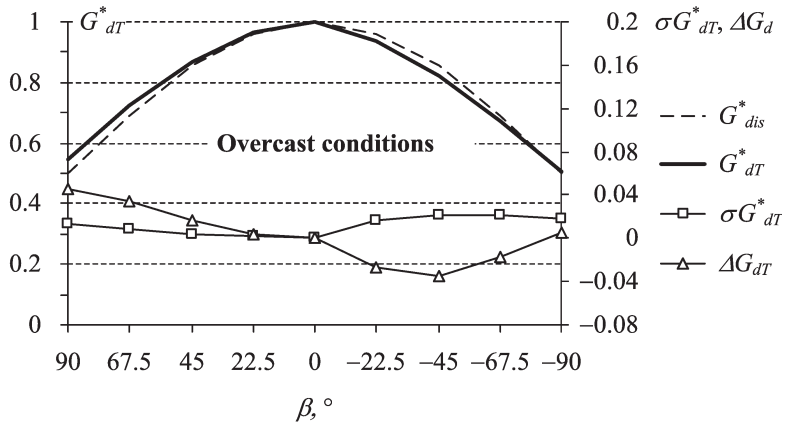
$$G_{dT}^* = G_{dT} / G_{d0} = (1 + \cos\beta) / 2. \tag{1}$$





Joonis 3. Stratus nebulosus  
Figure 3. Stratus nebulosus

See mudel, mida esmalt kirjeldavad liu ja Jordan (1963), on kõige populaarsem hajukiirguse arvutamise alus (Duffie, Beckman 2006) kaldpindadel.



Joonis 4. hajukiirguse suhteline väärtus  $G_{dT}^*$  ei sõltu suunast  
Figure 4. Relative value of the diffuse radiation is invariant to the direction

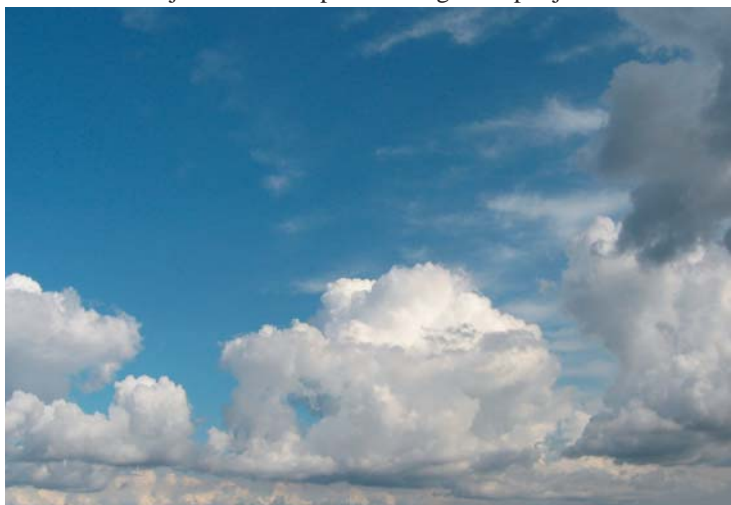
Joonis 4 näitab mõõdetud  $G^*_{dT}$  ja (1) järgi arvutatud jaotusseadust  $G^*_{dis}$ , mis mõlemad on invariantseid suunale. On tähelepanuväärne, et üksikute mõõtmiste standardhälve  $\sigma G^*_{dT}$  ja aproksimatsiooni viga  $\Delta G^*_{dT}$  on väikesed.

Kokkuvõtlikult tuleb lauspilvituse puhul esile tõsta hajukiirguse järgmisi omadusi.

1. Kiiritustiheduse maksimaalne väärtus  $\max G^*_{dT}(\beta) = G_{d0}$  esineb horisontaalpinnal.
2. kaldenurga suurenedes (mõlemas suunas – päikese poole ja sellest eemale  $\beta < 0$ ) väheneb  $G^*_{dT}$  monotoonselt, s.o tema inkrement on alati negatiivne, kui  $\beta \neq 0$ .
3. Diagrammil on kumer iseloom.
4. Kiiritustiheduse jaotus  $\beta \neq 0$  on ajaliselt stabiilne. Uurimistel leitud korrelatsiooniaeg on  $10 < \tau_c < 30$  min.

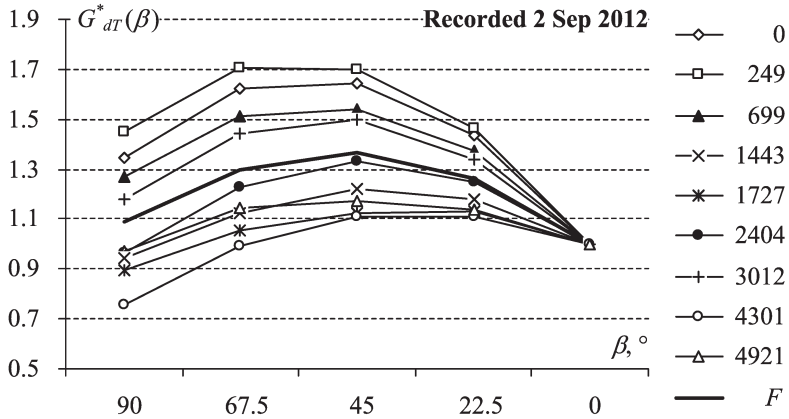
### Hajukiirgus lahkpilvede korral

Lahkpilved (diskreetselt üksteisest eraldatud pilved) on enamasti Cumuluse perekonda kuuluvad *Cumulus fractus*, *Cumulus humilis* ja *Cumulus mediocris* (joonis 5). Päris äikesepilv *Cumulus congestus* esineb enamasti ühe massiivina ja vahelduvat päikesekiirgust ei põhjusta.



Joonis 5. Cumulus mediocris  
Figure 5. Cumulus mediocris

Lahkpilvituse juures näib hajukiirus tekkivat peamiselt pilvedelt peegeldumisel. Kuna pilved muudavad pidevalt oma asendit, kuju ning ka päikese kõrgus muutub, on kiiritustiheduse jaotus pidevalt muutuv (joonis 6).



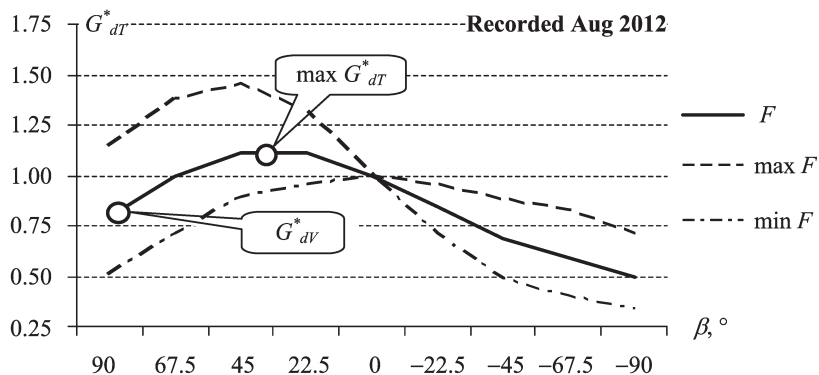
Joonis 6. Kiiritustiheduse jaotused (päikesesuunalisel) kaldpinnal pikema eksperimendi vältel  
 Figure 6. Distribution of diffuse irradiance on the tilted plane (due sun) during a long-lasting experiment

Joontelemistatud numbrid on ajateljel nende aadressid sekundites. Jäme joon  $F$  on eksperimendi vältel mõõdetud keskmine jaotusseadus. See ja kõik hajukiirguse jaotust kaldpinnal kirjeldavad eksperimentaalsed seosed on leitud mõõtestendi abil (joonis 7), mis koosneb viiest  $22,5^\circ$  võrra erinevalt kaldu monteeritud fotoelektrilisest püranomeetrist. Mõõteseadme (vertikaal)tasapind on muudetav soovitud suunas, kuid alljärgnevalt piirduetakse päikese suunal (selle vastassuunal) tehtud mõõtmisandmete esitamisega.

Võrreldes jooniseid 4 ja 7 on selge, et lahkpilvituse juures on otsitav jaotusseadus  $G^*_{dT}(\beta)$  põhimõtteliselt erinev ja komplitseeritud. Sellele nähtusele ei ole teaduskirjanduses seni tähelepanu pööratud ja see on leitav ainult tänu pilvede dünaamikaga arvestamisele. Peamiselt 2012. aasta suvel tehtud mõõtmisi võtab kokku joonis 8, mis arvestab nii päikesepoolseid ( $\beta > 0$ ) kui ka päikesest allapoole jäävaid kaldeid ( $\beta < 0$ ).



Joonis 7. (Haju)kiirguse kaldpindadel mõõtmise stand  
 Figure 7. Measuring device used



Joonis 8. Hajukiirguse suhteline väärtus  $G^*_{dT}$  päikese suunas ja sellest eemal  
 Figure 8. Relative value of diffuse irradiance due south and away from that

Joonte tähendus on järgmine: jäme joon  $F$  on paljude mõõtmiste keskmine; joon  $\max F$  on mähisjoon ülalt (s.o joon, mis ühendab leitud maksimumväärtusi) ja joon  $\min F$  on mähisjoon alt. Joonisel on eraldi näidatud iseloomulikud punktid  $\max G^*_{dT}$  (kõvera maksimumpunkt) ja  $G^*_{dV}$ , mis on vertikaalpinna kiiritustiheduse suhteline väärtus. Nende järgi on konstrueeritav kogu jaotuskõver ja piisab nende väärtuste korduvast mõõtmisest, et statistiliselt usaldatavat jaotusseadust leida. Jaotusseadus ise on kirjeldatav empiirilise valemiga

$$G^*_{dT}(\beta) = G^*_{dV} + 2 \cdot (\pi / 2 - \beta) \cdot (1 - G^*_{dV}) / \pi + A \cdot \sin(2\beta), \quad (2)$$

kus  $A$  on siinuselise liikme amplituud (suhtelistes ühikutes) ja  $(1 - G^*_{dV}) / \pi$  lineaarse liikme tõusunurk. Iseloomulikud punktid on seotud aproksimatsioonivalemiga järgmiselt:

$$A = \max G^*_{dT} - (1 + G^*_{dV}) / 2, \text{ kui } \beta = 45^\circ. \quad (3)$$

$\max G^*_{dT}$  ja  $G^*_{dV}$  vajavad detailsemat (pikemaajalist) uurimist, sest nad näivad olevat korreleeritud päikese kõrgusnurgaga (üle horisondi). Kui päikese (ja selle vastas)suunast kõrvale minna, väheneb  $A$  monotoonselt, kuni jaotusseadus kõdub sarnaseks lauspilvituse juhtumiga (joonis 4).

Päikese poole pööratud kaldpindadel on lahkpilvituse puhul hajukiirguse jaotusseadusel järgmised olulisemad omadused.

1. suhtelise hajukiirguse maksimumväärtus kaldpinnal  $\max G^*_{dT} > G_{d0}$  on suurem kui horisontaalpinnal.
2. Suurendades kaldenurka, ei muutu suhteline hajukiirgus monotoonselt, s.o tema inkrementid on nii positiivsed kui ka negatiivsed.
3. Joonisel 8 oleva diagrammi päikesest ära pööratud haru on nõgusa iseloomuga.
4. suhtelise hajukiirguse jaotusseadus kaldpindadel on ajateljel ebastabiilne.

## Kokkuvõte

Ülaloodud uurimustulemustest ilmneb, et lahkpilvisuse puhul võtab kaldpind vastu rohkem hajukiirguse päikeseenergiat, kui see järeldub tuntud aproksimatsioonimudelitest (1). Kui palju just, nõuab teavet lahkpilvituse kestvuse kohta. Sissejuhatuses antud ~33% oli leitud eksperthinnangu-na, määrates päevad pigem lauspilvisteks, pigem lahkpilvisteks jne. Arvutus vajaks täpsemaid andmeid, aga meetodika pilvisuse hindamiseks puudub senini. Ilmselt pilvi keegi loendama ei hakka ja lahendust tuleb otsida kiiritusdiagrammide andmetöötlusest. Samuti pole lõpuni uuritud korrelatiivsed seosed  $\max G_{dT}^*$  ja  $G_{dV}^*$  ning päikese kõrgusnurga vahel ja see võib viia nimetatud parameetrite sesoonse sõltuvuseni. Seega ei ole praegu veel arvulist vastust ja hajukiirgus vajab edasist uurimist.

## Kasutatud kirjandus

- Duffie, J. A., Beckman, W. A. 2006. Solar Engineering of Thermal Processes. Third. Edit. J. Wiley & Sons, N.Y.
- Liu, B.Y.H., Jordan, C. 1963. The long-term Average Performance of Flat-plate Solar Energy Collectors: With design data for the U.S, its outlying possessions and Canada. – Solar Energy 7, 53–74.
- Tooming, H. (ed). 2003. Handbook of Estonian solar radiation climate. EMHI, Tallinn.

## **DIFFUSE SOLAR RADIATION IN ESTONIA**

Teolan Tomson

High level (~50%) of diffuse radiation in Estonia is caused by prevailing cloudiness, which exists under overcast sky or in shadows of alternating discrete clouds (~33% of summer days). Regular actinometrical measurements record beam radiation from the sun's position and diffuse radiation from horizontal surfaces. These continuous recordings form the basis for the prognosis of energy production (thermal, electrical), and for the comparison of different technological solutions. As real solar collectors operate at different azimuths and tilt angles, it is of interest to study relative value of the diffuse component on such surfaces. Knowing this relative value, it is possible to calculate diffuse radiation on tilted planes from long-time series of actinometrical recordings. This study uses experimental data, recorded with tilted sensors in the dynamical regime (in real time), which differs from traditional studies based on averaged data corresponding to static situations.

# KAS JÄTTA PUIT METSA LAGUNEMA VÕI TOOTA SELLEST ENERGIAT?

Johannes Valk  
Agraarökonomist  
roos@laheroos.ee

## **Annotatsioon**

Käesolevas artiklis on juhitud tähelepanu asjaolule, et asendades ekvivalentse koguse põlevkivist seni piisavat kasutamist mitteleidva taastuva puiduga, on võimalik vähendada õhku paisatavate heitmete, eeskätt süsihappegaasi hulka ning see mõjub positiivselt maaelu loomulikule arengule.

Märksõnad: puidutagavara, raievanus, lokaalsed elektrijaamad, taastuva elektrienergia eksport, soojusenergia, piirangualad, „päikesekonserv”, tarnekindlus, energiajulgeolek, maaelu areng.

## **Sissejuhatus**

Eesti metsade puidutagavara kasvab juba pikemat aega ja seda eeskätt vähemväärtuslike lehtpuumetsade alaraide tulemusena. Seoses atmosfääriõhu süsihappegaasisalduse tõusuga lüheneb metsade raieküpsusvanus ja tõuseb nende produktiivsus. Metsadele kehtestatud raieküpsusvanust oleks otstarbekas vähendada või lõpetada selles osas seaduslikud piirangud üldse. Produktiivsuse täiendava tõusu ja puidu kvaliteedi kasvu peamiseks aluseks on optimaalses vanuses tehtavad raided.

Vähemväärtuslikule, kuid kütteks sobivale puidule puudub seni piisav turg. Seetõttu jäävad järjest suuremad kogused puitu lihtsalt metsa lagunema, tõstes sellega kasutult õhu süsihappegaasisaldust. Lisaks sellele paisatakse õhku suurtes kogustes süsihappegaasi, sest puidu asemel kasutatakse põlevkivi. Mõlema probleemi korral oleks lahenduseks seni väheväärtuslikuks peetud puidu kasutamine energiatootmises, ehitades näiteks tooraineallikate suhtelisse lähedusse 6...10 puitkütusel töötavat lokaalset elektrijaama.



## **Olukorra ja tendentsi kirjeldus**

Eesti metsanduse arengukavas aastani 2020 on kirjas, et meie metsade puidutagavara on viimasel poolsajandil kasvanud 2,5 korda. Järjest suureneb küpsete ja üleseisnud puistute osatähtsus. Küpsusvanuse saavutanud puistute osakaalu suurenemise tõttu kasutatakse metsamaa kasvupotentsiaali üha vähem, sest teatud vanuses hakkab metsa produktiivsus langema. Näiteks raiuti aastatel 2002–2008 SMI andmete põhjal alla 2/3 optimaalsest raiemahust. Viimane käib eeskätt lehtpuumetsade kohta. Ainuüksi hall-lepikutes on üle 7 miljoni tihumeetri üleseisnud puitu. Sellele lisandub haavikute ja mustlepikute puit. Ülekasvanud puit on vaja lähiaastatel maha raiuda ja ära kasutada.

Tavakodanik, kes peab metsaks eeskätt kõrge boniteedi ehk kõrge väärtusega metsamaal kasvavat okaspuupuistut, seda ei hooa. Pigem väidab ta, et metsa raiutakse liiga palju. Kuna väärtuslikud okaspuupuistud asuvad hästi ligipääsetavates kohtades, võib selline kartus isegi õigustatud olla. Eespool nimetatud arengukavas puudub korralik puidubilans – kui palju puitu hetkel on, kui palju kasvab kümne aastaga juurde, kui palju ja mis otstarbeks ära kasutatakse ja kui palju jääb 2020. aastaks metsa tagavaraks. Puidubilansi puudumise tõttu ei tule välja ka metsamajandamise kitsaskohad.

Raieküpsusvanus oleneb puude kasvukiirusest. Teatavasti moodustub assimilatsiooniprotsessi käigus biomass peaaegu kogu ulatuses süsihappegaasi ja vee arvelt. Süsihappegaasist saadakse süsinik ning veest vesinik ja hapnik. Selle protsessi käigus neelatakse päikeseenergiat ja vabaneb hapnik. Taimede lagunemise ja mädanemise ehk nn aeglase põlemise käigus toimub vastupidine protsess ja seotud süsinik vallandub, ühineb õhuhapnikuga ning õhku paisatakse CO<sub>2</sub>. Kuna õhu CO<sub>2</sub>-sisaldus on suhteliselt lühikese ajaga märkimisväärselt tõusnud ja tõus on kõikidele pingutustele vaatamata olnud järjest kiirenev, siis kasvavad taimed, sealhulgas ka puud, kiiremini. Seetõttu sirgub mets märksa rutem kui aastakümneid tagasi.

Samuti on üldtuntud tõsiasi, et haigused, mis varem muret ei valmistanud, tekitavad nüüdisaja metsades olulisi probleeme. Kuna vananev organism on haigustele vastuvõtlikum ja suurema CO<sub>2</sub>-kontsentratsiooni tingimustes kasvavad ja vananevad taimed kiiremini, siis riskide vähendamiseks tuleb majandusmetsades raievanust alandada. Selle tulemusena saame rohkem ja parema kvaliteediga puitu. Möödas on ajad, kus suurt osa puidust kasutati ümarpalgina. Nüüd liigume saematerjalilt pigem töödeldud puidutoodete poole, mille puhul on puu algne diameeter järjest ebaolulisem, sest toodete valmistamiseks kasutatakse selliseid sideaineid, nagu liim ja vaik.

### **Probleemist lähemalt**

Kahjuks ei pöörata eespool esitatud asjaoludele piisavalt tähelepanu, mistõttu tekitatakse metsamajandusele suurt kahju. Lõpuks tuleks arvesse võtta ka seda, et puittaimede kasvupind on meil tuntavalt suurenenud ja see kasv jätkub. Seetõttu on puidu kui ressursi maht pigem ala- kui ülehinnatud, eriti pikemas perspektiivis. Olukorras, kus suurenevad nii metsa pind kui ka pinnaühiku tootlus, tähendab raiemahtude soovituslikule tasemele (12 miljonit tm aastas) jätmine seda, et tagavara kasvab jõudsalt. Metsa majandamise asemel tekib oht, et mõne EL-i direktiivi alusel peame edaspidi süsiniku salvestatuna hoidmise nimel hakkama hoopis neid tagavarasid säilitama. Samal ajal lagunevad ja mädanevad meie lühiealised lehtpuumetsad, eritades süsihappegaasi kasutult atmosfääri, sest näiteks valgelepiku eluiga on Lääne-Euroopa tamme- ja pöögimetsadega võrreldes mitu korda lühem.

Selline lahendus ei ole vastuvõetav ei ühiskonnale ega meie (energia)metsade majandajatele. Arvesse tuleb võtta ka seda, et seni on majanduslikel põhjustel enam raiutud just kvaliteetsemaid okaspuumetsi. Samal ajal seisavad küpsed lehtpuumetsad kasutamata. Järelikult saab peaaegu kogu raiemahu suurenemine tulla vähemväärtusliku metsa arvelt, see aga sobib peamiselt energeetikas kasutamiseks. Hoonete energiakasutuse paranemise tulemusena ja töhusamate soojuspumpade laiaulatuslikuma kasutuselevõttuga väheneb vajadus kasutada soojuse tootmiseks puitu. Järelikult tuleb rõhku panna puidu kasutamisele elektrienergia tootmiseks.

## Võimalik lahendus

Piisava nõudluse korral on võimalik küttepuit maha raiuda kohe, kui metsa tootlus langema hakkab, sest pole vaja oodata, mil tüvi sobiva läbimõõdu saavutab. Jagades puidutagavara metsa vanusega, saame näitaja, mis kasvab teatud hetkeni ehk metsa vanuseni. Lihtsam võimalus on kasutada aastase juurdekasvu ja vanuse graafikut ning teha selle põhjal vastavad arvutused. Hetkest, mil see näitaja hakkab kahanema, on otstarbekas raiuda. Metsa tootlus kasvab, kui kasutame lühikest raieringi. Järelikult saame ka taastuvat energiat rohkem toota.

Seni pole vähem väärtuslikku metsa raiutud põhjusel, et see pole majanduslikult tasuv, kuna materjalile pole piisavalt turgu. Energiapuidu väljavedu Kesk-Euroopasse tõstaks selle energiakandja omahinna enam kui kahekordseks. Elektrienergia ülekanne on oluliselt odavam. Lahenduseks oleks ehitada puiduressursside asukohta arvestades üle riigi hajutatuna 6...10 lokaalset elektri jaama. Sealhulgas tuleb kaaluda energiakandja transpordikuluseid ja jaama ehitamise ning ekspluateerimise kulusid võimsuse- ja toodanguühiku kohta. Tänu vähenevatele transpordikuludele suudaksime puidus sisalduva energia MWh omahinna hetkel kasutatava tehnoloogia abil alandada 15...12,5 euroni. Kahjuks on riik korraldanud asjad nii, et seoses metsas erikütuse kasutamise lõpetamisega ja metsaveoautode vähese koormamisega on puidu omahind kõrgem ja sellel on raskem võistelda näiteks põhjanaabrite omaga. Puiduhakke tootmise uus tehnoloogia üha areneb ja seetõttu saab ennustada ka omahinna alenemist. Saadavat taastuvat elektrienergiat on võimalik eksportida nendesse EL-i maadesse, kus ei suudeta täita taastuvenergia tootmise kohustust. Lokaalne elektritootmine võimaldab ka eriolukorras stabiilsemat elektrivarustust. Narva elektri jaamadel oleks puitkütuse kasutamisel toetav roll. Nagu pole mõtet elektrienergia tootmiseks põlevkivi Võrumaale vedada, pole samaks otstarbeks mõtet sealt ka puitu Narva transportida. Ühiskonnale mittevajalikke kulutusi ei pea kinni maksma lõpptarbija. Elektri tootmisega kaasnevad soojusenergiat on võimalik kasutada erinevateks tehnoloogilisteks vajadusteks, nagu puidugraanulite ja -briketi tootmine, kasvuhooned, kalakasvatused. Seoses hoonete energiakasutuse jätkuva

paranemisega ja tõhusamate soojuspumpade suuremahulisema kasutuselevõttuga väheneb otsene vajadus soojusenergia järele, kuid samal ajal suureneb elektrienergia kasutamine.

Keskonnaministeeriumi kodulehel toodud andmete alusel oleme hoitava ja kaitstava metsa pindala poolest ühe elaniku kohta Euroopas ilmselt esikohal. Olles samal ajal üks Euroopa vaesemaid riike, saame sellist lukust lubada vaid juhul, kui põhiseaduse jätkuva rikkumise tõttu ei hüvitata metsaomanikele piirangutest tulenevaid kahjusid piisavalt. Eeltoodust lähtuvalt peame arvestama, et metsaraie ei saa mingil juhul väheneda piirangualade arvelt, pigem vastupidi, sest ühiskonnal puudub võimalus metsaomanike saamata jäävat tulu hüvitada ning põhiseaduse selline rikkumine tekitab pingeid. Seoses metsaomanikele mittehüvitatavate metsloomakahjudega ning seadusest lähtuvate piirangutega metsaomanikule sobiva raievanuse valimiseks on tõenäolisem, et edaspidi okaspuumetsade rajamine pigem kahaneb ja vastavalt sellele kasvab vähem väärtusliku lehtpuumetsa osatähtsus.

### **Miks selline lahendus ja mida see annab?**

Eestis seni üle jäänud küttepuitu on võimalik kasutada täies ulatuses elektrienergia tootmiseks, vähendades selle võrra soojuse tootmist põlevkivist. Kui küttepuit on lühiajalise säilivusega „päikesekonserv”, siis põlevkivi on pikaajalise säilivusega „päikesekonserv”, millel puuduvad hoiustamiskulud. Loogikavastane on tarbida säilivat ja lasta mittesäilival rikneda põhjusel, et säilivat konservi on hõlpsam tarbida. Pole otstarbekas süsihappegaasi kasutult õhku paisata ning mõtlema peab ka järgmiste põlvkondade peale.

Metsa energeetilise ressursi alahindamine annab ebaõige signaali nii riigile kui ettevõtjatele, vähendades meie võimekust majandada metsa tänapäevasel ja jätkusuutlikult. Kuna energiapoliitika on riigi üldise majanduspoliitika oluline osa, siis tuleks metsaomanikele ja ettevõtjatele teada anda, milles seisneb riigi huvi. See on vähim, mida riik teha saab ja tegema peaks. Määramatus ei soodusta meie metsaresursside paremat

ärakasutamist, vaid seda, et järjest suuremad kogused puitu jäävad meie metsadesse lagunema, tõstes sellega atmosfääriõhu süsihappegaasisaldust. Venemaa piiri vahetusse lähedusse ehitatud põlevkivielektrijaamadesse investeerimine, mida seni tehtud on, ei võimalda ära kasutada meie puiduressurssi ega parandada elektrienergia tarnekindlust ja energiajulgeolekut. Metsa ressursi mittetäielik ärakasutamine takistab ka maaelu loomulikku arengut.

### **Kokkuvõte**

Eesti vähem kvaliteetse, eeskätt kütteks sobiva metsa ressurss kasvab kiiresti. Piisava nõudluse puudumise tõttu jäävad järjest suuremad kogused sellist puitu metsadesse lagunema ja mädanema. Samal ajal toodetakse põhiosa elektrienergiast põlevkivist, mida saaks ilma kulutusteta maapõues säilitada. Selle tulemusena läheb kasutult raisku järjest suurem osa puidust ja paisatakse asjatult õhku süsihappegaasi.

Põlevkivil töötavates elektrijaamades on vaja kasutada ka puitu. Lisaks sellele tuleks puitkütuste transpordikulude vähendamiseks tooraineallikate suhtelisse lähedusse rajada üle riigi 6...10 lokaalset elektrijaama. Saadavat taastuvenergiat oleks odavam eksportida kui küttepuitu. Riik peaks CO<sub>2</sub> heitmete vähendamise, elektrienergia tarnekindluse suurendamise ja energiajulgeoleku parandamise suhtes kindla seisukoha võtma ja nendega reaalses elus rohkem arvestama. Venemaa piiri lähedusesse põlevkivil töötavate elektrijaamade jätkuv ehitamine ei lähe püstitatud eesmärkidega absoluutselt kokku. Metsa ressursi mittetäielik ärakasutamine takistab maaelu loomulikku arengut.

### **Kasutatud kirjandus**

Eesti metsanduse arengukava. 2010. Tallinn, lk 6-8, 11, 20-25.

Metsa hindamise meetodiline juhend. - Keskkonnaministri käskkirj nr 821, 09.06.2010.

Mets 2010. Aastaraamat. lk 80 ja tabel 3.5.4.

<http://www.annaabi.ee/assimilatsiooniprotsess-o.html>

<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

<http://www.arboristidekoda.ee/puude-haigused/>  
<http://dspace.emu.ee/handle/10492/140>  
<http://www.lote.ut.ee/786217?print=1>  
<http://www.tempt.ee/topic.php?topic=1373>  
<http://www.rohelinemaja.eu/et/energiasaastlikud-majad/nullenergiamaja.html>  
<http://www.eramets.ee/foorum/viewtopic.php?id=5575>  
<http://www.eramets.ee/foorum/viewtopic.php?id=4546>  
<http://www.eramets.ee/foorum/viewtopic.php?id=5503>  
<http://www.eramets.ee/foorum/viewtopic.php?id=4656>

## **SHOULD WOOD BE LEFT TO BE DECOMPOSED IN THE FORESTS OR SHOULD IT BE USED TO PRODUCE ENERGY?**

Johannes Valk

Low-quality forest resources, first and foremost suitable for heating, are increasing quickly in Estonia. Due to insufficient demand, ever greater quantities of such timber are simply left in the forest to decay/rot. At the same time, the lion's share of electricity is produced from oil shale, which could be stored in the earth without any expenses. As a result, carbon dioxide is unnecessarily emitted into the atmosphere. It is essential to start using timber in power plants that currently burn oil shale. In addition, 6 to 10 local power plants need to be established all over the country in order to decrease the transportation costs of fuel wood. The renewable energy thus obtained would be cheaper to transport than fuel wood. The state should take a firm stand on decreasing CO<sub>2</sub> emission, increasing the security of electricity supply, and improving energy security.



