

**TEUK VIII & IX**

**TAASTUVATE ENERGIAALLIKATE  
UURIMINE JA KASUTAMINE**

KAHEKSANDA JA ÜHEKSANDA  
KONVERENTSI KOGUMIK



**INVESTIGATION AND USAGE OF  
RENEWABLE ENERGY SOURCES**

EIGHTH AND NINTH  
CONFERENCE PROCEEDINGS

TARTU, ESTONIA, 2007

Peatoimetaja / Editor-in-Chief: Argo Normak

Toimetajad/ Compiled by: Elis Vollmer

Marek Muiste

Keeleline toimetaja: Margit Lehis

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

Eesti Vabariigi Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumile

Estonian Ministry of Economic Affairs and Communications

Eesti Vabariigi Põllumajandusministeeriumile

Estonian Ministry of Agriculture

Eesti Energia AS

Maaelu Edendamise Sihtasutus

Rural Development Foundation

SA Archimedes

Archimedes Foundation

Trükitud: OÜ Paar

Printed by: Paar Ltd

Kirjastaja: Eesti Maaülikool

Publisher: Estonian University of Life Sciences

© 2007

Eesti Maaülikool

Estonian University of Life Sciences

All Rights Reserved

ISBN: 978-9949-426-42-3

## Sisukord – Contents

<b>Eessõna</b> .....	4
<b>Foreword</b> .....	5
<b>TEUK 8</b> .....	6
<b>KARBIIDNE SÜSINIK - TULEVIKU ENERGIAKANDJA</b>	
Mati Arulepp .....	7
<b>SUPERKONDENSAATORID KARBIIDSET PÄRITOLU SÜSINIKELEKTROODIDEGA</b>	
Mati Arulepp jt .....	15
<b>ENERGEETILISE PILLIROO SAAGIKUSE MÄÄRAMISE TULEMUSI SAARE MAAKONNAS</b>	
Livia Kask, Ülo Kask .....	25
<b>ELEKTRILIHIDE TRASSIDELT SAADAVA VÕSA ENERGEETILINE POTENTSIAAL</b>	
Risto Mitt jt. ....	38
<b>BIOGAASI TOOTMISTEHNOLGOGIAD</b>	
Jüri Olt jt. ....	45
<b>EESTI ENERGIATULEVIK VAJAB OTSUSEID</b>	
Olavi Tammemäe .....	56
<b>VERTIKAALSE, KAHEASENDILISELT TOIMIVA HELIOFARMI OMADUSED</b>	
Teolan Tomson .....	65
<b>KÜTUSEPROTSESSOR – KÜTUSTE GAASISTAMINE.</b>	
Hillar Toomiste .....	76
<b>TEUK 9</b> .....	83
<b>KINETICS AND EFFICIENCY OF BIOGAS PRODUCTION FROM ESTONIAN WASTES AND CROPS: A NEW RESEARCH PROGRAM IN EESTI MAAÜLIKOO</b>	
Henri-Charles Dubourguier .....	84
<b>RENEWABLE ENERGY IN SAXONY-ANHALT AND ITS HIGH POTENTIAL FOR ECONOMIC GROWTH AND NATURE PROTECTION IN THE NEW STRUCTURAL FUND PERIOD 2007 - 2013</b>	
Michael Dörffel .....	91
<b>TUULIKUPARKIDE KUI OLULISE RUUMILISE MÕJUGA OBJEKTIDE ASUKOHAVALIKU PROTSESS LÄBI ÜLDPLANEERINGU MENETLUSE</b>	
Peep Leppik .....	96
<b>EESTI PÄIKESEENERGIA NÄIV JA TEGELIK RESSURSS NING SELLE EFEKTIIVSE KASUTAMISE VÕTTED</b>	
Teolan Tomson .....	102
<b>ÜLEVAADE ENERGIA SALVESTUSE TEHNOLOOGIADEST</b>	
Hillar Toomiste .....	110
<b>TOWARDS AN EFFICIENT ENERGY CONVERSION FROM BIOMASS OF SEMI-NATURAL GRASSLANDS</b>	
Michael Wachendorf <i>et. al.</i> .....	116
<b>BIOENERGY TECHNICAL TRAINING - CONTINUING EDUCATION FOR SKILLED WORKERS AND PROFESSIONALS</b>	
Caroline Werner <i>et. al.</i> .....	124

## **Eessõna**

Käesolev taastuvate energiaallikate uurimise ja kasutamise konverentsi TEUK kogumik on erandlik, kuna selles on trükitud kahe konverentsi ettekanded. Selline olukord tekkis seetõttu, et traditsiooniliselt on konverentsi kogumik välja antud järgmise konverentsi toimumise ajaks, kuid arvestades kiireid muutusi taastuenergia valdkonnas, otsustasime seda muuta ja edaspidi trükkida ettekannete kogumik enne konverentsi, et see oleks juba konverentsi ajal kasutatav. See võimaldab huvilistel tutvuda teemadega enne ettekandeid, osaleda aktiivselt diskussioonis ja esitatud infot koheselt täismahus kasutada.

TEUK-VIII toimus 12. oktoobril 2006. a Eesti Maaülikooli aulas Tartus. Selle konverentsi toimumise ajal tänati väsimatut taastuenergia valdkonna entusiasti ja TEUK konverentside traditsioonide loojat Valdur Tiitu pikaajalise töö eest. Konverentsi korraldamise võttis üle Eesti Maaülikooli taastuenergia keskus.

TEUK-IX toimub 15. novembril 2007. a Eesti Maaülikoolis. Seekordne konverents on üsna bioenergiakeskne, kuid on ettekandeid ka tuule- ja helioenergeetikast, energia salvestamisest ning Eesti poliitikast. Et tuua Eestisse uusi kogemusi, osalevad konverentsil kutsutud külalised Saksamaa ülikoolidest ja organisatsioonidest. Välislektorite ettekanded toimuvad inglise keeles, millest soovijad saavad kuulata sünkroontõlget. Eestikeelsed esitlused tõlgitakse inglise keelde.

2007. aasta on toonud Eestis taastuenergia valdkonda palju uut. Aasta alguses võeti vastu Biomassi ja bioenergia arengukava (kättesaadav: [www.agri.ee](http://www.agri.ee)), mille raames on algatatud uuringud Eesti maaressursi kaardistamiseks, energiakultuuride viljelemiseks ja taastuenergeetika tehnoloogiate juurutamiseks. Esimete uurimistööde tulemusi on oodata 2007. aasta lõpuks, nende põhjal koostatakse 2008. aasta tööprogramm. Samuti valmis Majandus- ja kommunikatsiooniministeeriumi tellimusel Eesti energiastechnoloogiate arengustrateegia („Estonian Development Strategy of Energy Related Technologies”, kättesaadav: [www.mkm.ee](http://www.mkm.ee)), mille järgi taastuenergiaressursid on Eestis üks kolmest võtmevaldkonnast (1. Põlevkivienergeetika, 2. Taastuenergia ressursid, 3. Arendatavad uued ressursid), mille tehnoloogia arendamiseks koostatakse eraldi arendusprogramm. Oluline on 1. mail 2007. a rakendunud Elektriturseadus (RT I 2007, 23, 120), mis määrab taastuvast energiaallikast toodetud elektrienergia hinnad ja toetused tootjatele.

Kuiigi taastuenergiaalane tegevus muutub Eestis järjest aktiivsemaks, on meil konkurentsivõimelise majandusharu ülesehitamiseks ja Euroopa direktiivides võetud eesmärkide täitmiseks veel suur töö teha, mis eeldab poliitikute, teadlaste, inseneride ja ettevõtjate head koostööd ning ühiseid pingutusi.

Argo Normak

Eesti Maaülikooli taastuenergia keskuse juhataja

## Foreword

This proceedings of the conference „Investigation and usage of renewable energy sources” is exceptional because it holds the proceedings of two conferences. Traditionally the proceedings were published for the next conference, but to take into account the frequent changes in the field of renewable energy we decided to change this tradition and publish the proceedings before the conference so it could be used during the conference. This way interested people can become acquainted with the subject before the presentations and participate actively in the discussion.

The eighth conference (TEUK VIII) took place on 12<sup>th</sup> of October 2006 in the assembly hall of Estonian University of Life Sciences. In the conference we thanked warmly the long-time enthusiast in the renewable energy field and the creator of the TEUK traditions – Mr. Valdur Tiit – for the long and good work. The conference organization was handed over to the Centre of Renewable Energy, Estonian University of Life Sciences.

The ninth conference will take place on 15<sup>th</sup> of October 2007 in the Estonian University of Life Sciences. This time the conference focuses mainly on bio energy, but there are also presentations about wind- and solar energy, energy storage and Estonian politics in the related field. To bring new experiences to Estonia we have invited several guests from different German universities and organizations. The presentations of the foreign lecturers will be in English, with simultaneous translation into Estonian. The Estonian presentations will also be translated into English.

The year 2007 has brought a lot of new into the renewable energy field. In the beginning of the year a National Biomass and Bioenergy Development plan for 2007- 2013 (see [www.agri.ee](http://www.agri.ee)) was passed, which led to research on energy crop cultivation, mapping the Estonian land resources and introduction of renewable energy resources. The first results can be expected by the end of 2007, which will give the basis for work plan of the year 2008. Estonian Development Strategy of Energy Related Technologies (see [www.mkm.ee](http://www.mkm.ee)) was also compiled by the Ministry of Economic Affairs and Communications. It states that renewable energies are one of the three key development areas (1. total oil-shale process, 2. renewable sources of energy, and 3. new emerging resources of energy) for what a technology program will be created. Electricity Market Act that came into force on 1<sup>st</sup> of May 2007 is also important, because it states the renewable electricity price and subsidies for the producers.

Although the actions in the field of renewable energy are getting more active, we still have a lot of work to do to build up competitive cluster and fill the goals set by the European directives. And that needs effective cooperation and collective effort between politicians, scientists, engineers and entrepreneurs.

Argo Normak  
Head of the Centre of Renewable Energy

**TEUK 8**

**TAASTUVATE ENERGIAALLIKATE  
UURIMINE JA KASUTAMINE**

Kaheksanda konverentsi kogumik

**INVESTIGATION AND USAGE OF  
RENEWABLE ENERGY SOURCES**

Eighth Conference Proceedings

Tartu, Estonia, 2. October 2006

# KARBIIDNE SÜSINIK – TULEVIKU ENERGIAKANDJA

Mati Arulepp

Tartu Tehnoloogiad OÜ, Riia 185, Tartu, Eesti

<http://www.skeletonnanolab.com>

[mati.arulepp@carbon.ee](mailto:mati.arulepp@carbon.ee)

## **Annotatsioon**

Karbiidse süsiniku eripäraks ning eeliseks mitmete teiste analoogsete materjalide ees on võimalus sünteesitingimuste lihtsate, kuid hästi kontrollitavate muutuste kaudu mõjutada lõpp-produktiks oleva süsiniku struktuurseid omadusi soovitavas suunas. Näiteks on sünteesitemperatuuri ning lähtematerjali koostise põhjal väga täpselt võimalik ette ennustada valmistatava süsiniku poorsust ning pooride suurst. Teatud tingimustel valmistatav eriti suure nanopooride sisaldusega karbiidne süsinik on võimeline siduma märkimisväärse koguse vesinikku. Titaankarbiidist pärinevatel süsinikmaterjalidel on mõõdetud vesiniku mahtuvuseks kuni 4,5 massiprotsenti 6 bari rõhu ja 77K juures. See on kuni 3 korda suurem vesiniku hulk, kui mahub samadel tingimustel süsiniku nanotorudesse või aktiveeritud poorsetesse süsinikmaterjalidesse. Valmistamise lihtsus ning lähteainete odavus annab karbiidset päritolu süsinikule märkimisväärseid eeliseid mitmete teiste poorsete ja nanostruktuursete materjalide ees.

*Märksõnad: süsinik, nanostruktuurne karbiidne süsinik, poorsus, eripind, vesiniku mahtuvus.*

## **Sissejuhatus**

Süsinik on maailmas levinumatest ainetest üks hämmastavamaid elemente, omades erinevates modifikatsioonides väga erinevaid omadusi. Üldtuntud on mitmed süsiniku allotroopsed teisendid: teemant, grafiit ja tahm. Eelmise sajandi lõpus see nimekiri täienes fullereenide ja nanotorudega. Kuid, 1960. aastatel oli lisatud süsinikmaterjalide nimistusse veel üks – mineraalset päritolu süsinik ehk karbiidne süsinik, mis oma ajast ees olles jäi seejärel kümneteks aastateks unustusehõlma.

Süsinik võib erinevates allotroopsetes vormides olla mehhaaniliselt ülitugev nagu seda on teemant või samas olla väga pehme – grafiit. Samuti võivad elektrilised

omadused, olenevalt süsiniku struktuurist, varieeruda väga laiades piirides. Teemandis on süsinik täielik isolaator, grafiidis on ta kesine elektrijuht, kuid teatud sümmeetriaga nanotorudes võib süsinik omada lausa vaselaadset juhtivust. Hämmastava omadusena on teatud nanotorudel avastatud ka pooljuhi omadusi. Süsiniku soojusjuhtivus varieerub samuti ühest äärmusest teise. Näiteks on teemandil parimad soojusjuhi omadused, vastupidiselt grafiitsele süsinikule, mida selle halva soojusjuhtivuse tõttu kasutatakse raketinade kuumuskindla kilbi koostises. Optilistelt omadustelt on teemandjas süsinik läbipaistev ning grafiitne süsinik “optiliselt pime” materjal. Kuna süsiniku aatom võib unikaalsele elektroonse struktuuri tõttu olla naaber-aatomitega seotud nii üksiksidemetega kui kordsete sidemetega, siis moodustab elementaarne süsinik ülikeerukaid struktuure.

Karbiidset päritolu süsinik (nn *Carbide-Derived Carbon*) on viimastel aastatel üha enam teadlaste pilke püüdnud materjal. Paljudes teadusajakirjades, k.a „Nature” ja „Science”, on avalikustatud üha uusi karbiidse süsiniku unikaalseid omadusi. Kõige rohkem on tehtud uuringuid adsorptsiooniliste ning elektrokeemiliste omaduste kohta, kusjuures käsitlust on leidnud nii superkondensaatorid kui ka energeetiliste gaaside – vesiniku ja metaani – salvestamine.

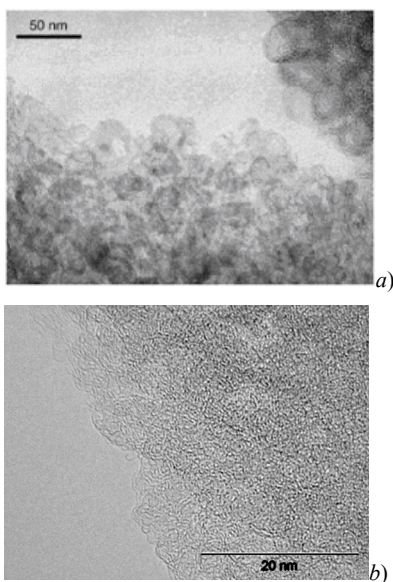
Alljärgnev peatükk on karbiidse süsiniku kui kaasaegse uudsete omadustega nanostruktuurse materjali lühitutvustus, mis hõlmab karbiidset päritolu süsiniku sünteesi ning põhilisi struktuurseid omadusi.

### **Karbiidne süsinik**

Karbiidne süsinik saadakse metalli või mittemetalli aatomite ekstraheerimisel karbiidi kristallvõrest. Harilikult teostatakse ekstraktsioon kõrgel temperatuuril halogeeni (nt kloor-gaas) atmosfääris. Protsess on suhteliselt keskkonnasõbralik, kuna liigne kloor ja kõrvalproduktideks olevad kloriidid seotakse leelise gaasi keedusoolaks (NaCl) ja neutraalseteks oksiidideks. Peale karbiidi moodustava elemendi aatomite ekstraheerimist järele jäävad süsiniku aatomid rekombineeruvad ning paiknevad ümber sõltuvalt reaktsioonikeskkonda antud kineetilise energia hulgast, kuid tekkiv süsinikmaterjal säilitab siiski lähtematerjali makroskoopilised dimensioonid. Süsiniku aatomite ümberpaiknemine ning keemiline seondumine naaberaatomitega ehk teisisõnu keemilisel reaktsioonil tekkiva süsinikmaterjali



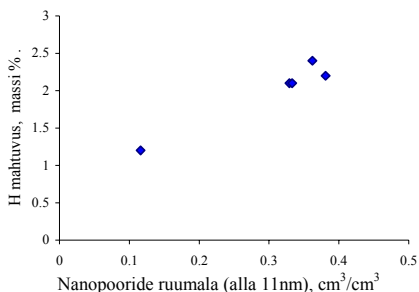
nanostruktuur sõltub olulisel määral süsiniku aatomite esialgsest asukohast karbiidi kristallvõres. Karbiidse süsiniku aallotroopia varieerub kõrge poorsusega korrapäratust struktuurist kuni kõrge kristalsusastmega grafiitsete või teemantilaadsete materjalideni. Teatud reaktsioonitingimuste juures on temperatuuri ja katalüütiliste lisandite koostoimel karbiididest võimalik saada mitmesuguseid nanostruktuure, sh nanosibulaid, nanotünne, nanotorukesi jne (vt joonis 1). Karbiidse süsiniku eripind võib varieeruda vahemikus 50 kuni 2000 m<sup>2</sup>/g. Viimane on võrreldav jalgpallistaadionisuuruse pindalaga, mida saab mahutada ühe grammi nanopoorse süsiniku pinnale.



Joonis 1. Karbiidne süsinik elektronmikroskoobis nanotünnidena (a) ja homogeense nanopoorse materjalina (b).

Väga suur eripind osutub võimalikuks tänu grafeeni-kihtide vahel moodustunud üliväikestele nanomeetri mõõtudes tühimikele ehk nn pooridele. Nanopoorideks nimetatakse kokkuleppeliselt poore, mille diameeter on suurusjärgus 1 nanomeeter. Karbiidse süsiniku nanopooride suuruse peenseadistmine toimub läbi protsessi parameetrite. Üldiselt on karbiidse süsiniku pooride mõõtmeid võimalik varieerida 6Å ülespoole kuni mitmekümne ongströmini.

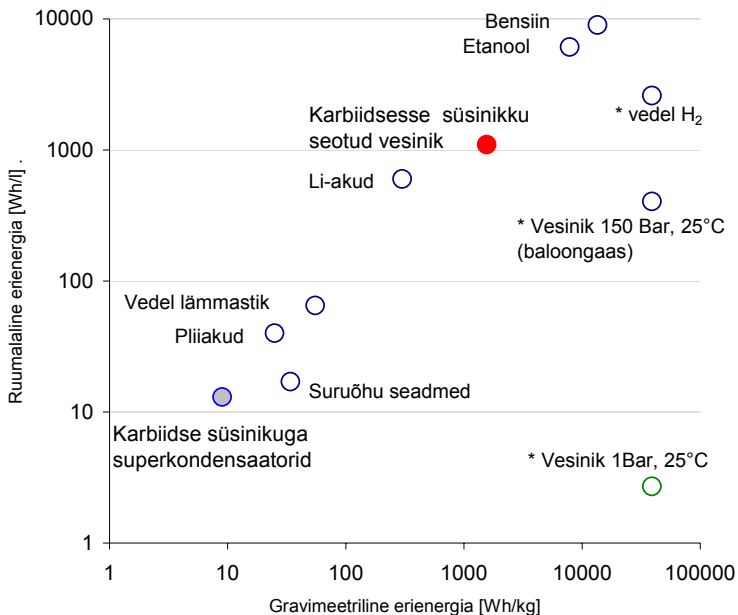
Alternatiivenergeetika programmides on vesiniku salvestamine maailmatasemel prioriteet ja siinkohal pakub teatud omadustega nanostruktuurne süsinik konkurents isegi ballooniaasile. Eeskätt karbiidse süsiniku baasil on tuvastatud, et vesiniku salvestamiseks on oluline süsiniku suur nanopooride hulk, vt joonis 2. Karbiidsele süsinikule garanteerivad suure nanopooruse sellised lähtekarbiidid nagu SiC ja TiC, millel on kõrge süsiniku tihedus ning teisalt ka seetõttu, et nii rüni kui titaani aatomimõõtmel on suhteliselt väikesed võrreldes mistahes ülejäänud stöhhiomeetriliste karbiididega.



Joonis 2. Mõnede karbiidsete süsinikmaterjalide vesiniku mahtuvus normaalrõhul.

Optimeeritud omadustega karbiidset päriolu süsi hoiab endas kuni 4,5 massiprotsenti vesinikku 6 atm rõhu all, 77K temperatuuril. Ümberarvutatult võrdub selline kogus vesinikku ligikaudu 450 atm ballooni kokkusurutud vesiniku mahuga. Kindlasti on tarbija seisukohalt ligi 75 korda väiksem rõhk eelistatud, sest see avab võimaluse süsinikuga täidetud paakide praktiliselt ohutuks kasutamise näiteks transpordivahendites. Vesiniku kättesaamine sellisest süsteemist on lihtne – tuleb vaid mahutit soojendada. Esmapilgul tundub kahtlasena hüpotees, et süsinikku täis paak mahutab rohkem vesinikku kui tühi anum. Saladus peitub selles, et struktuurses materjalis sisalduvad nanopoorid ahmivad aktiivselt endasse gaasi koguses, mis võib kutsuda esile isegi gaasi veeldumise. Võrdluseks võib tuua näite, et 100-liitrise veeboileri sarnaste omadustega süsinikku täis paak võimaldaks säilitada üle 3kg vesinikku, millest saaks toota umbes 120kWh soojusenergiat. Kasutades vesiniku põletamisel ~60% kasuteguriga kütuselementi, saaksime toota aga ~70kWh elektrienergiat ja 30–40kWh soojust.

Süsiniku kasutamist elektrienergia salvestites tuntakse samuti väga ammu. Tänu grafiitse süsiniku märkimisväärsetele elektrit juhtivatele omadustele ja keemilisele inertsusele kasutatakse seda keemilistes vooluallikates voolujuhina, näiteks patareides positiivsele elektroodi voolukollektorina. Grafiitse süsiniku kõrget liitiumimahtuvust kasutatakse samuti keemilistes vooluallikates. Neutraalsed Li osakesed, mis on interkaleerunud grafiidi süsiniku kihtide vahele, ei oma puhtale metallile iseloomulikke omadusi, mis seetõttu annab võimaluse konstrueerida laetavaid vooluallikaid ehk liitiumakusid. Selliseid vooluallikaid iseloomustab tänu grafiidi ja liitiumi suhteliselt madalatele tihedustele väga kõrge energiatihedus – kuni 250Wh/l. Selleski valdkonnas on karbiidsel süsinikul suur potentsiaal, kuna süsiniku valmistamise meetodika võimaldab üheaegselt reguleerida nii süsiniku poorsust kui ka grafiitsust, leidmaks optimaalseid struktuure Li-patareide elektrodidele.



Joonis 3. Energiaallikate energiad, \* märgitud suurused ei sisalda konteineri kaalu.

Lisaks klassikalistele patareidele (mittelaetavatele vooluallikatele) ja akudele, kasutatakse süsinikku elektroodi materjalina väga pikaealistes energiaallikates nn. superkondensaatorites. Kuna superkondensaatorite tööpõhimõtte baseerub adsorptsioonilistel elektrilise kaksikkihi mehhanismidel, siis peab vastav süsinik olema üldjuhul väga hea adsorbent, st omama suurt eripinda ja palju aktiivtsentreid elektrolüüdi ionide adsorbeerimiseks. Karbiidse nanopoorse süsiniku sobivusest superkondensaatorite tarbeks annab tunnistust fakt, et ülemaailmselt tunnustatud ekspert Prof Andrew Burke California Ülikoolist on avalikult deklareerinud, et OÜ Tartu Tehnoloogiad laborites karbiidsest süsinikust valmistatud superkondensaator on parim seda tüüpi energiasalvesti.

### **Kokkuvõte**

Karbiidne süsinik kui kaasaegne uudsete omadustega nanostruktuurne materjal kogub maailmas üha laiemat tuntust. Karbiidse süsiniku eripäraks ning eeliseks mitmete teiste analoogsete materjalide ees on võimalus sünteesitingimuste lihtsate, kuid hästi kontrollitavate muutuste kaudu mõjutada lõpp-produktiks oleva süsiniku poorsust ning struktuurseid omadusi soovitavas suunas.

Teatud tingimustel valmistatav eriti suure nanopooride sisaldusega karbiidne süsinik on võimeline siduma märkimisväärse koguse vesinikku. Titaankarbiidist pärinevatel süsinikmaterjalidel on mõõdetud vesiniku mahtuvuseks kuni 4,5 massiprotsenti 6 baari rõhu ja 77K juures, mida on kuni kolm korda rohkem kui mahutavad süsiniku nanotorud või aktiveeritud poorsed süsinikmaterjalid.

Kuna valmistamise lihtsus ning lähteainete odavus annab karbiidset päritolu süsinikule märkimisväärseid eeliseid mitmete teiste poorsete ja nanostruktuurseste materjalide ees, siis on karbiidse süsiniku jõudmine turule juba lähiaastatel vägagi tõenäoline.

### **Kirjandus**

Nanomaterials Handbook, Ed. Gogotsi, Y., *CRC Press*, **2006**, 239–282.

Amorphous and Nanostructured Carbon, Eds. Sullivan, J.P. *et al.*, Proc. Materials Research Soc. Symp., Boston, USA. **1999**, 539, 187–198

- Leis, J., Perkson, A., Arulepp, M., Käärik, M., Svensson, G. Carbon nanostructures produced by chlorinating aluminium carbide. *Carbon* **2001**, *39*, 2043–2048.
- Leis, J., Perkson, A., Arulepp, M., Nigu, P., Svensson, G. Catalytic effects of metals of the iron sub-group on chlorinating of titanium carbide to form nanostructural carbon. *Carbon* **2002**, *40*, 1559–1564.
- Perkson, A., Leis, J., Arulepp, M., Käärik, M., Urbonaite, S., Svensson, G. The barrel-like carbon nanoparticles from carbides by catalyst assisted chlorination. *Carbon* **2003**, *41*, 1729–1735.
- Leis, J., Arulepp, M., Lätt, M., Kuura, H., Kuura A. A method for manufacturing the nanoporous SkeletonC material. USA patent application 11/407202, **2006**.
- Eckström, T., Jacob, M., Zheng, J., Alberius-Henning, P., Palmqvist, U., Leis, J., Perkson, A. Method for producing a nanotubular carbon material, and the material produced thereby. PCT patent application PCT/EP00/08424, **2000**.
- Lätt, M., Leis, J., Arulepp, M., Kuura, H., Lust, E. Latest developments in Carbide Derived Carbon for Energy Storage Applications. Proc. 16th International Seminar on Double Layer Capacitors & Hybrid Energy Storage Devices, Deerfield Beach, USA, **2006**, 62–72.
- <http://www.hydrogen.energy.gov/>

## **CARBIDE-DERIVED CARBON – FUTURE ENERGY CARRIER**

*Mati Arulepp*

Tartu Technologies LLC

Carbide-derived carbon (CDC) as novel nanostructured material, possessing several unique properties, is gaining more and more reputation. Particular feature and advantage of CDC compared to other analogous materials is the possibility to vary and fine-tune its structure and porosity of carbon by simple but well controlled variations in synthesis conditions.

Highly nanoporous CDC made at certain reaction conditions may store a remarkable amount of hydrogen. For example, the carbon made from titanium carbide stores 4.5 %wt. hydrogen at 6 bar and 77K as measured by Sievert

apparatus. This is almost 3 times more than is hydrogen capacity of carbon nanotubes and activated carbons.

Because of the simplicity of CDC production and cheapness of raw materials, it is very probable that in few years the CDC materials will be commercialised.

# SUPERKONDENSAATORID KARBIIDSET PÄRITOLU SÜSINIKELEKTROODIDEGA

<sup>1</sup>Mati Arulepp, <sup>1,2</sup>Jaan Leis, <sup>1,2</sup>Marko Lätt, <sup>1,2</sup>Helle Kuura, <sup>1</sup>Andres Kuura,  
<sup>1</sup>Feliks Miller, <sup>1,3</sup>Kusta Rumma, <sup>1</sup>Vello Madiberk

<sup>1</sup>Tartu Tehnoloogiad OÜ, Riia 185, Tartu

<sup>2</sup>Tartu Ülikool, Jakobi 2, Tartu

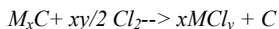
<sup>3</sup>Eesti Mereakadeemia, Tallinn

Käesolevas töös on toodud ülevaade Tartu Tehnoloogiad laborites valmistatud ning uuritud karbiidset päritolu süsinikmaterjalide kasutamisest uut tüüpi vooluallikates – superkondensaatorites. Mitmete võimalike rakenduste hulgast on eraldi välja töötatud karbiidsest süsinikust valmistatud superkondensaatorite kasutamine diiselmootori käivitamisel. Töös kasutati kahe erineva elektrolüüdiga täidetud 180F 15V superkondensaatorpatareisid. Võrdluskatsed on sooritatud hariliku pliiakuga. Tulemustest selgus, et mõlema elektrolüüdiga kondensaatorpatareid suudavad mootori käivitada  $-10^{\circ}\text{C}$  pakases. Sealjuures parima võimsuse saavutas madalaima sisetakistusega süsteem.

*Märksõnad: nanostruktuurne karbiidne süsinik, superkondensaator, erivõimsus, erienergia.*

## Nanostruktuurne karbiidset päriolu süsinik

Karbiidset päritolu süsinikku (nn CDC) saadakse metalli ekstraheerimisel karbiidi kristallvõrest, mis enamasti viiakse läbi halogeeni atmosfääris. Vastavat protsessi kirjeldab keemiline võrrand:



kus M on metalli aatom ning x ja y on vastavad stöhhiomeetriat iseloomustavad kordajad.

Eelnimetatud meetodil sünteesitud nanopoorne süsinik jäljendab lähtekarbiidi morfoloogilist ning on oluliselt mõjutatud keemilisest ja mikrostruktuursest koostisest. Seega ka süsiniku eripind väljendatuna  $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$  sõltub otseselt lähtekarbiidist ja süsiniku sünteesi tingimustest (T, P, c, v). Teades vastavaid sõltuvusi, saab ette ennustada sünteesitava süsiniku struktuuri ning valmistada soovivate omadustega materjali. Karbiidse süsiniku põhiline eelis aktiveeritud

nanopoorsete süsinikmaterjalide ees on sünteesi lihtsus ja väga täpselt ennustatav tulemus. Ülevaade Tartus sünteesitud ja uuritud karbiidsetest süsinikmaterjalidest on toodud tabelis 1.

Tabel 1. *Mõningate Tartus evalveeritud suure poorsusega süsinikmaterjalide elektrilised erimahtuvused.*

Süsiniku lähtematerjal	BET Eripind	Erimahtuvus*	
	m <sup>2</sup> /g	F/g	F/cm <sup>3</sup>
SiC	1220	102	80
TiC	1380	116	63
TiC/TiO <sub>2</sub>	1590	126	87
Mo <sub>2</sub> C	1800	113	68
B <sub>4</sub> C	1750	105	72
Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>	1470	72	50
NbC	1950	107	71
ZrC	1390	111	69
Köögilijaja jäätmel	2020	95	45
Pähklikoored	1900	112	73
Suhkur	1820	99	59

\* testitud atsetonitriili (AN) elektrolüüdis.

### Superkondensaatorid ja karbiidne süsinik

Superkondensaator, tuntud ka kui ülikondensaator, on elektrienergia salvestamise süsteem, kus energia talletatakse suurepinnalisele süsinikmaterjalile adsorptsiooni teel. Tänu keemiliste protsesside puudumisele on adsorptsiooni teel kondensaatoritesse võimalik energiat salvestada ja tarvitada sadu tuhandeid kordi. Põhiliselt eristab neid akudest kõrgem kasutegur, suurusjärgu võrra suurem erivõimsus ja samavõrd madalam energiatihedus, vaata tabel 2.

Tabel 2. *Laetavate vooluallikate võrdlus.*

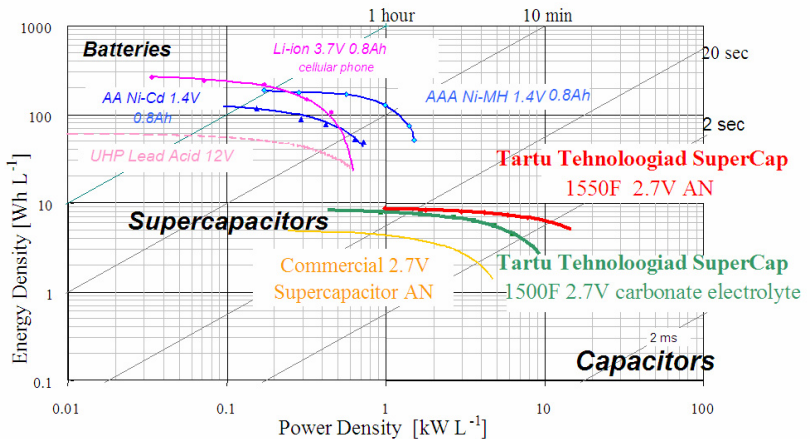
	Akupatareid	Super-kondensaatorid	Elektrolüüt kondensaatorid
Energia tihedus	40–400	4–13	Alla 0,01



[Wh/L]			
Max erivõimsus	0,1–1	5–25	Üle 1000
[kW/L]			
Tühjaks laadimise aeg	0,5–10 tundi	>1 sekund	0,1–2 ms
Kasutusiga tsüklites	500–2000	1 000 000	> 10 000 000
Kasutegur [%]	25–70	~99	>99
<i>IQ tühjenemine*</i>	ainult 1. tsükkel	pidevalt	pidevalt

\*1Q=1As

Selliseid põhimõtteliselt uut tüüpi vooluallikaid on esmamainitud juba 1960. aastatel, kuid tänu uuadetele materjalidele ja mitmesuguste elektroonikaseadmete levikule on nende kasusvaldkonnad laienenud. Nagu eelpool mainitud, koosnevad superkondensaatori elektroodid suurepinnalisest süsinikust. Karbiidsete süsinikelektroodidega superkondensaatoreid iseloomustavad väga kõrge erimahtuvus (kuni  $10 \text{ F/cm}^3$ ) ja erivõimsus ( $>10 \text{ kW/l}$ ) ning akudega võrreldes pikem tööiga. Sõltuvalt rakendusest võib akude ja superkondensaatorite tööiga erineda kuni 1000 korda. Omaduste poolest võib superkondensaatoreid tinglikult nimetada akude ja tavakondensaatorite vahelüliks.



Joonis 1. Ragone diagramm akude ning tööstuslike ja Tartus valmistatud superkondensaatorite võrdlevaks iseloomustamiseks.

Sobiva lähtekarbiidi valik ja optimaalsed sünteesi tingimused tagavad võimaluse prognoosida valmistatavate superkondensaatorite võimsus- ja energiamahutavuse näitajaid.

Superkondensaatorid asetsevad oma energia- ja võimsusnäitajate poolest tasemel, mis võimaldab suurte võimsusnäitajate juures opereerida ka märkimisväärsete energiahulkadega. Superkondensaatorite kaasabil avaneb võimalus säästa akudel ja patareidel baseeruvate energiaallikate eluiga, mis erinevalt superkondensaatoritest on väga tugevalt sõltuv täis- ja tühjakslaadimise tsüklite arvust. Kooskasutusskeemide korral võtaks superkondensaator aga suured vooluimpulsid enda kanda ning leevendaks sellega olulisel määral aku töörežiimi.

Lisaks avardavad superkondensaatorid akude kasutamise võimalusi madalamatel temperatuuridel. Akude mahtuvus väheneb ja sisetakistus kasvab proportsionaalselt temperatuuri alanemisega. Näiteks pliiaku korral mahtuvus väheneb umbes 1% iga alandatud kraadi kohta. Seega muutub akude olukord eriti kriitiliseks talvistel temperatuuridel ning tihti peale ei suuda akud väljastada rakenduseks vajalikku energiat. On välja töötatud elektrokeemiline lahendus superkondensaatori näol, kus sõltuvalt kasutatavast elektrolüüdist võivad superkondensaatorid toimida toatemperatuurile sarnase efektiivsusega kuni temperatuurideni  $-20 \dots -30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Tulenevalt adsorptsioonilisest energia salvestamise iseloomust on superkondensaatorite heade omaduste hulgas veel lisaks heale tsüklilisele elueale ka suur salvestatud energia kättesaamise kasutegur (kuni 99%). Samuti väärib äramärkimist fakt, et salvestatuse olek staatilisel säilitamisel ei avalda superkondensaatori omadustele praktiliselt mõju ehk ta võib olla laadimata või laetud olekus pikema aja jooksul ilma kahjustumata.

### **Superkondensaatorite võimalikud rakendused**

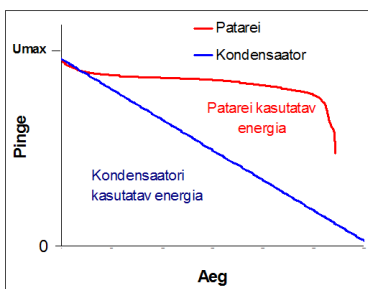
Suuremad superkondensaatorite tootjad on enamasti oma toodangut pakkunud autoarendajatele ja elektroonikatööstustele. Tänu pikale kasutuseale ja suurele erivõimsusele on valdkondi mujalgi, mainimata militaar- ja kosmosetööstust.

Rakendused, kus superkondensaatorid on juba oma koha leidnud :

- 1) paljundusmasinad (küttekeha kiirsoojendus),

- 2) tuulegeneraatorid (labade pööramine),
- 3) varugeneraatorite käivitus (haiglad, pangad jne.),
- 4) katkematu toitepinge allikad, (UPS-süsteemid),
- 5) hübriidajamiga liiklusvahendid (Honda, Nissan, MB, jt),
- 6) mänguasjad (mudelaudod, lalud),
- 7) mobiiltelefonid (koos akudega),

Rakenduste projekteerimisel on vaja arvestada asjaolu, et akud ja patareid on nn. püsipingeaallikad, kuid superkondensaatori pinge muutub ajas lineaarselt (vt joonis 2). Seetõttu tuleb teatud juhtudel kondensaatori pinge muundada süsteemile vastavaks.



Joonis 2. Aku ja superkondensaatori pingemuut ajas püsivoolu kasutamisel

### Superkondensaatorite kasutamine diiselmootori käivitamisel.

Katse kasutati Toyota Hiace mikrobusi (1995. a 2,4L, 85kW diiselmootor). Katse teostati välistemperatuuril  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kusjuures nii buss kui ka vooluallikad olid eelnevalt hoitud 12h samades tingimustes.

Kuueelemendises kondensaatorpatareis kasutati Tartu Tehnoloogiad OÜ-s karbiidse süsiniku baasil valmistatud superkondensaatoreid nominaalmahtuvusega 1300F ja -pingega 2,7V. Kondensaatorite järjestikühendus andis kondensaator-patarei mahtvuseks  $\sim 200\text{F}$  ja nominaalpingeks 16V. Et vältida üksikelemendi ülelaadimist teiste suhtes, kasutati iga üksik



Joonis 3.

*Superkondensaatorpatarei.* elemendi juures ka ülepinge kontrollskeemi.

Antud katsetes võrreldi kahte tüüpi superkondensaatorpatareisid (vt joonis 3), mis erinesid kasutatava elektrolüüdi osas:

- 1) Atsetonitriili (AN) solvendiga
- 2) Karbonaatse (PC) solvendiga

Alljärgnevalt on joonisel 4 toodud mõned fotod katsest .



a



b



c



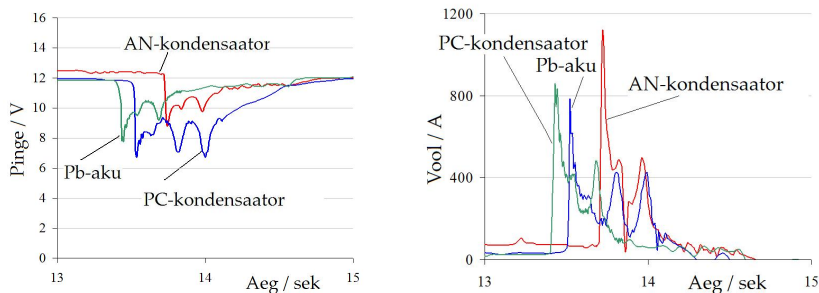
d

Joonis 4. a) Superkondensaator ja pliiauku, b) kondensaatori installatsioon, c) kondensaator on kindlalt paigas, d) ...katse õnnestus.

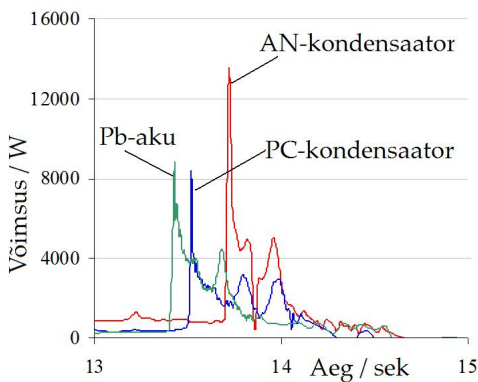
Kondensaatorpatareidega käivitamisel asendati suur pliiauku märkimisväärselt väiksema kondensaatorpatareiga. Katseid korrati samades tingimustes nii originaalpliiauku, PC-kondensaatorpatarei kui AN-kondensaatorpatareiga ning salvestati kõigil juhtudel käivitusvoolu ja pingelangu ajalised sõltuvused.

Katsemõõtmiste graafikud on toodud joonistel 5 ja 6. Kõikide vooluallikatega õnnestus mootori käivitus kohe esimesel katsel, kusjuures käivituse aeg oli vahemikus 0,9 kuni 1,2 sekundit. Konstrueeritud graafikute põhjal saab väita, et pingelang ulatus kuni 8 voldini ning pingemuutus ajas oli otseses sõltuvuses mootoris tekkiva kompressiooniga. Registreeritud voolupiigid olid 800A ja 1200A vahel, kusjuures

suurim vool saavutati AN-superkondensaatorpatareiga. Katses kasutatud energiaallikate parameetrite võrdlus on toodud tabelites 3 ja 4.



Joonis 5. Energiaallikate pinge ja voolu muutumine ajas diiselmootori käivitusel.



Joonis 6. Energiaallikate võimsusimpulsid ajas diiselmootori käivitamisel.

Tabel 3. Autokäivituskatses kasutatud erinevate vooluallikate parameetrid

Vooluallikas	AN-kondensaatorpatareid	PC-kondensaatorpatareid	Pb-aku
Pinge, [V]	15	15	14
Mahtuvus, [Ah]	0,38	0,42	95
Mahtuvus, [F]	180	200	-
Kogu energia, [kJ]	20,3	22,5	4104
Käivituseks kasutatud energia %	34	17,5	0,07
Mass, [kg]	2,2	2,5	19

Mõõtmisandmetest selgus, et suur osa käivitamisel kuluvast energiast kulub eelsüüte küünalde tööks, mida on kohati üle kahe korra enam kui käivitus impulsiks vajalik energia. Huvipakkuv on ka asjaolu, et madalaima sisetakistusega süsteem töötas eksperimendis kõige täielikumalt, annetades ligikaudu 34% oma salvestatud energiast süsteemile.

Tabel 4. Katse käigus  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  juures mõõdetud parameetrite võrdlus.

Vooluallikas	AN kondensaator- patarei	PC kondensaator- patarei	Pb-aku
Sisetakistus [mOhm]	3,3	6,3	4,7
Eelsüüteaeg [s]	5,0	4,5	4,0
Käivitusaeag [s]	0,9	0,7	1,2
Eelsütelaeng [As]	405	210	110
Käivituslaeng [As]	174	167	170
Eelsüüteenergia [kJ]	5,1	2,6	1,3
Käivitusenergia [kJ]	1,8	1,4	1,7
Kulutatud energia [kJ]	7,0	3,9	3,0
Kulutatud laeng [As]	579	377	280

Karbonaatse, PC elektrolüüdiga kondensaatorid käitusid sarnaselt, kuid kasutatav energia jäi alla 20%. Samas, pliiakust kulutati kaduvväike osa  $\sim 0,1\%$  energiast kogu süsteemile. Saadud tulemuste põhjal võib kinnitada, et 180 kuni 200 F mahtuvusega ja 15-voldises kondensaatorpatareis on piisavalt energiat ja võimsust, et garanteerida diiselmootori käivitumine Eestimaa pakaselises kliimas. Siiski tuleks katseid korrata veelgi karmimates kliimaatilistes tingimustes.

### Kokkuvõte

Käesolevas uuringus käsitleti karbiidset päritolu süsinikmaterjalidest valmistatud superkondensaatorite kasutamist diiselmootoriga auto käivitamiseks madalatel temperatuuridel. Katseobjektideks olid kahe erineva elektrolüüdiga kondensaatorpatareid, millede mahtuvused olid 180 ja 200F ning tööpinge 15V. Katsetulemuste põhjal selgus, et mõlemad kondensaatorpatareid on edukalt rakendatavad diiselmootori käivitamiseks temperatuuridel vähemalt  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Akupatareiga võrreldes saavutati suurusjärgudes parem energiakasutus. AN- elektrolüüdiga superkondensaatorpatarei saavutas kõrgeima piigivoolu ja võimsuse väärtused.

### **Kasutatud kirjandus:**

- B.E.Conway, Klugwer Academic / Plenum publishers, NewYork 1999, Electrochemical supercapacitors Scientific Fundamentals and Technological Applications”.
- Leis, J.; Arulepp, M.; Lätt, M.; Kuura, H.; Kuura A. A method for manufacturing the nanoporous SkeletonC material. USA Patenditaotlus US 11/407,202.
- Arulepp, M., Leis, J., Kuura, A., Lätt, M., Kuura, H., Permann, L., Miller, F., Rumma, K. Performance of Supercapacitors Based on Carbide Derived SkeletonC. Proc. 15th International Seminar on Double Layer Capacitors & Hybrid Energy Storage Devices, Deerfield Beach, USA, Dec.5–7, **2005**, 249–260.
- Miller J. R., Standars for Engie-Starting Capacitors. Proc. 15th International Seminar on Double Layer Capacitors & Hybrid Energy Storage Devices, Deerfield Beach, USA, Dec.5–7, **2005**, 186–201.
- Klementov, J. Theoretical and practical aspects of internal combustion engie starting with capacitors. Proc. 15th International Seminar on Double Layer Capacitors & Hybrid Energy Storage Devices, Deerfield Beach, USA, Dec. 5–7, **2005**, 202–214.
- Permann L, Lätt M, Leis J, Arulepp M. Electrical double layer characteristics of nanoporous carbon derived from titanium carbide. *Electrochim Acta* **2006**; *51*, 1274–1281.
- Leis, J., Arulepp, M., Kuura, A., Lätt, M., Lust, E. Electrical double-layer characteristics of novel carbide-derived carbon materials. *Carbon* **2006**; *44*, 2122–2129.
- Arulepp, M., Leis, J., Lätt, M., Miller, F., Rumma, K., Lust, E., Burke, A.F. The advanced carbide-derived carbon based supercapacitor. *J. Power Sources* **2006**; *162*, 1460–1466.
- Lätt, M., Leis, J., Arulepp, M., Kuura, H., Lust, E., Latest developments in Carbide Derived Carbon for Energy Storage Applications. Proc. 16th International Seminar on Double Layer Capacitors & Hybrid Energy Storage Devices, Deerfield Beach, USA, **2006**.
- M. Arulepp, J. Leis. “Nanostruktuurne süsinik – tuleviku energiakandja” *Keskonnatehnika* 8/2006 lk 26–28.

## THE SUPERCAPACITORS WITH CARBIDE-DERIVED CARBON

*<sup>1</sup>Mati Arulepp, <sup>1,2</sup>Jaan Leis, <sup>1,2</sup>Marko Lätt, <sup>1,2</sup>Helle Kuura, <sup>1</sup>Andres Kuura,*

*<sup>1</sup>Feliks Miller, <sup>1,3</sup>Kusta Rumma, <sup>1</sup>Vello Madiberk*

<sup>1</sup> Tartu Technologies LLC

<sup>2</sup> University of Tartu

<sup>3</sup> Estonian Maritime Academy

The supercapacitors made from the carbide-derived carbon (CDC) were used in experiments of diesel engine starting at low-temperature conditions. Two different supercapacitor batteries with capacitance of 180F and 200F and nominal voltage of 15V were tested. Results of this study confirmed that CDC-based supercapacitors with both, the acetonitrile (AN) and propylene carbonate (PC) electrolytes, can successfully be used for engine-starting at least at  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The energy utilisation by supercapacitors was by several orders better compared to the original accu-battery. The highest peak-current and power values were reached with supercapacitors having AN electrolyte.



# **ENERGEETILISE PILLIROO SAAGIKUSE MÄÄRAMISE TULEMUSI SAARE MAAKONNAS**

Livia Kask, Ülo Kask

Tallinna Tehnikaülikooli Soojustehnika Instituut, 11712 Tallinn, Kopli 116

E-post: livia.kask@ttu.ee, ykask@staff.ttu.ee

Uurimus oli osaks INTERREG IIIA programmist rahastatava projekti „Roostike kasutamise strateegia Soomes ja Eestis“ bioenergia moodulist. Projekti on toetanud rahaliselt ka Siseministeerium.

Projekti ühe väljundina peaks selguma, et kas, kus ja millises mahus ning milliste tehnoloogiatega oleks pilliroog kasutatav kütusena alates väiketarbijatest kuni kaugküttesüsteemideni. Tallinna Tehnikaülikooli (TTÜ) soojustehnika instituudi (STI, projekti Eesti poolne peapartner) teadurid korraldasid katseid pilliroo saagikuse määramiseks mitmetes Eesti piirkondades ajavahemikul veebruarist aprillini 2006.

Piirkondade (kohtade) valikul lähtuti projektis osalevate Eesti omavalitsuste huvidest (Saare maakond, Kuressaare linn, Haapsalu linn, Muhu vald, Lihula vald ja Noarootsi vald), suuremate roostike asukohast (Matsalu Rahvuspark, Silma Looduskaitseala, Mullutu laht, Väinameri jne), alade mitmekesisusest (avamererannad nagu Häädemeeste vallas, merelahesopid Rocca al Mares Kopli lahes Mustjõe suubumise lähedal, järverannad Peipsis ja Võrtsjärves) ja põhimõttest, et oleks kaetud enam-vähem suuremad tööstuslikku huvi pakkuvad alad.

Joonisel 1 on toodud proovivõtu kohad üle Eesti.



Joonis 1. Pilliroo proovivõtu kohad üle Eesti, 02.–04.2006.

### **Saagikuse määramise meetoodika**

Esmalt hinnati igas uuritavas kohas roostiku tihedust ja ühtlust visuaalselt. Eelneva visuaalse hindamisega püüti leida erineva suurusega ja biomassi hulgaga roostikuosade (tsoonide) summaarset kaalutud keskmist saagikust.

Seejärel valiti lõikealad nii, et oleks hõlmatud erinevad tsoonid vastavalt nende osakaalule. Igast valitud kohas lõigati pilliroogu vähemalt kolmel (kuni kuuel) 1 m<sup>2</sup> suurusel lõikealal. Üks proovilapp valiti avavee lähedal ja teine üsna kalda ääres ning nende vahel lõigati roogu vähemalt ühel proovilapil.

Igast piirkonnast võeti vähemalt 600 g, aga tavaliselt 1,5 kg kuivainet. Kõikidelt proovilappidelt kogutud segu viidi TTÜ STI laborisse, kus esmalt määrati pilliroo niiskus ning seejärel tükeldati rookõrred lühemaks (~5 cm) järgneva peenendamise ning põlemistehniliste parameetrite ja tuha omaduste määramise katsete jaoks.

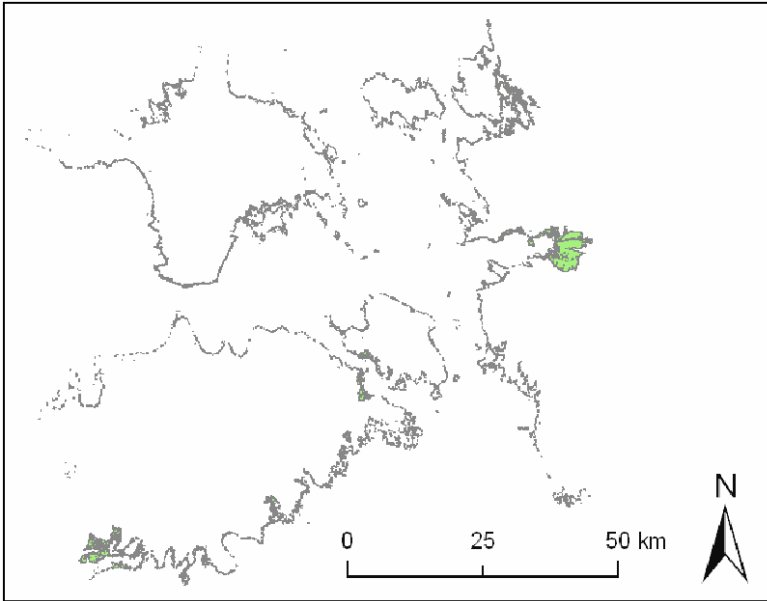
### **Roostike kaardistamine**

Eesti uurimispiirkond kattis Väinamere piirkonna mereäärsed vallad ehk Hiiumaa, suure osa Saaremaast, Muhu ja Vormsi saared ning rannikualad Riguldist kuni Varbla valla idapiirini. Piirkonnas on palju roostikualasid (joonis 2), kuid nende kaugseiramine oli märgatavalt keerulisem võrreldes Soome rannavööndiga. Üheks peamiseks põhjuseks saab pidada väheseid teadmisi piirkonna ja seal valitsevate looduslike olude osas.

Eesti uurimisalal määratleti roostikke ligikaudu **17 000 hektaril**, mis on keskmiselt 1,1% kõikide valdades esinevate veekogude pindalast. Üksikuid roostikulaike hinnati kaardistuse järgi ligikaudu 4400.

Kaugseire andmestikuna kasutati Landsat TM ja ETM+ -satelliitide pilte, mis on üks levinumaid ja kergemini kättesaadavaid satelliidipildiandmestikke. Landsat-satelliitide skaneeritava riba laius on 185 kilomeetrit ja mõlema satelliidi korduste tsükkel 16 päeva, kuid piirkonnas pildistamise hetkel valitsevad ilmastikuolud seavad takistusi piltide kasutamisele.

Osa Saaremaa valdu jäi satelliidipildilt välja (Torgu, Salme, Lümända, Ruhnu).



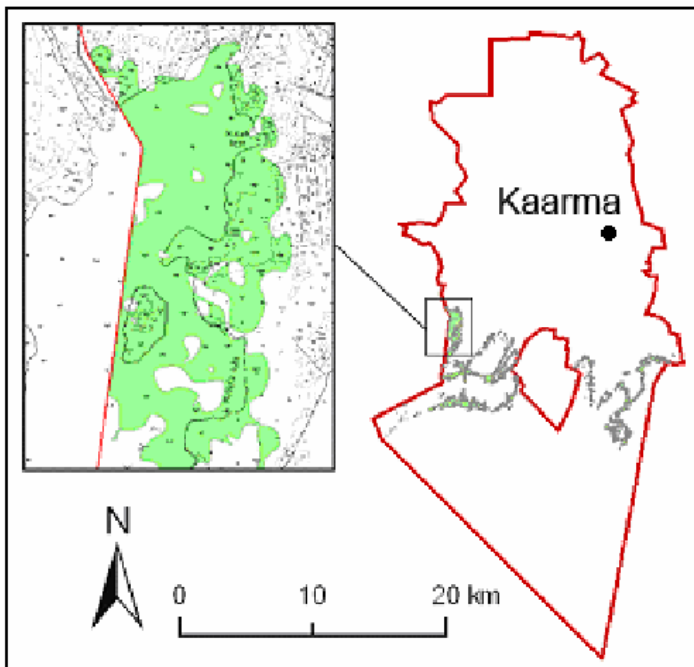
Joonis 2. Ülevaatlük kaart Eesti uurimispiirkonna roostikualadest (rohelisega).

### **Saare maakonna pilliroolad valdade kaupa**

Kaarma (roostike pindala 1217 ha, roostike osakaal valla pindalast 2,0%)

Kaarmas on roostike pindala suhteliselt suur, keskmisest oluliselt suurem on ka pindalasuhe.

Suurim ühtne roostik asub valla läänepiiril Mullutu lahe rannas ja selle pindala on Kaarma poolel peaaegu 470 hektarit.



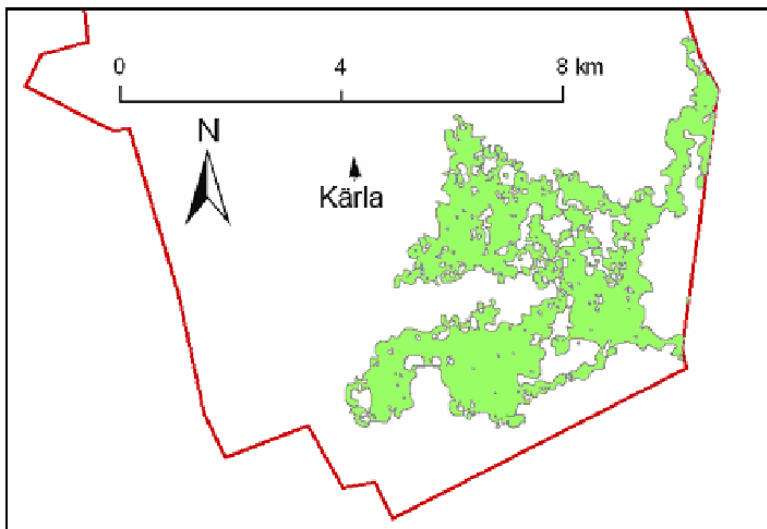
Joonis 3. Kaarma roostikualad, suurendatult Mullutu lahe piirkond.

Kuressaare (roostike pindala 116 ha, roostike osakaal linna pindalast 5,0%)

Kuressaare on nagu Haapsalugi oma pindalalt väike ja seetõttu annab viieprotsendiline roostikega kattuvus roostike kogupinnaks vaid ligikaudu sada hektarit. Roostikud paiknevad linna randadel hajusalt, ühtki laiku ei saa pidada kuigi suureks.

Kärla (roostike pindala 1410 ha, roostike osakaal valla pindalast 6,5%)

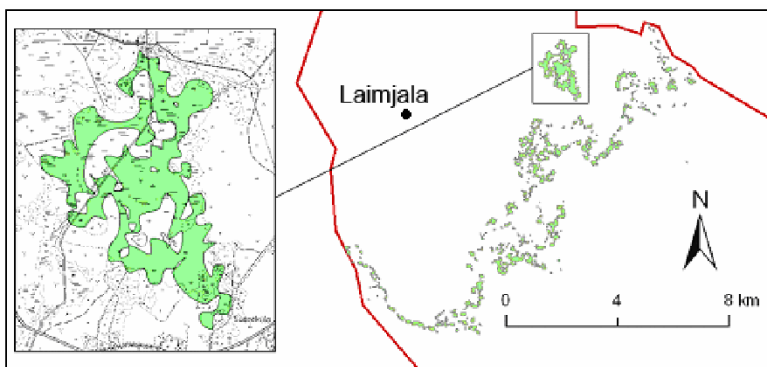
Kärla piirkonnas asub üks Eesti uurimisala suurematest rooväljadest, mis moodustab suure sisemaale ulatuva märgala ja jätkub mööda Mullutu lahe randa Kaarma vallas. Enam kui 1 400-hektariline ühtne roostik on looduses üsna muljetavaldav.



Joonis 4. Kärla roostikualad.

Laimjala (roostike pindala 474 ha, roostike osakaal valla pindalast 0,6%)

Laimjala vallas katab roostik peaaegu 500 hektarit, kuid valla kogupindalast moodustab see vaid ligikaudu 0,6%. Roostikud asuvad üsna hajusalt, üksik suurem laik asub veidi sisemaa pool Saareküla lähistel, selle suurus on üle 100 hektari.



Joonis 5. Laimjala roostikualad, suurendatult Saareküla ümbrus.

Leisi (roostike pindala 132 ha, roostike osakaal valla pindalast 0,3%)

Leisi valla roostikud katavad vaid 132 hektarit ja on jagunenud üsna laiale alale. Roostikud moodustavad piki rannajoont pideva ja kitsa vöö, kusagil ei leidu piisavalt suuri massiive.

Mustjala (roostike pindala 181 ha, roostike osakaal valla kogupindalast 0,3%)

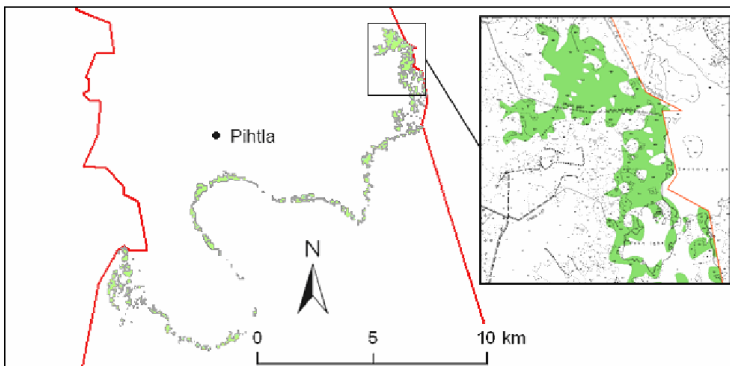
Mustjala ei tundu roostike seisukohast kuigi huvipakkuv – roostikualad paiknevad valdavalt eraldi ja väikeste laikudena. Mustjala rannas puuduvad lahed, mis soodustavad roostike arengut. 0,3%-line roostike osakaal valla pindalast jääb selgelt alla keskmise väärtuse.

Orissaare (roostike pindala 284 ha, roostike osakaal valla kogupindalast 0,9%)

Orissaare on roostike seisukohast suhteliselt tähtsusetu. Mõnesid valla kaguosas Muhusse viiva tammitee juures paiknevaid roostikulaike arvesse võtmata esineb neid suhteliselt hajusalt. Roostike pindala jääb selgelt alla naabervaldade omale, kuid suhtelist osakaalu tõstab Orissaarele kuuluvate veekogude pindala nappus.

Pihlta (roostike pindala 553 ha, roostike osakaal valla kogupindalast 0,6%)

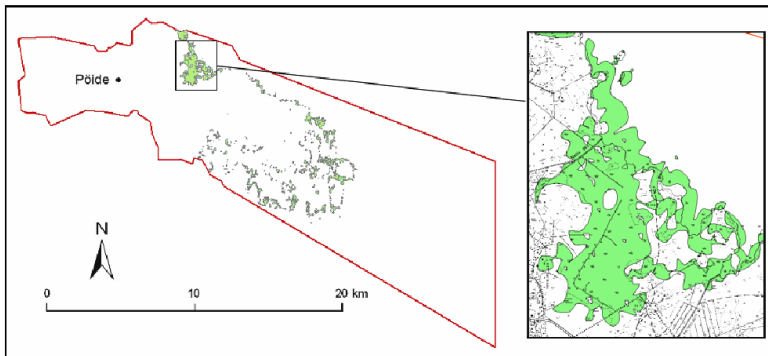
Pihlta piirkonnas esineb roostikke mõõdukalt igal pool. Valdavalt esinevad roostikud rannajoonel väikeste laikudena, kuid mõnesid veidi suuremaid laike võib leida valla idapiirilt Laidevahe lahe ja sellest põhja poole jäävate väikeste veekogude ümbrusest. Roostikud ulatuvad mitmes kohas naabervalla Valjala territooriumile.



Joonis 6. Pihlta roostikualad, suurendatult Laidevahe lahe põhjaosa.

Pöide (roostike pindala 749 ha, roostike osakaal valla kogupindalast 2,6%)

Põide rannajoone on suhteliselt liigestatud ja roostikualaigud on valdavalt väikesed, kuid valla põhjaosa randades leidub paiguti ka veidi suuremaid ühtlasi rooalasi. Üle 200 ha massiiv asub Tornimäe küla lähistel. Roostike osakaal Põide valla pindalast on 2,6%, mis on keskmisest selgelt suurem.



Joonis 7. Põide roostikualad, suurendatult Tornimäe küla kirdeosa

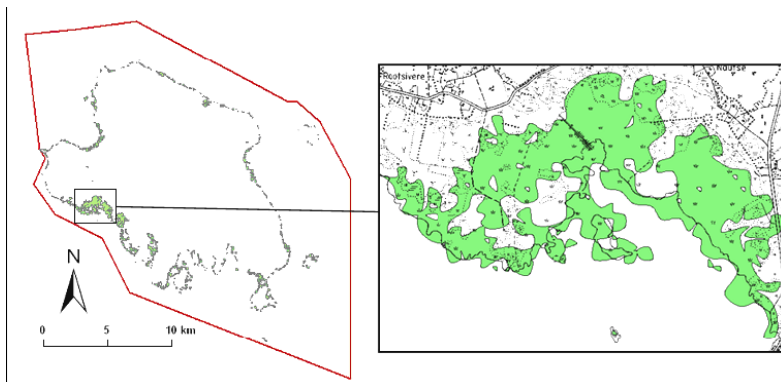
Valjala (roostike pindala 370 ha, roostike osakaal valla kogupindalast 0,4%)

Valjala vallas on lühikese rannajoone kohta suhteliselt palju roostikualasid, ehkki kogu pindalast katavad need vaid alla poole protsendi. Roostikud moodustavad rannavööndis peaaegu ühtlase vöö ning peale Kunnati ja Oesaare lahtede piirkonna, kus asuvad roostikud jätkuvad ka Pihla pool, ei ole märgata teisi selgelt suuremaid roostikulaike.

Muhu (roostike pindala 917 ha, roostike osakaal valla kogupindalast 2,0%)

Muhu saare rannikul katab roostik peaaegu 1000 hektari suuruse ala, valla kogupindalast moodustab see keskmisest veidi suurema 2,0%. Roostikud paiknevad peamiselt väikeste, osaliselt liitunud aladena mitmel pool saare randades, mõnevõrra suuremaid ja ühtlasemaid laike esineb Saaremaale viiva silla juures Rootsivere, Nautse ja Linnuse külade lähistel.





*Joonis 8. Muhu roostikualad; suurendatult Rootsivere ja Nautse külade ümbrus*

Ehkki eelpool on esitatud suhteliselt üksikasjalikke ja täpseid andmeid roostike katvuse kohta Eestis Väinamere piirkonnas, tuleks neid tulemusi käsitleda siiski pigem suundanäitavaiks kui absoluutsete faktidena. Uurimuse meetoodika valiti hoolikalt ja tööd tehti võimalikult kompetentselt, kuid perfektseid tulemusi üksnes Landsat-andmestikku kasutades siiski ei saa.

Tabel 1. Pilliroo saagikuse määramise katsete tulemused.

Maakond	Linn, vald	Valla pindala, km <sup>2</sup>	Elanike arv	Roostike pindala, ha	Roostike tarbimisaine keskmine saagikus t/ha	Roostike kuivaine keskmine saagikus t/ha	Roostike teoreetiline primaarenergia sisaldus, GWh	Roostike tehniline primaarenergia sisaldus, GWh
Saare Maakond	Kuressaare l.	15	15 230	115,58	6,20	4,98	2,72	1,84
	Kaarma	400	4 241	1 217,33	4,66	3,85	21,56	12,30
	Kärla	217,87	1 995	1 409,60	5,95	4,75	31,87	21,16
	Laimjala	116	932	473,50	7,75	5,89	13,94	10,35
	Leisi	347,91	2 419	132,41	5,95	4,75	2,99	1,99
	Muhu	198	2 170	917,13	6,21	4,94	21,64	14,67
	Mustjala	235,97	790	180,91	5,95	4,75	4,09	2,72
	Orissaare	163,02	2 268	283,80	5,95	4,75	6,42	4,26
	Pihntla	228,11	1 578	552,73	5,95	4,75	12,50	8,30
	Pöide	123,58	1 135	749,09	7,75	6,12	22,06	16,37
Valjala	180,02	1 570	370,35	5,95	4,75	8,37	5,56	
<b>KOKKU/KESKMINE</b>				<b>6 402,43</b>	<b>6,18</b>	<b>4,91</b>	<b>150,44</b>	<b>101,78</b>

Märkus: 20%-lise niiskuse juures on pilliroo alumine kütteväärtus 3,7–3,8 MWh/t;

Tehniline primaarenergia sisaldus on arvatud roostike tarbimisaine saagikuse juures, mis on 2 t/ha väiksem kui tabelis antud;

Valla roostike tarbimisaine keskmine saagikus on leitud osalt mõõtmistulemuste alusel ja osalt võetud maakonna keskmine (kui mõõdetud maakonna teistes valdades);

Valla pindala ja elanike arv on võetud statistikaameti andmebaasist 2005. aasta seisuga;

Roostike pindala on määratud satelliitfotode järgi.

### Saagikuse mõõtmiste tulemused

Proovilappide asukoha valiku hindamisest tulenevalt võib rootalade tegelik saagikus mõõdetud keskmisest erineda. Peab arvestama ka asjaoluga, et kogu rooala ei pruugi olla koristatav kas lumehangede, kivide, kändude vms tõttu. Täpsemaid hinnanguid koristatava roo koguse kohta saab peale suuremaid proovikoristusi masinatega. Pilliroo saagikuse määramise katsete tulemusest selgus, et erinevate piirkondade roostike vahel võib esineda suuri saagikuse erinevusi.

Saagikuse mõõtmise tulemused esitatakse tabelis 1. Tuuakse välja nii tarbimisaine keskmine saagikus (t/ha), sest see mass võib minna kohe katlamajasse energeetilise kütusena, kui ka kuivaine saagikus, mille alusel saab hinnata erinevatel perioodidel ja kuudel (suvi, talv, jaanuar, märts) ning ilmastiku tingimustes (kuiv, härmas, märgunud) lõigatud roo biomassi saagikust. Vaatluse all on tööstuslikult kogutava pilliroo biomassi saagikus, bioloogiline saagikus on kindlasti suurem.

Keskmiseks tarbimisaine saagikuseks saadi 6,18 t/ha ja kuivaine saagikuseks 4,91 t/ha. Talvisel niitmisel oleks reaalne koguda kütteroogu keskmiselt 5–6 t/ha tarbimisaine keskmise kütteväärtusega 3,7 MWh/t (niiskusel ~20%). Ühelt hektarilt kogutava kütteroo primaarenergia sisaldus jääb sel juhul vahemikku 18,5–22,2 MWh. Sarnase primaarenergia hulgaga oleks võimalik kindlustada väiksema (~500 m<sup>3</sup>) kaasaegse eramu aastane küttesoojuse vajadus.

Näide: jätkusuutlik küttepilliroo varumine ja soojuse tootmine: iga-aastaselt niites oleks

Saaremaalt kogutava pilliroo tehniline potentsiaal ~120 GWh/a, igal kolmandal aastal niites oleks see 40 GWh/a. Kasutatakse nn kolmeväljasüsteemi, et roolad saaksid taastuda.

- Energia muundamiseks ei saa kasutada kogu niidetavat roogu, osa läheb ehituseks ja muuks otstarbeks ning kõik maaomanikud ei luba oma maalt lõigata, siis eeldatavalt jääks bioenergia jaoks 50% ehk 20 GWh/a.
- Kui võtta 80% keskmiseks katla kasuteguriks, oleks soojustoodang 16 000 MWh/a, millest kuni 20% on võrgukaod, tarbijale saaks müüa 12 800 MWh.

- 20 MWh kulub aastas keskmise (mitte väga korraliku) korteri soojusega varustamiseks.
- $12\ 800/20 = 640$  korterit saaks aastas kütta.
- Kui kortermajas on 18 korterit, siis saaks Saaremaal aastas kütta pillirooga umbes 35 kortermaja.

### **Kokkuvõte**

Saaremaalt kogutava pilliroo tehniline potentsiaal oleks hinnanguliselt 110–120 GWh/a, milles üks osa (ilmselt väiksem) läheb ehitusmaterjaliks. Pilliroo kättesaadavus ja selle küttekolletele sobiva niiskusega kogumine ei pruugi olla igal pool ja igal aastal tagatud, kuigi Eesti ulatuses päris saagita ka ei jääda.

Pilliroole kui katlakütuse toormele pretendeerivad esimeses järjekorras ehitusroo tootjad, kes jõuavad materjali eest märksa rohkem maksta. Ka pelletiteks/brikettideks vääristatud pilliroog leiaks ostjaid peamiselt jõukates välisriikides.

## **RESULTS OF ENERGETIC REED PRODUCTIVITY TESTS IN SAARE COUNTY**

*Livia Kask, Ülo Kask*

Tallinn University of Technology Thermal Engineering Department

Results of reed productivity measuring tests in Estonian wetlands, coastal sea and lakes are carried out by researches of TED in winter (since February till April 2006) and summer 2006 (in the beginning of August). This research is a part of Finnish-Estonian Interreg IIIA program – project "Reed strategy in Finland and Estonia" bio energy module.

The aim of this investigation is to clarify the energetic potential of reed and with what kind of technologies it could be used as a fuel in small scale to district heating systems.

The district selection was made on the basis of the interest of Estonian municipalities participating in this project (Saare County, Kuressaare Town, Haapsalu Town, Lihula and Noarootsi Parishes), the location of bigger wetlands (Matsalu National Park, Silma Nature Park, Mullutu bay, Väinameri etc), the diversity of districts (shores of open sea like in Häädemeeste Parish, sea bays like Rocca al Mare in Kopli Gulf near debouch of Mustjõe river, lake shores in Peipsi and Võrtsjärv) and on the basis of the principle that all bigger areas that offer industrial interest would be covered. In numerous abovementioned places have been cut reed for building material. The choice of districts should give a sufficient overview of the biomass productivity of Estonian wetlands.

Overall results of productivity measuring are presented in table 1. There are presented productivity as received mater (t/ha), the volume can go directly to the boiler house as energetic fuel, and also as a dry mater. On the basis of dry mater the productivity of biomass of cut reed can be measured in different period (summer, winter) and in different weather conditions (dry, wet).

# ELEKTRILIINIDE TRASSIDELT SAADAVA VÕSA ENERGEETILINE POTENTSIAAL

Risto Mitt<sup>1</sup>, Peeter Muiste<sup>1</sup>, Kuldar Ivandi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 5, 51014 Tartu, e-post: risto.mitt@emu.ee

<sup>2</sup>AS Rait, Reola, 61701 Tartumaa, e-post: kuldar.ivandi@raitwood.ee

## **Annotatsioon**

Käesoleva töö eesmärgiks on selgitada välja energiahulk, mis oleks võimalik saada elektriliinide trassidel kasvava võsa realiseerimisel. Eestis läbi viidud uuringud näitavad, et pikemas perspektiivis on puitkütuste ressurssid vähenemas ning seega tuleks otsida täiendavaid alternatiivseid allikaid nende leidmiseks. Üheks võimaluseks on selles valdkonnas kasutada ära elektriliinide trassidel kasvav biomass, kuna liinide kaitsetsoone tuleb tahtmatult hooldada.

*Märksõnad: elektriliinide trassid, biomass, energeetiline potentsiaal.*

## **Sissejuhatus**

Puit on Eestis üks tähtsamaid taastuvaid energiallikaid. Traditsioonilise metsast raiutud küttepuu kõrval on kasutamata veel kraavikallastel, elektriliinide trassidel ja teistes samalaadsetes paikades kasvava võsa energeetiline potentsiaal. Katlamajade üleminekul hakkpuiduküttele on tekkinud suur nõudlus nimetatud toorme järele. Kuna metsast saadav hakkpuit ei rahulda enam kogu vajadust, siis on tarvis pöörata pilgud alternatiivsete allikate poole.

## **Prognos taastuvate energiaallikate kasutamiseks aastani 2015**

Arvestades Eesti suhteliselt suuri turba- ja puiduvarusid, nende kasutamise väikest keskkonna-ohhtlikkust ning positiivset mõju regionaalarengule ja tööhõivele, on otstarbekas kavandada nende kütuseliikide osatähtsuse tõusu kütusebilansis. Seejuures puit ja teised biokütused on taastuv loodusvara ja nende põlemisel atmosfääri paisatavaid CO<sub>2</sub> heitmed ei mõjuta süsiniku ringkäiku looduses ning neid ei arvestata kasvuhoonegaaside hulka.

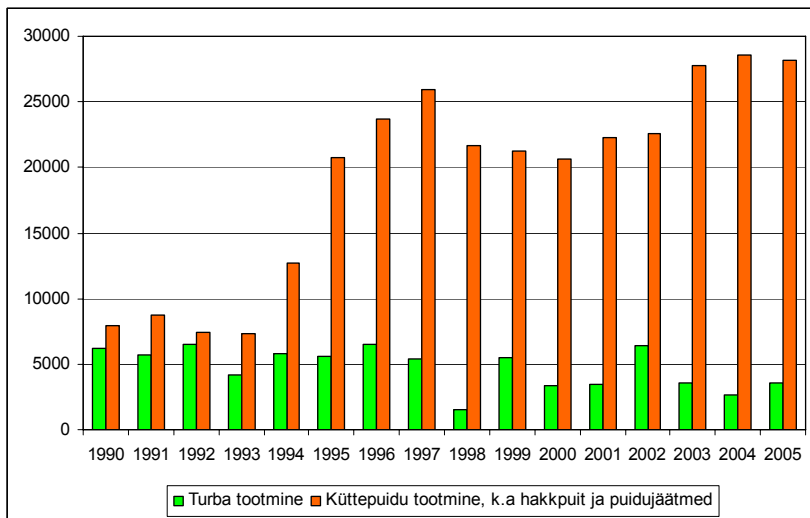
Kütuse- ja energiamajanduse pikaajalise riikliku arengukava aastani 2015 (RTI, 2004) järgi avaldub Eesti taastuvenergia potentsiaal eeskätt biokütustel baseerivas elektri ja soojuste koostootmises ning tuuleenergiast, samuti arendatakse väikesemahulist hüdroenergeetikat, mille tehniliselt rakendatavaks koguessursiks on ~40 MW. Planeerimisperioodi vältel suureneb ka päikeseenergia rakendamise konkurentsivõime ning osakaal.

Juba käesoleval ajal kasutatakse suur osa raiutava küttepuidu ja puidutöötlemisjääkide primaarenergiast peamiselt soojuste tootmiseks. Arvestatavaks lisanduvaks allikaks võib pidada raiejäätmeid. Biomassil põhineva elektri ja soojuste koostootmise arengut pidurdavaks teguriks on soojuskoormuse vähesus ning asjaolu, et soodsa soojuskoormusega piirkondadesse on juba paigaldatud uued, ainult soojust tootvad seadmed. Samuti piirab arengut biokütuste mahukas eksport, mistõttu esineb kohalikel energiatootjatel ressursipuudus (Energiasäästu..., 2006).

### **Eesti taastuvate energiavarude kasutamine**

Eestis kasutatakse põhiliselt järgnevaid taastuvaid energiaallikaid: turvas, küttepuid koos hakkpuidu ja puidujäätmetega, hüdro- ning tuuleenergia. Päikeseenergia kasutamist piiravad seadmete kõrge hind ja sessoonsus. Seepärast kasutataksegi päikeseplatadeid vähe ning üldjuhul ainult sooja vee tootmiseks kodumajapidamistes.

Kuna Eesti on metsarikas maa, siis on kõige tähtsam taastuv energiaallikas küttepuid. Siia alla kuuluvad ka hakkpuit ja puidujäätmed. 1995ndal aastal toimus suur hüpe küttepuidu kasutamisel energia tootmisel (joonis 1). Põhjuseks on puiduhakkurite ning hakkpuidul töötavate katlamajade kasutuselevõtmine. Peale 1997ndat aastat toimunud languse põhjuseks võib pidada toormepuudust. Joonisel 1 on toodud välja ka turba tootmine, mis moodustas 2003ndal aastal ligikaudu seitsmendiku küttepuidudest energia tootmisest.



Joonis 1. Taastuvenergia tootmine aastatel 1990–2005.

Figure 1. Production of renewable energy 199–2005.

### Elektriliinide trassid – kas alternatiiv?

Kuna Eesti on seadnud endale eesmärgiks aastaks 2010 toota 5,1% kogu energia tootmisest (RTI, 2004) taastuvenergiat kasutades, siis tulekski uurida lähemalt, kuidas oleks seda võimalik teostada?

Ühe võimalusena võiks välja tuua Keskkonnainvesteeringute Keskuse projekti raames EPMÜ metsandus- ja maaehitusinstituudis läbi viidud uurimustööd, mille abil uuriti elektriliinide trassidelt saadava võsa energeetilist potentsiaali. Nimetatud uurimustöö viidi läbi 2004. aasta sügisest kuni 2005. aasta kevadeni, eesmärgiks välja selgitada energiahulk, mis oleks võimalik saada elektriliinide trassidel kasvava võsa realiseerimisel.



## Elektriliinide trassid

Elektriliine jaotatakse kaheks – põhivõrk, mis hõlmab 110–330kV liine, ja jaotusvõrk, mille hallatavad on 0,4–35kV liinid. Ohutuse tagamiseks on igale liinikategoriale seatud nõudmised trassi laiuse suhtes, mis on välja toodud tabelis 1.

Tabel 1. Elektriliinide kaitsevööndite laius.

Table 1. Protective zones of power lines.

Liini tüüp	Kaitsevööndi laius (mõlemal pool liini telge), m
0,4kV	2*
6/10/15/20kV	10
35–110kV	25
220–330kV	40

\* Tegelikuses on kaitsevöönd laiem (3...4m)

Kaitsevööndeid tuleb regulaarselt hooldada (üldiselt tehakse seda 5-aastase intervalliga), mille tulemusena jääb liinide alla maha suurel hulgal võsa, mida võiks edukalt kasutada hakkpuidu tootmisel.

Uurimustöö käigus teostati hulgaliselt mõõtmisi, mille tulemusena märgiti maha proovitükid, mille pindalad olid vastavalt 70m<sup>2</sup> (7x10m), 200m<sup>2</sup> (10x20m), 225m<sup>2</sup> (15x15m) ja 625m<sup>2</sup> (25x25m). Mõõtmised valiti lähtuvalt teoreetilisest liini trassi laiusest ja reaalomukorrast. Proovitükid märgiti maha postide abil ning seejärel määrati GPS-seadmega kindlaks geograafilised koordinaadid. Kogu proovitükil olev võsa kaaluti ning seejärel võeti proovid, mida kuivatati kuivatuskambris senikaua, kuni proovide kaal enam ei muutunud ning see läbi saadi teada proovide niiskussisaldus. Kuivatamisel lähtuti sellest, et temperatuur ei ületaks 105 °C, kuna vastasel juhul hakkaks puit lagunema ning muutuks selle struktuur. Kuna puidu kütteväärtus sõltub niiskusesisaldusest (mida väiksem niiskus, seda kõrgem kütteväärtus) ja ka tuhasusest, määrati proovidele edasise analüüsi teostamiseks vastavad väärtused.

Uurimustöö tulemusena selgus, et Eestis on ca 68 700 km liine, mille kaitsevööndite pindala moodustab ca 116 250 ha. Kuna kõik elektriliinid ei asetse metsaga ümbritsetud aladel, siis energiahulga arvutamisel võeti aluseks AS Eesti Energia poolt väljapakutud 45%. Tulemusena saadi väärtused igale liinitüübile eraldi ning arvutused tehti värskest raiutud võsale niiskusega 50% (Biomass..., 1995), mis on välja toodud tabelis 2. Kütteväärtuste arvutamise aluseks võeti katsetööde käigus saadud tulemused ning AS Eesti Energia andmed elektriliinide pikkuste kohta. Saadi teada, et 5-aastase perioodi jooksul on võimalik kogu Eesti elektriliinide alt, mis läbivad metsi, koguda ligikaudu 472 000 tonni 50%-lise niiskusega võsa. Kui antud tulemus korrutada kütteväärtusega, mis on 50%-lise niiskusega puidul 8,28 MJ/kg (Wood..., 1993), siis saame vastuseks 3,86 PJ.

Tabel 2. 50% niiskusega võsa kütteväärtus, 5-aastase perioodi jooksul.

Table 2. Net calorific value of fresh residues (moisture content 50%), during 5-year rotation period.

Liini tüüp	Kütteväärtus, PJ
0,4kV	1,28
6/10/15/20kV	1,93
35kV	0,21
110kV	0,28
220kV	0,04
330kV	0,12
<b>KOKKU</b>	<b>3,86</b>

Nagu tabelist 2 näha, saab 110–330kV liinide alt märkimisväärselt vähem potentsiaalset biomassi võrreldes jaotusvõrgu liinide all olevaga, samas on laiemaid liinitrasse lihtsam hooldada.

Jagades väärtuse 3,86 PJ ära 5-aastasele perioodile, saame tulemuseks 0,772 PJ, mis oleks võimalik saada igal aastal täiendavalt elektriliinide trassidelt energia tootmiseks. Samas on võimalus pärast raiet võsa koondada teeäärde humnikutesse ja lasta kuivada ning seejärel hakkida, mille tulemusena suureneks energia hulk veelgi. Kui jätta võsa liini alla maha, siis on väga raske seda hiljem sealt kätte saada.

## **Järeldused**

Toetudes Statistikaameti andmetele, kasutati aastal 2005 Eestis elektri ja sooja tootmiseks 145,9 PJ energiat, mille hulgas põlevkivi 104,5 PJ ja põlevkiviõli 4,6 PJ ulatuses. Seega oleks teoreetiliselt võimalik kasutada ära elektriliinide trassidelt saadava võsa energeetilist potentsiaali (0,772 PJ), millega saaks katta Eesti energiavajadusest ca 0,71%, mis tänasel päeval baseerub põlevkivil ja selle kõrvalproduktidel.

Samas on see kõigest teoreetiline potentsiaal, kuna tõeline potentsiaal sõltub paljudest asjaoludest ja on tunduvalt madalam. Üks kõige tähtsamatest eeltingimustest on sobilik seadusandlus ja maksusüsteem, mis muudaks biokütused teiste kütuseliikidega majanduslikult võrdväärseteks ja teoreetilise potentsiaali tõeliseks. Nagu eelpool mainitud, on Eestil plaan aastaks 2010 saavutada taastuvenergia osakaaluks 5,1%, milles autori arvates võiks oma osa olla ka elektriliinide trassidelt saadava biomassi kasutamisel.

## **Kasutatud kirjandus**

RTI, 23.12.2004, 88, 601. Kütuse- ja energiamajanduse pikaajalise riikliku arengukava aastani 2015, [<https://www.riigiteataja.ee/ert/act.jsp?id=829062>] (28.02.2007)

Energiasäästu sihtprogrammi rakenduskava aastateks 2001–2005, ülevaade elluviimisest (jaanuar 2006), [<http://www.mkm.ee/doc.php?7622>] (28.02.2007)

Biomass technology group, Estonia: Utilization of wood and peat heat supply, main report, Oktoober 1995

Wood chips for energy production, Tehnology – Environment – Economy, The Center of Biomass Tehnology, 1993

## STUDY OF ENERGETIC POTENTIAL OF BRUSHWOOD FROM POWER LINE TRACES

*Risto Mitt<sup>1</sup>, Peeter Muiste<sup>1</sup>, Kuldar Ivandi<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Eesti Maailikool

<sup>2</sup>AS Rait, Reola

### **Abstract**

The protection zones of electric power lines should be cleared periodically and the harvested brushwood can be used as fuel. As the potential yield of biomass depends on the characteristics of the neighboring forest (age, composition by the tree species, soil type etc.), the sample plots were created aiming to cover the variety of different conditions. The study was carried out during the years 2004–2005.

As a result of the field experiments and analysis of map data the potential yield of wood fuel from electric power lines was determined. The data indicate that the additional resources of wood fuels available from electric power lines are remarkable and should be collected in order to cover the needs for biofuels in the future. According to the official statistics the consumption of fuels for electricity and heat generation in Estonia in the year 2005 was 145.9 PJ, including oil shale 104.5 PJ and shale oil 4.6 PJ. So, the theoretical potential of primary energy content of woody biomass (harvesting residues) from electric power lines (0.772 PJ) can cover up to one percentage of the energy need which is today covered by oil shale based fuels.

# BIOGAASI TOOTMISTEHNOLOOGIAD

Dots Jüri Olt, emer prof Jaan Lepa, Erkki Jõgi, Andres Menind

Eesti Maailikool, Tehnikainstituut

## Annotatsioon

Käesolevas artiklis antakse ülevaade biogaasi olemusest, peamistest koostisosadest ning toorainetest koos nendest saadava ligikaudse gaasisaagisega. Välja on toodud tootmisprotsessi erinevad temperatuuripiirkonnad ning keemilise protsessi kirjeldus. Käsitletud on protsessi kulgu, erinevaid kääritud tüpe ning vajalikke lisaseadmeid.

*Märksõnad: biogaas, metaan, gaasisaagis, kääritud, kääritamise tehnoloogiad, tootmisprotsess, kofermendid, patendiuuring.*

## Biogaas

Biogaasiks e käärimisgaasiks nimetatakse orgaanilise aine peamiselt anaeroobsel käärimisel tekkivat, põhilise põlevosana metaani (CH<sub>4</sub>) sisaldavat gaasi. Keemiliselt kuulub metaan nn alkaanide hulka, milliseid iseloomustab ühekordne side gaasi-molekuli süsinikuaatomite vahel. Biogaasi mahuline koostis on toodud tabelis 1.

Tabel 1. *Biogaasi mahuline koostis [1].*

Table 1. *Average composition of biogas.*

Koostisosa	Mahuprotsent
Metaan, CH <sub>4</sub>	50...75
Süsihappegaas, CO <sub>2</sub>	25...50
Lämmastik, N <sub>2</sub>	0...10*
Vesinik, H <sub>2</sub>	0...1
Väävelvesinik, H <sub>2</sub> S	0...3
Hapnik, O <sub>2</sub>	0...2*

\* Sageli lisatakse 5% õhku mikrobioloogiliseks väävlivabastuseks.

Biogaasi saadakse biomassist, mille võib jagada kaheks: põllul kasvav biomass (hein, teraviljad, õlikultuurid) ja tootmistegevusega kaasnev biomass (sõnnik, orgaanilised

jäätmel). Biogaasi saagis sõltub põhiliselt lähtematerjalist ja tabelis 2 on toodud orienteeruv biogaasi saagis mõningatest lähtematerjalidest.

Tabel 2. *Erinevatest lähtematerjalidest saadava biogaasi ligikaudne saagis [2].*

Table 2. *Yield of biogas acquired from different raw materials.*

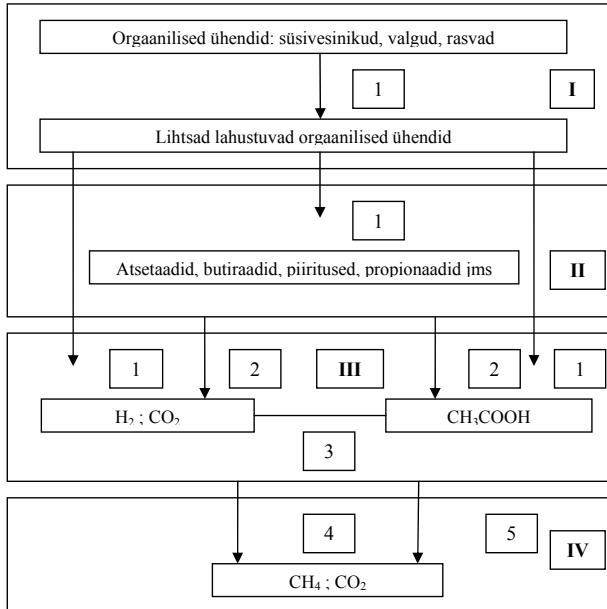
Lähtematerjal	Kuivaine sisaldus k %	Orgaanilist ainet kuivaines %	Biogaasi saagis s m <sup>3</sup> orgaanilise aine tonni kohta
Vedel veisesõnnik	6...11	68...85	200...260
Tahke veisesõnnik	11...25	65...85	200...300
Vedel seasõnnik	2,5...9,7	60...85	260...450
Tahke seasõnnik	20...25	75...90	450
Linnusõnnik	10...29	75...77	200...400
Linnusõnnik kuiv	32...32,5	70...80	400
Lambasõnnik	25...30	80	240...500
Hobusesõnnik	28	75	200...400
Söödapõhk	34	86	350...390
Rohusilo	26...82	67...98	300...500
Hein	86...93	83...93	500
Ristikhein	20	80	300...500
Põhk	85...90	85...89	180...600
Maisivarred	86	72	300...700
Piimavadak	5,3...6,5	80...92	330
Aedviljajäätmel	5...20	76...90	350

### **Biogaasi tootmine**

Biogaasi tootmisel eristatakse nelja erineva temperatuuriga režiimi [3]:

- psührofiilne (10...25 °C),
- mesofiilne (30...35 °C),
- termotolerantne (40...45 °C) ja
- termofiilne (50...60 °C).

Protsessi põhitingimuseks on orgaanilise aine ja vaba vee olemasolu. Selle erinevates staadiumides tegutsevad bakterid omavad erinevaid morfoloogilisi ja füsioloogilisi omadusi, mis väljendub erinevas paljunemiskiiruses, selle sõltuvuses keskkonna pH -st, hapnikusisaldusest jms.



Joonis 1. Anaeroobse metaani tootmise põhimõtteskeem. Araabia numbritega on tähistatud bakterite grupid: 1 – fermentsed hapendajad, 2 – vesinikku moodustavad atsetogeenid, 3 – H<sub>2</sub> kasutavad atsetogeenid, 4 – CO<sub>2</sub> kasutavad metanogeenid, 5 – atsetaate kasutavad metanogeenid. Rooma numbritega on tähistatud: I – hüdroolüüs, II – oksügenees, III – atsetogenees, IV – metanogenees.

Figure 1. Principle of anaerobic methane production. Arabic numbers indicate group of bacteria: 1 – acidic fermentators, 2 – hydrogen producing acetogenes, 3 - hydrogen consuming acetogenes, 4 – carbon dioxide consuming methanogens, 5 – acetate consuming methanogens.

Enamikus biogaasi tootmisega tegelevates riikides leiab käesoleval ajal kasutamist mesofiilne või selle lähedane (eeltoodud jaotusest lähtudes mesofiilse ja termotolerantse vahepealne) režiim, mida iseloomustab joonisel 1 toodud metaani anaeroobse tootmise põhimõtteskeem, mille kohaselt osalevad protsessis kokku 5 bakterite gruppi. Esimese grupi bakterid kutsuvad esile fermentatiivse hüdrolyüsi ja hapete tekke ning on valdavalt kiireltpaljunevad anaeroobsed fakultatiivsed anaeroobid, milliste jaoks optimaalne keskkonna pH on piirides 6,5...7,5. Nad eraldavad ka bioloogilisi katalüsaatoreid – eksofermente, mille osalusel toimub hüdrolyüs ja tahkete mittelahustuvate ühendite muundamine lahustuvateks. Kuna edasine protsess ei saa kulgeda ilma hüdrolyüsi ja lahustuvate ühendite tekketa, sõltub kogu edasine protsess hüdrolyüsist. Edasine, oksügeenne staadium, kus peaosa mängivad kiireltpaljunevad bakterid, protsessi kulgemise kiirust ei limiteeri. Atsetogeenses staadiumis osalevad kaks bakterite gruppi. Ühed neist moodustavad atsetaadi, näiteks äädikahappe propioonhapest (ehk propaanhapest) ja võihapest (butaanhapest).

Teine atsetogeensete bakterite grupp sünteesib äädikahappe vesinikust ja CO<sub>2</sub> –st.

Kolmas atsetogeensete bakterite grupp tarbib vesinikku. Metanogeenses staadiumis toodavad bakterid metaani kahel viisil:

- 1)  $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$  ja
- 2)  $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

Esimese valemi kohaselt tekib 72%, teise valemi kohaselt 28% metaani.

Tehnoloogiliselt võib kääritusprotsessi jagada kolmeks [4]:

- 1) tsükliline,
- 2) pidev ja
- 3) vaheajaline protsess.

Tsüklilisel töötlemisel täidetakse reaktor perioodiliselt biomassiga, suletakse hermeetiliselt ning kääritamisprotsess käivitub. Gaasi toodang kasvab ajas, kuni saavutab maksimumi. Pärast toodangu langust alla teatud piiri eemaldatakse 90...95% kääritatud massist ja täidetakse uuesti värske materjaliga. Allesjäänud mass 5...10% aitab kaasa uue portsu kääritamisprotsessi algatamisele. Saavutamaks pidevat gaasitoodangut, on vaja



mitut paralleelselt erinevas kääritusfaasis töötavat kääritit. Antud töötusviis on sobiv suuremahulistele tööstuslikele seadmetele.

Pideval töötusrežiimil töötav biogaasitehas hõlmab endas põhikäiritit ja eraldi järelkääritusmahutit. Lisades kääritisse biomassi, liigub osa läbitöötatud massist ülevoolutorustiku kaudu järelkääritusmahutisse. Seetõttu jääb massi tase kääritis konstantseks. Järelkääritusmahuti võib olla õhukindlalt suletud, võimaldamaks eralduvat gaasi kokku koguda, suurendades niiviisi üldist toodangu mahtu. Protsessi eeliseks on kompaktus, kuna biomassi hoitakse reaktoris ainult käärimise ajal.

Vaheajalise töötusel põimitakse tsüklilise ja pideva töötuse eeliseid, võimaldades kasutada kääritit nii biomassi hoidlana kui ka kääritamiseks. Biomassi lisatakse pidevalt, kuni mahuti on täis. Juba kääritatud massi hoitakse kääritis niikaua, kuni selleks on vajadus. Kui mahuti on täitunud, läheb kääriti tsükliliselt töötlemise režiimilt üle pidevale töötusrežiimile. Seetõttu veel lisatav mass selles tööstaadiumis põhjustab juba käärinud massi liikumist jääkidehoidlasse. Selle süsteemi suurim puudus seisneb biomassi ebatäielikus kääritamises, mistõttu kääriti efektiivsus ja biogaasi saagis on väiksem kui eelnevatel töötusrežiimidel.

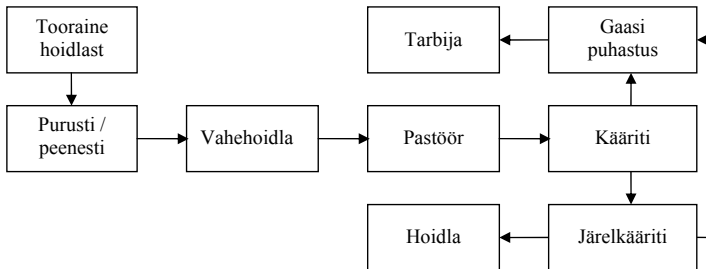
### **Biogaasi tootmistehnoloogiad**

Biogaasi tootmisel kasutatakse vastavalt toorainele ja kliimavõõtmele sobilikke tehnoloogiaid. Biogaasi tootmistehnoloogiliste elementide hulka kuuluvad:

- biomassihoidla,
- eeltöötus- ja etteandeseadmed,
- biomassikäiriti,
- biogaasihoidla,
- jääkidehoidla.

Biogaasi tootmise põhiliselt kasutatava tehnoloogia põhimõtteskeem on toodud joonisel 2. Lisaks skeemil näidatud elementidele võivad süsteemile olla lisatud veel gaasi kuivatusseadmed, väävlieraldus-seadmed ja võimaliku avari korral gaasi atmosfääri

paiskumise vältimiseks gaasi avariipõletid. Olenevalt toorainetest võivad töötlemisel mõned astmed vahele jääda või teisiti kulgeda.



Joonis 2. Biogaasi tootmistehnoloogia plokskeem.

Figure 2. Block diagram of production technology of biogas.

Biomassi hoidlaks on reeglina kas silotornid või -tranšeed. Hoidlad võivad olla maapealsed või maasse süvistatud. Biomassi eeltöötluste võib jagada kolmeks [4]:

- 1) **mehaaniline töötlus**, mille käigus hoidlasse sisestatud biomass pärast võrkehade eraldamist (magnetseparaator) sellest kas peenestatakse või jahvatatakse ühtlaseks massiks. Osakeste optimaalne suurus on piirides 0,5...3 mm (joonis 4). Lähtematerjali peenestamine lihtsustab selle transportimist (etteandmist) ja loob paremad eeldused biogaasi tekkeks. Materjalist sorteeritakse välja võõrised ja segatakse (segur).
- 2) **eelsoojendamine** – mõningate massis sisalduvate rasvade voolavuse parendamiseks võib kasutada soojendamist;
- 3) **termiline töötlus** – sanitaarnõuete täitmise eesmärgil võib olla vajalik töödelda osa massist termiliselt.

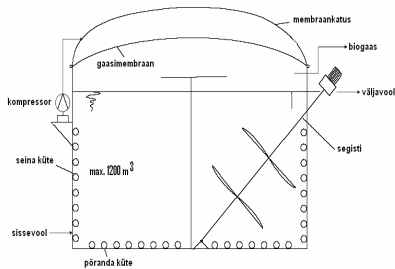
Biogaasi kääritud tankis toimub käärimisprotsess. Biomass viiakse suurde õhuvabasse ja -kindlasse mahutisse, kus hapnikuvabalt bakterite kaasabil tekib biogaas. Enamikel juhtudel soojendatakse massi sobiva töörežiimi säilitamiseks. Tootmise soojusvarustuse võib lahendada omatoodangul põhinevalt kas gaasikütte-seadmetena või kombijõujaama

jääksoojusega. Lisaks biogaasile tekib käärimisprotsessi tagajärjel kääritis veel orgaaniline jääk. Kasutatakse peamiselt kahte tüüpi kääriteid:

- 1) püstsed (joonised 3 ja 4) ning
- 2) rõhtsed (joonis 5).

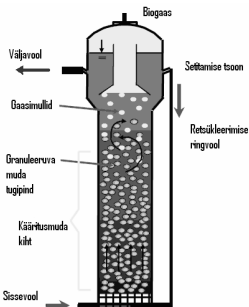
Püstsed kääritid kujutavad suuri silindrilisi mahuteid, mille maht on tavaliselt  $V = 300 \dots 1000 \text{ m}^3$ . Siiski kasutamaks ära tankide bioloogilise isepuhastumise efekti ei tohiks tangid olla suuremad kui ligikaudu 2500 kuupmeetrit. Kääritustanke valmistatakse tavaliselt armeeritud betoonist nii maapealse kui -aluse ehitisena; aga ka roostevasast terasest. Kääritisse siseneva ja seesoleva massi soojendamiseks kasutatakse küttekehi. Sisenevat biomassi soojendatakse välise küttekehaga, seesolevat kütetorustikuga reaktori seinal või valatuna põranda sisse. Soojakadude vältimiseks on mahuti soojustatud. Massi segamiseks kasutatakse erinevaid segisteid. Eraldunud biogaas hoiustatakse kääritatava massi kohal katuse all. Kääriti katuse moodustab kas jäik katus või kahekihiline membraan, milledest välimise ülesandeks on kaitsta sisemist kahjustuste eest, sisemine membraan käitub gaasimahutina. Kahe membraanikihi vahele tekitatakse rõhk, mis aitab välimisel membraanil kuju säilitada ning hoiab gaasihoidlana käituvat membraani rõhku. Käideldava massi kuivaine sisaldus on 10...15%.

Keevkihtkääritite tööpõhimõte seisneb biomassi pumpamisel teatud kiirusega põhjast ülespoole, kus plastrõngad bakteritega moodustavad keevkihi. Biomassi lagundamine toimub väga kiirelt, seetõttu kasutatakse antud süsteemi enamjaolt veepuhastites. Suurema efektiivsuse saavutamiseks retsükleeritakse osa biomassist.



Joonis 3. Püstne labasegistitega kääríti [5].

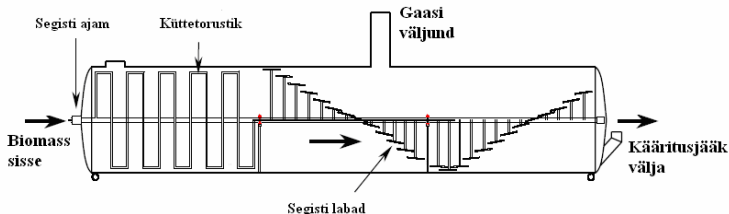
Figure 3. Vertical biogas reactor with paddle mixer.



Joonis 4. Püstne keevkihtkääríti [6].

Figure 4. Vertical upflow anaerobic sludge blanket reactor.

**Rõhtsed** kääritid on tavaliselt suhteliselt väikesed, mahuga  $V = 50 \dots 150 \text{ m}^3$ , tavaliselt mehaanilise segistiga varustatud terasmahutid. Biomass sisestatakse ühest ning jääk väljutatakse teisest otsast. Biomassi soojendatakse segisti külge paigaldatud kütteelementidega. Segistina kasutatakse mahuti pikiteljel paiknevaid võlli küljes asetsevaid mõlaseid. Kääritatav biomass teisaldatakse piki reaktorit ühtlase kiirusega. Soojakadude vältimiseks on mahuti soojustatud. Käideldava massi kuivainesisaldus on vahemikus  $15 \dots 20\%$ .

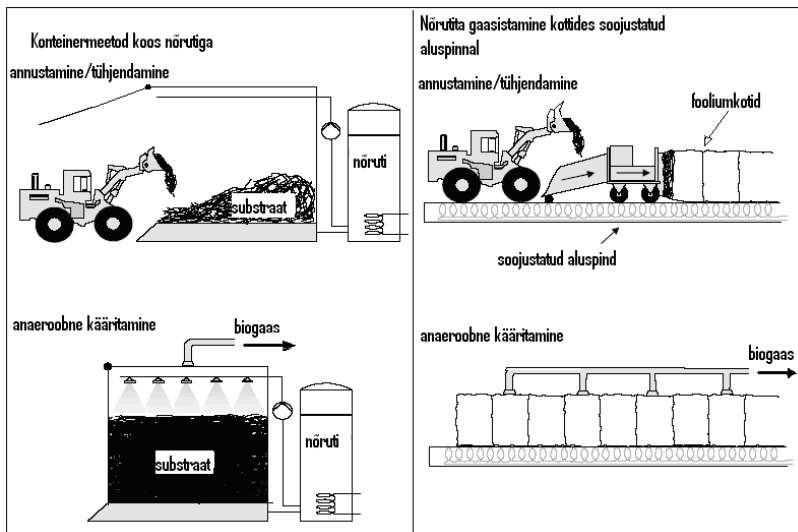


Joonis 5. Rõhtne kääríti [5].

Figure 5. Horizontal biogas reactor.

Toormassi sisseandmine reaktorisse toimub kas pumpamise teel, tigukonveieriga või laaduri abil. Viimasel juhul tuleb süsteemi sattunud õhk eemaldada, säilitamiseks tööks vajalik anaeroobsus. Etteandesüsteemi valik sõltub mahuti suurusel. Läbitootatud mass (kääritusjääk) hoiustatakse järelkääritushoidlas või setitis, millest eraldub täiendavalt biogaasi.

Biomassist gaasi tootmiseks kasutatakse ka kuivkääritamistehnoloogiat (joonis 6.), kuid see pole Euroopas eriti levinud. Peamiselt on tegemist katse- ja demonratsiooniseadmetega.



Joonis 6. Kuivkääritamise tehnoloogiad [5].

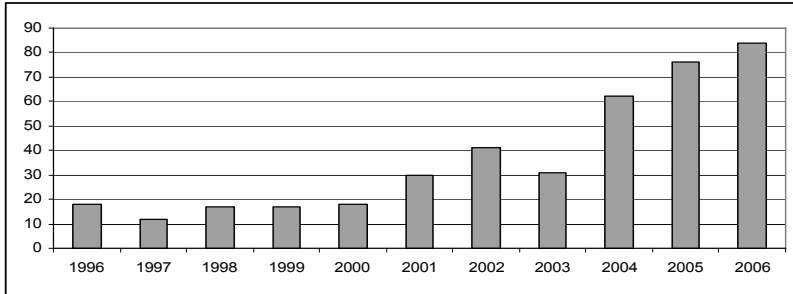
Figure 6. Technologies of dry-fermentation.

### Kokkuvõte

Võimalus kääritada orgaanilisi jäätmeid gaasi saamiseks tootmaks sellest soojus- ja elektrienergiat, on suunanud investeringud arendustegevusse ja sellest tulenevalt on viimase kümnendi jooksul biogaasialaste tehniliste lahenduste registreeringute (patentide) arv hüppeliselt tõusnud ning jätkab kasvutrendis (joonis 7) [7]. Enamik neist registreeringutest kuulub Saksamaa arendusasutustele ja ettevõtetele, kuigi viimastel aastatel on ka Austrias biogaasialaste patentide arv kasvanud. Arengutõuke on saanud masinatööstus, spetsialiseerudes konkreetset biogaasi käitlemiseks ja kasutamiseks mõeldud seadmete väljatöötamisele; ka on hoogustunud juba konkreetsetele objektidele inseneritehnilisi kompleks- ja üksiklahendusi pakkuvate büroode tegevus.

Tootmistehnoloogia valikul tuleks aluseks võtta substraadi ja kofermentide kogused ning liik. Lisaks veel kliimatingimused, kääritusjäägi laotusajad jmt. Arvestades Eestile iseloomulikke kliimatingimusi, on mõttekas rajada armeeritud betoonist soojustatud püstseid kääriteid tagamaks protsessi kulg ka talvel, mil gaasitarbimine on suurem.

Kuna Eestis kättesaadavaimad substraadikomponendid on läga ja silo, siis tuleks tehnoloogia valikul lähtuda läga ja kofermentide koos käärutamise võimalusest. Kääritusjäägi hoidla rajamisel võiks arvestada selle kinnikatmise võimalustega suurendamaks gaasiproduksiooni. Eesti oludes on võimalik laotada jääki umbes kuue kuu vältel, seetõttu peaks jäägihoidla mahutama märkimisväärse koguse materjali.



Joonis 7. Biogaasialaste tehniliste ja tehnoloogiliste lahenduste leiunduslik aktiivsus aastate lõikes.

Figure 7. Inventional activities on field of biogas technologies and techniques in 1996–2006.

## Kasutatud kirjandus

Basic information on biogas. Kättesaadav:

<http://www.kolumbus.fi/suomen.biokaasukeskus/en/enperus.html> (15.05.07)

The Biological Process of Anaerobic Digestion. Kättesaadav:

<http://www.rotaguido.it/eng/prodotti/recupero-biogas.html> (28.05.07)

Mukengele, M., Brule, M., Oechsner, H. (2006). Wheat grain and ensiled maize as substrates for biogas production. CIGR XVI Congress. – Bonn, 6 p.

Planning and Installing Bioenergy Systems (2005). James & James (Science Publishers). The German Solar Energy Society, Ecofys.

Weiland, P., Rieger, Ch., Ehrmann, Th. Evaluation of the newest biogas plants in Germany with respect to renewable energy production, greenhouse gas reduction and nutrient management. Institute of Technology and Biosystems Engineering Federal Agricultural Research Centre (FAL). Kättesaadav:

[http://websrv5.sdu.dk/bio/work%2003/Pres/Peter\\_Weiland.pdf](http://websrv5.sdu.dk/bio/work%2003/Pres/Peter_Weiland.pdf) (15.05.07)

Field, J.A., Sierra, R. High Rate Anaerobic Wastewater Treatment. University of Arizona.

Kättesaadav: <http://www.uasb.org/anaerlecl/sld001.htm> (15.05.07)

esp@cenet – European Patent Office

## **TECHNOLOGIES FOR BIOGAS PRODUCTION**

Dots J. Olt, emer prof J. Lepa, E. Jõgi, A. Menind

Estonian University of Life Sciences

Institute of Technology

### **Abstract**

This article provides an overview of different methods to produce biogas in agriculture. In Estonia, given topic is posed as environmental-friendly energy producing techniques have better subsidizing system and feasibility.

This work should give answers to questions like: what biogas is, what its main components are, of which raw materials are commonly used and their yield of biogas acquired. The range of different process temperatures is given, also chemical process description. An overview of different reactor types, mixing techniques and peripheral equipment is also given.

# EESTI ENERGIATULEVIK VAJAB OTSUSEID

Olavi Tammemäe

*Riigikontroll, Narva mnt.11a; olavi.tammemae@riigikontroll.ee*

## **Annotatsioon**

Eesti energiamajandus on suures osas üles ehitatud fossiilse kütuse, põlevkivi kasutamisele. Alljärgnevalt kirjeldan põlevkivi kasutamise tulevikuperspektiive seoses meie kütuse- ja energiamajandust suunavate strateegiliste dokumentidega ning alternatiivsete energiakandjate (sh turvas) võimalusi Eesti energiavajaduse katmisel. Oluline osa on siin energia säästmisel ning turgu reguleerivatel majandushoobadel. Meie energiatulevik vajab senisest avaramat analüüsi ning ühiskonna kaasamist avatud ja ausasse diskussiooni.

Olen veendunud, et Eesti energiamajanduse tulevikku kujundavatest otsustest sõltub paljuski meie riigi majandusedu jätkumine pikemas perspektiivis ning energeetiline varustuskindlus mängib olulist rolli Eesti riigi julgeoleku tagamisel laiemas mõttes.

*Märksõnad: kütuse- ja energiamajandus, taastuvad energiaallikad, põlevkivi kaevandamine, energiamajanduse tulevik, ökoloogiline maksureform.*

## **Sissejuhatus**

Seoses „Põlevkivi kasutamise riikliku arengukava 2007–2015” koostamisega on erinevad huvigrupid väljendanud oma seisukohti, mis kohati on üksteist lausa välistavad. Kui “rohelistest” ringkondadest tuleb üleskutseid põlevkivitootmine üldse lõpetada – mõned sooviksid seda lausa juba homsest – ning tõsta põlevkivi kaevandamisõiguse tasu tänasega võrreldes 40-kordseks, siis teised soovivad riigil näidata kõigile kaevandada soovijale rohelist tuld ja unustada põlevkivitootmise mahtude riiklik reguleerimine.

Samas on põlevkivi kaevandamise mahud suures osas ette kirjutatud Riigikogus juba 2004. aasta lõpus vastu võetud kütuse- ja energiamajanduse pikaajalises riiklikus arengukavas aastani 2015.

## **Eesti hetkeperspektiiv**

***Kütuse- ja energiamajanduse pikaajalise riikliku arengukava aastani 2015 (visiooniga 2030)*** järgi on põlevkivivaru kestvushinnangu järeldused sellised:

- Tegutsevate kaevanduste ja karjääride aktiivsest varust jätkub praeguse tarbimismahu (12 mln t/a) juures aastani 2025.

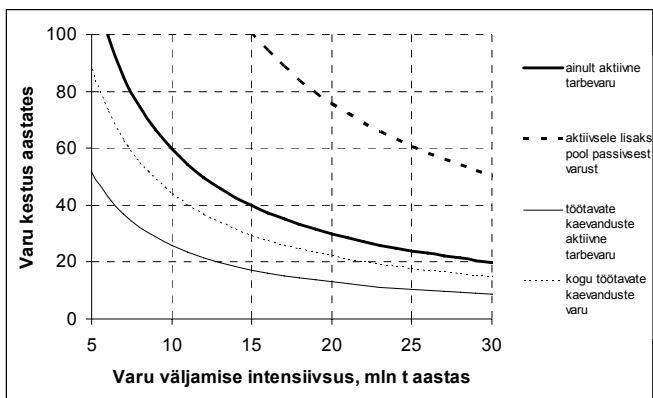


- Kui tarbimismaht ei vähene, tuleb ligikaudu 20 aasta pärast avada uusi kaevandusi, tarbimismahu kasvu korral juba varem.

Kogu põlevkivi aktiivsest varust, arvatuna lähtuvalt elektrijaamade tehnilis-majanduslikest tingimustest, jätkub praeguse tarbimismahu juures ligi 60 aastaks.

Põlevkivi kaevandamisega kaasnevate, ühiskonnas üha enam tähtsustavate sotsiaalsete mõjude täiendaval arvestamisel võib põlevkivi aktiivne varu oluliselt väheneda.

AS Eesti Põlevkivi aktiivsete tarbevarude kestvus sõltuvana aastasest tarbimisest



Taastuvate energiaallikate osakaal riigisisises brutotarbimises peab tagama põlevkivi kui Eesti riigi energiaressursi võimalikult pikaajalise kasutamise elektri tootmisel.

Elektrituruseadusel põhineva „*Eesti elektrimajanduse arengukava aastani 2015*” strateegiliseks eesmärgiks on leida optimum elektri varustuskindluse, elektri hinna ja keskkonnanahoiu vahel.

Elektrimajanduse arendamist mõjutavad järgmised eesmärgid:

- Saavutada aastaks 2010 taastuvatest energiaallikatest toodetud elektri osakaaluks 5,1% ning aastaks 2015 vähemalt 8% brutotarbimisest;
- Saavutada aastaks 2020 elektri- ja soojuse koostootmisjaamades toodetud elektri osakaaluks 20% brutotarbimisest;
- Avada Eesti elektriturg 35% ulatuses aastaks 2009 ja täielikult aastaks 2013;
- Hoida aastani 2010 primaarenergia tarbimise maht aasta 2003 tasemel.

Taastuvatel energiaallikatel põhineva elektritoodangu ressursipõhine jaotus aastatel 2005–2015:

	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>
Tuul	1,0%	2,2%	4,5%
Biokütused	0,2%	2,5%	3%
Muu	0,3%	0,4%	0,5%

Lugedes riiklikuks prioriteediks põlevkivi kasutamist siseriiklikuks tarbeks elektri, soojust ja põlevkiviõli tootmiseks ning tsemenditööstuses, ei ületaks vajalikud kaevandamismahud vähemalt aastani 2015 15 mln tonni piiri. Sellele lisanduvad Eesti Energia ärikavad elektrienergiat eksportida ning ärieringkondade huvid põlevkivist õli toota.

Riigile strateegiliselt olulise energiakandja, põlevkivi kaevandamise lisamiljonite tonnide lubamine *põlevkivi kasutamise riikliku arengukava 2007–2015* raames peaks sõltuma sellest, millises ulatuses on neid ärikavasid võimalik rakendada avaliku huvi teenistusse. Paraku ei võimalda tänane õigusruum meie liberaalse turumajanduse tingimustes põlevkivikasutuse seesugust riiklikku reguleerimist.

Iga otsus, mis vähendaks põlevkivi kaevandamise mahte alla 15 mln tonni aastas, toob endaga kaasa vajaduse korrigeerida riigi seniseid põlevkivipõhiseid kütuse ja energiamajanduse kavasid.

**Eelmainitud riiklikud strateegilised kavad vajavad juba täna korrigeerimist, kuna neis ei kajastu ülalmainitud ärieringkondade huvid.** Ka ei mahu neisse kavadesse kuidagi peaministri ning Eesti Energia aktiivne tegevus tuumaenergeetika vallas Ignalina suunal. Sellised avalikku huvi oluliselt puudutavad otsused nõuavad avalikkuse laialdast kaasamist ning sisulist poliitilist diskussiooni, mis tänaseni kahjuks puudub.

Kui lõviosa Eesti elektrist tootvate Narva elektrijaamade asjus on avaldatud kahtlusi just julgeolekuriskidega seonduvalt – “tark talumees ei pane kunagi kõiki mune ühte korvi” – siis Ignalina projektiga ühinedes viime selle „korvi” veel lisaks naabrite juurde. Kuivõrd suudame sellega tagada Eesti energiavarustuse stabiilsuse; kuivõrd suudame maandada asümmeetrilisi julgeolekuriske (sh majandusriske) – neile küsimustele peaksid vastama eksperdid.

Energiamajandust puudutavad otsused on sisuliselt pikaajalised miljardikrooni-otsused. Tuumaenergiast rääkides pole meil isegi lähteandmeid selle majandusliku tausta analüüsimiseks. Rääkides kuludest, tuleb jaama rajamise, kütuse- ja jooksvatele kuludele lisada ka tuumajäätmete käitlemise ning jaama kunagise sulgemise/likvideerimise kulud. Ignalina uue tuumajaama ehitamise eelselt sealse senise tuumajaama likvideerimisega saame ilmselt maailmas esimese teadmise selle maksumusest, seega ka esimesed lähteandmed majandusanalüüsiks.

### **Otsuseod, mis mõjutavad meie kütuse- ja energiamajandust pärast aastat 2015 – kuidas ja kuhu investeerida miljardeid kroone maksumaksja raha – tuleb teha juba lähema paari aasta jooksul.**

Põlevkivienergeetikaperspektiivi oleks meil veel maksimaalselt 40–50 aastaks eeldusel, et senised kasutusmahud ei kasva. Samas tuleb arvestada põlevkivi tootmisega kaasnevat oluliste keskkonna- ja sotsiaalmõjudega.

Kuigi Eesti teadlased omavad maailmas unikaalset põlevkivienergeetikaalast kompetentsi, tasub põhjalikult kaaluda, kui võrd otstarbekas on põlevkivi suhteliselt väheefektiivne põletamine ahjus võrreldes põlevkivikeemia erinevate võimalustega selle maavara vääristamiseks.

### **Alternatiivid**

Euroopa Liidu arenenumad riigid teevad jõupingutusi taastuvenergeetika arendamisel. Eestis oleksid arvestatavad tuule- ja bioenergia. Päikeseenergia kasutamine on täna veel liialt kulukas, hüdroenergiat pole Eesti tingimustes põhjust “rohelisteks” nimetada, kuna kaasnev keskkonnamõju on toodetud kilovattidega võrreldes ebaproportsionaalselt suur.

Tuulejaamade tasuvusaeg on meie tänases majandusruumis keskmiselt kümme aastat eeldusel, et tuuleenergia ebastabiilsust kompenseerivad võimsused ehitatakse riigi poolt. Samas võib tuuleparkide nn bilansielekttri lihtsalt sisse osta, mis on ilmselt odavam võimalus.

Bioenergia vallas on mõistlik vaadata põhjanaabrite toimetamisi. 2001. a tagati Rootsis 60% maapiirkondade soojavarustus bioküttega. 2010. a on kavas biomassist saada 10 TWh elektrit,

sellele järgneval aastakümnel juba 20 TWh (2003. a oli Eestis elektri sisemaine lõpptarbimine 5,57 TWh).

### **Ebaselgus turbavaru määratlemisel**

Eestil on suur turbavaru, mille kasutamist reguleerib säästva arengu seadusest tulenev regiooniti kehtestatud kaevandamise kvoot. Praeguseks hinnatud kasutatav turbavaru on 775 mln tonni. Eestis on viimastel aastatel jäänud turbatoodang vahemikku 0,7–1,5 mln tonni. Esimesed uuringud turba juurdekasvu hindamiseks on meile andnud *ca* 0,5 mln tonni aastas. Turbast toodetud elektrienergia osatähtsus on 0,2% kogutoodangust ning tänane õigusruum ei anna võimalust selle oluliseks kasvamiseks.

Põllumajanduslikel ja metsanduslikel eesmärkidel kuivendatud aladel väheneb turbavaru lagunemise tõttu igal aastal 2,5–3 mln tonni võrra (suurendades proportsionaalselt CO<sub>2</sub> hulka atmosfääris). Looduskaitsealistest eesmärkidest lähtuvalt tuleks soodustada turba kaevandamist kultuuristatud ja varem kuivendatud aladelt.

Arutlused turbavarude säästliku kasutamise üle lähtuvalt turbast kui taastuvast maavarast on viinud tõdemuseni, et turvas on küll uuenev maavara, ent reaalse majandustegevuse planeerimise ajaskaalas, mis hõlmab lähemad paarkümmend kuni 100 aastat, on selle käsitlemine taastuvana anakronistlik või demagoogiline.

Seda silmas pidades on loogiline soode, õigemini kõigi turbaalade säästliku majandamise ning kaitse kavandamisel asendada senine vastakaid arvamusi ning hinnanguid põhjustanud, turba aastasel juurdekasvul põhinev kontseptsioon adekvaatsemaga.

Arvestades seda, et Eesti on Soome järel Põhja-Euroopa sooderikkamaid maid ja meie turbavaru on küllaltki suur, samas aga energiavajadus järjekindlalt kasvab, on mõistlik erinevate ametkondade ja huvirühmade vahel leida kompromiss, mis arvestaks nii turbaalade kaitsmise vajadust kui ka majanduse nõudlust turba kaevandamise järele.

Toetumaks seejuures objektiivsetele argumentidele, on hädavajalik jätkata 1997. a. alustatud Eesti märgalade looduskaitseliste väärtuste inventuuri, hõlmates sellega kõik Eesti sood, laiemas plaanis aga kõik turbaalad.

Inventuuri tulemuste alusel tuleb kokku leppida, millised soolad võetakse kaitse alla ja millistel on lubatud majandustegevus. Majanduslikuks kasutamiseks lubatud soode jaoks tuleb omakorda sätestada, millised tegevused igas konkreetses soos on aktsepteeritavad. Eristades niiviisi sood, milles on tööstuslikku huvi pakkuv turbalasund, tuleb täpsustavalt määrata turbavaru suurus.

Turbavaru säästlik kasutamine eeldab riiklikku otsustamist, millele peaks tingimata eelnema laiapõhjaline erinevate huvirühmade ja institutsioonide vaheline arutelu, et selgitada

- milline on aastane turbatootmise lubatav kvoot, st millise aja jooksul oleme nõus Eesti nn aktiivse turbavaru ammendama;
- milliseks otstarbeks seda tehakse;
- kelle poolt ja mis tingimustel seda tehakse, ehk teisisõnu – kes ja millist tulu sellest saab. Praegu kaevandatakse turvast peamiselt aiandusturbana väljaveoks teistesse riikidesse (ca 90% toodetavast mahust), suurimad turba kaevandajad on välismaised ettevõtted.

Kirjeldatud suunad kajastuvad Vabariigi Valitsuses kinnitatud ning hetkel Riigikogus menetletavas looduskaitse arengukavas aastani 2030:

- Valdkond A – Loodusmaastikud; eesmärk A-4 “kõrge loodusväärtusega soode säilitamine”;
- Valdkond B – Kultuurmaastikud; eesmärk B-4 “soode loodusvarade säästlik kasutamine”;
- Valdkond C – Rikutud maastikud; eesmärk C-2 “rikutud turbaalade ökoloogilise seisundi parandamine”.

### **Meie ühiskonnas hetkel puudub ühine arusaamine Eesti energiamajanduse tulevikust**

Põlevkivienergeetika vastased räägivad küll alternatiivkütustest, kuid konkreetselt minnes selgub, et tuulepargid rikuvad meie maastike ilmet ja häirivad lindude rännet; raiemahud on niigi juba liialt suured ja ohustavad meie metsade liigirikkust; turba kaevandamise mahud ületavad säästva arengu seadusest tulenevaid piiranguid.

Samas oleks võimalik nt taastuvatest allikatest toodetava elektri osakaalu, mis kehtiva elektrimajanduse arengukava järgi peab aastaks 2015 ulatuma vähemalt 8%-ni, kasvatada lähikümnenditel mitmeid kordi suuremaks. Veelgi enam – Eestil oleks võimalus pöörata oma “energeetikalaev” põlevkivikursilt taastuvate allikate kursile.

Euroopa Komisjon soovib võtta aastaks 2020 liidu siseselt kohustusi neljas valdkonnas:

- vähendada CO<sub>2</sub> heitkoguseid vähemalt 20% võrra ja püüda kehtestada rahvusvahelistel läbirääkimistel arenenud maadele 30%-line heitkoguste vähendamise kohustus võrreldes Kyoto protokollis kavandatud baasaastaga 1990;
- saavutada taastuvate energiaallikate baasil toodetud elektri osakaaluks liidu sisetarbimises vähemalt 20%;
- saavutada 20% energiasäästu;
- suurendada biokütuse osakaal tarbitavast mootorikütusest 10%-ni.

Need ambitsioonikad eesmärgid hakkavad ühel või teisel moel mõjutama ka Eesti energeetika strateegilisi valikuid. Peame endile aru andma, et energiatootmisega kaasneb alati olulisi mitmesuguseid mõjusid. Meil tuleks nüüd kokku leppida, milliseid neist oleme valmis energia kasutamise nimel taluma.

Veel tuleb meil mõista, et energia pole kunagi odav, põlevkivienergia senine odavus on vaid näiline – ühiskond maksab sellele mitmesuguseid väliskulusid kattes sisuliselt peale. Energiatootmise hajutamine, mis muuhulgas maandaks ka julgeolekuriske, eeldab olulisi investeeringuid põhivõrgu uuendamiseks.

Samas võib poliitilise otsusega odavaks teha mistahes teise energiatootmise viisi. Oma rolli hakkavad siin mängima ka süsinikukaubandusest laekuvate vahendite kasutamise otsused.

Peale energiatootmise on meile veel üks oluline valdkond, millest seni liialt vähe räägitud – energia säästmine! Eesti tänane majandus on energiat raiskav, oleme oma põhjanaabritest energeetiliselt kordades!! väheefektiivsemad. Kuivõrd jätkusuutlik saab nii jätkates olla meie majandus pikemas perspektiivis?

### **Kas odavat energiat ongi mõtet kokku hoida?**

Ökoloogiline maksureform, mille eesmärk on maksukoormust nihutada tööjõu maksustamiselt loodusressursi kasutamise ja saastamise maksustamisele, annab tootjale signaali, et mõistlik on investeerida ressursi (sh energiat) säästvasse ning puhtamatesse tehnoloogiatesse. Ka siin tuleb pidevalt jälgida ühiskonna valmidust kaasa tulla – liigpikad või ka kiired sammud võivad viia komistamise või kukkumisenigi. Samas vajab maksureform jätkuvat edasiarendamist ning laiendamist ka kütuse- ja transpordisektoritesse.

## **Kokkuvõte**

Meie energiatulevik vajab senisest avaramat analüüsi ning ühiskonna kaasamist avatud ja ausasse diskussiooni. Poliitikutel tuleb tõsta sihiku kõrgus 4 aastastest valimisperioodist vähemalt 40–50 aasta kaugusele tulevikku.

Võimalikele rahvaküsitlustele peab eelnema kõigi alternatiivide ja nende sotsiaalmajanduslike ning keskkonnamõjude põhjalik tutvustamine.

Olen veendunud, et Eesti energiamajanduse tulevikku kujundavatest otsustest sõltub paljuski meie riigi majandusedu jätkumine pikemas perspektiivis ning energeetiline varustuskindlus mängib olulist rolli Eesti riigi julgeoleku tagamisel laiemas mõttes.

## **Kasutatud kirjandus**

Kütuse- ja energiamajanduse pikaajaline riiklik arengukava aastani 2015. RTI, 23.12.2004, 88, 601

Eesti elektrimajanduse arengukava 2005–2015. RTL, 18.01.2006, 7, 134

Põlevkivi kasutamise riiklik arengukava 2007–2015, eelnõu.  
<http://www.envir.ee/orb.aw/class=file/action=preview/id=306730/Arengukava.pdf>

Eesti looduskaitse arengukava aastani 2035, eelnõu.  
[http://www.envir.ee/orb.aw/class=file/action=preview/id=181566/Looduskaitse\\_arengukava100506.pdf](http://www.envir.ee/orb.aw/class=file/action=preview/id=181566/Looduskaitse_arengukava100506.pdf)

Hytönen, J. 2006. Use of agricultural plant based biomasses and residues in energy production in Scandinavian area. [http://www.chem.jyu.fi/ue/frame\\_left/UEsem2005-Hytonen.pdf](http://www.chem.jyu.fi/ue/frame_left/UEsem2005-Hytonen.pdf)

## **THE ENERGY FUTURE OF ESTONIA NEEDS DECISIONS**

*Olavi Tammemäe*

National Audit Office of Estonia

The aim of current paper is to analyse the trends in the current energy policy and related expectations from different stakeholders. The oil shale seems to stay the most important energy resource for the next 20...25 years, but Estonia is lacking for reliable long term analyses of alternatives with related socio-economical and environmental impact analyses. As these impacts influences on all population the appropriate wide range public consultations should be held before any strategic decisions will be made on energy field. The current status of peat as a renewable energy resource should be re-evaluated as the annual growth of the peat layer in already excavated areas does not ensure the renewal of used recourse within reasonable for human kind time period.

The successful long term development of Estonian economy depends very much on strategic decisions made upon our energy future and the security of energy supply plays an important role in ensuring security of the state in wider perspective.



# VERTIKAALSE, KAHEASENDILISELT TOIMIVA HELIOFARMI

## OMADUSED

Teolan Tomson

TTÜ materjaliteaduse instituut. Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn,

e-post: teolan@staff.ttu.ee

### Annotatsioon

Kahepositsiooniliselt eksponeeritava heliokollektori või PV-mooduli efektiivsuse suurenemine – kasu (*gain*) heliofarmis ei realiseeru nii suurelt kui üksikul seadmel. Vertikaalse (fassaadi) farmi PV-moodulite äärmist rida varjutab siirderežiimis fassaadi nurk, sisemised read on varjutatud naaberriidade poolt. Artiklis esitatakse varju siirde lihtsustatud tasapinnalise mudeli juures tehtud teoreetilise uuringu ja selle eksperimentaalse kontrolli tulemused. Võrreldes üksiku kahepositsiooniliselt eksponeeritava heliokollektori või PV-mooduliga väheneb farmi kasu ~5% võrra, jäädes vertikaalse lõunasuunalise farmi jaoks väärtusele ~1,23.

*Märksõnad: vertikaalne heliofarm, kahepositsiooniline eksponeerimine, kasu.*

### Sissejuhatus

Maailma, eriti Euroopa Ühenduse mure energianappuse eest järgmise mõnekümne aasta pärast sunnib otsima teid taastuva energia tehnoloogiate, eriti PV-helioenergeetika, arendamiseks. Kuna tegemist on hajutatud energia allikaga, siis energia kogumiseks tarvilik pind on väga suur ja ära tuleb kasutada kõik pinnad, mis päikest „näevad“, sealhulgas majade lõunapoolsed fassaadid (Nordmann, 2004). Eestis on päikese keskmine suvine kõrgusnurk päeva (6:00–18:00) vältel 28,5°, seega töötavad lõunapoolsed fassaadid piisavalt hästi. Töödes (Tomson ja Tamm, 2005, Tomson, 2006) tõestatakse, et üksiku vertikaalse PV-mooduli<sup>1</sup> kahepositsiooniline eksponeerimine tagab fikseeritud (lõunasuunalise) asendiga võrreldes keskmiselt 30% kasu (*gain*=1,3 – saagise suurenemine). Kuna farmi tingimuses moodulite naaberread piiravad päikesekiirguse vaba juurdepääsu, farmis nii suurt efekti oodata ei ole. Küll aga väärrib efekti suurust täpsemat uurimist.

---

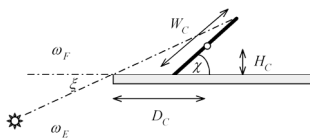
<sup>1</sup> Eksponeerimise mõttes soojuslik heliokollektor ja PV-moodul on ekvivalentsed. Kuna vertikaalsed PV-farmid on tõenäosemad, siis artikkel meenutab eeskätt neid. Lühiduse mõttes räägime PV-mooduli asemel „moodulist“.

## Teoreetilised lähtekohad

Lihtsustava eeldusena me loobume ääreefekte vaatlemast, so vaatleme elemendi või kollektori tööd, mis asub lõpmata pika moodulite rea keskel. See on kõige rangem juhus: ääreefektid vaid kiiritavad kollektorit, kui päike ümber naaberrea nurga sellele paistab ja tõstavad saagist võrreldes teoreetilise ennustusega. Lihtsustava eeldusena me loobume esialgu arvestamast ka sellega, et muundustegur  $\eta$  on peale kiiritustiheduse väärtuse (otsekiirguse) kohtumisnurga  $\Theta_T$  pidev funktsioon katte läbipaistvuse arvel (Solar Energy, 2001). Alternatiiv oleks nn nähtavuskoonuse kasutamine, lugedes kiirituse eksisteerivaks vaid siis, kui kohtumisnurk  $\Theta_T < 62^\circ$ , mis tuleneb (kollektori või) mooduli parameetri  $\tau\alpha$  nurgasõltuvuse  $\tau\alpha(\theta_T) = 1 - \tan^{1/r}(\Theta_T/2)$  aproksimeerimisest hüppefunktsiooniga. Tööperioodina käsitame ajavahemikku aprillist septembrini, sest 82% Eesti päikeseenergiast langeb nimetatud vahemikku (Russak ja Kallis, 2003) ja ülejäänud aeg on (helio)energeetiliselt tähtsusetu. Eraldi tuleb käsitada otsekiirgust ja hajukiirgust (töös me ignoreerime peegeldunud kiirgust, mis avaldab vertikaalpinnale toimet talvetingimustes), sest farmis on nende omastamistingimused erinevad.

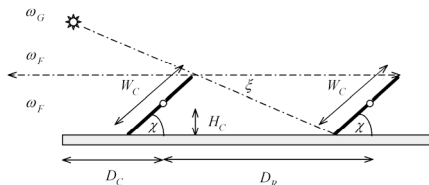
## Vertikaalse heliofarmi tasapinnaline mudel

Heliofarmi skeem (vaade pealt) on kujutatud joonistel 1 ja 2. Vaba mooduli ja farmi moodulite äärmise rea erinevus (joonis 1) tuleneb fassaadi serva varjestavast toimest. Otsekiirgus langeb mooduli ülemisele servale hommikul kellanurga  $\omega_E$  juures ning alles kellanurga  $\omega_F$  juures on mooduli kogu pind kiiritatud. Ajavahemikus, mis kulub päikesel nurga  $\xi = (\omega_F - \omega_E)$  läbimiseks, libiseb vari piki äärmist moodulit ja selle



Joonis 1. Heliofarmi äärmine moodulite rida.

Figure 1. Edge row of PV modules of the vertical solar farm.



Joonis 2. Heliofarmi moodulite sisemine rida.

Figure 2. Inner row of PV modules of the vertical solar farm.

reaktsioon sõltub elementide vastastikusest ühendusest. Nurk  $\omega_F$  on selline, mil otsekiirgus on suunatud piki fassaadi. Kui on tegemist elementide tulbaga piki moodulit, siis iga järgmine tulp rakendub töösse vastavalt kiirituse ilmumisele. Võime lugeda, et mooduli väljundvool kasvab proportsionaalselt valgustatud pinnale. Kui elemendid on ühendatud põiki moodulit (mis on vähetõenäoline), piirab viimane valgustamata elementide rida väljundvoolu, mis tekib hüppeliselt viimase rea kiiritamisel. Soojusliku heliokollektori käitumine pole uurimise selles staadiumis ennustatav, kõik sõltub kollektori sisemisest ehitusest ja soojuskandja ringlustingimustest. Eriti rööptorudega kollektori juures on karta sisemise ringluse teket ja kui sundringlust ei ole, ei tooda kollektor siirderežiimis tõenäoliselt sooja (vett). Joonisel 1 on kasutatud järgmisi tähistusi:  $W_C$  – mooduli laius;  $H_C$  – mooduli pöördetelje kõrgus fassaadist;  $D_C$  – mooduli pöördetelje kaugus fassaadi nurgast ja  $\chi$  – mooduli pöördenurk. Joonisel 2 on kasutatud täiendavalt järgmisi tähistusi:  $\omega_G$  – kellanurk, mil sisemine rida on (otsekiirguse poolt) täielikult kiiritatud, siin  $\xi = (\omega_G - \omega_F)$ . Varjusiirde ajavahemikus, mis kulub päikesel nurga  $\xi$  läbimiseks, libiseb vari piki sisemist moodulit, mis käitub analoogiliselt äärmisega. Siin on  $D_R$  moodulite pöördetelgede omavaheline kaugus. Õhtupäikeses suhtes on olukord peegelpildina ja seda ei tarvitse eraldi kirjeldada.

### **Farmi kasu (*gain*)**

Farmi kasu määratleme farmi sisemise rea mooduli kasuna, sest (suures) farmis on see prevaleeriv moodul. Kasu määramiseks kasutame otsesest meetodit: otsene tähendab suhte leidmist pööratavate moodulitega farmi sisemise mooduli toodangu ja optimaalsesse asendisse fikseeritud mooduli vahel  $gain = E_F/E_O$  kWhm<sup>-2</sup>/kWhm<sup>-2</sup>.  $E_F$  on farmi ja  $E_O$  on üksiku optimaalse asendiga mooduli energiatoodang mooduli pinnauhiku kohta. Uurimuse hilisemates staadiumides, mis pöörab tähelepanu heliofarmi majanduslikkusele, tuleb ilmselt määrata ka vastav suhe farmi kogupinna kohta. Kahtlemata pakub huvi farmi kasu võrdlemine üksikult seisva kahe diskreetse asendiga mooduli puhul, mille kasu  $gain = E_S/E_O$  kWhm<sup>-2</sup>/kWhm<sup>-2</sup>. Siin on  $E_S$  üksiku kahe diskreetse asendiga mooduli toodang. Tuleb silmas pidada, et farmi moodulite äärmised tulbad on paremini kiiritatavad ja selle asjaolu arvestamine (kui seda teha) parandab farmi kasu.

### **Farmi äärmise mooduliterea töörežiim**

Meid huvitab mooduli kiiritamise algushetk ja ajavahemik, mille jooksul (otsekiirguse poolt põhjustatud) vari üle mooduli laiuse libiseb. Aeg päikesetõusust kuni nimetatud algushetkeni

on kasutu selles mõttes, et moodul ei toimi üldse (v.a hajukiirguse arvel<sup>2</sup>) ja varju ülelibisemise ajavahemiku (edaspidi varjusiire) vältel mooduli väljundvool muutub proportsionaalselt (kogukiirguse väärtuse ja) kiiritatava pinna laiusega.

Määramaks heliofarmi põhimõttelisi omadusi, lähtume farmi tasapinnalisest mudelist (joonis 1).  $\xi = (\omega_E - \omega_F)$

$$W_C \sin(\chi) = \tan(\xi) \cdot (D_C + W_C \cdot \cos(\chi)/2),$$

millest

$$\xi = (\omega_E - \omega_F) = a \tan(W_C \cdot \sin(\chi) / (D_C / W_C + \cos(\chi)/2)) \quad (1)$$

Valem on universaalne ja kehtib ka lõunasuunast erinevatele fassaadidele. Kiirituse algushetk ja varjusiirde kestus suurenevad, kui mooduli laius kasvab ja pööramisnurk suureneb. Varjusiirde kestus väheneb, kui mooduli kaugus fassaadi nurgast suureneb ja lõpmata pika fassaadi puhul pole pööramisnurk või mooduli laius enam olulised.

Seega on kiirituse algushetk ja varjusiirde kestus kahe muutuja funktsioonid, sõltudes mooduli kauguse ja laiuse suhtest ning pöördenuurgast.

Tabel 1 kirjeldab kiirituse algushetke kellaaja järgi lõunasuunas orienteeritud fassaadi jaoks.

Äärmine moodul on täiesti kiiritatud siis, kui päikese asimuut ühildub fassaadiga.

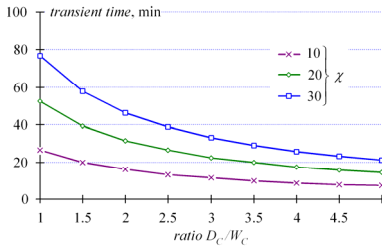
Joonis 3 kirjeldab äärmise moodulitrea teoreetilist varjusiiret, mis on märgatava pikkusega, joonis 4 illustreerib sama, mis on mõõdetud eksperimendil  $-10^\circ$  asimuudiga fassaadi jaoks.

Tabel 1. Pööratud PV mooduli kiirituse algushetk lõuna suunalisel fassaadil.

Table 1. Start of the irradiation of the deflected PV module on the south-faced wall.

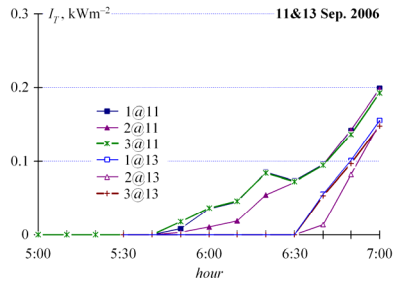
$\chi$	$D_C / W_C$			
	1	1.5	2	2.5
-10	5h24'	5h36'	5h42'	5h48'
-20	4h48'	5h12'	5h24'	5h30'
-30	3h54'	4h36'	4h54'	4h54'

<sup>2</sup> Mõõtmised näitasid hajukiirguse väga madalat taset päikesetõusu ja loojangu ümbruses, mistõttu võime teoreetilistes prognoosides hajukiirgust enne algushetke ignoreerida.



Joonis 3. Äärmise moodulite rea varjusiirde teoreetiline kestus.

Figure 3. Duration of the transient of the shadow on the edge column.



Joonis 4. Otsekiirgus idapoolsel vertikaalsel moodulil @ $D_C/W_C=3$  ja  $\chi=30^\circ$ .

Figure 4. The beam irradiance on the vertical eastern edge column @ $D_C/W_C=3$  ja  $\chi=30^\circ$ .

Joonis 4 on parema loetavuse huvides moonutatud: 13nda kuupäeva kiiritustiheduse diagramm on kujutatud hilinenult 30 minuti võrra, so kiiritustiheduse tegelik tõus algab 6:00. Eksperimentaalne varjusiire (mida deformeerib hommikune pilvitus või udu) jääb märksa lühemaks teoreetilisest.

Andur 1 modelleerib idapoolse mooduli välisserva, andur 2 mooduli siseserva ja 3 on vaba (üle fassaadi) asetsev andur. Teooriakohaselt peab anduri 2 kõver hilinema anduri 1 suhtes, mida eksperiment ka kinnitab. Teooria eeldas horisontaalset varjusiiret, kuid paralleelse naabercorpuse varjestava toime tõttu avaneb farmi mudel päikesele hommikuti alles siis, kui viimane on tõusnud üle naaberhoone katuse. See on – hommikuti on tegelik varjusiire pigem vertikaalne, mis mõjutab mõõtetulemust. Õhtune varjusiire toimub teooriaga paremini kooskõlas, sest läänesuunas on horisont vaba. Eksperiment erineb teooriast ka selle poolest, et andurid pole punktikujulised ega saa seepärast asetseda mooduli servades. Arvestades andurite keskpunktide vahet, on tegelik suhe  $D_C/W_C$  alati suurem kui deklareeritud väärtus.

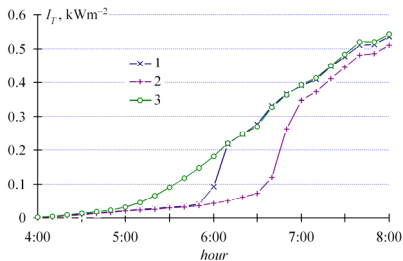
### Farmi sisemise moodulite rea töörežiim

Ka siin huvitavad meid samad omadused: varjusiirde algus ja kestvus. Lähtume ka siin farmi tasapinnalisest mudelist (joonis 2). Joonise geometriast leiame:

$$\xi = \omega_G - \omega_F = a \tan(2H_C / (D_R - W_C \cdot \cos(\chi))), \text{ millest teisendades leiame}$$

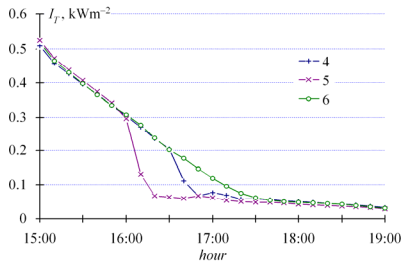
$$\xi = a \tan(1 / ((D_R / W_C) \cdot (1 / \sin(\chi)) - 1)) \quad (2)$$

Seega on päikese liikumise nurk (ja varjusiirde kestus) ka siin kahe muutuja funktsioon, sõltudes moodulite vahe ja laiuse suhtest ning pöördenurgast. Sisemise mooduli kiiritus (otsekiirgusega) algab siis, kui päikese asimuut ühildub fassaadiga. Joonised 5 ja 6 illustreerivad eksperimentaalset varjusiiret hommikul ja õhtul.



Joonis 5. Hommikune varjusiire  $@D_R/W_R \approx 2$ ,  $\chi = 15^\circ$ .

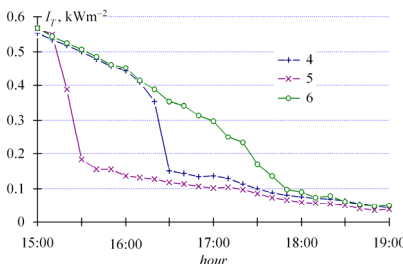
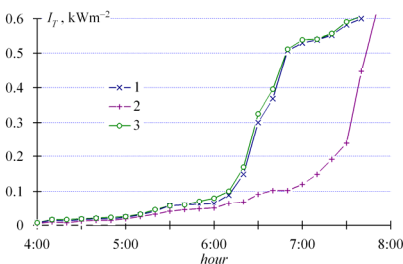
Figure 5. The transient shadow in the morning  $@D_R/W_R \approx 2$ ,  $\chi = 15^\circ$ .



Joonis 6. Õhtune varjusiire  $@D_R/W_R \approx 2$ ,  $\chi = 15^\circ$ .

Figure 6. The transient shadow in the evening  $@D_R/W_R \approx 2$ ,  $\chi = 15^\circ$ .

Joonised 5 ja 6 on ehitatud üldistatud päeva kohta vahemikus 15.–16. mai 2006 tingimusel  $D_R/W_R \approx 2$  ja  $\chi = 15^\circ$ . Üldistatud päev tähendab seda, et vahelduva pilvituse tõttu on kolmest järjestikusest päevast nopitud MAX-funktsiooni kasutades suurimad mõõdetud väärtused. Vastasel korral poleks olnud võimalik sujuvat siirdeprotsessi esitada. Andurite 1–3 tähendus on sama, mis ülal, andur 4 modelleerib läänepoolse mooduli välisserva, andur 5 selle siseserva ja andur 6 on läänepoolne vaba andur. Joonised 7 ja 8 kujutavad sama siirdeprotsessi, kui  $D_R/W_R \approx 2$  ja  $\chi = 30^\circ$ . Jooniselt 7 nähtub, et eksperimendi jooksul pole õnnestunud tabada päikeselist hommikut, sest andurite 1 ja 3 jooned langevad kokku, mis viitavad varasele pilvekattetele.

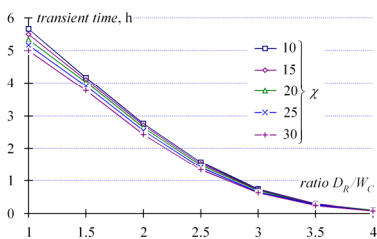


Joonis 7. Hommikune varjusiire @ $D_R/W_R \approx 2$ ,  $\chi = 30^\circ$ .

Figure 7. The transient shadow in the morning

$$@D_R/W_R \approx 2, \chi = 30^\circ.$$

Ka siin on kasutatud üldistatud päeva, kuid vahemikus 3.–5. juunini. Kahenädalase ajavahe tõttu on varjusiirde algus (õhtul lõpp) mõnevõrra erinevad, kuid oluline on siirdeprotsessi kestuse muutus vähemast (@  $\chi = 15^\circ$  ca 1 h) kuni suuremani (@  $\chi = 30^\circ$  ca 1,5 h), mis kvalitatiivselt langeb kokku teoreetilise ennustusega (joonis 9). Tuleb arvestada ka seda, et eksperimendil registreeritakse kiiritustaseme 10 minuti keskvaartused ja siirde põlv hügustub. Teoreetilisest analüüsist (joonis 9) selgub, et siirde kestuse määrab eeskätt moodulite omavaheline vahemaa, pöördenurk pole esmaselt oluline. See lubab mõnel juhtumil varjusiiret lihtsustatult käsitada vaid ühe muutuja (suhte  $D_R/W_R$ ) funktsioonina.



Joonis 9. Teoreetiliselt arvatud varjusiire sisemisel moodulil.

Figure 9. Calculated duration of the transient time of the shadow.

eeltakistuste valikuga täpselt ühesugusele tundlikkusele seadistatud mõõtekanaalid jooksid eksperimendi vältel märgitud ulatuses lahku.

### Efekttiivne otsekiirgus farmis

Siinjuures lähtume sisemisest reast, mis (suurte) farmide juures on kasu määravaks teguriks. Kui päikese kellanurk on väiksem kui  $\omega < \omega_F$  (õhtul  $\omega > \omega_F + 180^\circ$ ), siis otsekiirgus moodulit ei

Joonis 8. Õhtune varjusiire @ $D_R/W_R \approx 2$ ,  $\chi = 30^\circ$ .

Figure 8. The transient shadow in the evening

$$@D_R/W_R \approx 2, \chi = 15^\circ.$$

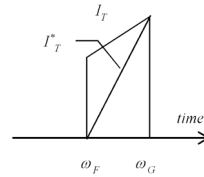
Joonisel 10 on kujutatud eksperimendi foto vaatega läänepoolsele moodulile. Esiplaanil on läänepoolne varje, mis on läänepoolse mooduliterea makett.

Ülemised kaks andurit on vabad andurid, mida naaberrida otsekiirguse eest ei varja.

Experimendil kasutati Taani firma SolData püranomeetreid, mis on tundlikud, kiiretoimelised, varustatud värsketete areerimispassidega, kuid mis eksploatatsioonis siiski osutusid paari protsendi ulatuses ebastabiilseteks: alul



Joonis 10. Eksperimentaalne mõõtestend TTÜ  
*V õppekorpusse seinal asimuudiga  $-10^\circ$ .*  
 Figure 10. Experimental stand of the measurements on the  
 wall of 5-th building of TTU with the azimuth  
 $-10^\circ$ .



Joonis 11. Sisemise mooduli varjusiirde  
 skeem.  
 Figure 11. Diagram of the transient of the  
 shadow on the inner module.

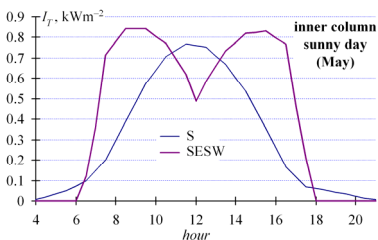
kiirita. Kui päikese kellanurk  $\omega > \omega_G$  hommikul ja  $\omega < (\omega_F + 180^\circ - \xi)$  õhtul, siis otsekiirgus pääseb moodulit kiiritama täiel määral, st kiiritustingimused ei erine tavalise pööratud asendiga mooduli omast. Varjusiirde jooksul efektiivne kiiritustihedus  $I_T^*$  muutub lineaarselt<sup>3</sup> nullist selle väärtuseni, mis otsekiirgusel on täiskiirguse avanemise hetkel  $I_T(\omega_G)$  (joonis 11). Alumise kolmnurga pind kirjeldab seega mooduli poolt omastatavat päikeseenergiat, ülemise kolmnurga pind aga seda päikeseenergiat, mida moodul varju tõttu vastu ei võta.

Hommikul siirdeaja kestel kaotsiminev energia on seega  $\Delta E = \xi \cdot I_T(\omega_F) / 2$ . Sümmeetrilisest kiiritusdiagrammist järeldub lõunasuunalisele fassaadile sama energiakadu õhtupoolikul ja seega läheb naaberridade varjude tõttu kaotsi  $\Delta E = \xi \cdot I_T(\omega_F) = f(D_R / W_R)$ . Kui fassaad ei ole lõunasuunaline, siis hommikuse ja õhtuse varjusiirde algused on erinevad  $|\omega_{FE}| \neq |\omega_{FW}|$ ; samuti kujunevad erinevaks kaotsiminevad energiakogused.

Illustreerime kasu väärtusi maikuu päikeselisel ja statistiliselt keskmisel päeval joonistega 12 ja 13. Mõlemal puhul on rakendatud teoreetiliselt arvatatud varjusiirde aega ja kestust ning joonisel 12 eksperimentaalselt mõõdetud kiiritustihedust vertikaalsel lõunasse orienteeritud pinnal pöördnurga  $\chi = \pm 45^\circ$  juures.

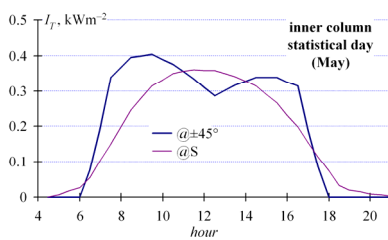
<sup>3</sup> Kiiritatud pind muutub lineaarselt päikese lineaarse liikumise tõttu, kiiritustiheduse muutuse võib siirdeaja vältel lugeda samuti lineaarselt muutuvaks.





Joonis 12. Efektiivne kiirustihedus 1,5 h varjusiirde jaoks päikeselisel maipäeval 2006.

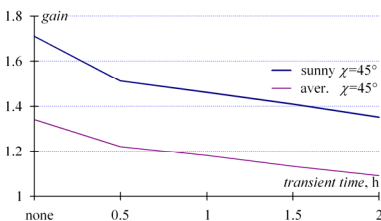
Figure 12. Effective global irradiance at the transient time of 1,5 h in a sunny day in May 2006.



Joonis 13. Efektiivne kiirustihedus 1,5 h varjusiirde jaoks statistilisel maipäeval.

Figure 13. Effective global irradiance at the transient time of 1,5 h in a statistical day in May month.

Kasu teoreetiline vähenemine võrreldes vaba ja  $\chi = \pm 45^\circ$  pööratava mooduli jaoks (*none*) on näidatud joonisel 14 sõltuvalt varjusiirde kestusest. Kuna kõverad on rööpsed, võib järeldada, et kiirustiheduse väärtus mõjub küll kasu väärtusele, kuid mitte tema sõltuvusele siirdeajast, viimane omakorda sõltub aga suhtest  $D_R/W_R$ . Eksperiment, mida sooritati 2006. aasta maikuu 12 päeva vältel pöördenuga  $\chi = \pm 15^\circ$  ja  $D_R/W_R \approx 2,5$  juures, andis farmi tootlikkuse 4%-lise vähenemise võrreldes vaba mooduliga (joonis 10).



Joonis 14. Varjusiirde poolt põhjustatud kasu vähenemine heliofarmis.

Figure 14. Decreased gain due to transient of the shadow in the solar farm.

### Efektiivne hajukiirgus farmis

Isotroopse hajukiirguse juures väheneb mooduli poolt „nähtav“ taevavõlv ja proportsionaalselt väheneb ka (sombuse päeva) hajukiirguse kiirustihedus vertikaalse fassaadi jaoks

$$I_{Td} = I_d^* (90 + \chi - \omega_G) / 2\pi \quad (3)$$

Kuna isotroopse mudeli juures päikese suund ei ole oluline (tema väärtust mõjutab vaid päikese kõrgus), siis temast varju ei teki ja otsekiirguse puudumisel mingit varjusiiret ei saa olla. Eksperimentaalandmed kinnitavad seda täiel määral.

### **Piirangud ja järeldused**

Ülal esitatud analüüs on ligikaudne mitmel põhjusel. Töös kasutati lihtsustatud tasapinnalist arvutusmudelit, mis ei arvestanud mooduli parameetri  $\tau\alpha$  nähtavuskoonust. Et leida omastatavat kogukiirgust, tuleb korrutada mooduli pinnale suvalise kohtumisnurga all langeva kiirguse väärtust teguriga  $k_{\theta}=1-\text{TAN}^{1/r}(\theta_T/2)$ , milles  $r \in \{0,25 \dots 0,4\}$  (Solar Energy, 2001). Viimast sõltuvust võiks lähenduse järgmises astmes aproksimeerida hüppefunktsiooniga, lugedes katte ühtlaselt läbipaistvaks, kui kohtumisnurk  $\theta_T < 62^\circ$ , ja läbipaistmatuks üle selle. Seega pakuksid huvi vaid need nähtused, mis toimivad ruuminurga  $\theta_T < 62^\circ$  sees ja me ignoreeriksime kõiki nähtusi väljaspool seda, need ei mõjuta energiatoodangut. Pole ka selge, kas statistilise keskmise päeva kasutamine kasu vähenemise uurimisel on põhjendatud, sest alternatiiviks oleks päikesepaistelise päeva andmete kasutamine koos päikeseliste ja sombuste päevade suhte määramisega. Sombustel päevadel varjusiiret ei ole. Nende meetodikate võrdlust ei ole veel tehtud.

Vaatamata lihtsustustele võib teha tööst järgmisi järeldusi:

1. Varjusiirde nähtus esineb päikeselistel päevadel vertikaalse heliofarmi moodulite sisemistes ridades, äärmises reas on see suhteliselt nõrk.
2. PV-moodulite ja (termiliste) heliokollektorite kahepositsiooniline eksponeerimine jääb efektiivseks ka vertikaalsete heliofarmide puhul.
3. Varjusiire vähendab vertikaalses heliofarmis kaheasendilise eksponeerimise efektiivsust, kuid see jääb ikkagi arvestatavale tasemele  $\sim 1,23$ , kui ridade vahe suhte mooduli laiusesse on üle 2,5.
4. Kiirituse (õhtupoolikul varju) algushetk ja varjusiirde kestus on kahe muutuja funktsioonid sõltudes eeskätt mooduli ridade vahekauguse- ja mooduli laiuse suhtest ning vähemal määral pöördenurgast.
5. Mooduli pöördenurk on kasu vähenemisel suhteliselt mitteoluline ja pöördenurka võib valida muudest kaalutlustest lähtuvalt.

## **Tänuavaldus**

Autor tänab sihtasutust Eesti Teadusfond toetuse eest grandid 6563 näol.

## **Kasutatud kirjandus**

Nordmann, Th. (2004) PV-market development, Keynote lecture on EuroSun2004, Freiburg (Germany), 23.06.2004.

Russak, Viivi ja Kallis, Ain (2003) Eesti kiirguskliima teatmik. Toim. Heino Tooming. EMHI, Tallinn.

Solar Energy. (2001) The state of the art. Ed. by. Jeffrey Gordon, James & James, London.

Tomson, T, Tamm, G. (2005) Performance of flat-plate collectors with active tracking about the vertical and horizontal axes. Journal of Applied Research. Official Journal of Lithuanian Applied Sciences Academy, Nr 2: 63–67.

Tomson, T. (2006) Üksiku kahepositsiooniliselt juhitava heliokollektori omadused. Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine, Seitsmenda konverentsi kogumik, peatoimetaja V. Tiit, O/Ü Halo, Tartu, trükkis.

## **PERFORMANCE OF THE TWO-POSITIONAL EXPOSED VERTICAL SOLAR FARM**

*Teolan Tomson*

Department of Materials Science of Tallinn University of Technology

Gain of two-positional exposed solar farm cannot achieve the corresponding value of the single stand-alone unit. The edge row of the vertical solar farm is transiently shadowed due to the edge of the façade; inner rows are shadowed by the neighbor rows. In the paper results of the theoretical analysis (made corresponding to the plane model of the shadow transient process) and its experimental control are presented. Compared to the single two-positional exposed solar collector the gain of the vertical solar farm reduces ~5% and has the value of ~1,23.

# KÜTUSEPROTSESSOR – KÜTUSTE GAASISTAMINE.

Hillar Toomiste

Sihtasutus Archimedes, Väike Turu 8, Tartu

e-post: [hillar@ibs.ee](mailto:hillar@ibs.ee)

Käesolevas artiklis on selgitatud kütuste gaasistamise olemust ja erinevaid tehnoloogiaid. Toodud on näiteid edukatest projektidest ja uutest gaasistamise tehnoloogiatest. Kütuste gaasistamist kasutades on lihtne organiseerida energia hajalitootmist ja vähendada kadusid. Kütuste gaasistamise kõrvalproduktina on võimalik toota toorainet keemiatööstusele. Gaasistamise tehnoloogia arendamine on perspektiivne suund põlevkivienergeetika arengus.

## Sissejuhatus

Kütuste gaasistamine on tuntud tehnoloogia juba päris pikka aega. See töötati välja 19 sajandil ja jõudis kiiresti ka Eestimaale. Näiteks Tartusse ehitati 1880. aastal gaasivabrik, mida laiendati 1904. aastal. 1914. aastaks oli Tartu tänavatel juba 536 gaasilaternat. Aastatel 1945–48 realiseeriti gaasi peamiselt mitmesugustele ettevõtetele. Samal ajal alustati Tartus ka korterite gasifitseerimist. Gaasi tootmine elavnes märgatavalt 1965. aastast alates, mil enamiku uute elamute köögid ja vannitoad gasifitseeriti. Gaasivabrik suleti 1976. aastal seoses Venemaalt saabuva maagaasitrassi valmimisega.

Kas siis peakski nii vanale tehnoloogiale enam tähelepanu pöörama?

Arvan, et peab, sest **kõik kütused põlevad gaasilises olekus.**

## Kütuse elutsüklil

Vaatleks korra kütusetarbimise elutsüklit. Siinjuures pole vahet, kas tegemist on fossiilse või taastuva kütusega.

- Protsess algab kütuse hankimisega, olgu see siis põlevkivikaevandamine või puude langetamine.
- Järgneb transport tootmisüksusesse, kus kütus väärindatakse tarbimiskõlblikuks. Põlevkivi puhul on see rikastamine, puude puhul tükeldamine ja lõhkumine.
- Ladustamine.
- Transport tarbija juurde.
- Põletamine.
- Jääkide utiliseerimine.

Eeltoodust on näha, et igas elutsükli faasis toimub kütuse mitmekordseid laadimisi ja ühest kohast teise vedamisi. See kõik nõuab täiendavalt energiat ja aega ning muudab lõppkokkuvõttes kütust kallimaks.

Kui nüüd muudaks eelnevalt toodud näidet ja kütuse väärindamise etapis läheks kohe kütuse gaasistamise juurde, siis muudaks see järgnevad etapid hoopis väiksema energiakuluga teostatavateks. Veelgi radikaalsem samm oleks kütus gaasistada otse hankimise kohal, seega kaevanduses või raielangil.

### Gaaskütuse omadused

Milles siis seisnevad gaaskütuse eelised?

- Gaasi on lihtne ja odav torujuhtmeid mööda transportida
- Gaasi põlemistemperatuur on kõrge, see võimaldab kõrge kasuteguriga muundamisi
- Põlemisjäätgid on madala toksilisusega
- Gaasi põletamine ei jäta tahkeid jääke, puudub utiliseerimise vajadus
- Gaasi põletamist on lihtne automatiseerida
- Tarbijad võivad olla väga laias võimsuste vahemikus

Kõige selle positiivse juures on ka negatiivne omadus – teda on raske suuremas koguses ladustada. Väiksemate koguste ja nn tippunni-puhvrite tegemine pole aga probleem. Võrreldes gaasi kui energiakandjat näiteks elektriga, siis on gaasi ülekandekulud ja võrgukaod väiksemad ning gaasi ei pea tootma sünkroonselt tarbimisega nagu elektrienergiat.

### Süngaasi saamine

Vaatleme, missugused keemilised protsessid leiavad aset kütuse gaasistamisel.

Tabel 1. Peamised keemilised reaktsioonid süngaasi tootmisel.

Table 1. The main reactions on syngas production.

Reaktsioon	$\Delta H_{298}$ , kJ/mol
Lenduv aine $\rightarrow$ CH <sub>4</sub> + C	Kergelt eksotermiline
$C + 0,5O_2 \rightarrow CO$	- 111
$CO + 0,5O_2 \rightarrow CO_2$	- 254
$H_2 + 0,5O_2 \rightarrow H_2O$	- 242
$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	+ 131
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	+ 172
$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	- 75

$\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	- 206
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	- 41
$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	-165

Nagu tabelist näha, on osad protsessid tugevalt eksotermilised ja piisab lihtsalt hapniku (õhu) andmisest hõõguvale kütusele ning vingugaasi moodustumisel vabanev energia hoiab gaasistumise protsessi pidevana.

Sellist protsessi nimetatakse **õhugaasi protsessiks** ja tema saagis on järgneva koostisega:

$\text{H}_2$  – 12%,  $\text{CH}_4$  – 2%,  $\text{CO}$  – 32%,  $\text{CO}_2$  – 5%,  $\text{C}_x\text{H}_y$  – 1%,  $\text{N}_2$  – 48%, kütteväärtus 2–8 MJ/m<sup>3</sup>, sõltuvalt generaatori tüübist.

Süngaasi kütteväärtust on võimalik tõsta, kui lisada protsessi ka kuumutatud veeauru. Siis hakkavad toimuma tugevalt endotermilised protsessid, mis lagundavad veeauru. Sellist protsessi nimetatakse **veegaasi protsessiks** ja tema saagise koostis on järgmine:

$\text{H}_2$  – 22%,  $\text{CH}_4$  – 4%,  $\text{CO}$  – 24%,  $\text{CO}_2$  – 16%,  $\text{C}_x\text{H}_y$  – 1%,  $\text{N}_2$  – 31%, kütteväärtus 9–12 MJ/m<sup>3</sup>.

See on juba parem tulemus, aga endiselt on süngaasis palju lämmastikku, mis viib gaasi energeetilise väärtuse alla.

Eelnevast puudusest on vaba **uttegaasi protsess**. Uttegaas saadakse kütuse kuumutamisel ilma õhu juurdepääsuta. Koostis:  $\text{H}_2$  – 40%,  $\text{CH}_4$  – 30%,  $\text{CO}$  – 18%,  $\text{CO}_2$  – 8%,  $\text{C}_x\text{H}_y$  – 4%, kütteväärtus 15–18 MJ/m<sup>3</sup>.

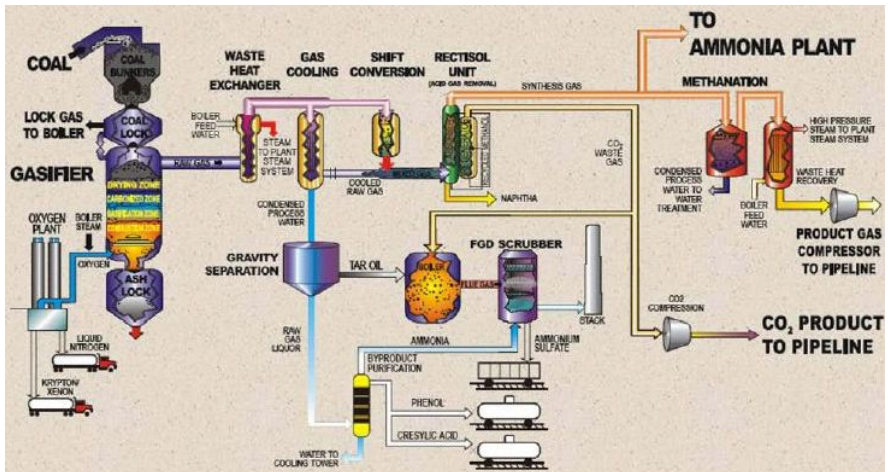
Selline gaas on suurepärase omadustega ja seda oleks väga hea edaspidises töötlemises kasutada.

Tuntakse veel üht biomassi termilise töötlemise võimalust – **kiire pürolüüs**. Kiire pürolüüsi puhul kuumutatakse madala niiskusesisaldusega biomassi kiirelt 450–550 kraadini ja saagis jahutatakse. Moodustub tume tõrvataoline vedelik (*biocrude*), mida on võimalik kasutada ahjukütusena või siis toorainena edasise krakkimise juures.

### Teostatud projektid

Vaatleks nüüd mõnda positiivset näidet kütuste gaasistamisest. Üks kuulsamaid on Dakota Gasification Company, Beulah, USA. Tehas lasti käiku 1984. aastal, tema planeeritud toodanguks oli sünteetiline metaan, mida toodeti kivisöest. Tehase jõudluseks oli planeeritud 3,5 mln kuupmeetrit päevas. Tegelikuses saavutati 21-aastase kasutusaja jooksul 4,7 mln

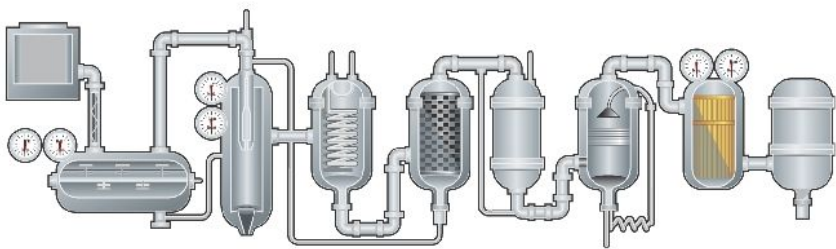
kuupmeetrit päevas ja tehas töötas 24/7 režiimis 7725 päeva 7828-st võimalikust. Seega oli ta äärmiselt töökindel. Tehases kasutati õhugaasi tehnoloogiat, aga selleks, et vabaneda tülikast lämmastikust, toideti gasifikaatorit puhta hapnikuga.



Joonis 1. Metaani ja süsihappegaasi tootmine kivisöest.

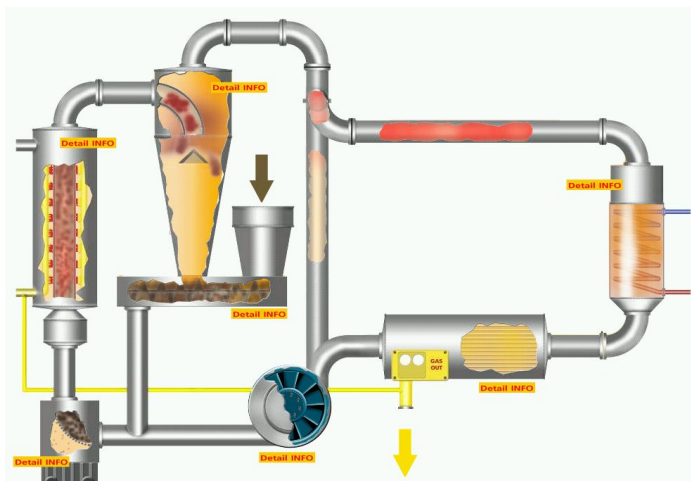
Figure 1. Production of methane and CO<sub>2</sub> from the coal.

Teiseks lahenduseks oleks Saksa firma Choren ([www.choren.com](http://www.choren.com)) poolt arendatud biodiiselmootori tootmise tehnoloogia. Selle abil saab biomassi gaasistades ja hiljem Fischer-Tropschi sünteesi kasutades diiselmootori toota.



Joonis 2. Diiselmootori tootmine biomassist.

Figure 2. Production of diesel fuel from biomass.



Joonis 3. Kõrge kütteväärtusega süngaasi tootmine biomassist.

Figure 3. Production of high quality syngas from biomass.

Väga perspektiivseks lahenduseks on ka Austria firma A.G.T. (<http://www.agt-austria.com/index3.html>) poolt arendatud katalüütilise gaasistamise tehnoloogia. Selles protsessis saadakse uttegaasi kvaliteediga süngaas. Süsteem on äärmiselt kompaktne ja on installeeritud kolme merekonteinerisse, millest üks sisaldab kombineeritud tsükliga gaasiturbiini ja auruturbiini ning generaatorit elektrienergia genereerimiseks.

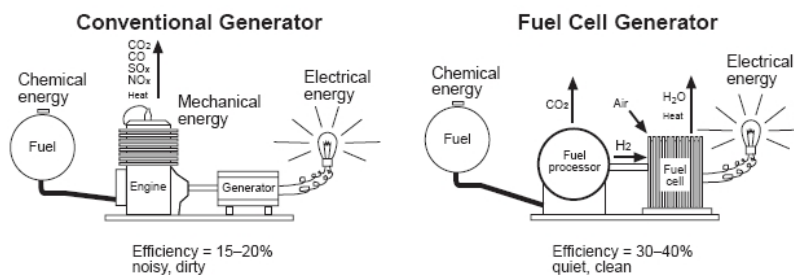
Omaette kategooria moodustavad superkriitilistes vedelikes gaasistamise tehnoloogiad. Need on mõeldud suure vedelikusaldusega (bio)materjalide gaasistamiseks. Üheks selliseks on tselluloosi gaasistamise tehnoloogia, kus 400°C ja 220 bar rõhu juures veekeskkonnas saadi 70% tselluloosist muundada metaaniks CH<sub>4</sub>. Sellise tehnoloogiaga saab näiteks paberitööstuse jäätmeid ja sealäga gaasistada, ilma et neid oleks vaja eelnevalt kuivatada.

Üheks eksootiliseks gaasistamise seadmeks on ka plasma-ahjud. Nendes toimub kütuse gaasistamine kaarleegi poolt tekitatud soojust kasutades. Seda tüüpi ahjude kasutegur on väga madal, kuna gaasistamiseks vajalik soojus saadakse elektrienergiat kulutades.



## Kütuselemendid

Gaasistamiseta ei saa läbi ka kütuselementide arendajad. Kuigi praegu arendatavad kütuselemendid kasutavad vesinik-hapniku reaktsiooni, ei usu allakirjutanu, et puhast vesinikku kunagi kommertseesmärkidel näiteks autodel laialdaselt kasutama hakatakse. Põhjuseks on probleemid vesiniku hoidmisel ja transpordil. Ehedal kujul vesinikku looduses ei leidu. Enamik praegu tööstuses kasutatavast vesinikust on toodetud fossiilkütusest – maagaasist. Muidugi saab vesinikku toota ka tuulegeneraatori poolt toodetud elektriga vee elektrolüüsil, aga selle protsessi kasutegur on ~70%. Seega kolmandik energiat on juba kadunud. Vesiniku veeldamine on väga energiamahukas protsess, mis alandaks kasutegurit veelgi. Surugaasina on aga vesiniku energiatihedus suhteliselt väike. Mõistlikum on vesinikku transportida metaanina torudes või metanoolina tsisternides. Metaani või metanooli saab vahetult enne tarbimist vesinikuks muundada.



Joonis 4. Kütuse eeltöötlus enne kütuselementi.

Figure 4. Fuel pretreatment before the fuel cell.

## Lõpetuseks

Eelkirjeldatud tehnoloogiate juurest tagasi tulles heidaks veelkord pilgu Eesti tänasele energeetikamaastikule ja küsiks:

### kas praegune põlevkivi otsepõletamine katlas ikka on parim viis tema kasutamiseks?

Põlevkivi gaasistamist kasutades saaksime:

- toota gaasi ja sellega käitada kõrge kasuteguriga koostootmisjaamu kohapeal või kaugemal (kasutades gaasi transpordiks torujuhtmeid),
- toota vedelkütuseid,
- toota toorainet keemiatööstusele,
- valikuvabaduse efektiivsete tehnoloogiate ja kütuste kasutamiseks,
- tugevdada julgeolekut ja sõltumatust Venemaa gaasist,

- vähendada soojuskadusid, mis on auruelektrijaama juures paratamatus,
- arendada põlevkivi ja biomassi koosgaasistamise tehnoloogiaid.

Seda nimekirja annaks kindlasti pikendada, aga jäägu see edasimõtlemiseks.

**Kasutatud allikad:**

<http://www.dakotagas.com>

<http://www.choren.com/en/>

<http://www.agt-austria.com/index3.html>

## **FUEL PROCESSOR – GASIFICATION OF FUELS**

*Hillar Toomiste*

Archimedes Foundation

Current article is short overview about different solid fuel gasification techniques. There are examples about chemical reactions what will occur during fuel gasification on different conditions. Chemical consistence and heating value of produced syngas will vary a lot from the gasification conditions.

Some new gasification technologies were pointed out.

**TEUK 9**

**TAASTUVATE ENERGIAALLIKATE  
UURIMINE JA KASUTAMINE**

Üheksanda konverentsi kogumik

**INVESTIGATION AND USAGE OF  
RENEWABLE ENERGY SOURCES**

Ninth Conference Proceedings

Tartu, Estonia, 15. November 2007

# KINETICS AND EFFICIENCY OF BIOGAS PRODUCTION FROM ESTONIAN WASTES AND CROPS: A NEW RESEARCH PROGRAM IN EESTI MAAÜLIKOOL

Henri-Charles Dubourguier,  
Estonian University of Life Sciences,  
Institute of Agricultural and Environmental Sciences,  
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014, Estonia, [charles@emu.ee](mailto:charles@emu.ee)

## Abstract

Anaerobic digestion is a proven technology for biogas production. The EMÜ project is part of the general strategy of the “Eesti Maaülikooli Taastuvenergia keskus”. It includes the competence of the team and the facilities of a new laboratory fully equipped for several purposes:

- Analysis of substrates suitable for bioconversion
- Basic research in bioconversion of wastes and crops to renewable fuels
- Routine monitoring of fermentation processes at pilot and full-scale
- Scientific and technical training of EMÜ scientists and partner organizations.

Collaborations with other research teams and industrial partners are presented together with the main expected results.

*Keywords: renewable energy, biogas, anaerobic digestion, crops, wastes.*

## Introduction

The Centre of Renewable Energy of the Estonian University of Life Sciences was founded in 2006. The initial main goals were to start, coordinate and develop interdisciplinary scientific and developmental co-operation in the field of renewable energy. EMÜ has quite wide range of available competences applicable for research on renewable energy: various types of biomasses for energy production like grasses and other “field plants” (Department of Agronomy and Department of Soil Sciences) and forest trees, bushes, short rotation trees (Department of Forestry). The Department of Technology is also concerned with development of technologies and monitoring, and the Institute of Economics and Social Sciences by the economical and social aspects of production and use of biofuels.

The Center for Renewable Energy is also a central point of coordination and information in EMÜ and contact persons are available on the following main topics:

- Short rotation energy coppice and fast-growing tree species
- herbaceous biomass
- forest biomass
- biogas
- Technology of renewable energy production and usage.
- Economic and social factors of production and usage of renewable energy

However, till 2006, the Center for Renewable energy was not including wastes in its topics of interest. However, A.Koppel, Vice-Rector of Research in EMÜ, was pointing the importance of biogas and other biofuels in a global strategy for renewable energy. All research on production of biofuels from biomass requires specific basic knowledge, specialized equipment and facilities such as pilot units and laboratories. But the Estonian University of Life Sciences had only limited competence and facilities for optimization and monitoring of biofuels production.

Production of biofuels and biogas may be done either by physical processes or/and microbiological processes. In the end of 2006, an internal report was commenting and proposing a project in order to develop biogas research in EMÜ.

Biogas and other biofuels production do not concern only the production from crops, grass or other agricultural products. The knowledge concerns also farm wastes (manures), agro-industry wastes and effluents, biodegradable solid wastes (industrial, green wastes), biological aerobic sludges (municipal or industrial).

The strategy for this development includes several topics of biogas and biofuel production:

- what type of biomass, in which conditions and which type of mix of organic matter etc. should be used according to a Life Cycle Assessment and to the economics.
- what type of technology should be used according to the substrate input
- use of biogas (steam, electricity, powering vehicles)
- how to manage problems which are often forgotten or not reported such as corrosion due to H<sub>2</sub>S (reactors, tubing, boilers, engines)
- how to manage with the use of additives in agricultures (pesticides, heavy metals, drugs) which may impair the bioconversion.

- how to manage residues of anaerobic treatment (anaerobic compost, residual waters)

To achieve these goals, the Estonian University of Life Sciences decided to combine the development of a basic and technical knowledge in anaerobic fermentations including methanisation with an investment in a specific biotechnological engineering laboratory. The priorities of applied and basic research were defined in the field of potential for methanogenesis from substrates and potential inhibitors, optimization of the microbial hydrolysis step, defining of operational parameters by pilot studies, fate and use of residues and lastly monitoring and optimization of pilot or industrial process such as in wastewater treatment plants or in experimental farms. These priorities were involving on the creation of a new laboratory, the recruitment of a technician and the recruitment of PhD students and on partnerships with other universities or research centers.

### **The “Bio- ja keskkonnakeemia labor”, a new facility for bio- and environmental sciences**

The laboratory was created in the former room 2D9 (Metsamaja) close to the actual laboratory facilities of the PKI. This room of almost 90 m<sup>2</sup> was divided in different areas (office, preparation of samples, washing and storage, analysis, lab-scale pilots, microscopy). Renovation of the whole area (walls, ventilation, electricity, tubings) was achieved by July 2007, benches and cupboards were installed in September. A centralized system distributes analytical gases for gas chromatograph and other equipment.

The initial equipment of the lab was financed by EMÜ and includes:

- water distillor for analytical purposes, refrigerators for preservation of sensitive standard solutions, chemicals and samples
- Analytical balances, oven and incubators, mill for crushing fibrous and semi-hard wastes, mixers and centrifuge
- Furnace up to 3000 °C for determination of organic matter
- Sieve shaker and ISO sieves for determination of granulometry
- pH/ion meter for determination of pH, redox and ions by electrochemistry
- Special spectrophotometer and thermoreactor for sample composition by specific colorimetric reactions

- systems OxiTop Control AN12 WTW for determination of potential of methanogenesis and kinetics of anaerobic degradation
- spectrophotometer UV/Vis equipped with thermostated cells for kinetic and enzymatic determinations
- Stereo zoom binocular and phase-contrast microscope with 5MP-digital camera and image analysis (size, density, shape, counting...)
- Gas chromatograph equipped with autosampler, FID detector for analysis and monitoring of organic compounds in liquid samples and TCD detector for biogas composition.

The analytical facilities are currently being improved by an AAS-graphite oven for high sensitivity heavy metal analysis and a Carbon/Nitrogen analyzer for analysis of liquid and solid samples with the support of the Estonian Environmental Investment Centre (KIK). Also, two 2-liters fermentors, flocculation reactors and additional microscopes will be installed. In 2008, pilot-scale studies will be possible with PC-controlled bioreactors up to 20 liters.

### **The research project**

The initial scientific activity of the lab is an applied research and aim to characterize the anaerobic biodegradation of chosen Estonian wastes and crops, including their methane potential, the influence of process conditions on kinetics and efficiency of bioconversion. The results will be used to establish an initial database for further use in feasibility, LCA and economic studies of processes. In addition, they will provide preliminary parameters for designing pilot studies (in lab and *in situ*).

The research concerns various crops and wastes, grasses from the maintenance of semi-natural grasslands and from intensive production, animal manure, yard wastes from urban parks and road maintenance, municipal sludge and wastes, industrial wastes and sludges from agro-industries such as food canning and paper industries.

Anaerobic degradation processes and kinetics is studied using the Oxitop system at several ranges of temperatures. Anaerobic inoculation is done by using an efficient anaerobic sludge from a municipal digester. Anaerobic degradation kinetics is followed by pressure variations

and by biogas analysis together with pH. In each set of experiments, controls are added to take in account the auto-degradation and endogenic production of biogas by the inoculum. Detailed analysis is done both on initial substrates and after anaerobic degradation (moisture, ash, and OM, COD, TOC, total nitrogen, ammonia, phosphorus, Cellulose, hemicellulose, lignin, Volatile fatty acids, heavy metals). All these analyses are the basis for the understanding of the kinetic conversion of raw substrate in biogas. For example, the significance of organic matter in the various stages of anaerobic degradation is not the same. Also, the nitrogen determination is not only important to take in account the C/N/P ratio for optimization of the process, but also the changes of the ratio  $N-NH_4$ /total N is a good indicator of the bioconversion of the substrate. In addition, ammonia may be a potential inhibitor of some metabolic pathways of the process. Concerning the metals, the methanogenic consortium has special requirements, not only iron, but also tungsten, nickel and molybden. Also selenium is required for the synthesis of selenomethionin, a specific aminoacid of methanogens. Other metals may be toxic for the process such as copper which is often used as a feed additive as well as zinc and manganese.

In this initial project, the toxicity is also taken in account. In the case of manures, toxicity may be observed due to the use of feed additives and veterinary drugs. Also, the leachates and the anaerobic composts may be potentially recycled in agriculture as fertilizers or amendments. Thus, it is suitable to determine the ecotoxicity of these by-products using a battery of biological tests for environmental and health risk assessment.

Later on, more basic topics will be developed with new PhD students, particularly on inhibition of methanogenesis and on computer-controlled optimization of semi-solid anaerobic digesters.

### **Competences of the research unit and scientific collaborations**

The research unit “bioconversion of crops and wastes” (UCBW) is managed in coordination with other PKI colleagues and the Center for Renewable Energy. As an environmental chemist, dots. Dr. K. Orupöld is contributing to the project, particularly by co-supervision of a PhD student, Mario Luna (Columbia). Graduated as an environmental engineer from Columbia University, he has also a MSc in environmental management from France. The laboratory assistant, Thomas Leydier, has a background of environmental engineer and is taking in charge all maintenance and running aspects of the lab. Further PhDs are planned



next year. In addition, a web specialist is in charge of the creation of a website concerning the activities on biogas and of the web database on methanogenic potentials from various crops and wastes.

The toxicity studies will be done in collaboration with KBFI (Dr. A. Kahru). EMÜ PhD students in KBFI, M. Heinlaan (mobility, bioavailability and toxicity of heavy metals) and V. Aruoja (new test formats in algae) will be involved part time. Solid Flash Assay, phytotoxicity, crustacean and algae tests are included in the project in addition to genotoxicity determination.

For high resolution microscopy, it is possible to use the Scanning electron Microscope of the Institute of Veterinary Medicine in EMÜ (T. Järveots.). However, if necessary advanced techniques (TEM, X-ray analysis, confocal laser) will be performed in collaboration with the University of Tours (France, Dr. B. Arbeille and Prof. G. Prensier). For optimization of AAS-graphite, Dr. C. Waterlot, expert in analytical chemistry in the Laboratory of Soils and Environment (ISA Lille France) will participate to the training of users.

These national and international collaborations may be extended to other countries depending on the topics and priorities. In order to investigate possibilities of new partnerships, the UCBW has participated to the 11th World Congress on Anaerobic Digestion (AD11) “Bioenergy for our future” (23–27 September 2007, Brisbane, Australia).

### **Industrial collaborations**

The competences of EMÜ in anaerobic digestion allow establishing collaborations with private partners in several areas:

- Training on basics biological and bioengineering of anaerobic processes
- Consultancy for technical projects
- Consultancy for start-up and optimization of anaerobic full-scale facilities.

According to the goals, different types of contracts may be agreements in order to respect mutual interests, confidentiality, responsibilities and property of the results.

Currently, the UCBW is collaborating with Tartu Veevärk for improvement of knowledge and of the project concerning anaerobic digestion of anaerobic sludges. Also a specific training session on bioengineering of anaerobic digesters has concerned Eesti Energia, Ragn Sells and

Ekseko. A new long term project (2007–2010) has been agreed between EMÜ-UBCW and Eesti Energia concerning the methanogenic potential of crops and wastes.

### **Transfer of knowledge and publications**

A database is currently under creation. Accessible on the Web, this database includes various characteristics of the substrates, their methanogenic potential and the properties of the after-digestion products with references and abstracts. Extension for inhibitors will be added. Specific login and passwords will be given according to the property rights in agreement with Eesti Energia.

The team of research will also provide training for scientists of other EMÜ research groups in order to optimize the use of the equipments which is highly relevant for various environmental research projects (soil, water, biology, etc ).

Lastly, publications of research papers in peer-reviewed journals (ISI) are planned in order to respect evaluation criteria of research in Estonia and at international level.

**Aknowledgements:** This project is supported by KIK project “Biokütuste labori sisustamine”, Tartu Veevärk contract n° 8-2/T7075PKPK and Eesti Energia “Future Energy Initiative: Eestimaise biomassi ning tootmise kõrvalsaaduste ja jäätmete biogaasi tootlikkuspotentsiaal ning anaeroobse fermentatsiooni kineetika“.

# **RENEWABLE ENERGY IN SAXONY-ANHALT AND ITS HIGH POTENTIAL FOR ECONOMIC GROWTH AND NATURE PROTECTION IN THE NEW STRUCTURAL FUND PERIOD 2007-2013**

Michael Dörffel

Head of Department of the Ministry of Agriculture and Environment of Saxony-Anhalt  
Olvenstedter Str. 4 39012 Magdeburg

## **Abstract**

The paper informs about the status of renewable energies and, in particular, of biomass use for power generation and the production of biofuels in the Federal State of Saxony-Anhalt. It demonstrates – also by comparing with the other German federal states – that renewable energies have reached a higher-than-average level and are, hence, of great importance to the economy, labour market and scientific sector of the state. Renewable energies decisively contribute to the fulfilment of the state's objectives regarding climate protection and development of rural areas.

Therefore, the state intends to intensify its support during the new structural fund period of pilot and demonstration projects in the field of decentralised biomass gasification technology, extended use of biogenic heat through investments in the installation and connection of district heating networks, model projects to support innovative developments of biomass use as well as development projects for the production of biofuels and chemical base materials on the basis of biomass, e.g. in biorefinery systems.

*Key words: renewable energies, wind energy, renewable raw materials, biomass, biogas, bioenergy, biofuels, economic policy, jobs, growth and employment, research and development, climate protection, reduction of greenhouse gas emissions.*

Innovation plays a crucial role in the shift towards a knowledge-based information society. The European Union recognises this, deciding at the Lisbon Conference in 2000 that it would strengthen the innovative potential of the European regions.

Saxony-Anhalt has taken up this strategy. The states funding programmes in the new structural fund period from 2007 to 2013 are orientated towards the innovative potential of research and industry.

Renewable energies play an important role in this process. One of the chief challenges in the twenty-first century is intelligent supplying and efficiently using energy.

In 2005, Saxony-Anhalt was already generating 20.5% of its total generated power from renewable energies. We currently estimate this share to be 26%. Thus, our state is clearly ahead of the other three regions and above the German average, which was approximately 11.8% in 2006.

Geographically and infrastructurally, Saxony-Anhalt has excellent conditions that have supported the development of wind energy and energy from renewable raw materials.

The state is predominantly influenced by windy Atlantic meteorological conditions and has expansive flat plains. Hence, up to 1,800 full load hours can be expected from the operation of wind energy converters. This makes cost effective operation possible.

In 1996 we compiled a wind potential study and, as part of our regional planning, identified areas suitable for the controlled development of wind energy. Nevertheless, this development is not proceeding without conflicts; problems include acceptance in the population, especially because of the wind energy converters' impact on the landscape, and problems with the irregular supply of power to the grid.

1,832 wind energy converters with a rated power of 2.533 MW were online by the end of 2006. This already exceeds the rated power of Saxony-Anhalt's conventionally generated power.

The recovery of energy from renewable raw materials to produce power and biofuel is extremely important. The area of the state of Saxony-Anhalt covers approximately 20,447 km<sup>2</sup>, of which 1.17 million hectares is utilized for agriculture and 477,000 hectares for forestry. In 2006, renewable raw materials were cultivated on approximately 100,000 hectares.

In the state, 110 biogas plants with a thermal output of 134 MW are currently in operation or under construction. We assume are approximately 400 further commercially feasible sites for

biogas plants. Biogas is converted into power nearly exclusively on site and fed into the transmission grid.

Intensified utilization of biogas to generate heat would tap great potentials. The gas must however be processed to natural gas quality and fed into the gas supply networks. As of yet, there are only a few examples of this because such projects are not yet cost effective. However, solutions are also being worked on intensively in Saxony-Anhalt.

21 wood-fired (heating and) power plants with 335 MW of thermal output are currently in operation in Saxony-Anhalt. Especially in the timber sector, competition is already emerging for the utilization of wood as energy and material because Europe's largest pulp plant and large production capacities for particleboard manufacture are located in the state.

With a volume of nearly 300,000 tons, approximately 60% of the total German production capacity for bioethanol is located in the state of Saxony-Anhalt. Five other plants are in planning. If all of them are constructed, capacity would increase to more than one million tons per year.

Six companies in the state produced 390,000 tons of biodiesel in 2006. That is 16% of German production. Another seven plants in Saxony-Anhalt will commence operation, as a result of which biodiesel production capacity will increase to 1.3 million tons.

Geographic conditions primarily account for why water power is only a small percentage of the total power supply and also limit its further development. The high costs and risks of drilling are similarly holding back geothermal energy.

Despite sizeable growth, photovoltaics contribute only marginally to the state's power supply. The arrival of two large manufacturers of solar cells that are expanding greatly commercially has already produced more than 1000 new jobs though.

Saxony-Anhalt's state government sees a number of opportunities in the sustainable development of renewable energies:

- Reducing greenhouse gases and conserving fossil primary energy sources;
- Reducing dependence on the import of fossil primary energy sources;

- Increasing energy supply security, particularly through distributed energy supply structures based on regenerative energy sources,
- Creating potentials for income in the state's economy and the forestry industry;
- Developing potentials for innovative in-state developments that can be marketed worldwide.
- Creating new and safeguarding existing jobs in manufacturing, service, research and development;

According to an estimate from 2005, in recent years the renewable energies sector has generated some 7,650 jobs, of which 53% are in wind energy, 22% in biomass utilization, 13% in photovoltaics, 10% in solar heat and 2% in geothermal power. New surveys being conducted this year indicate that 3,400 jobs have been created in the plant manufacturing sector.

To take advantage of these opportunities and further develop the effects, the state has set itself a number of goals:

- Developing the recovery of energy from biomass in regional materials cycles, in particular in the biomass fermentation and gasification sector;
- Replacing petroleum fuel with biofuel with the aim of producing more environmentally compatible fuel from biomass; the goal is to utilize plants holistically (keyword: second generation biofuels);
- Encouraging the recovery of material from renewable raw materials, emphasizing their utilization as materials and the exploitation of defined ingredients;
- Developing bioproducts in joint commercial solutions (developing biorefinery systems).

To support this development, the Ministry of Agriculture and the Environment has taken a variety of initiatives, for example:

- Compiling a study on biomass potential in Saxony-Anhalt, which presents the potentials for its utilization both as material and energy;
- Implementing innovative emphases during the new EU Structural Fund period 2007–2013;
- Compiling a study on the use of biofuels in Saxony-Anhalt;

- Creating a Biomass-to-Liquid Forum (BtL Forum) intended to advance the establishment of second generation biofuels in the state;
- Providing investors support if they are having problems connecting renewable energy plants to the supply grid,
- Supporting the location of a German biomass research center in the eastern German states;

**Summary:**

Renewable energies are an important contribution to the energy industry, labour market and climate strategy in Saxony-Anhalt. Having intensified its utilisation of wind energy to a marked extent, Saxony-Anhalt still has potentials for further development. Saxony-Anhalt is also best qualified in terms of growing renewable raw materials and making energetic and physical use of them, which the state considers a main axis. Bioenergy is an initiator and motor for strengthening the regional economic cycles, and is a firm component in the state's energy mix. Expanding the bioenergy sector is considered a chance and challenge for sustainable and economic development. Further expansion of bioenergy, however, may also result in competition between energetic and physical biomass use, on the one hand, and food and fodder production, on the other. This problem is considered manageable if the framework is defined correctly. The use of photovoltaics offers enormous chances for the labour market policy.

# TUULIKUPARKIDE KUI OLULISE RUUMILISE MÕJUGA OBJEKTIDE ASUKOHAVALIKU PROTSESS LÄBI ÜLDPLANEERINGU MENETLUSE

Peep Leppik

OÜ Hendrikson & Ko, Raekoja plats 8, Tartu

## **Annotatsioon**

Tuulikuparkide kui olulise ruumilise mõjuga objektide planeerimise juures mängivad olulist rolli sotsiaalsed aspektid, eriti avalik arvamus objekti rajamise suhtes. Avaliku arvamuse kujunemine sõltub suuresti sellest, kui avatult ja läbipaistvalt on läbi viidud tuulikupargi asukohavaliku protsess. Kuigi seadused annavad õigusliku raamistiku avalikkust kaasava ja huvigruppe ühendava protsessi läbiviimiseks, sõltub protsessi tulemuslikkus paljuski kohaliku omavalitsuse suutlikkusest menetleda tuulikupargi asukohavaliku protsessi olukorras, kus kõrgemalseisvad planeeringud annavad olulise ruumilise mõjuga objekti planeerimiseks vähe suuniseid, kus omavalitsusel puudub tihtipeale kogemus selliste keeruliste ja kõrgendatud avaliku huviga planeeringute läbiviimiseks ning õiglaste ja tasakaalustatud kaalutusotsuste tegemiseks.

*Märksõnad: planeerimine, olulise ruumilise mõjuga objektid, avalik protsess, tuulikupargid.*

## **Sissejuhatus**

Tuulikuparkide arendamine toimub Eestis viimasel ajal väga aktiivselt, eeskätt Eesti rannikualadel, kuid ka madalas avameres. Mida suuremat tuulikuparki kavandatakse, seda suurem on selle ruumiline mõju ümbritsevale keskkonnale ning seda olulisem on arvestada võimalikult paljude erinevate majanduslike, sotsiaal-kultuuriliste ja looduskeskkonnale avalduvate mõjudega. Kuna hoogustumas on üha suuremate tuulikuparkide arendamine, siis omab majanduslike ja energeetiliste aspektide kõrval järjest suuremat tähtsust tuulikuparkide rajamisega kaasnev sotsiaalne aspekt ehk avalik arvamus tuulikupargi rajamise suhtes.

Demokraatlikus ühiskonnas sõltub tuulikupargi rajamine asukohavaliku protsessi avatusest ja aususest, mille tulemusena kujunevast avalikkuse heakskiidust või mitteheakskiidust oleneb väga suurel määral kavandamise tulemuslikkus. Avatud ja aus saab olla vaid selline protsess, mis annab osalevatele huvigruppidele õigusliku kaitse ning otsustajale motiveeritud aluse otsuse langetamiseks. Avalikkuse kaasamise õigusliku regulatsiooni põhimõtted ja menetluse



nõuded sätestavad ruumiplaneerimise protsessis planeerimisseadus ning keskkonnamõju hindamise ja keskkonnajuhtimissüsteemi seadus.

### **Olulise ruumilise objekti planeerimise põhimõtted ja seaduslik taust**

Planeerimiseseaduse üks kandvamaid, kui mitte kõige olulisemaid põhimõtteid planeerimismenetluse käigus on huvide tasakaalustamine. Planeerimiseseadus (edaspidi PIS) § 1 kohaselt on ruumiline planeerimine demokraatlik, erinevate elualade arengukavasid koordineeriv ja integreeriv, funktsionaalne, pikaajaline ruumilise arengu kavandamine, mis tasakaalustatult arvestab majandusliku, sotsiaalse ja kultuurilise keskkonna ning looduskeskkonna arengu pikaajalisi suundumusi ja vajadusi. Planeerimise eesmärk on tagada võimalikult paljude ühiskonnaliikmete vajadusi ja huvisid arvestavad tingimused säästva ja tasakaalustatud ruumilise arengu kujundamiseks, ruumiliseks planeerimiseks, maakasutuseks ning ehitamiseks. Planeerimisvaldkonda iseloomustab seega planeeringu kehtestaja, üldplaneeringu puhul kohaliku omavalitsuse kui planeerimismonopoli omaja väga laiaulatuslik diskretsiooniruum.

Tulenevalt planeerimiseseaduse poolt sätestatud planeerimisprotsessi põhimõtetest tagada võimalikult head tasakaalustatud ruumilise arengu tingimused ja planeeritava tegevusega kaasnedes võivate mõjudega arvestamine, tõi 2003. aasta 1. jaanuaril jõustunud planeerimiseseadus sisse olulise ruumilise mõjuga objekti mõiste (edaspidi ORM), mille asukoha valik peab toimuma alternatiivsete asukohtade valikuprintsiibist lähtuvalt selliselt, et leitaks sobivaim asukoht objekti rajamiseks.

Seaduseandja eesmärk ORM mõiste sissetoomisel oli senise halva planeerimispraktika parandamine, kus suure mõjualaga objekti kavandamist alustati detailplaneeringu koostamisega, selgitamata välja laialdasemalt, kuidas see objekt mõjutab näiteks keskkonnaseisundit, transpordikorraldust või milline on avalik arvamus kogu objekti mõjualal. Eesmärk oli vältida näiteks Undva sadama taolisi juhtumeid, kus asuti sadama detailplaneeringut koostama, selgitamata, milline võib olla selle objektiga seotud mõju laiemal territooriumil ning kaalumata võimalikke asukoha alternatiive.

ORM on planeerimiseseaduse tähenduses objekt, millest tingitud transpordivood, saasteainete hulk, külastajate hulk ja tooraine või tööjõu vajadus muutuvad objekti kavandatavas asukohas senisega võrreldes oluliselt ning mille mõju ulatub suurele territooriumile. Olulise ruumilise

mõjuga objektide nimekirja kehtestab Vabariigi Valitsus määrusega (PIS § 8 lg6), nimetatud määruse (Olulise ruumilise mõjuga objektide nimekiri) punkt 6 loeb olulise ruumilise mõjuga objektide hulka kuuluvaks ka rohkem kui viie tuulikuga tuuleelektrijaama koguvõimsusega üle 7,5 MW.

### **Olulise ruumilise mõjuga objekti planeering kui väljakutse kohalikule omavalitsusele**

Seadusandja nägi ette sellise objekti kogu mõjupiirkonda käsitlevat asukohavalikut üldplaneeringu protsessi alusel. Olulise ruumilise mõjuga objektide asukohavaliku haldusmenetluslik protsess ja kaalutlemiskohustus delegeeriti sellega kohaliku omavalitsuse pädevusse.

Enamasti, tulenevalt maakasutusvõimalustest, soovitakse olulise ruumilise mõjuga objekte nagu tuulikupargid, jäätmekäitluskeskused või muud olulise mõjuulatusega tööstusettevõtted, rajada just haja-asustatud aladele. Sellest tulenevalt esitatakse just väikestele, suurte muutustega mitte harjunud ning tagasihoidlike analoogsete haldusmenetluslike planeerimiskogemustega omavalitsustele suur väljakutse. Regionaalse või isegi üleriikliku tähtsusega objekti asukohavaliku protsessi juhtimine ja kõiki osapooli rahuldava õiglase kaalutusotsuse langetamise kohustus seab sageli oma territooriumil planeerimis- ja ehitustegevuse eest vastutavale kohalikule omavalitsusele vastutusrikka ja raske ülesande protsessi suunata ja hallata nii, et oleks tagatud terviklik ja tasakaalustatud ruumiline areng.

Lisaks planeerimisseadusega sätestatud üldplaneeringu protsessi tavaregulatsioonile annab planeerimisseaduse § 8 lg 5 ORM'i läbiviimiseks mõningad erisätted. Planeerimisseadus annab olulise ruumilise mõjuga objekti planeeringu maa-ala määramise pädevuse üldplaneeringutele järelevalvet teostavale organile – maavanemale, kes koostöös kohaliku omavalitsusega määrab planeeringu maa-ala. Maavanema ja kohaliku omavalitsuse poolt määratud planeeringuala kooskõlastamise õigus on antud regionaalministrile. Maakondliku ja riikliku halduse kaasamise eesmärk on siinkohal regionaalsete ja riiklike arengu kavandamise ja suuniste järgimise tagamine vastavalt riiklike harukondlike strateegiliste dokumentide valdkondlike arengu eesmärkidele ja poliitilistele suundadele. Siit võib välja lugeda seadusandja soovi siduda üldriiklikud, regionaalsed ja kohalikud huvid, et kavandatud ruumilise arenguga kaasnedavad olulised keskkonnamõjud saaks piisavalt laialt hinnatud, et huvitatud osapooled oleks õigeaegselt kaasatud, tagatud üldine huvi ja tasakaalustatud ruumilise arengu tingimused.

Näiteks reguleerib riigi tasandil säästva arengu seaduse alusel vastuvõetud taastuvate energiaallikate kasutamist „Kütuse- ja energiamajanduse pikaajaline riiklik arengukava aastani 2015”. Arengukava näeb taastuvate energiaallikate kasutamise soodustamist riigi, kaasaarvatud omavalitsuste poolt. Aastaks 2010 peab nende osakaal ulatuma 5,1%-ni elektrienergia brutotarbimisest. Samuti kohustab Euroopa Liit tõstma taastuenergia osakaalu 2020. aastaks juba 20 protsendini. Tuuleenergia kasutamisega suurendatakse taastuenergia osakaalu Eesti energeetikas. Eesti kohustub Kyoto protokolli (Ühinenud Rahvaste Organisatsiooni kliimamuutuste raamkonventsiooni Kyoto Protokolli ratifitseerimise seadus) ratifitseerimisega 17. nov. 1998. a vähendama 1990. aastaga võrreldes oma territooriumilt aastatel 2008–2012 õhku paisatavate kasvuhoonegaaside heitkoguseid 8% võrra.

Kuna üleriigiline planeering „Eesti 2010” ega enamusjuhtudel ka maakonnaplaneeringud ei käsitle tuulikuparkide rajamiseks võimalikke suuniseid ega piirkondi ning ei anna üldist raamistikku kohalikule omavalitsusele üldiste strateegiatega järgimiseks, siis jääb sageli riigi ja maakonna tugi omavalitsusele väheseks, seda ennekõike just objekti kumulatiivsete mõjude aspektist, millega arvestamisel tehakse heal juhul koostööd naaberomavalitsustega, kuid terve regiooni üldpilt (näiteks mitmete tuulikuparkide koosmõju) jääb sageli häguseks.

Samuti peab kohalik omavalitsus suutma hakkama saada avaliku demokraatliku planeerimisprotsessi korraldamisega. Planeeringute koostamisel kui eriti laia diskretsiooniruumiga haldusmenetluslikul protsessil on eriti oluline roll kanda planeerimisseaduse ja keskkonnamõjude hindamise ja keskkonnajuhtimissüsteemi seaduse poolt sätestatud menetlusnõuete järgimisel ja avalikkuse arvamusega arvestamisel.

Tulenevalt kavandatava tegevuse iseloomust on ORM objektide asukohavaliku planeeringud alati kõrgendatud avalikkuse huviga protsess. Kohalik omavalitsus on kohustatud kõiki või võimalikult paljusid arvamusi ja seisukohti arvestades langetama otsuse üldistes huvides. Sellest tulenevalt on kohalikul omavalitsusel kohustus langetada parim ja õiglaseim lahendus/otsus, tehes seda haldusmenetluse seadusega antud volituste alusel, kaaluda otsustuse tegemist või valida erinevate otsustuste vahel ehk rakendades temale seadusega antud diskretsiooniõigust. Seega lasub kohalikul omavalitsusel kaalutusotsuse tegemisel kohustus igas planeerimismenetluse etapis, eriti õiguslike tagajärgi omavas otsuse tegemise etapis (algatamine, vastuvõtmine, kehtestamine), toetuda võimalikult laiapõhjalisele, faktilistele ja õiguslikele andmetele, et teostada õiguspärane otsus.

Sotsiaalse aspektiga arvestamine on seega kõige keerulisem ja eeldab läbimõeldud ning oskuslikku professionaalset kaasamisprotsessi. Olemasolevasse keskkonda ja maastikku uute mahukate struktuuride planeerimine toob endaga alati kaasa palju küsimusi ning hirme ja sellest tuleneva vastuseisu kavandatava suhtes.

Erinevate objektide kavandamisel tuleb osata arvestada eelarvamustega, mis on objektispetsiifilised ja mille selgitamisele tuleb pöörata erilist tähelepanu. Näiteks tuulikuparkide puhul on nendeks ennekõike kohalike elanike poolt tajutavad maastiku esteetilised muutused traditsioonilises põllumajandusmaastikus ja avatud vaadete asendumine mitmetasandilise tehnogeense horisondiga, mis nõuavad põhjalikku käsitlemist juba tuulikupargi kavandamise algfaasis. Samuti eeldavad sageli esinevad hirmud tuulegeneraatorite võimalikust negatiivsest mõjust inimeste tervisele ja bioloogilisele elukeskkonnale põhjalikku selgitamist ning avatud mõlemasuunalise diskussiooni olemasolu.

Kui planeerimis- ja otsustusprotsess ei ole piisavalt läbipaistev ja isikud ei näe, et nende huvide eest seistakse ja nende arvamusega arvestatakse, tekib kodanike võõrandumine ning sellest tulenevalt omakorda küsimus ja protestid omavalitsuse poolt tehtavate otsuste legitiimsuse kohta.

### **Kokkuvõte**

Kokkuvõtvalt võib öelda, et mida ausam ja avatum on planeerimisprotsess juba selle esimestest sammudest peale, seda suurema tõenäosusega saavutatakse avalike ja erahuvide tasakaal ja kompromiss ning avalikkuse heakskiit kavandatavale tegevusele. Demokraatlik, avalik läbirääkimiste protsess on kallis ja aeganõudev, kuid ilma selleta ei ole kohalikul omavalitsusel võimalik teha motiveeritud ja põhjendatud otsuseid.

### **Kasutatud kirjandus:**

Kütuse- ja energiamajanduse pikaajaline riiklik arengukava aastani 2015, <https://www.riigiteataja.ee/ert/act.jsp?id=829062>, viimati vaadatud 9. oktoober 2007. Üleriigiline planeering „Eesti 2010”.

Kasutatud normatiivmaterjal:

Haldusmenetluse seadus 6.06.2001. RT I 2001, 58, 354; 2007, 15, 76.

Keskkonnamõju hindamise ja keskkonnajuhtimissüsteemi seadus 22.02.2005. RT I 2005, 15, 87; 2007, 25, 131.

Olulise ruumilise mõjuga objektide nimekiri 15.07.2003 Vabariigi Valitsuse määrus nr 198 Planeerimisseadus 13.11.2002. RT I 2002, 99, 579; 2007, 24, 128.

Ühinenud Rahvaste Organisatsiooni kliimamuutuste raamkonventsiooni Kyoto Protokollit ratifitseerimise seadus 3.09.2002. RT II 2002, 26, 111; 2004, 43, 298.

## **PLANNING THE WIND PARKS AS OBJECTS WITH SIGNIFICANT SPATIAL INFLUENCE THROUGH BLOCK PLAN PROCESS**

*Peep Leppik*

Hendrikson & Ko

During recent years there has been an active development of wind parks in Estonia, which by Estonian Planning Act are defined as objects of significant spatial impact. Planning of such objects needs to take into account impacts to economic, socio-cultural and physical environment, but moreover pay close attention to social aspects of the planning process itself. Since planning of wind parks often creates wide public interest, the actual outcome and public opinion on developing a wind park depends largely on the transparency and openness of the planning process. The legal framework for achieving wide based public involvement and including different stakeholders in order to enhance openness is set by the Planning Act and Environmental Impact Assessment and Environmental Management System Act. The Planning Act places responsibility for coordinating the planning process of objects of significant spatial impact upon the local municipality. However, the local rural municipalities with favorable conditions for wind park development are often not equipped with knowledge and experience for coordinating such a complex planning process, balancing interests and making well calculated decisions along the process. Furthermore, little support can be found from regional or state level, since higher level plans lack strategies or remain vague about how to develop objects of significant spatial impact. For achieving wide based consensus and eliminating fears and doubts that arise from planning a wind park the local municipality has to aim for opened, transparent and cooperation based process from the very beginning of the planning process, which assures the legitimacy of the process and outcomes.

# EESTI PÄIKESEENERGIA NÄIV JA TEGELIK RESSURSS NING SELLE EFEKTIIVSE KASUTAMISE VÕTTED

Teolan Tomson

TTÜ materjaliteaduse instituut, Tallinn, 19086, Ehitajate tee 5 [teolan@staff.ttu.ee](mailto:teolan@staff.ttu.ee)

Aktinomeetriliste mõõtmistega horisontaalpinnale määratud päikeseenergia ressurss pole täiel määral realiseeritav, sest tehnilised seadmed on asimuuditundlikud. Tööpäeva pikendamine on võimalik odava kahepositsioonilise järgiva ekspositsioonirežiimiga, mis tagab paarikümneprotsendilise kasu. Heliofarmis on see pisut väiksem seadmete vastastikuse varjutamise tõttu. Sooja olmevee tootmisel päikesekiirguse abil on soovitatav rakendada erinevate parameetritega kollektorite jadaühendust.

*Märksõnad: aktinomeetria, kahepositsiooniline eksponeerimine, varjutamine, sooja olmevee tootmine.*

## Sissejuhatus

Päikesekiirguse mõõtmisi on Eestis tehtud juba aukartustäratava aja jooksul, pidevaid alates 1955. aastast (V. Russak ja A. Kallis, 2003). Viidatud allikas esitab 45 aasta (staatiliste mõõtmiste) andmed väga põhjalikult ning on hea lähtematerjal ainevallaga tegelejatele. Selle järgi on Eesti aastane keskmine kiirgusenergia  $\sim 970 \text{ kWhm}^{-2}$ , mis tundub küllalt ahvatlevana. Võrdluseks on tabelis 1 toodud mõnede tuntud paikade kiirgusenergia aastasummad (Martin jt, 2005) ja joonisel 1 selle kalendriline jaotus kuusummadena.

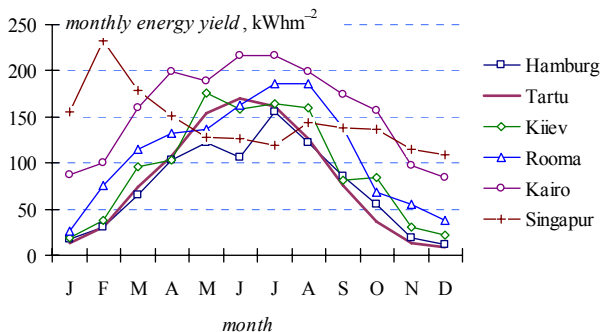
Tabel 1. *Aktionomeetrilise aastaressursi näited.*

Table 1. *Examples of the yearly energy yield.*

	Hamburg	Tartu (TRV)	Kiiev	Rooma	Kairo	Singapur
Laiuskraad N, °	53,05	58,25	50,4	45,43	30,08	1,37
Idapikkus E, °	8,8	26,5	30,45	12,55	31,28	103,98
Aastasumma, kWhm <sup>-2</sup>	892,6	970,2	1131,5	1318,6	1882,6	1735,4

Nii tabelist kui joonisest nähtub, et Eesti (täpsemalt Tõravere – TRV) energiasaagis pole oluliselt halvem teiste Euroopa paikadega võrreldes. Eesti paistab silma eriti terava päikeseenergia kalendriline jagunemisega:  $\sim 80\%$  energiast on koondunud suvekuudele. Talvekuudel seda praktiliselt polegi. Suvekuudel on see üsna võrreldav Kiievi ja Rooma

tulemustega ja ületab (praktiliselt ekvaatoril asuva) Singapuri energiasaagist. Paraku on see pilt petlik, sest aktinomeetritelistel mõõtmistel registreeritud kiirgusenergia on defineeritud horisontaalpinnale.



Joonis 1. Aktinomeetrilise kuuessursi näited.

Figure 1. Examples of the monthly energy yield.

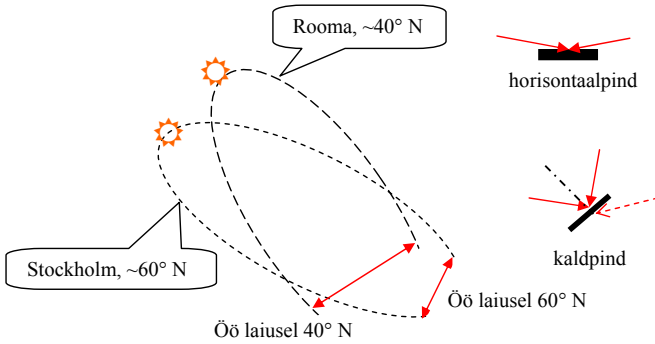
### Aktinomeetriliste mõõtmiste eripära

Joonisel 2 on kujutatud päikese rada Roomas ja Stockholmis juunikuus. Kõrgematel laiuskraadidel on päev pikem ja horisontaalpind on kiiritatud kogu valge aja vältel. Tehnilised seadmed on paigutatud kaldu ja seepärast osal päevast jääb päike koguni seadme seljataha. Veel on piiravaks tingimuseks kiirgust läbilaskva keskkonna (klaas) läbipaistvus  $\tau$ , mis sõltub kiirguse kohtumisnurgast  $\theta$  ja absorberi (kiirgust neelava pinna) absorptsioonitegur  $\alpha$ , mis sellest samuti sõltub. Seega on omandatav energia sõltuv nende korrutisest  $\tau\alpha$ , mida erialas käsitatakse iseseisva parameetrina.

Selle parameetri suhtelist väärtust  $k_\theta$  nimetatakse kohtumisnurga  $\theta$  modifikaatoriks ja selle matemaatiline avaldis (Solar Energy..., 2001)

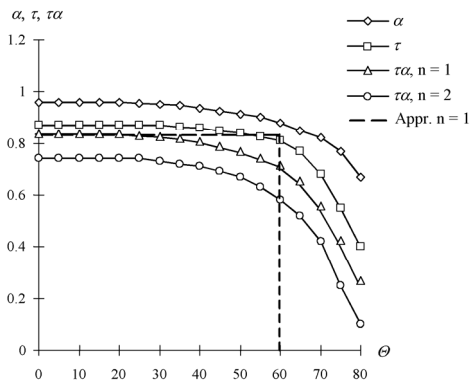
$$k_\theta = 1 - \tan^{1/r}(\theta/2), \quad r \in \{0,25-0,4\}$$

on suurte nurkade juures  $\theta > 60 \dots 70^\circ$  piisavalt hästi aproksimeeritav hüppefunktsiooniga; niisiis  $k_\theta = 1$  kui  $\theta < 60 \dots 70^\circ$  ja  $k_\theta = 0$  kui  $\theta > 60 \dots 70^\circ$ . Soojuslikel heliokollektoritel sõltub see veel optiliste katete arvust  $n$ .



Joonis 2. Päikese rada juunis, erinevatel laiuskraadidel.

Figure 2. Path of the sun, June month at different sites.



Joonis 3. Parameeter  $\tau\alpha$  nurgasõltuvus ja selle aproksimatsioon

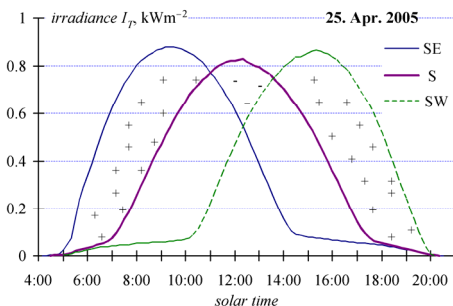
Figure 3. Transmittance-absorptance product depends on the value of the incident angle

Kokkuvõttes töötab suvaline kiirgust muundav tehniline seade vaid alla kümne tunni päevas, kui selle asend on fikseeritud. Pikk valge põhjamaine suvepäev ei ole täies ulatuses kasutatav. Kommentaar näite (joonis 2) juurde: Roomas on aastasumma  $1318 \text{ kWhm}^{-2}$  ja lõunasuunalise kollektori soovitatav kalle on  $25^\circ$ . Juunikuus jääb seejuures kasutamata 6 päikeselist tundi ööpäevas. Stokholmis on aastasumma  $975 \text{ kWhm}^{-2}$  ja lõunasuunalise kollektori soovitatav kalle on  $45^\circ$ . Juunikuus jääb kasutamata 10 päikeselist tundi ööpäevas. Mida lõuna poole, seda paremini läheneb tehniline ressurss aktinomeetrilisele ressursile.



## Tehnilise ressursi suurendamine

Tehniline ressurss suureneb aktinomeetrisega võrreldes tänu kollektori kaldele, mistõttu keskpäeval otsese kiirguse kohtumisnurk väheneb. Nimelt omandatakse kiirguse kollektori pinnaga risti olevat komponenti. Sobiva kaldenurga juures tõuseb sesoonne saagis selle arvel 10–15%. Sobiv kaldenurk ei ole ühetähenduslik: Eesti oludes annab suurima sesoonne saagise kaldenurk  $\beta=30^\circ$ , kuid saagise kalendriline sõltuvus on suur, lähedane joonisel 1 näidatule. Sesooni vältel ühtlasema saagise (mis on märksa praktilisem) tagab kaldenurga suurendamine väärtuseni  $45\text{--}60^\circ$ . Kaldenurga edasine suurendamine vähendab saagist, ehkki ka lõunapoolsete fassaadide katmine näiteks PV-moodulitega jääb päevakorda.

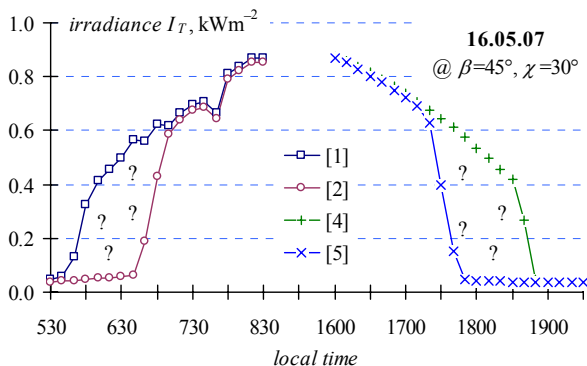


Joonis 4. Selge päeva kiirustiheduse diagramm erineva asimuudiga vertikaalpindadel.

Figure 4. Diagram shows irradiance on the vertical plane with different orientation in a clear day.

Päeva kasutamist saab pikendada, so ressursi suurendada päikese asendit järgivate kollektorite rakendamisega. Pidevatoimelised kahe- ja üheteljelised järgivad süsteemid õigustavad ennast ainult kõrbetingimustes parabool-kollektoreid rakendades. Eestis, kus on suur hajukiirguse osakaal, millel pole kindlat suunda, ning hajukiirguse kasutamiseks sobivate lamade kollektorite puhul pidev päikese järgimine ennast ei õigusta. Küll aga annab märgatavat efekti kollektorite rakendamine kahepositsioonilises režiimis. Sellisel kollektoril on (näiteks kaldu asetsev) pikitelg, mille ümber teda pööratakse nurga  $\chi$  võrra. Hommikupoolel asendisse  $a-\chi$  ja õhtupoolel asendisse  $a+\chi$ . Siin on  $a$  kollektori telje virtuaalne (näiv) asimuut. Kuna koosinusfunktsioon on (kohtumis-)nurga madalate väärtuste juures lame, pole asendi muutmise aja täpsus kuigi oluline. Joonisel 4 on kujutatud selgel suvepäeval realselt mõõdetud kiirustiheduse diagramm. Sellel on +-märkidega tähistatud hommikul ja õhtul tööpäeva pikenemise läbi juurde saadud energia, --mürgiga lõuna ajal kaotatud energia, sest lõunatundidel on otsekiirguse kohtumisnurk kasvanud. Võitu annab

otsekiirguse parem ärakasutamise ja sombustel päevadel kaheasendilise režiimist kasu ei ole. Aga selliste päevade energiasaagis on ka madal nii, et 45° kaldu ja kaheasendilise režiimis töötava üksiku kollektori efektiivsuse tõusu sesoonsel kasu võib hinnata ~20%, võrreldes sama kaldega lõunasuunalise kollektoriga (Tomson, 2006). Vertikaalsete kollektorite puhul on kasu isegi suurem ~30%.



Joonis 5. Siirdeprotsess kaldu paigutatud PV-moodulitel selge ilmaga.

Figure 5. Transient process of a PV-module in the tilted farm in a clear day.

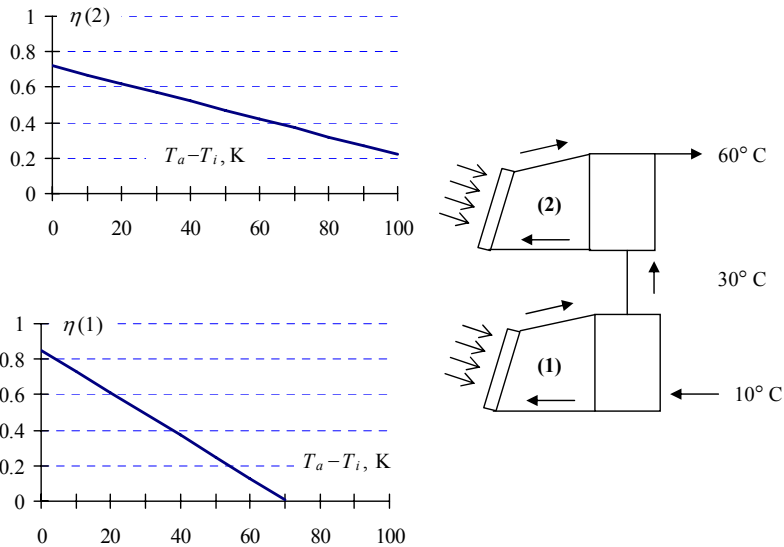
Kui kahepositsioonilise režiimis töötavad kollektorid on koondatud farmidesse, siis vastastikuse varjestamise tõttu kasu väheneb võrreldes üksiku kollektoriga. Nimelt libiseb hommiku ja õhtutundidel naabri vari üle vaadeldava kollektori, mis varjusiirde vältel töötab osalise pinnaga. Joonis 5 näitab farmis mõõdetud kiiritustiheduse  $I_T$  väärtusi meid huvitavatel ajaintervallidel. Osaliselt töötava pinna tunnuseks on küsimärgid (?) joonisel 5. PV-moodul on modelleeritud kahe püranomeetriga mooduli servadel, kusjuures [1] ja [2] kuuluvad SE suunas pööratud moodulile, [4] ja [5] SW suunas pööratud moodulile. [2] ja [5] on püranomeetrid mooduli sise- ning [1] ja [4] välisservadel, mis on kõige vähem varjutatud. Juhul, kui muundatud energia oleks võrdeline kiiritatud pinnaga (ja formaalse käsitluse puhul see nii ongi), siis oleks kasu vähenemine farmis (võrreldes üksiku PV-mooduli või kollektoriga) vaid mõõdukas. Kasutades päikese kiiritustiheduse statistilist mudelit, on farmisese mooduli teoreetiline tootlikkus leitud 0,93 analoogilise vaba mooduliga võrreldes, so kasu väheneb väärtuselt 1,3 väärtuseni 1,23, kuid jääb ikkagi arvestatavaks suuruseks. Eksperimendil leiti vastav tootlikkus 0,96, aga 2006. aasta suvi oli ka märksa päikeselisem statistilise keskmisega võrreldes. Farmis olevate moodulite ridade suhteline vahe (moodulite

sammu ja laiuse suhe  $d_R$ ) peaks ületama väärtust  $d_R < \{2...3\}$ ; kui see on vähem, hakkab kasu kiiresti vähenema. Käsitlusviisi formaalsust on rõhutatud ja joonisel on siirderežiim tähistatud küsimärkidega, sest tegeliku kasu määrab ka PV-mooduli või soojusliku kollektori siseehitus. Kui tegemist on PV-mooduliga, milles jadamisi fotorakud (*PV-cells*) on omakorda rööpühenduses ja seda rööbiti pöördeteljega, või kasutakse siug-voolukanaliga soojuslikku heliokollektorit, on toodetud energia võrdeline kiiritatud pinnaga. Kui fotorakud on teisiti ühendatud, määrab väljundvoolu üksainus nõrgalt kiiritatud fotorakk, kuna viimased on voolugeneraatorid. Osaliselt varjutatud rööptorudega soojusliku kollektori käitumise kohta ei saa ilma eriuurimiseta midagi ütelda, sest ilmselt tekivad sisemised ringvoolud nii, et osa pinda toimib absorberina ja osa soojust kiirgava radiaatorina. See vahekord oleneb ka soojuskandja ringlusest süsteemis.

### **Sooja olmeveesüsteemi parendamine**

Sooja vett saab toota ~15% rohkem, kui süsteem koostada kaheastmelisena (Tomson, 2000) nii, et kummaski astmes rakendatakse vastavale temperatuuripiirkonnale sobiva karakteristikuga termilist heliokollektorit.

Autori arvates on sooja olmevee tootmine suvesesoonil juba rentaabliks muutunud. Arvutuste kohaselt lihtsustatud süsteem kujuneb majanduslikult põhjendatuks siis, kui elektri hind saavutab taseme  $1.5 \text{ kr} \cdot \text{kWh}^{-1}$  (Tomson, 2000). See tase on 2007. aastaks juba saavutatud. Esimeses astmes (vt joonis 6) on heliokollektor nõrga optilise kattega, kuid suure läbipaistvusega ja see soojendab vett temperatuurini 30–40°C, ja mille väljund omakorda on sisendiks teisele astmele. Teises astmes kasutatakse heliokollektorit kaheklaasiline, täiendava soojustisoleeriva õhuga, kuid samas vähema almuundusteguriga. Teine aste toimib temperatuuridel 30–60 °C. Kõrgema temperatuuriga olmevee tootmisel ei ole mõtet. Joonis 6 on põhimõtteline ja arvestab vett soojuskandjana. Seda skeemi on küsitav rakendada külmumiskindlas kahekontuurilises soojavesüsteemis, sest värvilisel metallist soojusvaheti antifriisi ja vee vahel on kallis seade. Võib-olla tuleks mõeldud sajandi üheksakümendatel sooritatud uurimiste juurde tagasi pöörduda ja kontrollida, millist efekti annab erinevate jadamisi lülitatud siugtorukollektoritega kahekontuuriline soojavesüsteem. Viimast saab ehitada vaid ühe soojusvahetiga.



Joonis 6. Efektiivne kaheastmeline sooja olmevee süsteem.

Figure 6. Effective two-stage domestic hot water system.

### Kokkuvõte

Päikeseneergeetika kõrgetel laiuskraadidel nõuab keerukamat tehnoloogiat, kuid on suvesesoonil siiski täiesti rakendatav.

### Tänuavaldus

Käesoleva töö materjal on kogutud SA Eesti Teadusfond grantide 4493, 5671 ja 6563 toetusel.

### Kasutatud kirjandus:

Martin, Ch. I., Goswami, B. Y. 2005. Solar Energy Pocket Reference, ISES, 87 pages.

Russak, V., A. Kallis V. Eesti kiirguskliima teatmik 2003. Toim. H. Tooming, Tallinn, EMHI, 384 lk.

SOLAR ENERGY. The state of the art. Ed J. Gordon, 2001, James & James, London.

Tomson, T. 2006. Üksiku kahepositsiooniliselt juhitava heliokollektori omadused. TEUK seitsmenda konverentsi kogumik, peatoimetaja V. Tiit, O/Ü Halo, Tartu, 112–120.

Tomson, T. Helioenergeetika. Päikeseenergia tehniline kasutamine. 2000, Tallinn, O/Ü Humare, 136 lk.

## **VIRTUAL AND REAL SOLAR ENERGY RESOURCE IN ESTONIA AND ITS EFFECTIVE UTILIZATION**

Teolan Tomson

Institute of the materials science of Tallinn Technological University

The actinometrical solar energy resource is defined on the horizontal plane and cannot be completely realized due to dependence of technological equipment on the azimuth. The performance period per day can be prolonged if we use the cheap two-positional exposure of solar collectors (or PV-modules). The obtained gain has order 20–30%. In the farm conditions it's some degree less due to mutual shadowing of collectors. To produce domestic hot water the two-stage series connected pair of collectors with different parameters can be recommended.

# ÜLEVAADE ENERGIASALVESTUSE TEHNOLOOGIADEST

Hillar Toomiste

Säästva arengu keskus OÜ, e-post: [hillar.toomiste@ecopark.ee](mailto:hillar.toomiste@ecopark.ee)

## **Annotatsioon**

Käesolevas artiklis antakse ülevaade energiasalvestuse ning muundamise tehnoloogiast. Hindamise alusena kasutatakse energiakandja mahulist energiatihedust. Sellest lähtepunktist vaadates on isegi metanoolil suurem energiatihedus kui veeldatud vesinikul. Lähemalt vaadeldakse hooratta ja surugaasi abil energia salvestamise tehnoloogiaid. Tutvustatakse ka uut hübriidauto–tehnoloogiat, mis tarvitab 1,8 liitrit diiselkütust 100 km läbimiseks.

*Märksõnad: energiasalvestus, energia muundamine.*

## **Sissejuhatus**

Energia salvestamine ja energia muundamine on vahetult üksteisega seotud protsessid. Kõik energialiigid vajavad enne salvestamist mitmekordset muundamist, selleks, et neid salvestatud olekust kätte saada. Siin on ehk ainsaks erandiks jõe paisutamine tema veehulga potentsiaalse energia salvestamiseks. Sellegi energia kasutamiseks tuleb muundamistsükkel läbi teha.

Kõige üldisemalt saab energia salvestusmeetodeid jagada füüsikalisteks ja keemilisteks. Füüsikalise salvestamise all mõistetakse keha oleku muutumist, seega saab salvestada soojuslikku, potentsiaalset, kineetilist või elektromagnetilist energiat. Potentsiaalset energiat kannavad näiteks sururõhk ja hüdroelektrijaama veehoidla, kineetilist energiat saab salvestada näiteks hoorattasse, elektromagnetilist energiat hoiab elektrikondensaator. Keemilise salvestamise all mõistetakse aine muutumist ja salvestamist, nt pliiaku laadimisel moodustuvad kaks erinevat ainet, mis hiljem võivad uuesti laguneda ja vabastada salvestatud energia.

## **Energiakandjate energiatihedused**

Vaatleks nüüd tabeli 1 abil erinevate energiakandjate poolt võimaliku energiatiheduse väärtuste skaalat. Nagu tabelist näha, ei ole sorteerimine tehtud mitte energiahulga järgi massi kohta, vaid ruumala kohta. Selline lähenemine on praktilisem, kuna igapäevases elus on meile olulisem, kui suurt tünni peame kaasas kandma, et tagada piisava energiahulga olemasolu mingi ülesande lahendamiseks.

Tabel 1. *Energiakandjate energiatihedus.*Table 1. *Energy densities of energy carriers.*

Energiakandja	Efektiiv-		Energiakandja	Efektiiv-	
	sus	kWh/kg kWh/L		sus	kWh/kg kWh/L
B		16,36 38,28	metanool		5,47 4,33
Al		8,61 23,28	H <sub>2</sub> vedelikuna		39,72 2,81
Si		8,94 20,86	metaan 200 bar		14,89 2,78
C grafiidina		9,08 20,25	hooratas aeglane	81–94%	0,14 1,94
kivisüsi	36%	9,03 20,11	H <sub>2</sub> gaasina 700 bar		39,72 1,31
Fe		206 16,08	puit kuiv		4,72 0,89
hooratas kuni LiBH <sub>3</sub> (lithium borohydride)		0,94 15,00	Lithium Thionyl Chloride aku		0,35 0,77
		18,11 12,06	Li - S patarei kuni		0,40 0,53
Mg		6,86 11,94	Liioon aku kuni		0,20 0,53
polüetüleen		12,86 11,83	puit märg		1,67 0,50
diiselmootor	28%	12,72 10,75	Na - S aku	85%	0,22 0,34
Zn		1,47 10,56	Liioon aku alates	95%	0,15 0,25
bensiin	20%	13,03 9,61	Li - S patarei alates		0,15 0,25
biodiiselmootor	27%	11,72 8,48	NiCd aku	80%	0,06 0,16
hooratas alates		0,53 8,33	NiMH aku	60%	0,06 0,10
butanool		10,17 8,11	Va - Br aku	81%	0,05 0,07
E10		12,09 7,79	Pb aku	75–85%	0,03 0,05
suhkrud	25%	4,72 7,28	suruõhk 300 bar Va (vanadium redox)		1,11 0,04
Ca		4,42 6,83	aku	70–75%	0,03 0,03
etanool		8,33 6,67	superkondensaator	98,50%	0,02 0,013
Li		11,97 6,39	H <sub>2</sub> gaasina normaalrõhul		39,72 0,003
propan		9,55 6,16	suruõhk 20 bar vesi 100 m tammil	64%	0,08 0,0026
vask termiit (Al + CuO)		1,15 5,81	taga	85–90%	0,0003 0,0003
termiit (Al + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		1,11 5,11	kella vedru		0,0001 0,0002

Tabelist nähtub, et vesinik on isegi vedelal kujul madalama energiatihedusega kui metanool ja etanoolist isegi kaks korda madalama energiatihedusega. Seega oleks mõistlikum kütuseelementide väljatöötamisel kasutada pigem suurema energiatihedusega kütust kui püüda otsest vesiniku kasutamist arendada.

## **Kütuselemendid**

Tabeli ülaosas on hulk keemilisi elemente, mille ühinemine hapnikuga vabastaks suure hulga energiat. Seda teed on läinud „Power Air Corporation Technology” ([www.poweraircorp.com](http://www.poweraircorp.com)), kes on välja töötanud kütuselemendi, mille kütuseks on tsingigraanulid. Pärast kasutamist on jääkproduktiks tsinkoksiid, mis on uuesti ümbertöödeldav tsingigraanuliteks.

Islandil on peetud plaane ka alumiiniumi kasutamiseks energiakandjana. Näiteks 20 kg alumiiniumi oksüdeerimisel vabaneks 170 kWh energiat ja jääkproduktina tekiks 60 kg alumiiniumoksiidi. Seda oleks võimalik uuesti regenereerida alumiiniumiks. Kahjuks pole aga veel leitud madalatemperatuurset regenereerimise meetodit ja kasutatud kütuse transport tagasi tehasesse moodustaks olulise osa kogu süsteemi maksumusest.

## **Akad**

Akad moodustavad kõige tavalisema osa meie igapäevase elu energiasalvestuse seadmetest. Siin on välja töötatud hulk tehnoloogiaid, millest parimate tulemusteni on jõutud liitiumakudega. Aga hoolimata sellest pole akad veel nii suure energiatiheduse ja elueaga, et oleks majanduslikult mõistlik hakata elektriautot ehitama.

Huvitava kategooria moodustavad vedelat soola elektrolüüdina kasutavad akad. Nendel on suhteliselt suur mahutavus ja head võimsuslikud parameetrid, aga probleemiks on aku töötemperatuur, mis peab olema 250 °C. Selliseid tingimusi ei saa sõiduautos alati tagada.

Veel üheks perspektiivseks aku liigiks on vanaadiumakad. Õigemini töötavad need nagu kütuselemendid, neisse salvestuv energia on vedelas elektrolüüdis ja seda hoitakse eraldiseisvas mahutis. Seega on aku mahtuvuse suurendamiseks vaja lisada täiendav mahuti koos lisaelektrolüüdiga. Veel üheks positiivseks küljeks on tema kiire ümberlülitumise võime (25 ms jooksul laadimiselt tühjenemisele) ja pikk eluiga.

## **Hoorattad**

Huvitava projekti on teinud Siemens koos 50%-lise EL-poolse rahastusega. Projekti ULEV-TAP ([www.ulev-tap.org](http://www.ulev-tap.org)) käigus ehitati hoorattaga ajam trammile ja bussile. Eesmärgiks oli ülimaldala saastusega transpordivahendi loomine. Projekt oli edukas ja selle käigus töötati välja järgnevate parameetritega seade:

pidev võimsus: > 500 kW

energiamahtavus: 4–5 kWh



laadimise-tühjendamise efektiivsus: > 90%

maksimaalne kaal: 800 kg

mõõtmed (pikkus, laius, kõrgus): 1,600 x 1,850 x 583 mm.

## Hübridauto

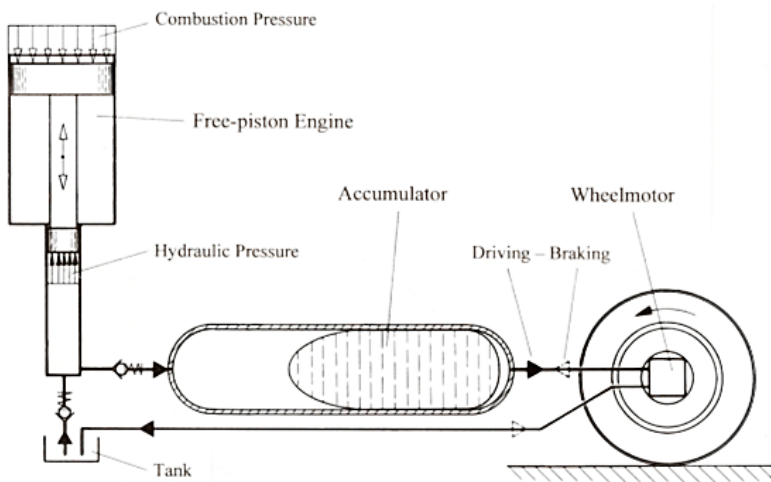
Hübridautode senine areng on olnud pigem piinlik kui edukas. Loomulikult on see kaasa toonud mõningase kütuse säästu, aga kahte põhiküsimust pole suudetud adekvaatselt lahendada: energia regenereerimine pidurdamisel ja kütuseenergia efektiivne kasutamine. Kõik siiani toodetud hübriidautod on komplekteeritud madala efektiivsusega bensiinimootoritega.

Käesolevaks hetkeks on olukord muutunud. Firma „Valentin Technologies” ([www.valentintechnologies.com](http://www.valentintechnologies.com)) on välja töötanud 5-kohalise pereauto tüüpi hübriidauto.

Selle auto põhinäitajad on:

- kaal 1000 kg
- kandevõime 470 kg
- maksimaalne kiirenduse aeg 0–100 km/h – 5 sekundit
- maksimaalkiirus 150 km/h
- kütusekulu 1,8 liitrit/100 km.

Sellist autot võib lugeda edukaks tehnoloogiaks. Saavutatud on see täiesti tavapäraste tehnoloogiate oskusliku sobitamise teel. Kõik kasutatavad tehnoloogilised põhimõtted on 50 kuni 100 aastat vanad. Erandiks on 25 aastat igapäevases kasutuses olnud arvuti, mis seda juhib. Joonisel 1 on kujutatud auto põhimõtteline skeem. Energiat saadakse väntvõllivabast diiselmootorist. Gaaside paisumise energia kantakse hüdroüsteemi abil üle survemahutisse (paisupaaki), kus selle abil surutakse energiat salvestav gaas kuni 470 baarini kokku. Kõikides ratastes asuvad hüdromotorid, mida kasutatakse survemahutist saadava hüdroõliga. Esiratastes paiknevad hüdromotorid võimsusega 170 kW ja tagaratastes olevad 80 kW. Selline 500 kW võimsusega veomootorite süsteem tagab autole täieliku pidurdusenergia ärakasutamise ja suurepärase kiirendusvõime. Huvitav on asjaolu, et diiselmootor töötab sisuliselt impulssrežiimis. Ta käivitatakse ainult juhul, kui surve paisupaagis läheb liiga madalaks. Paisupaagi energiamahutvus on 0,5 kWh, mis on piisav 16 kuni 24 km läbimiseks või ka auto täielikuks pidurdamiseks 4 sekundi jooksul.



Joonis 1. Hüdrostaatilise hübriidauto põhimõtteline skeem.

Figure 1. Principal scheme of hydrostatic car.

Sellist tehnoloogilist lahendust vaadates oleks sama printsiipi kasutavate tuulikute juures torni tipus ainult hüdro mootor, mis parima efektiivsusega ja optimaalseima pöörlemiskiirusega väärandaks tuuleenergiat. Survemahutid ja elektrigeneraator võiksid asuda maa peal, kus on neid ka lihtsam teenindada. Sobiliku konstruktsiooni juures võiks ka torn toimida survemahutina. Tuule kõikuva iseloomu tasakaalustamiseks sobiks hästi impulssrežiimis töötav diiselmootor. Saaksime suurepärase ja stabiilse energiaallika.

### Lõpetuseks

Energiasalvestuse ainukest meetoditena pole vaja loota ainult tulevase vesinikuenergeetika suurele õitsengule või Norra järvedesse vee pumpamisele. Mõlema nimetatud tehnoloogia kasutamise kasutegurid jäävad 40 kuni 55% vahemikku. Hooratas, surugaas ja vanaadiumaku võimaldavad energiat salvestada selle tekkekohal ja vältida asjatuid transpordikuluseid.

## **OVERVIEW OF ENERGY STORING TECHNOLOGIES.**

Hillar Toomiste

Centre of Sustainable Development

Current article holds on overview about energy transformation and storing. The evaluation is based on volumetric energy densities of energy carriers. From this point of view even methanol has a better energy density than liquid hydrogen. There is a closer introduction about flywheel and compressed gas technologies as more convenient and cheaper technologies. In article is an introduction about hydrostatic hybrid car which consumes 1,8 litre's of diesel for 100 km.

# TOWARDS AN EFFICIENT ENERGY CONVERSION FROM BIOMASS OF SEMI-NATURAL GRASSLANDS

Michael Wachendorf, Thomas Fricke, Rüdiger Graß, Reinhold Stülpnagel

Department of Grassland Science and Renewable Plant Resources, University of Kassel

Steinstrasse 19, 37218 Witzenhausen, Germany

## Abstract

Due to high feed-in tariffs for regenerative electricity, the generation and electrification of biogas from renewable resources in the German agriculture has increased strongly in recent years. With common biogas plants the conversion of biogas to electricity, produces up to 50% of energy as heat. Often this energy is not used, which means that the overall efficiency of energy conversion from biomass to useable energy is low. It is of particular interest in how far biomass from semi-natural grasslands can be used for energy production, as perspectives for a regular use as fodder are low and vast areas are already abandoned throughout Europe. The introduction of a mechanical dehydration of ensiled biomass prior to the anaerobic digestion provides a promising alternative. The pressing procedure provides a solid which contains more than 60% of the original dry matter (DM) and a liquid with up to 40% of the original DM. After pressing DM content of the solid ranges from 42 to 52%. The DM in the liquid, which mainly contains easily fermentable components, is then fermented in an anaerobic digester. The biogas produced should cover the energy demand for drying the solid phase to a storable fuel. With the proposed procedure a significant reduction in undesired components in the presscake (i.e. N, P, K) is achieved. On the one hand the quality of the presscake as a solid fuel is increased, on the other hand the mass fluxes of organic matter, ashes and nitrogen via the anaerobic digestion are essential for the ecological feasibility of the cropping system.

*Key Words: semi-natural grassland, nature conservation, biogas, solid fuel, bioenergy.*

## Introduction

Significant restrictions for the anaerobic fermentation of whole plants in general and biomass from semi-natural grasslands in particular are lignified cell wall structures. High contents of these constituents delay the fermentation processes and reduce the biogas output and therewith the energy profit. Energy demands of for heating, agitation, etc. and residual carbon in digestates decrease unavoidably the efficiency of conversion into usable energy. Even with a fermentation of common energy crops (e. g. of energy maize) in conventional biogas plants this value comes up to 50 to 60% (heat utilisation included). As a consequence the energy in

the biomass is utilised in a comparatively minor dimension (SCHEFFER, 2006b). Via the digestates big amounts of energy are restored to the fields with remarkable energy expenses (transport, turnout, etc.). Indeed buildings are heated, but utilisations in rural areas are frequently missing. The biogas association estimates that in 2005 nearly 2 billion MWh as heat from German biogas plants remain unused. If this heat would be used in private homes instead of gas, over 122.000 German households could be heated for one year. This marginal use of waste heat is basically due to the peripheral location of most biogas plants. External consumers, like business enterprises or residential developments, are often too far away. The installation of a district heating network is in the majority of cases therefore not profitable. Only few manufacturing processes feature a year-round and constant heat requirement. In this respect particularly sub-mountainous regions are confronted with huge problems:

- i. Low population densities and low numbers of industrial heat customers aggravate an economic operation of plants, the more so as the public investment allowances are in the future only granted by a proofed heat utilization concept. Difficult transportation routes with marked differences in altitude complicate the supply of biomass to the plants and accordingly the return of digestates to the field.
- ii. Social claims concerning the leisure and recovery function of landscapes normally jar with the operation of major biogas plants and their technical-logistic consequences.
- iii. For the protection of endangered plant species nature conservation demands an extensive grassland farming delayed cutting dates. In this way produced biomass shows a limited potential for a forage or energetic utilization.

For grassland biomass mainly two conversion routes are discussed: anaerobic fermentation (generation of biogas) and thermal conversion (combustion). Grassland as a substrate for the generation of biogas has a certain importance, where it is abundant due to local conditions and where it can be used as a co-substrate besides ensiled maize and/or liquid manure. Grassland biomass is particularly attractive, if the location does not allow maize growing and has in consequence relatively low land costs. These locations are normally quite intensively managed grassland types with a low diversity of species. If species-rich swards shall be conserved, a low utilisation frequency is needed and thereby only a thermal use of hay is possible. Unfavourable combustion properties of hay (in particular emission and ash problems; Kaltschmitt and Hartmann, 2003) besides other difficulties have prohibited a further distribution so far. Aim of the proposed technology is the production of a solid fuel with a high overall efficiency and an acceptable fuel quality. The technique suggested

separates the heavy fermentable elements of the silage using a mechanical press and supplies merely the press liquid to the fermentation (Scheffer, 1993; Reulein, 2007a; Wachendorf et al., 2007). While the generated electricity from the biogas-combustion at the combined heat and power plant gets fed in, the incidental heat is used for drying the press solid and is marketed as a transportable solid fuel (Fig. 1). In contrast to a thermal drying, mechanical dehydration expels the water far more efficient. For the present process a worm extruder (type A<sub>v</sub>, *anhydro LTd.*, Kassel, Germany) has proved adequate. In this case the drying is admittedly accompanied by a decrease of available biomass for combustion. But this biomass fraction is available as a (predominantly) well fermentable substrate in the press liquid, so that approx. 150% of the energy needed for the dehydration and approx. 100% of the heat energy for the after-drying arises from the fermentation in the associated biogas plant (data from experiments with maize silages). Therefore the solid fuel produced can be considered as net energy source (without any hidden additional energy demands) (Reulein, 2007b).

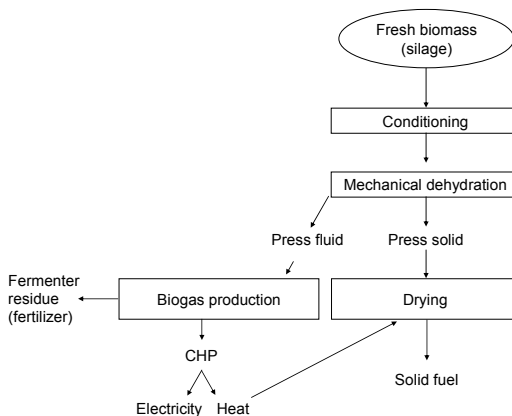


Fig. 1. Principle of the integrated biogas and solid fuel production from agricultural biomasses.

Concerning the potential biogas yield, the press liquid has been found a very favourable substrate for biogas plants, as the decomposition is very fast and occurs nearly complete. For this purpose the potential biogas and methane yields as well as the fermentation behaviour and the decomposition dynamic were examined with an experimental batch fermenter according to Zerr (2006). High methane yields between 450 and 500 litre CH<sub>4</sub> per kg oDM and decomposition rates above 90% were achieved from maize-press liquids, whose base materials were harvested at an early stage, as well as press liquids derived from ensiled grass.

The decomposition of the press liquids takes maximal 4 days (Bühle et al., 2007). Extensive research into the fermentation process in the continuous mode of an agitated experimental fermenter have demonstrated that a stable fermentation is merely possible under a high volume load and low retention times. A further increase of the volume load respectively to shorten the retention time, would lead to a discharge of bacteria and therewith to a collapse of the fermenter biology. With a fixed bed reactor a stable fermentation with very low retention times could be realised. Examinations of different mineral, synthetic and organically fixed bed materials lead to a more differentiated picture, which allows statements concerning the aptitude of those materials for an immobilisation of the bacterial biomass (Günther et al., 2007). Another essential aspect of routing the organic and mineral constituents from the ensiled biomass either into the press liquid or press solid lies in the relevance of potassium, chloride and nitrogen in the press-solid as they induce problems for furnaces and airways (ash slugging, corrosion and emissions) during combustion. On the other side, the transport into the liquid phase would accomplish the return of these agronomically essential elements with the digestates onto the field.

### **Material and Methods**

Ensiled intensive grassland biomass (first cut, dominated by *Lolium perenne* and *Dactylis glomerata*) from an agricultural dairy farm in the Northern Hesse served as substrate. Furthermore biomasses from extensive, semi-natural grasslands at high altitudes of the Black Forest and Rhön were used. They comprised mostly lignified forages from typical grassland communities (e.g. Arrhenatheretum, Trisetetum, Nardetum, different tall-herb communities, etc.) harvested late in July. The ensiled biomass was mashed under different temperature levels between 5 °C and 100 °C with water at the rate of 1:5 and was afterwards mechanically drained with a worm extruder. To obtain a reference value, the silage was put directly into the press without previous mashing. Beside DM contents, the Ca-, N-, P- and K-contents were determined in the base material, in the press solid and in the press liquid. The respective fractions of press solid and press liquid were calculated (based on DM) in relation to the base material. Based on the calculated fractions and the analysed parameters the mass flows of the different constituents (DM, oDM, Ca, N, P, K) in the press liquid were determined.

## Results

### Intensively managed grassland

Mash temperature exerted different effects on the mechanical dehydration. On the one hand DM contents in press solids of ensiled grass were only little affected by mashing at increasing temperatures. On the other side the quality of resulting solid fuel could be improved significantly by mashing prior to the mechanical dehydration. Corrosion supporting and emission relevant mineral nutrient contents (P, K), as well as the nitrogen and ash content were reduced. Especially the K- and P-content in the press-solids of both base materials could be reduced in most cases to a content, which is comparable with the one of wood fuels. Figure 2 shows the effect of mashing on the K-content in the press-solid derived from ensiled grass as a base material. Mashing at 60 °C reduced the K-content in the press-solid by about 88% compared to the base material.

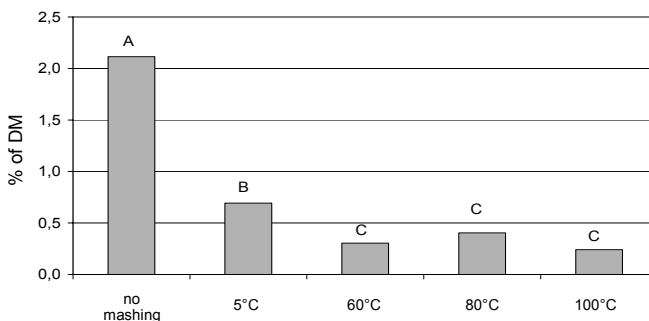


Fig. 2. *K* content in the press-solid of intensively managed grass as affected by mashing of the ensiled biomass prior to mechanical dehydration [significant differences between the press-solid means are marked by different letters ( $p < 0.05$ )].

Mashing at increasing temperature increased the mass flow of oDM, N, P, K and Ca into the press liquid. Figure 3 exemplarily demonstrates the mass flow of N due to the pressing of ensiled grass. Though the mass flow of N could be improved by increasing mashing temperatures, the values of K (up to 90%) were not achieved. Obviously, parts of the N in grassland plants are bound in cell wall structures, and thus are not available to be washed out into the liquid phase.



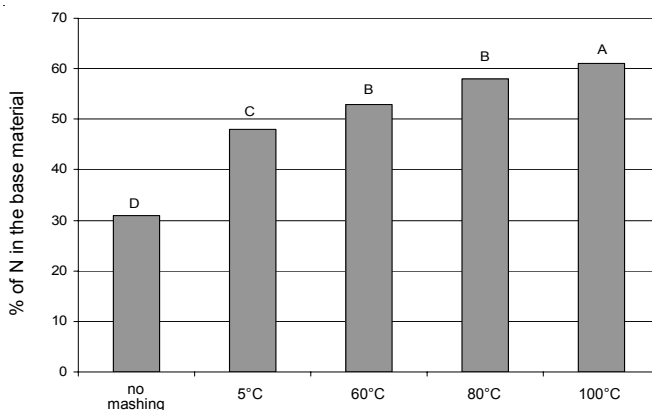


Fig. 3. Mass flow of N into the press liquid during mechanical dehydration of intensively managed grass [significant differences are marked by different letters ( $p < 0.05$ )].

#### Extensive, semi-natural grassland

K, P, N and oDM fractions found in the press liquid (Figure 4) were obviously affected by the conditioning of the silages as was apparent with the intensively managed grassland. In the diagram only average values across all grassland types are given. An increased mass flow into the press liquid could be achieved for all examined ingredients by a 15 minute mashing at increased temperatures compared to mashing with cold water. Using water of 60 °C lead to a mass flow into the press liquid of 84% K, 72% P, 38% N and 30% oDM. Only in the case of N an increase of the mash temperature to 80 °C could achieve a further (but small) increase in mass flow.

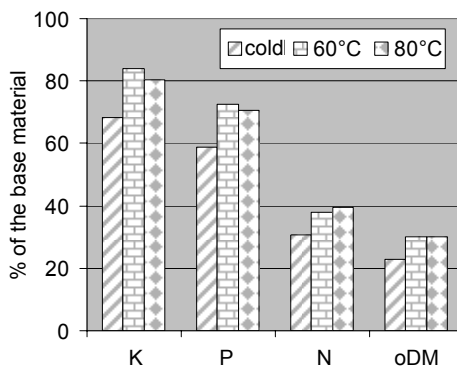


Fig. 4. Mass flows of N, P, K and oDM into the press liquid of extensive grassland (% of base material) as affected by mashing with different temperatures prior to mechanical dehydration.

Figure 5 compares the base materials with the differently conditioned press solids concerning the ingredients N, P, K. It appears that a short cold mashing already induced a reduction in these parameters in the press-solid, which could be further enhanced by a 15 minute mashing at 60 °C. An increase of the mashing temperature to 80 °C only caused further reductions in the case of nitrogen.

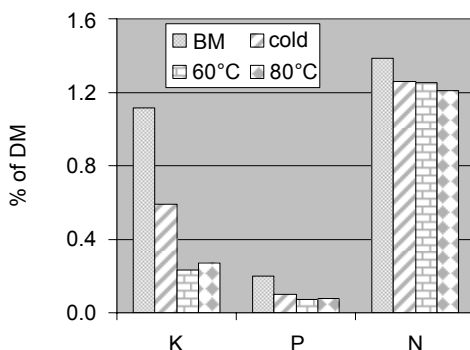


Fig. 5. K-, P- and N content in the base material (BM) and in the press-solid of extensive grassland as affected by mashing of the ensiled biomass prior to mechanical dehydration [significant differences between the press-solid means are marked by different letters ( $p < 0.05$ )].

## Summary

The integrated biogas and solid fuel production provides interesting aspects for an economical and ecological reasonable utilisation of grasslands in low mountain ranges and other rural areas. Compared to original biomass, chemistry of the solid fuel can be significantly improved by mashing the silage followed by the dehydration with a screw press. An essential feature will be the methane potential of press liquids, as this issue determines the amount of external heat which is needed to achieve crucial DM contents in the press solid. Ongoing research at the University of Kassel deal with the quantification of crop specific effects on the overall process and its components, with the objective of continuing technical improvements and questions on the local implementation of this technique.

## References

Bedenk, K., Fricke, T., Reulein, J., Stülpnagel, R., Wachendorf M. 2007. Charakterisierung der Mineralstoff- und Organik-Flüsse bei der mechanischen Abpressung von

- Grünlandaufwüchsen herkömmlicher Nutzungsintensität (in German). Proceedings of the 51. AGGF Meeting, 180–183.
- Beyrich, W., Emanuel, M., Neff, R., Fricke, T., Reulein, J., Stülpnagel, R., Wachendorf, M. 2007. Charakterisierung der Mineralstoff- und Organik-Flüsse bei der mechanischen Abpressung extensiver Grünlandaufwüchse. Proceedings of the 51. AGGF Meeting, 184–187.
- Bühle, L., Stülpnagel, R., Scheffer, K., Zerr, W., Wachendorf M. 2007. Gärdynamik und Methanbildungspotenzial von Presssäften mechanisch entwässerter Silagen. Proceedings of the 51. AGGF Meeting, 188–191.
- Günther, D., Bühle, L., Reulein, J., Zerr W., Wachendorf M. (2007): Eignung verschiedener Materialien als Festbett bei der anaeroben Fermentation von Presssaft aus mechanisch entwässerten Ganzpflanzsilagen. Proceedings of the 51. AGGF Meeting, 192–195.
- Kaltschmitt, M. und Hartmann, H. 2003. Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin.
- Reulein, J., Scheffer, K., Stülpnagel, R., Bühle, L., Zerr, W. and Wachendorf, M. 2007a. Efficient utilization of biomass through mechanical dehydration of silages. Proceedings of the 15th European Biomass Conference, Berlin, 1770–1774.
- Reulein, J. 2007b. Optimierung der energetischen Nutzung von feucht konservierten Pflanzenarten und Stroh durch Trennung in festen Brennstoff zur Herstellung von Pellets und flüssiges Biogassubstrat mittels Schneckenpresse. Abschlussbericht FNR- FKZ: 220 217 03.
- Stülpnagel, R. 1993. Der Tropenlandwirt, Beiheft Nr. 49, – Wege und Chancen bei der Bereitstellung des CO<sub>2</sub> -neutralen Energieträgers Biomasse, Selbstverlag des Verbandes der Tropenlandwirte, Witzenhausen.
- Scheffer, K. 2006. Optimierte Konzepte für den Anbau und die energetische Nutzung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. <http://www.energiewart.fechnermedia.de/downloads/Pflanzenbau2.pdf> 2006.
- Wachendorf, M., Fricke, T., Graß, R., Stülpnagel, R. 2007. Ein neues Konzept für die bioenergetische Nutzung von Grünlandbiomasse. Proceedings of the 51. AGGF Meeting, 165–168.
- Zerr, W. 2006. Versuchsanlage zur energetischen Beurteilung von Substraten und Kofermentaten für Biogasanlagen. Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie 18 (4), 219–227.

## BIOENERGY TECHNICAL TRAINING – CONTINUING EDUCATION FOR SKILLED WORKERS AND PROFESSIONALS

Caroline Werner<sup>1</sup>, Thomas Turk<sup>1</sup>, Veronika Hartart M.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ingenieurgemeinschaft Witzenhausen Fricke & Turk GmbH,

Bischhäuser Aue 12, 37213 Witzenhausen, Germany.

[www.igw-witzenhausen.de](http://www.igw-witzenhausen.de) , [caroline.werner@igw-witzenhausen.de](mailto:caroline.werner@igw-witzenhausen.de)

<sup>2</sup>Georg-August-Universität Göttingen, Pädagogisches Seminar, Baurat-Gerber-Str. 4–6, 37073 Göttingen,

Germany; [VeronikaHartart@sowi.uni-goettingen.de](mailto:VeronikaHartart@sowi.uni-goettingen.de)

### **Annotation**

Due to its fast growth, the bioenergy sector has a great demand for trained workers and professionals. Traditional vocational and academic training structures in Germany take too long to effectively “deliver” alumni with the know-how urgently required at the moment. Companies affected by the lack of trained workers therefore tend to install their own training programs or count on initiatives as the German “Nawaro-Bildung” (training for the use of regenerating raw materials). The pilot project on continuing education, supported by the German Ministry of Education and Research and the Hessian Environmental Ministry, aimed at meeting the continuing education requirements of the fast growing market of biogas and wood energy. The training materials as one output of the pilot project could as well be useful in other European countries.

*Keywords: bioenergy, training, education, skilled workers, wood energy, biogas.*

With the omnipresent endeavors for a sustainable energy supply the production and use of regenerating raw materials are increasing very rapidly. This creates new jobs but calls for new technical and logistic qualifications – of the producers of the raw materials, of the operators of processing plants and of many employees in the up- and downstream process. The required subjects have not – or at least not to the desired depth – been taught in the German vocational training system so far.

In 2006 existed approx. 170,000 jobs in the sphere of renewable energy in Germany. The acreage of renewable primary products increased from approx. 300,000 hectares in 1993 to approx. 1,800,000 hectares in 2006. The labour requirements and the new qualification demands in the bioenergy sector correlate at the same time with the ongoing structural change in rural areas that released large numbers of the traditional rural workforce. This is a great

chance for qualification programs that provide instant practical know-how for the new job opportunities in the bioenergy sector.

The German pilot project on continuing education “Nawaro-Bildung”, supported by the German Ministry of Education and Research and the Hessian Environmental Ministry, aimed at meeting the continuing education requirements of the fast growing market of specifically biogas and wood energy. It took the professional experience of farmers, foresters and craftsmen as a foundation to build the new qualifications on top.

### **Range of qualification**

During the three year pilot project the following qualifications were developed and tested:

- “Construction and operation of on-farm biogas plants” to target farmers,
- “Energy wood production and marketing” to target foresters,
- “Biogas plant service specialist” to target motor mechanics, electricians, plumbers and craftsmen of other groups.

### **Target groups**

With regard to the target groups it had to be taken into account that most of the students were on the job during the training courses. In addition, many of them were managers or owners of farms or companies. Therefore the classes had to take place at times when the respective jobs permitted the student’s absence (e.g. for the farmers during winter times) or enable him by e-learning tools to individually determine the time of study. Due to the limited time available for study, the participants especially demanded very effective study arrangements (short and precise study units, large number of practical exercises etc.). They especially enjoyed field trips which were integral part of all courses and a perfect opportunity to learn on practical objects and to speak to manufacturers, operators or contractors of plants.

The students were especially motivated and interested since all of them voluntarily enrolled in the classes. They had a profound knowledge of their particular occupational field. This was a pleasure and a challenge for the respective teaching staff that used a wide variety of methodologies (presence classes using different media, e-learning units, practical exercises, field trips etc.) to create the most effective learning success.

The courses were monitored and evaluated by the Pedagogical Seminar of the University of Göttingen. They found a higher-than-average contentment of the participants with the technical contents provided in the training. They also found that almost all participants felt enabled by the training to further use the new qualifications in their jobs or to create new job opportunities for themselves.

### **“Construction and operation of on-farm biogas plants”**

Since due to the legislative framework biogasification became of high economical importance for farmers in Germany, the necessary knowledge on biogas plant construction and operation has to be provided to the target groups. During the pilot project in the years 2005 to 2007 the developed course was successfully offered three times with a total of 77 participants. The teaching materials for tutors or educational institutions are available to anyone who is interested in offering such courses. They contain the presentation documents, the teacher’s assistance material as well as additional information on CD.

### **“Energy wood production and marketing”**

The intention of this course is to integrate the entire value chain of energy wood, including production, processing, logistics, marketing of energy wood up to the operation of wood fuelled heat and power facilities. Target groups were mainly foresters but also farmers or businesses of landscape gardening or horticulture.



Picture 1. *Field trip to site of fast-growing tree species.*

In cooperation with the silvicultural educational centre of the state of Hesse, the one-week course was offered during the pilot project two times in 2006, each with 10 participants from all over Germany. From 2007 on, the educational centre continues to offer the course on its own. As for the biogas course, the teaching materials for tutors or educational institutions are available to anyone who is interested in offering such courses. They contain the teacher's instructions on the topic, didactical recommendations and a password for an internet platform where additional information on the topic is gathered and revised regularly.

1. Wood as a fuel
2. Sustainable forestry
3. Harvest and logistics of energy wood
4. Technics of wood firing plants
5. Legal framework
6. Quality management of wood heat and power plants
7. Marketing of energy wood
8. Operation of wood firing plants
9. Economic efficiency calculation

Figure 1. *Energy wood qualification modules.*

### **“Biogas plant service specialist”**

Most of the times, the operators of biogas plants are quite challenged when providing for the raw materials and the stable operation of their plants. More complex repair and maintenance works including the start (or reset) of operation of the plants call for specialists. The course and homonymous certificate of the Chamber of Crafts – „Biogas plant service specialist“ aims at this qualification. It consists of the four one-week modules „Biogas fundamentals“, „Electrics“, „Central heat and power plant“ and „Technical instructions for gas installations“ and addresses workers from the crafts motor mechanics, electricians, plumbers and related crafts. The first course with 12 participants takes place at the educational centre of the Chamber of Crafts in Münster and will be completed by October 2007. The participants are already awaited by the biogas industry.

### **Outlook**

The experiences of each of the different classes with regard of contents and didactics may also become integral part of the vocational training curricula in Germany in the future. It has to be

considered that the contents of biogas and energy production from wood are in the course of rapid technological changes. All developed training materials would be outdated soon unless they are designed in a way that enables the respective user to further develop the materials and integrate recent changes. This aspect has been respected in the pilot project “Nawaro-Bildung”. The use of the training materials could also be tested in other regional connections within Europe. Further information on the project results can be obtained from the authors and from the website [www.nawaro-bildung.de](http://www.nawaro-bildung.de) .