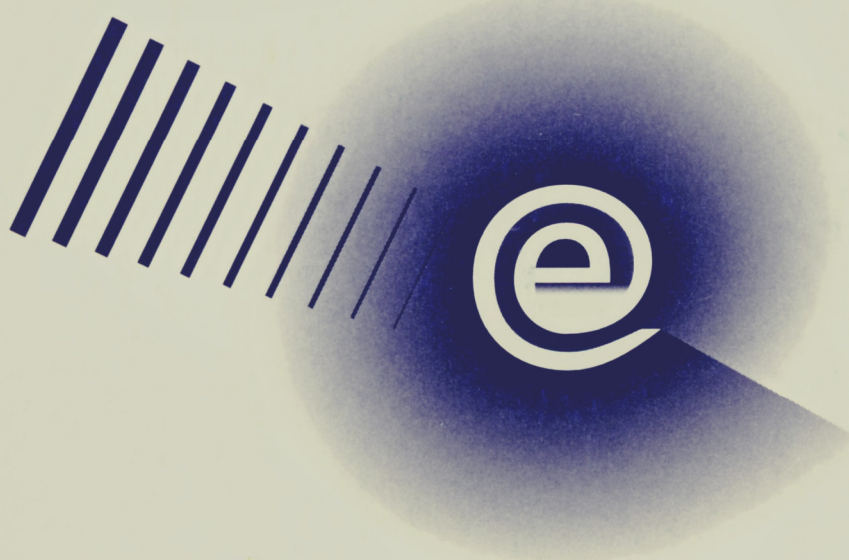


**TAASTUVATE ENERGIAALLIKATE
UURIMINE JA KASUTAMINE**

— TEISE —

KONVERENTSI KOGUMIK



**INVESTIGATION AND USAGE OF
RENEWABLE ENERGY SOURCES**

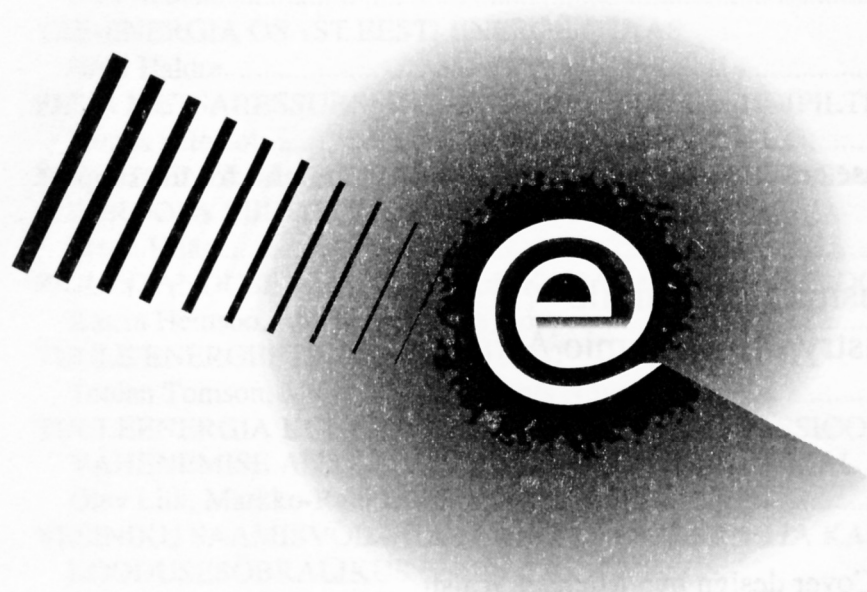
— SECOND —

CONFERENCE PROCEEDINGS

TARTU, ESTONIA 2001

TAASTUVATE ENERGIAALLIKATE UURIMINE JA KASUTAMINE

————— TEISE —————
KONVERENTSI KOGUMIK



INVESTIGATION AND USAGE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

————— SECOND —————
CONFERENCE PROCEEDINGS

TARTU, ESTONIA 2001

Peatoimetaja / Editor-in-chief: Valdur Tiit

Toimetajad / Compiled by: Sirli Lember
Tiina Kivisäkk
Silvi Seesmaa

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

Eesti Majandusministeeriumile
Estonian Ministry of Economic Affairs

Kaanekujundus / Cover design by: Michael Walsh

Trükitud: OÜ Paar
Printed by: Paar Ltd

Kirjastaja: Eesti Põllumajandusülikooli kirjastus
Publisher: Estonian Agricultural University Publishing Centre

© 2001

Eesti Põllumajandusülikool
Estonian Agricultural University

All Rights Reserved

ISBN 978-9949-426-35-5 (PDF)
ISBN 978-9985-816-16-5 (trükis)

SISUKORD

EDU TAASTUVENERGEETIKA ARENGULE EESTIS	
Valdur Tiit	7
KA ENERGEETIKA VALLAS SÄÄSTVA ARENGU TEELE	
Henn Elmet	8
MAJANDUSMINISTEERIUMI ETTEVÕTMISTEST TAASTUVATE	
ENERGIAALLIKATE KASUTAMISE TOETUSEKS	
Heikki Kulbas	11
TAASTUVAD ENERGIAALLIKAD, LOODUSLIK JA SOTSIAALNE	
ELUKESKKOND ENTROOPIAPRINTSIIBI VALGUSES	
Karl Rebane	13
VEE-ENERGIA OSAST EESTI ENERGEETIKAS	
Heiti Haldre	19
EESTI METSARESSURSSIDE MÕÕTMINE SATELLIIDIPILTIDEL	
Urmas Peterson	23
ELEKTRIENERGIA TOOTMINE TAASTUVATEST ENERGIAALLIKATEST	
EUROOPA LIIDU DIREKTIIVIDEST LÄHTUVALT	
Meeli Hüüs	29
PAJUISTANDUSED ENERGIAALLIKANA JA VEGETATSIOONIFILTRINA	
Katrin Heinsoo, Ebe Sild, Andres Koppel	32
TUULE ENERGEETILINE KVALITEET	
Teolan Tomson, Maire Hansen ja Ants Nõva	39
TUULEENERGIA KONKURENTSIVÕIME JA CO ₂ EMISSIOONIDE	
VÄHENEMISE ANALÜÜS EESTIS MUDELIGA MARKAL	
Olev Liik, Markko-Raul Esop	49
VESINIKU SAAMISVÕIMALUSED, SALVESTAMINE JA KASUTAMINE	
LOODUSESÕBRALIKUS ENERGEETIKAS	
Jüri Tamm	56
KOMPLEKSSE SÜSTEEMI LOOMINE KURESSAARE LINNALE	
ELEKTRI-, KÜTTE- JA SOOJA VEE TOOTMISEKS TAASTUVATE	
ENERGIAALLIKATE ABIL	
Lars Mach ja Valdur Tiit	61
RAPSIÕLI BAASIL BIODIISLIKÜTUSE VALMISTAMISE JA	
KASUTAMISE KOGEMUSI	
Toivo Pangsep ja Herma Olak	65
KÜTUSTE GENEETILINE KLASSIFIKATSIOON	
Rein Veski	71
METSAKASUTUSE SÄÄSTLIKKUSEST	
Avo Rosenvald	80
TAASTUVATE ENERGIAALLIKATE RESSURSID JA	
KASUTAMINE EESTIS	
Tanel Lukason	85
SOOJUSENERGIA TOOTMINE KURESSAARES BIOKÜTUSTE BAASIL	
Paul Leemet	92

PUIDUSÖE KASUTAMINE NING TOOTMISPERSPEKTIIVID EESTIS	
Matis Miljan	99
BIOKÜTUSTE KASUTAMINE MUHU VALLA LIIVA KATLAMAJAS	
Raido Liitmäe	107
TUULE KIIRUSE MÕÕTMISTE TULEMUSTEST TARTUS	
Tõnis Tamm, Veli Palge, Jaan Lepa	115
TUULEJÕUSEADME KASUTEGURI MODELLEERIMISEST	
Tõnis Tamm, Veli Palge, Jaan Lepa	123
HEIN KÜTUSENA	
Mart Hovi, Külli Hovi, Kuno Jürjenson	127
PÄIKESEKOLLEKTORI ENERGIABILANSS	
Veli Palge	129
KESKKONNASÕBRALIKUD TEHNOLOOGIAD JA	
MATERJALID LOODUSVARADE UURIMISES	
Mihkel Koel	136
CO ₂ EMISSIOONI VÄHENDAMINE ELAMUTE	
ENERGEETILISE RENOVEERIMISE TULEMUSEL	
Anton Laur, Tiit Kallaste	144
SOOJUST JA ELEKTRIT KOOSTOOTVA VÄIKETUULIKU	
KONTSEPTSIOON	
Anatoli Jegorov, Vello Selg	154

CONTENTS

SUCCESS FOR ENERGETICS BASED ON RENEWABLES IN ESTONIA	
Valdur Tiit	7
TOWARDS SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN ENERGETICS	
Henn Elmet	9
ACTIVITIES OF THE ESTONIAN MINISTRY OF ECONOMIC AFFAIRS AT SUPPORTING THE USE OF RENEWABLE ENERGY RESOURCES	
Heikki Kulbas	12
RENEWABLE RNERGY SOURCES, NATURAL AND SOCIAL ENVIRONMENT FROM VIEWPOINT OF THE ENTROPY PRINCIPLE	
Karl Rebane	17
HYDROPOWER ENERGY AS PART OF ESTONIAN ENERGY	
Heiti Haldre	22
MEASUREMENT OF ESTONIAN FORESTS FROM MEDIUM RESOLUTION SATELLITE SCENES	
Urmas Peterson	28
ELECTRIC ENERGY PRODUCTION FROM RENEWABLE ENERGY SOURCES FOLLOWING THE DIRECTIVES OF THE EUROPEAN UNION	
Meeli Hiius	31
WILLOW PLANTATION: ENERGY RESOURCE AND VEGETATION FILTER	
Katrin Heinsoo, Ebe Sild, Andres Koppel	38
QUALITY OF WIND ENERGY	
Teolan Tomson, Maire Hansen and Ants Nõva	48
WIND ENERGY COMPETITIVENESS AND THE ANALYSIS OF REDUCTION OF CO ₂ EMISSION IN ESTONIA ACCORDING TO THE MODEL MARKAL	
Olev Liik, Markko-Raul Esop	55
POSSIBILITIES OF PRODUCTION, STORAGE AND APPLICATION OF HYDROGEN IN NATURE-FRIENDLY ENERGETICS	
Jüri Tamm	60
CREATION OF THE NEW SYSTEM FOR THE KURESSAARE CITY TO PRODUCE ELECTRICITY, HEAT AND WARM WATER BY RENEWABLE ENERGY SOURCES	
Lars Mach and Valdur Tiit	64
EXPERIENCE OF MANUFACTURING AND USING RAPE-OIL-BASED DIESEL FUEL	
Toivo Pangsep and Herma Olak	70
GENETIC CLASSIFICATION OF FUELS	
Rein Veski	79
ECONOMICAL FOREST UTILIZATION	
Avo Rosenvald	84

THE RESERVE AND USAGE OF RENEWABLE ENERGY RESOURCES IN ESTONIA Tanel Lukason	91
HEAT PRODUCTION FROM BIOFUELS IN KURESSAARE Paul Leemet	98
THE USE OF CHARCOAL AND PRODUCING PERSPECTIVES IN ESTONIA Matis Miljan	106
USING BIOFUEL IN LIIVA BOILER HOUSE (MUHU PARISH) Raido Liitmäe	113
RESULTS OF MEASURING OF WIND SPEED IN TARTU Tõnis Tamm, Veli Palge, Jaan Lepa	122
MODELING OF POWER EFFICIENCY OF A WIND GENERATOR Tõnis Tamm, Veli Palge, Jaan Lepa	126
HAY AS FUEL Mart Hovi, Külli Hovi and Kuno Jürjenson	128
THE HEAT BALANCE OF A SOLAR COLLECTOR Veli Palge	135
ENVIRONMENTALLY FRIENDLY TECHNOLOGIES AND MATERIALS IN STUDY OF NATURAL RESOURCES Mihkel Koel	143
REDUCTION OF CO ₂ EMISSION AS A RESULT OF ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT IN DWELLINGS Anton Laur, Tiit Kallaste	153
THE CONCEPT OF AN AUTONOMOUS SMALL-SCALE WIND UTILIZATION SYSTEM FOR PRODUCING ELECTRICITY AND HEAT Anatoli Jegorov, Vello Selg	159

EDU TAASTUVENERGEETIKA ARENGULE EESTIS

Valdur Tiit

Eesti Põllumajandusülikool, Kreutzwaldi 56, 51014 Tartu, e-post: vtiit@eau.ee

Teine konverents

TAASTUVATE ENERGIAALLIKATE UURIMINE JA KASUTAMINE II toimus edukalt 2. novembril 2000. a. Tartus Eesti Põllumajandusülikooli aulas ja temast võttis osa arvukalt huvilisi.

Eestil on head looduslikud võimalused taastuvate energiaallikate ulatuslikuks kasutamiseks energeetikas. Meil on õigus need võimalused loodusesõbralikul ja otstarbekal moel realiseerida. Samuti on Eestil oma elanike ja ülejäänud maailma ees kohustus järgnevate aastakümnete jooksul üles ehitada stabiilne keskkonda säästev energiamajandus.

Käesolevas raamatus jõuavad lugejateni konverentsil peetud ettekanded. Loodetavasti annavad siin kirjasõnas toodud ja varem konverentsil TEUK – II esitatud mõtted oma panuse taastuvenergeetika arenguks Eestis.

Tahet, oskust ja jõudu kõigile edukaks tööks selles valdkonnas ning soovi järgmiste konverentside edukaks korraldamiseks!

SUCCESS FOR ENERGETICS BASED ON RENEWABLES IN ESTONIA

Valdur Tiit

Estonian Agricultural University, e-mail: vtiit@eau.ee

The second conference

INVESTIGATION AND USAGE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES II that took place on November 2nd 2000 in Estonian Agricultural University in Tartu was successful and involved many participants.

Estonia has good natural opportunities to use renewable energy sources in large scale. We have right to realise these opportunities in the most suitable and nature friendly way. Estonia has the obligation to build up stabile, environment saving energetics.

In this book the reader can read the reports of the conference. The authors' hope that the ideas, presented on the conference and reproduced here in written form will stimulate the development of renewable energetics in Estonia.

The Editor of the book wishes to all enthusiasts of renewable energy good luck in their work and successful continuation of the tradition of TEUK- conferences.

KA ENERGEETIKA VALLAS SÄÄSTVA ARENGU TEELE

Henn Elmet

Eesti Põllumajandusülikool, Kreutzwaldi 64, 51014 Tartu, e-post: rec@eau.ee

Liikumisel infoühiskonna suunas tarbime üha rohkem igat liiki energiat. Säästev areng eeldab esmalt meie inimeste säästmist, nende väljavahetamist tervistkahjustavate tööpostidelt ja inimtöö asendamist automaatsüsteemidega. Energiavajaduse kasv eeldab korralikku inventuuri nii tänastes energiavarudes kui ka mitmesuguste energialiikide tootmises.

Praegu võime konstateerida, et põhiline energiaallikas on Eestis mitut liiki fossiilsed energiaressursid. Nende varud nii Eestis kui väljaspool Eestit on aga jõudmas viimasesse faasi – suuremad varud hakkavad lõppema 20–30 aasta pärast. Väiksemad ressursid on kindlasti veel, kuid nende tootmine ja muutmise kütuseks kallineb järsult.

Lisaks kõigele muule saastavad fossiilsed kütused nii keskkonda kui atmosfääri ja põletavad eluks nii vajalikku hapnikku.

Seoses Eesti riigi deklareerimisega astuda säästva arengu teele, tuleb meil küllaltki kiiresti asuda välja töötama sellist säästva arengu kava, kus on ette nähtud konkreetset sammud riigi üleminekuks energiatarbes taastuvatele energiaallikatele. Siin on meil eeskujuks tuua piisavalt teisi riike, kus on väga konkreetset öeldud, et aastaks 2001 suureneb taastuvate energiaallikate poolt väljastatav energia nii ja nii mitu protsenti või megavatti, aastaks 2002 ..., aastaks 2003 ... jne.

Taoline konkreetne kava sunnib ka konkreetset tegutsema. Taolisi põhimõtteid tuleks järgida ka meie riigi majanduse juhtimisel. Paralleelselt taastuvate energiaallikate kasutuse laienemisega peavad karmistuma ka trahvid keskkonna reostuse eest. Ainult taoline kompleksne meetmete rakendus võib liigutada Eesti riiki selles valdkonnas surnud punktist välja.

Eestimaal puhuvad endiselt tuuled ja paistab päike, ka vesi jõgedes voolab küllaltki tugevasti oma voolu suunda muutmata. Miks siis mitte kasutada seda tasuta kätte tulevat energiaallikat. Ka Eesti Põllumajandusülikooli roll peaks olema siin tunduvalt suurem senisest. Tänapäevase maabilansi andmetel on meil 260 000 ha endist haritavat maad söötis ja võssa kasvanud. Kogu see pind tuleks muuta uuesti viljakandvaks ja inimtoidust ülejääv toodang oleks võimalik töödelda mingit liiki biokütuseks, mille edaspidine kasutus võib olla väga erinev.

Kasu taastuvate energiaallikate kasutusest oleks mitmekordne. Tööd saavad nii põllumehed, keemikud kui energeetikud. Peale kõike muud jääb väljast ostetava kütuse eest makstav raha Eestisse.

Et kõik need plaanid hakkaksid realiseeruma, on siin vajalik küllaltki tugev abi vastavate ministriumide poolt. See peaks olema nii moraalne kui materiaalne. Nii nagu alati, ideede realiseerimisele peavad eelnema uurimistööd vastavas valdkonnas. Nendega on aga lood rohkem kui halvad. Vähemalt meie ülikoolis puuduvad selliseks

tööks täielikult vahendid ja kui aeg sama tühjalt edasi läheb, siis varsti ei ole kusagilt võtta ka vastavaid spetsialiste.

Meie riigi arengusuunad taastuvate energiaallikate kasutuselevõtu kohta on fikseeritud 1998. a. veebruaris Riigikogu otsuses, mis seab eesmärgiks aastaks 2010 Eesti riigile taastuvenergeetikaallikate osatähtsuseks 13%, kusjuures taastuvenergia omahinnaks on planeeritud pikema kasutusaja keskmisena alla 50 senti/kW·h, mis on praegusest elektrienergia hinnast juba kaks korda odavam.

Eesti riigil on, mille üle mõelda.

TOWARDS SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN ENERGETICS

Henn Elmet

Estonian Agricultural University, e-mail: rec@eau.ee

In moving towards information society Man consumes more and more different kind of energy. Sustainable development, first and foremost, means sustainable use of people, the replacement of people with unhealthy jobs and the replacement of direct labour with automatic systems. The increase in energy need requires an inventory both in the present energy supply and production.

We can say that different kinds of fossil energy resources form the main source of energy in Estonia at present. Their reserves both in Estonia and outside Estonia are running out — the supplies will be exhausted in the next 20–30 years. There still remain some smaller deposits, but their application and processing will be considerably more expensive.

Besides all this fossil fuels pollute the environment and atmosphere and burn oxygen, which is very necessary for life.

As Estonia has announced that we have joined the sustainable way of life we must work out a plan for sustainable development, which ordains concrete steps for the transformation to the application of renewable energy resources in energy consumption. Here we could follow the example of several states that have claimed that by the year 2001 the application of renewable energy resources increases by such an amount or megawatts, by 2002 another ... per cent, by 2003 still ... per cent, etc.

Such a plan calls for specific action. Such principles should be followed in running our economy as well. Parallel to the increase in the application of renewable energy resources, the taxes for polluting the environment should increase as well. Only such a package plan would help Estonia out of the present standstill in this area.

There are still winds blowing and the sun is also shining in Estonia. The rivers follow their course without changing the direction. Why not make use of the free sources of energy?

The role of the Estonian Agricultural University should increase as well. The contemporary land inventory shows that about 260 000 hectares of land cultivated before now lie fallow and are overgrown with shrubs. All this land should be re-cultivated and the agricultural produce left over from human food could be processed into bio-fuels and used in different ways.

The profit from renewable energy resources would be many-fold. This will give jobs to farmers, chemists and power engineers. Besides that the money, which we would have spent on fuels will remain in Estonia.

To achieve all this respective ministries should support the project both morally and financially. As always the application of such ideas into practice should be preceded by feasibility studies in the given field. But unfortunately our University lacks the means for such kind of research and, if we wait too long, respective specialists as well.

Our standpoints in the application of renewable energy resources have been expressed in the decision of the Estonian Parliament of February 1998, which ordains that by the year 2010 the share of renewable energy resources should comprise 13% of energy use. Cost accounting over a longer period of time shows that the mean estimated price will amount to less than 50 cents/kW·h, which will be twice as cheap as the price of electricity at present.

Estonia has what to think about!

MAJANDUSMINISTEERIUMI ETTEVÕTMISTEST TAASTUVATE ENERGIAALLIKATE KASUTAMISE TOETUSEKS

Heikki Kulbas

Majandusministeerium, Harju 11, 15072 Tallinn, e-post: HKulbas@mineco.ee

Majandusministri käskkirjaga nr. 195, 24.10.2000 on moodustatud taastuvenergiaga seotud aktuaalsete küsimuste läbivaatamiseks ja majandusministrile sellekohaste ettepanekute tegemiseks ning arvamuste avaldamiseks alaline taastuvenergeetika nõukogu.

Nõukogu koosseisus on 14 liiget ja nõukogu esimees on hr. Villu Vares Eesti Energeetika Instituudist.

Taastuvenergeetika nõukogu põhiülesanded on järgmised.

1. Sihtprogrammi koostamise käivitamine turba, biokütuste ja teiste taastuvate energiaallikate majanduslikult põhjendatud rakendamiseks energia tootmisel, vastavalt Kütuse ja energiamajanduse pikaajalisele riiklikule arengukavale (Tallinn, 1998) Majandusministri nõustamine taastuvenergeetika küsimustes.
2. Avalikkuse teavitamine ja kaasamine taastuvenergeetika põhiseisukohtade kujundamiseks.
3. Taastuvenergeetika riiklike prioriteetide väljaselgitamine ja selle traditsioonilise energeetikaga integreerimise soovitude väljatöötamine.
4. Hinnangu andmine taastuvenergeetikaga seotud probleemidele ja taastuvenergeetika arengule.
5. Taastuvenergeetikaga seotud eurointegratsioonialaste küsimuste arutelu ja ettepanekute tegemine nende analüüsiks.

Nõukogu töö eest vastutavaks on nimetatud Majandusministeeriumi energeetikaosakonna juhataja Ell-Mari Koppel ja nõukogu tehnilise teenindamise tagab energeetikaosakond.

Majandusministeeriumi energeetikaosakonna poolt on ettevalmistatud ja nõukogule esitatud taastuvate energiaallikate programmi (aastani 2010) esialgne tööülesande variant. Selles tööülesandes on välja pakutud programmi realiseerimiseks muu hulgas ka:

- 1) vajalike maksupoliitiliste meetmete (aktsiisimaksud, keskkonnamaksud, käibemaks jt) kirjeldus ja kasutusvõimalused;
- 2) investeringute toetused (riigieelarvelised vahendid, riigi garantiiga laenud, rahvusvahelised fondid);
- 3) elektrienergia ostukohustuse rakendamine.

Energiaseaduse muudatusettepanekutes on ühe punktina lisatud ka biokütuste täpsustatud definitsioon.

KirjandusReferences

1. (1998) Kütuse ja energiamajanduse pikaajaline riiklik arengukava. Riigi Teataja I, 19, 295.

ACTIVITIES OF THE ESTONIAN MINISTRY OF ECONOMIC AFFAIRS AT SUPPORTING THE USE OF RENEWABLE ENERGY RESOURCES

Heikki Kulbas

Estonian Ministry of Economic Affairs, e-mail: HKulbas@mineco.ee

According to the Minister of Economic Affairs order nr. 195, signed on 24 October 2000 there is a permanent council at the Ministry to review the questions concerning renewable energy, give relevant advice to the minister and express opinions concerning renewable energy. The council has 14 members and its head is Villu Vares from Estonian Energy Research Institute.

The main tasks of the council are the following.

1. Initiate the compilation of the program of peat, biofuel and other renewable energy resources use for producing energy according to the National Long Term Energy Development Programme (Tallinn, 1998).
2. Advising the minister with questions concerning renewable energy.
3. Publicity and raising public participation in questions concerning renewable energy.
4. Clarification of national renewable energy priorities and working out the recommendations for integrating the priorities with the traditional energy plan.
5. Assess the problems of renewable energy and the development of renewable energy resources.
6. Analysis of renewable energy questions in the light of eurointegration and working out recommendations.

Ell-Mari Koppel, Head of the Energy Department at the Ministry of Economic Affairs is responsible for the work of the council and technical assistance is provided by the Energy Department.

The Energy Department has prepared and presented to the council a draft of the renewable energy program (to the year 2010). Program implementation working task includes also:

1. Descriptions and implementation possibilities of different tax policy measures (excise, VAT, environmental taxes).
2. Investment support (budgetary means, state guaranteed loans, international funds).
3. Implementation of compulsory electricity purchase.

The amendment proposals to the Energy Act include also a clarified definition of a biofuel.

TAASTUVAD ENERGIAALLIKAD, LOODUSLIK JA SOTSIAALNE ELUKESKKOND ENTROOPIAPRINTSIIBI VALGUSES

Karl Rebane

Tartu Ülikooli Füüsika Instituut, Riia 142, 51014 Tartu, e-post: rebanek@fi.tartu.ee

Annotatsioon

Energia jäävuse seadus ja entroopia kasvu seadus on fundamentaalsed looduseadused. Maakeral oma elusfääri, tsivilisatsiooniga jne. allub väga täpselt neile seadustele. Mudeliks on termodünaamika definitsiooni järgi *suletud* süsteem, s.o ei ole täielikult isoleeritud maailmaruumist, vaid võtab vastu kõrge kvaliteediga päikesekiirgust ja saadab maailmaruumi madalama kvaliteediga soojuskiirgust. Tulevikulahenduseks peab olema suur- ja väikeenergeetika kooseksisteerimine. Mõlemas peaks olema väga tubli osa taastuvaid allikaid. Informatsioon ei tõsta kübetki energia kvaliteeti. Informatsiooni roll on võimaldada viimase paremat kasutamist. Võitluses ellujäämise eest jäävad eelistatult peale need organismid, kooslused, suguharud, riigid jne., kes rohkem ja hoolimatumalt eksploateerivad keskkonda, saastavad seda.

Kui pidada Maakeral arenenud elu ja kultuuri niivõrd väärtuslikuks ja Universumile kasulikuks, et neid teistele taevakehadele siirdada, oleks seda mõistlik teha panspermia abil, veelgi parem – potentsiaalselt elu algust, arengut ja üpris erinevaid struktuure lubavate kõrge vaba energiaga (esmapilgul korrastamata ehitusega) ainetilkade maailmaruumi levitamise teel.

KESKKONNAHOID, ENTROOPIA, VÕITJAD ELLUJÄÄMISE VÕITLUSES, PANSPERMIA, INFORMATSIOONI ROLL

Väikeenergeetika vajadus ja elujõud

Taastuvad on praegu pea eranditult väikeallikad. See ei pea tingimata nii olema, eriti tulevikus. Näiteks on põllumajandus taastuv suuremõduline energiat tootev (s.o energiat inimesele vajalikku vormi muundav) süsteem. Kahjuks kõrgtehnoloogia tipus olev tänane põllumajandus, USA-s näiteks, on seda üpris väikesel määral: ühe kalori väärtuses toidu tootmiseks kulub siin (lisaks päikese kiirgusenergiale) veel kümnekond kalorit kõrgekvaliteedilist energiat mootorikütuse, elektri ja kemikaalide näol, mis kõik on saadud taastumatutest allikatest.

Ei maksa teha illusioone, et saab hakkama suurenergeetikata. Tänapäeva ja lähituleviku kõrgtehnoloogia jaoks on suurenergeetika eluliselt vajalik.

Termin “infoühiskond” ei tohiks viia eksiteele, nagu piisaks tulevikus üksnes infoteenistusest, energiateenistust nagu polekski siis enam vaja. Tingimata jäävad ka tulevikus mõlemad inimkonnale eluliselt vajalikud valdkonnad – infoteenistus ja energiateenistus. Infoteenistus ei anna juurde kübetki kõrgekvaliteedilist energiat. Selle välistab termodünaamika teine seadus – entroopia kasvu seadus. Info tänuväärne roll on selles, et loob võimalusi olemasoleva energia (tegelikult selle kvaliteedi) paremaks, kokkuhoidlikumaks, seega ka keskkonnasõbralikumaks kasutamiseks.

Väikeenergeetika seadmete eelised ja puudused.

1. Kaugtarbijale (mägedes, saartel, metsades, soode-rabade taga) kättesaadavam ja odavam, sageli ainuvõimalik.
2. Kvaasisõltumatu pahandustest suurtes energiasüsteemides ja laiemal ühiskonnatasemel.
3. Vähem ohtlik terrorismi suhtes.
4. Ainus viis vabaneda saastekoormast, tekitamata veelgi suuremat saastet kuskil mujal maa elukeskkonnas, on lülitada puhastustsükklisse päikesekiirgus.
5. Suureenergeetikal seisavad ees rasked ajad taastumatute allikate ammendumise tõttu. Kui taastuvad ei tugevne piisavalt tublisti ja kiiresti, hääbub tänapäeva tsivilisatsioon. Üksnes väikeenergeetikast ei piisa.
6. Ei saa hakkama suureenergeetika ülesannetega.
7. On puudu head elektrienergia akumulaatorid.
8. Sageli jääb vajadus energiat kontsentreerida, mis omakorda nõuab energiat.

Kokkuvõtteks.

1. Lahendus saab olla suur- ja väikeenergeetika kooseksisteerimises. Seda nii energia "tootmises" kui keskkonnanahoius. Mõlemas energeetika tiivas olgu võimalikult rohkem taastuvaid energiaallikaid.
2. Soodustada organisatsioonide ja ka omaette meistrimeeste ettevõtmisi väikeenergeetika seadmete loomisel ja rakendamisel. Kõigepealt ja otsustavalt toetada nende kasutamist kohtades, kuhu suureenergeetika jaotusliinide toomine on võimatu või kulukas.

Ülevaate vist pea kõigist tänapäeval uuritavatest ja kasutatavatest taastuvatest energiaallikatest võib leida raamatus "Energia, entroopia, elukeskkond" (Rebane, 1980, vene k. 1984).

Jäävuse seadused

1. Energia ei saa tekkida ega hävida, energia saab muutuda ühest kujust teise. Energia jäävuse seadus – fundamentaalne loodusseadus – tagab, et energia *hulga* pärast pole tarvis üldsegi muretseda. Muutub energia *kvaliteet*. Isoleeritud süsteemis alati halvemaks. Just energia (ja aine) muutuse käigus kvaliteedilt halvemaks saab inimene saavutada ja saavutab seda, mida talle tarvis.
2. Energia ja aine kvaliteeti ning selle muutumist halvemuse poole kõigis isoleeritud süsteemis toimuvates protsessides väljendab termodünaamika teine seadus – entroopia kasvu seadus. Entroopia näitab energia ja aine kvaliteeti. Entroopia märk on valitud nii, et entroopia kasv tähendab kvaliteedi langust.

Füüsik Emdenilt on pärit tabav võrdlus: looduses on energial üksnes raamatupidaja roll, looduses toimuva tegelik korraldaja-direktor on entroopiaseadus (vt näiteks Rebane, 1980, 1984, 1998).

Keskkonnahoiu süvaraskus

Keskkonnahoiu süvaraskus tuleneb sellest, et olelusvõitluses jäävad tugevasti eelistatult peale need isendid, kooslused, suguharud, maakonnad, riigid jne, kes rohkem (ja hoolimatumalt!) kasutavad keskkonna ressursse ja saastavad keskkonda (Rebane, 1980,1984,1995,1990).

Päikesekiirgus on puhtaim ja mõjusaim energiaallikas

Ülimalt töökindel tuumareaktor, hästi efektiivne, sest on meist parajal kaugusel, hästi ohutu, sest on küllalt kaugel, on Päike. Muidugi, tegelikult on asjad vastupidi – elu Maakeral, meie ise kaasa arvatud, on arenenud just nii, kuidas Päikeselt tulev kiirgus on seda aastamiljoneid võimaldanud.

Päikesekiirgus on ka praegu kõige tõsisemalt arvestatav taastuv (s.o – ülimalt pika kestusega) energiaallikas. Sellele saab juba täna, veelgi enam tulevikus, rajada uusi, järjest paremaid energeetikaseadmeid, ka võimsaid ja ülivõimsaid.

Mõnusaks meelespidamiseks: päikesekiirgus toob Maakera elusfääri keskel läbi ligikaudu ühe kilovati võimsust ruutmeetri ehk ühe megavati ruutkilomeetri.

Tänapäeva pooljuhtpäikesepatareid suudavad muundada ligikaudu 10% päikesekiirgust elektrienergiaks. Kui ehitada päikesepatareid kümne ruutkilomeetriga väli, saaks elektrit samapalju kui 1000 kilovatisest elektrijaamast. Saadav elektrienergia on kahjuks hajutatud laiali üle ruutkilomeetrite pindade. Energia *kontsentratsioon* ruumis on madal, sellepolest ka kvaliteet kesine, paljudeks kasutamisealadeks ilma täiendava kontsentreerimiseta kõlbmatu. Elektrienergiat saab kontsentreerida, kuid see on tülikas ning toob kaasa täiendava energiakulu.

Kui ehitada tõeliselt suuri päikesepatareid välja ning paigutada need maailmaruumi eemale maapinnast, läheb raskeks ka toodetud elektrienergia toimetamine maale. Lahendus võiks olla selles, et toota sealsamas “elektripõldudel” lõpp-produktina keemilise energia poolest rikkaid ühendeid, mida saaks hõlpsasti kokku korjata. Tahke olluse puhul lihtsalt kokku rehitseda, kottidesse panna ja tarbijale maale toimetada.

Selline “ideaalse energeetika skeem” tuleb muidugi tuttav ette – on nagu põllumajandus. Kui skeemi lülitada veel päikesekiirguse energia muundamine fotosünteesi abil ja päikesepatareidele anda veel omadus end ise remontida, arendada ja järglaste näol taastoota, olemegi jõudnud “veelgi ideaalsemale energeetikaskeemile” – põllumajandusele. Seda oleks mõistlik viljelda teistel, selleks sobivatel taevakehadel.

Panspermia kui maailmaruumi energiaallikate kasutamine

Oleks mõistlik energia mõjusa kasutamise poolest, kui ka tarbijad asuksid päikesekiirgust püüdvatel väljadel sealsamas, elaksid teisel looduslikul või tehnilisel taevakehal. Transportida inimesi saab ainult üsna lähedastele taevakehadele ja seegi oleks tülikas, neelaks tohutul hulgal kõrgekvaliteedilist energiat ja materjale. Pealegi oleks otsustav koos taimikasvatusega arendada ka loomakasvatust.

Mõeldav tulevikulahendus kalduks ilmselt panspermia kanti – sobivasse keskkonda tuleks läkitada üksnes sõnum infokandjatega – portsjon DNA ja muid tarvilikke molekule, mis võiksid panna aluse meilaadsele elule teisel planeedil.

Miks peaks aga sealne uus elu olema tingimata “meilaadne” – üsnagi samasugune nagu Maakeral? Uue planeedi tingimused on tõenäoliselt üsnagi erinevad Maakeral olnutest ja olevatest. Peaks andma rohkem vabadust uue elu struktuuridele isemoodustumiseks. Pealegi oleks pikal rännakul kosmoseavarustes vähe tõenäone, et molekulita-sandil struktuurid-infokandjad säiliksivad piisavalt tervetena. Seega oleks mõistlik panna panspermia sõnumisse mitte valmisstruktuurid-infokandjad, vaid kõrge vaba energiaga (kaootilised) kogumid sobivaid molekule, millel võime käivitada hulganisti keemilisi reaktsioone, moodustada rikkalikult mitmesuguseid struktuure ja lasta neil omavahel võistelda, nii et jääks püsima see ülimalt väike protsent neist, mis kõige paremini sobivad uude keskkonda.

Mõistagi on ülaltoodud arutelus tublisti fantaasialendu. Kuid see on termodünaamika fundamentaalsetele seadustele tuginev *teaduslik* fantaasia. Fantaasiavabad üksikute valemitega pikitud arutelud taastuvate energiaallikate ja päikeseenergeetika kohta on leida raamatutes "Energia, entroopia, elukeskkond" (Rebane 1980, vene k. 1984).

Kas informatsioon suurendab tarbimiskõlbliku energia hulka? Milles on informatsiooni roll?

Infoühiskonna tulek rõhutab küsimuste olulisust. Populistlik kära nende ümber on genereerinud ridamisi väärarvamusi. Kas teave (informatsioon, *know-how*) suurendab tarbimiskõlbliku energia hulka, tõstab energia ja aine termodünaamilist kvaliteeti? Kindlasti mitte. See oleks vastu termodünaamika teist seadust, s.o entroopia kasvu seadust.

Teabe kogumine, säilitamine, töötlemine, edastamine, väljalugemine tarbivad täiendavalt kvaliteetset energiat (ja ainet), kasvatavad ümbruskonna entroopiat.

Informatsioon võimaldab aga kätte näidata paremaid teid ja viise olemasoleva negentroopia (kvaliteetse energia ja aine) mõjusaks kasutamiseks. Negentroopia kokkuvõtteks mingile soovitatavale tehnoloogilisele lõpptulemusele jõudmiseks võib tulla väga suur. Selles ongi teabe ülitähtis positiivne roll. Aluseks on siin asjaolu, et infole kulutatav energiahulk on kümnekond ja enam suurusjärku väiksem kui tehnoloogilises protsessis saavutatav kokkuvõtte.

Muide, informaatika vahendite ülikiire areng (ja Nobeli füüsikapreemiade seas seda arengut edasiviivate tööde ülekaal) viimasel ajal on tingitud samast asjaolust: informaatika arengu põhimõtteline termodünaamiline piir (minimaalselt tarvismineva energiahulga poolt pandud) on olnud ja on veel praegu mitmeid suurusjärke eemal tänaseks saavutatust.

Kirjandus ✕ References

1. Rebane, K. (1980) Energia, entroopia, elukeskkond.. Valgus, Tallinn: 126.
2. Ребане, К. (1984) Энергия, энтропия, среда обитания. Валгус, Таллинн: 138.
3. Rebane, K. (1990) Energia, entroopia, elukeskkond. Miks on elukeskkonna kaitse ka objektiivselt raske? Akadeemia 3: 451–468.
4. Rebane, K. (1995) Energy, entropy, environment: why is protection of the environment objectively difficult? Ecological Economics 13(1): 89–92.
5. Ребане, К. (1998) Энергия, энтропия, экономика, экология, окружающая среда. Исследование Земли из космоса 5: 29–41.

RENEWABLE RNERGY SOURCES, NATURAL AND SOCIAL ENVIRONMENT FROM VIEWPOINT OF THE ENTROPY PRINCIPLE

Karl Rebane

Institute of Physics of the University of Tartu, e-mail: rebanek@fi.tartu.ee

Abstract

Renewable energy sources viewed from the entropy principle.

The two fundamental laws of thermodynamics – the *energy conservation* law and the *entropy growth* law - are valid also for the Earth and its biosphere, including the man’s civilization. The first law tells us that there is no need to be concerned about energy – its amount is always kept constant. What changes is the *quality* of energy (and matter). The thermodynamical measure of quality is *entropy*. The second law of thermodynamics says that entropy of any isolated system can only grow (or stay constant). Historically the sign in the definition of entropy is chosen so that growth of entropy means decrease of quality. Earth is not an isolated but closed thermodynamical system: it receives Sun radiation of high quality and sends into Space long-wave radiation of lower quality.

Why is protection of environment *objectively* difficult? (see Rebane, 1980, 1984, 1990, 1998 and references therein). The answer offered is the following: the *winners* in the struggle for survival are preferably the organisms, species, populations, tribes, communities, states etc., which exploit more and more carelessly the resources of environment and consequently cause *more pollution*.

The most powerful and reliable energy source has been Sun. The Sun’s radiation is a very steady flow of high quality energy and from the viewpoint of the energy “producing” devices it is an excellent *renewable* source. Note, that Sun is actually a thermonuclear (fusion) reactor, effective and safe, because is placed at proper distance from Earth.

As a rough but easy to remember estimate we can say that the Sun's radiation brings to Earth about 1 kW of power per square meter, i.e. 1 megawatt per square kilometre. Sun radiation can serve as a *large-scale* powerful *renewable* source for electrical energy production.

There are quite a few ways of cleaning the environment *locally* but at the expense of creating somewhere else *more new pollution*, if measured in amounts of entropy. For the Earth's biosphere as a whole only these processes can be really cleaning ones if the Sun radiation is included in the cycle. It seems easier to do that in small renewable energy sources.

Electrical power created on large photoelectric fields is of low spatial density. Ways to concentrate it as electrical power do exist, but they are rather complicated and consume materials and energy.

A reasonable and historically approved reliable way to concentrate the dispersed photoelectrical energy into high quality energy earned from Sun radiation is agriculture: in photosynthesis the primarily generated electrical energy is transformed into chemical compounds of high free-energy. If the fruits of biological and cultural evolution on Earth are considered really valuable, worth to be transferred to and implanted on the other planets, the consumers – people (and cattle) could be also transported to live on the new fields. In fact the proper planets are too far away for convenient travel of people, cattle or any other heavy load.

Continuation of this of science fantasy line of thinking brings us to panspermia: spreading over space very small simple organisms or even “pure” genetic information – completes of DNA and accompanying molecules. There is an even more reliable option – to spread in space clods of matter comprising high potential to form new competitive structures (i.e. having high free energy and proper composition of matter the spatial orderness is not obligatory), after arrival (by chance) in some kind of proper environment.

A fiction free consideration of various nowadays devices for renewable energy sources can be found in references (Rebane, 1980,1984).

Information does not generate new negentropy, does not improve the quality of energy and matter. On the contrary – collection, processing, storage, transfer, read-out of information consumes additionally high-quality energy, increases entropy and thus causes additional pollution of the environment. Information opens possibilities for *better* use of the quality of energy and matter. The point is that the amount of energy consumed for information service can be many orders of magnitude smaller than the gain from the more efficient utilization of the large amount of energy involved in technology.

VEE-ENERGIA OSAST EESTI ENERGEETIKAS

Heiti Haldre

Eesti Põllumajandusülikool, Kreutzwaldi 5, 51014 Tartu, e-post: hhaldre@eau.ee

Majandusministeeriumi energeetika ülevaates 1998. aasta kohta on kirjutatud järgmist:
Paigaldatud / kasutatavad võimsused olid:

soojusjõujaamad 3307 / 2904 MW

veejõujaamad 1,3 / 0,9 MW

Elektrienergia bilanss soojuselektrijaamades oli:

tootmine 8,52 TW·h

tarbimine 5,58 TW·h

jaamade omatarve 0,98 TW·h

kaod 1,57 TW·h

Tabel 1. Kuuekümnendatel aastatel Eestis töötanud veejõujaamad

Table 1. Hydropower stations in Estonia in sixties

Jaam	Jõgi	P kW	H m	Ehitusaasta
Keila-Joa	Keila	250	4,5	1938
Kohila	Keila	250	1,2	1928
Saunja	Jägala	50	3,2	1947
Lilli	Jägala	90	3,5	1928
Kehra	Jägala	50	2,5	1952
Kaunissaare	Jägala	150	2,8	1953
Jägala	Jägala	1350	17	1925
Tammiku	Jägala	250	2,5	1905
Kamari	Põltsamaa	400	5	1957
Põltsamaa	Põltsamaa	100	2	1951
Saesaare	Ahja	193	8,8	1952
Leevaku	Võhandu	130	2,5	1948
Räpina	Võhandu	100	2,5	
Tõrve	Pedja	80	4	1952
Härjanurme	Pedja	110	5	1960
Vaimastvere	Pedja	50	3,5	1956
Painküla	Pedja	65	4	1955
Kunda	Kunda	400	9,5	1958
Kotka	Valgejõe	250	6,6	1950
Nõmmeveski	Valgejõe	170	7,8	1924
Sindi	Pärnu	500	3,2	1932
Jändja	Pärnu	100	2,5	1925
Suurejõe	Pärnu	100	2,4	1928
Tudu	Rannapungerja	50	5	1950
Joaveski	Loobu	100	10	
Summa		5338		

1936. aastal oli Eestis 747 veejõuseadet koguvõimsusega 33 536 Hj (25 035 kW). Hüdrolektrijaamade koguvõimsus oli 9,3 MW, aastast toodeti 28 GW·h elektrienergiat, mis kattis 28,6% elektrienergia vajadusest.

Kuuekümnendatel aastatel taastati vanu ja rajati uusi veejõujaamu (tabel 1).

Optimistlikul hinnangul on Eestis võimalik rajada veejõujaamu koguvõimsusega kuni 30 MW, aastane energiatootlus oleks siis kuni 150 GW·h. See moodustab aasta vajadusest (5,6 TW·h) ainult 2,7%.

Pilt on mõnevõrra teine, kui üldriiklikult tasandilt minna kohalikule tasandile. Kagu-Eesti energiakasutust illustreerib tabel 2, võimalikku vee-energia ressursi tabel 3.

Tabel 2. Energiatarve Kagu-Eesti maakondades GW·h / aastast

Table 2. Electroenergy consumption in South-East Estonia GW·h/year

Maakond	1998	1999
Võru	101	104
Valga	124	115,8
Põlva	82,3	73,7
Summa	316,3	293,5

Tabel 3. Kagu-Eesti jõgede vee-energia varu

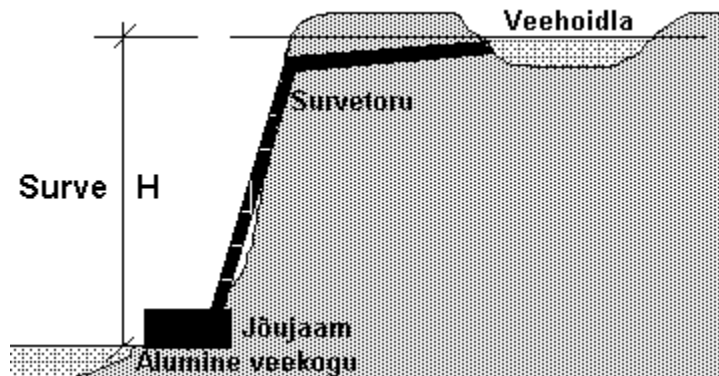
Table 3. Available hydropower energy in South-East Estonia rivers

Jõed	Veskite arv	E MW·h	P kW
Ahja	10	1572	262
Väike Emajõgi	25	2371	451
Võhandu	36	3474	579
Piusa	23	882	147
Elva	5	456	78
Õhne	16	3233	947
Mustjõe	12	900	150
Summad		12 888	2614

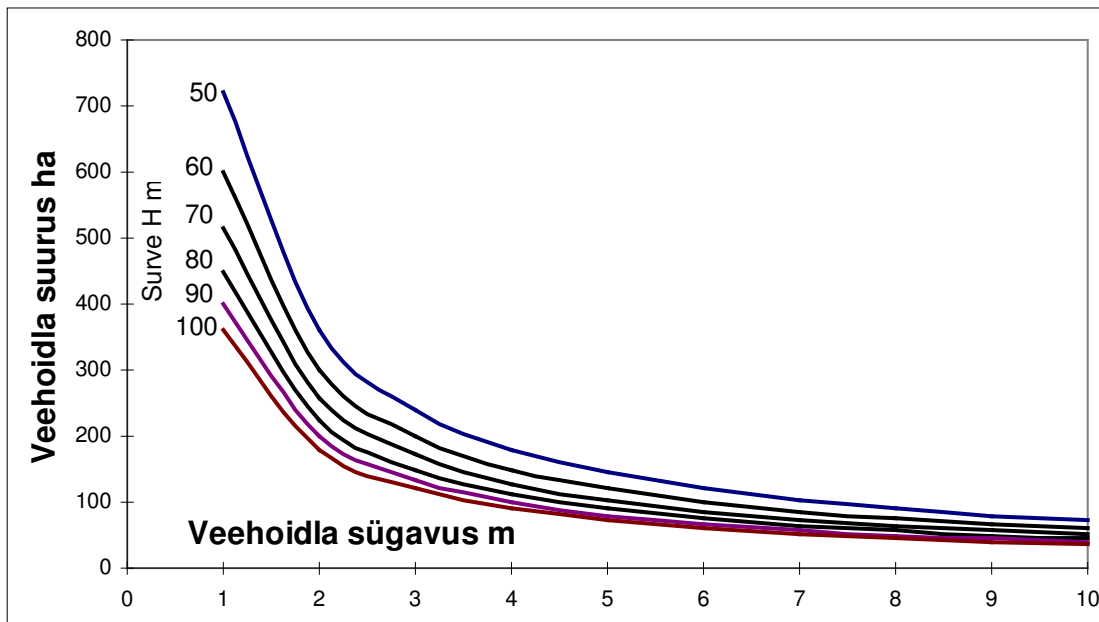
Tabelitest selgub, et Kagu-Eesti suudaks oma elektrienergia vajadusest katta vee-energiaga 4,3%. See on ligi kaks korda suurem, kui Eesti keskmine. Maakohas võib vee-energia katta suure piirkonna energiavajaduse, vähendab liinikadu võrkudes (praegu moodustab 18,6% elektrienergia toodangust), loob juurde uusi töökohti maakohades ja võimaldab vähendada põlevkivi põletamist.

Tuuleenergia varud võimaldavad Eesti energiaprobleeme lahendada palju suuremal määral, kui seda võimaldab vee-energia. Vaja on suuremahulisi energiasalvesteid. Üheks praktikas läbiproovitud võtteks on pumpejaamade rajamine (joonis 1). Jaam koosneb kõrgele kaldale rajatud veehoidlast, seda jaamahoonega ühendavast torustikust, pump-turbiine sisaldavast jaamahoonest ja alumisest suuremahulisest veekogust. 1 kW·h salvestamiseks tuleb (kasutegureid arvestamata) tõsta 360 kuupmeetrit vett 1 m kõrgusele. Mida kõrgemale vett tõsta saab, seda vähem teda kulub. 1 GW·h vee-

energia salvestamiseks tuleb 100 m kõrgusel asuvasse veehoidlasse pumbata 3 600 000 m³ vett. Veehoidla suurus ühe GW-h salvestamiseks oleneb tõstekõrgusest ja veehoidla sügavusest (joonis 2).



Joonis 1. Pumpejõujaama skeem
Figure 1. Scheme of a power plant



Joonis 2. Vajalik veehoidla pind olenevalt sügavusest ja tõstekõrgusest
Figure 2. Needed area of water reservoir depends on its depth and pumping head

Kogu ettevõtmise kasutegur võib ulatuda 70–80%-ni. Suure veekogu (meri) läheduses paiknevaid kohti leidub Eesti põhjakaldal (50–70 m), kui otsida, siis mujalgi. On aeg hakata tõsiselt tegelema energia salvestamise probleemidega Eestis. Ülalesitatud on üks paljudest võimalustest.

HYDROPOWER ENERGY AS PART OF ESTONIAN ENERGY

Heiti Haldre

Estonian Agricultural University, e-mail: hhaldre@eau.ee

Abstract

Estonian water energy resources are limited. The waterpower can cover only 2% of Estonian energy need. Locally the ratio may be better. In South-East Estonia up to 4.3%. The potential of wind energy in Estonia is significant. Up to 10 TW·h electricity per annum could be produced theoretically. A full utilisation of said possibility is impossible without a good energy saving system. A hydropower equipment and structures may be used here. Pumping-hydropower stations are known as energy saving facilities. Efficiency up to 70% may be received. In Estonia one can find suitable places for such hydrotechnical structures.

EESTI METSARESSURSSIDE MÕÕTMINE SATELLIIDIPILTIDEL

Urmas Peterson

Tartu Observatoorium, 61602 Tõravere, Tartumaa, e-post: urpe@aai.ee

Annotatsioon

Satelliidi Landsat skanneri Thematic Mapper talvistest lausalise lumikattega piltidest on koostatud Eesti metsade kaart mõõtkavas 1:100 000. Satelliidipiltidelt aastatest 1990 ja 2000 on hinnatud kümne aasta kestel raiutud lageraielankide pindala.

EESTI METSASUS, SATELLIIDIPILDID, LAGERAIELANGID

Kõige pikema tegevusega satelliitide seeria Landsat piltide aegreas on Eesti ala katvaid satelliidipilte viimase viieteistkümne aasta kohta. Satelliidi Landsat skanneri Thematic Mapper numbriliste piltide ruumiline lahutus – piksli suurus maapinnal on 30 meetrit. Niisugustest keskmise ruumilise lahutusega satelliidipiltidest saab koostada kaarte mõõtkavas kuni 1:100 000 – trükituna oleks ühe piksli suurus sel juhul 0,3 mm kaardil. Landsati orbiit on päikesesünkroonne ülelennuga samast paigast alati samal kellaajal keskhommikul. Satelliidipiltide asend maapinna suhtes on ajas püsiv, kõikides aastate jooksul vaid mõne kilomeetri võrra. Ühe pildi küljepikkus maapinnal on seejuures ligikaudu 180 km. Eesti ala katab täielikult viis satelliidi Landsat pilti.

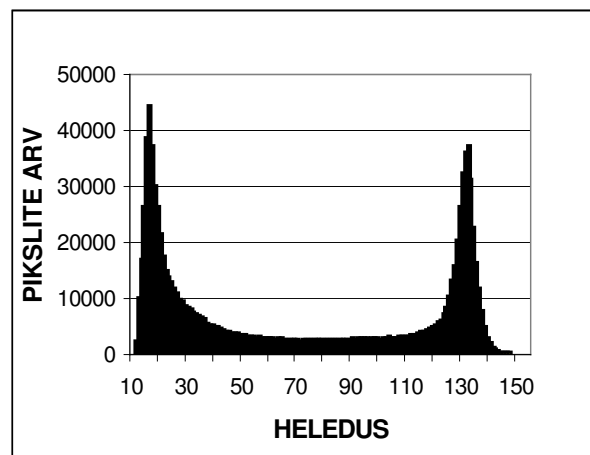
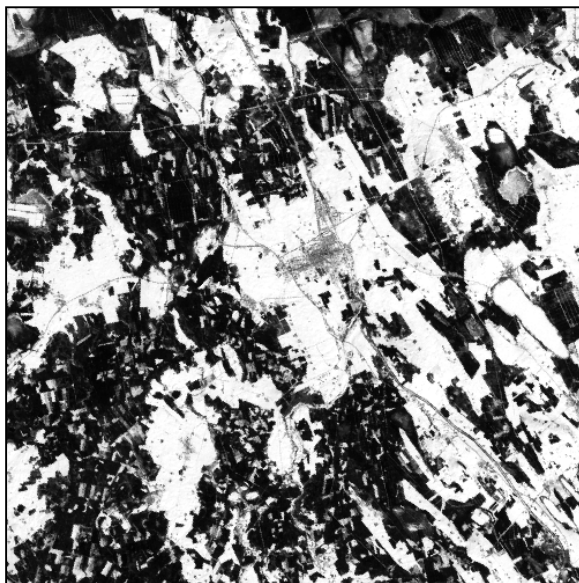
Satelliidipiltide kasutusülesandeid võib põhimõtteliselt liigitada kahte tüüpi. Neist ühe ühishimmetajaks on klassifitseerimisülesanded, mil piisab tavaliselt ühest pildist ning väljundiks on näiteks maakasutuskaardid või põlluviljade saagikuse hinnangud. Teist tüüpi ülesannetes kasutatakse teatud ajavahemiku tagant tehtud pildipaare või piltide aegridasid toimunud muutuste leidmiseks.

Praegustes Eesti oludes on huvipakkuvaks ülesandeks, mille lahendamisel saab toetuda satelliidipiltidele, metsamaa pindala mõõtmine. Selge ei ole ka viimaste aastate metsamaa pindala muutuste ulatus. Metsamaa pindala muutuste seas võib eristada ajutiselt metsata alade teket metsade välispiiri sees ehk lageraielasid ning metsade välispiiri laienemist kunagiste põllumajanduslikus kasutuses olnud maade arvel. Kasutusest välja jäänud põllumajandusliku maa hulka Eestis on hinnatud 180 – 350 000 hektarile, hinnangud on arvutuslikud. Põllumajanduslikust kasutusest välja jäänud maa metsastub looduslikul teel või vajab metsastamist.

Eesti metsade kaardi koostamiseks oleme võimalike satelliidipiltide seas valinud talvised lausalise lumikattega pildid. Lagedate alade lumepinna, st mittemetsade heleduse erinevus keskealiste ja vanemate puistutega st. metsadega võrreldes on viiekordne. Ühelgi teisel aastaajal metsade ja mittemetsade nii suurt heleduse erinevust ei ole ning klassifitseerimistäpsus vaid kahe klassi “mets” ja “mittemets” eristamiseks satelliidipiltidel seetõttu parim. Metsade väike heledus talvel on tingitud tumedatest lehtpuu- ja okaspuuvõradest ning võrade ja tüvede heidetud varjudest. Värskest sadanud lumi on spektri nähtavas piirkonnas kõige heledam looduslik pind üldse. Satelliidipiltidena oleme kasutanud veebruari lõpus või märtsikuus pilvitu ilmaga

tehtud pilte. Eelistatud on võimalikult hilise kuupäevaga pildid. Mida kaugemale talvisest pööripäevast, seda intensiivsem on päikesekiirgusega valgustus ja seda täielikumalt on ära kasutatud satelliidi skanneri dünaamiline diapasoone, skanneri tundlikkus ning eeldatavalt on väiksemad ka mõõtmistäpsusest tingitud klassifitseerimisvead.

Talvised satelliidipildid on klassifitseeritud kaheks klassiks. Otsus “mets” või “mittemets” on kõikide satelliidipiltide iga piksli puhul langetatud piksli heleduse väärtusest lähtuvalt. Eestimaa talvise pildi heleduse sagedusjaotuses domineerivad kaks nivood: suure heledusega lagedate alade heleduse nivoo ning väikese heledusega metsade nivoo. Heleduse sagedusjaotus on kahe maksimumiga ning nende vahelise madala lameda sadulaga. Sagedusjaotuse sadulat moodustavate heledusväärtustega pikslid tähistavad üleminekulisi alasid metsade ja mittemetsade vahel (näiteks puisrabad ja -madalood) ning servapikslid. Servapikslid on metsade ja lagedate alade piiril olevad pikslid, kus 30×30 m ruudu piiresse (piksli suurus) jääb kas suuremal või vähemal määral kumbagi klassidest. Heleduse sagedusjaotuse sadulasse tõmmatava kahe klassi eristuspiiri põhjenduseks oleme kasutanud Eesti põhikaardi tarbeks pildistatud numbrilisi ortofotosid (põhikaardi projektsioonis Lambert-EST aerofoto-

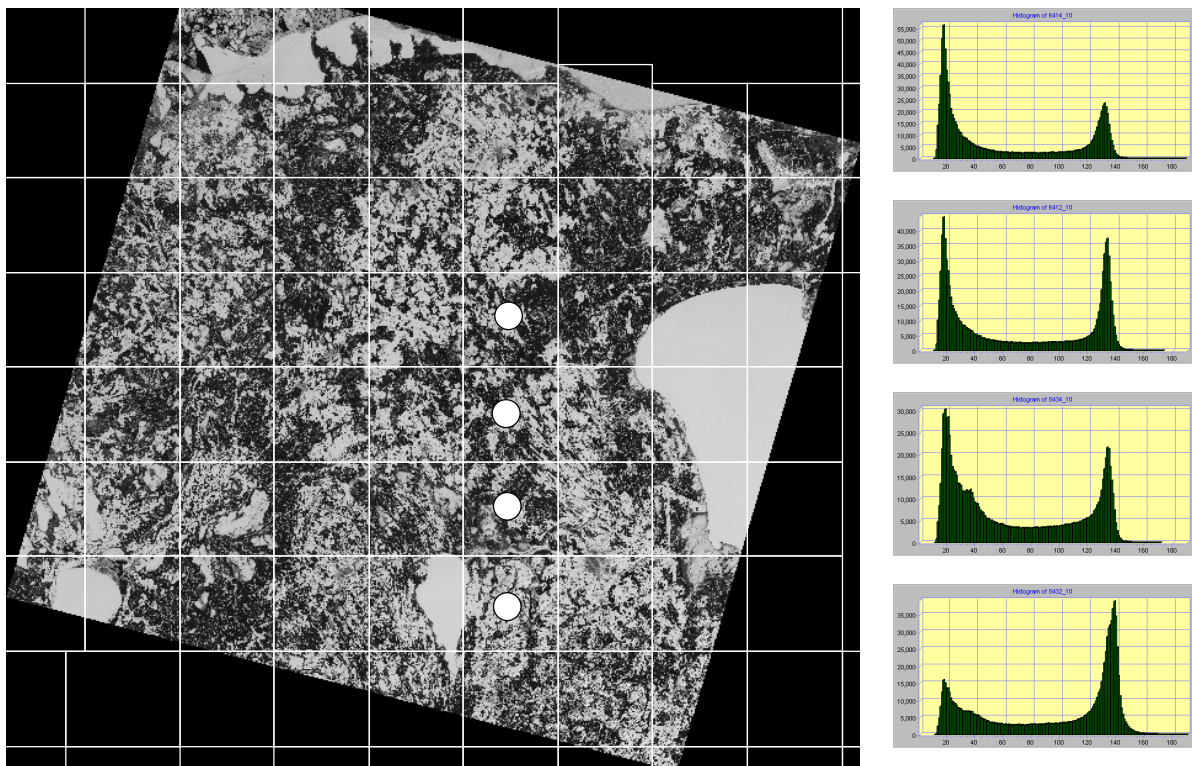


Joonis 1. Eesti baaskaardi Jõgeva lehe suurune fragment (25 x 25 km maapinnal) satelliidi Landsat skanneri Thematic Mapper pildist 10. märtsil 1996. a. Paremalt on sama pildi heleduse sagedusjaotus, milles domineerivad kaks heleduse nivood: väikese heledusega metsade nivoo ning suure heledusega lagedate lumeväljade nivoo

Figure 1. A sample (25×25 km) of a satellite Landsat scanner Thematic Mapper band 3 scene from March 10 1996. Frequency distribution of brightness values of the same scene has two local maxima. The maximum of low reflectance values correspond to forests, the maximum of high reflectance values corresponds to bare snow areas

sid). Valitud paikades üle kogu Eesti, kokku kahekümnel ortofoto ruudul küljepikkusega 5 km maapinnal on metsad dešifreeritud ning metsakontuuride piirid vektorjoontena digitud. Satelliidipildil on seejärel leitud heleduse nivoo, mille kohaselt pilti kaheks klassiks klassifitseerides on numbriline sarnasus ortofotolt leitud metsakontuuriga kõige suurem ning pindalaerinevus kõige väiksem. Ortofotol digitud metsapiiri loetakse seejuures tõeseks metsapiiriks.

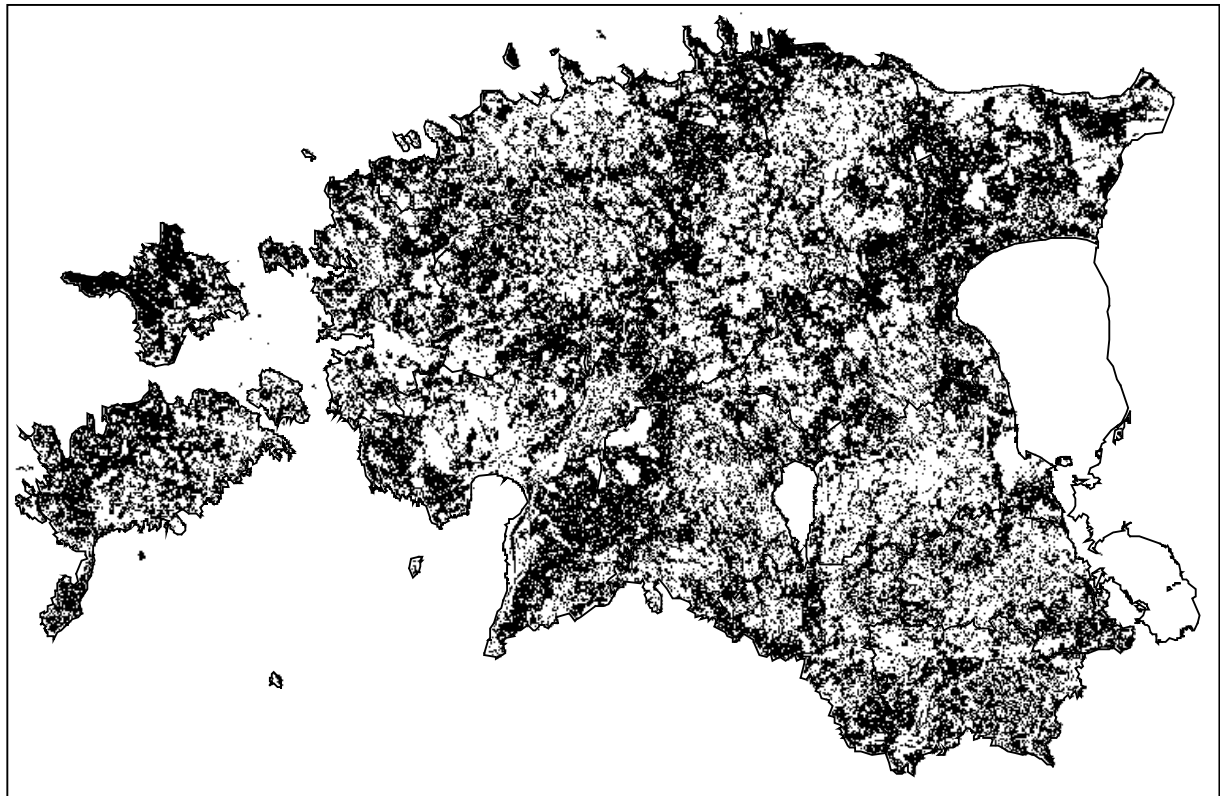
Selleks, et hinnata ühel ortofotol leitud eristusnivoo kehtivust lähiümbruses, oleme talvise satelliidipildi heleduse sagedusjaotusi võrrelnud Eesti baaskaardi lehe suuruste pildilõikude kaupa (25×25 km maapinnal). Võrrelnud oleme metsadele ja lagedatele vastavate heleduse maksimumide asendit heleduse teljel, eeldades maksimumide sarnasuse korral ka pildivälja lõikude valgustustingimuste ja lumeolude sarnasust. Heleduse erinevusi võivad põhjustada atmosfääri erinev läbipaistvus pildivälja eri osades, lumepinna heleduse erinevused või puuvõradesse pidama jäänud lumi.



Joonis 2. Pildivälja ühetaolisust kirjeldab sagedusjaotuse kahe lokaalse maksimumi asend heledusteljel. Eesti baaskaardi lehtede kaupa (pildil valgete joontega võrgustikuna) arvutatud sagedusjaotustest on neli esitatud. Vastavad kaardilehed on märgitud valgete ringidega satelliidipildil. Oluline on maksimumide asend heleduse teljel, maksimumide kõrgus kirjeldab metsade ja lagedate omavahelist suhet pildiruudu piires

Figure 2. Local conditions in the scene area are measured with the position of two local maxima in the frequency distribution. Frequency distributions are calculated for Estonian Base Map sheets covering scene area. The outlines of map sheets are with white grid. Location of the four histogram sheets in the scene are denmoted with white dots

Pildi järeltöötlusena on Eesti baaskaardi numbrilisi andmekihte kasutades kõrvaldatud need alad, mis heleduse järgi klassifitseeritakse metsatukkadeks, on aga tegelikult põldude keskel olevad talud või teedeäärsed puuderibad. Ükshaaval klassifitseeritud satelliidipiltidest on lõpptulemusena kokku pandud Eesti metsade kaart. Lähteandmetest, satelliidipiltide piksli suurus maapinnal, lähtuvalt on numbrilise kaardi täpsus võrreldav mõõtkavas 1:100 000 trükitud kaardiga.



Joonis 3. Talvistest satelliidipiltidest klassifitseeritud Eesti metsade kaart

Figure 3. Forest map of Estonia. Forests are classified from snow-covered satellite scenes.

Talvistel piltidel klassifitseeritud metsade ala sees oleme maikuus tehtud kevadsuviseid pilte kasutades eristanud metsad liigilise koosseisu järgi. Oleme pidanud võimalikuks eristada koosseisu järgi okaspuu- ja lehtpuupuistud 10-pallilises skaalas (0 okaspuud kuni 10 okaspuud). Klassifitseerimine on tehtud õpetava valimiga, õpetuspiirkondadena oleme kasutanud riigimetsade takseerandmestiku metaskondade vektorkaarte ja takseertunnuste andmebaasi. Kasutatud meetodiks on klassifitseerimine hägusate hulkadena (*fuzzy sets*).

Viimase kümne aasta kestel raiutud lageraielangid on leitud 1990. ja 2000. aasta maikuu satelliidipiltidelt. Piltide regressioonseosest leitud olulised erinevused heleduse suurenemise suunas on metsades defineeritud lageraielankidena. Klassifitseerimistäpsus on hinnatud võrdlusena Eesti põhikaardi ortofotodel defineeritud raielankide piiridega.

Tabel 1. Maakondade metsasus satelliidipiltidelt mõõdetuna

Table 1. Forest area in Estonian counties measured from classified satellite scenes

Maakond	Metsamaa pindala (ha)	Metsasus (%)
Harju	222 000	51,3
Hiiu	68 300	67,4
Ida-Viru	185 200	55,0
Jõgeva	127 900	49,2
Järva	122 600	46,8
Lääne	112 200	46,6
Lääne-Viru	173 900	50,2
Põlva	95 700	44,2
Pärnu	243 500	50,7
Rapla	155 600	52,2
Saare	154 100	53,4
Tartu	112 000	37,4
Valga	106 800	52,7
Viljandi	166 200	48,6
Võru	111 800	48,5
Kokku	2 157 800	49,7



Joonis 4. Satelliidipildid Virumaa metsadest. Landsat TM 5. kanal, 13 mai 1990. a. (vasakul) ning 16. mai 2000. a. (paremal). Heledad korrapäraseid kujundid on raiesmikud. Raiesmikud on regressiooniseosest klassifitseeritavad kui pildipaaril olevad olulised erinevused

Figure 4. Satellite scenes of Virumaa county, North Estonia (Landsat TM, band 5, May 13, 1990 (to the left) and May 16, 2000 (to the right)). Bright areas of rectangular shape are forest clearcuts. Clearcuts are identified as unpredictable change from pairwise regression of scenes

MEASUREMENT OF ESTONIAN FORESTS FROM MEDIUM RESOLUTION SATELLITE SCENES

Urmas Peterson

Tartu Observatory, e-mail: urpe@aai.ee

Abstract

A map of Estonian forests was compiled and forested areas were estimated from snow-covered winter scenes. Satellite Landsat Thematic Mapper scanner images were used. Satellite images from May 1990 and May 2000 were used to classify forest clearcut areas.

ELEKTRIENERGIA TOOTMINE TAASTUVATEST ENERGIAALLIKATEST EUROOPA LIIDU DIREKTIIVIDEST LÄHTUVALT

Meeli Hüüs

Eesti Biokütuste Ühing, Kreutzwaldi 5, 44314 Rakvere, e-post: meeli@estpak.ee

Annotatsioon

Eesti Biokütuste Ühingu tegevuse korraldamisel, sh kaasaaitamisel Eesti Vabariigi võimalikule ühinemisele Euroopa Liiduga, oleme lähtunud olemasolevatest ametlikest suunistest ja meie ühingu võimalustest. Selleks, et koostada Eestile sobilikku ja kindlat tegevuskava taastuvate energiaallikate osas, esitatakse ajalooline lühiülevaade toimunud protsessidest ning valdkonna hetkeseisust. Nimetatakse Euroopa Liidus vastu võetud olulisemad otsused.

TAASTUVAD ENERGIAALLIKAD, EUROOPA LIIT, EESMÄRGID, DIREKTIIVID

Tähtsamad otsused

Euroopa integratsiooni aluseks oli kooperatsioon energeetika valdkonnas.

- 1952. a. sõlmiti *Pariisi leping*, mis nägi ette Prantsusmaa, Saksamaa, Itaalia, Belgia, Hollandi ja Luksemburgi vahelist kokkulepet *Euroopa Sõe- ja Teraseühenduse (ESKÜ)* loomiseks – kehtib aastani 2002.
- 1958. a. loodi *Euroopa Aatomienergiaühendus (EURATOM)* samade riikide poolt eesmärgiga arendada konkurentsivõimelist tuumaenergeetikat.
- 1973. a. naftakriisi ajal kogeti, et tuleb arendada ühist energiapoliitikat. 1974. a. võtsid liikmesriigid vastu Resolutsiooni **ENERGIA RATSIONAALSEST KASUTUSEST** Euroopa Liidus (EL) – edukas energiasäästu poliitika arenemine.
- 1975. a. võttis EL vastu **TAASTUVENERGIA JA ENERGIASÄÄSTU TEADUSLIK-TEHNILISE ARENGUPROGRAMMI**.
- 1979. a. võttis EL vastu **DEMONSTRATSIOONOBJEKTIDE PROGRAMMI**.
- 1980. a. seadis EL endale energeetika vallas järgmised olulisemad eesmärgid:
 - tagada majanduslik kasv ilma energiakasutuse olulise suurendamiseta;
 - vähendada naftasaaduste tarbimist nii, et see ei ületaks 40% summaarsest primaarenergia vajadusest;
 - suurendada tahkekütuste ja tuumaenergia osakaalu elektrienergia tootmisel;
 - võtta kasutusele taastuvad energiaallikad;
 - töötada välja ühtne EL eesmärkidele vastav hinnapoliitika energiaartiklitele.
- 1993. a. nimetati Euroopa Majandusühendus Euroopa Ühenduseks.
- 1995. a. kiideti komisjoni poolt EL ametlik energiapoliitika lõplikult heaks (detsember 1995 – Energiapoliitika Valge Raamat).

- Aastail 1983–1986 võeti vastu deklaratsioonid, mis kinnitati Euroopa Valitsuse (EV) resolutsiooniga ning sätestati järgnevaiks aastaiks hulga laiaulatuslikke eesmärgid energiapoliitikale.

EL energiapoliitika põhisuunad ja -vahendid

EL peab eriti oluliseks tegevusi järgmistes valdkondades:

- konkurentsivõime tõstmine;
- varustuskindluse parandamine;
- keskkonnakaitse tõhustamine;
- turu vabastamine piirangutest ja konkurentsivõime arendamine;
- hinna läbipaistvuse saavutamine;
- energiamajanduse efektiivsuse tõstmine;
- koostöö ja energiasektoriga seotud kaupade vaba läbivoo arendamine;
- turu integratsiooni süvendamine;
- dotatsioonide vähendamine;
- uute ja taastuvate energiaallikate kasutuselevõtu oluline suurendamine;
- energiasektori arendamisele ja keskkonnale avaldatava kahjuliku mõju vähendamisele suunatud teaduslik-tehniliste programmide toetamine.

Olulised dokumendid

Direktiiv 96/92/EC sätestab elektrienergia siseturu eeskirjad liikumisel ühtse turu suunas: suurtarbijatele (kellel oli tarbimine 1999. a. vähemalt 40 GW·h, 2000. a. vähemalt 20 GW·h ja 2003. a. – vähemalt 9 GW·h) antakse võimalus valida, milliselt tootjalt osta elektrit.

Direktiiv 88/609/EEC, mis näeb ette SO₂ emissioonide vähendamist üle 50 MW võimsusega soojuselektrijaamades aastaks 2003 59% võrra (1980. a. on baasaasta) ja NO_x vähendamist aastaks 1998 30% võrra.

See direktiiv sätestab samuti SO₂, NO_x ja tolmuemissioonide maksimaalselt lubatud määrad uutest parimal võimalikul tehnoloogial põhinevatest elektrijaamadest, millega ei kaasne ülemääraseid kulusid (BATNEEC).

The Large Combustion Installations Directive (LCI) on eelneva täienduseks väljatöötamisel.

The Integrated Pollution Prevention and Control Directive (IPPC) – sätestab täienduseks elektrijaamadele õhu-, vee- ja pinnase reostuse kontrollimise lubade väljastamise süsteemi. Olemasolevate elektrijaamade kaasajastamine aastaks 2007, kasutades selleks kohthaaval meetodit, parimat võimalikku tehnikat ja arvestades kulude/tulude analüüsi tulemusi.

The Integrated Resource Planning Directive (IRP), täienduseks, mis nõuab elektri- ja gaasijaotusettevõtelt nõudluse vähendamisele suunatud investeeringute arvestamist, mis oleksid alternatiiviks üha kasvavale energiavajadusele.

VALGE RAAMAT “Tulevikuenergia – taastuvad energiaallikad” “*Energy for the future – renewable sources of energy*”, COM(97)599.

EL energiapoliitika elluviimist on toetatud ja toetatakse ka programmide ALTENER, PHARE, SAVE, SÜNERGIA kaudu.

EL abistab energiaplaneeringuid riiklikul ja regionaalsel tasemel, eriti aga institutsioonide loomisel, mis vastutavad energiapoliitika eest. EL tegevuse põhieesmärk energiapoliitika kujundamisel ja elluviimisel on **tagada ühiskonna tasakaalustatud ja säästev areng.**

ELECTRIC ENERGY PRODUCTION FROM RENEWABLE ENERGY SOURCES FOLLOWING THE DIRECTIVES OF THE EUROPEAN UNION

Meeli Hiius

Estonian Biofuels Association, e-mail: meeli@estpak.ee

Abstract

Estonian Biofuels Association is following the existing official directives in coordination of its work, including support to Estonia's possible joining with the European Union. In order to establish a comprehensive renewable energy action plan for the Republic of Estonia, an overview of the processes completed and current status of the field is presented. Important EU legal acts are listed.

PAJUISTANDUSED ENERGIAALLIKANA JA VEGETATSIOONIFILTRINA

Katrin Heinsoo¹, Ebe Sild², Andres Koppel³

¹Eesti Põllumajandusülikool, Zooloogia ja Botaanika Instituut, Riia 181, 51014 Tartu
e-post: katrin@zbi.ee

²Eesti Põllumajandusülikool, Zooloogia ja Botaanika Instituut, Riia 181, 51014 Tartu
e-post: ebe@zbi.ee

³Eesti Põllumajandusülikool, Kreutzwaldi 64, 51014 Tartu, e-post: akoppel@eau.ee

Annotatsioon

Kiirekasvulised puud on üheks võimalikuks taastuva energia allikaks. Eestis seitse aastat tagasi rajatud kiirekasvulise paju istandused on võimaldanud mitmekülgset uurida selle kultuuri kasvatamisvõimalusi meie kliimas. Väetatud ja hästi hooldatud istanduses on tootmine keskmiselt 44 tonni kuiva puitu hektarilt 4-aastase kasvuperioodi jooksul (st 11 tonni hektarilt aastas). Sellise koguse puidu müügist saadav tulu oleks ligikaudu 16 000 krooni. Pajuistanduse saagikust on võimalik tõsta, istutades külma- ja haiguskindlaid kloone. Energiavõsa hooldamiskuludest moodustavad ligikaudu 80% väetiste ostuks tehtavad kulutused. Seega saaks istanduse hooldamiskulusid oluliselt vähendada, kasutades mineraalväetiste asemel reovett. Taastuva energiaallikana rajatud paju võsa kasutamine reovee puhastajana toob endaga küll suuremaid kulutusi istanduse rajamisele, kuid saadav tulu nii tootmise tõusust (kuni 22 t kuivmassi hektarilt aastas) kui reostuse vähenemisest peaks niivõrd kulutusi kompenseerima. Usume, et sellised energiaallika ja vegetatsioonifiltrina kasutatavad pajuistandused võiksid olla Eesti maapiirkonna ja väikeasulate jaoks sobivaks säästva arengu teeks.

PUIT, PAJU, TOOTMINE, VEGETATSIOONIFILTER

Energiavõsa

Taastuvatest energiaallikatest on Eestis kahtlemata kõige kauem ja rohkem kasutatud puitu. Linnastumine ning majanduse intensiivistumine on puidu kasutamist kütusena järk-järgult vähendanud, kuna küttepuidu kasvatamine, varumine ning põletamine on olnud seotud suuremate kulutustega kui fossiilsete kütuste kasutamine. Arvestades fossiilkütuste varu vähenemist ning sellest tulenevat hinnatõusu nii maailma- kui ka Eesti turul, on puidu kasutamine kütusena jälle aktuaalne. Selle tõestuseks võib tuua näiteid siitsamast Tartumaalt, kus puiduküttele üle läinud katlamajad (Tartu, Rõhu, Kambja) suudavad sooja toota mitte kallimalt kui gaasi- või masuudikütusel töötavad katlamajad. Lisaks fossiilkütuste hinna tõusule maailmaturul hakkab lähiajal katlamajade konkurentsivõimele mõju avaldama keskkonnanõuetel kaalutlustel lisanduv nn süsihappegaasi maks.

Praegu katlamajades kasutatav puit koosneb põhiliselt puidutööstuse- või raiejäätmetest. Kui puidu kasutamine kütusena veelgi laieneb, tekib peagi raskusi toorme hankimisega. Loota praegu võsastuvate teeservade ning mahajäetud põllumaa peale on lühinägelik. Viljakamad põllud leiavad üsna kiiresti otstarbekohase rakenduse, teeservadel või jäätmaal hajusalt ja üldiselt ebatasasel pinnal kasvava võsa koristamine on aga

liiga töömahukas ja kallis. Puude kasvatamine selleks spetsiaalselt rajatud puuistandustes (nn puupõldudel) on üheks väljapääsuks võimalikule küttepuidu defitsiidile. Majanduslikel kaalutlustel peab selline istandus a) asuma lõpptarbijale (katlamajale) võimalikult lähedal, b) olema võimalikult produktiivne, c) võimaldama kiiret, mehhaniseeritud koristamist. Mitmetes riikides (Rootsi, Ameerika Ühendriigid, Holland) on sellised kiirekasvulised energiavõsad laialt levinud. Sõltuvalt kohalikest kliimatingimustest kasutatakse võsa rajamisel erinevaid taimeliike. Meie kliimas sobivad energiavõsa kasvatamiseks paju ja hall lepp, võimalik, et mõned teisedki puuliigid.

Eestis 7 aastat tagasi rajatud prooviistandustes kasvab kaks pajuliiki: vitspaju (*Salix viminalis*) ja pikalehine paju (*Salix dasyclados*). Istanduste taimed pärinevad Rootsi Põllumajandusülikoolist, kus nad valiti välja oma eriti kiire kasvu, haiguskindluse, kliimasobivuse jms poolest. Siiani tehtud uurimistöö neis istandustes on andnud piisavalt teadmisi ja kogemusi tööstuslike pajuistanduste rajamiseks lähitulevikus.

Pajukasvatuse põhimõtted

Pajuistandus rajatakse valitud kloonide umbes 20 cm pikkuste juurdumata pistokstega (Sennerby-Forsse, Johansson, 1993). Esimesel suvel kasvab juurdunud pistoksast 1...4 võsu. Võsude arvu taime kohta suurendab esimese aasta võsude talvine tagasilõikamine. Istanduse raieküpsus saabub sõltuvalt taimede istutustihedusest ja kasvukiirusest 3...7 aasta jooksul. Koristamisel lõigatakse võsud taimede puhkeperioodil (st talvel) umbes 5...10 cm kõrguselt maha. Järgmisel kevadel kasvavad kändudest uued võsud. Hästi hooldatud istanduses on võsude kasvutsükleid (rotatsioonitsükleid) 4...5.

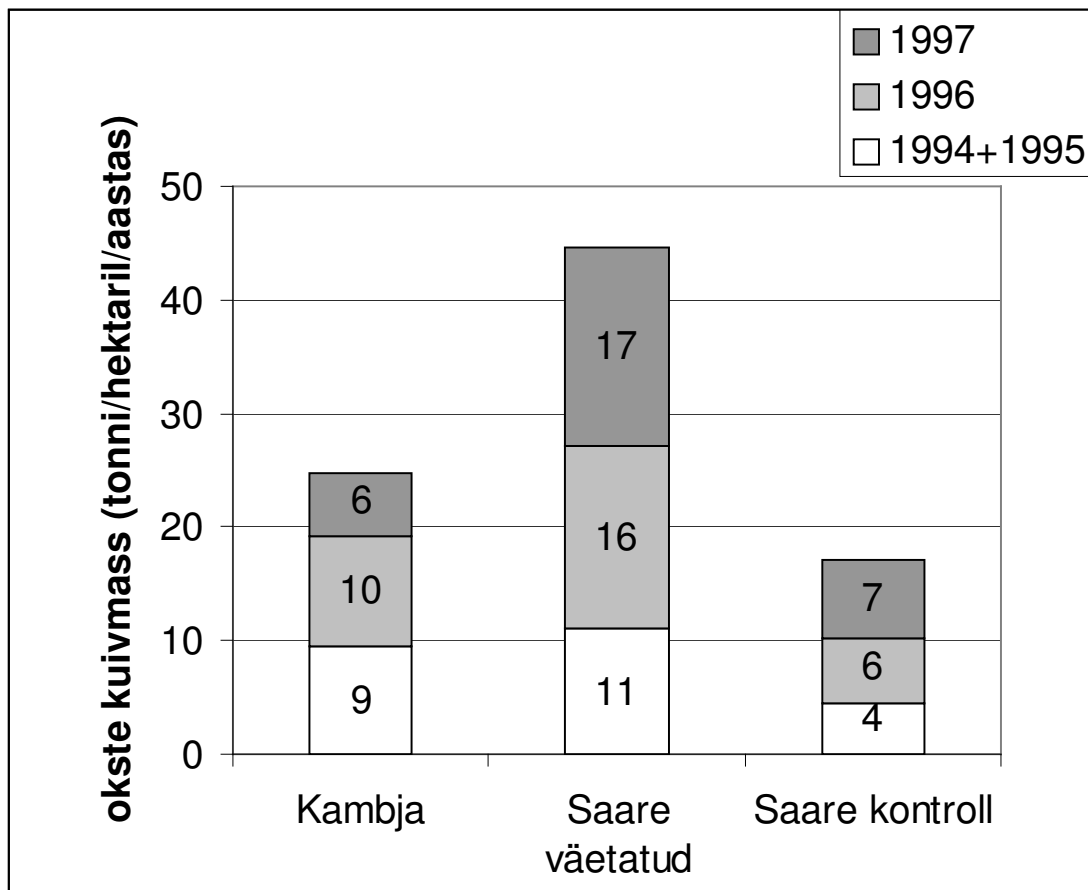
Pajuistanduste saagikus ja seda mõjutavad tegurid

Pajuistanduste saagikus sõltub mitmetest teguritest. Aastane puidu juurdekasv oleneb kasutatavast kloonist, mullaviljakusest, kliimatingimustest ja istanduse vanusest. Kolmandal-neljandal aastal on võsude juurdekasv tavaliselt suurem kui esimestel aastatel. Edaspidi kasv pidurdub taimede omavahelise konkurentsi tõttu istanduses, mis põhjustab nõrgemate taimede ja võsude kängumise/suremise. Kasvu pidurdumine viitab sellele, et istandus tuleks koristada. Istanduse taastumine sõltub taimede lõikuseelsest elujõulisusest ning taimede suremine vähendab tulevikus saadavat saaki, seega on lõikuse ajastus väga oluline. Meie praktika näitab, et istandustes tihedusega 2 taime/m² on soovitatud 4-aastane rotatsiooniperiood (Ledin, 1996) mõnikord liiga pikk, põhjustades suurema kasvukiirusega taimedel okste suurt suremust. Et kuivade/surnud okste biomass pole mehaaniliselt koristatav, on saagikadu nendelt aladelt suur (Verwijst, Telenius, 1999).

Istanduses kasvatatavate pajuliikide ja -kloonide külmatundlikkus ning haiguskindlus on erinev. Meie vaatlusalustes istandustes kasvas kõige kiiremini laialehine paju *S. dasyclados* (kloon 81090). Paraku osutus see kloon Tõravere istanduses väga vastuvõtlikuks leheroostele *Melampsora* sp., mille tagajärjel istandus hävis. Saare istanduses kahjustasid laialehist paju kevadised öökülmad (eriti väetatud prooviruutudel), tuues endaga kaasa suure taimede suremise. Kokkuvõttes oleme samal arvamusel kirjanduse soovitustega, et tööstuslikult rajatav pajuistandus peaks sisaldama segu (näiteks ridade

kaupa) erinevatest pajuliikidest/kloonidest. See aitaks takistada võimalikku haiguste levikut ja teisi ühekordseid kahjustusi istanduses.

Nagu teistegi põllukultuuride puhul, sõltub ka pajuistanduste saagikus, st kättesaadava puidu hulk, mulla viljakusest (joonis 1). Vähemviljakatel muldadel aitab saagikust tõsta väetamine, eriti lämmastikväetistega. Näiteks N-viljakale madalsoomullale rajatud Kambja istanduses, kus rotatsioonitsükli esimeste aastate produktsioon oli suur, pidurdus kasv neljandal kasvuaastal seoses mõnede toitainete (P ja K) puudusega.



Joonis 1. Pajuistanduste saagikus erinevatel kasvukohtadel ja väetustasemetel
Figure 1. Productivity of willow plantations in different sites and fertilisation levels

Pajuistanduse majanduslik väärtus

Saare prooviaala väetatud ruutudel oli paju võsa keskmine saagikus istanduse esimesel 4 aastat kestnud rotatsiooniperioodil 44 tonni puidu kuivmassi hektarilt. Arvestades, et katlamajades kasutatava hakkpuidu veesisaldus on ligikaudu 40%, võiks tööstusliku pajuistanduse igalt hektarilt saada 73 tonni hakkpuitu iga nelja aasta tagant. Praegu makstakse Tartu katlamajas 1 tonni hakkpuidu eest ligikaudu 330 kr. Seega oleks ühe hektari pajuistanduse nelja-aastane toodang praeguste hindadega väärt veidi rohkem kui 24 000 kr. Et võsa koristamise ja hakkpuidu transpordi kulud moodustavad ligikaudu ühe kolmandiku puidu lõppmaksumusest (Ross jt, 1996), on tootjapoolne tulu ühelt istanduse hektarilt umbes 16 000 krooni.

Seni tehtud majanduslikud arvestused energiavõsa rajamis- ja hooldamiskulude kohta Eestis (Ross jt, 1996) on vananenud, kuna kulud nii väetisele, kütusele kui tööjõule on vahepealsete aastate jooksul tunduvalt suurenenud. Ligikaudsed arvutused näitavad, et ka sel juhul, kui kulutused töötasule, kütusele ja väetistele oleksid poole suuremad nimetatud artiklis esitatutest, oleks võsaistanduse rajaja ikka veel kasumis. Siinjuures tuleb arvestada, et järgmiste rotatsiooniperioodide jooksul kulutused vähenevad (ühekordne kuluartikkel istutusmaterjaliks kasutatud pistokstele on arvestatud 3500 kr/ha).

Energiavõsast saadavat kasumit on võimalik suurendada tehtavaid kulutusi vähendades. Üheks suuremaks kuluartiklikuks istanduses on mineraalväetised. Sõltuvalt istanduse mullatüübist ja -viljakusest moodustab väetise hind J. Rossi ja kolleegide andmetel (1996) ligikaudu 80% kõikidest istutusjärgsetel aastatel tehtavatest kulutustest. Seda kulu on võimalik vältida, kasutades kallite mineraalväetiste asemel istanduse väetamiseks reovett. Lisaks saadavale kokkuhoiule väetiste pealt toimib pajuvõsa ka reovee puhastina, mis omakorda säästab vajadusest kallite puhastussüsteemide ja -kemikaalide järele.

Pajuvõsa puhastusfiltrina

Pajuvõsa nagu kõigi teiste vegetatsioonifiltrite tööpõhimõtted on järgmised:

- taimed omastavad reovees olevaid mineraalaineid (N, P, K);
- reovee hulk väheneb tänu transpiratsioonile;
- mulla mikroorganismide osalusel toimuvates keemilistes reaktsioonides tekib erinevatest lämmastikuühenditest N₂;
- mullaosakesed filtreerivad reoveest tahked osakesed, mistõttu püütakse kinni enamik vees lahustumatuid komponente.

Võrreldes seni Eestis kasutatud looduslike biofiltritega on istutatud pajuvõsal mitmeid eeliseid. Neist olulisim on puhastusfiltri pikk tööiga – iga 3...4 aasta järel viiakse filtrist hakkpuiduna ära suur kogus biomassi. Seetõttu väheneb oht, et puhastusfilter küllastuks mõne mineraalainega ning filtri edasine puhastusvõime väheneks.

Puhastusfiltrina kasutatavas pajuistanduses on taimede produktsioon oluliselt suurem, sest a) töötlemata kommunaalreovees sisalduvad üldjuhul kõik põhilised mineraalained taimedele sobivas vahekorras (Perttu, 1998) ning seetõttu ei teki taimede kasvu limiteerivat mineraalainete defitsiiti; b) paraneb taimede veega varustus. Veedefitsiiti peetakse viljakatel muldadel kasvavate (või väetatud) pajude puhul põhiliseks kasvu limiteerivaks faktoriks.

Aarikese pajuistandusse juhitakse 5 m³ reovett päevas kõrvalasuvast hooldekodust, aastane lisatav N kogus on umbes 5300 kg ha⁻¹. Meie katsed sel proovialal näitasid, et laialehise paju taimede juurdekasv oli kahel esimesel kasvuaastal rohkem kui 13 tonni kuiva puitu hektarilt aastas. Taimede vananedes aastane produktsioon ilmselt veelgi tõuseb – kolmeaastastel vitspaju taimedel (mille juurdekasv on harilikult väiksem kui laialehisel pajul) mõõdeti aastaseks puiduproduktsiooniks üle 22 tonni kuivmassi hektarilt.

Transpordikulude vähendamiseks tuleb istandus rajada reoveeallikale võimalikult lähedale. Reovee jaotamiseks vegetatsioonifiltris on mitmeid võimalusi (tabel 1).

Nende vahel valides tuleb lisaks majanduslikele kaalutlustele lähtuda ka sanitaarnõuetest.

Tabel 1. Poolt- ja vastuargumendid erinevatele reovee jaotamise võimalustele

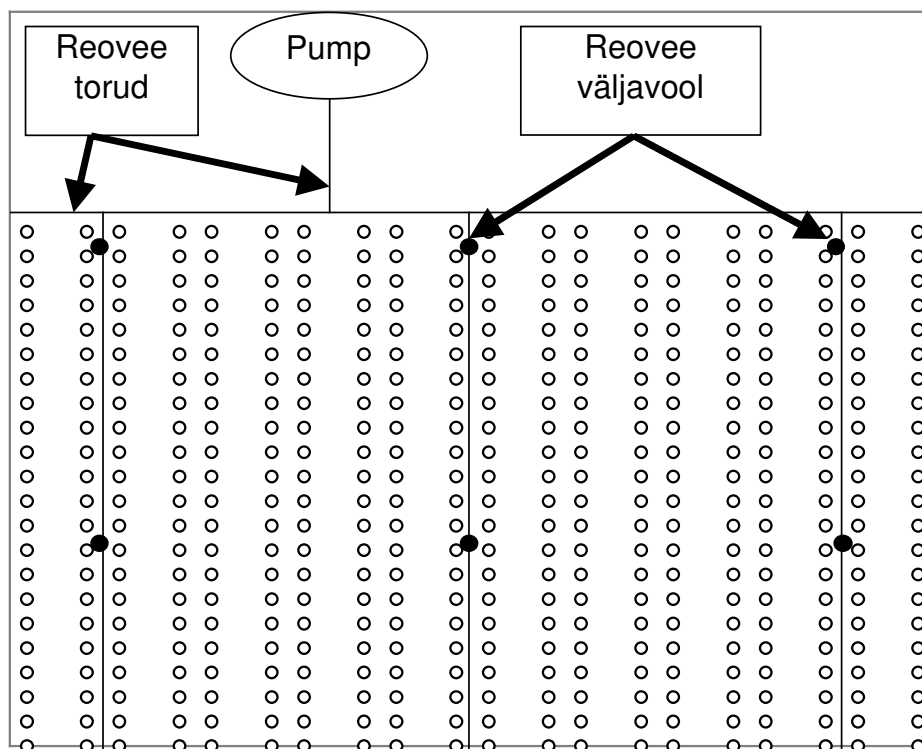
Table 1. Advantages and disadvantages of different wastewater spreading systems

Jaotamine	Pooltargumendid	Vastuargumendid	Kasutusvõimalus	Maksumus
Isevooluline	Ei nõua rajamist	Vee ning selles sisalduvate ainete jaotus ja seega ka taimede kasv väga ebahühtlane. Leostumise võimalus suur	Väga väikeste reovee koguste või madalate reovee mineraalainete sisalduse korral	Odav
Kraavides	Ei nõua pidevat hooldust	Kokkupuutepind ja -aeg reovee ning mulla vahel väike. Istanduse koristamine mehhaniseeritult võimalatu	Juhul kui reovees on nii mineraalaineid kui orgaanikat suhteliselt vähe	Rajamine suhteliselt kulukas, töös hoidmine odav
Vihmutitega	Vee jaotumine alale hühtlane	Saasteainete kokkupuutepind õhuga ja seega bakteriaalse reostuse oht suur	Eelpuhastuse läbinud (madala BHT ₇ -ga) vee puhul	Rajamine ja töös hoidmine kulukas
Torudes	Vee jaotumine alale hühtlane	Nii rajamine kui töös hoidmine komplitseeritud	Universaalne	Rajamine ja töös hoidmine kulukas

Hoolimata suurematest kulutustest filtri rajamisel on paljudes maades enim levinud reovee jaotamine istanduses torude abil. Selleks paigutatakse vastrajatud istanduse taimede paarisrea keskele 3...5 cm läbimõõduga plastiktorud, millesse on umbes 10-meetrise sammuga puuritud augud (joonis 2). Jaotustorud on ühendatud pumbaga, mis suunab sobival ajal sobiva koguse reovett kogu istandusse või mõnda selle ossa. Torude tihedus sõltub majanduslikest (torude suurem hulk muudab süsteemi kallimaks) ja kvaliteedinõuetest (tihedamalt paigutatud torud tagavad hühtlase veejaotuse ja istanduse kasvu).

Reovee hulk, mida pajudel põhinev vegetatsioonifilter suudab töödelda, oleneb kohalikust kliimast. Talvistes tingimustes on pajufiltri puhastusvõime Eesti oludes tunduvalt väiksem. Samuti ei saa talvel kasutada torusüsteemi vee jaotamiseks. Väikeste veekoguste puhul on seetõttu otstarbekas koguda talvine reovesi spetsiaalsesse hoiubasseinidesse. Vajadus periooditi reovett koguda ongi

vegetatsioonifiltrite kasutamise üks suurimaid puudusi ning raskendab oluliselt seda tüüpi filtrite rakendamist suurte reoveekoguste puhul, näiteks suurlinnades.



Joonis 2. Torudest ning pumbast koosnev reovee jaotussüsteem pajuistanduses
Figure 2. The network of pipes and pump for wastewater disposal in willow plantation

Vegetatsiooniperioodil võib reoveega lisada vähemalt 200 kg N istanduse ühe hektari kohta. Sellest mitukümmend korda suurem reoainete koormus Aarikese pajuistanduses ei taga nõutaval tasemel veepuhastust nii üldlämmastiku kui üldfosfori osas (tabel 2). Samas ei kahjusta nii suur kogus reoaineid istanduse taimi. Liiga suure veekoguse suunamine istandusse pole soovitatav ka suhteliselt madala reoainete sisalduse korral, kuna sel juhul võib seisev pinnavesi vähendada pajujuurte hapnikuga varustatust ja/või põhjustada põhjavee saastumist. Rootsi erinevate linnade pajuistandustest järelpuhastites on keskmine päevane kasutatav veehulk vegetatsiooniperioodil 2...6 mm.

Tabel 2. Aarikese pajuistanduse puhastusvõime juunis-novembris 1999 (istanduse pindala 192 m²)
Table 2. Purification capacity of Aarike willow plantation in June-November 1999 (plantation area 192 m²)

Reostuskoormuse indikaator	Kontsentratsioon sissevoolus	Kontsentratsioon väljavoolus
BHT ₇	154,8 mgO l ⁻¹	18,3 mgO l ⁻¹
üldlämmastik	58,8 mg l ⁻¹	28,3 mg l ⁻¹
üldfosfor	10,7 mg l ⁻¹	9,2 mg l ⁻¹

Meie arvutused näitavad, et eeltoodud piiranguid arvesse võttes on ühe hektari paju võsa abil võimalik puhastada 50 inimekvivalendi poolt aasta jooksul tekitatud reovesi. Seega peame otstarbekaks lähitulevikus selliste vegetatsioonifiltrite loomist väikeasulate ja suurtalude juurde.

Kirjandus ✕ **References**

1. Ledin, S. (1996) Willow wood properties, production and economy. *Biomass and Bioenergy* 11(2/3): 75–83.
2. Perttu, K. L. (1998) Environmental justification for short-rotation forestry in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 15(1): 1–6.
3. Ross, J., Koppel, A., Roostalu, H. (1996) Kas pajuistandikel on Eestis perspektiivi energiametsana. *Põllumajandus* 11: 15–19.
4. Sennerby-Forsse, L., Johansson, H. (1993) Energiavõsa. Väike käsiraamat. Eesti TA Zooloogia ja Botaanika Instituut: 40.
5. Verwijst, T., Telenius, B. (1999) Biomass estimation procedures in short rotation forestry. *Forest Ecology and Management* 121: 137–146.

WILLOW PLANTATION: ENERGY RESOURCE AND VEGETATION FILTER

Katrin Heinsoo¹, Ebe Sild², Andres Koppel³

¹Institute of Zoology and Botany of the Estonian Agricultural University
e-mail: katrin@zbi.ee

²Institute of Zoology and Botany of the Estonian Agricultural University
e-mail: ebe@zbi.ee

³Estonian Agricultural University, e-mail: akoppel@eau.ee

Abstract

Plantations of fast-growing trees provide a renewable source of energy. The studies performed in Estonian willow plantations since their establishment in 1993 has resulted in knowledge on the potential utilisation range of willows in our climate. In fertilised and properly managed plantation the total dry wood production was 44 tons/ha during the first 4-year growth period. By realising this wood *in situ*, the grower's income will be about 16 000 EEK. If frost- and pathogen-resistant clones are used, the production may be even higher. Fertilisers form about 80% of management expenses in established plantation. Thus, plantation management could be considerably cheaper if wastewater is used instead of mineral fertilisers. The establishment of plantation used as vegetation filter is more expensive. However, the resulting profit from increased biomass production (up to annual production of 22 tons/ha) and purified water should counterbalance higher establishment expenses. We think that willow plantations used both for energy and wastewater purification purposes provide suitable scenario for sustainable development in Estonian rural areas.

TUULE ENERGEETILINE KVALITEET

Teolan Tomson, Maire Hansen ja Ants Nõva

Eesti Energeetika Instituut, Paldiski mnt 1, 10137 Tallinn, e-post: teolan@anet.ee

Annotatsioon

Tuule energeetilise kvaliteedi hindamisel tuleb arvestada Eesti energiasüsteemi ja rakendatavate tuuleturbiinide omadusi. Olulisim kvaliteedi näitaja on tuule energeetiline ressurss, kuid silmas maksab pidada ka tuule dünaamilisi omadusi, mis on olulised koostöökas energiasüsteemiga. Tuule dünaamikat iseloomustab nii tema kiiruse perioodilisus kui ka juhuslikud muutused. Juhuslikke muutusi vaadeldakse tuule hetkkiiruse hälbe suurusena ja keskväärtuse ühetunnise muutuse poolt põhjustatud tuuleturbiini võimsuse juurdekasvuna (muut). Üldistatult saab tuule kiiruse stabiilsust ajas ja ruumis uurida, käsitades tuule kiirust statsionaarse juhusliku protsessina, millele rakendatakse korrelatsioonanalüüsi.

TUULE KIIRUSE PERIOODILISUS, HÄLVE, TUULE VÕIMSUSE JUURDEKASV

Eesti energiasüsteemi omadused

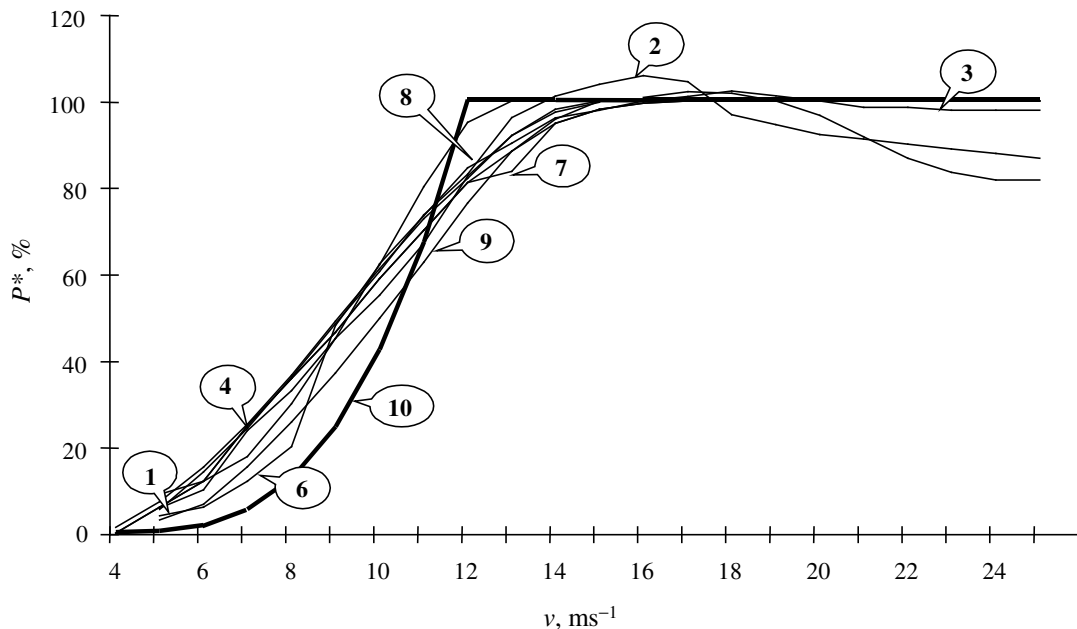
Tuuleenergia kasutamist mõjutavad energiasüsteemi tehnilised ja majanduslikud omadused. Majandus mõjutab seda seadusandja tahtel elektritarifi kaudu. Samuti mõjutavad tuuleenergia kasutamist investeeringud vajatavatesse uutesse elektriliinidesse (ja võib-olla ka kompensatsiooniseadmetesse), sest Eesti tuulerikas läänerannik on hõredate elektriliinidega. Tuuleenergia kasutamist mõjutab ka rahvusvaheline elektrienergia kaubandus, sealhulgas tipuenergia hind.

Energiasüsteemi tehnilistest omadustest mõjutavad tuuleenergia kasutamist elektrijaamade reservvõimsused, elektriliinide paigutus ja läbilaskevõime, kompensatsiooniseadmete (sünkroonkompensaator, kondensaatorpatareid) võimsus ja paigutus ning olulisemate tarbijapiirkondade koormusgraafik. Eesti energiasüsteemi üldine koormus suveti on tunduvalt madalam talvisest. Tuuleenergia juurutamist hakkab mõjutama ka uute ehitatavate gaasielektrijaamade võimsus, paigutus ning projekteeritav töörežiim (s.o kas on need elektri ja soojuse koostootmise jaamad (kombijaamad), kombijaamad soojussalvestiga või mittekombijaamad). Sellega koos ka gaasitraktide läbilaskevõime.

Tuuleturbiinide omadused

Kui me räägime tuule energeetilisest kvaliteedist, siis üldistuste jaoks vajame ka tuuleturbiini mudelit (iseloomulikku esindajat). Joonisel 1 on kujutatud Euroopas enam levinud tuuleturbiinide karakteristikud (võimsuse sõltuvus tuule kiirusest) suhtelistes ühikutes $P^*(v)$. Moodsate turbiinide karakteristikud on kiiruste piirkonnas $4 < v < 14 \text{ ms}^{-1}$ vähem mittelineaarsed ja erinevad vanemate turbiinide kuupkarakteristikuist, mis on käesolevas töös veel analüüsi aluseks võetud. Piirkonnas stardikiirusest $v_{start} = 4 \text{ ms}^{-1}$ kuni stabiliseerimiskiiruseni $v_{stab} = 12 \text{ ms}^{-1}$ on turbiini suhteline võimsus kirjeldatav $P^* = (v - v_{start})^3 / (v_{stab} - v_{start})^3$. Suurematel tuulekiirustel,

kuni pidurdamiseni (enamikus tuule kiirusel $v_{brk} = 25 \text{ ms}^{-1}$) võib turbiini suhtelist võimsust lugeda jäävaks $P^* = 1$, et analüüsi lihtsustada. Valitud aproksimatsioon on järsem paljudest tegelikest karakteristikutest, mistõttu tuuleenergia dünaamika analüüsitud omadusi võib käsitleda “hinnanguna ülalt”. Üldistatud kvaasilineaarsete karakteristikute kasutamine tuuleturbiinide sünkroonse töö uurimisel on veel pooleli.



Joonis 1. Euroopas toodetud turbiinide karakteristikud (1–9) ja nendele antud töös kasutatud tavaturbiini karakteristiku teoreetiline aproksimatsioon (10)

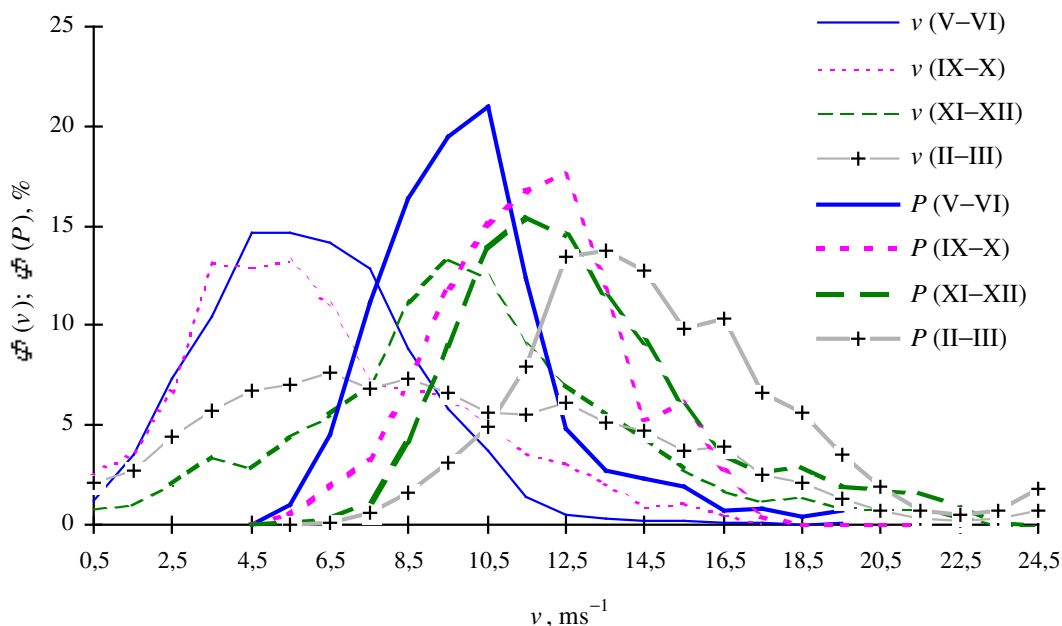
Figure 1. Technical characteristics of new wind turbines produced in Europe (1–9) and the theoretical approximation of a conventional wind turbine applied in the work (10)

1 – Bonus Combi 300kW	6 – Vestas V39 – 500 kW
2 – Bonus 450 kW MkIII	7 – Enercon E – 40/500 kW
3 – Micon M700 – 225/40	8 – Nedwind 40
4 – Micon M750 – 400/100	9 – MWT 250/300 kW

Tuule energeetiline ressurss

Tuule energeetilise ressursi määrab keskmise tuulekiiruse sageduslik jaotus (histogramm) turbiini telje kõrgusel, mida näitena (27 m Kihnus) esitab peente joontega joonis 2. Arendatava võimsuse sõltuvus tuule kiirusest, arvestades valitud aproksimeerivat karakteristikut on mõnevõrra erinev tuule kiiruse sageduslikust jaotusest. Näitel on esitatud jämedate joontega ettekujutatava ühikvõimsusega tuuleturbiini suhteliste võimsuste sageduslik jaotus. Histogrammid ei ole jäävad, vaid sõltuvad tuule (aastase) perioodilise komponendi tõttu aastaajast. Antud näite puhul on tegemist lühiajalisele mõõtmisele (à 2 kuud) tuginevate, kuid naturaalsete histogrammidega. Arvestades tuulemõõtmiste kõrget hinda ja selleks kuluvat pikka aega, tuleb perspektiivi hindamisel ja projekteerimisel leppida tuletatud histogrammidega, mis tuginevad tuuleatlase (European Wind Atlas, 1995) andmeile. Paraku on Eesti tuulte senised histogrammid (sealsamas) ehitatud suhteliselt lühikeste

(1–2 aastat) mõõtmisriidade alusel, vajalik oleks tugineda näiteks 10-aastase intervalli keskmistatud histogrammidele kuude või aastaegade kaupa.



Joonis 2. Tuule kiiruse histogrammid ja ühikvõimsusega turbiini suhteline võimsus sõltuvalt aastaajast Kihnus 1999/2000

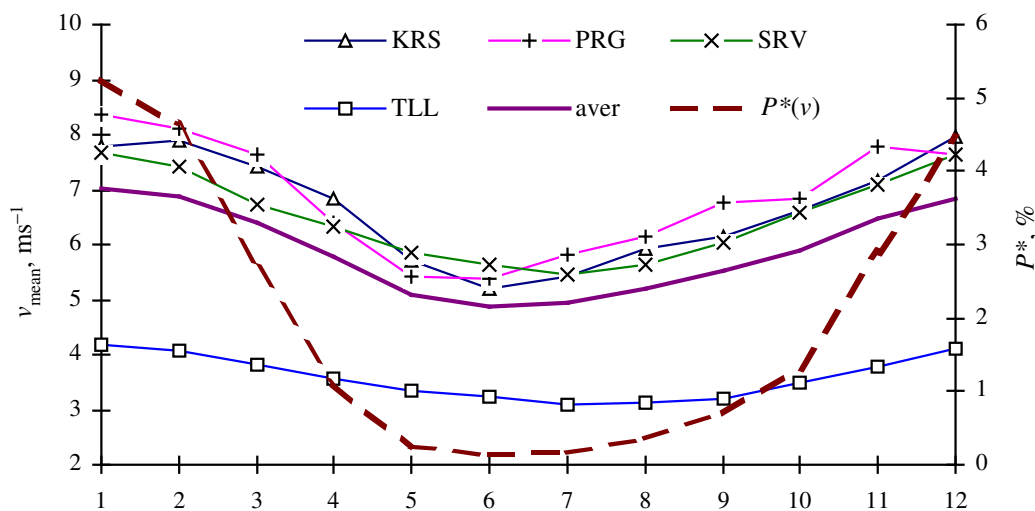
Figure 2. Histograms of wind velocity and relative capacity of a unit power turbine depending on the season on the island of Kihnu in 1999/2000

Tuule perioodilisus

Eesti (läänerranniku) tuule keskvaartuse aastane perioodiline komponent on ligikaudse amplituudiga 1 ms^{-1} ja see on märkimisväärne. Joonisel 3 on esitatud Euroopa tuuleatlase (European Wind Atlas, 1995) andmete põhjal konstrueeritud, diagramm, mis näitab Sõrve (SRV), Kuressaare (KRS), Tallinna (TLL) ja Prangli (PRG) ning nende keskmisena Lääne-Eesti tuulekiiruse sõltuvust kuude kaupa ja selle keskvaartuse alusel arvutatud “formaalset võimsust” P^* , %. Suhtelise võimsuse ligikaudsestki hinnangust on näha, et võimsus ja energiatoodang sõltuvad aastaajast märgatavalt ja tuuleenergia on Eestis aasta vältel kasulikult jaotunud, olles korreleeritud energiasüsteemi koormusgraafikuga.

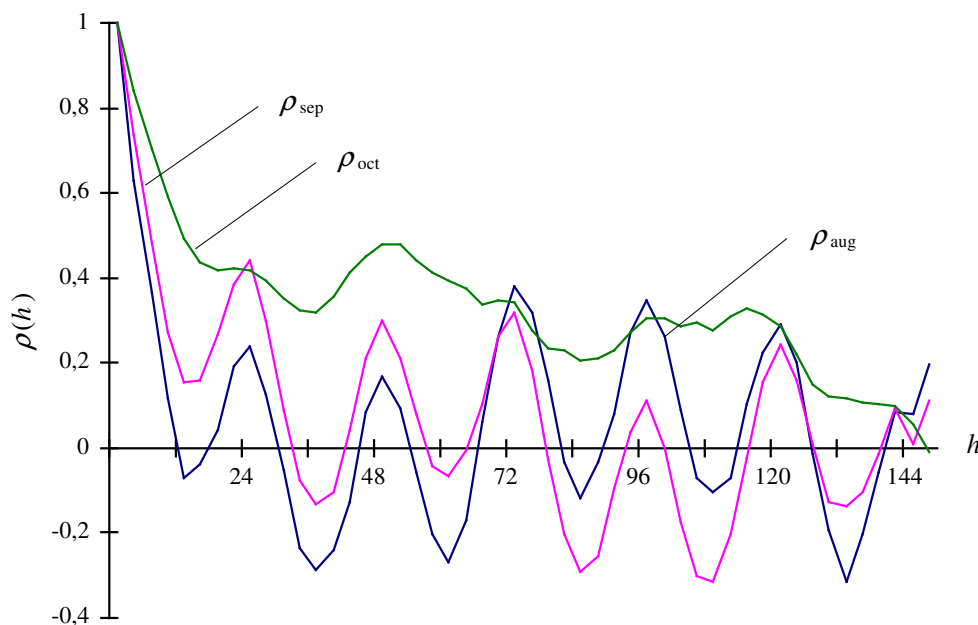
Eesti tuult iseloomustab ka ööpäevane perioodiline komponent, mis suveti tuulevaikuses on rannikul üldtuntud briisina. Joonisel 4 on esitatud Tallinna tuule autokorrelatsioonifunktsioonid augusti, septembri ja oktoobri jaoks. Suvekuudel on igapäevane 24-tunnine perioodiline komponent selgesti nähtav, oktoobris vaevumärgatav ja kõdub alates novembrist. Merel, näiteks Harilaiul, briisi ei esine (Kihnus on see vaevumärgatav). Tuule rannikuga risti olev perioodiline komponent väheneb (võrreldes ranniku puutuja suunas puhuva komponendiga) sisemaa suunas monotoonselt (joonis 5). Vastupidiselt levinud arvamusele ulatub Nigula (NGL), Kuusiku (KSK) ja Türi (TRI) meteoroloogiajaama andmete alusel matemaatiliselt määratud mere mõju palju kaugemale sisemaale, kui geograafide poolt vaatluste alusel seni väidetud on. Graafikul on antud ligikaudne kaugus rannajoonest. Ööpäevase

perioodilise komponendi amplituud on suurusjärgus $\sim 1 \text{ ms}^{-1}$, kuid et see eksisteerib suveti koos nõrga keskmise tuulega, siis ööpäevasel perioodilisel komponendil energeetilist tähtsust ei ole.



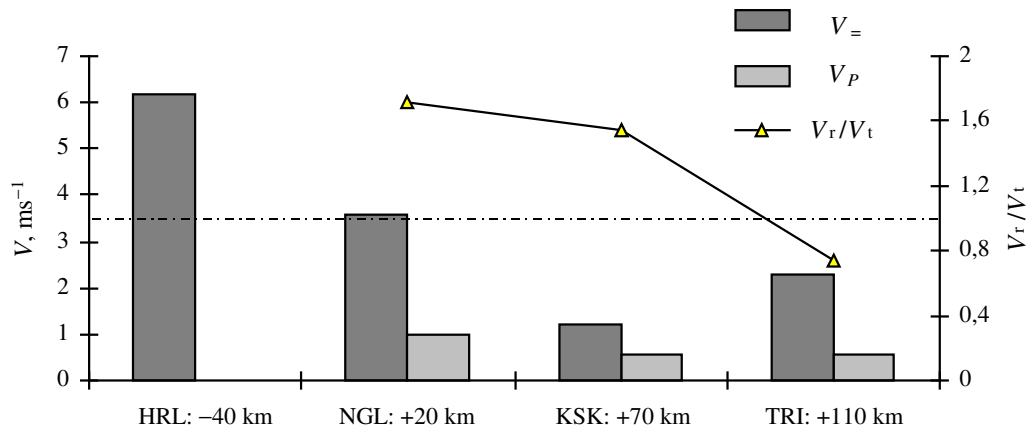
Joonis 3. Eesti lääneranniku punktide tuule kuu keskmised kiirused ja formaalne võimsus (European Wind Atlas, 1995)

Figure 3. Average velocities and expected capacity of the monthly wind average in the sites on the Estonian Western coast (according to the European Wind Atlas, 1995)



Joonis 4. Tallinna tuule normeeritud autokorrelatsioonifunktsioonid 1998. augustist oktoobrini

Figure 4. Normalized autocorrelation functions of wind in Tallinn in August–October 1998



Joonis 5. 1998. augusti tuulekiiruse keskvärtus V_{e} , selle perioodilise osise amplituudi V_{p} ja perioodilise osise radiaal- V_{r} ning tangentsiaalkomponendi V_{t} omavaheline suhe

Figure 5. The wind average V_{e} , the amplitude V_{p} of its periodical component and interrelation of the radial component V_{r} and tangential component V_{t} of this periodical component

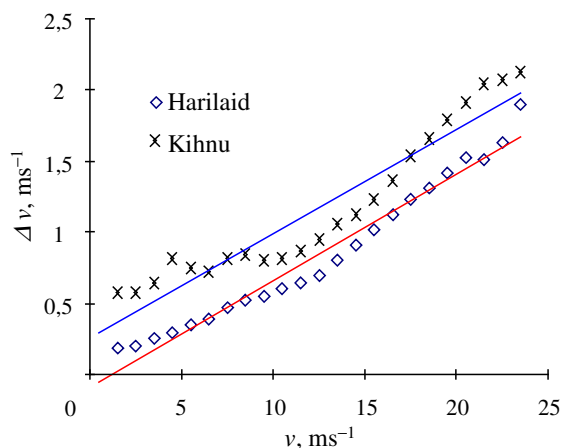
Tuule juhuslikud dünaamilised omadused

Tuule dünaamikat Eestis on veel vähe uuritud (Tomson ja Hansen, 2000 a). Seda on aga vaja tunda kahel põhjusel. Tuule hetkkiiruse kiired muutused põhjustavad materjalide väsimust, laagrite (jõuülekanne jne) kulumist ja selle kaudu seadmete eluea lühenemist. Tuule keskvärtuse kiired muutused põhjustavad tuuleturbiinide märgatava erikaalu puhul energiasüsteemi võimsuste bilansi tasakaalust välja viimist ja kui jooksev reserv ei ole piisav, järgneb sellele sageduse (mittelubata!) muutus – energia kvaliteedi langus. Suure jooksva reservi hoidmine põlevkivielektri jaamades toob kaasa atmosfäärse saaste kasvamise ja elektri jaama kasuteguri languse (Oidram, 2000).

Tuule hetkkiiruse hälve

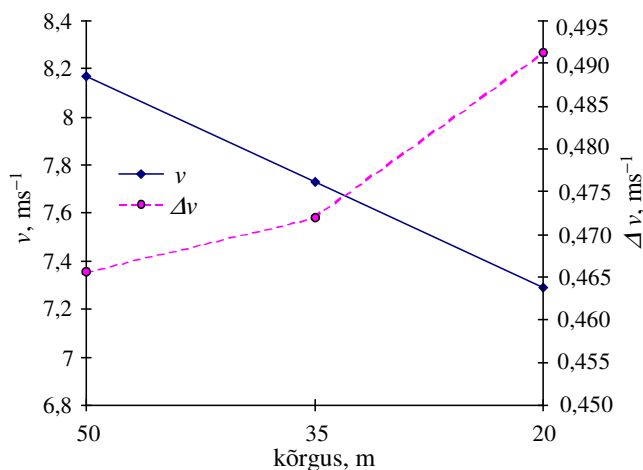
Tuule hetkkiiruse muutusi iseloomustab mingil määral tuule automaatmõõtejaamades registreeritav ruutkeskmise hälve.

Tuulekiiruse hälbe suurus sõltub kõrgusest ja tuule keskmisest kiirusest. Joonisel 6 esitatakse selle sõltuvus tuule keskmisest kiirusest Harilaiul 35 m kõrgusel ja Kihnus 27 m kõrgusel. Samalt jooniselt nähtub, et kõrgemal on tuul vähema hälbe tõttu stabiilsem. Suuremaid kui $v > 17 \text{ ms}^{-1}$ keskmisi tuulekiirusi esineb nii harva, et selles piirkonnas on raske hälbe seaduspärasusest rääkida. Madalamatel keskmistel on seos lähedal lineaarsele. Joonisel 7 esitatakse tuule keskmise kiiruse ja tema ruutkeskmise hälbe sõltuvus kõrgusest Harilaiu näitel. Madalamal esineb suurem hälve, mis johtub maapinna tuuletakistuse poolt esile kutsutud turbulentsist. Sama iseloom on ka Kihnus mõõdetud hälvetel, kus (2 vaatluskuu jooksul, mai–juuni 1999) 27 m kõrgusel keskmise kiiruse 6 ms^{-1} juures oli ruutkeskmise hälve $0,64 \text{ ms}^{-1}$ ja 10 m kõrgusel keskmise kiiruse $4,4 \text{ ms}^{-1}$ juures oli ruutkeskmise hälve $0,74 \text{ ms}^{-1}$.



Joonis 6. Tuule kiiruse ruutkeskmise hälbe sõltuvus tema keskmisest kiirusest Harilaiul 35 m ja Kihnus 27 m kõrgusel

Figure 6. Dependence of the rms deviation of wind velocity from its average speed on the isle of Harilaid at the altitude of 35 m and on the island of Kihnu at the altitude of 27 m



Joonis 7. Tuule keskmise kiiruse v ja selle ruutkeskmise hälbe Δv sõltuvus kõrgusest

Figure 7. Dependence of the average wind velocity v and its rms deviation Δv from the altitudes

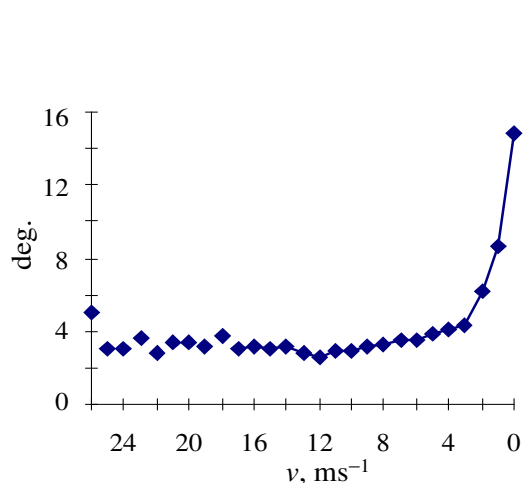
Asimuudi hälbed on tuule kiirusest vähe sõltuvad tuule keskmistel kiirustel $v > 7 \text{ ms}^{-1}$ ja suurenevad järsult, kui $v < 4 \text{ ms}^{-1}$ (joonis 8). Et Harilaiu automaatjaam on varustatud ainult ühe tuulesuuna anduriga, tuleb sõltuvust kõrgusest tutvustada Kihnu näitel, kus asimuudi ruutkeskmise hälbe vaatlusperioodi vältel oli 10 m kõrgusel $10,6^\circ$ ja 27 m kõrgusel $6,4^\circ$.

Et tuule automaatmõõtmisi on tehtud alles lühikest aega (Harilaiul alates 1995, Kihnus alates 1999), siis on toodud näited vaid orienteerivad. Meteoroloogiateenistus on pikki aastaid registreerinud “puhanguid”, milleks loetakse vaatluste kolmetunnises vahemikus registreeritud tuule maksimaalset hetkkiirust. Hindamaks, kui palju kasulikku informatsiooni võib puhanguist välja lugeda, töödeldi Kihnus paralleelselt 10 m kõrgusel 2 vaatluskuu jooksul (mai – juuni 1999) mõõdetud andmeid (automaatmõõtejaam ja traditsiooniline meteoroloogiajaam asuvad samas paigas 50 m vahega ja samades tingimustes). Selgus, et tuulekiiruse ruutkeskmise hälbe automaatmõõtmistel oli $0,74 \text{ ms}^{-1}$. Oletades, et hälvete jaotusseadus on normaalne, peaks maksimaalne tuule kiirus ületama vastava keskväärtuse $2,21 \text{ ms}^{-1}$ võrra. Registreeritud puhangute keskväärtus ületas registreeritud keskmise tuulekiiruse väärtuse aga $3,67 \text{ ms}^{-1}$ võrra. Seega kokkulangevus on küllalt halb ja registreeritud puhangute pikka rida on raske kasutada tuule dünaamiliste omaduste hindamiseks. Mittekokkulangevuse põhjus on mõistetav: meteoroloogilistel mõõtmistel tuule kiiruse keskväärtus määratakse mõõteperioodi (3 tundi) viimase kümne minuti järgi, puhang võib sellest ajast kuni kolme tunni võrra

nihutatud olla ning korrelatiivne side mõõdetud keskvaartuse ja puhangu ajal kehtiva tuule keskmise kiiruse vahel on nõrk.

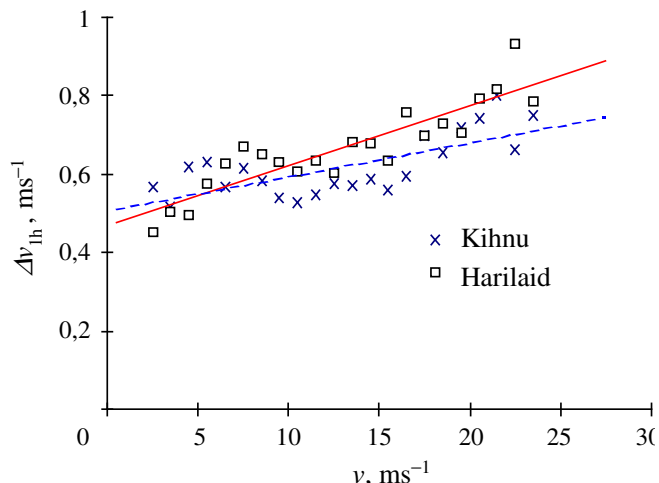
Tuuleturbiini võimsuse muut

Tuule kiiruse muut, s.o keskmise kiiruse muutus ühe tunni Δv_{1h} jooksul on lineaarselt, kuid nõrgalt, korreleeritud tuule kiiruse keskvaartusega (joonis 9).



Joonis 8. Tuule asimuudi ruutkeskmise hälbe sõltuvus tuule keskmisest kiirusest Harilaiul 35 m kõrgusel

Figure 8. Dependence of the rms deviation of the wind azimuth from its average speed on the isle of Harilaid at the altitude of 35 m



Joonis 9. Tuule kiiruse muut Δv_{1h} on nõrgalt (ja lineaarselt) korreleeritud tuule keskmise kiirusega v

Figure 9. The wind velocity increment Δv_{1h} is weakly (the linear correlation) correlated with the average wind velocity v

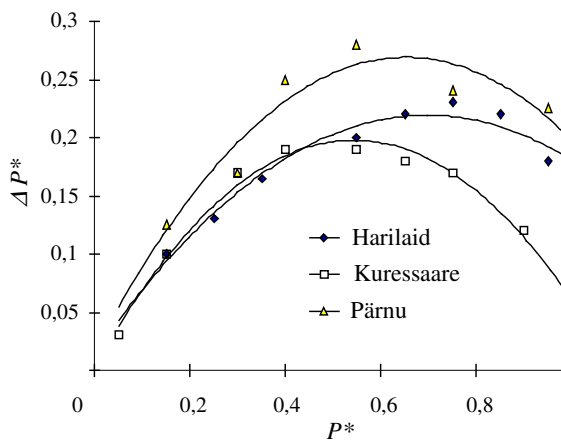
Ühetunnise muudu esiletõstmise tuleneb võimsuse muudu määratlusest, sest turbiini seob energiasüsteemiga mitte tuule kiirus, vaid tuule poolt arendatav võimsus.

Energiasüsteemi dispetšerteenistus prognoosib süsteemi võimsuste bilansi üks tund ette. Tuuleturbiinide võimsuse ühetunnine muut on leidnud ka seni teadustöös kasutamist (Drustewitz *et al.*, 1997) ja seepärast jääme selle juurde ning defineerime võimsuse muudu tuule poolt turbiinis arendatava suhtelise võimsuse (turbiini nimivõimsuse suhtes) muutusena ühe tunni vältel: $\Delta_{1h} = P^*(h+1) - P^*(h)$. Energiasüsteemi seisukohalt ei ole vahet, kas muut on negatiivne või positiivne – mõlemad tuleb “katta” süsteemi jooksva reservi arvelt. Harilaiu tuuleandmete töötlus näitas, et muutude jaotusseadus on samasugune nii positiivsete kui ka negatiivsete muutude jaoks ja seepärast opereerime analüüsil muudu absoluutväärtustega

$$\Delta_{1h} = \text{ABS} [P^*(h+1) - P^*(h)].$$

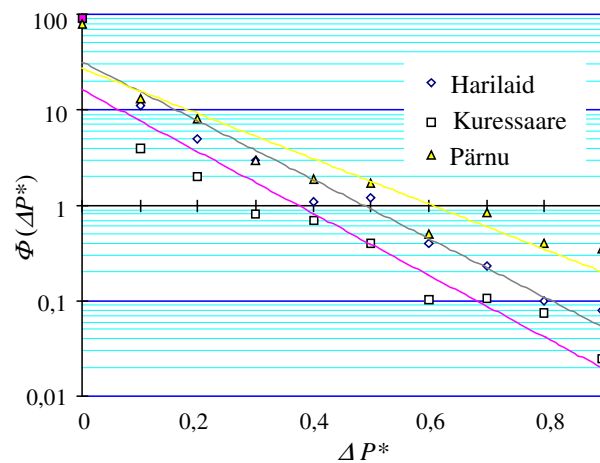
Tuuleturbiini karakteristiku aproksimatsioonist johtub, et tuule kiirustel $v < 4 \text{ ms}^{-1}$ ja $v > 12 \text{ ms}^{-1}$ arendatava võimsuse muut on $\Delta_{1h} = 0$. Muutude väärtus tuulekiiruste piirkonnas $4 < v < 7 \text{ ms}^{-1}$ on tühine, tuulekiiruste piirkonnas $8 < v < 12 \text{ ms}^{-1}$ muutub

võimsus (kasutatud aproksimatsiooni puhul) $\Delta P^* = 90\%$ võrra. Harilaiu, Kuressaare ja Pärnu asukohtade näitel (joonis 10) on suurimad keskmised võimsuse muudud turbiini võimsuste piirkonnas $0,5P^* - 0,75P^*$, mis vastab keskmise tuulekiiruse piirkonnale $10-11 \text{ ms}^{-1}$. Muutude sageduslik jaotus (ette kujutatavate) ühikvõimsusega turbiinide jaoks erinevates paikades on esitatud joonisel 11. Valdav osa (90%) muutust jääb tühiseks, $\Delta P^* < 0,1$, mis ei kujuta energiasüsteemile probleemi. Suuremate muutude piirkonnas $\Delta P^* > 0,2$ on muutude jaotusseadus (nende esinemise tõenäosus) hästi aproksimeeritav eksponentjaotusseadusega. Viimane lubab hinnata ka üksiku turbiini jaoks 100% muudu tõenäosust ühe tunni jooksul $\Phi(\Delta P^* = 100\%) = 0,01-0,1\%$. Et Harilaiu jaoks on olemas aastapikkune katkematu mõõtmiste rida, on võimalik aasta vältel esinevate 100% muutude arvu teoreetilist prognoosi $N_{\Delta} = 8640 \cdot 0,001 = 8,6$ võrrelda tegelikult esinenud 100% muutude arvuga $\mathcal{N}_{\Delta} = 7$, mis on üllatav (ja ühe näite põhjal vaid juhuslik?) kokkulangevus.



Joonis 10. Tuuleturbiini muudu sõltuvus tema tööpiirkonnast

Figure 10. Dependence of the power increment of a wind turbine from its operational range



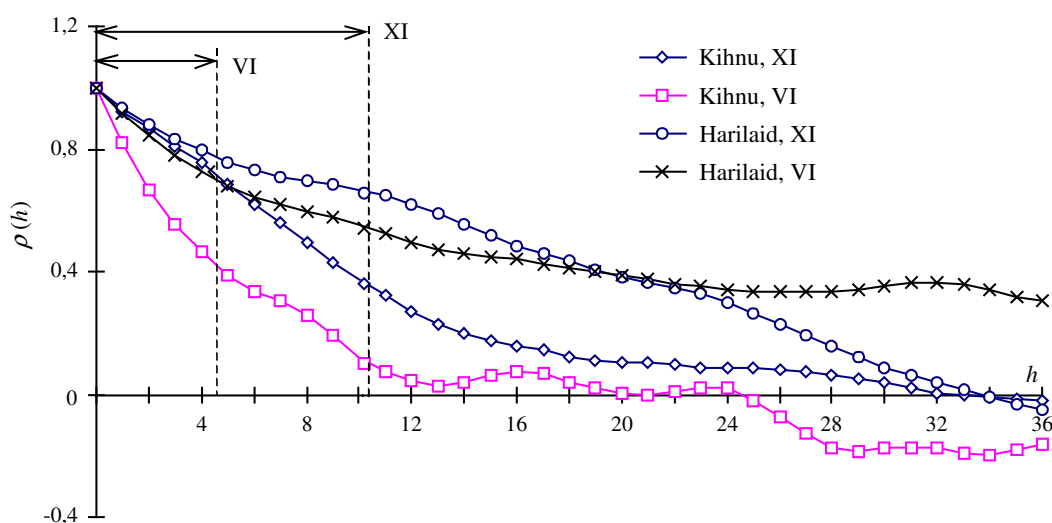
Joonis 11. Tuuleturbiini muudu jaotusseadus Harilaiul, Kuressaares ja Pärnus

Figure 11. Distribution rule of the wind turbine power increment on Harilaid, in Kuressaare and Pärnu

Tuule kiiruse stabiilsus ajas ja ruumis

Tuule kiiruse lühiaegset stabiilsust vaatasime juba hälvetena ja pikaajset stabiilsust vaatasime muutudena. Üldistatult saab tuule kiiruse stabiilsust uurida tema autokorrelatsioonifunktsiooni kasutades. Selleks käsitame tuule kiiruse andmebaasi juhusliku skalaarse¹ statsionaarse protsessina. Mittestatsionaarseks seda pidada ei saa, sest pikema aja vältel tema keskvaartus ei muutu, samuti ka mitte tema dispersioon. Et statsionaarsuse tingimus oleks mingi lõpliku ajaintervalli jaoks korrektselt täidetud, tuleb välja filtreerida tuule perioodiline komponent. Meie ülesannete jaoks, milles mõõteintervall (olenevalt andmetest) on 10 minutit kuni 3 tundi ja käsitatava andmebaasi pikkuseks on 1–5 kuud (kuni 10000 üksikmõõtmist), on perioodiline komponent kõrvaldatav trendina (Bendat ja Pirsol, 1974).

¹ Energiatoodangu mõttes ei ole tuule suunal tähtsust ja üldjuhul me sellele tähelepanu ei pööra. Autori märkus.



Joonis 12. Kihnu (KHN) ja Harilaidu (HRL) tuulekiiruse normeeritud autokorrelatsioonifunktsioonid 1999. a juunis ja novembris
 Figure 12. The normalized autocorrelation functions of wind velocity on Kihnu (KHN) and Harilaid (HRL) in June and November 1999

Tuule kiiruse autokorrelatsioonifunktsiooni esimene näide oli antud joonisel 4, kuid see oli “risustatud” perioodilise komponendi poolt. Mereliste paikade normeeritud autokorrelatsioonifunktsioonid on esitatud joonisel 12 juuni (VI) ja novembri (XI) jaoks. Kihnu jaoks on punktiirjoontega toodud ka korrelatsiooniajad (VI: 4,5 tundi ja XI: 10 tundi), mis ütleb seda, et talviti on tuul stabiilsem. Sama kehtib ka Harilaidu jaoks, mille korrelatsiooniaeg on nii pikk, et näitele pole seda kantud. Tulemus ühildub eespool väidetuga, et talviti on tuule kiirus suurem ja sellele vastavad ka vähemad hälbed. Ühtlasi kinnitab see seda, et *offshore* (meres paiknevad) turbiinid töötavad mitte ainult suurema ressursiga, vaid ka stabiilsemalt. Kas meres paiknevaid turbiine ka Eestisse soovitada võib, pole kaugeltki selge, sest jää rünnet pole veel uuritud.

Tuule (kahemõõtmelise) ruumilise stabiilsusena tuleb mõista seda, kuidas tuule omadused geograafilise nihutuse tingimustes muutuvad. Kui need ruumilise nihke (olgu piiki rannajoont) puhul vähe muutuvad, on hea ühe koha kohta saadud tulemusi teise paika üle kanda (ennustustäpsus tõuseb). Teiselt poolt pakub nihutatud turbiinide koostöö sama energiasüsteemiga summaarse võimsuse muudu vähendamise võimalust, kui tuule omadused erinevates asukohtades erinevad. Eeluurimise korras on seda vaadeldud Tomsoni ja Hanseni töödes (Tomson ja Hansen, 2000 b; Tomson, 2000), kuid paljud probleemid selles ainevallas vajavad veel täiendavat uurimistööd.

Kirjandus ☒ References

1. Бендат, Дж., Пирсол, А. (1974) Измерение и анализ случайных процессов. Мир. М.: 368.
2. Drustewitz, M. *et al.* (1997) Electrical Power from Widely-Dispersed Wind Turbines. Proc. of EWEC, Oct., Dublin Castle, Ireland: 743–746.

3. European Wind Atlas (1995) Vol. II: Measurements and Modelling in Complex Terrain. Risoe NL, Roskilde, Denmark: 361.
4. Oidram, R. (2000) Tuuleenergeetika võimalustest Eestis. Tallinna TÜ Aastaraamat 1999. Tallinn: 254–259.
5. Tomson, T. (2000) Tuule ja päikese energia kasutamisevõimalused Eestis. Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine. Esimese konverentsi kogumik. Tartu: 21–25.
6. Tomson, T., Hansen, M. (2000a) Wind Dynamics in the Moonsund Archipelago. Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., **6**, 1, 61–69.
7. Tomson, T., Hansen, M. (2000b) Performance of Wind Turbine Group. Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., **6**, 4, 268–277.

QUALITY OF WIND ENERGY

Teolan Tomson, Maire Hansen and Ants Nõva

Estonian Energy Research Institute, e-mail: teolan@anet.ee

Abstract

The characteristics of Estonian energy system and implemented wind turbines must be taken into account for the evaluation of the quality of the wind energy. The most significant quality factor is the energy resource of wind, but (periodical and random) changes of wind velocity must also be considered. For co-operation with the conventional power system, random dynamic properties of wind are essential, which include deviation of the instant velocity of wind and hourly changes of the average value expressed as power increment of a wind turbine. The stability of wind velocity in time and space can be investigated in a generalized way when treating wind velocity as a stationary random process to which the correlation analysis is applied.

TUULEENERGIA KONKURENTSIVÕIME JA CO₂ EMISSIOONIDE VÄHENEMISE ANALÜÜS EESTIS MUDELIGA MARKAL

Olev Liik¹, Markko-Raul Esop^{1,2}

¹ Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituut, Kopli 82, 10412 Tallinn
e-post: olev.liik@ttu.ee

² Säästva Eesti Instituut (SEI-Tallinn), Lai 34, Postkast 160, 10502 Tallinn
e-post: raul@seit.ee

Annotatsioon

Käesolev uurimus on osa Eesti Teadusfondi grandiprojektist G4276 "Tuulegeneraatorite kasutamise võimalused ja efektiivsus Eestis". Eesmärk oli välja selgitada tuuleenergeetika konkurentsivõime tingimused subsideerimise puudumisel. Kuigi maailma senine praktika näitab, et ilma majanduslike soodustusteta tuuleenergiat kasutusele ei võeta, on vastav uuring vajalik nõutavate toetuste suuruse hindamiseks tasuvus- ja tegelike tingimuste võrdlemise teel. Lähemalt uuriti tuulegeneraatorite investeeringukulude ja süsinikdioksiidi maksu mõju. Vaadeldi tulevikku kuni 35 aastat ette. Arvutused viidi läbi Rahvusvahelise Energiaagentuuri energeetika, majanduse ja keskkonna kompleksse pikaajalise planeerimise mudeliga MARKAL, kasutades TTÜ elektroenergeetika instituudis väljatöötatud andmebaasi. Vaadeldi kolme tuulegeneraatori varianti sõltuvana asukohast: rannikul heades tuuletingimustes, rannikul parimates tuuletingimustes ja rannikumeres. Tulemused näitavad, et rannikul parimates tuuletingimustes olevate generaatorite puhul tagaks konkurentsivõime investeeringukulu tasemel 44–69% 2000. a investeeringu maksumusest, heades tuuletingimustes olevate tuulikute puhul vastavalt 31–50% ja rannikumerre ehitatud tuulikute korral 27–37% 2000. a investeeringu maksumusest. Tegelike investeeringukulude juures peaks lähitulevikus tuulegeneraatorite tasuvuse saavutamiseks tõstma CO₂-maksu vähemalt tasemeni 100 USD/t_{CO2}.

ENERGIASÜSTEEMI PIKAAJALINE PLANEERIMINE, MARKAL MUDEL, TUULEGENERAATORID, INVESTEERINGU MAKSUMUS, NIMIVÕIMSUSE KASUTUSTEGUR, CO₂-MAKS JA EMISSIOONID

Ülesande püstitus

Uurimistöo on osa Eesti Teadusfondi grandi projektist G4276 "Tuulegeneraatorite kasutamise võimalused ja efektiivsus Eestis" ja tema eesmärk oli välja selgitada tuuleenergeetika konkurentsivõime riikliku subsideerimise puudumisel. Rahvusvahelised kogemused ja senised arvutused energiasüsteemi pikaajalise arengu optimeerimise mudeliga MARKAL (Fishbone ja Abilock, 1981; Fishbone jt, 1983) on näidanud, et ilma majanduslike soodustusteta tuuleenergiat kasutusele võtta ei õnnestu. Tuuleelektrijaamad ei ole reeglina konkurentsivõimelised. Konkurentsivõimet suurendaks ühelt poolt madalam investeeringu hind koos kõrgema toodetud elektri ostuhinnaga ja teiselt poolt fossiilsetel energiaallikatel põhinevaid tehnoloogiaid kallimaks tegevad keskkonnamaksud ja kõrgem kütuse hind. On selge, et uute investeeringute ja muude tegurite mõjul tulevikus Eestis elektri hind tõuseb, kuid samal ajal väheneb ka tuulegeneraatoritega saavutatav keskkonnasääst, sest uued tehnoloogiad saastavad oluliselt vähem.

Pika aja jooksul arenevad ja muutuvad odavamaks ka teised praegu kallid taastuvenergia tehnoloogiad, saades omakorda konkurendiks tuuleenergiale. Käesolevas töös uuriti lähemalt investeringukulude ja süsinikdioksiidi maksu mõju tuulikute konkurentsivõimele.

Lähtetingimused

Kuna energiasüsteem pidevalt areneb, siis on mõistlik tulevikku suunatud arvutusi teha ainult kompleksse optimeeriva mudeliga. Nagu eespool mainitud, kasutati käesolevas töös Rahvusvahelise Energiaagentuuri (IEA) mudelit MARKAL, mis vaatleb tehnilist energiasüsteemi seoses keskkonna ja majandusega. Optimeerimise sihifunktsiooniks on summaarsete kulude miinimum üle kogu planeerimishorisondi (meie töös 35 aastat). Mudel otsib parimat lahendust etteantud energiakandjate ja tehnoloogiate valiku raames, arvestades energiatarbe, kütusehindade ja muude kulude prognoose ning keskkonna- ja majanduspiiranguid. Muutes kulude prognoose, seadmete valikut või mitmesuguseid piiranguid, on võimalik "läbi mängida" mistahes energeetika arengutsenaariume.

Mudelarvutustes kasutati Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudi andmebaasi, mille detailse kirjelduse võib leida raamatust (Kallaste jt, 1999).

Kuna riigimaksud (nt käibemaks) ja subsiidiumid mõjutavad küll tarbija tariife, kuid ei kujuta endast reaalseid kulutusi makromajanduse tasandil, siis arvestati arvutustes ainult tootmiskulusid ja keskkonnamakse. Kahjuks puudusid andmed sotsiaalsete kulude kaasamiseks.

Antud töös ei võetud arvesse tuulegeneraatorite võimsuse kiire muutumise tasakaalustamiseks soojuselektrijaamades tehtavaid kulutusi, samuti ei arvestatud muutusi elektrivõrgu kadudes ja tuulegeneraatorite põhjustatud probleeme elektrivõrgus. MARKAL võimaldab keskkonnamõjusid arvutada vaid lineaarselt, välistades sellega tuuleenergiat tasakaalustavate soojusjaamade "hüstereesist" tingitud lisaemissioonide arvestamise (Oidram, 2000).

Vaadeldi kolme tuulegeneraatori (tuuliku) varianti (vt tabel 1):

- variant 1 – tuulikud rannikul heades tuuletingimustes,
- variant 2 – tuulikud rannikul parimates tuuletingimustes,
- variant 3 – tuulikud rannikumeres.

Heade tuuletingimustega piirkondades võeti tuulikute aastase kasutustegurini väärtuseks 0,24, mis on ekvivalentne nimivõimsusel töötamise ajaga 2100 h/a. Ebareaalsete tulemuste välistamiseks eeldati, et aastal 2005 võib summaarne elektritoodang olla kuni 3 PJ ja aastal 2030 kuni 10 PJ.

Parimate tuuletingimustega piirkondade tuulikute aastaseks kasutusteguriks võeti 0,3, st aastas toodetud energia võrduks nimivõimsusel töötamisega 2686 tunni jooksul. Eeldati, et selliseid tuulikuid saab ehitada summaarse võimsusega kuni 100 MW.

Rannikumere tuulikute aastane kasutustegur valiti 0,35, st nimivõimsusel töötamise aeg on 3066 h/a. Eeldati, et selliseid tuulikuid saab ehitada samuti summaarse võimsusega kuni 100 MW.

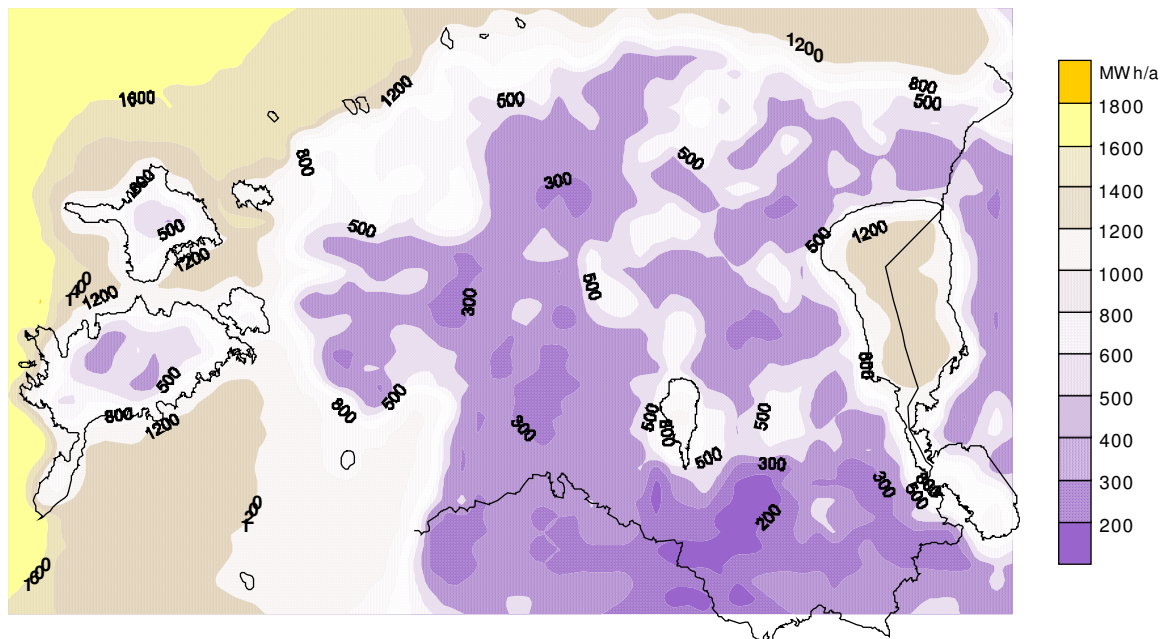
Tabel 1. Tuulegeneraatorite tehnilis-majanduslikud näitajad
Table 1. Technical parameters of wind generators

	Variant 1	Variant 2	Variant 3
Investeeringu hind, kr/kW	16 000	16 000	30 000
Aastased käidukulud, kr/kW	250	250	350
Nimivõimsuse kasutustegur	0,24	0,3	0,35

Mudelis eeldati, et planeerimisperioodi jooksul tuulikute hind langeb järgmiselt:

tuulikud maal 16 000 → 12 000 kr/kW,
 tuulikud meres 30 000 → 20 000 kr/kW.

Joonisel 1 on esitatud firma Bonus 450 kW võimsusega tuuleturbiini potentsiaalse elektritoodangu väärtused (MW·h/a) Eestis. (Kull, 1996). Sellise tuuliku puhul vastab kasutusteguri väärtusele 0,24 elektritoodang 947 MW·h/a, väärtusele 0,3 elektritoodang 1183 MW·h/a ja väärtusele 0,35 elektritoodang 1380 MW·h/a.



Joonis 1. Potentsiaalne aastane elektritoodang (MW·h) Bonus 450 kW võimsusega tuuleturbiiniga (Kull, 1996)

Figure 1. Potential annual electricity production (MW·h) with Bonus 450 kW wind turbine (Kull, 1996)

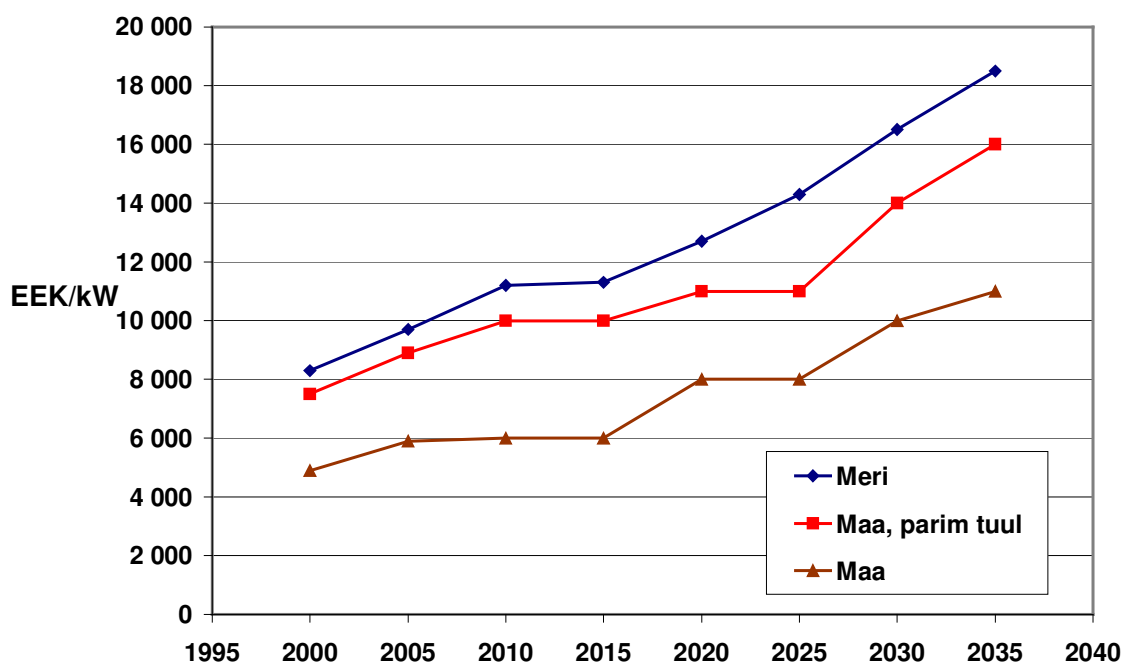
Jooniselt 1 võib näha, et parimad tuulikute asukohad eriti soodsate tuuletingimustega on Lääne-Eesti saarestikus, Sõrve poolsaarel, Vilsandil, Kõpu poolsaarel, Loode-Eesti rannikul, Paldiski poolsaarel, Pakri saartel ja Osmussaarel. Märkimisväärne on tuulepotentsiaal ka Peipsi järvel. Nendes piirkondades oleks otstarbekas kasutada võimsamaid 1 kuni 2 MW tuulikuid, kuna tuuletingimuste territoriaalsed erinevused potentsiaalse kasutusteguri ja elektritoodangu seisukohalt tulevad esile just võimsamate tuuleturbiinide korral.

Senitehtud MARKAL-lahendustes tuulegeneraatoreid kasutusele ei võetud eeskätt toetuste puudumise, madalate keskkonnamaksude, pessimistliku investeeringute erikulu prognoosi ja tuuletingimuste vähese diferentseerituse tõttu mudelis.

Konkurentsivõime sõltuvus investeeringu maksumusest

Uurides tuulegeneraatorite investeeringu erikulu mõju nende konkurentsivõimele, tuleb arvestada, et erinevatel ajahetkedel on tasuvust tagav erikulu suurus erinev, sest energiasüsteem muutub pidevalt. Antud töös seati eesmärgiks määrata suurim konkurentsivõimet tagav erinvesteeringu väärtus iga planeerimise alamperioodi (5 aastat) jaoks. On selge, et mida kõrgemale tõuseb elektri tootmise marginaalkulu süsteemis, seda suurem võib turule pääsemiseks olla tuulegeneraatorite investeeringukulu. Sama seos kehtib ka tuuletingimuste jaoks – mida paremad need on, seda kallim tuulik võib olla.

Joonisel 2 on toodud tuulegeneraatori teiste tehnoloogiatega edukat konkureerimist võimaldava suurima investeeringukulu sõltuvus generaatori asukohast ja ehitusaastast ilma maksude ja elektri müügihinna soodustuseta.



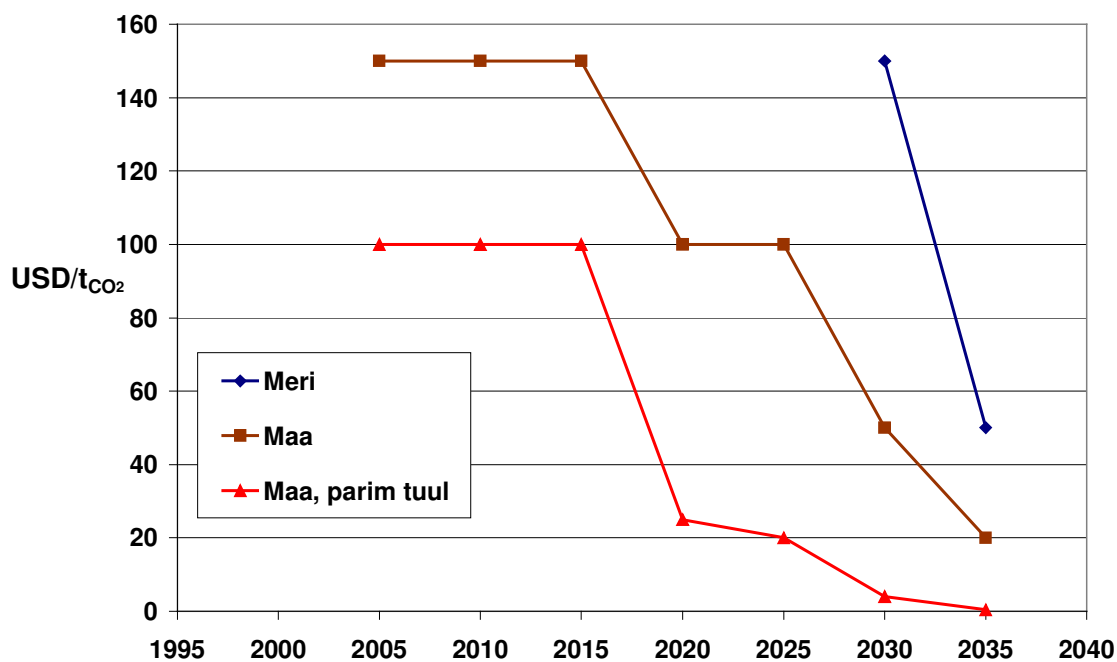
Joonis 2. Konkurentsivõimelise tuulegeneraatori suurim investeeringu maksumus
 Figure 2. Maximum investment cost of competitive wind turbines

Konkurentsivõime sõltuvus CO₂ maksu suurusest

Oluline tuulegeneraatorite konkurentsivõimet suurendav tegur on CO₂ maks, mis muudab kallimaks fossiilkütustest toodetud elektri. Tõstes CO₂ maksu piisavalt kõrgele, on võimalik tagada tuulikute turuletulekut ka ilma nende investeerimiskulusid või toodangut subsideerimata. Energiasüsteemi pideva muutumise tõttu on tuulikute konkurentsivõimet tagava maksu suurus erinevatel ajaperioodidel erinev.

Antud töös rakendati CO₂-maksu vahemikus 0.38–200 USD/t_{CO2} kusjuures 0.38 USD/t_{CO2} = 5 EEK/t_{CO2} on kehtiv süsinikdioksiidi-maks Eestis 2000. aastal (Riigi Teataja, 1999).

Joonisel 3 toodud graafikud iseloomustavad minimaalset CO₂ maksu suurust, mis võimaldaks tuulegeneraatoritel konkureerida teiste elektrijaamadega ilma subsidiiumiteta sõltuvana generaatori asukohast ja ehitusaastast. Tuulikute tasuvuseks vajaliku CO₂ maksu suurust võib vaadelda kui ühe tonni CO₂ vähendamise hinda tuulegeneraatorite abil.



Joonis 3. CO₂ maksu tase, mille juures tuuleenergia muutub konkurentsivõimeliseks
 Figure 3. CO₂ tax level necessary for the competitiveness of wind turbines

CO₂ emissioonide vähenemine

CO₂ emissioonide vähenemise hindamiseks tuleb võrrelda tuulegeneraatoreid sisaldavaid ja mittesisaldavaid, kuid muudelt tingimustelt identseid mudelarvutusi. Arvutused näitavad, et aastal 2010 vähendaks rannikul heades tuuletingimustes ülesseatud 50 MW koguvõimsusega tuulikuid energiasüsteemist lähtuvat CO₂ emissiooni 0,11 Mt ja aastal 2025 vähendaks 150 MW koguvõimsusega tuulikuid rannikul ja 150 MW rannikumeres CO₂ emissiooni 1,0 Mt võrra. Erinevate CO₂ emissiooni vähendamise meetmete analüüsi võib leida raamatust (Kallaste jt, 1999) ja artiklist (Esop ja Liik, 1998).

Järeldused

Rannikul parimates tuuletingimustes olevate generaatorite puhul on vajalik, et investeeringukulu langeb tasemeni 7000 kuni 11 000 kr/kW muutmaks nad konkurentsivõimeliseks.

Konkurentsi tagamiseks peaks rannikul heades tuuletingimustes olevate generaatorite investeringu maksumus langema tasemeni 5000 kuni 8000 kr/kW.

Rannikumerre ehitatud tuuliku erinvesteering peaks lähiaastatel olema vahemikus 8000 kuni 11 000 kr/kW.

Juhul kui tuulega toodetud elektri müüki elektrivõrku ei subsideerita, tuleks tuulegeneraatorite kasutuselevõtuks 2000. aastal nende ehitamist toetada 5000 kuni 8000 kr/kW ulatuses. Seega 1 MW-se võimsusega tuuliku rajamist tuleks toetada kuni 8 miljoni krooniga.

Vähemalt 100 USD/t_{CO₂} suurune CO₂ maks võimaldaks lähitulevikus turule tuua rannikul parimates tuuletingimustes olevad generaatorid ja maksu muutus avaldab kuni 2015. aastani vähe mõju. Alates 2020. a väheneb maksu vajalik suurus 25 USD-ni ja jätkab langust nullini. Analooogne tendents iseloomustab ka teistes tuuletingimustes asuvaid generaatoreid.

Eesti majandusliku olukorra seisukohalt tundub praegu 100 USD suurune CO₂ maks utopia, kuid arvestades järjest rangemaks muutuvaid keskkonnanõudeid kogu maailmas ja Eesti tõenäolist astumist lähiaastatel Euroopa Liitu võib see number osutada reaalsuseks oodatust oluliselt varem.

Kokkuvõttes võib öelda, et aeg töötab Eestis tuulegeneraatorite kasutuselevõtu kasuks: energiasüsteemi arenguks tehtavad investeringud tõstavad elektri hinda, fossiilkütuste hinnad ja keskkonnamaksud suurenevad, tuulikute hinnad alanevad ning nende tehnilised näitajad paranevad. Ka teised muudatused energiasüsteemis, eriti kiirelt reguleeritavate gaasiturbiinide rajamine, peaksid tuulikute turuletulekut lihtsustama. Tuulikute võimsuse järske muutusi kompenseerivate hüdrojaamade puudumine Eestis vähendab siiski oluliselt võimalikku keskkonnasäästu ning kui arvestada ka elektrivõrgu ülesehitust, eriti selle väikest läbilaskevõimet tuulerikastes piirkondades, siis tehnilistest ja majanduslikest probleemidest tuuleenergia rakendamisel puudu ei tule.

Kirjandus ✕ **References**

1. Esop, M.-R., Liik, O. (1998) Analysis of CO₂ emission reduction options in the Estonian energy system. *Baltic Electrical Engineering Review* 1(7). Vilnius Electrical Engineering Centre Inc.: 59–69.
2. Fishbone, L. G. and Abilock, H. (1981) MARKAL, a linear-programming model for energy system analysis: Technical description of the BNL version. *Int. Journal of Energy Research* 5(4): 353–375.
3. Fishbone, L. G., Giesen, G., Goldstein, G., Hymmen, H. A., Stocks, K. J., Vos, H., Wilde, D., Zölcher, R., Balzer, C. and Abilock, H. (1983) *User's Guide for MARKAL*. (BNL-51701). Brookhaven National Laboratory, Upton, New York: 227.
4. Kallaste, T., Liik, O., Ots, A. (editors) (1999) *Possible Energy Sector Trends in Estonia. Context of Climate Change*. SEI-Tallinn, Tallinn Technical University, Tallinn: 190.
5. Kull, A. (1996) *Eesti tuuleatlas*.
6. Oidram, R. (2000) *Tuuleenergeetika võimalikkusest Eestis*. Tallinna Tehnikaülikooli aastaraamat 1999. TTÜ kirjastus, Tallinn: 254–259.

7. Riigi Teataja. (1999) Saastetasu seadus. I osa, Nr. 24, Art. 361. Tallinn: 1591–1601.

WIND ENERGY COMPETITIVENESS AND THE ANALYSIS OF REDUCTION OF CO₂ EMISSION IN ESTONIA ACCORDING TO THE MODEL MARKAL

Olev Liik¹, Markko-Raul Esop^{1,2}

¹Department of Electrical Power Engineering, Tallinn Technical University
e-mail: olev.liik@ttu.ee

²Estonian Institute for Sustainable Development, e-mail: raul@seit.ee

Abstract

Current work is a part of a comprehensive study “Possibilities and efficiency of the use of wind generators in Estonia” financed by Estonian Science Foundation grant G4276. Aim of the work was to examine wind power competitiveness while no subsidizing is allowed. Although current world experience on wind power shows that without economical support it is not viable (is off the market), this type of research is needed to evaluate the financial support needed. Wind turbines investment cost and tax on CO₂ emissions were studied closer. Forecast period was 35 years. Calculations were made with long-term energy system planning model MARKAL (International Energy Agency model). The database developed at the department of electrical power engineering of Tallinn Technical University was used. Three wind turbine location dependent options were investigated: good wind conditions on coastline, the best wind conditions on coastline and wind turbines on coastal sea area. The results show that wind turbines located in the best wind conditions on coastline can guarantee competitiveness with 44–69% (level) investment cost when compared to year 2000. The same figures for good wind conditions and offshore wind turbines are 31–50% and 27–37%, respectively. To maintain current investment cost level of wind turbines the CO₂ emission tax should raise to the level of 100 USD/ t_{CO2} in the near future.

VESINIKU SAAMISVÕIMALUSED, SALVESTAMINE JA KASUTAMINE LOODUSESÕBRALIKUS ENERGEETIKAS

Jüri Tamm

Tartu Ülikool, Jakobi 2, 51014 Tartu, e-post: tamm@chem.ut.ee

Annotatsioon

Vesinik on üks kõige perspektiivsemad energia salvestamise ja transportimise vahendeid. Teda võib võrrelda elektrienergiaga, kuid tal on ka üks oluline eelis, teda saab salvestada suurtes kogustes ning seejärel kasutada vastavalt vajadustele. Vesiniku elektrokeemiline tootmine võimaldab edukalt kasutada mittepidevaid energiaallikaid nagu tuul ja päikesekiirgus. Kui rajada energiasüsteem, mis koosneb tuulegeneraatoritest, elektrolüüseritest, vesiniku salvestamise vahenditest ja kütuselementidest, on võimalik saavutada kõrge autonoomsuse aste nii elektri- kui soojusenergiaga varustamises.

VESINIK, ELEKTROLÜÜS, KÜTUSELEMENT

Sissejuhatus

Perspektiivsete taastuvate energiaallikate eesotsas on kahtlemata tuule- ja päikeseenergia. Tegelikult on kõik taastuvad energiaallikad Päikese poolt tekitatud. Kahjuks on nii tuule- kui Päikese energia mittepideva toimega energiaallikad. Seetõttu on nende kasutamine mõnevõrra piiratud, seni kuni ei ole leitud efektiivseid energia salvestamise meetodeid. Üheks kõige perspektiivsemaks energia salvestamise ja ka transportimise vormiks tuleb lugeda vesinikku (Rossmeissl ja Waltemath, 1996).

Kui räägitakse vesinikust, tekivad inimestel vägagi erinevad seosed, mis on tingitud eelnevatest teadmistest ja kogemustest. Üldiselt teatakse, et vesinik on kõige kergem gaas, vesinik moodustab hapnikuga (õhuga) kergesti plahvatava segu (paukgaasi). Mõnigi on kuulnud, et tänapäeval kasutatakse laialdaselt uudseid vooluallikaid (akusid), nagu nikkelhüdriidakud.

Miks ikkagi vesinik? Vesinik on kõige keskkonnasõbralikum kütus. Tema põlemisel tekib vaid vesi:



Seejuures ei teki süsihappegaasi (süsinikdioksiidi CO_2), mida tänapäeval süüdistatakse Maa temperatuuri tõstmises, ega ka vingugaasi (süsinikmonooksiidi CO), mis tekib süsinikku sisaldavate kütuste (kivisüsi, põlevkivi, turvas, puit, nafta ja naftasaadused) mittetäielikul põlemisel. Ühe kilogrammi vesiniku põlemisel eraldub 120–143 MJ energiat (olenevalt tekkiva vee agregaatolekust), mis on oluliselt rohkem kui näiteks bensiini 40–45 MJ, kivisöe ≈ 30 MJ või puidu 15 MJ põletamisel. Seega on vesinik ideaalne kütus! Kahjuks vesinikku looduses vabal kujul ei leidu. Teda tuleb toota. Selles mõttes on ta sarnane elektrienergiaga. Mõlemad toodetakse ja transporditakse kaugete maa taha. Kuid vesinikul on elektrienergia ees üks väga oluline eelis – teda on võimalik koguda suures koguses. Elektrienergiat teatavasti saab salvestada ainult kondensaatorites, kõik teised salvestamise meetodid sisaldavad elektrienergia muundamist

mõneks teiseks energia vormiks, näiteks keemiliseks energiaks akudes. On avaldatud arvamust, et 21. sajand kujuneb vesinikusajandiks – vesiniku osakaal energia salvestajana ja ülekandjana kasvab niivõrd, et tema kasutamise ulatus muutub võrreldavaks elektrienergia kasutamisega.

Vesiniku saamine

Tänapäeval kasutatakse tööstuses mitmeid vesiniku saamismeetodeid. Kõige levinum on vesiniku tootmine maagaasist protsessis, mida nimetatakse konversiooniks:



ja metaani osalisel oksüdeerimisel:



Kusjuures tekkiv CO muudetakse CO₂-ks reaktsiooni (Cloumann *et al*, 1996) abil. Toodud võrranditest on näha, et mõlema protsessi tulemusena tekib lisaks vesinikule ka CO₂.

Väga head puhast vesinikku saadakse vee elektrolüüsil leelises keskkonnas:



Katoodil eraldub vesinik:



ja anoodil hapnik:



See vesiniku saamise meetod on kõige keskkonnasõbralikum ja väga sobilik elektrienergia salvestamiseks (Kreuter ja Hofmann, 1996, Cloumann *et al*, 1996). Tänapäeval valmistatakse väga erinevaid elektrolüüsereid, mis võivad töötada mitte ainult pidevas, vaid ka perioodilises režiimis. Seega on elektrolüüserit võimalik toita nii päikesepatareide kui tuulegeneraatorite poolt toodetava elektriga. Meie tingimustes oleks kõige sobivam rakendada elektrolüüserid tööle tuulegeneraatorite poolt toodetava elektrienergiaga niisuguse skeemi kohaselt, et kui tuult on piisavalt palju, siis osa elektrienergiast suunatakse vesinikku (ja hapnikku) tootvatele elektrolüüseritele ja tuule puudumisel kasutatakse toodetud ja salvestatud vesinikku uuesti elektrienergia tootmiseks.

Vesiniku salvestamine

Vesinik on väga kerge gaas ja tema kogumiseks ja säilitamiseks tuleb ta kokku suruda võimalikult väikesesse ruumalasse. Kõige lihtsam ongi mitmesuguste survemahutite (näiteks balloonide) kasutamine, milles vesinik on kokku surutud rõhuni 150 atm. Teiseks võimaluseks on vesiniku veeldamine. Vedel vesinik võtab muidugi palju vähem ruumi, kuid tema säilitamiseks on vajalikud väga hea soojusisolatsiooniga mahutid, sest vedel vesinik keeb juba –252,6 °C (20,5 K) juures. Sellele vaatamata on veeldatud vesinik leidnud kasutamist mitte ainult hinnatud raketikütusena, vaid ka mitme-

tes tootmisharudes. Viimastel aastatel on väga intensiivselt tegeldud vesiniku salvestamise suhteliselt uudses vormis – hüdriididena. Hüdriidid on vesiniku ühendid teiste keemiliste elementidega ja nii võib hüdriidideks nimetada ka vett H_2O , metaani CH_4 jne. Enamasti mõeldakse hüdriidide all siiski vesiniku ühendeid metallidega (M):

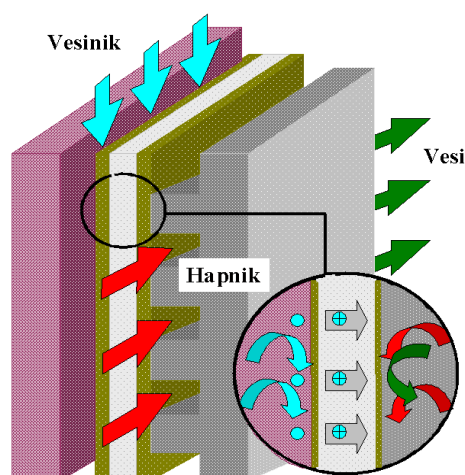


Vesiniku salvestamise seisukohalt on väga oluline, et metallhüdridi moodustumine ja lagunemine vesiniku vabastamisega oleks võimalikult pöörduv. Sel juhul on võimalik suhteliselt väikese lisarõhuga tekitada hüdriid ja rõhku alandades jällegi saada vaba vesinik. Tänapäeval toimuvad selles valdkonnas väga intensiivsed uuringud ja nagu teada, on tulemused juba käesoleval ajal paljulubavad – mobiiltelefonides ja portatiivsetes arvutites kasutatavad akud on enamasti nikkel-metallhüdriidakud. Siiski ei ole õige väita, et kõik probleemid on lahendatud. Näiteks elektriautodes, mis töötavad vesinikuga, oleks ideaalseks vesiniku transportimise viisiks just hüdriidne vorm, kuid käesoleval ajal on vastavad seadmed küllaltki rasked ja vägagi kallid.

Vesiniku kasutamine

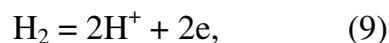
Vesinikku võib kasutada mitmeti. Kõige lihtsam on tema põletamine. Vesinik-hapnik põleti annab väga kõrge temperatuuri – kuni $2800\text{ }^\circ\text{C}$, mis on hästi kasutatav paljude metallide tootmisel ja sulatamisel. On tehtud ettepanekuid kasutada vesinikku segus maagaasiga nii majapidamises kui tööstuses. Vesinikku saab vägagi edukalt kasutada sisepõlemismootorites (autodes) bensiini asemel. Viimastel aastatel tehtud uuringud näitavad, et selleks ei ole vaja teostada olulisi ümberehitusi automootorites, tuleb vaid kasutada teistsuguseid kütuse (vesiniku) silindrisse sisseviimise süsteeme. Vesinikuga töötav automootor on ökoloogiliselt puhas – ei teki CO_2 ega CO , ainult vesi! Kõige perspektiivsem on muidugi vesiniku kasutamine kütuselemendis elektrienergia tootmiseks.

$H_2 - O_2$ kütuselement on elektrokeemiline seade, mis muudab vesiniku ja hapniku keemilise energia elektrienergiaks (ja osaliselt soojuseks). Kütuselemendi põhimõttelist ehitust illustreerib joonis 1.

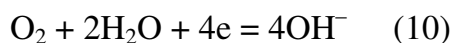


Joonis 1. Kütuselemendi skeem
Figure 1. Scheme of fuel cell

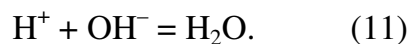
Kütuselemendis toimub samuti vesiniku põletamine (reaktsioon 1), kuid see protsess on jagatud kahte ossa – ühel elektroodil toimub vesiniku ionisatsioon,



ja teisel elektroodil hapniku ionisatsioon:



Moodustunud vesinik- ja hüdroksiidioonid saavad kokku elektroodide vahel olevas elektrolüüdikihis ja ühinevad veeks:



Seega saame vesiniku ja hapniku reageerimisel vee, kuid lisaks sellele ka elektrienergiat.

Kütuselemente jagatakse töötemperatuuri alusel kolme liiki: madalatemperatuurilised – kuni 120 °C; kesktemperatuurilised 200–500 °C ja kõrgetemperatuurilised 500–1200 °C. Madalatemperatuuriliste kütuselementide erinevate mudelite seas on kõige suurema huvi objektiks polümeermembraaniga kütuselement (DEMFC), milles elektrolüüdi rolli täidab prootonjuhtivusega polümeerne elektrolüüt. Seda tüüpi kütuselementi eeliseks on väga suur kompaktsus ja puuduseks materjalide kõrge maksumus, sest happelise keskkonna tõttu saab elektroodina kasutada ainult platinarühma metalle ja nende sulameid.

Kõrgetemperatuurilised kütuselemendid töötavad samuti tahke elektrolüüdiga, kuid nüüd on selleks ioonjuhtiv oksiidse loomusega membraan, mis on juhtiv ainult kõrgetel temperatuuridel. Kõrgetemperatuuriliste kütuselementide kasutust seostame eelkõige elamute varustamisega elektri ja soojusega.

Kütuselementide uuringutesse on viimastel aastakümnetel investeeritud suured vahendid, kuid suuremaks saavutuseks tuleks märkida vaid USA kosmoselaevade elektrivarustuse süsteemi, mis baseerub polümeermembraaniga H₂ – O₂ kütuselementidel, ja katseliselt toodetavaid süsteeme autodele ja ka elamutele nende varustamiseks elektri ja soojaga.

Lähitulevikus on loota edu eelkõige kahel suunal, mobiilsed süsteemid (autotransport), mis võimaldavad vähendada linnade saastatust autode heitgaasidega; ja statsionaarsed süsteemid üksikute majade kui ka majade gruppide varustamiseks nii elektri kui soojaga. Eestis tuleks luua pilootsüsteem, mis kasutaks tuuleenergiat. Põhisõlmed oleks järgmised: tuulegeneraator – elektrolüüser – vesiniku salvesti – kütuselement. Niisugune kompleks võimaldaks katsetada mitmesuguseid vesinikuenergeetikaga seotud seadmeid, omandada vajalikke teadmisi ja oskusi ning olla valmis, kui saabub aeg, evitada vesinikku laialdaselt nii energeetikas kui igapäevases elus.

Kirjandus **References**

1. Cloumann, A., d'Erasmus, P., Nielsen, M., Halvorsen, B. G., Stevens, P. (1996) Analysis and optimisation of equipment cost to minimise operation and investment for a 300 MW electrolysis plant, in Hydrogen Energy Progress XI, Volume 1. Frankfurt: 143–152.
2. Kreuter, W., Hofmann, H. (1996) Electrolysis: The important energy transformer in a world of sustainable energy, in Hydrogen Energy Progress XI, Volume 1. Frankfurt: 537–548.
3. Rossmeissl, N. P., Waltemath, L. A. (1996) The United States Department of Energy Hydrogen Program, in Hydrogen Energy Progress XI, Volume 1. Frankfurt: 27–35.

POSSIBILITIES OF PRODUCTION, STORAGE AND APPLICATION OF HYDROGEN IN NATURE-FRIENDLY ENERGETICS

Jiiri Tamm

University of Tartu, e-mail: tamm@chem.ut.ee

Abstract

Hydrogen will turn in the nearest future in to one of the most important sources of storage and transport of energy. Hydrogen as an energy carrier is comparable to electricity – both can be produced and used in different places. But hydrogen has one very essential privilege, differently from electricity it is possible to store hydrogen in a great amount and use later in various places. Hydrogen is the environmentally cleanest fuel as the only product of the combustion of hydrogen is water.

One of the best ways to ensure the environmentally friendly, technologically advanced and cost efficient production of energy is to develop the system including wind energy generators, electrolyzers, hydrogen storage systems and fuel cells.

KOMPLEKSSE SÜSTEEMI LOOMINE KURESSAARE LINNALE ELEKTRI-, KÜTTE- JA SOOJA VEE TOOTMISEKS TAASTUVATE ENERGIAALLIKATE ABIL

Lars Mach¹ ja Valdur Tiit²

¹ Renewable Energy Group OÜ, Lai 31, 10133 Tallinn, e-post: Lars.Mach@web.de

² Eesti Põllumajandusülikool, Kreutzwaldi 56, 51014 Tartu, e-post: vtiit@eau.ee

Annotatsioon

Käsitletakse võimalust ehitada Kuressaare linna elektri ja soojusega varustamiseks kompleksne süsteem, mis baseerub taastuvate energiaallikate kasutamisel. Saaremaal on küllaldased looduslikud ressursid ettepaneku realiseerimiseks.

TUULEGENERAATOR, PÄIKESEPANEEL, BIOKÜTUS, VESINIK

Kaasaegne ühiskond tarbib väga suurtes kogustes elektri- ja soojusenergiat. Peamiselt saadakse see nn fossiilsetest varudest, kuid taastuvate energiaallikate osakaal on reas maades tähelepanuväärne. Fossiilsete energiakandjate kasutamise negatiivne mõju keskkonnale ja ka varude piiratus tingib paljudes riikides suurenevat tähelepanu taastuvate energiaallikate kasutamiseks.

Eesti saab peaaegu kogu vajaliku elektrienergia Narva jaamadest, sest seal läheduses asuvad põlevkivivarud. Elektri tootmisel tekib palju soojust, mida aga suurte transpordikulude tõttu pole otstarbekas kaugetele tarbijatele saata ja seetõttu ta Narva jaamades enamuses hajutatakse. Kokkuvõttes tähendab see aga põlevkivi kui energiakandja ebaefektiivset kasutamist. Narvast kaugel asuvates asulates soojust tootes tuleb aga täiendavalt kasutada teisi energiavarusid.

Ühiskonna energiavarustuse stabiilsuse ja säästva arengu seisukohtadelt lähtuvalt pakub seetõttu huvi uurida võimalusi toota nii elektrit kui ka soojust tarbijate läheduses, kasutades maksimaalselt kogu energiakandja varu.

Käesolevas artiklis püüame juhtida tähelepanu eriti sellele, et Eesti looduslikes tingimustes on taastuvate energiaallikate kasutamine soojuse ja elektri tootmiseks arvestatav alternatiiv fossiilsete energiakandjate tarbimisele. Käesoleva etteaste **peamine mõte on pöörata tähelepanu sellele komplekssele suuremahulisele võimalusele, temaga seotud majanduslikele, keskkonnakaitselistele ja sotsiaalsetele tagajärgedele.**

Arvestades asjaolu, et üle Eesti rannikualade vuhisevast tuulest võime põhimõtteliselt saada kogu riigile vajamineva energia, peame õigeks hakata seda loodusjõudu inimeste huvides rohkem kasutama. Kuivõrd mere lähedal on takistuste puudumise tõttu tuuled tugevamad, tuleb suuri ja küllaltki kalleid tuulikuid kasutada esmajoones mererandadel. Seepärast on loomulik, et eriti pakub huvi Saaremaa, kus on ka küllalt suur elektrienergia omatarbimine ja mis asub Narva jaamadest kaugel.

Aastasadu on tuuleveskid aidanud Saaremaal kergendada inimeste tööd (Steinrücke, 1994; Lausmaa, 1996; Kull *et al.*, 1999). On samuti tähelepanuväärne, et juba paarikümmend aasta tagasi ehitati Saaremaale Nõukogude Liidu tollane suurim tuulepark

(Lokna ja Petrov, 1995; EE, 1996), mis, tõsi küll, mitmesugustel põhjustel veel enne lõpuni ehitamist demonteeriti. Kuid uute võimaluste otsimisega tegeletakse tuulejõu kasutamiseks paljude poolt jätkuvalt, mille kohta esitame siin vaid ühe näite (Tiit, 1996; Tiit ja Mättas, 1996).

Samuti on Saaremaal suveperioodil võimalik kasutada päikeseenergiat vee soojendamiseks. Ka väärib tähelepanu rapsi kasvatamine biodiisli tootmise eesmärgil.

Kuressaares tarbiti 1999. a. soojust ligikaudu 59 500 MW·h (toodeti 81 800 MW·h), millest ligi pool oli saadud taastuvast biomassist (peamiselt puidujäätmed). Puitpõhise energiakandja osakaal suureneb juba lähemas tulevikus veelgi (AS Kuressaare ..., 2000). Samal aastal tarbiti elektrienergiat umbes 37 000 MW·h (Saaremaa ..., 2001).

Toetudes säästva arengu põhimõtetele ja Saaremaa looduslikele võimalustele ning soovides kaasa aidata regiooni stabiilsusele elektrienergia tootmise hajutamise kaudu, teeme ettepaneku **viia lähematel aastatel kogu Kuressaare linna elektri- ja soojavarustus täielikult üle taastuvate energiaallikate (tuul, mitmesugune biotoodang ja päikesekiirgus) kasutamisele.**

Kahtlemata on see keeruline ülesanne, kuid me arvame, et tema mitmekülgne läbitöötamine on õigustatud. Sel moel on võimalik leida sobivaid lahendusi, määrata nende mõju tööhõivele, turismile ja hinnata saadavaid kogemusi laialdasemalt ning siis otsustada kulutuste otstarbekuse üle.

Järgnevalt kirjeldame ühte võimalikku lahendust (vt ka joonist 1).

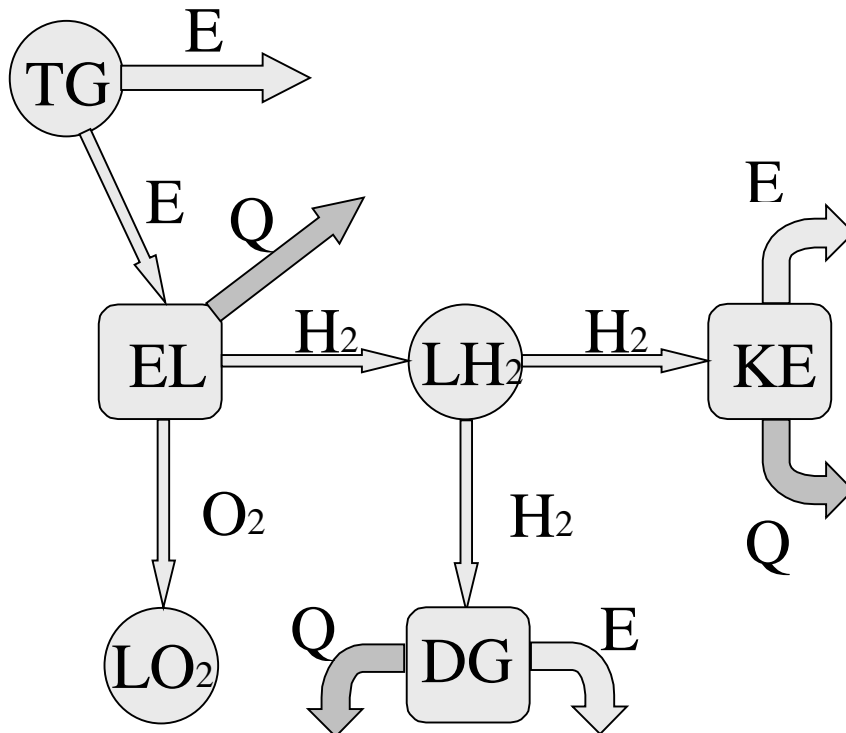
Kui oletada, et terve vajalik elektrienergia kogus soovitakse saada tuulikute abil, siis peab nende installeeritud koguvõimsus ulatuma 12 megavatini (eeldusel, et seadmete ühe megavati kohta toodetakse aastas 3 miljonit kW·h elektrienergiat). Selleks vajatakse näiteks kaheksat 1,5 MW seadet, mis mahuvad ära ligikaudu ühele ruutkilomeetrile. Saaremaa pindala on 2673 km² ([http://www.saaremaa ...](http://www.saaremaa...)) ja ka kõiki looduskaitsepiiranguid arvestades on võimalik vajalikud kohad leida.

Suuremahuline tuuleenergia kasutamine muudab eriti aktuaalseks energia salvestamise ülesande näiteks vesiniku tootmise abil. Arvestades vajadust selle projekti raames toota elektrolüüserite abil vesinikku (ja loomuliku lisana ka hapnikku), oleks vajalik suurendada tuulikute koguvõimsust vähemalt kahekordseks, seega kokku 24 MW või isegi enam. Vesinikku saab sobival ajal (tuulevaikus, kiiresti kasvanud tarbimine) kasutada kas temale kohandatud mootorgeneraatori või kütuseelementide abil uuesti elektri ja soojust tootmiseks. Kaugemas tulevikus, kui vesinikuenergeetika osatähtsus kasvab, võivad kütuseelemendid paikneda vahetult elamute juures, andes nii elektrit kui ka sooja.

Talvistel tööpäevadel on Kuressaares vajalik elektriline võimsus ligikaudu 12 MW (Saaremaa ..., 2001). Kui sel ajal on täielik tuulevaikus ja me soovime saada vajaliku elektri taastuvatest energiakandjatest, siis on nähtavasti otstarbekohane ehitada lisaks kütuseelementidele veel jõujaam, mis töötab biodiisli abil. Oletades, et jõujaama elektritoodangu võimsus on 12 MW ja kasutegur 0,33. Kui ta töötab täisvõimsusega vaid 5% aastast, siis ta toodab kokku 5200 MW·h elektrit (14% aastasest koguvajadusest) ja 10 500 MW·h soojust (12% aastasest koguvajadusest). Selline jaam vajab umbes 1600 tonni rapsiõli, mille võib saada umbes 1200 ha (12 km²) kasvavast rapsist.

See on ligikaudu 2,2% Saaremaa haritavast maast ([http://www.saaremaa ...](http://www.saaremaa...)). Arvestades külvikordade vaheldumist, peaks rapsikasvatamiseks kasutatava maa reserv olema ligikaudu viis korda suurem.

Kütuseelementide kasutamine võimaldab ehitada väiksema võimsusega biodiisli jaama.



Joonis 1. Tuuleenergia kasutamise skeem.

TG – tuulegeneraator, EL – elektroliüüser, LH₂ – vesiniku ladu, KE – kütuseelement, LO₂ – hapniku ladu, DG – diisलगeneraator, H₂ – vesiniku vool, O₂ – hapniku vool, E – elekter ja Q – soojus

Figure 1. Scheme of the use of wind energy.

TG – wind generator, EL – electrolyser, LH₂ – storage for hydrogen, KE – fuel cell, LO₂ – storage for oxygen, DG – diesel generator, H₂ – hydrogen flow, O₂ – oxygen flow, E – electricity and Q – heat flow

Võttes sooja vee tootmiseks kasutusele 1000 m² päikesepaneele, võib suvel nende abil saada orienteerivalt 15%–20% tarbitavast soojusenergiast. Seega tasub juba kaaluda 5000 m² päikesepaneelide ehitamist otse majade juurde, et vältida suvel suhteliselt suuri kadusid trassides. Paneelide paigutamiseks sobivaid katuseid on Kuressaares väga palju.

Kokkuvõte

Näitasime, et Saaremaal on küllaldased looduslikud eeldused tagamaks Kuressaare elektri ja soojuse vajadus taastuvate energiaallikate kasutamise teel. See võimaldab hoida keskkonda puhtamana, suurendab energiavarustuse stabiilsust (eriti ohtlikes olu-

kordades), ja suurendab kohalike elanike tööhõivet. Samuti annab taolise kompleksi kavandamine, ehitamine ja ekspuuteerimine kasulikke kogemusi tuleviku energeetika rajamiseks.

Kirjandus \simeq **References**

1. AS-i Kuressaare Soojus 1999. a. majandusaasta aruanne (2000) AS Kuressaare Soojus, Kuressaare, Estonia: 17.
2. <http://www.saaremaa.ee/est/general/default.htm>.
3. Kull, A., Selg, V. and Valma, A. (1999) Capt.: 4.7 Wind energy. 4.8 Conclusions. Possible Energy Sector Development Trends in Estonia. Context of Climate Change. Eds. Kallaste, T., Liik, O., Ots, A. Proc. of the Stockholm Environ. Inst. Tallinn Centre and Tallinn Technical University. Vaba Maa. Tallinn: 105...127.
4. Lausmaa, T. (1996) Wind Speed Control Measurements by Automatic Weather Stations in the West-Estonian Archipelago. Abs. of Conf. "Wind Energy in Baltics", Riga: 42...43.
5. Lokna, A. ja Petrov, J. (1995) Vätta (Saaremaa) tuulepargi kogemused. III rahvusvah. nõup. "Tuuleenergia kasutamise võimalused Eestis", Tartu: 15 (käsikiri).
6. Saaremaa energeetika hetkeseis (2001) ESTIVO, Tallinn: 9.
7. Steinrücke, J. (1994) Tuulejõud. Eesti Loodus, 2: 61...62.
8. Tiit, V. (1996) Estonian Wind Energy Project at Saaremaa for 10 MW. Estonian Agricultural University, Tartu: 6 (käsikiri).
9. Tiit, V., Mättas, L. (1996), Tuuleenergia kasutamise võimalustest Eestis. EPMÜ tead. tööde kog., Põllumajandustehnika. ja energeetika, 189, Tartu: 138...146.
10. Vätta, 1986–1990, 4–30 kW, kokku 346 kW, NSVL-i suurim tuulepark. Eesti Entsüklopeedia, 9. K., 638–639, Tallinn: Eesti Entsüklopeediakirjastus, 1996).

CREATION OF THE NEW SYSTEM FOR THE KURESSAARE CITY TO PRODUCE ELECTRICITY, HEAT AND WARM WATER BY RENEWABLE ENERGY SOURCES

Lars Mach¹ and Valdur Tiit²

¹ Renewable Energy Group OÜ, e-mail: Lars.Mach@web.de

² Estonian Agricultural University, e-mail: vtiit@eau.ee

Abstract

According to the authors' calculations Saaremaa does have sufficient renewable energy resources (wind, bio and solar) to build complete energy (electricity and heat) supply system for Kuressaare city. This would enable to save the environment, increase stability of energy supply and decrease unemployment. In addition, planning, building and exploiting this complex would provide valuable experience.

RAPSIÕLI BAASIL BIODIISLIKÜTUSE VALMISTAMISE JA KASUTAMISE KOGEMUSI

Toivo Pangsep¹ ja Herma Olak²

¹Oru Taimeõlitööstuse OÜ, Oru 75103, Harjumaa

²Eesti Põllumajandusülikool, Kreutzwaldi 64, 51014 Tartu, e-post: hermo@eau.ee

Annotatsioon

Käsitletakse rapsi- ja rüpsiõli metüül- ning etüülestrite valmistamise ja nende kasutamise kogemusi mootorikütusena, analüüsitakse biodiislikütuse kasutusomadusi ning mõju traktori diisli reguleerimis- ja väljundparameetritele.

BIODIISLIKÜTUS, RAPSIÕLI, REAKTOR, TRAKTORIDIISEL, KARAKTERISTIK

Kasutatud lühendid ja tähised

RME – rapsiõli metüülester

REE – rapsiõli etüülester

NK – naftakütus

M_d – mootori pöördemoment

P_e – mootori väljundvõimsus

b_e – kütuse erikulu

n – mootori väntvõlli pöörlemisagedus

Sissejuhatus

Rapsi- ja rüpsiseemnete kuumpressimisega õli saamise eesmärgil on Oru Taimeõlitööstuses tegeldud üle 10 aasta. Ajapikku on toodangu maht kasvanud. Viimasel ajal pressitakse Oru pressimistehhis aastas 1700 tonni seemet ja saadakse 570 tonni õli. Oru Taimeõlitööstuse OÜ koostöö EPMÜ Põllumajandustehnika Instituudiga algas 1996. a teisel poolel. Instituudi mootorite katsetuse laboratooriumis tegeldi sel ajal mootorikütuste saamisvõimaluste uurimisega kohalikust, looduslikult taastuvast toorainest. Koostöö raames keskenduti rapsi- ja rüpsiõli kasutamisevõimaluste selgitamisele diiselmootori kütusena.

Taimeõlid ei ole kasutatavad diiselmootori kütusena puhtal kujul. Nende põlemisel tekib suhteliselt palju vaik- ja tõrvaineid, mille ladestused silindri ja väljalasketrakti sisepindadel häirivad mootori tööd. Taimeõlid, nende suurest molekulmassist tingitud viskoossuse tõttu, nõuavad mootori toiteaparatuuri normaalse töö tagamiseks kütuse eelsoojendust ja vedeldamist. On andmeid, et taimseid õlisid on kasutatud diiselmootori kütusena segatult nafta alusel valmistatud diislikütusega. Meie esialgsed mootorkatsetused näitasid, et naftakütuse ja rapsiõli seguna kombineeritud kütuses võib viimase osakaal olla 40...60%.

Nafta alusel toodetava diislikütuse kasutamisest loobumiseks on üks võimalustest valmistada diiselmootori kütus põllul kasvatatavatest, looduslikult taastuvast toorainest.

Meie tingimustes on kõige sobivamaks põllul kasvatatavaks tooraineks õlikultuurid – raps ja rüps. Rapsiõlist diislikütuse valmistamise algtehnoloogia omandamiseks tuli läbi töötada sellel alal kättesaadavad kirjandusallikad ja tutvuda vastavate Austria, Saksa ja Soome patentide kirjeldustega. Selgus, et taimeõlide põhikomponentide rasvhapete triglütseriidide esterifikatsiooni tuntakse juba alates 1852. aastast. Mootorikütustena hakati taimeõlide estreid kasutama alles viimase paarikümne aasta jooksul.

Täielikult bioloogilisel alusel, nagu seda on taimeõlid, valmistatud diislikütusel on rida eeliseid:

- kütusel on head määrimisomadused ja küllaldane soojusväärtus;
- kütus sisaldab väga vähe kahjulikke komponente, selle sattumisel maapinnale ei teki olulist saastamist;
- töötamisel biodiislikütusel on mootori heitgaaside suitsusus märgatavalt väiksem, selle koostises on vähem keskkonda saastavaid ühendeid, võrreldes töötamisega naftakütusel;
- talupidaja saab ise kasvatada põllu harimiseks vajaliku mootorikütuse tooraine, kütuse valmistamiseks tarviliku õli pressimisel tekib kõrvalsaadusena proteiini-rikas sööt loomadele ja lindudele.

Biodiislikütuse valmistamise tehnoloogia ja seadmed

Tuginedes avaldatud materjalide läbitöötamisel kujunenud arusaamadele, töötati välja ja võeti kasutusele biodiislikütuse valmistamise menetlus rapsiõli esterifitseerimise teel metanooli ja etanooli abil. Esialgselt valmistati mootorkatsetusteks vajaminev rapsi- ja rüpsiõli metüül- ja etüülester mootorite katsetuse laboris. Kütuse valmistamise protsessi omandamisel ja selle juhtimise täpsustamisel saadud kogemuste alusel konstrueeriti ja ehitati Orul reaktor 1997. aastal.

Üldjoontes on reaktori ehitus järgmine. Reaktori põhiosaks on vertikaalasendis jalgadele toetuv silindriline anum, mille läbimõõt on 1 m, kõrgus 1,5 m, mahtuvus ca 1,2 m³. Täieliku tühjendamise eesmärgil on anuma põhi kujundatud nürinurkse koonusena. Anuma põhjatipus ja külgpinnal, vahemikus 1/20 kuni 1/10 mahtuvusele vastavatel kõrgustel on paigutatud kraanid sadenemisel põhja valgunud glütserooli ja jääkide ning kütuse väljalaskmiseks. Pealt on reaktor suletud tihendatud kaanega, milles on luuk anuma täitmiseks. Reaktori raamikujuline rootor on toetatud anuma põhjas ja kaanes olevatele laagritele. Kaanele on kinnitatud rootori ajam, selleks on kahe pooluspaariga asünkroonmootor. Rootori pöörlemissagedus on reguleeritav kõrvalruumis olevas elektrikilbis paikneva variaatori abil.

Biodiislikütuse valmistamise menetlus on järgmine. Anum täidetakse vastavalt soovitud kütusekogusele, 30...80% ulatuses kogumahust, rapsiõliga. Rooror pannakse pöörlema väikesel pöörlemissagedusel. Õlisse lisatakse peene joana umbes veerand tunni vältel absolutiseeritud metanool (või etanool) umbes 1/10 õli mahust. Metanoolis on eelnevalt lahustatud katalüsaator – kaalium- või naatriumhüdrosiid (10...40 grammi metanooli liitri kohta). Metanooli või etanooli kogus tuleb täpsustada iga kord sõltuvalt õli kvaliteedinäitajatest ja temperatuurist; viimasest tuleb kinni pidada kogu protsessi vältel. Segamine toimub pidevalt, protsessi käigus suurendatakse rootori pöörlemissagedust. Reaktsioon kestab vähemalt kolm tundi; seejärel rootor seisatakse.

11...12 tunni vältel sadeneb reaktori põhja glütserool, katalüsaator ja muud võimalikud jäägid (10...11% mahust).

Peale väljasadenemiseks vajaliku aja möödumist lastakse välja rapsiõli metüülester reaktori külgpinnas, anuma täitmise astmele vastaval kõrgusel paiknevast kraanist. Põhja sadenenud glütserool juhitakse kogumistanki, eemaldades filtreerimise teel eelnevalt tahked jäägid. Reaktori võib tühjendada ka alumise kraani kaudu, eraldades al-gul põhja sadenenud glütserooli. Valmistatud metüül- või etüülester on estrile iseloo-muliku lõhnaga ja kasutatav kohe diiselmootori kütuseks, kui välisõhu temperatuur on üle $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Biodiislikütuse kasutusomaduste analüüs

1998. aasta oktoobris valmistatud biodiislikütuse kordusanalüüs tehti 14. septembril 2000. a laboris SGS Estonia Ltd. (EV reg. nr. 10144522, Lab, tegevuse tunnistus nr. 0034); analüüsi tulemused on toodud tabelis 1.

Tabel 1. Biodiislikütuse analüüsi tulemused (osalised)

Table 1. Results of the biodiesel fuel analysis (partial)

KVALITEEDINÄITAJA	MÕÕT ÜHIK	KATSEMEETOD	RME	NAFTA-KÜTUS
Tihedus $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ juures	kg/m^3	ASTMD4052/EN ISO 12185	989,7	829,0
Kinemaatiline viskoossus $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ juures	mm^2/s	ASTMD445/EN ISO 3104	12,37	3,87
Kinemaatiline viskoossus $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ juures	mm^2/s	ASTMD445/EN ISO 3104	7,27	–
Hägustumispunkt	$^{\circ}\text{C}$	ASTMD2500/EN 3015	–9	–5
Hangumispunkt	$^{\circ}\text{C}$	ASTMD97/EN ISO 3016	–12	–15
Korrosiivsus vaskplaadikatsel		ASTMD139/EN ISO 2160	läbib(No.1)	läbib(No.1)
Tahked osised	mg/kg	ASTMD4738/ ISO 3735	<0,01	<0,005

Tabelist 1 nähtub, et biodiislikütuse tihedus on suurem, aga kinemaatiline viskoossus oluliselt suurem võrreldes naftakütusega. Samas mõjutab biodiislikütuse viskoosust tugevalt temperatuuri langus. Võrreldes tabelis toodud näitajaid sama kütuse valmistamise järgselt laboris ANALIIT-AA saadud näitajatega võib märkida, et arvestatavaid muutusi ei ole.

Temperatuuril alla $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ on vajalik lisada rapsiõli esterifitseerimise teel saadud biodiislikütusele viskoosust stabiliseerivaid lisandeid. Seni oleme omavalmistatud kütuse viskoossuse vähendamiseks ja mootori käivitusomaduste parendamiseks madalatel temperatuuridel kasutanud isopropüül- ja isoamüülpiiritust ning polüisobutuleeni. Lõplikult on välja selgitamata talvetingimustes biodiislikütuse kasutamiseks kõige sobivam komponent.

Biodiislikütuse kasutusomadusi on hinnatud traktoridiisli Д-240 stendikatsetustel võetud regulaatorarakteristikute baasil. Analüüsi aluseks on võrdlusmeetod. Võrdlusanalüüsil on baasvariandiks mootori töö vastavate näitajate osas naftakütuse kasutamisel. Katsetus toimus vastavalt ГOCT 18509-88 nõuetele. Seejuures määrati mootori

pöördemoment, väljundvõimsus, kütuse tunni- ja erikulu, heitgaaside temperatuur ning suitsusus.

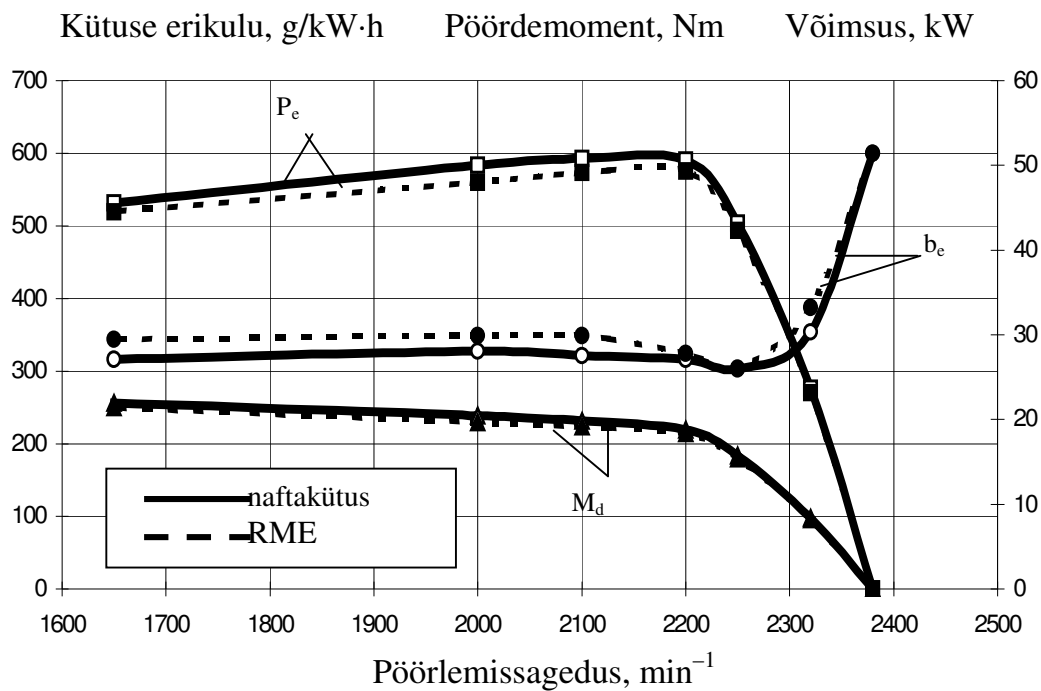
Traktoridiisli optimaalsete reguleeringute määramiseks biodiislikütusel töötamiseks võeti eelnevalt reguleerimiskarakteristikud. Selgus, et mootor arendab suurimat võimsust ühesuguse etteandenurga väärtuse korral nii töötamisel naftakütusel kui rapsiõli metüülestril. Sama etteandenurga korral, mis vastab mootori valmistaja andmetele, on kõige väiksem ka kütuse erikulu. Kütuse tunnikulu on muutumatu tulenevalt karakteristiku võtmise tingimustest. Mitmete kütuse etteandenurga reguleerimiskarakteristikute võrdluse tulemusena võib märkida, et rapsi-, rüpsiõli metüül- ja etüülestriete kasutamisel kütusena, võib jääda etteandenurk samaks, mis on ette nähtud valmistaja tehase poolt traktoridiislile D-240 naftakütuse kasutamisel.

Biodiislikütusel töötamiseks sobiva sissepritserõhu määramiseks katsetati mootorit pihustite töö rõhku 17 ja 19 MPa. Selgus, et pihusti töö rõhul 19 MPa arendas mootor nimi- ja täiskoormuse piirkonnas 2...3% võrra suuremat võimsust võrreldes töötamisega pihusti rõhul 17 MPa. Samades koormuse tingimustes oli kütuse erikulu väiksem. Siit järeldub, et suurema sissepritserõhu korral pihustub naftakütusest viskoossem biodiislikütus peenemateks osakesteks, seguneb ühtlasemalt õhuga ning põleb täielikumalt.

Mootori kütusekulu- ja võimsusnäitajate võrdlemiseks töötamisel biodiislikütusel ja naftakütusel on mootori põhikarakteristikud võetud optimaalsete reguleerimisparameetrite väärtuste korral. Joonisel 1 on esitatud mootori pöördemomendi, efektiivvõimsuse ja kütuse erikulu muutus regulaatorkarakteristiku tingimustes. Siit näeme, et näitajate erinevus suureneb mootori koormuse kasvamisel nullist kuni nimikoormuseni, seejuures langeb pöörlemissagedus tühikäigupööretelt 2380 min^{-1} nimipöörlemis-sageduseni 2200 min^{-1} . Biodiislikütuse puhul on täiskoormuse piirkonnas mootori võimsusnäitajad püsivalt väiksemad kui naftakütuse korral. Korduvatel stendikatsetustel saadud andmete analüüsi tulemusena võib väita, et mootori võimsusnäitajad töötamisel biodiislikütusel on kuni 5% väiksemad võrreldes töötamisega naftakütusel; kütuste erikulu aga suurem kuni 7%; viimane asjaolu on seletatav biodiislikütuse mõnevõrra suurema tihedusega.

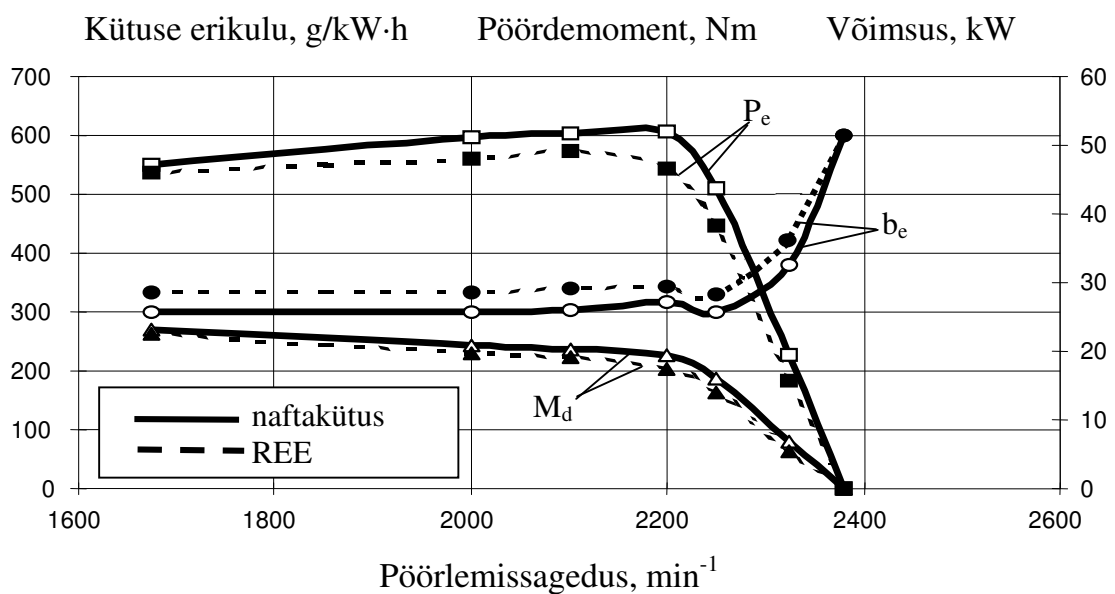
Joonisel 2 on toodud traktoridiisli regulaatorkarakteristik töötamisel rapsiõli etüülestril. Karakteristikult nähtub, et rapsiõli etanooliga esterifitseerimise tulemusena saadud biodiislikütuse kasutamisel on mootori täiskoormusel pöördemoment ja väljundvõimsus väiksem 10...11%, kütuse erikulu aga suurem 11...13% võrreldes naftakütuse kasutamisega.

Täiskoormusel töötava mootori heitgaaside temperatuur on biodiislikütuse korral väiksem 10...15 °C võrra, naftakütuse puhul ulatub heitgaaside temperatuur 425 °C. Heitgaaside suitsusus mootori täiskoormusel on nii rapsiõli metüül- kui etüülestri kasutamisel väiksem 25...40% võrreldes naftakütuse kasutamisega. Mootori pöördemomendi, väljundvõimsuse ja heitgaaside suitsususe vähenemine rapsi-, rüpsiõli metüül- ja etüülestritel töötamisel on tingitud eeskätt biodiislikütuse väiksemast süsinikusisaldusest ning sellest tulenevalt madalamast soojusväärtusest võrreldes naftakütusega, mille soojusväärtus on keskmiselt 42,5 MJ/kg.



Joonis 1. Traktoridiisli väljundvõimsuse (P_e), pöördemomendi (M_d) ja kütuse erikulu (b_e) muutus regulaator karakteristiku tingimustes töötamisel rüpsiõli metüülestril (RME) ja naftakütusel (NK)

Figure 1. Power output (P_e), torque (M_d) and fuel consumption (b_e) dependence on engine speed using rape-oil methyl ester (RME) and petroleum-based diesel fuel (NK)



Joonis 2. Traktoridiisli väljundvõimsuse (P_e), pöördemomendi (M_d) ja kütuse erikulu (b_e) muutus regulaator karakteristiku tingimustes töötamisel rapsiõli etüülestril (REE) ja naftakütusel (NK)

Figure 2. Power output (P_e), torque (M_d) and fuel consumption (b_e) dependence on engine speed using rape-oil ethylester (REE) and petroleum-based diesel fuel (NK)

Järeldused ja kokkuvõte

Biodiislikütuse kasutusomaduste analüüsi tulemusena tehtud järeldused on saadud põhiliselt traktoridiisli stendikatsetustel määratud mootori heitgaaside, kütusekulu ja võimsusnäitajate põhjal.

1. Biodiislikütuse kasutamisel, kui selles puudub viskoossust stabiliseeriv lisand, on otstarbekas tõsta pihustite töö rõhku ettenähtud 17 MPa asemel 19 MPa-ni.
2. Mootori võimsus töötamisel nimi- ja täiskoormusel on biodiislikütuse - rapsiõli metüülestri korral väiksem kuni 5%, rapsiõli etüülestri korral aga kuni 11% võrreldes töötamisega naftakütusel.
3. Mootori töö näitajad on ühesugused nii kuum- kui külmpressimisel saadud õlist valmistatud biodiislikütuse kasutamisel.

Kahe aasta jooksul on Oru Taimeõlitööstuses valmistatud biodiislikütust 7 korral, kokku 2200 liitrit. Sellest 500 liitrit on kulutatud diiselmootori stendikatsetustel traktoridiisli töö näitajate määramiseks. Ülejäänud 1700 liitrit on kasutatud Taimeõlitööstuse traktorites, mis töötasid põhiliselt transporttöödel 1998. a. Traktoridiisli osalise koormuse tõttu transporttöödel praktiliselt mootori võimsuse vähenemist ei täheldatud. Temperatuuril alla $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ mootorit käivitada ei õnnestunud.

Pideva hinnatõusu tulemusena on naftakütuse hind kerkinud biodiislikütuse valmistamiskulude tasemele, mõnedes tanklates isegi ületab selle. Samuti ei ole naftakütuse kvaliteedinäitajad mitmetes müügikohtades nõutaval tasemel. Seepärast on tekkimas nõudlus biodiislikütuse järele. Oru Taimeõliteshases toimub praegu tsehi osaline rekonstrueerimine biodiislikütuse tootmisvõimaluste laiendamiseks.

EXPERIENCE OF MANUFACTURING AND USING RAPE-OIL-BASED DIESEL FUEL

Toivo Pangsep¹ and Herma Olak²

¹Oru Vegetable Oil LLC

²Estonian Agricultural University, e-mail: hermo@eau.ee

Abstract

In Oru Vegetable Oil LLC in cooperation with the scientists of Institute of Agricultural Machinery EAU a technological method for rape-oil-based diesel oil manufacturing was developed. A reactor for biodiesel fuel production was designed and built. Methanol and ethanol are being used for the rape oil esterification. Comparative tests of the petroleum-based and rape-oil-based diesel fuels were carried out. Rape-oil-based fuel has a higher viscosity and density level in comparison with petroleum-based fuel but a smaller net heat. Tractor diesel engine D-240 laboratory tests have pointed out that using rape-oil methyl ester declines the torque and power output 5% and rape oil ethyl ester – 11% in comparison with petroleum-based fuel. At the same time the exhaust gases smoke content and temperature were less when using rape-oil methyl and ethyl esters. When working on rape-oil-based fuel it is reasonable to raise the injector working pressure up to 19 MPa.

KÜTUSTE GENEETILINE KLASSIFIKATSIOON

Rein Veski

Turbateabe OÜ, Sõpruse pst. 233–48, 13420 Tallinn, e-post: rein.veski@mail.ee

Annotatsioon

Kütused on jagatavad taastuvateks ja mittetaastuvateks, aga ka taimseks biomassiks, kaustobioliitideks ja tehiskütusteks. Taimne biomass on esmane lähtematerjal kaustobioliitide, need ja biomass omakorda tehiskütuste saamisel. Põhimõtteliselt on kõik kütused taastuvad seni, kuni taimkate uueneb ja nende biomass koos konsumentide omaga mattub. Seni ei ole see protsess ja kaustobioliitide muutumine ühest liigist teise hetkekski peatunud. Taimed kasvavad ning turvas ja sapropeel ladestub meie silmade all, nende edasist muutumist maakoos me otseselt ei näe. Osa mattuvast taimsest materjalist kasutatakse heterotroofide poolt. Seepärast mattunud taimse materjali kogus protsessides, mille käigus üks kütuseliik muutub maakoos teiseks, pidevalt väheneb. Fossiilkütuste põletamine vähendab Maa kütusevarusid omakorda. Selle tõttu loetakse fossiilkütused tinglikult taastumatuteks, taimed ja nendega kaetud pidevalt juurde tekkiv turvas ja sapropeel taastuvateks. Täielikust taastuvusest saab rääkida vaid juhul, kui teatud riigis või ka selle isoleeritud piirkonnas, näiteks saartel, nende põletamisel eraldunud süsinikdioksiid seotakse sealsamas taimede poolt. Taimede biomass läbib mattumisel mulla- ja mikroobistaadiumi, mis on osa turbastaadiumist. Viimasele järgneb pruunsöe-, kivisöe-, antratsiidi- ja grafiidistaadium. Kaustobioliidid jagatakse põlevmaterjali sisalduse järgi süteks ja põlevkivideks, need omakorda lähtematerjali andnud fotosünteesivate taimede järgi sapropeliitideks, liptobioliitideks, humiitideks ja segakaustobioliitideks. Töös vaadeldakse ka eestikeelses kirjanduses varem avaldatud seisukohti kaustobioliitide geneesist ja viidatakse autori varasematele töödele, mis aitavad esitatut paremini põhjendada.

TAASTUVKÜTUS, FOSSIILKÜTUS, BIOMASS, TEHISKÜTUS, KLASSIFIKATSIOON

Siin kasutatud lühendid

OA – orgaaniline aine, HOA – hajutatud orgaaniline aine

Taimed kui kütused ja kaustobioliitide lähtematerjal

Kui tavaliselt alustatakse kütuste klassifikatsioone turbaga ja lõpetatakse antratsiidiga, siis käesolevas klassifikatsioonis vaadeldakse kogu süterida koos taimse biomassiga, lisaks veel tehiskütuste klassifitseerimise põhimõtteid. Taimed jagunevad alamateks ja kõrgemateks taimedeks. Nende vahepealse rühma moodustavad sammaltaimed. **Alamad taimed** on kas mikroskoopilised üherakulised, koloonialised või hulkraksed. **Kõrgemad ehk soontaimed** on juhtkoe, varre, lehtede ja juurtega. **Sammaltaimed** (kõder-, maksa- ja lehtsamblad, viimaste hulgas ka **turbasamblad**) on kõrgemad taimed, mis erinevalt soontaimedest kinnituvad substraadile risoidide abil. Nad erinevad nii välise kuju, keemilise koostise kui põlemisomaduste poolest. Otse kütusena leiab kasutamist enamik soontaimedest, vähesel määral ka teised taimeliigid.

Taimed erinevad loomadest ja seentest selle poolest, et nad on **autotroofid**, mis tähendab võimet sünteesida süsinikdioksiidist, veest jt lihtsamatest keemilistest ühenditest päikesekiirguse toimele taimset biomassi. Ülejäänud eluvormid, üldnimetusega **heterotroofid** (konsumendid ja destruktorid) on võimelised vaid autotroofide sünteesitud biomassi töötleva, k.a seda süsinikdioksiidiks ja veeks mineraliseerima. Heterotroofide jäänused ja elutegevuse produktid kuuluvad samuti kaustobioliitide lähtematerjali hulka.

Kaustobioliidi mõistet (*καυστός* – põlev, *βίος* – elu, *λίθος* – kivi) seotakse saksa paleobotaaniku H. Potonié nimega. Potonié jagas 1908. aastal kõik kütused ehk kaustobioliidid vastavalt taimsele lähtematerjalile sapropeliitideks (tekkisid alamatest veetaimedest), humiitideks (tekkisid kõrgematest, s.o soon- ja sammaltaimedest) ja liptobioliitideks (tekkisid kõrgemate taimede eriti püsivatest osistest). Potonié kajastas oma klassifikatsioonis põhiliselt turba ja pruunsöe staadiumis olevaid kaustobioliite. Lisaks tahketele kaustobioliitidele eristatakse migratsioonilise tekkega naftat ja maagaasi ning nende derivaate kaustobioliitide naftarea (naftiidide) rühmana.

Eestikeelne kirjandus kütuste klassifitseerimisest

Eesti keeles avaldatud kütuste definitsioonid ja geneetilised klassifikatsioonid peegeldavad saksa, hiljem vene ja kohati inglise keeles avaldatud seisukohti.

Kunagi tähendas süsi eesti keeles üheaegselt nii sütt kui süsinikku (Kalkun, 1921), millest tulenevalt nimetati selle üht põlemissaadust süsinikdioksiidi alles hiljuti süsihappegaasiks. Juba üle saja aasta tagasi kirjutas J. Kunder (1878), et elu sai alguse meres: *Taime riik... kasvis ime lopsakalt merestel lastel, ... neist otsatu suured ja sügavad kivisöe hauad saivad, kui nad kivistasivad*. Ta (Kunder, 1885) kirjeldas hiljem kütuste teket veelgi täpsemalt, et *algilma taimede kehadest sündinud põlevad mineraalid on ummukses ärakivistanud*. Pruunsüsi olevat *seeläbi sündinud, et õitsevate puude metsad maamulla alla jäävad ja siin mulla raskuse all niisamuti ära süsinesivad, nagu miili haugus süedgi*. Kunder jagas põlevad mineraalid kolmeks (säilitatakse algne kirjaviis):

- 1) süed: pruunsüsi, kivisüsi, süsiläige (*anthracit*), kirjutussüsi (*graphit*) ja (soo-, nõmm-, roht-, mets- ja mere-) turvas. (Ta paigutas süte alla teistest eraldi kennelsöe – *Kannelkohle*, mis osutuski sapropeliitsöeks, veel hiljem segasöeks – sapropeliithumiidiks. Nüüd kasutatakse nimetust kännelsüsi – R.V.);
- 2) vaigud: merevaik (merevaik on liptobioliit, mida kütuseks ei kasutata, selle liigitamisega oli ka hiljem raskusi – R.V.);
- 3) maaõlid: maaõli (mäepalsam *Naphta*), kiviõli ehk petrooleum ja mäetõrv (*Bergtheer*) ning maapigi ehk juudapigi (*Asphalt*).

Turvast kirjeldas Kunder kui igavesti uuenevat noort kivisütt, mis sünnib veel iga päev meie silma ees. Huvipakkuv oli grafiidi kui taimse materjali muutuste lõppsaaduse vaatlemine söena.

Ettekujutus kütuste geneesist jäi ka sajandivahetusel üldjoones samaks. Arutati vaid, kas nafta tekkis suure kuumuse juures süsinikku sisaldavatesse raualademetesse tunginud vee toimele või mere põhja langenud ja limaga kaetud loomade surnukehade

rasvast *raske rõhumise all* (Aavakivi, 1900), seega kas nafta on abiogeense või bio-geense päritoluga.

Kütuseid on nimetatud ka **orgaanilisteks mineraalideks** (Kuusk, 1928) ja lihtsalt **orgaanilisteks ühenditeks** (Kark, 1940). Kuusk (1928) ei vaadelnud merevetikatest tekkinud kukersiitpõlevkivi süte all. Küll aga arvas Kark (1940) vetikatest (*Gloeocapsomorpha prisca*) tekkinud kerogeeniga kukersiidi mineraalsüte hulka, samas aga liptobioliite (püropissiit ja merevaik) mitte. Kukersiidi puhul rõhutati, et see nii nagu kivisööed, ei kujuta endast mineraali. Seega ei olnud mineraalsüsi mineraal. Kark eristas koksisütest pika leegiga bituumsed bogheedid (*boghed*) ja kännelsöe (temal *boghead* ja *cannel-süsi*). Bogheedid on teatavasti sapropeliidid.

Huvipakkuv oli meremuda nimetamine **sapropeeliks** (Veiderma, 1932), kuna tavaliselt on sapropeeliks peetud ainult järvemuda, millega satub vastuollu teatmeteostes levinud seisukoht, et sapropeliidid tekkisid kõikides veekogudes.

Äramärkimist vajab jätkuv tava vältida põlevmaarete klassifitseerimisel kaustobioliidi mõistet. Nii leidis *kõige üldisemas orgaaniliste mineraalide ja nende agregaatide klassifikatsioonis* (Ojaste jt, 1964) koha orgaaniliste hapete soolade (melliit, vevelliit, oksammiit jt), süsivesinike (nafta, bituumenid, osokeriit jt) ja vaikude (asfalt, merevaik jt) kõrval **süsiniku suhtes rikastunud orgaanilised jäänused**, mis hõlmasid turvast, pruun- ja kivisütt, antratsiiti, šungiiti, aga ka juba liptobioliite ja sapropeliite.

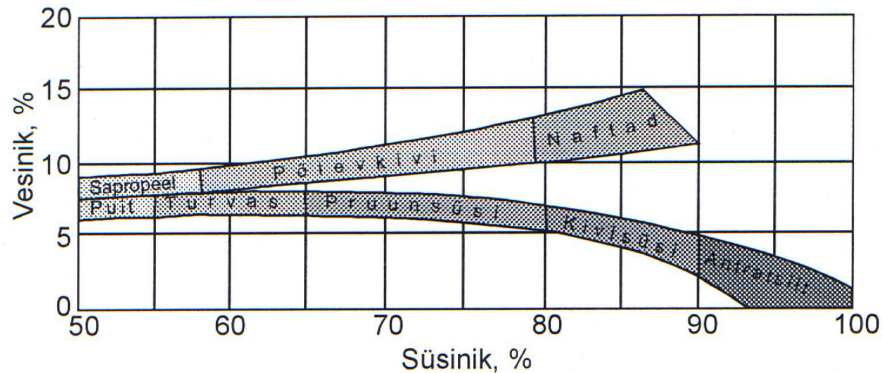
Potonié kaustobioliidi mõiste muutus eestikeelses kirjanduses alles viimasel ajal valdavaks, kuid mitte lõpuni arusaaduks. Võrreldes märksõnu *kütus* (1989) ja *kaustobioliidid* (1990), märkame et esimeses liigitatakse looduslikud kütused huumus- ja sapropeelikütusteks (viimase alla on arvatud nafta ja põlevkivi), olgugi et naftarea kaustobioliidid tekivad maakooses nii sapropeliitide kui humiitide muutumisel. Kumbki märksõna ei sisalda liptobioliidimõistet. Geneesi seisukohalt oli oluline sapropeelisüte eristamine sapropeliitide all, kuid põlevkivide puhul öeldi eestikeelses trükisõnas alles päris hiljuti välja (Aarna, 1989), et *sõltuvalt humiinaine osatähtsusest orgaanilistes ainetes jaotatakse põlevkivid tüüpidesse: sapropeelpõlevkivid, sapropeelhuumus-põlevkivid ja huumus-sapropeelpõlevkivid*, mis tähendas esmakordselt segalähtematerjaliga põlevkivide eristamist. See tähendas, et põlevkivisid ei tule vaadelda ainult sapropeliitide all. Muukeelses trükisõnas eristati põlevkivide hulgas juba varem sapropeliithumiite, mille OA sisaldas kuni 50% vitriiniiti (Ginzburg, 1969), humiitide üht põhilist mikrokomponenti. Jäi veel väike samm looduses esinevate seni erilise tähelepanuta jäänud humiitpõlevkivide tunnistamiseni.

Mõiste *sapropeelkütus* ja *sapropeliit* (näiteks Veiderma ja Mölder, 1970) vaba kasutamine samas tähenduses on levinud ka muukeelses kirjanduses.

Kütuste geneetiline klassifikatsioon keemilise koostise alusel

Kütuseid võib klassifitseerida eri tunnuste järgi. Neist on botaanilise koostise kõrval meie ettekujutust väga tugevasti mõjutanud eesti keeles väikeste kärbetega avaldatud (Aarna jt, 1954) A. Dobrjanski (1947) graafiline vesiniku ja süsiniku sisaldusel põhinev kütuste geneetiline klassifikatsioon (joonis 1). Dobrjanski eristas sapropeelirida, mis läks üle sapropeliitide ja põlevkivide oksüasfaldiks ning edasi naftaks. Peaaegu sa-

mast lähtepunktist saab alguse teine kütuste rida: puit, turvas, pruunsüsi, kivisüsi ja antratsiit. Need teed lahknuvad, kuna antratsiit on naftast väiksema vesiniku sisaldusega.



Joonis 1. Põlevkivide geneetiline klassifikatsioon (Dobrzanski, 1947; Aarna jt, 1954)
Figure 1. Genetic classification of oil shales (Dobrzanski, 1947; Aarna jt, 1954)

Dobrzanski klassifikatsioon oli ühest küljest tugevaks argumendiks humiitide ja sapropeliitide eristamisel, teisest küljest aga ei näidanud, et mattumisel jõuab mattunud OA antratsiidi- ja sealt edasi grafiidistaadiumi, s.o ühisesse lõpp-punkti. Vaadeldaval joonisel muutusid põlevkivid sujuvalt tahket süsinikurikast moodustist andmata naftaks. Tehnoloogiliselt on põlevkivist õli saamine utmisel süsinikurikka poolkoksi tekketa teatavasti võimatu.

Taimed ja murenemiskoorik

Maakoore ülemine pind koosneb murenemiskoorikust. Väljakujunenud tava järgi murenemiskoorik tekib ja muutub füüsikaliste, mehaaniliste, keemiliste ja bioloogiliste tegurite, s.o rabenemise ja porsumise mõjul. Need tegurid esinevad tihti koos ja neile lisandub inimtegevuse mõju. Elutekke eelsel Maal mõjutasid murenemiskoorikut ainult mehaanilised, füüsikalised ja keemilised tegurid. Bioloogiline tegur lisandus fototroofsete taimede ja heterotroofide tekkega. Nad muutsid algselt abiogeense päritoluga süsinikühendid biogeenseteks (Veski, 1983b; 1988a). Veelgi olulisem on rõhutada murenemiskoorikut rabendava ja porsutava toime kõrval taimede loovat tegevust, mille tulemusena fotosünteesitakse süsinikdioksiidist ja veest biomass. Fotosünteesivate alamate taimedega ja kõrgemate taimede juurtega koostoimes olevat murenemiskooriku pealmist kihti nimetatakse **mullaks** (Veski, 1983a). Taime juured võimaldavad osa fotosünteesitud materjali ladestada otse mulda. Taimeosised viiakse pinnasesse ka loomade abiga. Muld paikneb murenemiskooriku ülemises kihis, mida organismid muudavad taimekasvuks veelgi soodsamaks. Biomassi edasisel kuhjumisel kaitseb tekkinud sapropeeli või turba kiht pinnast hoopiski edasise murenemise eest.

Taimede **mattumine** toimub läbi veekogu põhja ja maismaa pindmise kihi. Setete mineraalseteks koostisosadeks on tavaliselt kivimite murenemisel tekkinud osakesed, abiogeenne vulkaaniline ja kosmiline tolm. **Rabas** on süsinikdioksiidi "settimine" eriti selgelt näha, kuna mineraalsete purdosakeste sissekanne sinna on tühine. Murenemis-

koorikus mullast allapoole jääv kiht ei sisalda ei autotroofe ega nende juuri, küll aga heterotroofe, lõppedes mikroorganismidega, mis on vastastikusel toimes keskkonnaga, s.o nad ei ole anabioosi olekus.

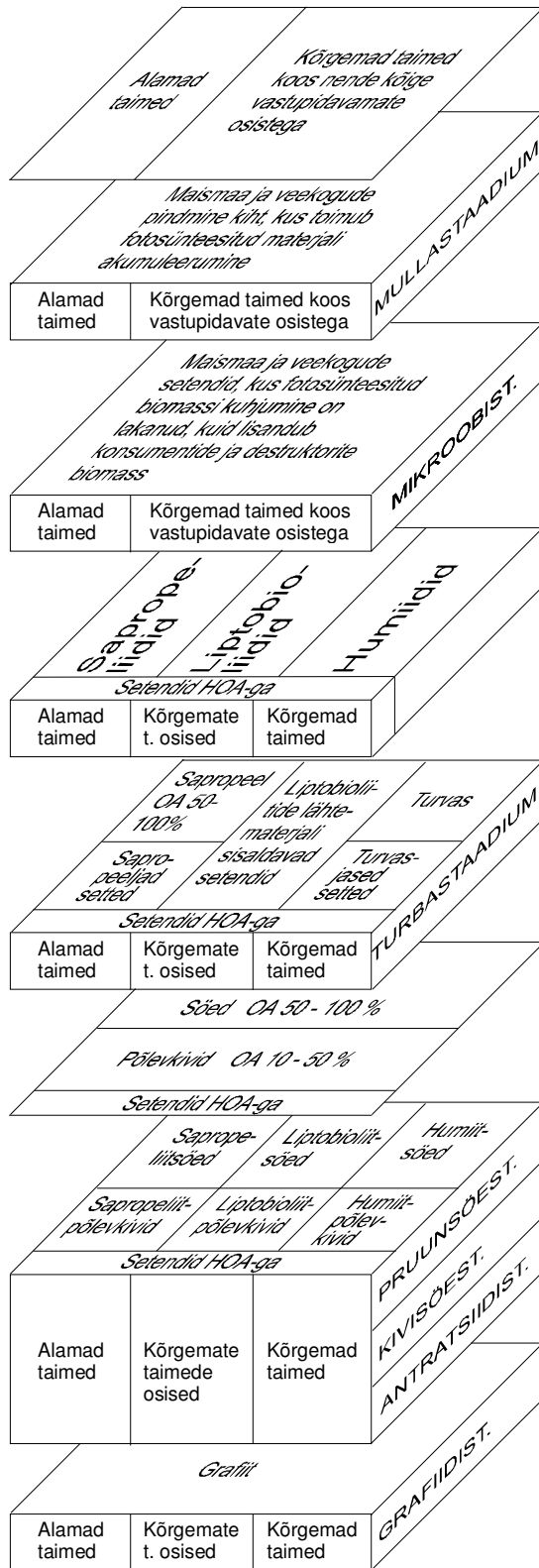
Söed ja põlevkivid

Nii nagu eelmisest osast selgus, läbib taimne ja loomne biomass mattumisel kaks staadiumi, ühes neis – **mullastaadiumis** – on võtmeprotsessiks värske fotosünteesitud biomassi akumulatsioon, teises – **mikroobistaadiumis** (Veski, 1982) – vaid selle lagundamine ja heterotroofide sünteesitud biomassi lisandumine. Joonisel 2 asuvad need staadiumid vahetult taimede tahvli all.

Sapropeliidid, liptobioliidid, humiidid või looduses enam levinud segatüüpi kaustobioliidid (viimaseid ei näidata joonisel lihtsustamise mõttes) tekivad siis, kui OA-sisaldus maakoore ülakihis on suur, väikese sisalduse korral tekivad hajutatud orgaanilist ainet (HOA – järgmine tahvel) sisaldavad setendid, millest osa tuntakse (mustade) kiltade nime all (Veski, 1988b; 1991).

Kui murenemiskoorikus toimub biomassi selektiivne lagunemine, võivad taimede eriti vastupidavad osised kas kuhjuda kohapeal või olla kantud eemal olevasse settebasseini. Nii tekivad kõrgemate taimede püsivatest osistest **liptobioliidid**. Seda selgitab ka tahvel, mis jagab kõrgematest taimedest saadava biomassi kaheks, nende taimede põhimassiks ja vastupidavateks osisteks. Kui kaustobioliidid peaksid kas geoloogiliste protsesside või inimtegevuse tulemusel paljanduma, muutuvad nad murenemiskooriku osaks ja nende kvaliteet kütusena halveneb. Mulla- ja mikroobistaadiumi eristamine varem teada olevast turbastaadiumist aitab paremini aru saada selles toimuvatest protsessidest. Vahetahvil eristatakse OA-sisalduse alusel söed, põlevkivid ja setendid HOA-ga. Edasi järgneb plokk pruunsüte, kivisüte ja antratsiidide staadiumidega. Põlevkivide koha määramist kütuste geneetilises klassifikatsioonis käsitlesime ühes oma varasemas töös (Veski, 1986). Viimasel tahvilil kujutatakse grafiidistaadiumi.

Varem ei peetud alamate taimede biomassist tekkinud kivisöe ja antratsiidi staadiumis olevaid kaustobioliite sapropeliitideks. Üheks käibeväiteks oli, et OA pärast nafta genereerimist *kaotab geneetilise tüübi omapära ja ei ole enam diagnoositav sapropeliitena...*, ja läbib edaspidi *huumusainele iseloomulikud muutused* (Levin, 1982). Geneetilise klassifikatsiooni järgi ei ole võimalik alamate taimede jäänuste (sapropeliitide lähtematerjal) muutumine maakoos humiitideks, kuna need tekivad kõrgemate taimede jäänustest. Meil õnnestus näidata (Veski jt, 1990), et sapropeliitsüte OA aroomaatsuse aste kasvab alates pruunsöe staadiumist nagu humiitidel. Nad olid ka humiitide vahekihtidena geoloogide poolt eristatavad. Sapropeliitide geneetiline päritolu säilib, olgugi et keemiline koostis ja toorainelised omadused mattudes lähenevad. Grafiit kui keemiliselt peaaegu puhas süsinik säilitab samuti oma geneetilise päritolu. Seega ei tähenda sarnasus kaustobioliitide keemilises koostises ja toorainelistes omadustes geneetilist sarnasust.



Moodustuvad katabogeneetilised naftiidid | Moodustuvad diogeneetilised naftiidid

Naftarida ja kunstlikud kütused

Naftiidid tekivad maakoorest igasugusest taimsest lähtematerjalist Algul moodustuvad **diogeneetilised, hiljem katabogeneetilised naftiidid** (vaata püstikirjeid joonisel tahvlite kõrval). Esmalt tekib diogeneetiline metaan, edasisesel mattumisel peamiselt nafta ja lõpuks termaalne metaan. Naftast tekib maakoorest või selle pinnal omakorda eri konsistentsi ja keemilise koostisega looduslikke saadusi.

Naftiidid ehk naftarea kaustobioliidid leiavad, nii nagu varem vaadeldud taimed, sapropeliidid, liptobioliidid ja humiidid, kasutamist kütusena ja keemiatööstuse toorainena. Taimed ja kaustobioliidid on ka mitmesuguste gaas-, vedel- ja tahkekütuste lähtematerjaliks. Kui esitada vaid kütuste klassifitseerimise põhimõtted koos näidetega, oleks kütused jagatavad järgmistesse gruppidesse:

1. **Abiogeensed:** olid Maal enne eluteket või tekkisid hiljem maakera sügavimates kihtides abiogeensetest lähtematerjalidest abiogeensete protsesside toimel (põhimõttest lähemalt: Veski, 1988a).

Joonis 2. Üldine looduslike tahke-, vedel- ja gaaskütuste geneetiline klassifikatsioon

Figure 2. Universal genetic classification of natural solid, liquid and gaseous fuels

Seni pole usaldusväärset tõestatud, et kas või osa kasutusel olevast naftast oleks abiogeense päritoluga.

2. **Organismide biomass.**
3. **Kaustobioliidid** (vt joonis 2).
4. **Kunstlikud:** need saadakse (üksiknäidetega):
 - a) **mehaaniliste protsesside abil:** puidu-, turba- ja pruunsöebrikett, põhupallid, hakkpuit jt;
 - b) **füüsikaliste protsesside abil:** kütuste termilise töötamise saadused (põlevkiviõli ja -gaas, kiviõkoks, nafta destilleerimissaadused jt);
 - c) **keemiliste protsesside abil:** metanool, sünteesvedelkütus, plastmassijäätmed jt;
 - d) **inimtekkelistes geoloogilistes moodustistes:** põlevmaterjali sisaldavate aherainemägede, turbaaunade isesüttimisel tekkiv õli ja poolkoks. Orgaanilise materjali turvastumine prügimägedel biogaasi tekkega (vt ka Veski, 1999);
 - e) **bioloogiliste protsesside abil:** metaanitankis saadav biogaas, bioetanool jt.

Tavaliselt valmistatakse kunstlikke kütuseid mitmeid protsesse kombineerides. Näiteks on vaja biodiislikütuse (või bioloogilise diislikütuse) valmistamisel pressida rapsiseemnetest mehaaniliselt teel õli välja, see omakorda katalüsaatorite abil esterdata. Kütusena kasutatakse ka jäätmeid, mis ei teki kütusetööstuses. Jäätmeid ei saa taastuvateks lugeda juhul, kui need tekivad taastumatutest ressurssidest.

Meie ettekujutus kütuste klassidest on eelpool toodu põhjal sajandite jooksul tugevasti muutunud. Seejuures iga varem väljatöötatud terminoloogiline süsteem ja põhimõtted, mida anti edasi hariduse teel ja kirjanduse kaudu, on olnud eelmistest tavaliselt teaduslikus mõttes täpsemad, kuid on samas olnud "tõe monopolina" (entsüklopeediad, õpikud, monograafiad jm) takistuseks uute seisukohtade tekkimisel. Autor loodab, et käesolev arutelu aitab paremini aru saada olukorrast kütuste klassifitseerimisel ja ei ole takistuseks teema edasisele arendamisele.

Kirjandus ✕ **References**

1. Aarna, A. (1989) Põlevkivi. Valgus. Tallinn: 143.
2. Aarna, A., Kask, K., Reier, A., Öpik, I. (1954) Põlevkivi. Eesti Riiklik Kirjastus. Tallinn: 190.
3. Aavakivi, R. (1900) Meie maakera minevik. Trükitud väljaandja kuluga. Jurjev (Tartu): 51 (Teaduslik kirjakogu).
4. Dobrjanski, A. F. (1947) Oil Shales of USSR. Gostoptehizdat. Leningrad, Moscow: 232 (In Russian).
5. Ginzburg, A. I. (1969) Organic matter of petrographic types of oil shales. *Litology and Mineral Resources*. 4: 39–52 (In Russian).
6. Kalkun, J. (1921) Mineraloogia käsiraamat. Kiviriigi õppimiseks. III täiendatud trükk. G. Pihlakas & Poeg. Tallinn: 164.
7. Kark, J. (1940) Mineraloogia õpperaamat. Teaduslik Kirjastus. Tartu: 287.
8. Kaustobioliidid (1989) *ENE*, 4: 411–412.
9. Kunder, J. (1878) Maakera elu ja olu. Õpetlik raamat koolile ja kodule. Schnakenburgi trükk ja kulu. Tartu: 72 (Eesti Kirjameeste Seltsi Toimetused, nr 23).

10. Kunder, J. (1885) Looduse õpetus. Koolmeistritele, koolidele ja iseõpetuseks. Kolmas raamat: Kivide (mineraalide) riik. Piltidega. Schnakenbergi trükk ja kulu. Tartu: 60 (Eesti Kirjameeste Seltsi toimetused nr 21).
11. Kuusk, J. (1928) Keemia ja mineraloogia keskkoolidele. V täiendatud trükk. Tallinn: 287.
12. Kütus (1990) EE, 5: 343–344.
13. Levin, A. C. (1982) Fundamental Questions of Oil Shale Deposits. Nauka. Moscow: 80 (In Russian).
14. Ojaste, K., Reier, A., Mens, K. (1964) Kristallograafia. Mineraloogia. Petrograafia. Eesti Riiklik Kirjastus. Tallinn: 463.
15. Veiderma, A. (1932) Keemia ja mineraloogia. K.-Ü. "Loodus". Tartu: 136.
16. Veiderma, M., Mölder, L. (1970) Toimetaja K. Help. Tähtsamate keemiasaaduste tehnoloogia. Valgus. Tallinn: 286.
17. Veski, R. E. (1982) Pedology and science on biotic systems. Soviet Soil Science. 12: 18–25 (In Russian, summary in English).
18. Veski, R. (1983a) Mis on muld? 2. Mis saab mullast, kui taim temast eemaldada? Eesti Loodus. 9: 556–561 (In Estonian, summary in English: What is soil? Part 2).
19. Veski, R. (1983b) On the abiogenic, living and dead matter in biogeology and in V. I. Vernadsky's theory of biosphere. Proc. Ac. Sc. Estonian SSR. Chem. 32(1): 70–77 (In Russian, summaries in English and Estonian).
20. Veski, R. (1986) A more generalized understanding of the term "oil shale". Oil Shale 3(2): 113–120 (In Russian, summary in English).
21. Veski, R. (1988a) Natural and artificial organic reactions in the biosphere and noosphere. Proc. Ac. Sc. Estonian SSR. Chem. 37(2): 136–139 (In Russian, summaries in English and Estonian).
22. Veski, R. E. (1988b) Black and carbonaceous shales and their relation with oil shales. Oil Shale 5(2): 153–159 (In Russian, summary in English).
23. Veski, R. E. (1991) Ed. by A. E. Kontorovich, S. F. Bakhturov, Yu. N. Zanin. Organic formations in the earth crust and black shales. International Symposium *Black Shale Basins and Related Mineral. Deposits*. Abstracts. Vol. I. Novosibirsk: 316.
24. Veski, R. (1999) Landfill as a man-made peat deposits. Eesti Turvas/Estonian Peat. 1–3:12.
25. Veski, R. E., Taal, H. A., Sidorova, S. M., Pobul, L. Ya., Bazarova, O. A. (1990) Oxidative and thermooxidative destruction of sapropelites of the metamorphism series. Reports of Ac. Sc. Ukrainian SSR. Ser. B. Geology, Geophysics and Biology. 2: 41–44.

GENETIC CLASSIFICATION OF FUELS

Rein Veski

Peat Info Ltd., e-mail: rein.veski@mail.ee

Abstract

As an addition to our genetic classifications of caustobioliths (Veski, 1986; 1988b, 1991) carbon-based fuels are classified more widely as of: (1) abiogenic (which were the only genetic type of hydrocarbons and related compounds in prebiological Earth, see also Veski, 1988b; 1988a); (2) biomass of phototrophic and heterotrophic organisms; (3) caustobioliths; and (4) processed ones. Caustobioliths are divided after H. Potonié according to the type of plant biomass as: (1) sapropeliths (from biomass of lower phototrophic aquatic plants); (2) liptobioliths (from the most stable residue of decomposed higher land plants, such as waxes, resins, spores etc.), (3) humites (from the biomass of partially decayed higher land and swamps plants); and naphtides (naphta and its derivatives). The most caustobioliths are of mixed origin.

When buried, the secretions and remains of organisms first pass the soil stage (the upper layer of the zone of weathering, in Fig. 2 *mullastaadium*). In soil stage (Veski, 1982, 1983a) lower plant and roots of higher plants are in mutual action with the substrate. The next stage is microbial (*mikroobistaadium*) which is determined by living heterotrophs, in its lower part only by microorganisms which are not in the state of anabiosis. These two stages specify the upper part of the known peat stage (*turbastaadium*). The following stages are widely known.

Processed fuels are divided as mechanically, physically, chemically, geologically (formed in man-made geological depositions, for example, Veski, 1999), and biologically processed fuels, in most cases by combining the mentioned levels.

METSAKASUTUSE SÄÄSTLIKKUSEST

Avo Rosenvald

OÜ Rosenvald & Pojad, Riia 38, 50405 Tartu, e-post: avo@oluts.tartu.ee

Annotatsioon

Artiklis püütakse hinnata küttepuidu tagavara Eestis ning selle tegelikku kasutamist. Lähemalt vaadeldakse hakkpuidu valmistamist valgustusraide, teeäärte ja elektriliinide võsast ning selleks sobivaid masinaid.

VÕSA, HAKKPUIT, SÄÄSTLIKKUS

Viimastel aastatel maailmas levinud säästva metsamajanduse kontseptsioon rõhutab metsa igakülgset kasutamist. Küttepuu metsajätmine praeguses Eestis on selle põhimõtte järsk rikkumine. Sama lugu on saetööstuse jäätmetega. See võib saada oluliseks takistuseks sertifitseerimisel. Küttepuu raiumisel on eelised kõigis kolmes metsaga seotud olulises valdkonnas. Majanduslik kasu seisneb selles, et tarbepuu pääseb paremini kasvama ning kütuste import väheneb; ökoloogiline kasu väljendub Eesti kui terviku saastetaseme vähendamises; sotsiaalne kasu on rohketes töökohtades. Nagu näeme, on ainult esimene valdkond praktiliselt metsaga seotud, teised kaks annavad üleriigilist, otseselt metsasse mittepuutuvat kasu. Seetõttu ei ole kahjuks metsamehed ise probleemi lahendamisest erilisel huvitatud. Lahendus saabki tulla eelkõige valitsuse ja paljude huvigruppide koostöös.

Kõigepealt oleks tarvis teha selgeks, kui palju me ikkagi võiksime küttepuuresurssi kasutada aastas. A. Nilson pakub 1,1–1,7 mln tm riigimetsades (Nilson, 1994). H. Tulluse arvates võiks kogus kasvada kogu Eesti kohta 3–3,5 mln tm-ni (Tullus, 1994). P. Muiste saab selleks arvuks samuti u 3,5 mln tm, kui raiuda ka seni puutumata võsa-alasid. Muiste nimetab kümmekond väga olulist faktorit, millest küttepuukasutus sõltub (Muiste, 2000). "Eesti statistika aastaraamatust 2000" loeme must valgelt: küttepuukasutus oli 1997. a 3,479 mln tm, 1998. a 3,087 mln tm ja 1999. a 3,059 mln tm. Siia on kokku arvatud nii halupuu kui hakkpuit. Nendest arvudest peab järeldama, et prognoosid olid liiga ettevaatlikud. Tarbepuu raiet tuleks praegu vähendada, küttepuu väljaraiet suurendada.

1997. a rahuldab puit juba 10% kogu Eesti energiabilansist. Kütuse- ja energiamajanduse riiklik arengukava (Kütuse- ..., 1998) näeb biokütuste osa tõusu 11%-ni 2005. aastaks. Näeme, et majandusministeeriumi kavandatud biokütuste osa tõus on lubamatult aeglane. 1997. aastast alates on tegelik tõus peatunud. Allakirjutanu arvates on hädavajalik avaldada kolmanda sektori poolt tugevamat survet valitsusele, Riigikogule (seaduseelnõu projekt!) ja poliitilistele parteidele, et kehtestataks kõrgemad saastemaksud fossiilkütustele ja võimaluse korral soodustus taastuvkütustele. See on poliitiline otsus, mida ei saa lahendada majandusministeerium üksi. A. Koppel soovib kehtestada strateegiline maks sisseveetavatele kütustele (Koppel ja Ross, 1994). Näiteks Taanis põletatakse palju põhku, sest niisugune on

valitsuse poliitiline otsus ja ta on teostanud selle vastavate soodustuste ja maksudega. Metsameeste levinuim väide hakkpuidu kasutamise vastu on, et toorme eest makstakse liiga vähe. On tõsi, et müügihind kipub olema madalam omahinnast. Laias laastus on keskmine omahind 120 kr/tm, müügihind 100 kr/tm. Arvan, et kui valitsus avab "ülaltpoolt" kütturetu, lähevad nõudluse kasvu tõttu hinnad ise paika.

Aastate jooksul on näha, kuidas küttepuidu turu sees toimuvad ebaloomulikud nihked. Kümnendi algul müüsid suured metsafirmad oma küttepuu põhiliselt hakkpuidu toormeks, nüüd aga müüakse osa vahendajatele, kes teevad nad halupuudeks ning müüvad edasi eraisikutele. Halb on see sellepärast, et nii aheneb talumeeste ja väikeste metsafirmade müügivõimalus.

Suur kitsaskoht Eesti metsades on valgustusraide vähesus ja seda mitte ainult erametsades. Probleem on selles, et see on kallis töö ega anna esialgu sentigi tulu, küll aga annab suurt kasu tulevikus. Asja parandaks see, kui hilinevad valgustusraide puhul, kus raiutav võsakogus on suur, kasutataks osagi raiutavast materjalist hakkpuidu tooraineks. Selleks on muidugi vaja spetsiaalset masinat ja veidi käsitööd, samuti väljaveoteede olemasolu. Siin saaks kasutada hädaabitöölisi, kusjuures nende tasu võiks olla senisest hoopis kõrgem, sest raha võiks tulla mitte ainult sotsiaalfondist, vaid ka hakkpuidu hinnast.



Joonis 1. Võsahakkur töö Tartu maakonnas Saarel A. Koppeli eestvedamisel rajatud energiavõsa proovitiikil 1998. a

Figures 1. A coppice chipping machine at work at Saare in 1998, in a test field of energy coppice, initiated by A. Koppel

Teine hästi kättesaadav küttepuureserv on teeääred, kraavikaldad, kvartalisihid ning elektriliinid. Suured summad kulutatakse sealt võsa niitmiseks ja raiumiseks kas iga aasta või harvem; kui see võsa hakkeks teha, tuleks töö kokkuvõttes kindlasti odavam.

Praktiliselt on see võimalik kahel viisil. Esimene võimalus oleks Rootsis toodetavate energiavõsa koristuskombainide kasutamine. Kui teeäär või siht eelnevalt üle kontrollida, et seal poleks kive, kände, auke ega liiga suurt kallet, siis võiks neid kohti majandada energiavõsapõlluna. Ilma mingi kultiveerimiskuluta võiks mõne aasta tagant teeservad üle käia. Kombain sõidaks tee kõrval, käruga traktor või auto teel.

Võsakombaini tööd näeme fotodel 1 ja 2, kus Rootsi kombain lõikab 1998. a Tartu maakonnas Saarel asuvat A. Koppeli eestvedamisel loodud energiavõsa katsetükki. Masin proovis lõigata ka tavalist võsa ja see õnnestus täiesti. (Esimesel fotol laseb masin hakke maha, sest ei olnud jäänud küllalt ruumi teise traktori jaoks tara ja võsa vahele.)



Joonis 2. Võsahakkur tööel Tartu maakonnas Saarel A. Koppeli eestvedamisel rajatud energiavõsa proovitükil 1998. a

Figure 2. A coppice chipping machine at work at Saare in 1998, in a test field of energy coppice, initiated by A. Koppel

Teine võimalus on langetada võsa võsalõikajaga, panna käsitsi hunnikutesse ning hakkida spetsiaalse iseliikuva võsahakkuriga, mis viib hakke ise katlamajja. Sellist masinat näeme töös fotol 3. Foto on tehtud Saaremaal, kus masin töötab juba aastaid. See on võimeline korjama oksti, võsa ja latvu nii hunnikust kui vaaludest. Loomulikult sobib see hakkur ka lageraide oksavaalude hakkimiseks. H. Tulluse arvates võib oksad enamasti metsast ära vedada, ainult väga lahjadel muldadel ei sobi seda teha (Tullus, 1994).

Eeltoodud viisidel võsa kasutamine annaks kindlasti olulise kokkuhoiu, sest millalgi tuleb neist kohtadest niikuinii võsa raiuda. Energiavõsa kohta ütleks siin niipalju, et hädavajalik oleks riigi abiga jätkata katsetusi, et saaksime vajadusel suurtootmist alustada. Vajadus tuleb siis, kui loodusliku võsa potentsiaal on ära kasutatud.



Joonis 3. Iseliikuv käruga puiduhakkur töö Saaremaal metsas

Figure 3. A wood chipping machine with a self-moving barrow at work in forest in Saaremaa

Veel tuleks mõelda sellele, kuidas majandada lepikut. Lepikut ei ole otstarbekas mõne aasta tagant niita, sest ta on 15–20 aasta jooksul tugeva kasvuga ning siis saab tast juba saepalki. Praegu juba plaanitakse Läänemaal halli lepa palgi saeveskit. Otstarbekaim tundub olevat lõigata mõneaastasesse lepikusse koridorid võsakombainiga või käsitsi, teha see hakkeks ja lasta ülejäänul kasvada metsaks. 20-aastast leppa on igatahes palju kasulikum müüa palgiks kui kütteks (Tullus jt, 1998).

Siinkohal juhiksingi tähelepanu sellele, et säästlik metsakasutus tähendab alati võimaluse korral tarbepuu kasvatamise eelistamist küttepuule, sest esimesed on majanduslikult, esteetiliselt ja ökoloogiliselt (pika ea tõttu) kasulikumad (Reisner, 1997). Eriti on Eestis vaja pöörata tähelepanu kuusele ja männile, sest kask tuleb niikuinii. Kui lepikusse on kasvanud kuuske, tuleb see järk-järgult kindlasti avada valgusele. A. Nilson märgib, et tarbepuu kõrvalt tasub küttepuu maha võtta isegi siis, kui see vaid mõne protsendi võrra kiirendab tarbepuu kasvu (Nilson, 1994). Eesti esimene FSC-sertifikaadi omanik L. Laks imestab, et lepikus võib samavanuste kuuske pikkuks erineda kaks korda (Aitsam, 2000). Allakirjutanu on korduvalt näinud paarikümneaastastes noorendikes ühevanuseid kuuski kuni kümme korda erineva pikkusega. See on muidugi lubamatu raiskamine.

Eelpool sai puudutatud põhiliselt neid säästliku metsakasutuse võtteid, mis on seotud küttepuuga. On veel palju muid kasutamata võimalusi, mida tuleks rakendada (kraavikaldad metsastada, peen okaspuid senisest hoopis rohkem eksportida postina jm).

Taastuvate energiaallikate kasutuselevõtu pooldajate ülesandeks jäävad paralleelselt praktiliste võimaluste uurimine ja katsetamine ning tõhus selgitustöö avalikkuse, riigiorganite ja poliitikute keskel. V. Varese sõnul on biokütuste kasutuselevõtuks suurim lootus selles, et Eestis on palju vastava ala entusiaste.

Kirjandus ✕ References

1. Aitsam, V. (2000) Mets nagu muinasjutt. Maaleht 26. okt: 5.
2. Koppel, A., Ross, J. (1994) Eesti-Rootsi energiametsa projekt. Energiavõsa kasvatamine ja kasutamine. Konverentsi materjalid. Koost. Ross, V. Eesti TA Zooloogia ja Botaanika Instituut. Tartu: 14–21.
3. (1998) Kütuse- ja energiamajanduse pikaajaline riiklik arengukava. Riigi Teataja I, 19, 295.
4. Muiste, P. (2000) 21. sajandi perspektiivsem kütus kasvab metsas. Eesti Mets (3): 16–18.
5. Nilson, A. (1994) Küttepuidu varumisest Eesti riigimetsas. Energiavõsa kasvatamine ja kasutamine. Konverentsi materjalid. Koost. Ross, V. Eesti TA Zooloogia ja Botaanika Instituut. Tartu: 48–50.
6. Reisner, V. (1997) Kasvuhoonegaaside emissiooni vähendamise võimalusi. Teadustööde kogumik 189. Metsandus. Koost. Kiviste, K. EPMÜ Metsandus-teaduskond. Tartu: 252–254.
7. Tullus, H. (1994) Puidukütte perspektiivid Eestis. Energiavõsa kasvatamine ja kasutamine. Konverentsi materjalid. Koost. Ross, V. Eesti TA Zooloogia ja Botaanika Instituut. Tartu: 46–47.
8. Tullus, H., Uri, V., Lõhmus, K., Mander, Ü., Keedus, K. (1998) Halli lepa majandamine ja ökoloogia. Kogumik. Koost. Uri, V. EPMÜ Metsakasvatuse Instituut. Tartu: 20.

ECONOMICAL FOREST UTILIZATION

Avo Rosenvald

OÜ Rosenvald & Pojad, e-mail: avo@oluts.tartu.ee

Abstract

According to various estimates, the Estonian forests hold 1 million to 3.5 million solid cubic meters of firewood for yearly usage. In reality, the usage was 3.479 million solid cubic meters already in 1997. However, every forester knows that an excessive amount of firewood, cutting waste, waste from lumber industry and coppice is still left over. Hence, the estimates were too modest, and the potential for usage is considerably greater. Instead of expensive cutting of the coppice on roadsides and along overhead lines, the coppice ought to be used as wood chips for heating and generating electricity. On the isle Saaremaa, there is an efficiently operating machine for both chipping coppice and branches (as versus trunks), as well as for transporting chips into towns. Unfortunately, the use of chipped wood is not encouraged through legislation, the way it is in Europe and especially in the Nordic countries.

TAASTUVATE ENERGIAALLIKATE RESSURSID JA KASUTAMINE EESTIS

Tanel Lukason

Tartu Ülikool, Geograafia instituut, Vanemuise 46, 51014 Tartu
e-post: oliverl@ut.ee

Annotatsioon

Artiklis antakse ülevaade taastuvate energiaallikate ressurssidest ja nende kasutamisest Eestis ning analüüsitakse võimalusi imporditavate kütuste asendamiseks kodumaistega.

PUIT, TURVAS, MUUD TAASTUVAD KÜTUSED

Sissejuhatus

Aastatel 1998–2000 uuriti erinevate energiaallikate ressursse ja kasutamist elektri ja soojuste tootmisel nii Eestis tervikuna kui ka maakonniti. Taastuvate energiaallikate hulka on antud artiklis loetud puit ja muu biomass ning jäätmed ja nendest saadav biogaas. Artiklis on käsitletud ka turba ressursse ja kasutamist, kuigi pika taastumistsükli tõttu puudub ühtne seisukoht turba kui taastuva/taastumatu energiaallika osas. Teiste taastuvate energiaallikate (tuule-, hüdro- ja päikeseenergia) kasutamist pole artikli piiratud mahu tõttu käsitletud.

Kuna soojusenergia tootmiseks kasutatud importkütuste (eriti naftaproduktide) hind on oluliselt tõusnud, on kerkinud esile vajadus kasutada katlamajades rohkem kodumaist toorainet. Eestis on olemas ulatuslik taastuvate energiaallikate varu. Ka elektrienergia hind on pidevalt kallinenud ning valitsuse poolt loodud soodustused alternatiivsete energiaallikate kasutuselevõtuks annavad soodsa võimaluse päikese-, hüdro- ja tuuleenergia, jäätmete ning biomassi baasil elektrit toota. Samas pole soodustust rakendatud turbale.

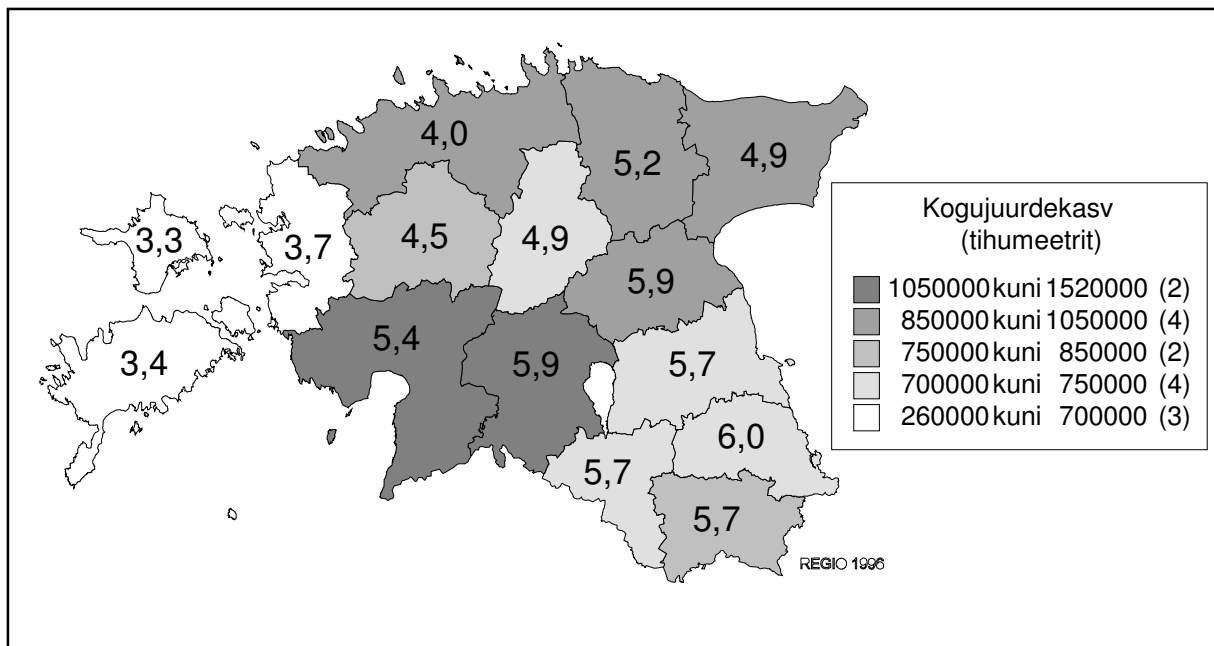
Taastuvatest energiaallikatest kasutatakse Eestis enim puitu ja turvast. Vastavate energiaallikate ressurssidest, kasutusest ja potentsiaalsetest kasutusvõimalustest maakonniti annavadki ülevaate joonised 1–5. Joonisel 4 on esitatud 1998. aastal Eestis kasutatud kütuste osatähtsused maakondade kütuste kogutarbest. Joonisel 5 on toodud kohalike taastuvate kütustega kaetav osa kogutarbimisest maakonniti.

Puit

Eestis on üle 2 miljoni hektari metsamaad, mis moodustab umbes 47% maismaast. 1999. a oli Eesti Statistikaameti andmetel puistute üldvaru 352,7 Mtm ja keskmine hektarivaru 171 tm/ha. Suuremad metsavarud on koondunud Pärnu-, Lääne-Viru-, Ida-Viru-, Viljandi- ja Harjumaale. Neis maakondades on ka metsamaa pindala suurim. Väike on metsavaru Lääne-Eesti maakondades.

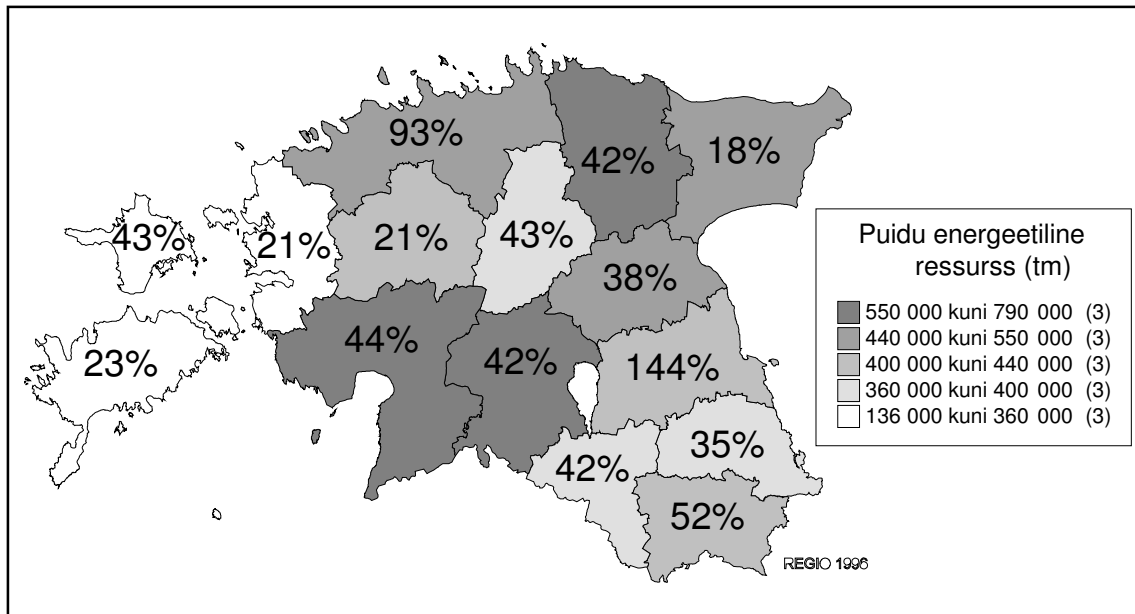
Keskmiseks juurdekasvuks Eesti metsades on hinnatud 5 tm/ha/a ning kogujuurdekasvuks 10–12 miljonit tm/a. Samas on tegemist hinnangu või prognoosiga ning täpne

juurdekasv pole teada. Välja on pakutud isegi veel suuremat juurdekasvu. Joonisel 1 on näidatud erinevate toonidega puidu kogujuurdekasvud väärtusvahemikena maakonniti ning hektarijuurdekasvu näidud (Metsakorralduskeskuse andmed) iga maakonna kohta. Nagu kaardilt näha, asuvad tootlikumad metsad põhiliselt Lõuna-Eestis, kus kõikjal on keskmine juurdekasv üle 5 tm/ha/a. Küllalt väike on juurdekasv saartel. Kogujuurdekasvud on suurimad samuti Pärnu-, Viljandi-, Lääne-Viru-, Ida-Viru- ning Harjumaal, kus ka metsavaru on suurim.



Joonis 1. Puidu juurdekasv metsamaal (tm/ha/a)
 Figure 1. Increase on forest land ($m^3/ha/yr$)

Kuigi puidu juurdekasv on suur (10–12 Mtm/a), ei ole võimalik kõike seda kasutada. Riigi metsapoliitikas on aluseks võetud, et raiuda tohib vaid 7,8 Mtm/a. Lisaks pole kogu seda puidukogust võimalik ja mõtet kasutada vaid energeetikas. Energeetikas sobib kasutada mittelikviidset puitu (osaliselt tüvepuu, oksad, ladvad, puukoor) ning puidutööstuse jäätmeid (saepuru, laastud, pinnud, servad). Lisaks puistute puiduvarule lisandub energeetilise puidu hulka ka ulatuslik võsa, mille puiduvaru on hinnatud olevat üle 15 Mtm. Võsa kasutatavaks mahuks on võetud 1,0–1,5 Mtm/a, mille on välja pakkunud mitmed eksperdid. Summaarne energeetiline puiduressurs Eestis on seega umbes 6–7 Mtm. Vastava ressursi jagunemine maakonniti ongi esitatud joonisel 2 erinevate värvitoonidega. 1998. a kasutati energeetiliseks otstarbeks ära vaid 3,1 Mtm puitu. Seega on energeetilise puidu varu suur. Protsentidena on kaardi peal esitatud maakondade energeetiliseks otstarbeks kasutatavad puidukogused võimalikust maakonna vastavast ressursist. Eriti väike on vastav näit Ida-Viru-, Lääne-, Rapla- ja Saaremaal (u 20% ressursist). Vaid Tartumaal tarbitakse seda üle võimaliku ressursi. Siiski pole maakonnapiir nagu riigipiir. Küttepuidu vedudel pole maakonnapiir mingi takistus, kuigi ka väga kaugelt ei tasu vedada. Tegelikult tarbitakse näiteks Tartumaal ka naabermaakondadest sisseveetud puitu.



Joonis 2. Energeetiliseks otstarbeks kasutatud puidu osatähtsus energetilisest ressursist (1998. a)

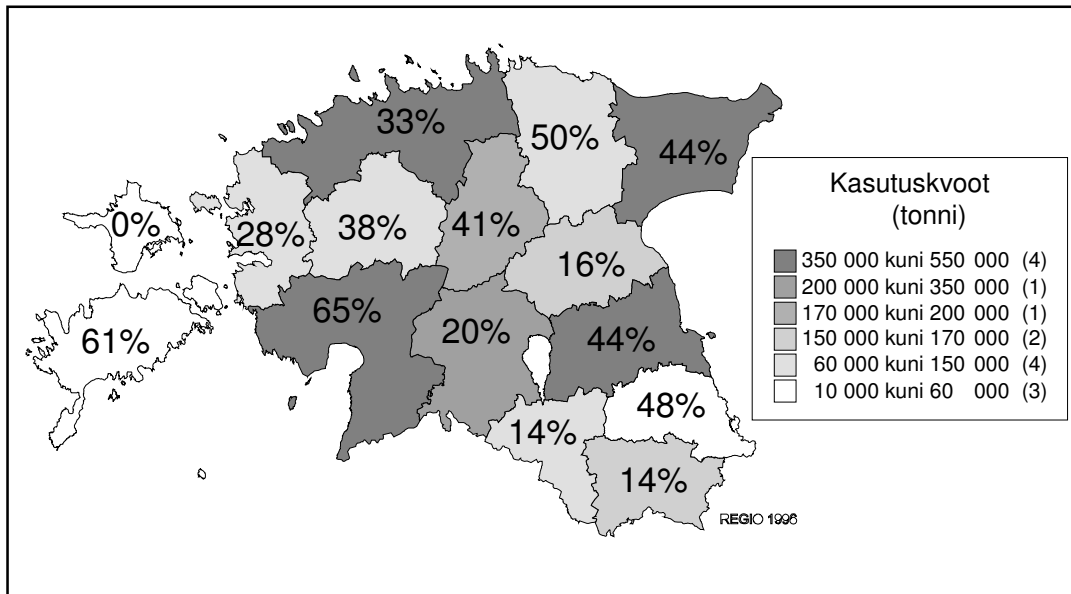
Figure 2. Percentage of wood (from energetical resource) used for energetical purposes (in 1998)

Turvas

1999. a alguse seisuga oli Eesti turbavarude üldhulk Geoloogiakeskuse andmetel umbes 2,3 miljardit tonni. Sellest aktiivne ehk kasutatav varu moodustas 1,45 miljardit tonni ning passiivne ehk mittekasutatav varu 850 Mt. Antud varu on arvatud turba maardlate kohta ning arvesse on võetud turbamaardlad pindalaga vähemalt 10 ha ning turbakihi paksusega madalsoos vähemalt 0,9 m, siirdesoo 1,1 m ning rabas 1,2 m. Suurimad kasutatavad turbavarud on koondunud eeskätt Pärnumaale, aga ka Ida-Viru-, Harju- ja Järvamaale. Pärnumaal on lisaks väga suur osa turbast mittekasutatav. Väike on turbavaru saartel.

Eesti Vabariigi valitsus kehtestas 1996. a turba kaevandamise aastased kvoodid nii kogu vabariigi (2,78 Mt) kui ka eraldi maakondade lõikes. Vastavad kvoodid määrati maakondadele 2006. aastani. Joonisel 3 ongi esitatud erinevate värvitoonidega maakondadele määratud kasutuskvoodid väärtusvahemikena. Nagu kaardilt näha, on suuremad kasutuskvoodid antud Pärnu-, Ida-Viru-, Harju- ja Tartumaale. Kolmes esimeses maakonnas on ka aktiivne turbavaru suurim, erinevus on aga selles, et Tartumaale, kus on väiksem kasutatav turbavaru, on antud oluliselt suurem tootmiskvoot kui Järvamaale. Lisaks tootmiskvoodile on kaardil esitatud ka protsentidena 1996. a toodangu kogused kvoodist. 1996. a andmetega võrdleme kvooti põhjusel, et siis oli turbatootmine tunduvalt suurem kui 1998. a (1999. a regionaalsed andmed puudusid). Nagu kaardilt näha, on kvoodist enim täidetud Pärnumaal, Saaremaal ja Lääne-Virumaal. 1996. a ei toodetud Hiiumaal üldse turvast. Nüüdseks on olukord aga muutunud ja sealgi on turvast tootma hakatud. Kokkuvõttes on turba tootmiskaht Eestis siiski veel küllalt väike ning tootmist on võimalik oluliselt suurendada. Eeskätt peaks see

huvitama energeetikasektorit, kuna valdav osa turbast moodustab kütteks sobiv hästilagunenud turvas (u 85%).



Joonis 3. Turba tootmise osatähtsus kvoodist 1996. a
Figure 3. Percentage of peat production from the quota in 1996

Taastuvate kütuste tarbimine maakonniti

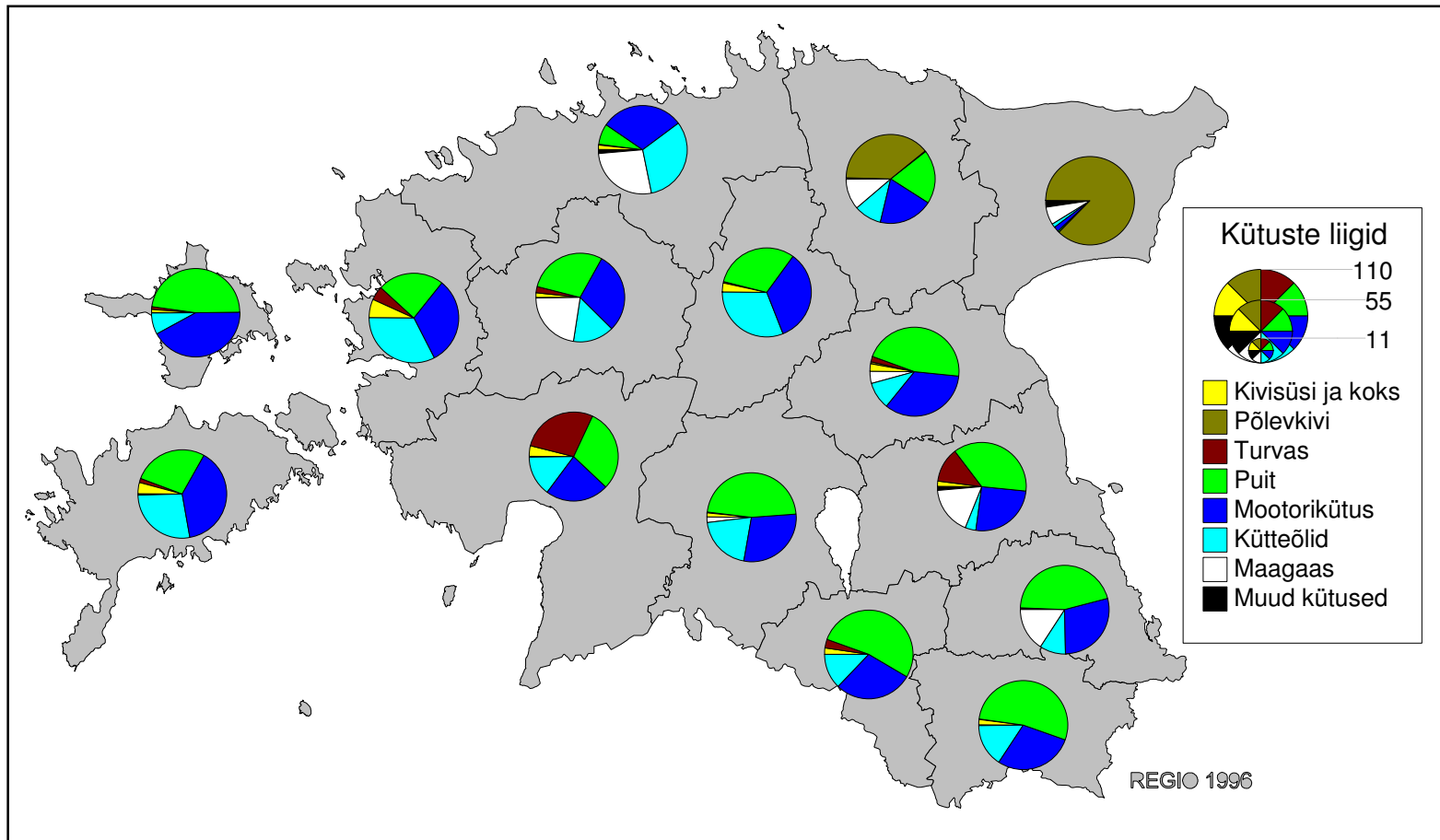
Joonisel 4 on esitatud sektordiagrammidena ülevaade kõigist Eestis kasutatavatest kütustest maakonniti 1998. a. Praeguse olukorra kirjelduseks võetud 1998. a andmed on kõige hilisemad, mis oli võimalik saada Statistikaametist. Käesolevas artiklis pööratakse peatähelepanu taastuvatele energiaallikatele.

Analüüsitavaatest taastuvatest kütustest kasutatakse Eestis enam puitu ja turvast. Puidu osatähtsus Eesti energiabilansis on umbes 10%. Turba osakaal on viimastel aastatel sõltuvalt muutlikust ilmastikust olnud 1–2% piires.

Olukord on oluliselt muutunud võrreldes ENSV aegade, kui valitses suurtootmine ning kütused olid odavad ja veeti enamasti sisse. Mitmete välislaenu ja toetuste tulemusena on nüüdseks paljud katlamajad üle viidud kas täielikult või suures osas puiduküttele. Enamikus maakondades on puit seega tõusnud tähtsaimaks katla- või ahjukütuseks, ulatudes Valga- ja Võrumaal isegi üle 50% maakonna kütuste kogutarbest.

Vaid Põhja-Eesti maakondades ja Läänemaal on muud kütused tähtsamad. Turba osakaal oli 1998. a ilmselt vihmase suve tõttu väike, enamikus maakondades vaid kuni paar protsenti. Vaid turbatootmise keskustes Tartu- ja Pärnumaal oli turba osakaal märkimisväärne – Tartumaal üle 10% ning Pärnumaal ligikaudu 25%.

Biogaasi, mis on kaardil paigutatud kütuste gruppi “Muud kütused”, toodeti ja tarbiti 1998. a vähe, vaid Harjumaal Tallinnas.



Joonis 4. Kütuste tarbimine Eestis maakondade lõikes 1998. a
Figure 4. Usage of fuels in Estonian counties in 1998

Muude taastuvate energiaallikate ressursid ja kasutamine Eestis

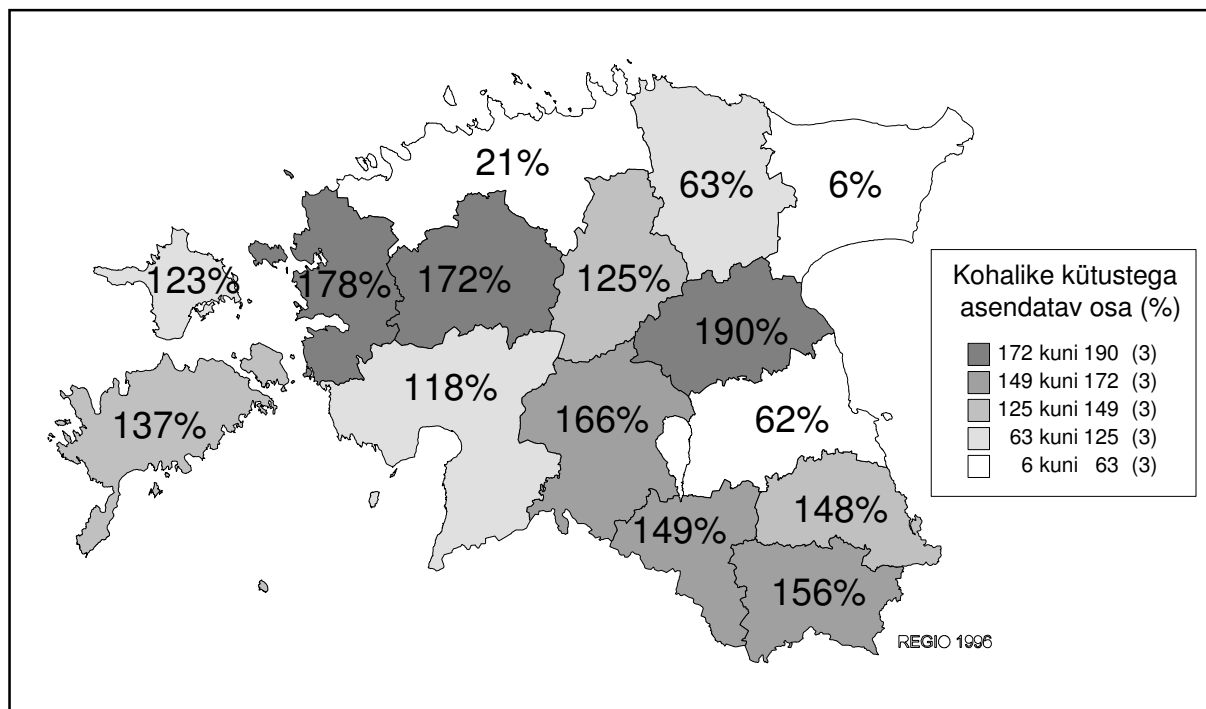
Jäätmed: võimalik põletamiseks sobiv jäätmete kogus aastas on umbes 1,4 Mt (11,8 PJ). Antud jäätmekoguse hulka pole arvestatud puidujäätmeid (vt puiduosa).

Biogaas: aastas jäätmetest eralduv biogaasi kogus on 35 Mnm³ (0,63 PJ) + umbes 64 Mm³ (1 PJ) on võimalik saada loomade-lindude sõnnikust. Antud jäätmetest saadav potentsiaalne biogaasi kogus ei hõlma mitmeid Eesti prügilaid ning teadmata on ka võimalikud veepuhastusjaamade jääkmuda kogused, millest biogaasi saaks toota. Seega potentsiaalne biogaasi kogus on orienteerivalt 2 PJ aastas, samas pole ka kõik see kasutatav. Biogaasi kasutatakse praegu soojusenergia tootmiseks vaid Tallinnas.

Põhk: liigse põhu ressursiks Eestis on hinnatud orienteerivalt 100 000 t/a (1–1,5 PJ). Kütusena on võimalik kasutada ka energiaheina ning pilliroogu.

Kokkuvõte

Joonisel 5 on kokkuvõtlikult esitatud potentsiaalne kõikide taastuvate kütustega asendatav osa maakondade katlakütuste kogutarbest. Värvitoonidega on eristatud väärtusvahemikud ning esitatud ka asendusvõimalused protsentides. Et ressursse puudutavad andmed pole päris täpsed (eriti jäätmeid ja põhku



Joonis 5. Võimalused katlakütuste kogutarbe katmiseks kohalike taastuvate kütustega
Figure 5. Possibilities for replacing boiler fuels with local renewable fuels

puudutavad), siis ei saa neid protsente võtta kui absoluutselt täpsed andmeid, vaid pigem suurusjärke. Tegelikud maksimaalsed asendusvõimalused on veelgi suuremad, samas pole aga kogu seda ressursi võimalik või otstarbekas kasutada.

Nagu kaardilt näha, suudaks enamik maakondi katta katlakütuste vajaduse oma taastuvate ressurssidega. Puudu jääb ressurssidest vaid Põhja-Eesti maakondades ja Tartumaal, kuhu on koondunud ka Eesti põhiline rahvastik ja tööstus. Kuna Ida-Virumaal toodetakse põlevkivi baasil elektrienergiat peaaegu kogu vabariigile ja müüakse välismaalegi, siis on seal kütuste kogutarve suur. Kütuste asendusvõimaluste väike näit (6%) ei kajasta selle maakonna spetsiifika tõttu tegelikke võimalusi omatarbe katmiseks kohalike taastuvate kütustega. Tegelik kogutarbe katmisvõimalus on kindlasti mitu korda suurem.

Kirjandus ✕ **References**

1. Energiabilanss 1998 (1999) ESA. Tallinn: 18–25.
2. Kallas, R. Turba säästev kasutamine. Eesti turvas, talv 97/98: 17.
3. Lukason, T. (2000) Energiaallikad ja nende kasutamine Eestis. Bakalaureusetöö. Käsikiri. TÜ Geograafia instituut. Tartu: 88 lk.
4. Metsamajandus 2000, 1. ESA. Tallinn: 11–13.

THE RESERVE AND USAGE OF RENEWABLE ENERGY RESOURCES IN ESTONIA

Tanel Lukason

Institute of Geography, Tartu University, e-mail: oliverl@ut.ee

Abstract

This paper gives an overview of renewable energy resources (biomass, waste, biogas, peat), about their consumption and possible ways of usage in Estonia. The existing reserve of the above mentioned energy resources is big and using them would cover the boiler fuel consumption in most of the counties. Only in North-Estonian counties (Harjumaa, Lääne-Virumaa, Ida-Virumaa) and in Tartumaa there would be a lack of local energy resources.

SOOJUSENERGIA TOOTMINE KURESSAARES BIOKÜTUSTE BAASIL

Paul Leemet

AS Kuressaare Soojus, Kalevi 1a, 93802 Kuressaare, e-post: paul.leemet@tt.ee

Annotatsioon

Artiklis antakse ülevaade puiduhakke ja puidujäätmete kasutamisest kütusena AS Kuressaare Soojuse kaugkütte katlamajades. Kirjeldatakse tekkinud probleeme ja neile leitud lahendusi.

PUIDUHAKE, PUUKOOR, KATEL, EELKOLLE

Sissejuhatus

AS Kuressaare Soojus varustab soojusenergiaga Kuressaare linna elamuid ja asutusi. Ettevõttel on Kuressaares kaks katlamaja katelde koguvõimsusega 48 MW. Soojusvõrgu pikkus on 29 km, torustiku läbimõõt 40–300 mm, sellest ~5 km on eelisoleeritud torustik.

ASi Kuressaare Soojus töötajate arv on 42, soojusenergia müük 1999. aastal oli 60 539 MWh, realiseerimise netokäive 22,276 miljonit krooni.

Puidukatla paigaldamise kronoloogia

Esimene seade puiduhakke põletamiseks Kuressaares paigaldati 1993. aasta sügisel Kuressaare Gümnaasiumi hoonet soojusega varustavasse katlamajja. See oli firmas Terg valmistatud eelkolle katlale Kiviöli 80.

Seade töötas 1996. aasta maini, mil nimetatud katlamaja suleti ja gümnaasiumihoone lülitati linna kaugküttevõrku.

1996. aasta novembris külastasid Kuressaaret Rootsi Riikliku Energiaameti (sel ajal NUTEK – Swedish National Board for Industrial and Technical Development ja konsultatsioonifirma ÅF-Energikonsult esindajad, et selgitada võimalust paigaldada Kuressaares seadmed puidukütuse põletamiseks.

1997. aasta märtsis kirjutati alla kavatsuste protokollile puidukatla paigaldamiseks.

Samal ajal viidi läbi vähempakkumine puidukütuse põletamise seadmete tarnija ja paigaldaja leidmiseks.

30.06. – 01.07.1997. a toimusid läbirääkimised kahe odavama hinnapakkumise teinud firmaga.

01.07.1997. a kirjutati alla seadmete tarne ja paigaldamise leping vähempakkumise võitnud firmaga SAXLUND AB Rootsist ja tema alltöövõtjaga AS TAMULT Eestist.

Märtsis 1998. a toimus uue puiduhakkekatla esimene käivitus.

Puidukatla andmed

Eelkolle:

- valmistaja Saxlund AB,
- võimsus 5 MW,
- liikuv rest,
- tuhaeraldus märgmenetlusel,
- põletatava kütuse niiskus 35–55%,
- saepuru osa kütuses max 50%.

Katel:

- veekatel,
- valmistaja Danstoker,
- võimsus 5 MW,
- väljuva vee temperatuur 120 °C, rõhk 8 Bar,
- automaatne akustiline suruõhuga töötav tahmapuhur,
- suitsugaaside temperatuur peale katelt 160 °C.

Automaatladu:

- mõõdud: 12×6 meetrit,
- maht 230 m³,
- liikuvad redelid.

Juhtimine:

- Siemensi kontrolleri S7-314,
- personaalarvuti – jälgimistarkvara Citect 4.20 (lisaks puidukatlale ka kogu katlamaja töö jälgimine ja juhtimine).

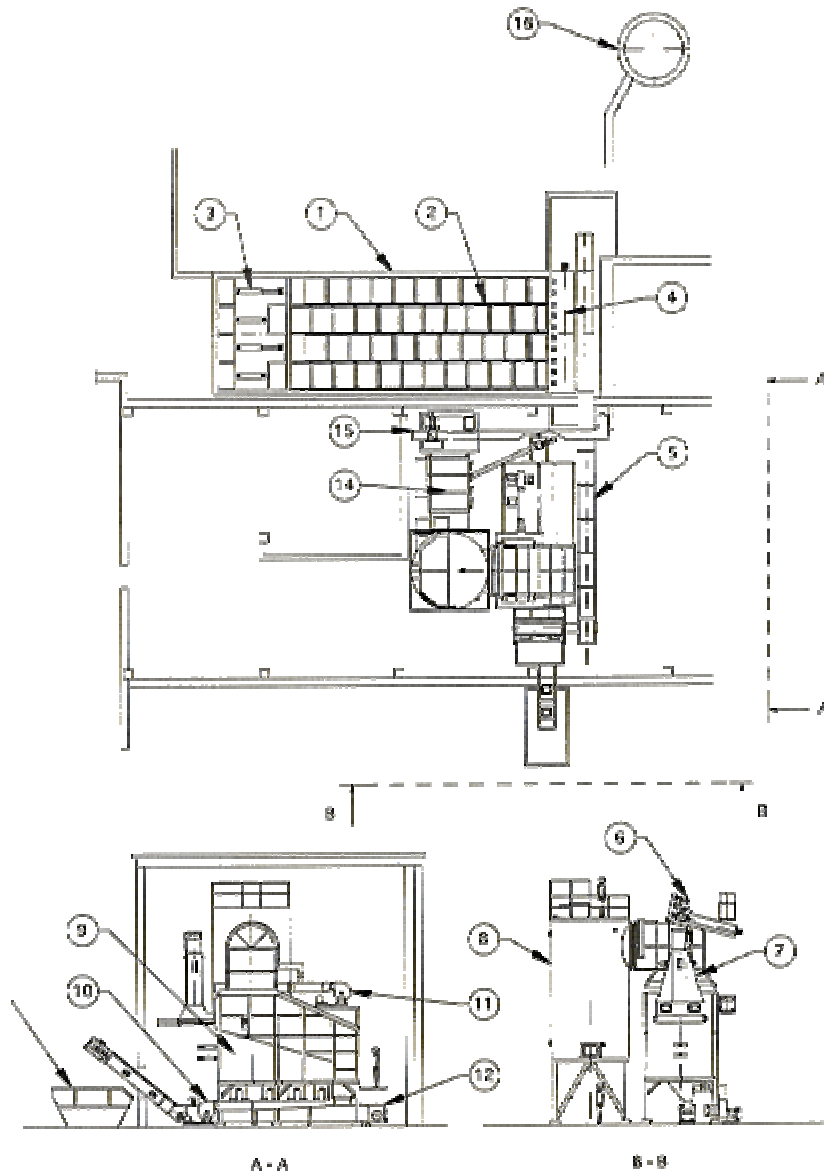
Katel on paigaldatud Kuressaare linna kirdeosas asuvasse Kalevi katlamajja. Katlamajas asuvad veel üks vene päritolu veekatlaks ümberehitatud DKVR tüüpi katel võimsusega 8 MW ja 10 MW võimsusega veekatel GTP-10 – tootja Osby Parca. Katlamaja vahetuses paikneb konteinerkatlamaja 8 MW Witermo veekatlagaga. Lähemas tulevikus on kavas ehitada katlale DKVR rest puidukütuste põletamiseks. Kuna mõlemat puidukatelt hakkame kütusega varustama sama lao ja etteandesüsteemi kaudu, paigaldame võimalike lao rikete puhul täiendava reservkatla, mille kütuseks on raske kütteõli.

Puidukatla käitamise kogemused

Kuna tegemist on uute seadmetega, ei ole olnud käitamisel tõsiseid probleeme. Kasutegur, mis vastavalt pakkumisele pidi olema vähemalt 84%, on seda ka tegelikult.

Arvuti kasutamine protsessi jälgimiseks ja juhtimiseks hõlbustab oluliselt katla reguleerimist, samuti katla töö kontrolli kõrge efektiivsuse tagamiseks.

Esimesel kasutusaastal oli probleeme müüritusega eelkolde ja katla vahelise ühenduskäigu piirkonnas. Müüritus lagunes, kuna temperatuur ületas paigaldatud materjalile lubatud piiri. Asja lähemal kontrollil selgus, et selles koldeosas olev temperatuuriandur oli paigaldatud vahetult pärast tertsiaalõhu sisenemiskohta – see põhjustas olukorra,



Joonis 1. Kuressaares Kalevi katlamajas oleva puidukatla asendiplaan: 1 – kütusehoidla, 2 – kraapredelid, 3 – hüdrotsilinder, 4 – tasandusrull, 5 – kraaptransportöör, 6 – tigutransportöör, 7 – kütuse sisseandesüsteem, 8 – 5 MW katel, 9 – eelkolle, 10 – primaarõhu ventilaator, 11 – sekundaarõhu ventilaator, 12 – tuhaktransportöör, 13 – tuhakonteiner, 14 – multitsüklon, 15 – suitsuventilaator, 16 – korsten

Figure 1. Situation plan of woodchip fired boiler in Kalevi boilerhouse, Kuressaare: 1 – Fuel silo, 2 – Silo scraper, 3 – Hydraulic cylinder, 4 – Levelling roll, 5 – Scraper conveyor, 6 – Screw conveyor, 7 – Fuel infeeding system, 8 – 5 MW boiler, 9 – Furnace, 10 – Primary air fan, 11 – Secondary air fan, 12 – Ash conveyor, 13 – Ash container, 14 – Multicyclone, 15 – Flue gas fan, 16 – Chimney

kus saime tegelikust temperatuurist ~200 kraadi võrra madalama näidu. Tulemust mõjutas ka anduri kattumine tuhaga. Probleemi lahendasime järgmiselt:

- anduri paigaldamisega sobivasse kohta,
- müürituse taastamisega kõrgema sulamistemperatuuriga materjali kasutades,
- suitsugaaside ringluse tekitamiseks ventilaatori paigaldamisega.

Kui seni hoidsime temperatuuri eelkolde ja katla piiril kuni 1200 °C, siis praegu hoiame seal temperatuuri kuni 1000 °C.

Meie seade on mõeldud niiskete kütuste põletamiseks. Et töötada täisvõimsusel, ilma et kolde temperatuur ületaks lubatud, pidi kasutatava kütuse niiskus olema vähemalt 50%. Niisuguse niiskusega kütust ei ole alati võimalik saada, kütuse niisutamine veega ei anna head tulemust.

Et võimaldada kuivemate kütuste põletamist katla täisvõimsusel, oleme paigaldanud eelkoldele suitsugaaside ringluse. Sellega on võimalik pidurdada põlemise intensiivsust ja võimsust vähendamata hoida kolde temperatuur lubatud piirides ka kuivemaid kütuseid põletades.

Korstnasse suunduvate suitsugaaside temperatuur täisvõimsusel töötaval katlal on 160–180 kraadi. Suitsugaasidest täiendava energia kättesaamiseks oleme ehitanud multitsükloni ja korstna vahele soojusvaheti, soojendades nii osa katlasse sisenevast veest. Kahe kuu pikkuse kasutuskogemuse põhjal saame öelda, et täiendavalt suitsugaasidest kättesaadav energia on 5–8% katla toodangust ja suitsugaaside temperatuur langeb ~100 kraadi võrra. Seega on võimalik aastas toota täiendavalt üle 2000 MW·h soojusenergiat lisakütust kulutamata. Arvestades puidust toodetava soojuse hinnaks peale katelt 110 krooni/MWh, saame 2000 MW·h täiendava toodangu puhul aastas säästu 220 000 krooni. Soojusvaheti maksumus on 130 000 krooni, seega on tasuvusaeg vähem kui aasta. Et veelgi rohkem energiat suitsugaasidest kätte saada, tuleks suitsus olev veeaur kondenseerida. See eeldab suuremat investeringut. Praegusel juhul tingis ehituse suhteliselt madala hinna asjaolu, et kasutasime praktiliselt vanaraua hinnaga ostetud DKVR-10 katla soojusvaheti ribitorusid. Probleemiks on soojusvahetit läbivates suitsugaasides olev tuhk, mis sadestub ribitorudele. Kord kahe nädala jooksul on vaja sadestunud tuhka veega eemaldada.

Millele pöörata tähelepanu puidukatla käitamisel

- Kasutatav kütus peaks olema vaba võõrkehade, mis võivad konveieri või tigutransportööri vahele kiiluda;
- et katel töötaks stabiilselt ja suure kasuteguriga, peab kütuse niiskus ja koostis olema ühtlane. Selle saavutamiseks on hädavajalik omada kütuse varu, mis koosneb erineva niiskusega komponentidest (hake, koor) ja neid segada kindla niiskusega kütuse saamiseks;
- perioodilised hooldused on eelduseks süsteemi häireteta tööks;
- oluline on jälgida katla tahmapuhuri korrasolekut;
- tuhakonveieris olev vesi vajab perioodiliselt väljavahetamist.

Andmed ettevõtte ja puidukatla soojustoodangu kohta

Tabel 1. AS Kuressaare Soojus soojusenergia toodang

Table 1. Heat energy production in Kuressaare Soojus

Aasta	Soojusenergia kogutoodang MW·h	Puidukütusest toodetud soojusenergia MW·h	Puidukütusest toodetud soojusenergia osa %
1998	79 560	19 530	24,5
1999	81 840	27 550	33,7
2000 9 kuud	53 700	25 860	48,2
2000 prognoos	79 000	36 000	45,6

1998. aastal jäi puidukütusest toodetud soojusenergia osatähtsus väikeseks kahel põhjusel:

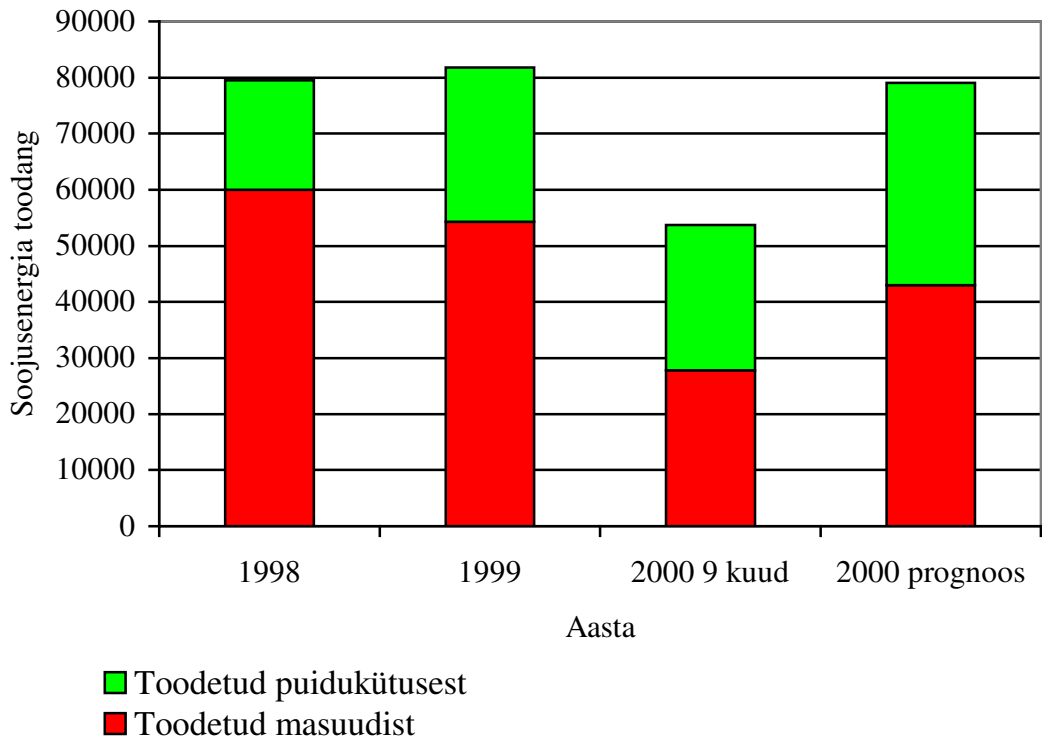
- katla käikulaskmine toimus enne kütteperioodi lõppu. Suvekuudel töötas katel kuni 2,5 MW võimsusega. Täisvõimsusega oli võimalik töötada kütteperioodi algusest sügisel.
- kuna ei olnud välja kujunenud kütuseturg, tuli sageli vähendada katla võimsust kütuse vähesuse tõttu. Probleem lahenes pärast puukoore sisseveo alustamist Purilast ja Paikuselt. Käesoleval ajal võimaldab kättesaadav kütuse kogus laiendada puidukütusest soojusenergia tootmist.

1999. aastal ei jõutud plaanitud soojustoodanguni eelkolde müüritusega seotud probleemide tõttu. 2000. aastal saavutame ja ületame plaanitud toodangu mahu, seda osaliselt ka suitsugaaside jahutamisest saadava täiendava soojusenergia arvel.

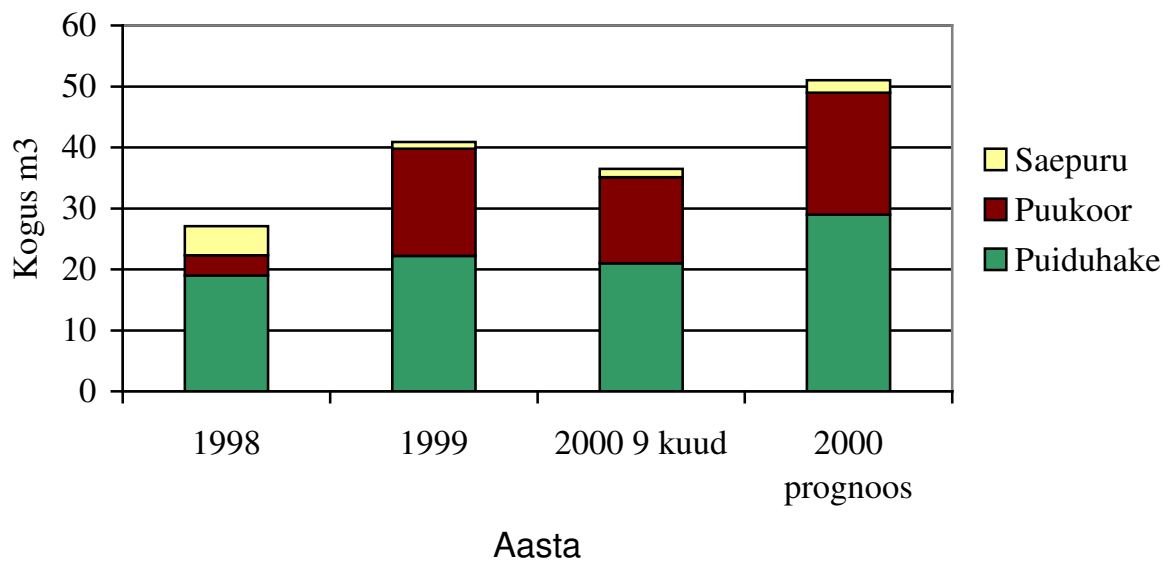
Tabel 2. Puidukatlas kasutatud kütused

Table 2. Fuels used in wood fired boiler

Aasta	Puiduhake m ³	%	Puukoor m ³	%	Saepuru m ³	%	Kokku m ³
1998	19 000	70	3 300	12	4 800	18	27 100
1999	22 200	54	17 600	36	1 100	10	40 900
2000 9 kuud	21 000	57	14 100	39	1 400	4	36 500
2000 prognoos	29 000	57	20 000	39	2 000	4	51 000



Joonis 2. AS Kuressaare Soojus soojusenergia toodang
 Figure 2. Heat energy production in Kuressaare Soojus



Joonis 3. Puidukatlas kasutatud kütused
 Figure 3. Fuels used in wood fired boiler

1999. aastal oli saepurul suhteliselt suur osatähtsus puidukatla kütusena. Selle tingis asjaolu, et varem polnud võimalik saepuru ära kasutada, samuti muude kütuste vähesus. Praeguseks välja kujunenud kütuste vahekord peaks säilima nii kauaks, kuni töötame ühe puidukatlaga. Teise katla lisandumisel suureneb ilmselt puiduhakke osakaal. Odavam kasutatavatest kütustest on saepuru, kuid selle osatähtsus on tühine. Järgneb puukoor, mis hoolimata suurest transpordikaugusest on odavam kui puiduhake.

Kõige kallim on metsas ja ümarpuidust valmistatud hake.

HEAT PRODUCTION FROM BIOFUELS IN KURESSAARE

Paul Leemet

AS Kuressaare Soojus, e-mail: paul.leemet@tt.ee

Abstract

AS Kuressaare Soojus is a district heating company, which supplies the residents and institutions of Kuressaare with the heat energy. In 1994 the company started to use biofuel for producing the heat energy. The first used plant was the furnace for the boiler Kiviõli-80, which was used for burning woodchips. The plant was used till the summer of 1996. In 1997 started the works for building the woodchips fired boiler (powerfulness 5 MW) in the Kalevi boilerhouse. The boiler started working in March 1998. In the year 2000 40% from all of the heat energy production comes from the woodchips fired boiler.

PUIDUSÖE KASUTAMINE NING TOOTMISPERSPEKTIIVID EESTIS

Matis Miljan

Eesti Põllumajandusülikool, Metsanduse teaduskond, metsatööstuse instituut
Kreutzwaldi 5, 51014 Tartu, e-post: matis@eau.ee

Annotatsioon

Puidusöe tootmine on Eestis taasleitud puitkütuse vääristamise moodus. Viimastel aastatel on selle tootmine praktiliselt nullist kerkinud 4000 tonnini aastas. Samuti on ka tarbimine tõusnud. Artiklis on tutvustatud puidusütt – selle ajalugu, tootmist, kasutamist ja omadusi. Siin on käsitletud sobiliku toorme varusid puidusöe tootmiseks, samuti ka ekspordi ja impordi statistikat.

PUIDUSÜSI, SÜSI, RETORT, TAASTUV ENERGIA, PÜROLÜÜS

Puidusüsi on suure süsinikusisaldusega poorne aine, mis tekib puidu kuumutamisel õhu juurdepääsuta või vähesel juurdepääsul. Temperatuur tõuseb 500–800 °C-ni. Sellist kuumutamist nimetatakse utmiseks. Tulemuseks on suure süsinikusisaldusega (85–90%) ning energiarikas (8 MW·h/t) kütus.

Puidusöe ajaloost

Puidusöe kasutamine ulatub ajaliselt väga kaugele. Esimesed märgid puidusöe kasutamisest on rohkem kui 30 000 aastat vanad ning need pärinevad Lõuna-Euroopa kaljujoonistelt, kuid ei ole teada, kas siis põletati sütt kindla eesmärgiga või võeti lihtsalt söestunud puutükke lõkkeasemetelt. On tõenäoline, et puidusöe esmane kasutamine kütusena ulatub 7000 aasta kaugusse, kui algas vase sulatamine.

Esimene kindel märk puidusöe kasutamisest kütusena pärineb 3500. aastat e. Kr Lõuna-Euroopast ja Lähis-Idast. Arvatakse, et egiptlased, kes olid kuulsad metallitöötledajad, kasutasid samuti puidusütt raua sulatamisel juba 2750. aastal e. Kr ning tuhat aastat hiljem klaasi sulatamisel.

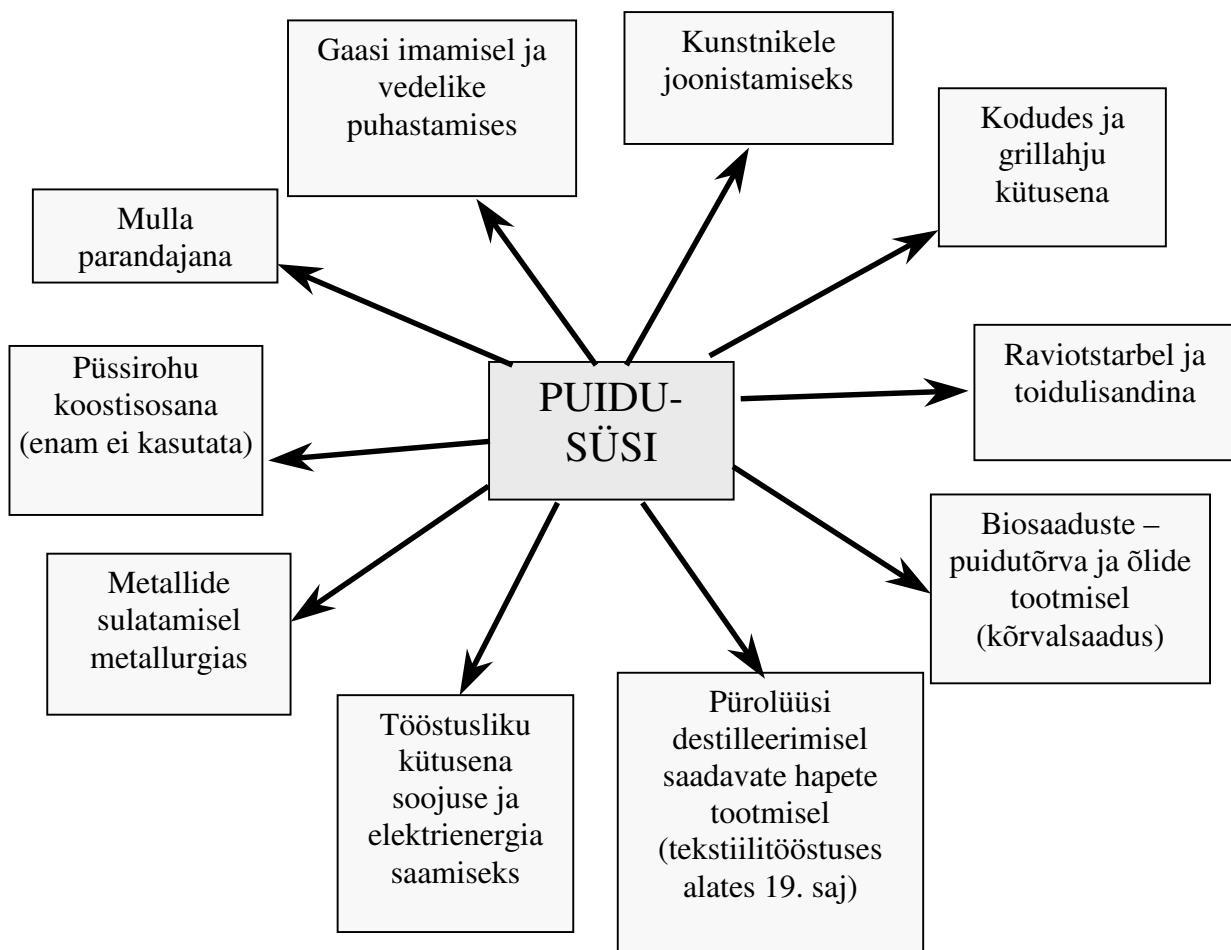
Samast ajast on teateid puidusöe kasutamise kohta Eesti aladel. Rooma rauaajast on pärit sepsed, mis on sepiatud kohalike seppade poolt siinsamas (Moora, 1935). Aga nagu teada, selleks et rauda töödelda, oli vaja piisavat temperatuuri, mida sellel ajal suutis tagada ainult puidust põletatud süsi.

Järk-järgult kasvas puidusöe kasutamine ning tootmine, kuna see oli ainuke kütus, mis suutis tagada kõrgema temperatuuri kui 300–400 °C. Puidusöe kasutamise intensiivsust näitab ka see, et näiteks Suurbritannia saared, mida katsid pärast jääaega tervenisti metsamassiivid, olid 1000. aastaks e. Kr poolenisti ära raiutud.

Rauaajal muutus puidusöe kasutamine veelgi intensiivsemaks. Puidusöe kasutamise õitseage kestis kuni 1735. aastani, kui kivisöega eksperimenteerides avastati kivisöe muutumine koksiks. Uus kütus sai peagi laialt tuntuks ning see tõrjus välja puidusöe metallitöötlemisest.

Kahekümnenda sajandi esimesel poolel oli puidusöe tootmise peamine eesmärk saada süsinikdisulfiidi – keemilist toorainet kunstiidi tootmiseks. Aja jooksul töötati välja ka puidusöe teisi kasutamise võimalusi. Puidusöe imamisvõime tõttu hakati puidusütt kasutama gaaside ja vedelike puhastamisel (gaasimaskides ning keemiliste lahuste puhastamisel). Samuti on puidusüsi leidnud kasutamist loomasöötades, aianduses ja ravimitööstuses. Viimasel paarikümnel aastal on puidusöe tootmiskaht märgatavalt kasvanud. Seda eelkõige söe kasutamise tõttu toiduvalmistamisel (liha grillimine). Ajaloolise ülevaate osa andmed on saadud Inglise puidusöe koduleheküljelt <http://www.englishcharcoal.co.uk/>.

Puidusöe kasutamine



Joonis 1. Puidusöe kasutamise valdkonnad
Figure 1. The fields of charcoal use

Jooniselt 1 nähtub, et puidusütt on kasutatud väga mitmel elualadel alates kodusest majapidamisest kuni sõjanduseni. Praegu kasutatakse puidusütt peamiselt gaaside ja vedelike imamisel, joonistamisel, ravimitööstuses ja toidulisandina, metallurgias, grillimisel nii kodus kui ka restoranis, kuid samuti on viimasel ajal hakatud puidusütt kasutama elektri- ja soojusenergia tootmiseks elektrijaamades. Viimastel aastatel on kasvanud puidusöe kasutamine järgnevalt – grillimisel, vedelike puhastamisel ning

tööstusliku kütusena energia tootmises. Eestis toodetud puidusütt kasutatakse peamiselt grillimisel. Minu arvates on viimasel kõige suurem potentsiaal tulevikus, sest mitte taastuvate loodusvarade varud hakkavad lõppema ning puidusöest on energia tootmine lihtsam kui tavalist puitu põletades.

Söe tootmisprotsess

Puidusöe tootmise protsess jaguneb selgelt eristatavatesse etappidesse, mis on järgnevad.

- **Puidu kuivatamine.** Temperatuuri järkjärguline tõstmine kuni 150–170 °C. Kuivatamise käigus eraldub kogu puidus olev vesi.
- **Puidu termiline lagunemine.** Jätkub temperatuuri tõstmine. Alates 150 °C algab lendosade eraldumine gaasi kujul (CO, CO₂, H₂, CH₄, õli jne). Temperatuuri tõustes 260–300 °C algab eksotermiline reaktsioon, millega kaasneb temperatuuri kiire tõus. Sellega kaasneb gaasi märgatavalt suurem eraldumine. Saavutatakse soovitud lõpptemperatuur 500–800 °C, mida hoitakse paar tundi.
- **Jahutamine.** See etapp kestab seni, kui puusüsi on täielikult maha jahtunud. Hapniku juurdepääs söele peab olema välistatud, sest isegi 100 °C juures võib puusüsi süttida.

Mida kõrgem on protsessi teise järgu temperatuur, seda suurema C-sisaldusega puidusüsi tuleb. Samas väheneb söe väljatulek.

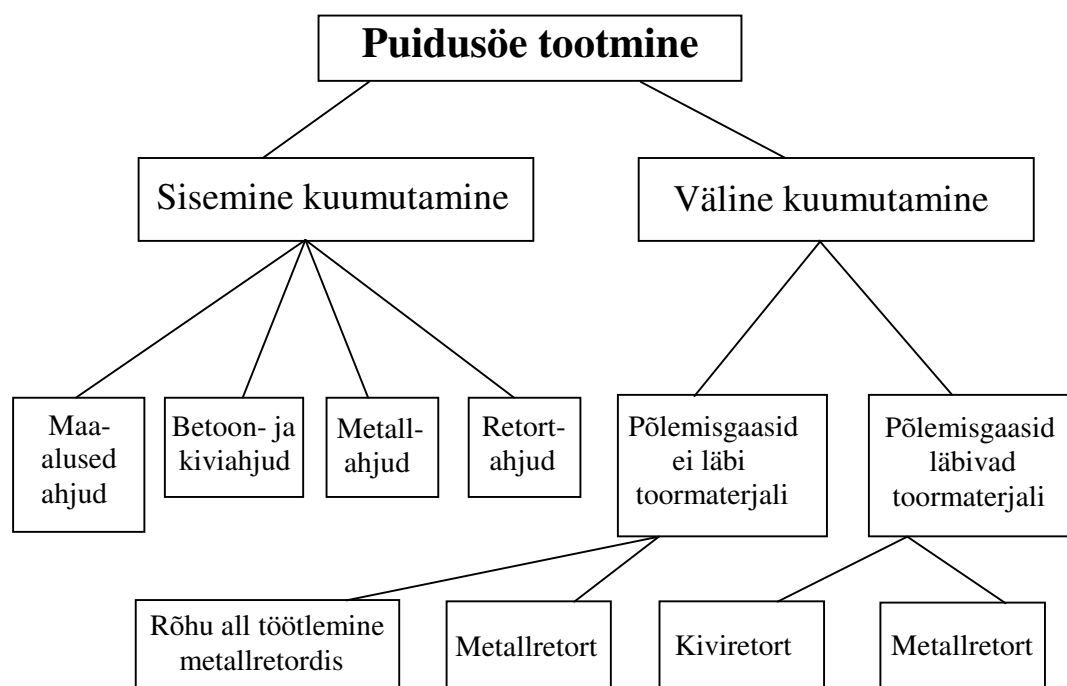
Puidusöe tootmise moodused

Joonisel 2 on toodud puidusöe tootmise moodused. Vasakul on kõige vanem moodus, mida paremale, seda kaasaegsem moodus. Praegusel ajal kasutatakse söe tootmiseks metallahjusid ja metallretortahjusid. Eesti väiketootjad kasutavad metallahjusid ja natuke suuremad tootjad metallretortahjusid.

Söetootmiseseadmeid saab jagada ka tootmisprotsessi kestuse järgi.

- Pidevatoimelised.
- Tsüklilised.
- Kombineeritud.

Pidevatoimelised ahjud peavad olema suured – puidu kogus peab olema piisav, et tagada pidev protsess. Tsükliliste ahjude suurused võivad olla väga erinevad. Kombineeritud söe tootmiseseadmetel on mitu (2...8) tsüklilist seadet kokku pandud ning neid kuumutatakse välispidiselt kordamööda ühe ahjuga. Kombineeritud seadmed on keskmise suurusega ja võrdlemisi tootlikud.



Joonis 2. Puidusöe tootmise võimalused
 Figure 2. The possibilities of producing charcoal

Puidusöe tootmiseks sobilik toore ja selle muutus Eestis

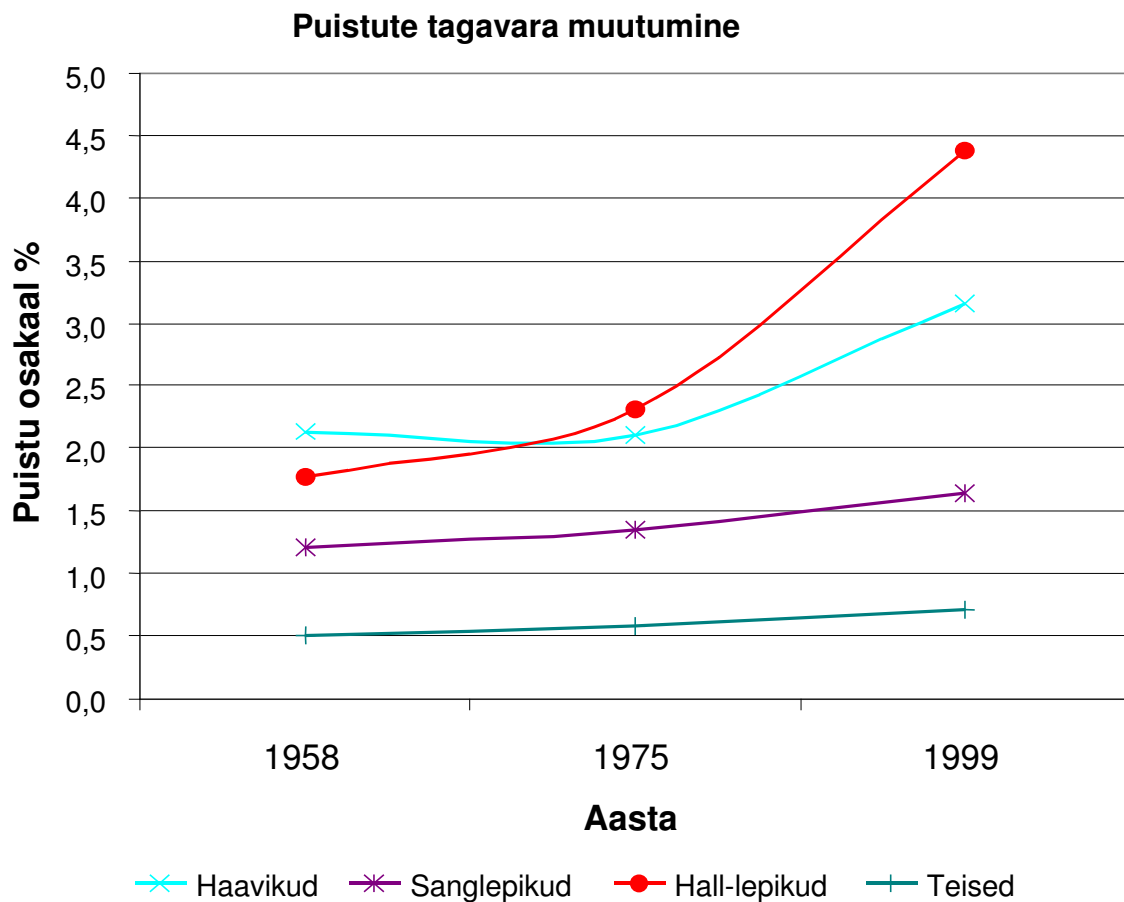
Jooniselt 3 on näha mõnede puuliikide – haab, hall- ja sanglepp ning teised (v.a kuusk, mänd ja kask) – puistute osakaalu muutumist aastatel 1958–1999. Okaspuude tagavara osakaal on langenud 75→62,9%, samas on lehtpuu osakaal tõusnud. Seda eriti kaasikute, 7,9%, (19,4→27,3%) ja hall-lepa, 2,6%, osas. Kui vaadelda kogu tagavara muutumist (tabel 1), siis see on kasvanud kokku 268,8% ning vähenemist ei ole ühegi puuliigi osas. Kõige rohkem on suurenenud hall-lepikute tagavara – 662%.

Tabel 1. Puistute tagavara muutus protsentides (Aastaraamat Mets, 1999)
 Tabel 1. The change of growing stock in Estonian forests (Aastaraamat Mets, 1999)

Puistu	Puistu tagavara muutumine (%) 1958–1999	Puistu tagavara muutumine (%) 1975–1999
Männikud	251,62	170,69
Kuusikud	191,46	142,26
Kaasikud	377,43	217,44
Haavikud	397,64	270,04
Sanglepikud	365,7	217,95
Hall-lepikud	662,34	341,56
Teised	378,68	221,08
Kogu muutus	268,84	179,83

Samuti on suurenenud teiste lehtpuuliikide tagavara rohkem kui 300%. Nendes tabelites ei ole arvatud viimase viie – kümne aasta metsastuvaid põllumaid, kuhu samuti kasvab lepp, haab, kask ja paju ning mida on üle 300 000 ha (*Eesti Statistikaamet*). Seega tõuseb lähiaastatel lehtpuude – eriti väheväärtusliku – osakaal veelgi ning sellele puidule tuleb leida otstarve.

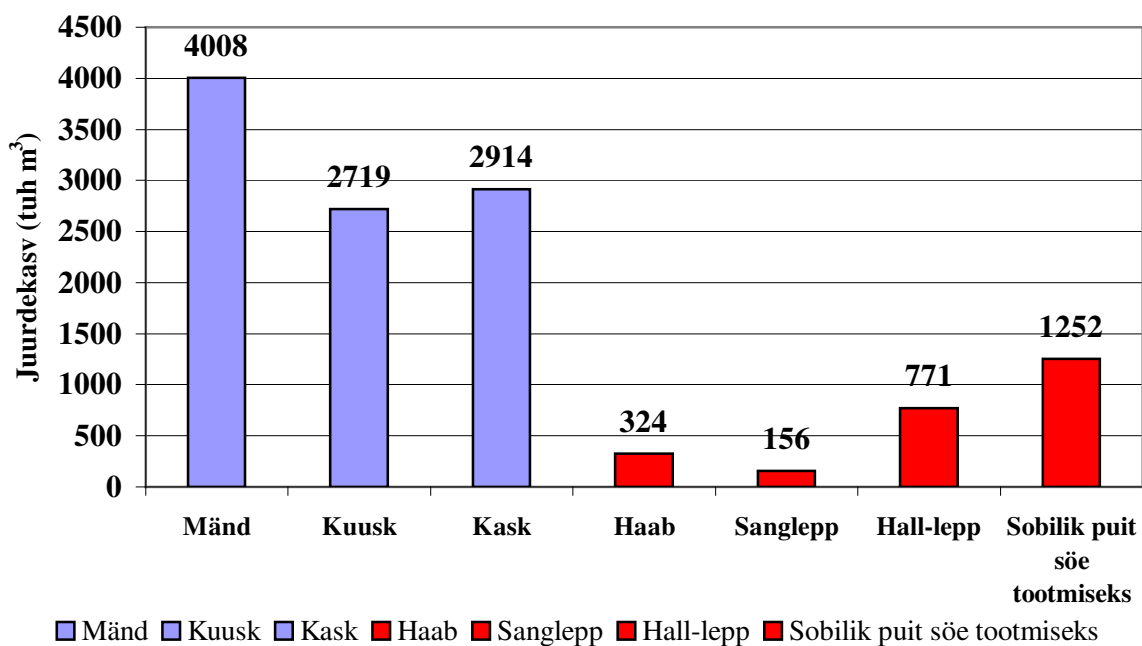
Eesti metsa aastane juurdekasv on ligi 11 miljonit m³ aastas, millest üle 1 mln m³ – on madala kvaliteediga lehtpuu. Juurdekasvust läheb 1,25 mln m³ (vt joonis 4) osalt graanuliks nii kodumajapidamistes kui ka ekspordiks, osalt plaaditööstusele ning



Joonis 3. Lehtpuupuistute osakaalu muutumise % aastatel 1958–1999 (Aastaraamat Mets, 1999)

Figure 3. The change of proportion of broad leaf trees during the years 1958–1999 (Aastaraamat Mets, 1999)

osalt madala kvaliteediga aluslaudadeks. Kuid järgi jääb ikkagi märkimisväärne kogus lehtpuitu, mis praegu metsas lihtsalt mädaneb. Samuti saab tehnoloogilise söe tootmiseks kasutada puitu – pinnud, tüüka osad jne, mis jääb saetööstustel järgi.



Joonis 4. Aastane juurdekasv Eesti metsades liigiti (Aastaraamat Mets, 1999)
 Figure 4. The annual growth in Estonian forests (Aastaraamat Mets, 1999)

Puidusöe tootjad Eestis ja nende poolt kasutatavad tehnoloogiad

Tabel 2. Suuremad puidusöetootjad Eestis aastal 2000
 Table 2. Bigger charcoal producers in Estonia in the year 2000

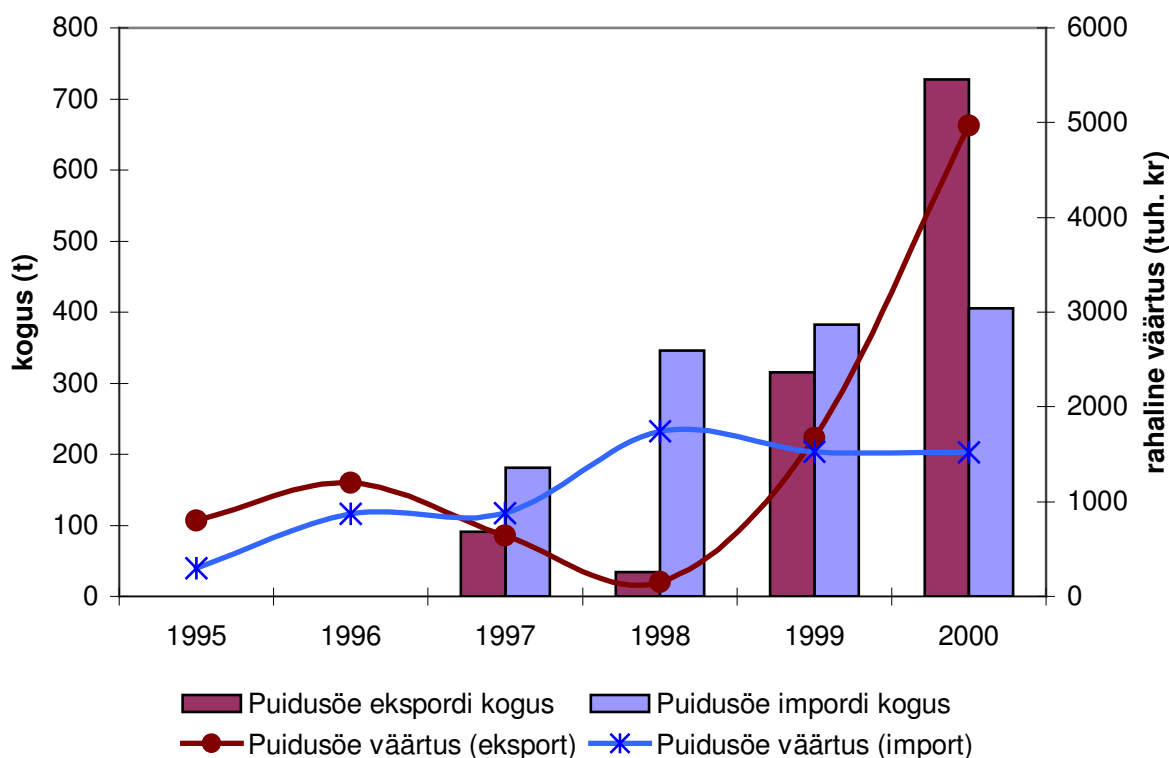
Puidusöe tootjad							
Tootja nimi	Aadress	Kontakt-inimene	Telefon	Tootmisvõimsus 2000. a	Tootmine 2000. a	Tootmisvõimsus 2001. a	Tehnoloogia
Eesti Süsi OÜ	Misso küla, Misso vald, 65001 Võrumaa	Tõnu Sults, Paavo Malvik	078/60405 078/67590	1000 t	700 t	1000t	LPKI poolt väljatöötatud
Igori süsi	Narva			700 t	700 t	700 t	
Barbetec OÜ	Selja, 86801 Tori vald, Pärnu Maakond	Rainer Rebane	044 58154 050/60836 barbetec@uninet.ee	900 t	700 t	2700t	BTG tehnoloogia
Kagu Mets	Veski 69, 50409 Tartu (tootmine Antsla juures)	Ülar Tikk	07 387801	1200 t	200 t	1200 t	LPKI poolt väljatöötatud (kohapeal täiustatud)
GreenCoal OÜ	Turba 3, 80041 Pärnu	Jaan Akerman	044 78097	900 t	100 t	1800t	BTG tehnoloogia
	Kodila			1100 t	1000 t	1000 t	LPKI poolt väljatöötatud
Teadmata hulk väikseid tootjaid					500 t	700 t	
Kokku				5800 t	3900	9100 t	

Ekspordi ja impordi andmete põhjal ei saa öelda, kui palju puidusütt Eestis toodetakse ning seda ei saa kuskilt statistikast ka välja lugeda. Võib ainult ligikaudu öelda, võttes arvesse Eestis tegutsevate söetootjate tootmismahud. Eelnevas tabelis on ka need ära toodud.

Seega on 2000. a arvatav tootmismahud Eestis umbes 4000 tonni puidusütt. Kuid 2001. aastaks see maht kahekordistub, sest Antsla ja Pärnu tehased hakkavad täie võimsusega tööle ning OÜ Barbetec käivitab veel kaks söetootmise seadet. Samuti on mitmed firmad ja isikud tundunud huvi puidusöe tootmisvõimaluste kohta ning tõenäoliselt rajatakse Eestisse veel tehaseid tootmisvõimsusega 1000–2000 t sütt aastas, kuid see jääb juba aastasse 2002.

Eesti puidusöe eksport ja import

Järgnevalt graafikult on näha, et puidusöe ekspordi maht on tõusnud viimase kahe aastaga hüppeliselt ning prognoositavalt tõuseb järgmise aastaga vähemalt veel kaks korda. Samas on sisetoodava puidusöe kogus jäänud samaks. Seega enamus Eestis müüdivast puidusöest toodetakse siin.



Joonis 5. Puidusöe ekspordi ja impordi kogused ja väärtus aastatel 1995–2000, aasta 2000 on arvatatud I poolaasta tulemuste põhjal (Eesti Statistikaamet)

Figure 5. The volumes and values of import and export in Estonia during the years 1995–2000 (Eesti Statistikaamet)

Kirjandus ✕ **References**

1. (1999) Aastaraamat Mets. Metsakaitse- ja metsauuenduskeskus. OÜ Paar, Tartu: 120.
2. (1997) Ekologiska Kokoglu Ražošanas Iekârta, Latvian State Institute of Wood Chemistry. Riga: 4.
3. Interneti leheküljed:
Inglise Puidusöe kodulehekülj: <http://www.englishcharcoal.co.uk>;
Transnational Technology: <http://www.tehctp.com>.
4. Moora, H. (1935) Eesti Ajalugu I. Eesti Kirjanduse Selts, Tartu: 376.

THE USE OF CHARCOAL AND PRODUCING PERSPECTIVES IN ESTONIA

Matis Miljan

Estonian Agricultural University, e-mail: matis@eau.ee

Abstract

This article contains short introduction of charcoal, the historical overview. Also here are described the producing process and methods and also the fields of using charcoal. Main content contains the analysis of raw material for charcoal and the exports and import volumes and values. Also I have pointed out main producers of charcoal in Estonia.

BIOKÜTUSTE KASUTAMINE MUHU VALLA LIIVA KATLAMAJAS

Raido Liitmäe

Muhu Vallavalitsus, Muhu vald, Liiva, 94701 Saare maakond
e-post: muhu.vald@mail.ee

Annotatsioon

90-ndate aastate alguses lõpetasid tegevuse paljud maa-asulate kaugküttesüsteemid. Artikkel annab ülevaate Muhu valla Liiva asula kaugküttesüsteemi uuendamisest, süsteemi majandamisest ja saadud kogemustest kohalike kütuste kasutamisel.

KATLAMAJA, KOHALIK KÜTUS, KESKKONNAKAITSE, HIND

Süsteemi uuendamise vajadus

1995. a. oli Muhu valla Liiva katlamaja sisseseade lootusetult vananenud ja amortiseerunud – küttevee soojendamiseks kasutati kolme E-tüüpi veekatelt á 0,7 MW ja sooja vee tootmiseks ühte aurukatelt KB – 300. Katlad olid tehniliselt korrast ära ja töötasid ebanormaalselt väikesel koormusel ning eluiga oli kõigil juba üle 10 a, seoses sellega kaasnes pidev alakütmine. Kõik katlad töötasid kivisöel, mida oli tol ajal väga raske hankida ja kütuse tarnimise Muhu saarele tegi kulukaks mitme transpordiliigi kasutamine, sellest tulenevalt mitmekordne kütuse laadimine ning loomulikult suured veokaugused.

Kuna katlamaja teeninduspiirkonnas asub mitmeid valla sotsiaalobjekte, siis otsustati tsentraalküte igal juhul säilitada.

Et sel ajal oli esimene suurem suundumus kasutamaks kohalikke kütuseid ja ka kõik eeluuringud seda kinnitasid, sai meiegi puhul otsustatud biokütusega töötava katla-süsteemi kasuks.

Rekonstrueerimine

Katlamaja rekonstrueerimiseks otsustas vallavolikogu 1995. a võtta Maailmapanga laenu. Sobiva süsteemi leidmiseks välja kuulutatud konkursi võitis Taani firma REKA, kelle pakkumine oli umbes 2,3 miljonit.

Maailmapanga laenu tingimused: tagasimaksmine 12 a, aastaintress 10% tagasi maksmata põhisummalt, kaks esimest aastat ainult intressid.

Katlamaja rekonstrueeriti ja tööd alustati 5. jaanuaril 1996. a.

Paigaldatud süsteemi iseloomustus

Paigaldatud on 0,5 MW REKA tahkekütuse katel. 60 m³ kütusehoidla asub katlamaja kõrval maapinnast allpool. Kütusehoidlast tõmbavad kaks hüdraulilist ettekandekraapi kütuse lao väljaveo teosse. Ettekandekraapide tööd juhitakse automaatselt nn fotosilma abil, mis vastavalt teo täitumisele kütusega seiskab kraabid. Lao väljaveo tigu töötab

samaaegselt transporditeoga, need kaks tigu moodustavad kokku kütuse doseerimis-süsteemi, mille tööd juhitakse automaatselt vastavalt katla võimsusele.

Söötmistigu ja kütuse lüüs töötavad pidevalt.

Edasi liigub kütus liikuvatele restidele, mille liikumise ja seismise vahetamine tuleb reguleerida vastavalt kütuse kvaliteedile.

Tuhk eemaldatakse katlast automaatselt.

Paigaldati ka veepehmendusseade, uued ringluspumbad ja soojusvaheti. Laenu rahast osteti samuti traktor MTZ-80 ja puiduhakkur FARM CH/SH 250.

Katlamaja teeninduspiirkond ja selle kütmiseks kulutatud soojushulgad

Katlamaja teeninduspiirkonna moodustavad neli 12-korterilist elamut, kaks ühepere-elamut, koolimaja, lasteaed, spordihall ja vanurite hooldekodu – kokku on köetavat kubatuuri ligemale 40 000 m³, sellest 75% moodustavad vallale kuuluvad sotsiaalobjektid ja 25% on elamud. 3–4 a tagasi läksid üle elektriküttele 6 korterit köetava kubatuuriga umbes 800 m³.

Ülevaate toodetud soojusest annab tabel 1.

Tabel 1. Liiva katlamaja kulud soojatootmisele ja toodetud soojus kütteks aastatel 1995...1999. a

Table 1. Expenses on heat production and amount of heat produced in 1995...1999

Aasta	Soojatootmise kulud, kr	Toodetud soojus, MW·h	Keskmine hind, kr/MW·h
1995*	623 804	2336	267
1996	641 257	1815	353
1997	559 666	1691	331
1998	492 375	1630	302
1999	439 288	1639	268

* 1995. a toimus kütmine veel kivisöekateldega ja MW·h arvestus toimus arvutuslikul teel, mis lähtuvalt hilisematest mõõturiga mõõdetust on tunduvalt suurem ja ilmselt ebatäpne

Kasutatavad kütused, kogused ja kvaliteet

Praeguseks oleme täiesti lõpetanud kivisöe importimise Muhusse, viimati kasutasime kivisütt eelmisel kütteperioodil tsentraalse sooja vee saamiseks KB-tüüpi katlaga. Tarbijate vähesuse ja kivisöe hirmkalli hinna tõttu (meil koos veokulude ja praamipileti hinnaga umbes 1000 kr/t) osutus tegevus mittetasuvaks, mistõttu sai 1999. a sügisel tehtud järsk otsus soojaveevarustuse lõpetamiseks.

Põhiküttena on meil praegu kasutusel Saaremaa päritolu Saikla või Putla raba küteturvas, mille kvaliteet on suhteliselt hea – aastate keskmisena on olnud kütteväärtus tarbimisainele kuni 12 MJ/kg ehk 3,5 MW·h/t. Kõige odavam on siiski oma töötajate valmistatud puiduhake, mille osakaal on aasta-aastalt kasvanud. Kui 1996. a tarbisime 548 t tükkturvast ja 286 m³ puiduhaket, siis 1999. a olid vastavad arvud 302 t ja 885 m³ (~288 t).

Seega on aasta-aastalt vähenenud turba kasutamine ja suurenenud puiduhakke kasutamine. Sellel on mitmeid põhjuseid – on olnud vihmaseid suvesid, kus turvast pole teha saanud ja ka muid põhjuseid, kuid kõige suurem neist on see, et veokulud on väga suured. Nii asub Saikla raba meist 30 km kaugusel, s.o reis edasi-tagasi 60 km. Ohjeldamatu kütusehinna tõus on jätnud ka siin oma jälje.

Tabel 2. Turba hind ja veokulude suurenemine

Table 2. Price of sod peat and rise of carriage expenses

Aasta	Turba müügihind, kr/t	Veokulud, kr/t	Platsihind, kr/t
1996	225/265,50*	35,05/41,95*	260,05/306,85*
1997	225/265,50*	27,00/31,85*	252,05/297,25*
1998	225/265,50*	41,80/49,30*	266,80/314,80*
1999	56,70/302,90*	42,45/50,10*	299,15/353,00*

* käibemaksuga

Seega on 1999. a turvas meil platsihinnaga 353 kr/t, s.o ~125 kr/m³ (koos käibemaksuga), hakke hinnaks kujuneb keskmiselt 65 kr/m³, s.o peaaegu 2-kordne vahe, kusjuures kütteväärtuste vahe on ca 1,3 korda.

Tihti peale hinnatakse kütuses sisalduva primaarenergia hinda, meil tuleks see hakkepuidu puhul ~70 kr/ MW·h ja turba puhul ~100 kr/MW·h, kivisütt kasutades tuleks see juba ~150 kr/MW·h.

Kütuste varumisprotsess

Puiduhakke varumiseks on meil puiduhakkur FARMi CH/SH 250, haakes MTZ-80-ga. Põhitöö teevad aastaringselt 2 meest, kellele suveperioodil lisanduvad 2 vabanevat katlakütjat. Väikekatlamaja jaoks leidub saarel võsa, raiejäätmeid ja madalakvaliteedilist puitu piisavalt – oleme seni puhastanud võssakasvanud teeääri, palju materjali oleme saanud lageraielankidelt. Samuti oleme teinud inimestega nn bartertehingu metsast võsa väljaraiumisel. Inimene saab korrastatud erametsa, katlamaja – puiduhakke. Eelmisel kütteperioodil alustasime just erametsaomanikele ja töötulele suunatud suurema kampaaniaga hakke varumiseks. Nemed panevad kokku hakkimisele kuuluva materjali, meie poolt on hakkimistöö ja raha. Töötasime välja hinnad nii hakke valmis kujul ostmiseks kui ka meiepoolse hakkimistöö korral.

Praegu on põhiprobleemiks kujunenud mitte enam see, kust kütust saada, nagu see oli 5 aastat tagasi, vaid see, kuidas üha odavamalt seda kätte saada. Põhilised hakkmaterjali algallikad on Saare EPT (võsastunud sookraavide puhastamisel), Eesti Energia (elektriliinide alused), metsamajand ja puidufirmad (raielangid), eraisikud.

Hakke varumisprotsessi kiirendamiseks ja ohutustehnika nõuetega vastavusse viimiseks saime vastava projekti abil raha ka Eesti Regionaalarengu Sihtasutuselt. Projekti raames muretsesime hakkurile hüdroetteandeseadme, mis võimaldab hakkida lühemaid ja kõveramaid oksid, tagab laastu stabiilsuse ja kiirendab kokkuvõttes tööprotsessi. Abi on kindlasti ka soetatud vedavast esisillast traktorile MTZ-80. See võimaldab saada kätte hakkmaterjali ka niiskematelt aladelt ja tagab ka pikema kütuse varumisperioodi. Varumisprotsessi täiustamiseks saime lisaks olemasolevale kahele metsasaele soetada

veel ühe ja ka võsalõikaja; vähetähtsad ei ole ka töötajatele ohutustehnikavahendid – kiivrid, tööriided jne.

Varutud kütused viiakse üldjuhul 1,5 km kaugusel asetsevasse umbes 1500 m³ küttematerjali mahutavasse hoidlasse. Oktoobris-novembris tuuakse tavaliselt hakkepuut metsast otse katlamaja kütusehoidlasse, sest suve läbi kuivanud oksad ja võsa on piisavalt kuiv kohe põletamiseks, sellega hoiame kokku ka veo- ja laadimiskulusid. Kahjuks ei ole Muhus praegu ühtegi töötavat saekaatrit.

Puidu puudust saarel karta ei ole, kui kogu Eestis kasvab igal aastal rohkem puitu peale, kui seda raiuda jõutakse, siis sama suhe kehtib hinnanguliselt ka meil, kui juurde arvestada ka võsastunud heinamaade puit.

Organisatsiooniline ja majanduslik külg

Meie puhul ainsaks ellujäämise võimaluseks oli eksisteerida valla allasutusena – Muhu Valla Kommunaalametina. Üldjuhul on elanikud maal soojaettevõtetele väga palju võlgu, samas ei saa katlamaja viivitada oma kuluartiklite eest tasumisega (elekter, kütused). Kuna vaba raha võlgnike tõttu puudub, siis oma kohustuste (põhivõlg, intressid ja intressivõlg) lumepallina kasvamine lämmatab ettevõtte kiiresti. Muhu vallas kütab Liiva katlamaja 75% valla objektidest. Seetõttu oli otstarbekas luua katlamaja näol omaette valla allüksus ja säilitada tsentraalküte.

Seega ei ole me tüüpiline äriettevõte, vaid sisuliselt 75% tehtud kulutustest ringleb valla rahakotis ühest taskust teise vastavalt tehtud kulutustele. Elanikele (st korteritele) toimub soojuse müük loomulikult vastavalt MW·h hinnale.

Personal on optimaalne ja täielikult koormatud: 2 katlakütjat, 2 põhikohaga metsabri-gaadi meest, kellele kiirel kütteperioodil lisanduvad 1–2 hakkematerjali kokkupanijat, lukksepp-keevitaja. Seda tööd juhib valla kommunaalameti juhataja. Raamatupidamist teeb valla raamatupidaja.

Kuludest moodustavad

- 40% kütused,
- 16% elekter,
- 20% töötasud,
- 9% ekspluatatsioon ja remont,
- 10% amortisatsioon,
- 5% muud kulud.

Süsteemi kogukulud on ökonoomsete seadmete, optimaalse kaadri, range kokkuhoiu ja odava kütuse tõttu vähenenud, võrreldes 5–6 aasta taguse “kivisöeajastuga”, umbes 1,5–2 korda (mõtlen siinkohal otseseid kulutusi 1 MW·h tootmiseks, laenusummat arvestamata).

Kulud soojatootmisele 1995–1999. a on toodud tabelis 1. Nagu näha, on soojatootmise kogukulud aasta-aastalt vähenenud. 1995. a on 1 MW·h hind küll arvude järgi väiksem, kuid tol ajal puudus katlamajas soojamõõtja ja MW·h hulka arvestati arvutuslikul teel, mis ei olnud kuigi usaldusväärne.

Seega on viie aasta jooksul kogukulud soojatootmisele vähenenud peaaegu 200 000 krooni. See ongi umbes summa, mis oleks tulnud laenu tagasimaksegraafikut täpselt järgides maksta igal aastal. Ja kui arvestada, et muud kulud on 5 aasta jooksul kallinenud vähemalt 60–70% (bensiin, elekter jne), siis võib öelda, et oleme oma investeeringu õigsuse tõestanud. Tähtsusetu ei ole ka fakt, et elanikkond ei kaalu enam üleminekut mõnele muule küttesüsteemile (elekter, halupuud vms), sest tarbija jaoks on hind püsinud 4–5 a samal tasemel.

Keskkonnakaitseaspektid

Mööda ei saa minna ka keskkonnakaitseküsimustest, millele on viimasel ajal suurt tähelepanu pööratud. Üha suurenevad keskkonnamaksud mõjutavad oluliselt ka väikekatlamajade töö majanduslikku külge.

Puit on loodusesõbralik kütus, mille tuhasisaldus on keskmiselt 1%, ka väävlisisaldus on tühine, 0,05...0,1%, samas tükktribal on vastavad näitajad 4...6% ja 0,2...0,3%.

Tabelist 3 nähtub, et keskkonda paisatud saasteainete hulk on aastatega tunduvalt vähenenud – seetõttu on vähenenud ka saastekahju hüvitis, kuigi hüvitise määrad on tõusnud 5 aastaga ~2,5 korda.

Tabel 3. Saasteainete heide keskkonda Liiva katlamajast 1995...1999. a

Table 3. NO₂, SO₂ emission from Liiva boiler house 1995...1999

Aasta	NO ₂	SO ₂	Lendtuhk
1995	1,78	31,82	28,15
1996	1,38	10,96	24,20
1997	1,04	5,73	15,16
1998	0,90	5,12	12,56
1999	0,90	3,05	9,70

1999. a eest tasusime saastekahju hüvitist 716 krooni, sama soojushulga tootmiseks kulunud kivisöehulga puhul vanades kateldes oleks meil tulnud tasuda umbes 2500 krooni.

Tähelepanekuid ja arvamusi

1. Taani katel on igati hea. Kolde erilisest materjalist võlvikivide tõttu (mille koostist valmistajatehas muidugi ei avalda) saab selles põletada ka üsna niisket kütust. Katelt hinnanud Energeetika Instituudi soojusenergeetika osakonna teadurite andmetel on katla kasutegur 80–82% ning ta koormus võib olla nimikoormusest (0,5 MW) suurem. Katlaga ja personali tegevusega on väga rahul ka valmistajatehas.
2. Praegusel ajal on maal väikekatlamaja käigus hoidmine väga raske. Üldjuhul on teeninduspiirkond suhteliselt väike, kütus koos veokuludega kallis, asjatundlikku kaadrit ja hea koolituse saamise võimalusi vähe, palju on nõukogudeaegseid energiamahukaid seadmeid. See kõik loob eeldused selleks, et kulud 1 MW·h kohta on maal tunduvalt suuremad kui linnas. Sama kehtib administratiivkulude kohta.
3. Enamik omavalitsusüksusi on hädas soojalaenude tagastamisega. Põhjus on enamasti selles, et aastaid tagasi koostatud äriplaanides esinevad arvud praegusel ajal

enam ei kehti. Tõusnud on kohalike kütuste hind, kavandatust rohkem on tõusnud ka elektri, bensiini ja diislikütuse hind. 4–5 aastat tagasi eraldus suhteliselt palju kaugkütte kliente süsteemist, mis tõstis hinda allesjäänutele.

4. Kui maal asuvad väikekatlamajad tahavad edasi eksisteerida, peavad need oma põhjendatud kulud soojatootmisele tagasi saama (nagu iga teinegi ettevõtte). Ei saa lähendada arvamusest, et kui maal on inimestel vähem raha, siis peab soojus ka 1,5–2 korda odavam olema – meil ei ole ju ükski muu kuluartikkel (elekter, kütus, transport) odavam kui linnas.
5. Suhteliselt korralike katlamaja sisseseadete kõrval on muud soojasüsteemi osad üldjuhul väga viletsad – puudub raha nii majade soojustamiseks kui ka kaasaegsete majasiseste reguleerimissüsteemide ostmiseks – see loob eeldused suurtele kadudele ja süsteemi tasakaalustamatusele.

Meie puhul tekib selline tunne, et vanade pükste ette on õmmeldud uus nõõp – kui katlasüsteem on väga hea, siis muud süsteemi osad – nii trassid kui majasisesed süsteemid on ajale jalgu jäänud.

6. Väikekatlamaja puhul on eriti oluline optimaalne töötajate arv, maksimaalne töö efektiivsus jne, kuid selge on see, et lõputult enam kokku hoida ei saa, saavutatud minimaalkuludest hakkavad kuluartiklite kallinedes suurenema ka kogukulud. Tähtis on, et ka soojasüsteemi teine pool, s.o tarbija, võtab kasutusele omapoolsed meetmed soojusenergia efektiivsemaks kasutamiseks – majade soojustamise jms, sest parim tulemus saavutatakse alati kahe poole koostöös.
7. Mida väiksema võimsusega on katlamaja, seda tähtsam on selles kvaliteetse kütuse kasutamine – juba väike kogus mittekvaliteetset kütust mõjutab põlemisprotsessi.

Biokütuste eelised ja miinused

1. Eelised.

- 1.1. Suureneb kohalike elanike tööhõive ja sissetulekud, selle kaudu ka valla tulubaas. Töö ja sissetuleku olemasolu hoiab võib-olla nii mõnegi perekonna maal. Meil oleks ju palju lihtsam vastu võtta imporditud kütuseid, kui ise vaeva näha kütuse varumisel. On võimalik ka nn multiefekti teke, st tööhõive annab sekundaarse efekti kaupade ja teenuste nõudluse suurenemise näol.
- 1.2. Väheneb sõltuvus kütuseimpordist – kõik me kindlasti mäletame aega, kui Venemaalt ei saanud sütt jne.
- 1.3. Tegu on suhteliselt kiiresti taastuva energiaallikaga (puit), st toimub säästlik ressursikasutus.
- 1.4. Keskkonda saastatakse minimaalselt ja makstakse sellega seonduvalt vähe saastemaksu, sest puit on ökoloogiliselt puhtaim kütus. Atmosfääri ei lisandu süsihappegaasi heitmeid, sest biomassi kasvamisel seostatakse atmosfäärist sama kogus süsihappegaasi, kui põlemisel tekib.
- 1.5. Paraneb piirkonna üldine heakord, mis Muhu kui atraktiivse turismipiirkonna jaoks ei ole vähetähtis.
- 1.6. Võrreldes “kivisöeajastuga” on töö ja katlamaja tunduvalt puhtamad.

2. Miinused.

1.7. Esialgu suhteliselt suurte investeeringute tegemine (meie puhul küllalt suured traktori, hakkuri ja kütusehoidla soetamiseks).

1.8. Väikekatlamaja puhul võib esineda kütuse kvaliteedi suur kõikumine.

Kokkuvõte ja edasised suunad

Lähtuvalt viimaste aastate kogemustest ja tulemustest on meie suund veelgi suurendada hakkpuidu osakaalu – selle tingivad nii väiksemad transpordikulud, väiksem saasteaste kui ka muud eespool loetletud põhjused.

Hakkpuidu osakaalu suurendamisel saab täiendavalt tööd pakkuda kohalikele elanikele.

Järgnevate aastate märksõnaks on kokkuhoid lõpptarbija juures – koostöös majavaldatajatega uurida võimalusi energiasäästuks.

Võimaluse korral tuleks rohkem mehhaniseerida hakkpuidu varumisprotsessi – materjali etteandmiseks paigaldada hakkurile hüdrauliline etteandeseade ja traktorile haaratsid, et töö muutuks efektiivsemaks.

Oleme praegu veendunud biokütuste (eelkõige puit) pooldajad, üldjuhul ei saa see kindlasti olla mingi reegel – igal kohal on oma geograafiline, looduslik jms eripära – mõnes teises kohas võib mõne muu kütuseliigi kasutamine olla majanduslikult palju otstarbekam.

USING BIOFUEL IN LIIVA BOILER HOUSE (MUHU PARISH)

Raido Liitmäe

Muhu Rural Municipality Government, Muhu Parish, e-mail: muhu.vald@mail.ee

Abstract

In 1995 the plant of Liiva boiler house was totally damped – we used 3 waterboilers (type E) for district heating. The boilers were over 10 years old and heated by coal, that was very expensive and there were difficulties with attaining coal.

In this situation local government decided to take part of small boiler houses' project financed by the World Bank "Distance heating reconstruction" loan.

New boiler system was installed and started in January 1996. There was installed REKA HKRS 0,5 MW water boiler heated by local fuel (woodchips and sod peat). There is also a new system inside the boiler house: new heat exchanger, water softening plant, circulation pumps, etc. 60 m³ storage is situated beside the boiler house (dug into the ground), and fuel moves from the fuel storage to the boiler by conveyors. The system is fully automatic. We bought also tractor MTZ-80 and wood chipper FARMI CH/SH 250.

There are 8 buildings connected to the heating system: 4 housing units, home for aged people, kindergarten, gym and schoolhouse – total volume about 40 000 m³. Local Municipality owns 75 % of the buildings, 25 % is owned by local people.

Experience we have got by using of the boiler house over 5 years.

1. The expenses for heating have decreased, and the consumer price also (Table 1).
2. The cheapest fuel for us is woodchips, because the woodchips are made of local wood, but sod peat has to be transported from 60 km away and transportation costs are high. Year by year the use of woodchips has increased – 286 m³ in 1996 and 885 m³ in 1999.
3. Liiva boiler house is owned by Muhu Rural Municipality Government – it is the best way to organize the work of such a small company.
4. The SO₂, NO₂ and CO₂ emission has decreased (decreasing pollution of environment).
5. In the future we would like to use more woodchips for heating – it is the cheapest fuel for us due to low transport expenses, the people of Muhu island can have new jobs, and also the look of island improves.
6. The next step for us is to raise warmth-preserving of buildings, reconstruction of heat systems inside buildings and better insulation of heating network – it means energy saving on customer's side.

TUULE KIIRUSE MÕÕTMISTE TULEMUSTEST TARTUS

Tõnis Tamm, Veli Palge, Jaan Lepa

EPMÜ Põllumajandusenergeetika instituut
Kreutzwaldi 56, 51014 Tartu, e-post: tonis.tamm@mail.ee, pvel@eau.ee,
jlepa@eau.ee

Annotatsioon

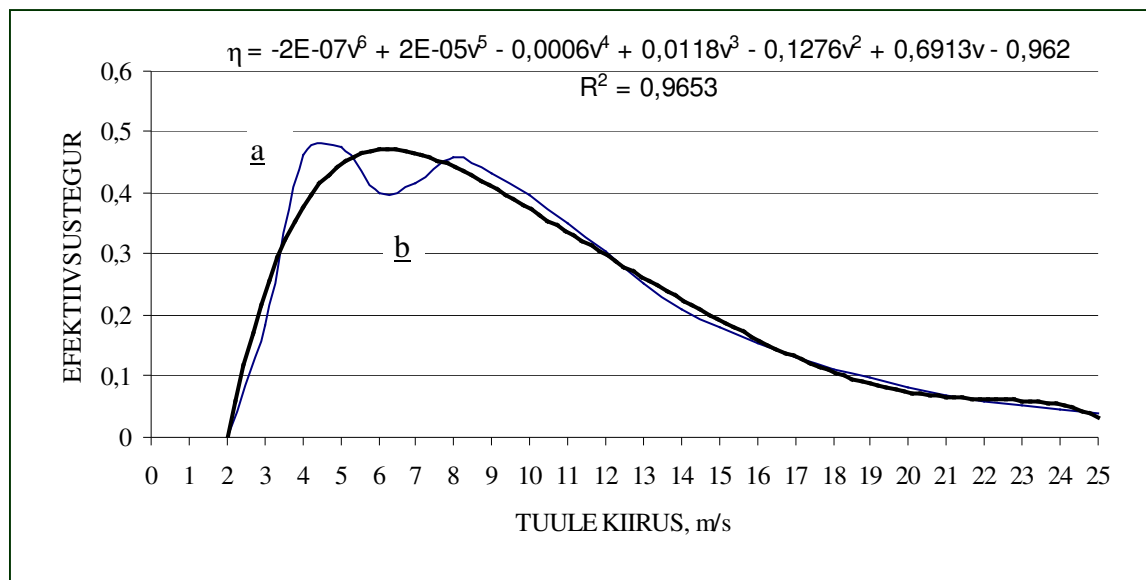
Käsitletakse tuule kiiruse mõõtmise tulemusi EPMÜ tehnikateaduskonna hoone katusel, kirjeldatakse mõõtmis skeemi ja tulemuste salvestamise süsteemi. Mõõtmisandmete töötlemisel leiti võimalik erienergia (energia tiiviku ringi pinna ühe ruutmeetri kohta), mida saaks toota antud kohas 250 kW-se tuulejõuseadmega Nordex N29/250, arvestades agregaadid tuule kiirusest sõltuvat kasutegurit, mille sõltuvus tuule kiirusest on antud joonisel 1. Tulemused on toodud viie kuu kohta joonistel 2...6 (1999. aasta septembrist kuni 2000. aasta jaanuarini). Selgub, et nimetatud ajavahemikul olid talvekuud sügiskuudest tunduvalt tuulisemad.

TUUL, ANEMORUMBOMEETER, ANALOOG-KOONDMUUNDUR, ENERGIA

EPMÜ Põllumajandusenergeetika instituudi juures on tuule kiiruse mõõtmisi tehtud alates 1999. aasta juulist. Tuule kiiruse mõõtmiseks kasutati maapinnast 27 m kõrgusele (tehnikateaduskonna katusest 9 m kõrgemale) paigaldatud anemorumbomeetrit M-47. Selle tahhogeneeraatori poolt genereeritava tuule kiirusest sõltuva anemorumbomeetri mõõtja signaali ahelale lülitati rööbiti suure sisetakistusega alaldi. Alaldilt saadav signaal edastati arvuti XT printeripordi külge ühendatud firma "Picolog" analoog-koodmuunduri ADC-11 sisendile. Analoogkoodmuundur registreeris sekundis kümme korda tuule kiirust ja juhtprogramm registreeris nende mõõtmistulemuste aritmeetilise keskmise. Seega saadi igas tunnis tuule kiiruse kohta 3600 mõõtmistulemust. Tuule suunda ei jälgitud. Arvuti XT kõvakettale mahtus sellise mõõtmisageduse juures umbes 10 ööpäeva mõõtmistulemused.

Mõõtmistulemuste töötlemiseks oli vaja mõõtmistulemused üle kanda teise arvuti kõvakettale. Esialgu kasutati selleks andmete elastkettale ümberkirjutamist. See viis osutus väga ajakulukaks, kestis kuni kolm tundi ühe mõõtmisperioodi kohta. Hiljem kasutati arvutite ühendamist printeripordide kaudu. Andmete ümberlaadimise ajaks tuli tuule kiiruse mõõtmine katkestada. Sellel põhjusel on mõõteandmetes perioodiliselt vaheajad. Suure sagedusega mõõtmisandmete kogumise kasuks tehti otsus, lähtudes soovist saada võimalikult üksikasjalisem ettekujutus tuule käitumise kohta. Artiklis (Tamm jt, 1999) on võrreldud põllumajandusenergeetika instituudi juures suure sagedusega tehtud mõõtmisi Tõravere tehtud mõõtmistega. Analüüsi järeldeuseks oli, et pikaajaliste mõõtmiste korral tuule energiaressursside hindamiseks on ka Tõravere kasutatava meetodikaga saadavad andmed kasutatavad. Kuid tuule käitumise iseärasuste hindamiseks sisaldavad Tõravere andmed liiga vähe informatsiooni.

Saadud tuulekiiruse andmed töödeldi arvesse võttes 660 m² tööpindalaga tuulegeneraatori Nordex N29/250 tehnilisi andmeid. Tuules sisalduva energia mõõtmistulemus korrutati läbi vastavalt tuule kiirusele generaatori efektiivsusteguriga (efektiivsusteguri sõltuvus tuule kiirusest on esitatud joonisel 1).



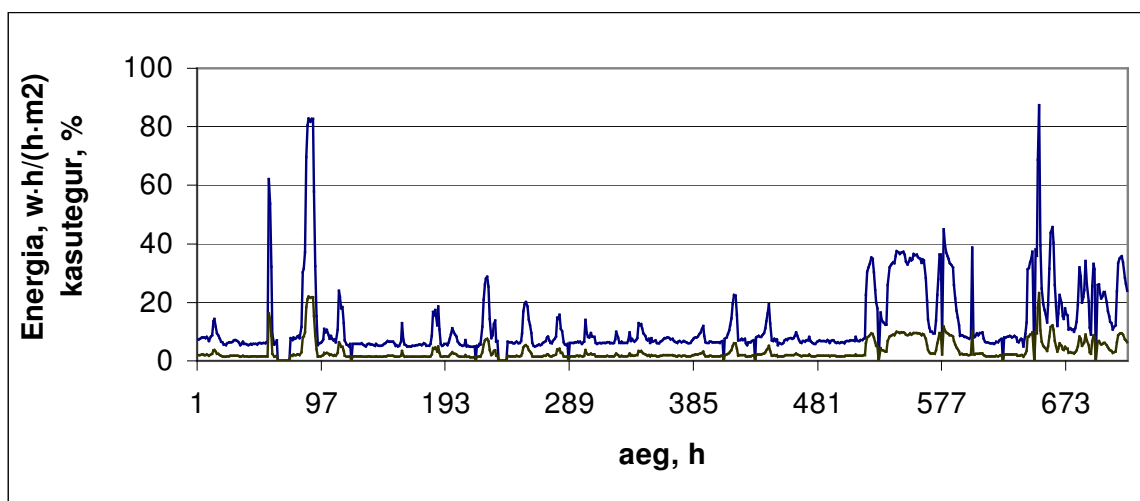
Joonis 1. Tuulegeneraatori Nordex N29/250 tehniliste andmete alusel konstrueeritud kasuteguri graafik a ja seda aproksimeeriv joon b

Figure 1. The power efficiency curve a constructed on the basis of technical data of the wind turbine Nordex N29/250 and the approximating curve b

Siinkohal on esitatud pidevate mõõtmiste andmed viie kuu kohta: 1999. aasta septembrist 2000. aasta jaanuarini. Tuule tunnienergia graafikud eelmainitud tuulejõuseadme ühe ruutmeetri kohta (ülemine joon) ja kasutegurite graafikud (alumine joon) on toodud joonistel 2...6. Viimaste summeerimisel saadi võimalik energiakogus m² kohta kuude kaupa:

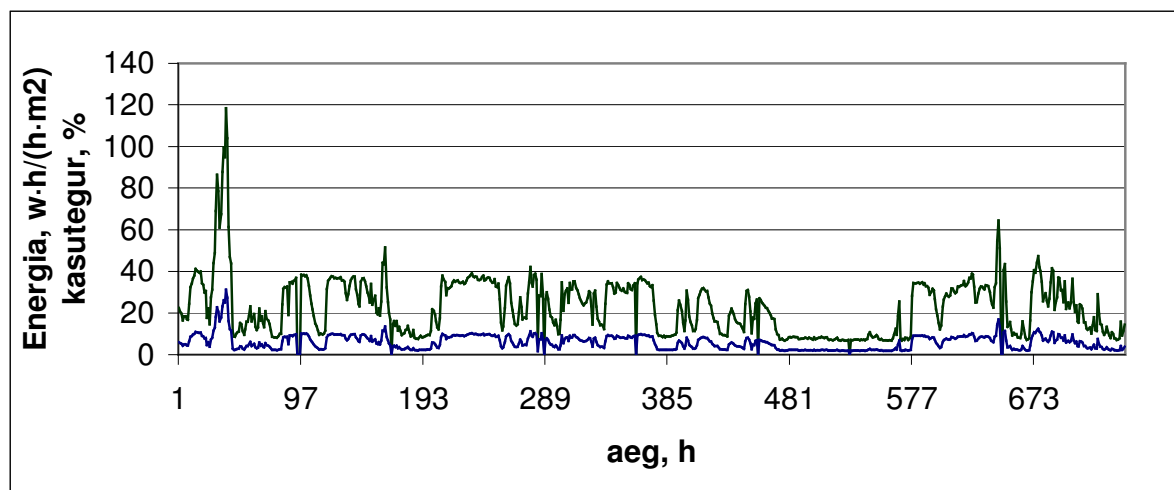
septembris	8,87 kW·h
oktoobris	16,90 kW·h
novembris	18,08 kW·h
detsembris	28,64 kW·h
jaanuaris	24,82 kW·h

Esitatud andmete põhjal võib näha, et talvekuud olid 1999/2000. aastal tuulisemad kui sügiskuud.



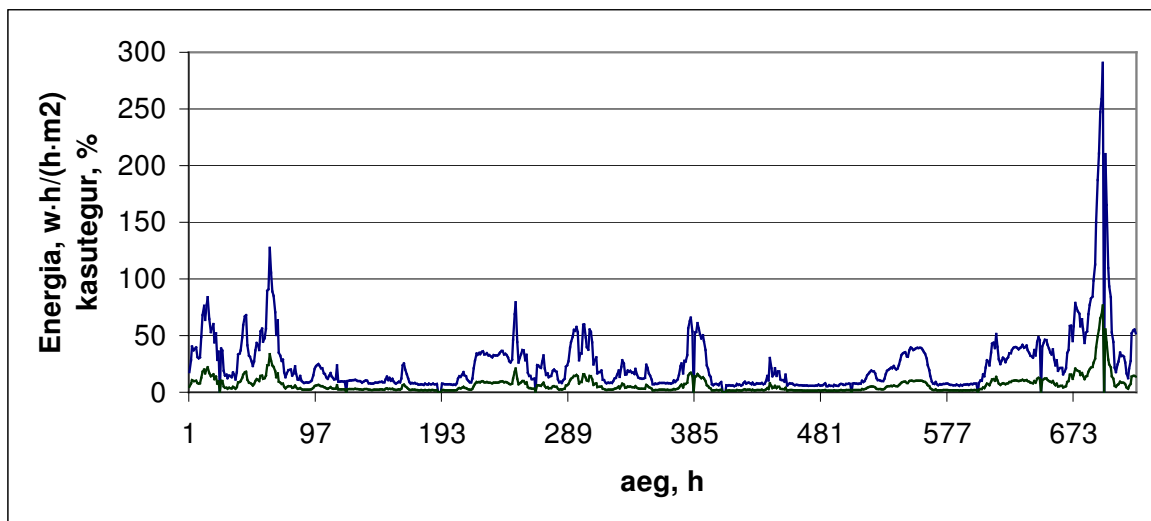
Joonis 2. EPMÜ tehnikateaduskonnas tehtud mõõtmiste alusel arvutustega määratud energia tunnis tiiviku pöörlemistasandi m^2 kohta, $(W \cdot h/m^2)/h$, mida võis tuulegeneraator Nordex N29/250 maksimaalselt toota septembris 1999 (null-väärtusega perioodid on tingitud vaheaegadest mõõtmisüsteemi töötamisel)

Figure 2. The amount of energy calculated on the basis of measurements compiled in the faculty of agricultural engineering of the EAU, $(W \cdot h/m^2)/h$, for Nordex N29/250 in Sept. 1999



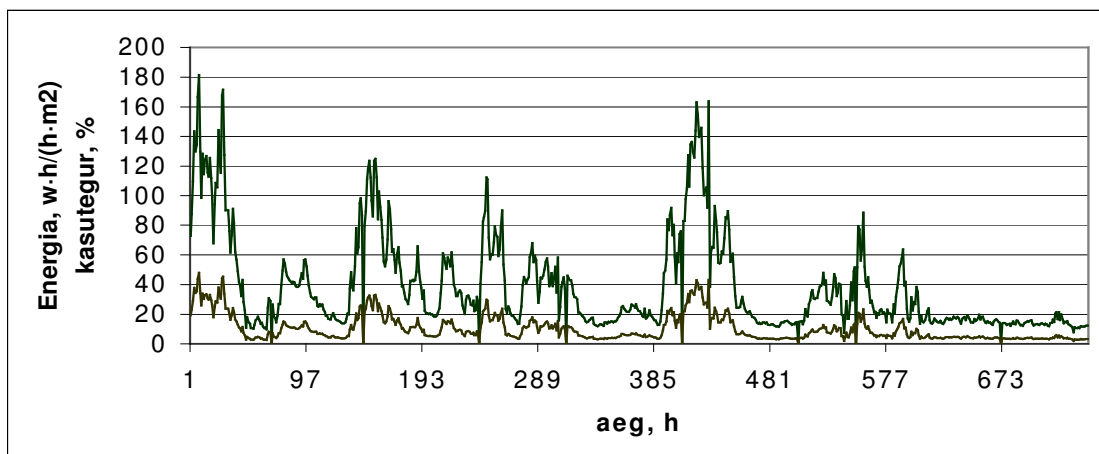
Joonis 3. EPMÜ tehnikateaduskonnas tehtud mõõtmiste alusel arvutustega määratud energia tunnis tiiviku pöörlemistasandi m^2 kohta, $(W \cdot h/m^2)/h$, mida võis tuulegeneraator Nordex N29/250 maksimaalselt toota oktoobris 1999 (null-väärtusega perioodid on tingitud vaheaegadest mõõtmisüsteemi töötamisel)

Figure 3. The amount of energy calculated on the basis of measurements compiled in the faculty of agricultural engineering of the EAU, $(W \cdot h/m^2)/h$, for Nordex N29/250 in Oct. 1999



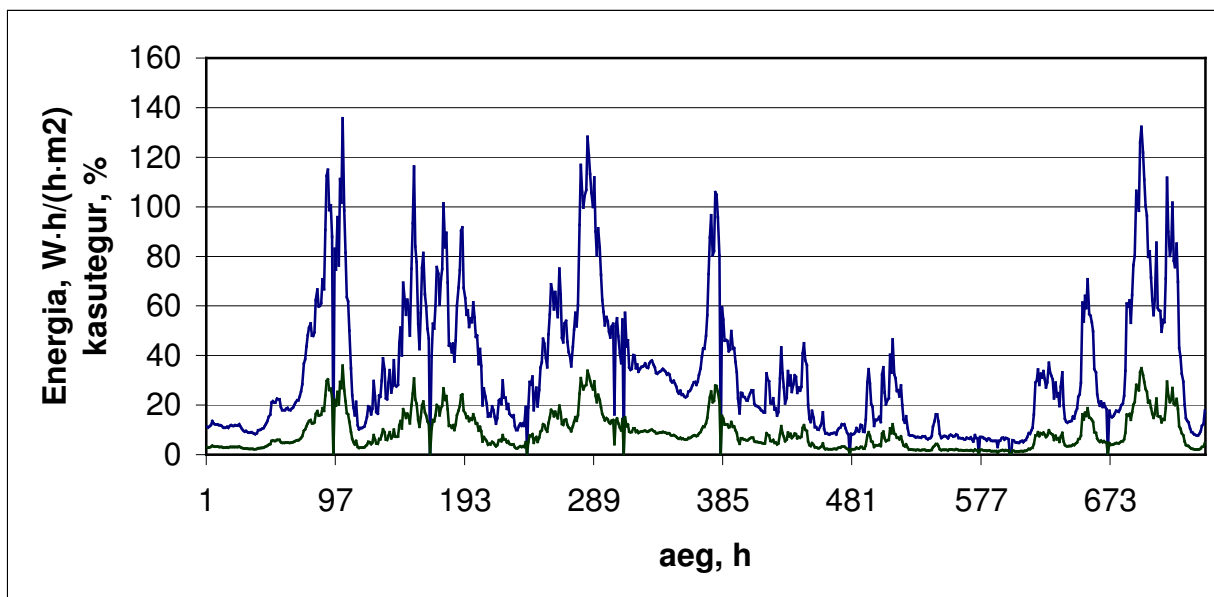
Joonis 4. EPMÜ tehnikateaduskonnas tehtud mõõtmiste alusel arvutustega määratud energia tunnis tiiviku pöörlemistasandi m^2 kohta, $(W \cdot h/m^2)/h$, mida võis tuulegeneraator Nordex N29/250 maksimaalselt toota novembris 1999 (null-väärtusega perioodid on tingitud vaheaegadest mõõtmisüsteemi töötamisel)

Figure 4. The amount of energy calculated on the basis of measurements compiled in the faculty of agricultural engineering of the EAU, $(W \cdot h/m^2)/h$, for Nordex N29/250 in Nov. 1999



Joonis 5. EPMÜ tehnikateaduskonnas tehtud mõõtmiste alusel arvutustega määratud energia tunnis tiiviku pöörlemistasandi m^2 kohta, $(W \cdot h/m^2)/h$, mida võis tuulegeneraator Nordex N29/250 maksimaalselt toota detsembris 1999 (null-väärtusega perioodid on tingitud vaheaegadest mõõtmisüsteemi töötamisel)

Figure 5. The amount of energy calculated on the basis of measurements compiled in the faculty of agricultural engineering of the EAU, $(W \cdot h/m^2)/h$, for Nordex N29/250 in Dec. 1999



Joonis 6. EPMÜ tehnikateaduskonnas tehtud mõõtmiste alusel arvutustega määratud energia tunnis tiiviku pöörlemistasandi m^2 kohta, $(W \cdot h/m^2)/h$, mida võis tuulegeneraator Nordex N29/250 maksimaalselt toota jaanuaris 1999 (nullväärtusega perioodid on tingitud vaheaegadest mõõtmissüsteemi töötamisel)

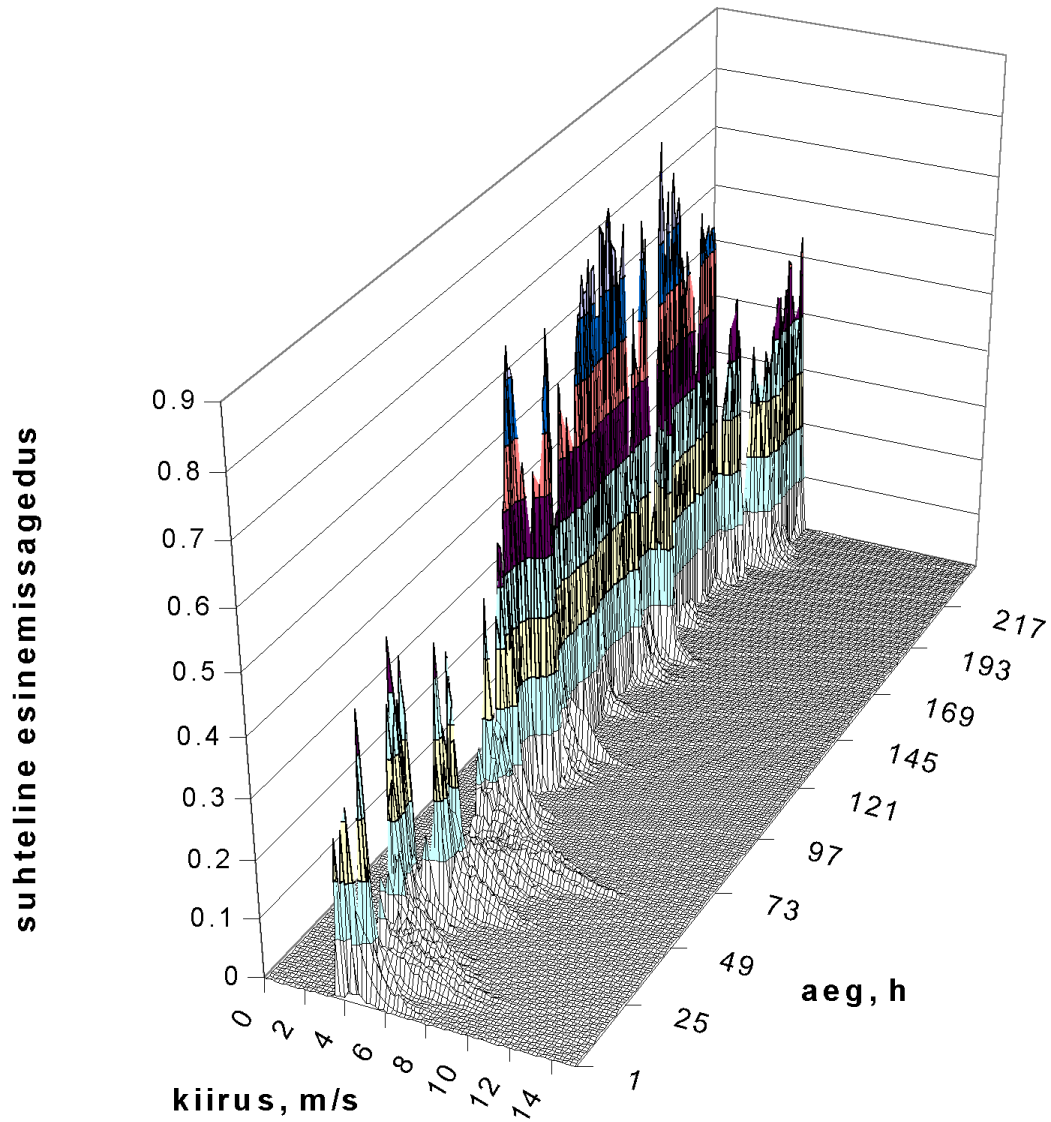
Figure 6. The amount of energy calculated on the basis of measurements compiled in the faculty of agricultural engineering of the EAU, $(W \cdot h/m^2)/h$, for Nordex N29/250 in Jan. 1999

Võrreldes novembri alguse kohta esitatud tuule kiiruse jagunemise graafikut (joonis 7) generaatori poolt potentsiaalselt toodetava energiaga, on näha, et suuremaid energiakoguseid saab tuulegeneraator toota tugevamate tuulepuhangute ajal. Jooniselt 7 selgub, et anemorumbomeetri paigalduskohas esinevad tugevamad tuuled puhangutena (tunnise ajavahemiku kestel esines isegi tuulekiirusi kuni 20 m/s – joonis 8 ja joonis 9). Just selliste puhangute ajal on tuulegeneraator võimeline tootma rohkem energiat. Ei saa välistada, et tuule kiiruse muutumise iseloomu (peegeldub mõõtmistulemustes) võisid mõjutada õppehoone enda konstruktsioonist ja tuule suunast selle suhtes ning lähedastest ehitistest (EPMÜ ühiselamu-kõrghoone) tingitud aerodünaamilised põhjused.

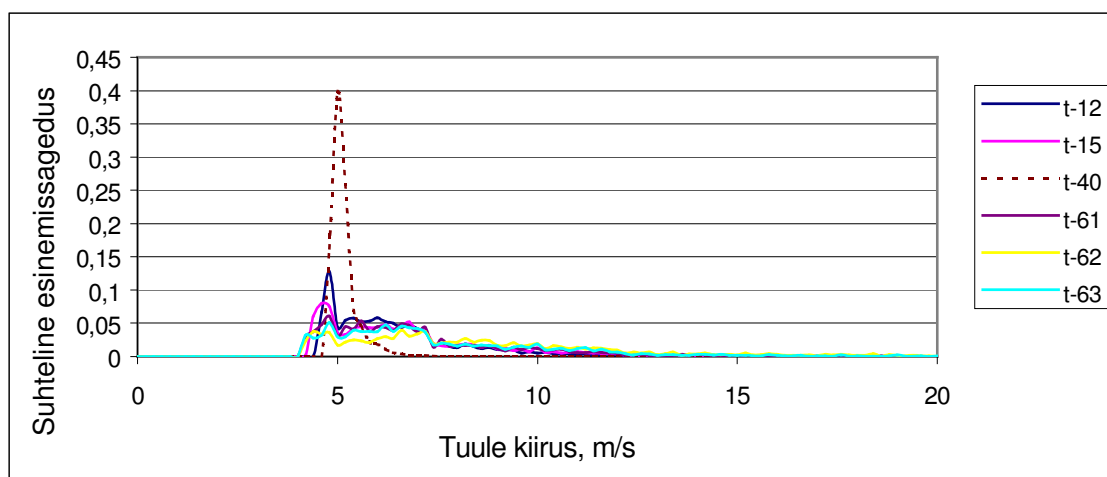
Joonistel 2...6 toodud graafikutelt selgub, et üksikute suurte tuulejõuseadmete kasutamine võib põhjustada võrku antava energia ebahütlust ja sellega mõjutada elektrivõrkude ja energiasüsteemi töö stabiilsust¹. Sellest võib olla tingitud ka entusiasmide puudumine elektrienergia varustussüsteemide tuuleenergeetika arendamiseks. Suurel määral aitaks mittestabiilselt energiat tootvate seadmete võrku ühendamise probleemi lahendamisele kaasa odavate ja töökindlate energia salvestusseadmete kasutuselevõtt. Joonisel 7 on näidatud tuule iseloomu muutus ühtlase ja muutuva kiiruse juures. Ühtlase tuulekiiruse korral tuule kiirus muutub väikeses vahemikus ja esinemissageduse ordinaat on kõrge. Muutuva tuulekiiruse korral kiirused esinevad laias vahemikus ja esinemissageduste ordinaadid on madalad.

¹ Uuemates süsteemides on selline mõju vähendatud miinimumini. Toim. märkus.

Nende jaotuste iseloomu kirjeldavad samuti joonis 8 (saab võrrelda ühtlase ja muutuva kiirusega olukordi) ja joonis 9 (muutuva tuule kiirusega olukorrad suurendatud mastaabis).

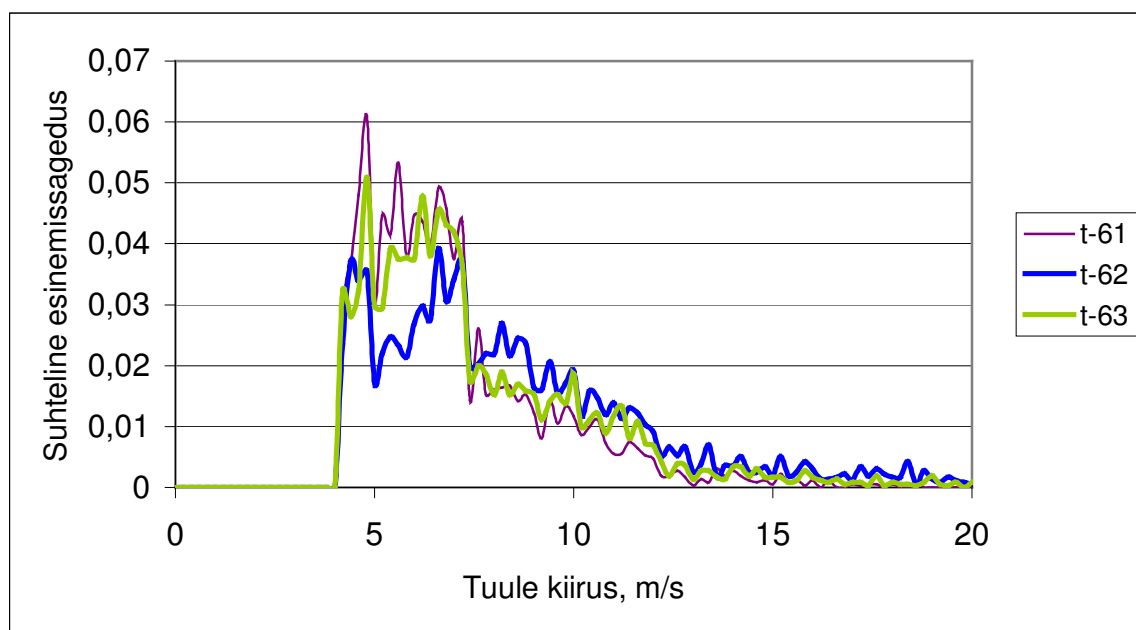


Joonis 7. Tuule kiiruste jaotumine ajavahemikus 1.–10. nov 1999
Figure 7. The distribution of wind speed in the period of November 1–10, 1999



Joonis 8. Tuule kiiruse jaotuskõverad tunniajaliste ajaintervallide kestel ühtlase (t-40) ja muutliku (ülejäanud) tuulekiiruse korral

Figure 8. Distribution curves of wind speed for hourly time intervals for constant (t-40) and for fluctuating (the other) wind at the beginning of November 1999



Joonis 9. Tuule kiiruse jaotuskõverad tunniajaliste ajaintervallide kestel muutliku tuulekiiruse korral

Figure 9. The curves of wind speed distribution for various hourly time intervals for high and fluctuating wind at beginning of November 1999

KirjandusReferences

1. Tamm, T., Palge V., Lepa, J. (1999) Tuuleenergia kasutamisevõimalusi Tartu ja Pärnu maakonnas. EPMÜ teadustööde kogumik nr. 204. Tartu: 205–210.

RESULTS OF MEASURING OF WIND SPEED IN TARTU

Tõnis Tamm, Veli Palge, Jaan Lepa

Institute of Agricultural Energy Engineering of the Estonian Agricultural University
e-mail: tonis.tamm@mail.ee, pvel@eau.ee, jlepa@eau.ee

Abstract

Our report describes results of measuring wind speed in Tartu 9 m above the roof of the building—faculty of Agricultural Engineering of the Estonian Agricultural University (27 m above the earth surface). Report also describes the measuring equipment and the system of data acquisition. The research resulted in finding the specific energy for the 1 m² swept area of the rotor of wind power unit Nordex N29/250. Measurement results are given for a 5-month period from September 1999 to January 2000.

TUULEJÕUSEADME KASUTEGURI MODELLEERIMISEST

Tõnis Tamm, Veli Palge, Jaan Lepa

EPMÜ Põllumajandusenergeetika instituut, Kreutzwaldi 56, 51014 Tartu
e-post: tonis.tamm@mail.ee, pvel@eau.ee, jlepa@eau.ee)

Annotatsioon

Tuulejõuseadme poolt toodetava energiakoguse arvutamisel on olulise tähtsusega agregaadid kasutegur, mis sõltub tuule kiirusest. See sõltuvus on kirjeldatav suhteliselt keerukate matemaatiliste valemitega, mis on erinevate seadmete jaoks erinevad. Käesolevas artiklis on need valemid toodud mõnede tuulejõuseadmete kohta, milliste tunnusjooned on olemas infomaterjalides.

TUUL, KASUTEGUR, ENERGIA

Seosed ja arutlused

Tuule kui energiaallika võimsus P' vattides pinnaühiku kohta on määratav valemiga

$$P' = \frac{\rho \cdot v^3}{2}, \quad (1)$$

kus ρ – õhu tihedus kg/m^3 on muutuv suurus, sõltudes näiteks rõhust, kuid ligikaudseteks arvutusteks võib väliskeskkonna jaoks võtta 1,3, v – tuule kiirus m/s .

Tuulejõuseadmele tuulevoo poolt rakendatav võimsus P vattides on

$$P = P' \cdot F_e, \quad (2)$$

kus F_e on tuulejõuseadme tiiviku ringi efektiivpindala, m^2 , mille võib samuti ligikaudseteks arvutusteks võtta võrdseks tiiviku ringi pindalaga.

Tuule üheks olulisemaks energeetiliseks iseärasuseks on kiiruse v juhuslik (puhanguliselt muutuv) iseloom. Probleemi lähem uurimine on näidanud, et tuule kiirus sõltub märgatavalt ka selle kõrgusest maa- (mere-) pinnast, kasvades kõrguse suurenedes. Viimane peab paika keskmiste väärtuste kohta ning hetkväärtused võivad sellest reeglist kõrvale kalduda juhuslikest asjaoludest tingitud keeriste tõttu.

Praktikas ei huvita meid mitte niivõrd tuulevoo võimsus, vaid just agregaadid väljundis saadav (näiteks elektriline) võimsus. Viimane sõltub seadme kogukasutegurist, mida mõned allikad (Twidell, 1990) ka efektiivsusteguriks nimetavad. See tegur omakorda sõltub nii agregaadid konstruktsioonist (tüübist) kui ka tuule kiirusest, olles enamikul juhtudel kiirustel alla 2...3 m/s ligilähedane nullile, hakkab siis kiiresti kasvama, saavutab maksimumi kiiruste vahemikus 5...12 m/s ja hakkab suurematel kiirustel jälle langema, muutudes tuule kiirustel 24...25 m/s jälle nulliks, kuna tavalised agregaadid tuleb taolistel juhtudel ohutuse kaalutlustest lähtudes välja lülitada.

Selleks et määrata orienteerivalt tuuleagregaadid poolt toodetavat energiat, lähtudes tuule kiirusest ja selle muutuse iseloomust, võib kasutada valemit

$$W = \sum_n (P_n \cdot \eta_n \cdot t_n), \quad (3)$$

kus P_n on tuulevoo võimsus ajavahemiku t_n jooksul, η_n – tuuleagregaadi efektiivsustegur (kasutegur), tuulevoo võimsusel P_n .

Efektiivsusteguri määramisel võib lähtuda agregaatide infomaterjalides antavast võimsusest sõltuvalt tuule kiirusest

$$\eta_n = \frac{Pa_n}{P_n}, \quad (4)$$

kus Pa_n on tuuleagregaadi väljund- (elektriline) võimsus tuulevoo võimsusel P_n .

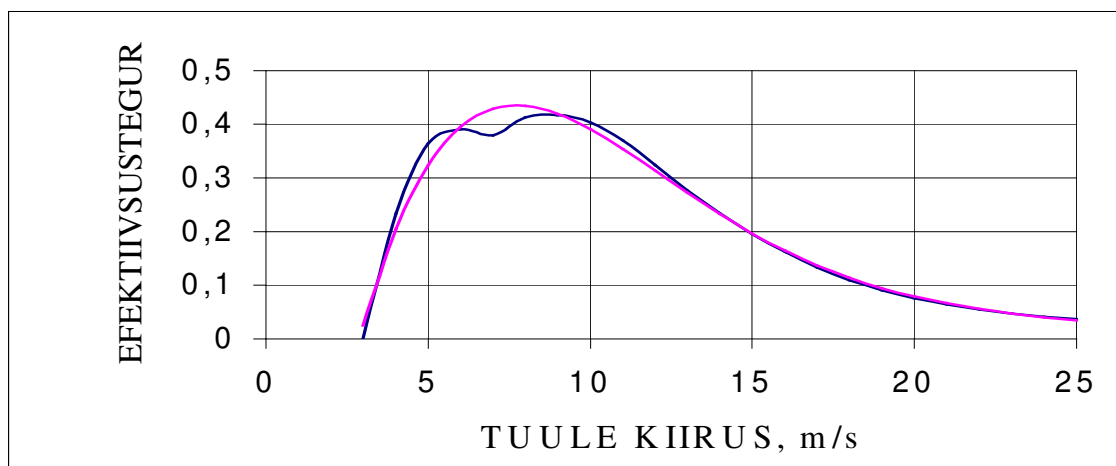
Kui on antud tuule kiiruse muutumise graafik $v_n = f(t)$ ja ajavahemikul t_n on energia W määramiseks vajalik veel agregaadid efektiivsustegur $\eta_n = f(P_n)$ (leitav valemiga 4), mis tuleb määrata matemaatilise sõltuvusena. Näiteks tuuleagregaadile Nordex N29/250 on see modelleeritud polünoomiga

$$\eta_n = 1,063874 \cdot 10^{-6} \cdot v^5 - 1,022459 \cdot 10^{-4} \cdot v^4 + 3,741829 \cdot 10^{-3} \cdot v^3 - 6,341744 \cdot 10^{-2} \cdot v^2 + 0,4573146 \cdot v - 0,6729174. \quad (5)$$

Tuuleagregaadile Nordex N50/800 on efektiivsusteguri sõltuvus tuule kiirusest avaldatav polünoomiga

$$\eta_n = 9,330112183 \cdot 10^{-6} \cdot v^5 - 9,287227 \cdot 10^{-5} \cdot v^4 + 3,578658 \cdot 10^{-3} \cdot v^3 - 6,503499 \cdot 10^{-2} \cdot v^2 + 0,5186521 \cdot v - 1,035139 \quad (6)$$

Viimase sõltuvus on toodud joonisel 1.



Joonis 1. Tuuleagregaadi Nordex N50/800 efektiivsusteguri sõltuvus tuule kiirusest
 Figure 1. Dependence of the efficiency factor of the windpower unit Nordex N50/800 on wind speed

Oleme püüdnud leida efektiivsusteguri üldistatud valemit firma “Vestas” tuulejõu seadmetele efektiivsusteguri kõvera tõusvale osale

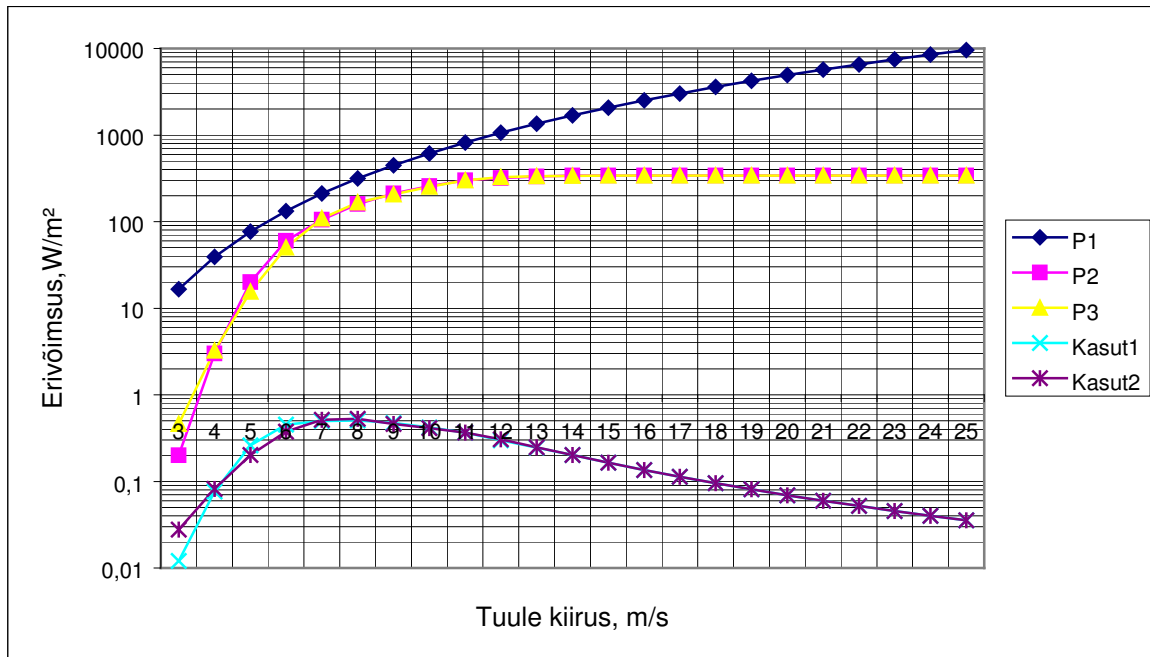
$$\eta_n = \frac{k}{(1+150 e^{-(1,7v_n)})} \quad (7)$$

ja langevale osale

$$\eta_m = k - \left(\frac{k}{(1 + 150 \cdot e^{-(0,8(v_m - 11))})} \right), \quad (8)$$

kus k on tuulejõuseadme maksimaalne efektiivsustegur, v_n – tuule kiirused 0...12,5 m/s, v_m – tuule kiirused 12,5...25 m/s.

Kui on võimalik matemaatiliselt avaldada tuuleagregaadi väljundvõimsuse sõltuvus tuule kiirusest, on võimalik leida kasutegur nimetatud võimsuse ja tuulevoo võimsuste suhtena.



Joonis 2. Tuule erivõimsus – P1, Taani firma tuuleagregaadi “Vestas V29-225 kW” erivõimsus (leitud tehase poolt antud tunnusjoonelt (Vestas V29-225) – P2, valemi (9) abil modelleeritud tunnusjoonelt leitud erivõimsus – P3, agregaaadi kasutegur tehase tunnusjoone põhjal (Kasut1), modelleeritud tunnusjoone P3 põhjal leitud kasutegur (Kasut2)

Figure 2. The wind specific power – P1, the specific power for the Danish wind generator Vestas V29-225 kW based on the data from the characteristic curve given by the manufacturer (Vestas V29-225) – P2, the specific power calculated by the formula (9) – P3, the efficiency of the wind generator based on the manufacturer’s data – “Kasut1”, the efficiency “Kasut2” of the same wind generator derived on the basis of modeled characteristic P3

Nimetatud agregaaadi tunnusjoone modelleerimiseks on kasutatud valemit

$$P3 = \frac{341}{1 - 350000 \cdot e^{-1,28 \cdot v}} + \frac{450}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot 1,55}} e^{-\frac{(v-8,3)^2}{4,8}} \quad (9)$$

ning kasutegurite leidmiseks

$$Kasut1 = \frac{P2}{P1}, \quad (10)$$

$$Kasut2 = \frac{P3}{P1}. \quad (11)$$

Probleemi paremaks näitlikustamiseks on kõik graafikud kujutatud poollogaritmilises teljestikus, mis võimaldab vaadelda kõiki suurusi koos ja sobivas mastaabis.

Kokkuvõte

Tuule kui energiaallika võimsuse uurimisel on otstarbekas lähtuda agregaadid poolt antavast (elektrilisest) võimsusest tiiviku ringi pinnaühiku kohta (erivõimsusest), mis võimaldab omavahel võrrelda erinevaid seadmeid. Väga oluline on erivõimsuse, s.t ka kasuteguri sõltuvus tuule kiirusest, täpsemalt selle sõltuvuse matemaatiline väljendus (mudel), millest lähtudes saab prognoosida antud maakohas toodetavaid energiakoguseid näiteks valemi (3) abil, lähtudes kasuteguri valemist (5), (6), (7), (8) või (11).

Kirjandus \bowtie **References**

1. Twidell, J., Weir, A. (Твайделл Дж., Уйер А.) (1990) Возобновляемые источники энергии. Энергоатомиздат, Москва: 392.
2. (2000) Vestas V29-225 kW. Pitch regulated wind turbines. (MIDT MARKETING A/S, Denmark, 6.)

MODELING OF POWER EFFICIENCY OF A WIND GENERATOR

Tõnis Tamm, Veli Palge, Jaan Lepa

Estonian Agricultural University
e-mail: tonis.tamm@mail.ee, pvel@eau.ee, jlepa@eau.ee)

Abstract

In order to calculate the quantity of energy produced by a wind generator, it is necessary to know the power efficiency, which depends on wind speed. This dependence can be described by complicated mathematical equations that vary for different devices. This article includes equations for some generators characteristic curves of which are included in catalogues.

HEIN KÜTUSENA

Mart Hovi, Külli Hovi, Kuno Jürjenson

Eesti Põllumajandusülikool, Põllumajandusenergeetika instituut
Kreutzwaldi 56, 51014 Tartu
e-post: mhovi@eau.ee, lohe@eau.ee, kuno@eau.ee

Annotatsioon

Lühikese kasvuperioodiga põllukultuuride (hein, teraviljapõhk, energiavõsa) kasutamine kütusena võimaldab vältida põhilise kasvuhoonegaasi CO₂ hulga suurenemist maakera atmosfääris, ära kasutada praegu söötis olevaid (enam kui 200 000 ha) põllupindu, suurendada maaelanikkonna tööhõivet jne. Tuuakse andmed energeetiliseks kasutamiseks perspektiivsemate heinakultuuride (ida-kitsehernes, päideroog) kütteväärtuse ja tuhasisalduse kohta. Ühelt hektarilt koristatav energiahein võimaldab saada umbes 20 MW·h energiat. Kõne alla tuleb ka heinagaasi kasutamine.

KASVUHOONEGAAS, KÜTTEVÄÄRTUS, IDA-KITSEHERNES

Fossiilse päritoluga kütuste hinna kiire kasv, nende põletamisega kaasneva põhilise kasvuhoonegaasi CO₂ massi pidev suurenemine maakera atmosfääris ja mõne (nafta) varude lõppemise oht juba lähemate aastakümnete jooksul peaks inimkonna tõsiselt mõtlema panema meie energeetika tuleviku üle. Kahjuks mõjutab inimeste käitumist enamasti tehniline ja majanduslik inerts ning murrangulisi otsuseid võetakse vastu ainult äärmuslikes olukordades või juhtudel, kui positiivne tulemus on saavutatav lihtsalt ja väga väikeste kulutustega. Ja sedagi siis, kui mõjukad ringkonnad neid otseselt ei takista.

Kui meil räägitakse energia tootmisest, on tegu enamasti mõne käepärase energialiigi muundamisega meile vajalikku vormi. Näiteks soojus- ja elektrienergiat saame enamasti kütustes sisalduva keemilise energia muundamisel.

Kasutades lähteallikana fossiilseid kütuseid, milleks Eesti oludes on peamiselt põlevkivi, väiksemas ulatuses ka turvas, teeme loodusele korvamatut kahju. Samal ajal aga hoolitseb loodus ise Päikese abil energia pideva ringluse eest maakeral. On ju nii tuul kui ka voolav vesi sisuliselt salvestunud päikeseenergia.

Kui fossiilsete kütuste näol on meil tegemist miljoneid aastaid tagasi salvestunud päikeseenergiaga, siis meie põldudel ja metsades toimub see protsess ka tänapäeval. Taastumistsükkel, mis turba puhul on näiteks aastatuhandeid, metsapuidul mõnikümne aastat, piirdub põllu- ja heintaimedel aastaga, s.t kevadine või eelmise aasta külv võib anda täissaagi.

Olukorras, kus Eestis on kasutamata enam kui 200 000 hektarit hiljuti käibel olnud põllupindu ning kurdetakse pidevalt energia hindade, fossiilkütuste keskkonnareostuse ja maaelanikkonna tööhõive üle, oleks põllutoodangu energeetiline kasutamine igati teretulnud. Kui teravilja kasutamine kütusena võib põllumeestes tekitada psühholoogilist vastuseisu, siis mõne suurema saagiga heintaimede puhul seda ilmselt pole. Eesti

oludes võiks küsimuse tõstatamiseks lugeda tehnikamagister Mart Hovi töid selles valdkonnas (Hovi, 1995) ja (Hovi jt, 1995).

Energiatoormena sobivad kasutamiseks eelkõige taimed, mille kuivainetoodang põllumaa pinnauhiku kohta on võimalikult suur. Meie oludes, mis ei ole suure biomassi toodanguga taimede kasvatamiseks küll eriti soodsad, võiks kõne alla tulla eelkõige päideroog (*Phalaris arundinacea*), roog-aruhein (*Festuca arundinacea*) ja ida-kitsehernes ehk galeega (*Galega orientalis*). Mart Hovi magistritöö raames määrati EPMÜ Eerika katsepõllult 1994. a kogutud ida-kitseherne kuivaine kütteväärtus – 16 580 kJ/kg (4,6 kW·h/kg) ja tuhasisaldus ~8%.

Päideroo kohta olid autoritel kasutada Soome andmed (Hovi, 1995) kevadel koristatud 12,3% niiskusesisaldusega materjali kohta. Selle kütteväärtus oli 14,9 MJ/kg (4,14 kW·h/kg). Tarbimisaine tuhasisaldus oli päiderool ~4,7%. Arvestades kasutuskuiva energiaheina toodanguks ~5 t/ha ja kütteväärtuseks ~4 kW·h/kg, saame hektarilt ~20 MW·h energiat, millega võiks rahuldada väiksema talumaja aastase kütusevajaduse. Heina võib kasutada ka gaasi tootmiseks. Heinagaasi kütteväärtus on umbes 1,5 kW·h/m³.

Kasutamiseks tuleks hein kas granuleerida või briketeerida, mis nõuab täiendavaid kulutusi. Võrreldes puiduga on heina taamusteks suurem tuhasisaldus ja tuha pisut madalam sulamistemperatuur. Eelisteks lühike tootmistsükkel, peaaegu söötis maade kiire kasutuselevõtt ja maaelanikkonna tööhõive parendamine.

Kirjandus ✕ **References**

1. Hovi, M. (1995) Mitmeaastased rohhtaimed energeetilise toormena Eesti Vabariigis. Magistritöö. Tartu: 66.
2. Hovi, M., Hovi, K. (1995) Energiahein – ja miks ka mitte? Maakodu, 5: 10–11.
3. Hovi, M., Lepa, J. (1995) Energiahein kui kohalik kütus. Postimees, 3. mai.

HAY AS FUEL

Mart Hovi, Külli Hovi and Kuno Jürjenson

Estonian Agricultural University, Department of Agricultural Energy Engineering
e-mail: mhovi@eau.ee, lohe@eau.ee, kuno@eau.ee

Abstract

Hay, as a fuel does not contribute to increasing CO₂ content of the atmosphere. Production of hay enables to make use of fields that have remained uncultivated (currently more than 200,000 ha in Estonia) and to increase employment of people in the rural areas. Hay from 1 ha contains approximately 20 MW·h of energy.

PÄIKESEKOLLEKTORI ENERGIABILANSS

Veli Palge

EPMÜ Põllumajandusenergeetika instituut, Kreutzwaldi 56, 51014 Tartu
e-post: pvel@eau.ee

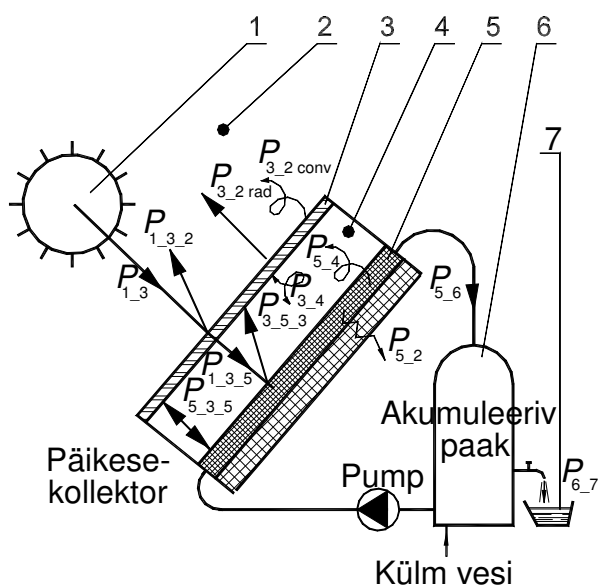
Annotatsioon

Vaadeldav töö kirjeldab lihtsa päikesekiirgust soojusenergiaks muundava süsteemi, mis koosneb päikesekollektorist, tsirkulatsioonipumbast ja akumulaatorpaagist, energiabilansi analüüsi kasutades POWERSIM-keskkonnas koostatud mudelit. On esitatud mudeli graafiline kirjeldus, POWERSIM-keskkonnas süsteemi töö simuleerimise tulemusena saadud mitmesuguseid süsteemi tööd ajas kirjeldavaid graafikuid ja päikeselt saabuva energia jagunemine erinevateks soojusvoogude komponentideks.

PÄIKESEKIIRGUS, PÄIKESEKOLLEKTOR, ENERGIABILANSS, MODELLEERIMINE, SIMULEERIMINE

Kollektor

Päikesekollektorite kasutamisel on sageli suureks probleemiks päikesekollektori võimekus kinni püüda temale pealangevat päikesekiirgust. Vaadeldav töö püüab vastust anda küsimustele: kui suur osa kollektorile pealangevast otsesest päikesekiirgusest muundatakse akumulaatorpaaki salvestuvaks energiaks ja millest salvestuv energiaosa sõltub. Kirjeldatud eesmärgi saavutamiseks on kasutatud päikesekollektoriga seotud soojusprotsesside modelleerimist arvutipaketi POWERSIM keskkonnas. Soojusprotsesside modelleerimine võimaldab paremini aru saada soojuslikes süsteemides toimuvatest protsessidest. Elektrialaste teadmistega inimesed koostaksid ülalkirjeldatud süsteemis toimuvate protsesside ana-



Joonis 1. Modelleeritav süsteem
Figure 1. The system under modelling

lüsümiseks soojusliku süsteemi elektrilise aseseemi. Vaadeldaval juhul käsitletakse vaid POWERSIM-keskkonna poolt pakutavaid võimalusi ja soojuslevi teooria põhimõtteid.

Päikesekollektoris toimuvate protsesside uurimiseks on vaadeldaval juhul põhimõtete selgitamiseks valitud võimalikult lihtne veesoojendus-süsteem, mis vastavalt joonisele 1 koosneb päikesekollektorist, akumulaatorpaagist ja tsirkulatsioonipumbast. Selles süsteemis, arvestades asetleidvaid soojusülekanneid, on eristatud seitse olulisemat soojusobjekti: 1 – päike, 2 – ümbritsev õhk, 3 – kollektorit kattev klaas,

4 - klaasialune õhk, 5 – kiirguse neelaja, 6 - soojusenergiat akumul eeriv veepaak, 7 - tarbija.

Joonisel 1 on näidatud ka soojusvood: P_{1_3} – päikeselt 1 klaasipinnale 3 saabuv kiirgusvoog; $P_{1_3_2}$ – päikeselt 1 saanud klaasi 3 pinnalt ümbritsevasse keskkonda 2 peegeldunud kiirgusvoog; $P_{1_3_5}$ – kiirguse P_{1_3} klaasist 3 läbitunginud neelajani 5 jõudev kiirguse osa; $P_{3_5_3}$ – klaasi 3 läbinud ja neelajalt 5 klaasile 3 tagasi peegelduv kiirguse $P_{1_3_5}$ osa; $P_{5_3_5}$ – kiirguse neelajalt 5 kiirgunud, kuid kattedklaasilt 3 neelajale 5 tagasipeegeldunud kiirgusvoog; P_{3_2rad} – kiirgusega klaasi 3 pinnalt keskkonda 2 lahkuv energiavoog; P_{3_2conv} – klaasi 3 pinnalt keskkonda 2 konvektsiooni teel lahkuv soojuskadu; P_{3_4} – konvektiivsel teel toimuv soojusvahetus klaasi 3 ja klaasialuse õhu 4 vahel; P_{5_4} – konvektiivne soojusvahetus kiirguse neelaja 5 ja klaasialuse õhu 4 vahel; P_{5_2} – soojuskadu väliskeskkonda 2 läbi soojusisolatsiooni soojusjuhtivuse teel; P_{5_6} – soojusvoog neelajast 5 akumul eerivasse paaki 6 soojuskandja vahendusel; P_{6_7} – soojusvoog akumul eerivast paagist 6 sooja veega tarbijatele 7.

Päike on kirjeldatud süsteemis energiaallikaks. Maakera ümbritsevat puhast õhku peetakse päikesekiirgust läbilaskvaks, kuid siiski neeldub osa sellest kiirgusest atmosfääris enne maapinnale jõudmist (pilved, veeaur, CO₂ ja muud). Klaas on päikesekiirgust hästi läbilaskev materjal, kuid klaasi alla jõudev kiirguseosa sõltub oluliselt kiirte ja klaaspinna vahelisest nurgast, mis oluliselt mõjutab klaasilt peegelduvat kiirguse osa. Klaasialust õhku seoses tema kihi paksusega loetakse samuti kiirgust täielikult läbilaskvaks. Klaasialune kiirgust neelav pind on põhiline energiapüüdja. Selle kõige olulisemaks parameetriks on pinna kiirguse neeldumistegur, mille suurus mõjutab oluliselt süsteemi kasutegurit. Kiirgust neelavasse pinda saab neelduda see päikesekiirguse osa, mis pole neeldunud atmosfääris ega peegeldunud klaasi pinnalt tagasi. Samuti vähendavad kogutavat energiat neelduvalt pinnalt konvektsiooni ja soojusjuhtivuse tõttu esinevad kaod. Süsteemis sisalduv akumul eeriv veepaak on vajalik kiirguse neelajas soojenenud vee kogumiseks. Kiirguse neelajalt akumul eerivasse paaki ülekantav energiavoog sõltub oluliselt kiirguse neelajast paaki saabuva soojuskandja temperatuurist. Mida kõrgem on soojuskandja temperatuur paagis oleva vee temperatuuri suhtes, seda suurem energiavoog suunatakse paaki ja vastupidi. Kui kiirguse neelajas oleva soojuskandja temperatuur on paagis oleva vee temperatuuriga võrdne, siis paaki energiat juurde ei anta. Sel puhul kogu neelajas neelduv energia eraldub süsteemist soojuskadudena. Kõik loetletud mõjufaktorid on kirjeldatavad matemaatiliste seostega, mis omavahel kombineerudes moodustavadki süsteemi kirjeldava matemaatilise mudeli. Mudeli aluseks on soojusbilanss, mis võtab arvesse kõik eespool loetletud energiavood ja kirjeldab süsteemi kuuluvate kehade soojusvahetust:

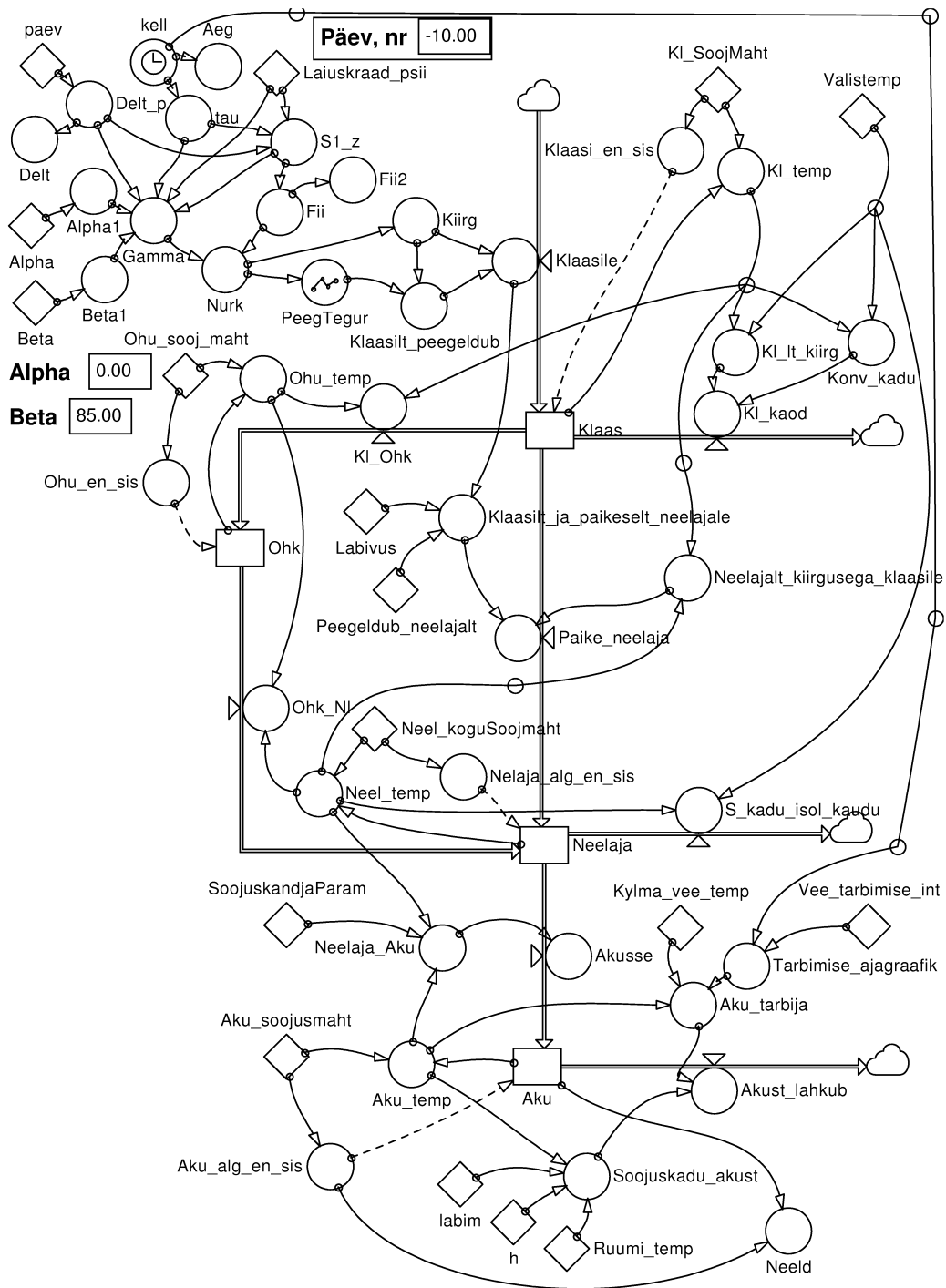
$$Q_3 = Q_{3_alg} + \Delta t \cdot (P_{1_3} - P_{1_3_5} - P_{3_4} - P_{3_2}) \quad (1)$$

$$Q_4 = Q_{4_alg} + \Delta t \cdot (P_{3_4} - P_{5_4}) \quad (2)$$

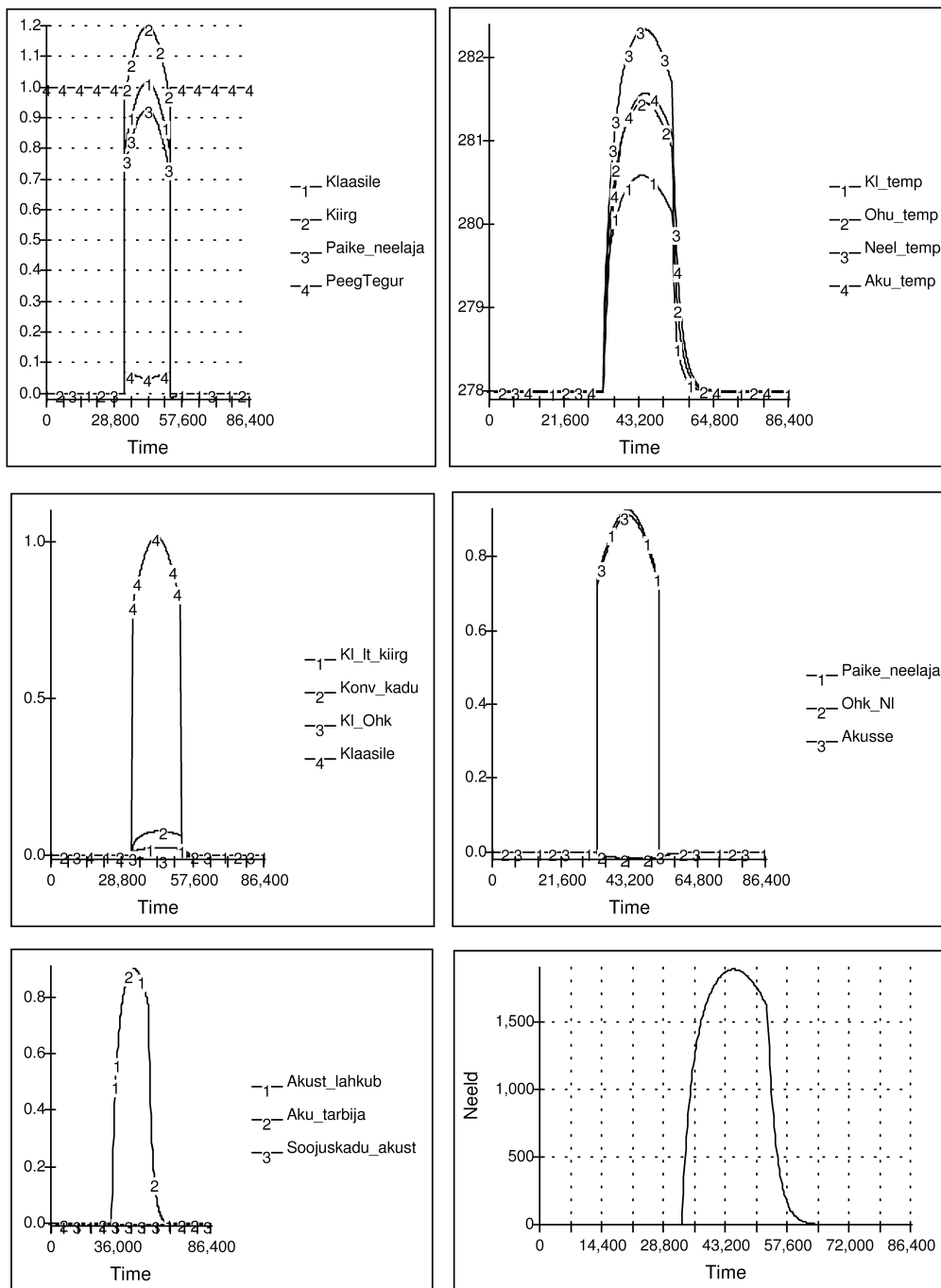
$$Q_5 = Q_{5_alg} + \Delta t \cdot (P_{1_3_5} + P_{5_4} - P_{5_6} - P_{5_2}) \quad (3)$$

$$Q_6 = Q_{6_alg} + \Delta t \cdot (P_{5_6} - P_{6_7}). \quad (4)$$

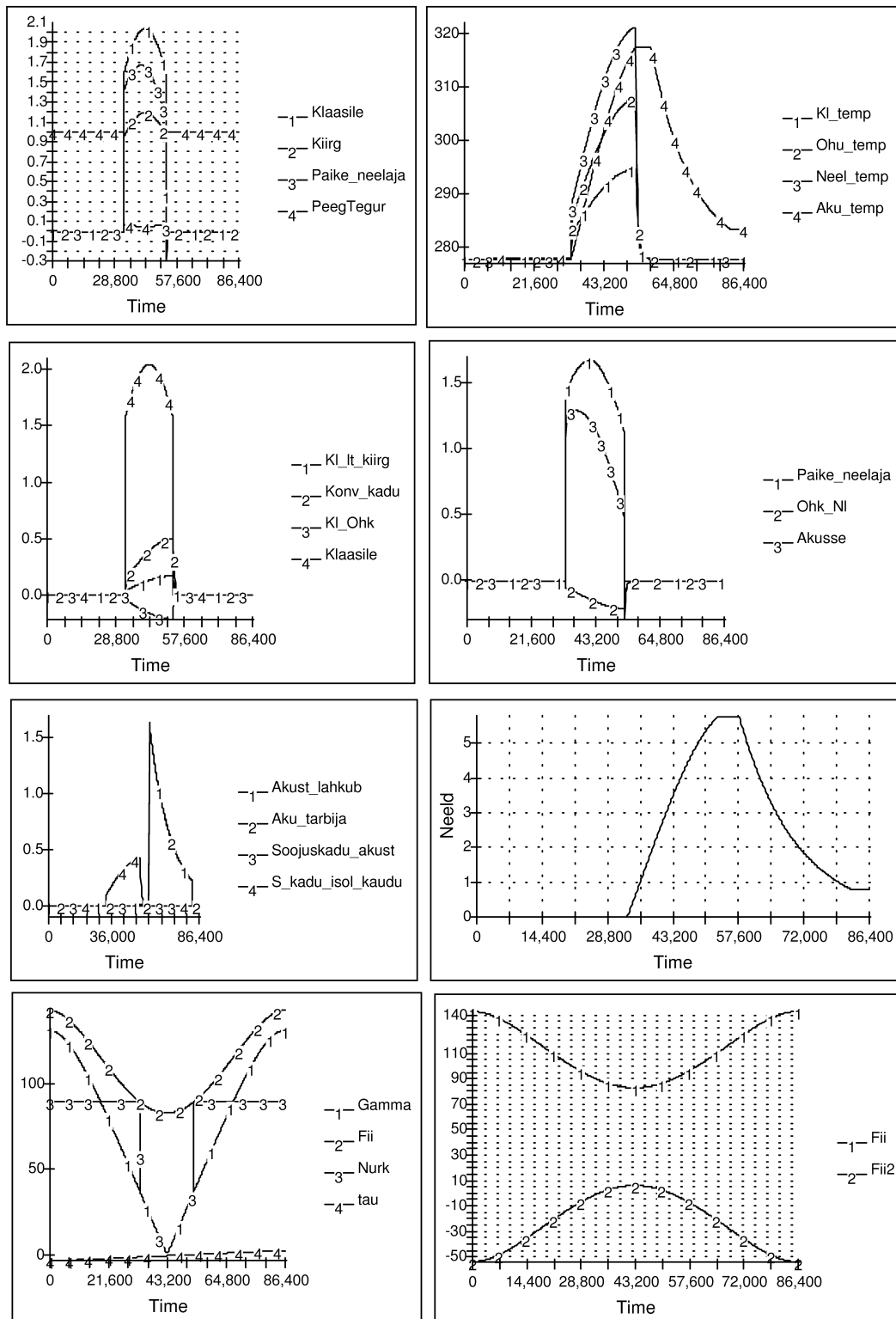
Siin Q_x on x-nda keha energiasisaldus vaadeldaval ajahetkel, Q_{x_alg} – x-nda keha energiasisaldus vaadeldavale ajavahemikule Δt võrra eelneval ajahetkel, P_{x_y} – x-ndasse kehasse saabuv või sellest lahkuv soojusvoog.



Joonis 2. Joonisel 1 kirjeldatud süsteemi POWERSIM-mudel
 Figure 2. The POWERSIM model for in Figure 1 described system



Joonis 3. Mudeli töö tulemusena saadud graafikud juhuks, kui soojusakumulaatorist tarbitakse kogu aeg ühtlase intensiivsusega vett
 Figure 3. Charts of modelling at case if water consumption is continuous



Joonis 4. Mudeli töö tulemusena saadud graafikud juhuks, kui sooja vett hakatakse tarbima õhtul pärast energia salvestumise katkemist kiirguse vastuvõtjas Figure 4. Charts of modelling at case if warmed water will be used after discontinue the penetrating of the solar radiation through radiation receiver covering glass

Mudeli koostamisel kasutati päikeselt saabuva klaasi läbiva kiirgusvoo määramiseks põhimõtteid, mis on kirjeldatud allikas (Palge, 1997). Selles kirjeldatud reeglite kasutamiseks on vaja algandmetena kasutada päikesekiirgust neelava süsteemi asukoha laiuskraadi ϕ , nurka α (mudelis Alpha, nurk lõunasuuna ja klaasi pinna normaali horisontaalpinnale langeva projektsiooni vahel) ja nurka β (mudelis Beta – nurk horisontaalpinna normaali ja kollektori pinna normaali vahel). Lisaks neile on vaja veel arvutada nurk τ (mudelis tau, see kirjeldab päikese asukoha nurka (nurk ekvatoriaaltasandil tekkiva päikesekiirte projektsiooni ja lõunasihi vahel, sõltub kohalikust päikeseajast). Kiirguse klaasist läbimine või sellelt peegeldumine sõltub nurgast γ (mudelis Gamma), mis on nurk päikesekiirte ja klaasi pinna normaali vahel.

$$\gamma = f(\alpha, \beta, \tau, \phi), \quad (5)$$

Soojusvood P_{3_x} , P_{4_x} , P_{5_x} , ja P_{6_x} arvutatakse lähtudes soojuslevi teooriast.

Joonisel 2 on esitatud kirjeldatud kollektorit sisaldava süsteemi POWERSIM-mudel. POWERSIM-mudel on koostatud stiliseeritud soojusmahtuvustest (rööpkülilikud), nendevahelistest soojusvoogudest (kahekordsed jooned), soojusvoogusid mõjutavatest funktsioonidest (ringid), funktsioonidevahelistest seostest (nooltega jooned) ja konstantidest (rombid). Iga mudeli element omab pärisnime, mis on valitud lähtudes tema funktsioonist mudelis. Mudeli tööks vajalikud konstandid ja funktsioonid on peidetud mudeli elementidesse. Selle tulemusena on mudel samaaegselt ka töötav programm. Seda programmi saab käivitada mitmesugustes töörežiimides, töötavat mudelit saab hetkeks peatada ja siis uuesti käivitada. Programmi/mudeli töötamise käigus arvutatakse pidevalt reaajas toimuvate protsesside ja süsteemi koostisosade olekuparameetreid. Mudeli töö tulemusena arvutatud parameetrite väärtuste alusel saab välja joonistada parameetrite ajas toimuvate muutuste graafikuid (joonised 3 ja 4) ja samuti saab tellida mudelilt nende parameetrite muutusi kirjeldavate väärtuste tabelleid. Joonisel 3 on esitatud mudeli töö tulemusena saadud graafikud juhuks, kui kogu aeg tarbitakse soojusakumulaatorist ühtlase intensiivsusega vett, sõltumata saadava vee temperatuurist, joonisel 4 on esitatud mudeli töö tulemusena saadud graafikud juhul, kui sooja vett hakatakse tarbima õhtul pärast energia salvestumise katkemist kiirguse vastuvõtjas. Graafikutel esitatud viited võimaldavad graafikutest aru saada isegi neid eraldi kirjeldamata.

Vaadeldava mudeli töö alusel saab teha järelused:

- ruumis kohtkindlalt kinnitatud päikesekollektor töötab efektiivselt ainult 6 tunni kestel;
- eelmise olukorra põhjuseks on klaasi peegeldus- ja neeldumisteguri sõltuvus päikesekiirte ja klaasi pinna normaali vahelisest nurgast;
- neelava pinna neeldumisteguri osatähtsus süsteemi kasuteguri kujunemisel on oluline, kuid mõjustab kasutegurit vähem kui klaasi peegeldustegur;
- eelnevast saab teha ulmelise järeluse: päikesekollektori kasuteguri oluliseks parendamiseks tuleb katteks kasutada päikesekiiri mittepeegeldavat klaasi (kattematerjali).

Kirjandus ▫ References

1. Palge, V. (1997) Dependence of the Penetration of Solar Radiation into Greenhouse on the Angle of the Roof and North-South Orientation of the Greenhouse. Proc. V. 2 of 7th International Conference on Solar Energy at High Latitudes, 9–11 June, Espoo-Otaniemi, Finland. Eds Konttinen, P. and Lund, P. D. '97 North Sun. Tummavuoren Kirjapaino Oy. Helsinki: 784–789.

THE HEAT BALANCE OF A SOLAR COLLECTOR

Veli Palge

Department of Agricultural Energy Engineering of the Estonian Agricultural University, e-mail: pvel@eau.ee

Abstract

The paper is created to describe a tool for visualizing and analysing processes of heat flux in Solar Collectors that should be used in order to generate possibilities for improving construction of Solar Collectors and for justifying the choice of specific materials. The electrical substitution scheme also should be used in order to better describe heat flow processes in Solar Collectors. Classical methods of heat engineering may be used for determining parameters of the electrical substitution scheme. POWERSIM – software for modelling systems and simulating processes connected with the systems – was used to describe the dynamics of the processes. Usage of POWERSIM is an innovative way for treating the problems connected with Solar Collectors. The used treatment makes it easy to explain how heat flux processes occur while at the same time using strict scientific rules and achieving high accuracy. The model and treatment is also applicable for educational purposes. The model created in POWERSIM environment allows simulating of processes of heat flux in Solar Collectors and easier study of processes connected with the Collector. During the simulation, it is possible to change the parameters of the Collector materials and to study the results of the change of the parameters. Therefore, by way of simulation, it is possible to estimate how the parameters of the Collector materials affect the effectiveness of the Collector operations. At the case under studying were found that the reflection of the Solar Collector covering material influences the effectiveness of Solar Collector more than absorption coefficient of surface of radiation absorber.

The model can also be used for explaining the principles of the work of Solar Collectors in educational institutions.

KESKKONNASÕBRALIKUD TEHNOLOOGIAD JA MATERJALID LOODUSVARADE UURIMISES

Mihkel Koel

TTÜ Keemia Instituut

Akadeemia 15; 12618 Tallinn, e-post: vmihkel@argus.chemnet.ee

Annotatsioon

Vaatluse all on uut tüüpi lahustite, nagu ülekriitilises olekus süsinikdioksiid, kõrgel temperatuuril ja rõhul olev vesi, toatemperatuuril vedelad soolad – ioonsed vedelikud. Esitatakse tulemusi nende kasutamise võimalustest põlevkivide uurimisel.

ROHELINE KEEMIA, ÜLEKRIITILINE OLEK, EKSTRAKTSIOON, IOONSED VEDELIKUD

Keemia ümbritseb kaasaegset inimest kõikjal. Seepärast iga ettevõtmine nii maavarade kasutamises kui ka energeetikas on seotud keemiliste ainete ja protsessidega elukeskkonnas. Jätkusuutliku arengu planeerimisel tuleb kõikidele keemiaga seotud probleemidele pöörata suurt tähelepanu ja võidelda tuleb puhtama elukeskkonna saavutamiseks vajalike muutuste eest nii laboratooriumis kui ka tootmises. Tööstuslikult arenenud riikide ühendus OECD formuleeris oma säästliku keemia konverentsil, Veneetsias 1998. a järeldused ja soovitused säästliku ehk rohelise keemia vallas: “Säästliku arengu laias raamistikus me peame pingutama, et saada maksimaalne ressursside efektiivsus läbi selliste ettevõtmiste nagu energia ja mitte-uuenevate ressursside konserveerimine, riski minimiseerimine, saastumise ärahoidmine, jääkide minimiseerimine produkti eluea igas astmes ning välja töötama selliseid tooteid, mis on vastupidavad ja korduvkasutatavad ning taaskäideldavad. Säästlik keemia pingutab nende eesmärkide saavutamiseks disainides ja valmistades keskkonnasõbralike tooteid, kasutades efektiivseid ja tootlikke keskkonnaohutuid protsesse”.

Selline lähenemine eeldab, et igasugune jätkusuutlikkuse planeerimine on kompleksne protsess ning kõikides tehtavates otsustes peavad olema kaetud järgmised valdkonnad.

- Toote elutsükli hindamine.
- Kogu kulude hindamine.
- Roheline keemia.
- Roheline tehnoloogia.
- Ühiskonna surve (saastemaksud, transpordikulud, keskkonnasõbra maine jt).

Nii rohelises keemias kui ka tehnoloogia hindamisel suurema objektiivsuse saamiseks on vaja kasutada mõõdetavaid suurusid, mida siis erinevate protsesside võrdlemisel saab kasutada. Ilmselt saab selliseid suurusid valida palju, kuid põhiliste hulgas peaks olema järgmised: mass, energia, ohtlike ja mürgiste ainete jaotus, lahustite kasutamine, kasutatud reaktsiooni efektiivsused – atomaarne efektiivsus (millises ulatuses kasutatakse reagendi molekuli produkti molekuli saamiseks) ja reaktsiooni massi efektiivsus (kogu mass 1 kg produkti saamiseks).

Siit on näha lahustite tähtsat osa mitmesuguste keemiliste protsesside läbiviimisel. Ühest küljest on paljude orgaaniliste lahustite kasutamine seotud otsese ohuga keskkonnale seoses nende lenduvuse ja tuleohtlikkusega, toksilisusega elusa looduse suhtes, kahjuga osoonikihile (kloori ja fluori sisaldavate lahustite poolt). Teisest küljest on enamiku orgaaniliste lahustite kasutamise puhul raskusi nende utiliseerimisega. Lahustite eraldamine ja puhastamine on energiakulukad protsessid.

Ohtlikele lahustitele asendajate otsimisele sunnivad rahvusvahelised konventsioonid ja lepingud, millega piiratakse just mitmesuguste kergelt lenduvate ainete (VOC – *volatile organic compounds*) kasutamist. Eesti Vabariik on liitunud või liitumas nende lepingutega ja sellest tulenevad kohustused kõigile keemiaga tegelevatele institutsioonidele ka meil.

Üheks esimeseks selliseks leppeks oli Genfi konventsioon 1979. a, mis käsitles piiriülese õhusaaste kauglevi, millele 1991. a lisati ka protokoll lenduvate orgaaniliste ainete kohta. Eesti Valitsus kiitis 19. jaanuaril 2000. a heaks piiriülese õhusaaste kauglevi konventsiooni ning väävliühendite, lämmastikoksiidide ja lenduvate orgaaniliste ühendite protokollidega ühinemise seaduse eelnõu. Ette on valmistatud piiriülese õhusaaste kauglevi konventsiooni juurde kuuluva seire ja hindamise Euroopa ühisprogrammi (EMEP) protokolliga ühinemise seaduse eelnõu. Viimatinimetatud programmi täitmise osas on töö käinud juba aastaid ja selle jätkamist finantseeritakse riikliku seireprogrammi vahenditest ka edaspidi. Konventsiooni juurde kuuluvad käesoleval ajal veel väävliühendite heitkoguste edasise vähendamise, raskmetallide ning püsivate orgaaniliste ühendite heitkoguste vähendamise protokollid. Nende protokollidega ühineb Eesti aastatel 2001–2002. Eemalt vaadates näeb Eesti Vabariik üsna hea välja, sest kõik nendes protokollide sätetes õhuheitmetele esitatavad nõudmised on Eestil tegelikult täidetud. Samas teavad kõik keemikud täpselt, kuidas neid eeskirju tegelikult järgitakse ja nõudeid täidetakse.

Teiseks valdkonnaks, mis oluliselt puudutab lahustite kasutamist, on Maad ümbritseva osoonikihi kaitsmine. Selle kohta on olemas 1985. aastast Viini konventsioon osoonikihi kaitse kohta ja 1987. a Montreali protokoll osoonikihti lagundavate ainete kohta, millele on hiljem juurde tulnud Londoni (1990) ja Kopenhaageni (1992) protokollide parandused. Eesti ühinemisel Euroopa Liiduga on üheks eeltingimuseks ühinemine osoonikihti kahandavate ainete Montreali protokolliga ja selle Londoni ning Kopenhaageni täienduste ja parandustega. 12. aprillil 1999. aastal ratifitseeris Eesti Montreali protokolliga Londoni ning Kopenhaageni parandused. Nende aktidega on määratud teiste seas ka selliste laborites ja tootmises laialt levinud lahustite nagu tetrakloorisüsiniku, metüleenkloriidi ja kloroformi kasutamise tingimused.

Neile lepingutele, mis puudutavad kergesti lenduvaid keemilisi ühendeid, lisandus 1989. aastal Baseli konventsioon piiriülese ohtlike jääkide ja nende utiliseerimise kohta. USA-s on vastava seaduse täitmine tagatud Puhta Õhu Aktiga 1990. a (USA Clean Air Act), mis samuti oluliselt piirab tööstuses kasutatavate lahustite hulka.

Terve mõistuse ja seadusandlikku surve uute keskkonnasõbralikumate lahustite otsimiseks nii laboris kui ka tehnoloogilistes protsessides kasutamiseks on suur ning ka Eestis on mõningaid selleks sobivaid aineid uuritud.

Osutub, et sobivaid asendusaineid eriti palju ei olegi ja nende väheste laialdasem kasutamine uutes olukordades vajab lähemat uurimist. Eestis on mõningaid asendusainete kandidaate uuritud just lähtudes meie peamise maavara – põlevkivi – kasutamisest. See väga keeruline objekt on heaks väljakutseks uute meetodite ja tehnoloogiate katsetamisel. Kaasajal kujuneb peamiseks eesmärgiks põlevkivist efektiivselt väärtuslikku keemiatööstuse toorainet saada, kusjuures tuleb arvestada kõrgendatud nõudeid keskkonnanahoiuks.

Käesolevas töös on vaatluse all kolm keskkonnasõbralikku lahusti kandidaati: süsinikdioksiid, vesi ja ioonsed vedelikud. Süsinikdioksiid ja vesi normaalsetest tingimustest erinevatel rõhkudel ja temperatuuridel on hoopis eriliste omadustega ning seega kasutatavad teistes rakendustes kui normaaltingimustel.

Kuigi vesi ja süsinikdioksiid on väga levinud ja laialt kasutatavad ained, on nende omadused ja käitumine kõrgematel rõhkudel ja temperatuuridel suhteliselt vähem uuritud valdkond ning lisaks nõuab spetsiaalset aparatuuri. Selles suhtes on nende kasutuselevõtmine kallim tavalisest tehnoloogiast, mis tuleb kompenseerida protsessi suurema efektiivsuse ning loodusesõbralikkusest saadava kasuga. Ioonsed vedelikud on madalal temperatuuril vedelad soolad, mille omadused võivad neile anda keskkonnasõbralikke rakendusi. Ioonsed vedelikud on väheuuritud klass aineid ning siin on juhtivaks jõuks teaduslik uudishimu uute lahenduste leidmisel.

Aine ülekriitiline olek

Aine on ülekriitilises olekus, kui tema temperatuur ja rõhk ületavad nn kriitilisele punktile vastava temperatuuri ja rõhu. Kriitilises olekus kaob erinevus koos eksisteerivate vedela ja gaasilise oleku vahel. Kriitilise punkti parameetrid on iga aine jaoks erinevad ja praegu puudub täpne teooria nende ennustamiseks, lähtudes aine struktuurist. Näiteks kriitilised parameetrid on süsinikdioksiidi jaoks ($p_{kr} = 72,8 \text{ atm}$, $T_{kr} = 31,1 \text{ °C}$ ja $d_{kr} = 0,466 \text{ g/mL}$) ja vee jaoks ($p_{kr} = 217,6 \text{ atm}$, $T_{kr} = 374,2 \text{ °C}$ ja $d_{kr} = 0,322 \text{ g/mL}$).

Ülekriitilises olekus on võimalik lahusti omadusi reguleerida gaasisarnasest kuni vedeliku sarnaseni, muutes rõhku ja/või temperatuuri. Ülekriitilises olekus fluidumi jaoks on võimalikud sellised vahepealsed tihedused, mida ei saavutata kriitilisest madalamatel rõhkudel ja temperatuuridel. Huvi kriitilises olekus fluidumite vastu on tingitud just sellest, et nende omadused on gaaside ja vedelike omaduste vahepealsed. Võrreldes vedelikega on fluidumite tihedused ja viskoossused väiksemad, difusioon aga suurem. Ülekriitilise fluidumi märgamistvõime, kombineerituna lahustamisvõimega, annab parandatud lahusti omadused. Varieerides temperatuuri ja rõhku, saab muuta suures ulatuses fluidumi tihedust ja seega selle võimet lahustada teisi aineid, mis annab võimaluse selektiivseks lahustamiseks fluidumi poolt. Kui kasutatakse süsinikdioksiidi, siis saab ülekriitilise oleku eeliseid arvestada suhteliselt madalatel temperatuuridel, mis on oluline termolabiilsete ainete ekstraheerimisel või käitlemisel.

Lisaks on võimalik muuta fluidumi omadusi vähese hulga nn modifikaatori lisamisega, mis on oluline sel juhul, kui fluidum ise on mittepolaarne ja on vaja lahustada polarseid ühendeid. Lisatava modifikaatori kogus on tavaliselt 5–10% mille määrab modifikaatori lahustuvus fluidumis, et säiliks ülekriitiline olek.

Ülaltoodust on näha, et ülekritiliste fluidumite omadused on tavalistest lahustitest erinevad, mis võivad anda eelised nende kasutamisel ekstraktsiooniks või reaktsioonikeskkonnaks. Kuna fluidumi puhul kombineeruvad gaasi sarnased massi ülekandekomadused ja vedeliku sarnased lahustamise omadused, siis uuritakse intensiivselt nende ainete kasutamist uutes valdkondades. Ekstraktsioon ülekritilise CO₂-ga on mõnedes valdkondades juba leidnud tööstuslikku rakendust.

Ülekriitilises olekus fluidumiga ekstraktsioon ja selle eelised

Ülekriitilises olekus fluidumi põhiliseks eeliseks tuleb lugeda võimalust rõhu ja/või temperatuuri alandamise või tõstmisega kergesti muuta lahusti omadusi, nagu näiteks viskoossus, difusioon, dielektriline läbitavus, tihedus, ja mille tulemuseks on lahusti lahustamisvõime varieerimine. Siit tuleneb fluidumi kasutamisel ekstrahendina võimalus selektiivseks ekstraktsiooniks ühe ja sama lahustiga.

Pidades silmas ülekritilises olekus CO₂ kasutamist, saame veel ühe ekstraktsiooni juures olulise eelise: protseduur lahusti eraldamiseks on väga lihtne. Süsinikdioksiid on normaaltingimustel gaas ning selle eraldamine ekstraktist toimub lihtsalt normaaltingimustele üleminekul. Muidugi tuleb tehnilisest küljest arvestada suurt rõhkude vahet ja gaasisegu jahtumist sellisel üleminekul. Eeliseks võib lugeda ka protsessi suhtelist energiasäästlikkust. Energiat on vaja ainult ülekritilise oleku saavutamiseks, ekstrakti saamiseks ei ole vaja läbi viia selliseid protsesse nagu destillatsioon või lahusti aurustamine. Samas on seadet lihtne kohandada ekstraktsiooniks erinevate ainetega või segudega, samuti gaasi koos modifikaatoriga.

Süsinikdioksiidi kasutamine on seotud veel üsna mitme kasuliku küljega:

- olles tootmisprotsesside kaasprodukt, on ta odav ja kergesti puhastatav, nii et saadakse lihtsalt lisanditevaba lahusti, millest ei jää ekstrakti mingeid kahjulikke jääke;
- ta on mittetoksiline lahusti ja selle kasutamine ei põhjusta keskkonnale lisakoormust;
- ta on keemiliselt suhteliselt inertne lahusti ning temaga töötamisel puudub plahvatus- ja süttimisoht, üldjuhul kasutatakse suletud süsteeme, mis välistavad hapniku osalemise protsessis;
- lahusti mittepolaarsust saab kergesti muuta selliste orgaaniliste lisanditega nagu alkoholid.

Ülekriitilist CO₂ on kasutatud suures ulatuses taimse materjali ekstraheerimiseks, kuna see võimaldab hoiduda klassikaliste meetodite puudustest nagu termiline lagunemine, hüdrolüüs, lahusti jäägid. Kohviubadest ja teest kofeiini eraldamine, humalate ekstraheerimine ja taimedest maitseainete eraldamine on kõige suurema toodangumahuga valdkonnad, kus ülekritilise CO₂ kasutamine orgaaniliste lahustite asendajana on leidnud tööstuslikku rakendust. Järjest rohkem kasutatakse sel eesmärgil ülekritilist CO₂ ka rasvade ja õlide eraldamiseks ning töötlemiseks.

Uueks valdkonnaks, kus kasutatakse ära fluidumist gaasilisse olekusse üleminekul toimuvat selles lahustunud ainete väljasadenemist, on ravimitööstus. See uus tehnoloogia võimaldab saada väga ühtlase tera suurusega pulbreid ja tahkeid segusid.

Kõige keskkonnasõbralikum lahusti on vesi, seda kasutatakse palju ja ikka veel otsitakse uusi võimalusi. Osutub, et vee omadused kriitilise oleku ümbruses erinevad oluliselt nendest, mis tal on normaaltingimustel. Vee kriitiline punkt on suhteliselt kõrgel temperatuuril ja rõhul ning selle punkti ümbruses on vesi kokkusurutav, väikestele temperatuuri- ja rõhu muutustele kaasnevad suured muutused tiheduses ja dielektrilistes omadustes, mis omakorda põhjustavad suuri muutusi lahustuvuses ja happe-alus tasakaalus.

Vesi kriitilisele olekule lähedastel rõhkudel ja temperatuuridel on muutumas intensiivse uurimise objektiks ning on ilmunud ka sellise vee esimesed pooltööstuslikud kasutusalaad:

- jäätmete hüdrotermiline oksüdatsioon: nendel tingimustel hapnik lahustub hästi vees ning moodustub väga tugev oksüdeeriv keskkond, mida kasutatakse militaarjääkide (lõhkeained, mürgid) kui ka farmaatsiatööstuse ohtlike jääkide kahjutuks tegemiseks. See on kõrgetemperatuursest põletamisest märksa energiasäästlikum ja selle käigus ei teki ka lämmastikoksiide;
- hüdrotermiline kristallide kasvatamine
- keraamika pihustamine: kuna vee kui lahusti omadused muutuvad, siis muutuvad ka mitmesuguste anorgaaniliste ainete lahustuvused suurtes piirides. Seega on võimalik lihtsalt rõhu või temperatuuri väikese muutuse juures saada korrapärase kujuga ja vajaliku suurusega kristalle või pulbreid;
- hüdrotermilised sünteesireaktsioonid: keemiliste reaktsioonide läbiviimisel on väga oluline reaktsiooni keskkond ja selle omadused. Muutes selliseid väliseid parameetreid nagu rõhk ja temperatuur, on võimalik sama lahustit kasutades viia läbi unikaalseid reaktsioone.

Ioonsed vedelikud

Toatemperatuuril vedelad soolad, mida on hakatud kutsuma ka ionseteks vedelikeks, sest koosnevad ainult ionidest, on mittehüdraatsed aprotoonsed lahustid. Intensiivselt hakati neid uurima alles 80-ndatel aastatel ja praegu loodetakse neist nii mõnegi protsessi keskkonnasõbralikumat lahendust. Selles valdkonnas äratavad nad huvi järgmiste omaduste poolest: neil praktiliselt puudub aururõhk ja nad on mitteplahvatavad ning mitteoksüdeerivad. Kahjuks puuduvad veel põhjalikud toksikoloogilised uuringud, et anda lõplikku hinnangut nende ohutuse kohta. Ka mitmed muud omadused teevad sellised vedelikud võimalikeks kandidaatideks uutele tehnoloogilistele lahendustele:

- on vedelas olekus laias temperatuurivahemikus (tüüpiliselt -40 °C kuni 200 °C);
- segunevad mitmete orgaaniliste lahustitega;
- võimelised lahustama orgaanilisi, anorgaanilisi ja metallorgaanilisi ühendeid.

Ioonsed vedelikud pakkusid esialgu kõige suuremat huvi just elektrokeemikutele heade elektrikeemiliste omaduste tõttu: suur juhtivus, lai elektrokeemiline potentsiaalide vahemik, madalatemperatuurne elektrolüüt. Elektrokeemikud vaatlevad ionseid vedelikke kui sobivaid materjale uut tüüpi patareide ja kütuselementide valmistamiseks.

Kui vee ja süsinikdioksiidi puhul nende kui lahustite omaduste muutmiseks saab kasutada temperatuuri ja rõhu muutmist, siis ionsete vedelike puhul räägitakse rohkem

keemilise varieerimise võimalustest. Kergeks teeb selle asjaolu, et mitmeid vedelaid sooli on lihtne valmistada.

Ioonse vedeliku katioonne osa määrab põhiliselt vedeliku füüsikalised omadused, anioonne osa aga rohkem keemilised omadused. Näiteks 1-butüül-3-metüül imidazooliumi [BMIm] baasil saadavad soolad on väga erinevate omadustega:

- [BMImCl]⁻AlCl₃ – hügrokoopne;
- [BMIm]⁻PF₆⁻ – hüdrofoobne;
- [BMIm]⁻CF₃COO⁻ – vees lahustuv.

Halogeenaluminaatide baasil ioonsed vedelikud omavad Lewis aluste ja hapete omadusi, mis teeb neist samaaegselt nii katalüsaatori kui ka reaktsiooni toimumiseks vajaliku keskkonna.

Eesti põlevkivi ekstraktsioon ja konversioon lahustitega ülekritilises olekus

Nagu ikka uute meetodite ja võimaluste ilmnemisel üritavad uurijad neile leida rakendusi kohalike maavarade ja ressursside ümbertöötamiseks. Nii on olnud ka kõikide ülalkirjeldatud lahustite korral. Nüüdses Tallinna Tehnikaülikooli juures olevas Keemia Instituudis (endine TA Keemia Instituut) on uuritud ülekritilises olekus lahustite (süsinikdioksiid, vesi, benseen, toluen jt) kasutamist põlevkivi kerogeeni käitlemiseks juba 1980-ndatel aastatel. Katsed toimusid lahkunud professor I. Klesmenti juhtimisel. Nende uurimiste eesmärgiks oli põlevkivi orgaanilise osa struktuuri uurimine, kusjuures sellisel kerogeeni vedeldamisel loodeti saada spetsiifilist informatsiooni struktuurielementide kohta, mida teiste meetodite kasutamisel ei olnud võimalik saada. Autoklaavi katsetel saadi peaaegu täielik konversioon, kui kasutati segu CO₂ ja H₂O (5:1) temperatuuril 340 °C (Klesment ja Nappa, 1980; Nappa jt, 1982; Luik ja Klesment, 1985; Luik ja Klesment 1988). Sel ajal toimusid need uuringud sisuliselt eemal Eesti põlevkivitööstusest ja mingit tehnoloogilist huvi nad tol ajal ei tekitanud. Kahjuks on olukord selliseks jäänud ka tänapäeval. Kuigi on selge, et selle protsessi tulemusena saadav õli on hoopis erineva koostisega kui poolkoksistamisel saadav ning võib anda teist laadi toorainet keemiatööstusele. 1990-ndatel kasutas M. Koel madalatel temperatuuridel ülekritilises olekus olevat CO₂ analüütilistel eesmärkidel (Koel ja Bondar, 1998; Bondar jt, 1998). Nendes töödes kirjeldati just kerogeeni maatriksiga mitteseotud ekstraheeritavat orgaanilist ainet, mille osa kukersiidis on 0,5–1% ja ilmselt ei paku tööstuslikku huvi, kuid mis aitab geokeemikuid põlevkivi algmaterjali ning geneesi uurimises.

Ülekritilises olekus ekstrahentide kasutamise uurimine on jäänud laboritöö tasemele ja sellest tulenev keskkonnasõbralikkus on aidanud luua säästlikke analüüsimeetodeid. Oluline on muidugi ka valdkonna uudsusest tingitud informatsiooni vähesus ja nende meetodite poolt pakutava keskkonnasõbralikkuse mittepiisav hindamine.

Ka ioonseid vedelikke (halogeenaluminaatide baasil) on proovitud põlevkivi töötlemiseks (Koel jt, 2000; Bugle jt, 1978; Newman jt, 1987), kasutades vedelikku kui katalüsaatorit. Siiski viitavad need esialgsed uuringud ainult võimalikule positiivsele tulemusele. Kasutades ioonseid vedelikke, on võimalik lagundada kerogeeni märksa madalamal temperatuuril, kui algab termiline lagunemine (≈350 °C). Kui kerogeeni ekstraktsioonil madalal temperatuuril on saagis võrreldav mittepolaarsete lahustite

kasutamisel saadavate saagistega, siis temperatuuri tõustes saagis suureneb tunduvalt ja juba 175 °C juures on saagis 10 korda suurem. Ionsed vedelikud on niivõrd uus klass aineid, et nendega tehtavad uurimised on veel teataval akadeemilise uudishimu rahuldamise tasemel. Neid töid ergutab lootus leida uut tüüpi tehnoloogiaid või lisandväärtusegaprodukte.

Kaasaegne keemia pöörab järjest rohkem tähelepanu uute keskkonnasõbralike materjalide ja tehnoloogiate kasutusele võtmisele. Nende esialgne maksumus võib tunduda suurena, kuid keskkonda säästev ja saastatust kahandav efekt võib kaugemas perspektiivis tasuda kulutused mitmekordselt.

KirjandusReferences

1. Bondar, E., Koel, M., Liiv, M. (1998) A Comparative Study of the composition of biomarkers in SFE and solvent extracts of oil shales, *Fuel*, 77, 3: 215–219.
2. Bugle, R. C., Wilson, K., Olsen, G., Wade Jr., L. G., Osteryoung, R. A. (1978) “Oil-shale kerogen: low temperature degradation in molten salts”, *Nature*, 274, 578–580.
3. Klesment, I., Nappa, L. (1980) Investigation of the structure of Estonian oil shale kukersite by conversion in aqueous suspension, *Fuel*, 59, 2: 117–122.
4. Koel, M., Bondar, E. (1998) Application of supercritical fluid extraction to organic geochemical studies, *Fuel*, 77, 3: 211–213.
5. Koel, M., Hollis, W. K., Lombardo, T. J., Smith, B. F., Rubin, J. B. (2000) “Ionic liquids for Oil Shale Extraction”, *Proc NATO ARW on Green Chemistry*, (in press).
6. Luik, H., Klesment, I. (1985) Liquefaction of kukersite concentrate at 330–370 °C in supercritical solvents (in Russian), *Eesti TA Toim., Keemia*, 34, 4: 253–263.
7. Luik, H., Klesment, I. (1988) Liquefaction of kukersite concentrate in an autoclave in the presence of CO₂: single and binary extragents (in Russian), *Eesti TA Toim., Keemia*, 37, 4: 279–281.
8. Nappa, L., Klesment, I., Vink, N., Kailas, K. (1982) Low temperature decomposition of organic matter of oil shales by solvent extraction. 1. Kukersite oil shale (in Russian), *Eesti TA Toim., Keemia*, 31, 1: 17–24.
9. Newman, D. S., Kinstle, T. H., Thambo, G. (1987) “The acylation of coal and model coal compounds in room temperature molten salts”, *Proc. Intern. Symp. on Molten Salts*, ed. G. Mamontov, C. Hussey, *et al.*

ENVIRONMENTALLY FRIENDLY TECHNOLOGIES AND MATERIALS IN STUDY OF NATURAL RESOURCES

Mihkel Koel

Institute of Chemistry at Tallinn Technical University
e-mail: vmihkel@argus.chemnet.ee

Abstract

There are new international agreements on air pollution and hazardous waste and regulations on substances that deplete the ozone layer. In this study are discussed the trends in chemistry according to this regulations and the search of better solvents to use in analytical laboratories as well as in industry. There are several candidates under the consideration – supercritical carbon dioxide, sub- and supercritical water, room temperature liquid salts – ionic liquids.

Properties of substances near critical point and in supercritical state are very different from properties in normal state. Supercritical carbon dioxide is good non-polar solvent and can be used for extraction as well as environment for synthesis. The main advantage of supercritical fluid is that near critical point little changes in temperature and pressure give big change in fluid density and with that it is possible to control the dissolving power of the fluid.

The properties of water are changed very much getting closer to critical point. It becomes more like organic solvent dissolving non-polar compounds. Supercritical water is very good environment to proceed different chemical reactions.

Room temperature molten salts – ionic liquids are composed entirely of ions and are liquid-like over a wide range of temperature. They are anhydrous aprotic solvents, and they are non-volatile what makes them environmentally benign solvents.

Shortly are discussed and presented the results on use of these new solvents in oil shale studies.

CO₂ EMISSIOONI VÄHENDAMINE ELAMUTE ENERGEETILISE RENOVEERIMISE TULEMUSEL

Anton Laur¹, Tiit Kallaste²

¹Tallinna Tehnikaülikooli Eesti Majanduse Instituut, Estonia pst 7, 10143 Tallinn
e-post: antonl@tami.ee

²Säästva Eesti Instituut, SEI-Tallinn, Lai tn 34, 10502 Tallinn, e-post: tiit@seit.ee

Annotatsioon

Artikkel käsitleb Tallinna Mustamäe elamurajoonis aastail 1993–1997 Rootsi ja Eesti kliimamuutuste vältimise ühisrakendusprojekti raames läbi viidud elamute energeetilise renoveerimise tulemuste analüüsi. Eeltingimuseks oli elementaarse statistilise andmebaasi loomine. See on asjaolu, mida tuleb arvestada järgmiste ühisrakendusprojektide kavandamisel. Korrastatud statistika annab ka tõepärasema pildi saavutatud efektist. Artiklis on esitatud nii eksperitiisi metoodika kui ka konkreetsed hindamistulemused soojusenergia säästu ja sellest tuleneva CO₂ emissiooni vähenemise kohta. Mitmete lähenduste seast osutus sobivaimaks nn kraadpäevade kasutamine, mis võimaldab ühtlustada eri aastate kütteperioodide ilmastiku erinevused. Keskmiseks soojuse kokkuhoiuks kompleksse energeetilise renoveerimise tulemusena kujunes 17%, mis on võrreldav teistes Balti riikides samal ajal tehtud analoogiliste projektidega. Kliimamuutuste vältimise seisukohalt on see tulemus arvestamisväärne, kuna 15 mitmekorruselise elamu kohta kujunes aastaseks säästuks 2400 MW·h soojust, mis on teisendatav ligi 640 t ärahoitud kasvuhoonegaaside (KHG) emissiooniks. Rahvusvaheliste ühisrakendusprojektide mastaabi laiendamisel oleks efekt märkimisväärne – hoitaks kokku kütust, sellega välditaks ühtlasi KHG emissiooni ja mis peamine, elanikele suureneks oluliselt komfort nende korterites. Riigi kliima- ja energiasäästu programmi kavandamisel tuleks taolisi tulemusi tõsiselt arvestada.

Autorid loodavad, et nende poolt antud panus aitab korrastada kliimamuutuste vältimiseks tehtud ühisrakendusprojektide tulemuste arvestamise metoodikat, luues sellega soodsa pinnase uute investorite ja doonorriikide kaasamiseks kliima- ja energiaprojektidesse ning järgmiste projektide käivitamiseks Eestis. Ühtse metoodilise aluse loomine ühisrakendusprojektide praktilisel teostamisel vastuvõtja riigi ja doonorriigi vahel loob hea aluse edasiminekku järgmiste ühiste ettevõtmiste käivitamiseks.

ENERGEETILINE RENOVEERIMINE, ÜHISRAKENDUSE PILOOTPROJEKT, ENERGIASÄÄST, KRAADPÄEV, KASVUHOONEGAASIDE EMISSIOON

Kasutatud lühendid

UN FCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change* – ÜRO kliimamuutuste raamkonventsioon
JI – *Joint Implementation* – ühisrakendus
AIJ – *Activities Implemented Jointly* – ühisrakenduse pilootfaas
EAES – *Environmentally Adapted Energy System* – keskkonnasõbralikud piirkondlikud energiasüsteemid
NUTEK – *National Board of Industry and Technology of the Swedish Kingdom* – Rootsi Kuningriigi Tööstuse ja Tehnika Agentuur

STEM – Swedish National Energy Agency– Rootsi Riiklik Energiaadministratsioon
KHG – kasvuhoonegaasid

Sissejuhatus

Eesti ratifitseeris ÜRO Kliimamuutuste konventsiooni 1994. aastal pärast selle kinnitamist Riigikogus. Konventsiooni liikmena on Eesti riik oma kohustusi täitnud igas valdkonnas edukalt: vähendanud emissioone, viinud edasi teadustööd ja mingil määral suutnud luua elementaarse institutsionaalse baasi riigi poolt seatud eesmärkide saavutamiseks. Siiski on riigil palju tööd ees, et luua kliimamuutuste vältimisega tegelev institutsioon, kes looks riigis kõik eeldused, et doonorriigid saaksid investeerida kliima- ja energiasäästu projektidesse. Seni on vastav tegevus toimunud peamiselt arenenud naaberriikide initsiatiivil. Eesti poole kohustused on taandatud kohaliku omavalitsuse ja konkreetse projekti juhi tasandile. Seni on ühisorakendusprojektid sujunud edukalt, v.a mõned üksikud erandid. Eesti on saanud tuntuks ühisorakendusprojektide heatasemelise vastuvõtja maana. Rootsi Kuningriigi *NUTEK*i programm *EAES* - Keskkonnasõbralikud piirkondlikud energiasüsteemid, pälvis 1999 aastal maailma kliimatehnoloogiate rakendamise auhinna.

Esitav materjal on saadud Tallinna Mustamäe elamurajoonis aastail 1993–1997 teostatud elamute energeetilise renoveerimise projektide tsükli ekspertiisi tulemuste alusel. See projektide tsükkel oli üheks osaks Rootsi riigi poolt Balti regioonis aastatel 1993–1998 läbi viidud *EAES* programmist, mille strateegiline põhieesmärk oli teatavasti CO₂ emissiooni vähendamine energeetikaprojektide kaudu. *EAES* programmi realiseerimise võtmesõnaks oli *AIJ* ehk *Activities Implemented Jointly*, mis lühidalt öeldes tähendab kliimaalaste ühisorakendusprojektide pilootfaasi. *Joint Implementation* – ühisorakenduse projekte viiakse ellu, kui leitakse, et doonorriigis on kasvuhoonegaaside emissiooni vähendamiseks tehtavad majanduslikud kulutused tunduvalt suuremad kui vastuvõtja riigis (Kallaste, 2000). Eesti on pälvinud oma 21 kliimamuutuste konventsiooni sekretariaadis ametlikult registreeritud ühisorakendusprojektiga positiivset tähelepanu. Seniajani ainukese doonorriigi, Rootsiaga on kliimamuutuste vältimisele suunatud energeetikaprojektide (sh elamute renoveerimise alaste) rakendamine sujunud loomuliku initsiatiivi õhkkonnas. See on ärgitanud paljusid elamuühistuid otsima rahalisi võimalusi analoogiliste renoveerimisprojektide teostamiseks kohalike pankade ja nõustajate ning konsultatsioonifirmade kaasabil.

Kliimamuutuste vältimisele suunatud *EAES* projektide üheks tüübiks oli paljukorruseliste elamute energeetiline renoveerimine. Käesolev artikkel ongi pühendatud 1994. a alustatud esimeste ühisorakenduse pilootfaasi projektide kirjeldamisele ja nende tulemuste analüüsimisele ning üldistamisele.

Renoveerimisprojekti kirjeldus

Kokku renoveeriti Mustamäel vaatlusaluse projektide tsükli käigus 15 korterelamut. Üldandmed nende projektide kohta on toodud tabelis 1. Esimene projekt (Sütiste tee 16 elamu) oli nn pilootprojekt, mis tehti abi korras Rootsi välismajanduskoostöö organisatsiooni *BITS* poolt. Ülejäänud projektid teostati otseselt *NUTEK*i poolt. Sealjuures II (elamud 2–5) ja III projektide tsükkel (elamud 6–9) realiseeriti *NUTEK*i poolt

korraldatud sooduslaenu abil, viimase (IV) projektide tsükli (elamud 10–15) puhul vahendasid NUTEKi kaasabil korraldatud laenu Eesti Investeerimispank ja Eesti Ühispank.

Vaadeldavate energeetilise renoveerimise projektide põhielementideks olid

- soojussõlme uuendamine;
- uue sisseseade paigaldamine sooja vee saamiseks;
- püstikutele reguleerimisventiilide paigaldamine ja küttesüsteemi tasakaalustamine;
- katuste täiendav isoleerimine;
- akende ja rõdude tihendamine;
- keldrites asuva kütte ja sooja vee jaotustorustike isoleerimine;
- elamu välisuste uuendamine.

Autorite poolt tehtud ekspertiis jagunes kahte ossa: esimese etapi ülesandeks oli hinnata soojuse tarbimise vähenemist renoveerimise tulemusena. Teisel etapil selgitati välja soojuse tarbimise vähenemisest ja Mustamäe piirkonnas toimiva soojuse tootmise parameetritest lähtuvalt CO₂ emissiooni vähenemine renoveerimise tulemusena. Äärmiselt oluliseks ja küllalt suuremahuliseks tööks oli siinjuures soojuse tarbimise usaldusväärsete andmete hankimine ja analüüs renoveeritud elamute kohta. Kuivõrd enamik nendest elamutest on endised elamukooperatiivid (praegu elamuühistud), saime suure osa andmeid otseselt ühistute raamatupidamisest. Andmed elamute kohta, kus ühistuid pole loodud, saime AS-lt Mustamäe Kinnisvarahaldus. Soojuse tarbimise andmed (MW·h/aastas) renoveeritud elamutes on koondatud tabelisse 2 (rasvaselt trükitud arvudega tabeli osa tähistab perioodi pärast renoveerimist). Tabelis 3 on samad andmed esitatud elamute üldpinna kohta (kW·h/m²/aastas).

Nagu tabelist 3 näha võib, varieerus soojuse tarbimine hoonete lõikes väga suurtes piirides – näiteks 1997. aastal 130 kuni 280 kW·h/m². Märgime võrdluseks, et statistiliselt keskmine soojuse tarbimine näiteks Rootsis 1961–1970 ehitatud korterelamutes on 190 kW·h/m², ja 130 kW·h/m² elamutes, mis on ehitatud pärast 1980. a (Rolen *et al.*, 1994).

Tabel 1. Mustamäe renoveeritud elamute üldandmed
Table 1. General data for Mustamäe renovated dwellings

Nr	Aadress	Ehitusaasta	Elamu tüüp*	Korterite üldpind, m ²	Omandivorm**	Projekt	Renoveerimise lõpetamine	Võrdluselamu (renoveerimata)
1	Sütiste tee 16	1970	9/2/72/pan	3956	3	BITS (abi)	jaan 1993	Sütiste tee 14
2	Vilde tee 85	1965	5/4/80/pan	3500	3	NUTEK (laen)	1994	Keskuse tn 12
3	Vilde tee 87	1965	5/4/80/pan	3509	3	- " -	- " -	Keskuse tn 12
4	Vilde tee 89	1965	5/4/80/pan	3518	3	- " -	- " -	Keskuse tn 12
5	Vilde tee 91	1965	5/4/80/pan	3497	3	- " -	- " -	Keskuse tn 12
6	Mustamäe tee 128	1964	5/3/60/pan	2557	1	NUTEK (laen)	jaan 1996	Mustamäe tee 122
7	Mustamäe tee 177	1972	9/4/144/pan	7545	1	- " -	jaan 1996	Mustamäe tee 167
8	Ehitajate tee 40/46	1963	5/8/160/pan	6485	1	- " -	jaan 1996	Ehitajate tee 52/58
9	Sütiste tee 58	1968	5/4/60/pan	2703	1	- " -	jaan 1996	Vilde tee 80
10	Mustamäe tee 100	1967	5/8/119/pan	5680	1	NUTEK +	sept 1997	Tammsaare tee 113
11	Mustamäe tee 193	1966	5/6/90/pan	4400	1	Eesti Inves-	juuli 1997	Keskuse tn 4a
12	Vilde tee 52	1972	10/5/162/sil	10272	1	Teerimispank +	juuli 1997	Sõpruse pst 214
13	Retke tee 24	1969	5/4/60/pan	2703	1	Eesti Ühis-	juuli 1997	Vilde tee 80
14	Sõpruse pst 247	1968	5/8/119/pan	5727	1	Pank	juuli 1997	Tammsaare tee 107
15	Mooni tn 113	1970	5/4/60/pan	2684	1	(laen)	sept 1997	Vilde tee 80

* Selgitus: korruste arv/trepikodade (välisuste) arv/korterite arv/seinad: pan – betoonpaneelidest; sil – silikaattelistest

** Võimalikud omandivormid:

- 1 – endine elamukooperatiiv, praegu elamuühistu
- 2 – korteriühistu (korterid erastatud)
- 3 – korterid erastatud, ühistut pole loodud

Tabel 2. Soojuse tarbimine Mustamäe renoveeritud elamutes
Table 2. Heat consumption in Mustamäe renovated dwellings

Nr	Aadress	Soojuse tarbimine, MW·h					
		1994	1995	1996	1997	1997/1998*	1998**
1	Sütiste tee 16		955	1101	986	725	367
2	Vilde tee 85		949	1068	917	637	337
3	Vilde tee 87			1158	905	640	332
4	Vilde tee 89			1143	906	603	318
5	Vilde tee 91			1208	980	675	350
6	Mustamäe tee 128	480	512	496	493	320	154
7	Mustamäe tee 177		1850	1850	1784	1337	713
8	Ehitajate tee 40/46	1775	1530	1642	1657	1164	605
9	Sütiste tee 58	681	633	457	402	270	152
10	Mustamäe tee 100		1380	1510	1279	924	460
11	Mustamäe tee 193		710	740	570	352	205
12	Vilde tee 52			3813	2296	1694	873
13	Retke tee 24	656	558	715	701	447	226
14	Sõpruse pst 247	1387	1519	1354	957	740	396
15	Mooni tn 113			735	627	439	218

* 1.10.1997–31.03.1998

* 1.01.1998–31.03.1998

Tabel 3. Soojuse tarbimine Mustamäe renoveeritud elamutes korterite üldpinna m² kohta

Table 3. Heat consumption in Mustamäe renovated dwellings per m²

Nr	Aadress	Korterite üldpind, m ²	Soojuse tarbimine, kW·h/m ²			
			1994	1995	1996	1997
1	Sütiste tee 16	3956		241	278	249
2	Vilde tee 85	3500		271	305	262
3	Vilde tee 87	3509			330	258
4	Vilde tee 89	3518			325	258
5	Vilde tee 91	3497			345	280
6	Mustamäe tee 128	2557	188	200	194	193
7	Mustamäe tee 177	7545		245	245	236
8	Ehitajate tee 40/46	6485	274	236	253	256
9	Sütiste tee 58	2703	252	234	169	149
10	Mustamäe tee 100	5680		243	266	225
11	Mustamäe tee 193	4400		161	168	130
12	Vilde tee 52	10272			371	224
13	Retke tee 24	2703	243	206	265	259
14	Sõpruse pst 247	5727	242	265	236	167
15	Mooni tn 113	2684			274	234

Meetodi valik ja kirjeldus

Põhiprobleemiks energeetilise renoveerimise tulemuste hindamisel oli kõige kohasema võrdlusmetoodika leidmine. Renoveerimise eelsete ja järgsete aastate soojuse tarbimise andmete otsene võrdlemine objektide kaupa polnud võimalik ilmastiku suuresti varieeruva mõju tõttu erinevatel aastatel. Vastava andmestiku, nn kraadpäevade statistika puudumise tõttu vabariigis polnud võimalik seda mõju elimineerida. Seetõttu oli esimeseks lahenduseks võrdluselamute meetodi kasutamine, mille kohaselt leiti igale renoveeritud elamule ligilähedaselt sama tüüpi renoveerimata võrdluselamu. Renoveerimistulemuste hindamiseks kasutati soojuse tarbimiste suhet renoveeritud ja renoveerimata elamutes, mis osutus aga küllalt raskesti analüüsitavaks.

Üldjuhul vaadeldav suhtarv küll ootuspäraselt vähenes pärast renoveerimist, kuid mõnel juhul esines ka vastupidist, samuti ei onud võimalik fikseerida kindlat trendi järjestikuste aastate kohta pärast renoveerimist. Järeldusena tuleb tunnistada võrdluselamu meetodi ebasobivust. Lähemal analüüsil võib selleks leida ka mitmeid objektiivseid põhjuseid. Kuigi elamu projekt on sama, on erinevad elanike arv, sooja vee mõõtjate arv majades, mis omakorda tingib erinevad tarbimismudelid, samuti ehituse kvaliteet, elamu paiknemine ilmakaarte suhtes jne. Võrdluselamu meetodi puudusi on rõhutanud ka E. Martinot oma töös, mis on pühendatud endise NL mõnede riikide, sh ka Eesti elamumajanduse analüüsimisele energia efektiivsuse seisukohalt (Martinot, 1997).

Järgnevalt kasutasime renoveerimistulemuste hindamisel ilmastiku mõju elimineerimist või teisiti öeldes, väljakaalumist ikkagi kraadpäevade alusel. Viimased arvutasime, lähtudes kuu keskmistest temperatuuridest Mustamäel kütteperioodidel 1993–1998. Aluseks võtsime siinjuures siseruumi temperatuuri normi $+17\text{ °C}^1$. Sellest lähtudes toimus (kuu) kraadpäevade arvutamine järgmise valemi alusel:

$$KP = (17 - t_k) \cdot p,$$

kus KP – kraadpäevade arv;
 t_k – kuu keskmine temperatuur;
 p – päevade arv kuus.

Järgnevalt jagasime soojuse tarbimise renoveeritud elamutes vaadeldavatel aastatel vastavate perioodide (kuude) summaarse kraadpäevade arvuga. Saadud tulemused tarbitud soojusena kraadpäevade kohta ($MW \cdot h/KP$ tabelis 4 peaksid nüüd küllalt adekvaatselt peegeldama soojuse tarbimise muutust pärast renoveerimist (kahjuks pole küll andmeid objektide nr 1–5 soojuse tarbimise kohta enne renoveerimist). Tabelit 4 analüüsid näeme, et praktiliselt kõigi elamute puhul, kus võrdlus on võimalik (objektid nr 6–15), on pärast renoveerimist täheldatav märgatav soojuse tarbimise vähenemine. Mõnel juhul on see muutus päris hüppeline (kuni 37% Sütiste tee 58 ja Vilde tee 52 elamutes).

Tulemuste analüüs ja järeldused

Keskmiseks soojuse kokkuhoiuks objektide nr 6–15 renoveerimisel kujunes arvutuste põhjal 17%, mida tuleb pidada heaks näitajaks. Taolist tulemust prognoositi ka juba pro-

¹ Siinjuures olgu märgitud, et normi arvvärtus ise tundub autoritele madalana. Autorite märkus.

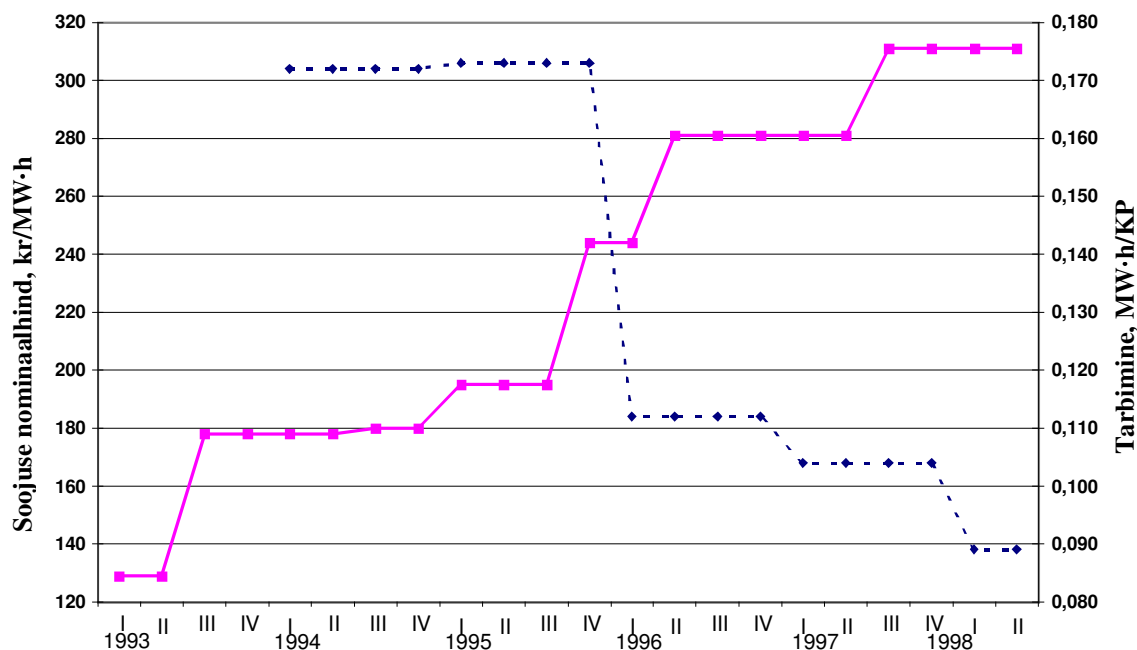
jektide koostamisel. Märgime, et analoogilise projekti realiseerimisel *EAES* programmi koosseisus Leedus (18 hoonet – peamiselt Vilniuses, mõned ka Kaunases, Shiauliais, Marijampoles ja Druskininkais) kujunes keskmiseks soojuse kokkuhoiuks 19% (Martinaitis, 2000). Seda tuleb pidada igati põhjendatud ja reaalselt võimalikuks efektiks taoliste projektide puhul. Loomulikult võib saavutada ka mõnevõrra suuremat efekti, sel juhul on aga representatiivsete tulemuste saamiseks juba projekti alustamisel vajalik korradada olemasolev statistika. 1990ndate aastate keeruline majanduspoliitiline situatsioon loomulikult seda ei võimaldanud ja seepärast tuleb antud juhul paratamatult leppida teatava ligikaudsusega. Üldist trendi ei tohiks see aga oluliselt mõjutada.

Autorite poolt tehtud arvutuste kohaselt tähendab 17%-line soojuse sääst vaatlusalustes elamutes soojuse tarbimise vähenemist aastas ligikaudu 2400 MW·h võrra. Arvestades Mustamäe ja Kadaka katlamajades kasutatavaid erinevaid kütuseliike ja ka tehnoloogilisi näitajaid, oleme välja arvutanud, et 1 MW·h kokkuhoitud soojust vastab 0,266 t CO₂ emissioonile (Kantha *et al.*, 1999). Seega võimaldab 15 elamu renoveerimine Mustamäel vähendada CO₂ emissiooni ligikaudu 640 t aastas, mis hoonete üldpinnale taandatuna moodustab 9,3 kg/m² aastas.

Kui nüüd teha hinnangulisi arvutusi kogu Mustamäe kohta, kus elamufond koosneb ligikaudu 250 elamust, keskmiselt igas 4000 m², saame kokku ligemale 1 miljon m². Energeetilise renoveerimise tulemusena võib seal seega saada CO₂ emissioonide kokkuhoidu (säästu korral 9,3 kg/m²) ligikaudu 9000 tonni võrra. See on juba märkimisväärne näitaja, mida tuleks võtta eeskujuks kogu riigi energiasäästu ja kliimamuutuste vältimise strateegiliste arengukavade koostamisel.

Kasu elanikkonnale energeetilisest renoveerimisest avaldub eelkõige 17% võrra väiksemate soojuse arвете maksimises, mis parasjagu sobivalt tasandavad soojuse hinna tõusu, vt graafikuid joonisel 1. Sellel joonisel on vasakpoolsel skaalal kujutatud soojuse hinna dünaamika aastatel 1993–1998, mis ilmutab järsku tõusutrendi. Teisalt, joonise parempoolsel skaalal on toodud soojuse tarbimine kraadpäeva kohta renoveeritud majades, mis selgelt peegeldab vähenemise trendi. Sisuliselt iseloomustab see joonis kallinenud megavatt-tundide vähenenud tarbimist pärast elamute energeetilist renoveerimist.

Mitte vähem tähtsust ei oma aga ka renoveeritud majade elanike üldise komfortitaseme oluline tõus, mis avaldub korteri soojusrežiimide ühtlustumises ja keskmise temperatuuri lähenemises optimaalseni, samuti sooja veega varustatuse paranemises (eeskätt ülemistel korrustel). Kui vaid meenutada 1990ndate aastate alguse kütusekriisi ja alakõetud kortereid, kus siseruumide temperatuur 13–15 kraadi Celsiuse järgi oli tavaline nähtus, siis tuleb nõustuda, et elanike elukvaliteet on oluliselt tõusnud. Samas ei pea renoveeritud majade elanikud muretsema pidevalt tõusnud soojuse hinna pärast – neile on soojuse eest tasutud arved jäänud ligilähedaselt samaks viimase nelja-viie aasta jooksul. See on aga elanike seisukohalt vaadatuna oluline materiaalne eelis.



Joonis 1. Soojuse nominaalhinna ja tarbimise dünaamika (Sütiste tee 58)

Figure 1. Dynamics of nominal heat tariff and heat consumption (Sütiste tee 58)

Tabel 4. Soojuse tarbimine Mustamäe renoveeritud elamutes kraadpäeva (KP) kohta
Table 4. Heat consumption in Mustamäe renovated dwellings per degree day (KP)

Nr	Address	Soojuse tarbimine, MW·h/KP				Jaan-märts 1998, MW·h/KP
		1994	1995	1996	1997	
1	Sütiste tee 16		0,260	0,270	0,255	0,214
2	Vilde tee 85		0,259	0,262	0,237	0,196
3	Vilde tee 87			0,284	0,234	0,193
4	Vilde tee 89			0,281	0,234	0,185
5	Vilde tee 91			0,297	0,253	0,204
6	Mustamäe tee 128	0,121	0,140	0,122	0,127	0,090
7	Mustamäe tee 177		0,504	0,454	0,461	0,415
8	Ehitajate tee 40/46	0,448	0,417	0,403	0,428	0,352
9	Sütiste tee 58	0,172	0,173	0,112	0,104	0,089
10	Mustamäe tee 100		0,376	0,371	0,330	0,268
11	Mustamäe tee 193		0,194	0,182	0,147	0,119
12	Vilde tee 52			0,936	0,593	0,508
13	Retke tee 24	0,166	0,152	0,176	0,181	0,132
14	Sõpruse pst 247	0,350	0,414	0,333	0,247	0,231
15	Mooni tn 113			0,181	0,162	0,127

Kui kliimakonventsioonist osavõtvate riikide konverents COP (*Conference of Parties*) järjekordselt Kyoto Protokollis fikseeritud KHG emissiooni vähendamise mehhanisme arutab ja kasvuhoonegaaside emissioonidega kauplemise osas mingisuguselegi kokkuleppele jõuab, siis moodustaks seni rahvusvahelistes ringkondades väljapakutud

5 USA dollarit 1 tonni ärahoitud CO₂ emissiooni eest Mustamäe majade energeetilise renoveerimise tulemusena 45 000 US. Eesti krooni vääringus läheneb see miljonile. Sellise raha võiks Eesti siis tulevasel rahvusvahelisel kasvuhoonegaasidega kauplemise börsil teenida ainüksi ühe linnaosa energeetilise renoveerimise tulemusena.

Kirjandus ✕ **References**

1. Kallaste, T. (2000) Joint Implementation Pilot Phase in Estonia. In: Capacity for Climate Protection in Central and Eastern Europe. Activities Implemented Jointly (AIJ). The Regional Environmental Center for Central and Eastern Europe, World Resources Institute. Szentendre, Hungary: 21–31.
2. Kartha, S., Lazarus, M., Martinot, E., Ruth, M., Corland, D., Kallaste, T., Kull, A., Laur, A., Muiste, P., Pallo, T. (1999) An Assessment of Joint Implementation between Sweden and the Baltic States. SEI Boston, SEI-Tallinn Centre, SEI-Stockholm: 61.
3. Martinaitis, V. (2000) Lithuanian Energy Efficiency Housing Project – Motion and Results. Proceedings of the CTI Training Course for Eastern Europe “Climate Technology and Energy Audit as a Tool for Improved Energy Efficiency” Tallinn, 26.–29. Sept. 2000. Tallinn: 257–263.
4. Martinot, E. (1997) Investments to Improve the Energy Efficiency of Existing Residential Buildings in Countries of the Former Soviet Union. Studies of Economics in Transformation 24. The World Bank. Washington: 151.
5. Rolen, C., Hult, M., Karlsson, H.-O., Brudvik O. A., Sundberg, S. (1994) Demonstration of energy saving potential in Estonian apartment buildings. Report of BITS for the apartment house at Sütiste tee 16. Stockholm: 22.

REDUCTION OF CO₂ EMISSION AS A RESULT OF ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT IN DWELLINGS

Anton Laur¹, Tiit Kallaste²

¹Estonian Institute of Economics at Tallinn Technical University
e-mail: antonl@tami.ee

²Estonian Institute for Sustainable Development, SEI-Tallinn Centre
e-mail: tiit@seit.ee

Abstract

The article is based on the expert examination of the results of energy efficiency improvement of buildings in the residential district of Mustamäe, Tallinn, which was carried out in 1993–1997 within the framework of the Swedish-Estonian joint implementation project of climate change mitigation. A precondition was the compilation of an elementary statistical database. This is the issue that must be considered in planning the next joint implementation projects. Organised statistics gives a more truthful idea of the effect to be obtained. The article provides methods of examination as well as concrete results of evaluation of the sparing heat consumption and the resulting reduction of CO₂ emission. The application of so-called degree-days turned out to be the most suitable from among several approaches, enabling to smooth weather differences of heating periods of different years. The average saving of heat as a result of complex renovation was 17%, which is comparable with the analogous simultaneous projects carried out in the other Baltic States. From the aspect of climate change mitigation this is remarkable as the annual saving of heat for 15 multi-storeyed buildings would be 2400 MW·h, which can be translated into nearly 640 t of the avoided greenhouse gas emission. The greenhouse gas mitigation effect would be remarkable with the enlargement of the scales of Joint Implementation projects – it would save fuel and would also avoid greenhouse gas emission and, which is most important for residents – would considerably increase comfort in their apartments. The results should be considered when designing the national climate and energy conservation strategy.

The authors hope that their contribution will help to improve the methods of calculating the results of Joint Implementation to mitigate climate change, creating with this favourable grounds for attracting new investors/donors to climate and energy projects, and for launching new projects in Estonia. A uniform methodological basis for widening the scope of Joint Implementation will create good preconditions for next project-based mechanisms.

SOOJUST JA ELEKTRIT KOOSTOOTVA VÄIKETUULIKU KONTSEPTSIOON

Anatoli Jegorov, Vello Selg

TTÜ Soojustehnika Instituut, Kopli 116, 11712 Tallinn, e-post: egorov@sti.ttu.ee

Annotatsioon

Käsitletakse horisontaalse ja vertikaalse teljega ilma kiiruskastita autonoomsete tuulikute kasutamise võimalusi soojuse ja elektri koostootmiseks maamajapidamistes, suvemajades ja mujal, kus puudub ühendus ühtse energiavõrguga. Kirjeldatakse vertikaalse teljega väiketuulikut tuulemõõtmisüsteemi akude laadimiseks ja andurite ning süsteemiboksi soojendamiseks.

TUULIK, SOOJUS, ELEKTER, HÜDROPIDUR

Kasutatud lühendid

STI – TTÜ Soojustehnika Instituut

Sissejuhatus

Hiljuti juhtis üks Euroopa Liidu “Valge raamatu” koostajatest, dr. Mombaur, tähelepanu asjaolule, et vaatamata elektrienergia massilisele kasutamisele elab maailmas kaks miljardit inimest piirkondades, kuhu ka tulevikus suured elektrivõrgud ei ulatu. Lihtsad taastuvenergiaga baseeruvad autonoomsed kohtvõrgud on nende piirkondade energiaga varustamise lahendus. See on selge, et tegemist on hiigelsuure maailmaturuga (Mombaur, 1999). Selline tõsiasi stimuleerib uurima võimalusi elektri ja soojuse koos või eraldi tootmiseks autonoomsete, lihtsa ehituse ja käsitlemisega väiketuulikute abil.

Tuuleenergeetika alaste uuringutega alustati STI-s kaheksakümnendate aastate alguses. Algul oli koos üliõpilastega läbiviidud uuringutes ja valminud diplomitöodes tähelepanu pööratud tiiva aerodünaamika matemaatiliste mudelite loomisele (Karileet, 1984), väiketuulikute tuulest soojuse tootmisele hüdropiduri vahendusel (Selg, 1988), tuuleenergia rakendamise tingimustele Eestis (Vene, 1988), horisontaalse (Lassmann, 1993) ja vertikaalse teljega (Keltman, 1993) väiketuulikutele. Uuriti ka ühtsesse elektrivõrku töötava väikese katsetuuliku kontseptsiooni (Jegorov, 1997) ja lahendati tuulemõõtmistega seotud probleeme. Praegu on peatähelepanu pööratud tuuleuuringute kõrval elektrilise võlliga soojust ja elektrit koos tootvate väiketuulikute prototüüpide väljatöötamisele.

Autonoomse väiketuuliku kontseptsioon

Autonoomse tuuliku kontseptsiooni väljatöötamisel on esimeseks sammuks tuuliku põhitüübi valik. Võimalik on kasutada horisontaalse või vertikaalse teljega tiivikut. Vertikaalse ja horisontaalse teljega skeemide aerodünaamika võrdlemine vastavatel matemaatilistel mudelitel näitas, et teoreetiliselt on mõlemad skeemid ligikaudu samaväärsed, mida iseloomustab peale tiiva geomeetria optimeerimist lähedane

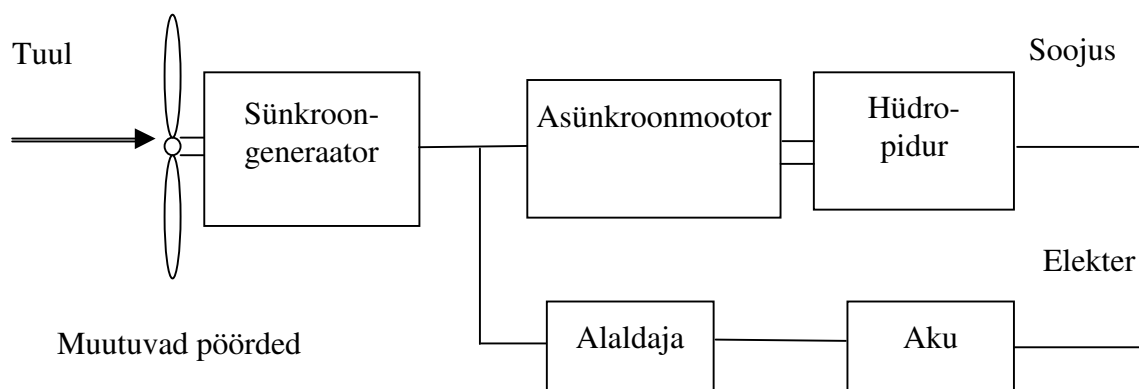
võimsusteguri väärtus ($C_p = 0,45 \dots 0,48$). Praktilist kasutamiskõlblikust aitab selgitada kummagi tuulikutüübi eeliste ja puuduste võrdlemine (tabel 1).

Tabel 1. Erinevat tüüpi tuulikute eeliste ja puuduste võrdlus

Table 1. Advantages and disadvantages of vertical-axis rotor and horizontal-axis rotor

Vertikaalse teljega H-rootoriga tuulik		Horisontaalse teljega tuulik	
Eelised	Puudused	Eelised	Puudused
Puudub vajadus tuule suuna järgi seada (pole vaja pöördlauda)	Vajab käivitamiseks Savoniuse rootorit või elektristarterit	Hästi väljaarendatud tiibade tüübid, tootmise kogemused	Vajab tuulde pööramise mehhanismi (pöördlauda)
Ilma väändeta sirged ühtlase profiiliga (odavamad) tiivad	Rüнденurga pidev muutumine tingib pöörlemise ebäühtluse	Suurem käiguühtlus kui vertikaalse teljega tuulikudel	Tiivad on muutuva põiklõike ja pikiväändega (kallimad)
Generaator ja kiiruskast võivad asuda maapinnal	Maapinnal asuva generaatori puhul on võll ja laagrid kallid	Tiiva seadenurka muutes saab mõjutada efektiivsust	Vajab generaatori kaabli keerdumist vältivat seadet või kontaktharjadega kollektorit
Generaatori ühendamise elektri kaabliga on lihtne	Kiirekäigulisuse kasutuspiirkond on kitsas	Elektrivõrku töötamisel saab kasutada keerispidurdust	

Parema hinnangu mõlemat tüüpi tuulikute kasutamise võimalustele saab anda pärast katsetuulikute valmistamist ja katsetamist. Mõlemat tüüpi väiketuuliku näidise väljatöötamisel võtsime aluseks joonisel 1 toodud põhiskeemi.



Joonis 1. Elektrilise ülekandega autonoomse tuuliku põhimõtteline skeem

Figure 1. A schematic diagram of a combined autonomous wind turbine

Joonisel 1 toodud põhimõtteline skeem sobib kasutamiseks nii horisontaalse kui ka vertikaalse teljega väiketuulikule võimsusega 3...30 kW. Toodust suuremate võimsuste kasutamist piirab püsिमagnetitega generaatori hankimise raskus. Ainult mõned välisfirmad valmistavad üksikuid (suuremaid kui 30 kW) püsिमagnetitega generaato-

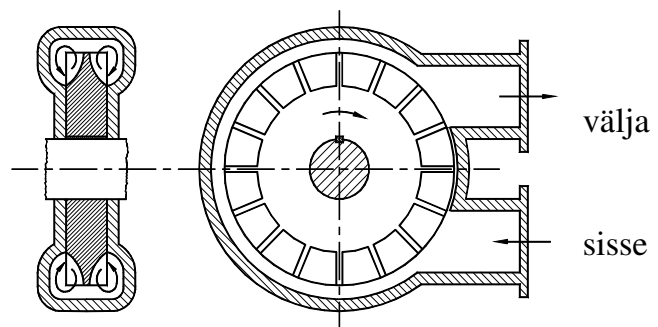
reid eritellimusel ja nende hind on seetõttu meile liiga kõrge. Väiksemate, kuni 30 kW generaatorite tootmisse juurutamine on ka Eestis võimalik, kui tekib nõudlus. Praegu toodab tehas “VOLTA” selliseid generaatoreid tellimustööna ühele välisfirmale.

Süsteemi põhikomponentideks on

- väikese võimsusega (3...30 kW) horisontaalse (või vertikaalse) teljega tuulik, millel on 2...6-tiivaline tiivik ja paljupooluseline püsimagnetitega aeglasekäiguline sünkroongeneraator;
- asünkroonmootoriga varustatud hüdripidur, mis muudab mehaanilise pöörlemise soojuseks ja toimib ühtlasi kogu süsteemi automaatse koormusregulaatorina;
- alaldi-akulaadija koos akudega;
- vajaduse korral inverter, mis muudab alalisvoolu püsiva sageduse ja sobiva pingega vahelduvvooluks.

Hüdripiduriga seadme on peamiseks tarbitavaks energialiigiks soojus. Hüdripiduri automaatse reguleerimise omadused säilivad, kui kuni 20% tiiviku poolt kinnipüütud energiast ära kasutada akude laadimiseks. Ilma hüdripidurita skeem vajab suhteliselt kallist ja keerulist juhtimissüsteemi, mille abil tuuliku koormust saaks reguleerida automaatselt. See oleks aga juba hoopis teine süsteem, kus hüdripidurist muundur on

asendatud muudetava takistusega elektriliste küttekehadega, tuuliku tiivik on horisontaalse teljega ja kasutatakse tiibade seadenurga muutmist ehk nn *pitch* reguleerimist. Vertikaalse teljega tiiviku (H-rootori) efektiivne kasutamine tuleb meie arvates kõne alla ainult kirjeldatud hüdripiduriga koormamise korral. Hüdripiduri tüüpiliseks esindajaks on halva kasuteguriga keerispump (joonis 2), mille külmutumiskindla töövedeliku (näiteks vedela õli) väljavoolu piirab termostaatklapp.



Joonis 2. Keerispump

Figure 2. The whirl pump

Koormuse reguleerimise probleemid ja aerodünaamika

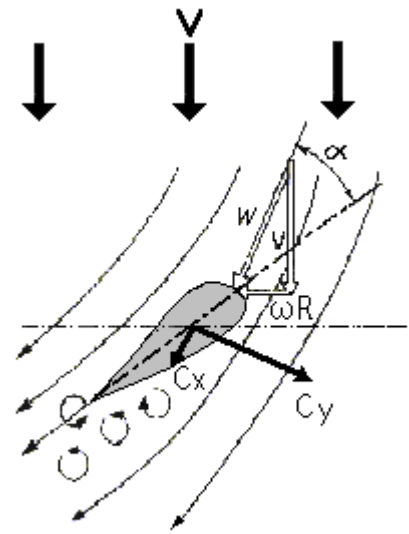
Tuule muutliku iseloomu tõttu on tuuleenergia rakendamisel peamiseks probleemiks tiivikule optimaalse koormuse (pidurduse) leidmine ehk teisiti, igal ajahetkel sobiva rüнденurga α kindlustamine tiivaprofiili telje ja tiivale voolava õhujoa vahel. Tiivale voolav õhujuga koosneb tegelikult kahest komponendist ja on tiiva liikumisele vastasuunalise vektori ωR ja tuulest tekkiva õhuvooluse vektori V summa W (joonis 3). Optimaalse rüнденurga α puhul on tiiva takistusteguri C_x suhe tõstejõutegurisse C_y (ehk suhteline takistus C_x/C_y) minimaalne. Optimaalsuse säilitamiseks tuleb tuule kiiruse muutumisel leida vahendeid suhtelise takistuse suurenemise vastu, s.t rüнденurga väärtuse säilitamiseks endisel tasemel. Rüнденurk säilitab tuule kiiruse muutudes endise väärtuse kahel juhul:

- 1) kui säilib senine kiirekäigulisuse ($\omega R/V$) väärtus;

- 2) kui muudetakse tiiva seadenurka pöörlemistasapinna suhtes proportsionaalselt tuule kiiruse muutumisele.

Muudetava seadenurga kasutamine teeb väiketuuliku kalliks. Seepärast on parem lahendus reguleerida koormust peamiselt (>80% ulatuses) hüdropiduriga, mille tulemusena kiirekäigulisus säilitab ligikaudu endise väärtuse. Millest see tuleneb? Põhjus on lihtne. Kuna tiiviku võimsus on kuupsõltuvuses tuule kiirusest V ja hüdropiduri võimsus kuupsõltuvuses pöörete arvust $n = 30 \cdot \omega / \pi$, siis toimib pidev proportsionaalne tuuliku koormuse reguleerimine automaatselt. Lisatingimuseks on, et hüdropiduri töövedeliku viskoossus ei muutuks. Seda aga peab kindlustama termostaatklapp hüdropiduri väljundis.

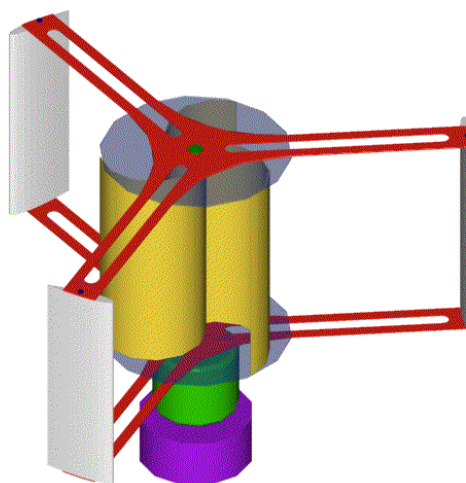
Hüdropiduriga kombineeritud reguleerimise skeemi kasutamine avab võimaluse kasutada ühte või mitut suuremat tuulikut “elektriliste võllide” kaudu paljude väiketarbijate küttevajaduste katmisel.



Joonis 3. Keerispidurdus
Figure 3. “Stall” regulation

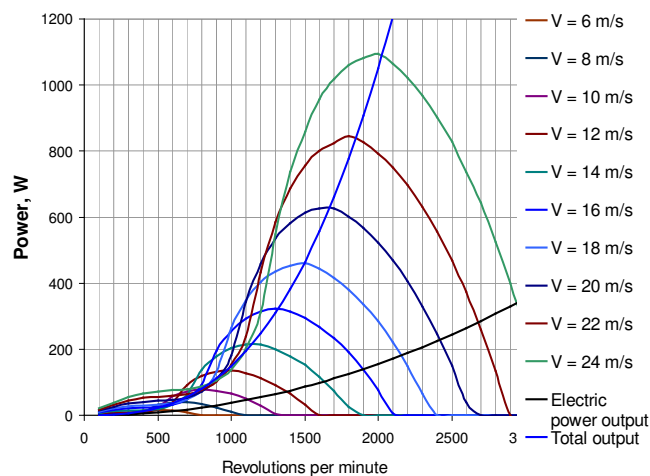
Vertikaalse teljega minituuliku näidis

Kasutades eespool kirjeldatud hüdropiduriga skeemi koos autonoomse seadme käivitamiseks vajaliku, põhitüübiga samal teljel asuva nn Savoniuse rooriga, saame lihtsa ehitusviisiga kompaktselt tuuliku (joonis 4), mida saab kasutada akude laadimiseks, ühest elektrivõrgust eemal asetsevaid suvemaju, piirivalvepunkte, tuulemõõtemaste ja teisi objekte nii sooja vee kui ka elektrienergiaga varustamiseks.



Joonis 4. Autonoomne väiketuulik akude laadimiseks, -soojuse ja elektri tootmiseks
Figure 4. Autonomous micro-class wind turbine for production heat and electricity

Tuuliku aerodünaamika modelleerimine toimus STI-s loodud matemaatilisel mudelil jõudude bilansiga iga rootori asendi nurgakraadi puhul. Modelleerimise tulemused on näha jooniselt 5, kus on toodud tiiviku võimsuse kõverad sõltuvalt tuule kiirusest ja kaks koormuskõverat, mille lõikepunktid tiiviku võimsuskõveraga annavad tööpunkti vastaval tuulekiirusel. Alumine koormuskõver on elektrigeneraatori oma, ülemine aga summaarne, kus hüdropiduri ja elektrigeneraatori koormused on koos. Erinevalt jooniselt 1 toodud põhiskeemist ei kasutata siin “elektrilist võlli” ja hüdropidur ning generaator asuvad mõlemad tiivikuga samal võllil. Modelleerimisel kasutati tiibade jaoks profiili NACA 0015, mille aerodünaamiliste tegurite C_x ja C_y väärtused sõltuvalt rüнденurgast saadi tööst (Yong ja Snyder, 1988). Rootori läbimõõt oli 0,75 m ja kõrgus 0,3 m.



Joonis 5. H-rootoriga tuuliku karakteristikad

Figure 5. Characteristics of a H-rotor wind turbine

Kirjandus ✕ References

1. Jegorov, A. (1997) Katsetuuliku kontseptsiooni väljatöötamine ja vastava tiiviku tiibade modelleerimine. Diplomitöö. TTÜ STI, juhendaja V. Selg: 90.
2. Karileet, U. (1984) Tuulemootori kasutamine põllumajanduses. Diplomitöö. TTÜ STI, juhendaja V. Selg. Tallinn: 81.
3. Keltman, A. (1993) Autonoomne tuuleagregaat võimsusega 10 kW. Diplomitöö. TTÜ STI, juhendaja V. Selg: 60.
4. Lassmann, J. (1993) Autonoomne tuuleagregaat võimsusega 6,8 kW. Diplomitöö. TTÜ STI, juhendaja V. Selg. Tallinn: 67.
5. Mombaur, M. (1999) Energiepolitik wird auf EU-Ebene an Stellenwert gewinnen. Neue Energie, Nr.9, 106-107.
6. Selg, V. (1988) Mittetraditsiooniliste energiaallikate kasutamisevõimalustest Eesti NSV tingimustes. Energiavarustus ja -sääst 1(4). Tallinn: 12–16.
7. Vene, U. (1988) Tuuleenergia kasutamisevõimalused Eesti NSV tingimustes. Diplomitöö: TTÜ STI, juhendaja V. Selg. Tallinn: 113.
8. Yong, W., Snyder, M. (1988) Compilation of characteristics of airfoils at high angles of attack. Institute for aviation research, Wichita, KS 67208.

THE CONCEPT OF AN AUTONOMOUS SMALL-SCALE WIND UTILIZATION SYSTEM FOR PRODUCING ELECTRICITY AND HEAT

Anatoli Jegorov, Vello Selg

Department of Thermal Engineering, Tallinn Technical University
e-mail: egorov@sti.ttu.ee

Abstract

The report surveys the main principles of an autonomous small-scale wind utilization system intended to cover the needs of small communities or some separate households in rural areas for electricity and heating. The report also contains some information about the prototype of a micro class wind converter that would be implemented within an autonomous environmental measurements system for battery charging and heating purposes. The research works in that regard were carried out with an emphasis on system reliability, simple construction and regulation principles.



Võsahakkur töö Tartu maakonnas
Saarel rajatud energiavõsa proovitükil 1998. a.

Foto Andres Koppel

Tulevikulahenduseks peab olema suur- ja väikeenergeetika kooseksisteerimine. Mõlemas peaks olema väga tubli osa taastuvaid allikaid.

Karl Rebane

Kasutades lähteallikana fossiilseid kütuseid, milleks Eesti oludes on peamiselt põlevkivi, väiksemas ulatuses ka turvas, teeme loodusele korvamatut kahju. Samal ajal aga hoolitseb loodus ise Päikese abil energia pideva ringluse eest maakeral.

Mart Hovi, Külli Hovi, Kuno Jürjenson