



TEADUSMÕTE EESTIS (IV)  
TEHNIKATEADUSED (II)

TALLINN 2007

Raamatu väljaandmist toetas Haridus- ja Teadusministeerium

TEADUSMÕTE EESTIS (IV)  
TEHNIKATEADUSED (II)

Rein Küttner (vastutav toimetaja)

Helle-Liis Help, Siiri Jakobson, Galina Varlamova

---

---

ISSN 1736-5015  
ISBN 978-9985-50-394-2  
ISBN 9985-50-394-5

© EESTI TEADUSTE AKADEEMIA

*Facta non solum verba*

---

---

# SISUKORD

SAATEKS	
Rein Küttner .....	6
MIKROSTRUKTUURSED MATERJALID JA DEFORMATSIOONILAINED	
Jüri Engelbrecht, Andrus Salupere, Arkadi Berezovski .....	9
BIOMEDITSIINITEHNIKA – TERVISEINSENEERING	
Hiie Hinrikus, Jaanus Lass, Kalju Meigas, Ivo Fridolin .....	17
TEEL NANOTEHNOLOOGIA RAKENDAMISE SUUNAS	
Ilmar Kink, Kristjan Saal, Tanel Tätte, Valter Reedo, Ants Lõhmus .....	27
SURVETORUDE HÜDRODÜNAAMIKA PROBLEEME	
Tiit Koppel, Leo Ainola, Anatoli Vassiljev .....	33
ÕHUKESEKILELISED PÄIKESEPATAREID PIHUSTUSPÜROLÜÜSI MEETODIL	
Malle Krunks .....	41
KAABELKONSTRUKTSIOONIDEST EESTIS JA MAAILMAS	
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLI UURIMISTÖÖDE TAUSTAL	
Valdek Kulbach .....	49
KAS JA MILLISEID MATERJALIUURINGUID OOTAB EESTI	
TTÜ MEHAANIKATEADUSKONNALT	
Priit Kulu .....	65
KOMPLEKSSETE TEHNILISTE SÜSTEEMIDE OPTIMAALNE PROJEKTEERIMINE –	
TOODETE KONKURENTSIVÕIME TAGAMISE EELTINGIMUS	
Rein Küttner, Martin Eerme, Kristo Karjust Jüri Majak, Meelis Pohlak .....	71
LAINIKUTE RAKENDAMINE DIFERENTSIAAL- JA INTEGRAALVÕRRANDITE	
LAHENDAMISEKS	
Ülo Lepik .....	81
ELEKTRILISE KAKSIKIIHI KONDENSAATORITE JA SÜSINIKMATERJALIDE	
UURINGUD TARTUS 1997–2006	
Enn Lust, Alar Jänes .....	85
PROAKTIIVSED TEHNOLOOGIAD MEIL JA MUJAL	
Leo Mõtus , Merik Meriste .....	95
KEEVKIHT-PÕLETUSTEHNOLOOGIA	
Arvo Ots .....	105
BIOKÜTUSTE JA TUULEENERGIA ALASTEST UURINGUTEST	
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLIS	
Aadu Paist, Teet Parve, Ülo Kask, Maaris Nuutre, Jüri Loosaar, Ants Veski, Indrek Pertmann ..	113
RÄNIKARBIIDIL PÕHINEVATE JÕUPOOLJUHTSEADISTE DISAIN JA	
KARAKTERISEERIMINE	
Toomas Rang, Galina Rang .....	121
LAINETAV LÄÄNEMERI EESTI TEADLASTE PILGU LÄBI	
Tarmo Soomere .....	133
AUTORITEST JA KAASAUTORITEST .....	143

# SAATEKS

Käesolev kogumik on järjeks 2002. aastal avaldatud kogumikule “Teadusmõte Eestis. Tehnikateadused” ja sisaldab põhiliselt arengute kirjeldusi tehnikateadustes Eestis aastatel 2002–2006.

Artiklite valikul oli eesmärgiks tutvustada Eesti tehnikateadlaste olulisemaid saavutusi ning anda lühiülevaade valdkonna uutest arengutest. Ükski taoline kogumik ei suuda oma piiratud mahu tõttu kirjeldada kõiki Eesti tehnikateadlaste tegemisi. Kavast on jätkata analoogiliste kogumike väljaandmist ka edaspidi orienteeruvalt 4-aastaste perioodidega.

Majandus on Eestis viimastel aastatel kodumaise nõudluse, otsese välisinvesteeringute ning ekspordi kasvu toel arenenud väga kiiresti. Sellele vaatamata on Eesti tootlikkuse poolest EL liikmete hulgas tagantpoolt kolmandal kohal ning tootlikkus töötaja kohta moodustas 2004. a vaid 50,6% EL riikide keskmisest tasemest. Senises majandusarengu faasis on ettevõtetel olnud võimalik tulu teenida, investeerimata oluliselt teadmistesse ja oskustesse. Töötlevas tööstuses loodav lisandväärtus inimese kohta on suurima tööhõive (23,7%) juures Eesti majandusharude keskmisest väiksem. Ohumärgiks on asjaolu, et tootlikkuse kasv hakkab töajukulude kasvule alla jääma, kasumlikkus langeb ning peagi on ettevõtted valiku ees, kas viia tootmine madalamate töajukuludega riikidesse või orienteeruda ümber oluliselt kõrgema lisandväärtusega toodete ja teenuste pakkumisele.

Vastavalt TA&I strateegias “Teadmispõhine Eesti 2007–2013” (TE II) toodud suunistele tuleks ühiskonna jätkusuutlik areng tagada põhiliselt teadus- ja arendustegevuse ning innovatsiooni kaudu. Lähituleviku väljakutseks majandusele on tootlikkuse ja kõrge lisandväärtusega ekspordi suurendamine, uuendusi soodustavate koostöövõrgustike loomine, jms. Teadus üldse ja eriti tehnikateadus peab nende eesmärkide realiseerimisele tõhusalt kaasa aitama. Oma sihtide seadmisel pea-

me arvestama arengutega meil ja meid ümbritsevas maailmas, esmajoonel aga põhiliste turukonkurentide juures.

Meie võimed ja võimalused on kasvanud. Majanduse globaliseerumine ja süvenev tööjaotus teravdab konkurentsi, sealhulgas ka teaduses. Nende probleemidega toimetulemine eeldab kõrgelt haritud ja motiveeritud spetsialistide olemasolu, kes on suutelised looma ja arendama uusi teadmisi ja tehnoloogiaid ning neid loovalt kasutama. Eelkõige suureneb nõudlus kõrge kvalifikatsiooniga teadlaste ja inseneride järele.

Teadusuuringud ja teaduslik mõtteviis on olulised kõigis ühiskonna tegevusvaldkondades. Kuigi Eesti teadus- ja arendustegevus on lahutamatu seotud rahvusvahelise teadusruumiga ja Eesti teadlaste uurimisvaldkonnad katavad laia teemade spektri, ei suuda Eesti olla ühtemoodi edukas kõigis TA&I valdkondades. On oluline keskenduda eelkõige Eestile olulistele valdkondadele. Samas peab TA&I süsteem tulevikku suunatud teadusuuringute ja eesmärgipõhiste rakendusuuringute alusel tagama Eesti hariduse järjepidevuseks vajaliku uuringute mitmekesisuse. Teadus peab suutma kontsentreeritult käsitleda nii tulevikuvõimalusi (uusi tehnoloogiaid) kui ka tulevikuriske.

Ühiskonna praktiliste probleemide lahendamiseks on vaja otsese rakendusliku väljundiga eesmärgipäraseid uuringuid. Teadus- ja arendustegevuse uus strateegia (TE II) fokuseerib arengud:

- võtmetehnoloogiatele, nagu info- ja kommunikatsioonitehnoloogiad, biotehnoloogia, materjalitehnoloogiad;
- ühiskonna ja majanduse arengu sotsiaal-majanduslikele väljakutsetele, nagu energeetika, keskkonnasääst, tervishoid, julgeolek.

Mõlemad teaduse arengusuunad on omavahel tihe-dalt seotud ning nende kattuvusala tänapäeval üha kasvab. Seetõttu on oluline leida sobiv tasakaal nende kahe teaduse arengusuuna vahel.

Eesti ettevõtete TA&I tegevuste intensiivsus on kasvanud. Positiivse trendina on aset leidnud erasektori T&A investeeringute kiirem kasv võrreldes avaliku sektori T&A investeeringute kasvuga. Kui 1999. a moodustasid erasektori investeeringud T&A kogukulutustest vaid 24,4%, siis 2004. a oli vastav näitaja juba 39% (TE II). Siiski on erasektori osalus teadus- ja arendustegevuses ikka veel oluliselt madalam arenenud riikidest (USAs 63,1%, Soomes 69,5%, EL keskmine 55,5%). Sellest on suuresti tingitud ka otseselt ettevõtlussektoris tehtava teadus- ja arendustöö kirjelduste puudumine antud kogumikus (kuigi tellimus esitati). Loodame, et järgmistes kogumikes see puudus kõrvaldatakse. Samas peegeldab praegune olukord ka Eesti majanduse struktuuri, milles domineerivad madaltehnoloogilised väike- ja keskmise suurusega ettevõtted, mis on suuresti orienteeritud lihtsale allhankele.

Jõudmine uuest ideest eduni eksporditurgudel eeldab ettevõtjatelt palju teadmisi ja oskusi. Mitte alati ei ole kogu vajalikku kompetentsust ettevõtte enda sees, mistõttu on oluline teha koostööd teiste ettevõtete ja T&A asutustega. Koostöö ettevõttega (tarnijate ja klientidega) on Eestis küll EL keskmisega võrreldes sagedasem. Ülikoolide ning teadus- ja arendusasutustega teevad Eesti ettevõtted aga ligi 2,5 korda vähem koostööd kui partner-ettevõtetega. Ühelt poolt on vähene koostöö üli-

koolide ja T&A asutustega seletatav asjaoluga, et ülikoolide ja T&A asutuste poolt tehtav teadus- ja arendustegevus ei ole olnud piisavalt suunatud rakenduslikkusele, ettevõtete vajadustele. Veelgi olulisemal määral on aga ettevõtete vähene koostöö ülikoolide ja T&A asutustega seletatav majanduse struktuuriga, kus suur osa ettevõtteid tegeleb madala lisandväärtusega niššides. Puudub arvestatav ettevõttesisene TA&I tegevus ning seetõttu on piiratud nii ettevõtete vajadused kui ka võimekus teadmiste- ja tehnoloogiasirdele orienteeritud koostööks T&A asutustega. Sisuliselt puudub hästi toimiv süsteem majanduse tehnoloogiliste arengute tulevikuseireks.

Kogumiku üheks eesmärgiks on kaasa aidata T&A süsteemi ees seisvate ülesannete lahendamisele. Materjal on valitud Eesti TA Informaatika ja Tehnikateaduste Osakonna poolt. Kogumik sisaldab põhiliselt piiratud väljavõtet nii Tallinna Tehnikaülikoolis kui ka Tartu Ülikoolis tehtavatest tehnikateaduse alastest (tehnikateadustega vahetult seotud) uuringutest. Esitatud materjal on toimetatud Eesti TA teadusinfo osakonnas. Kogumiku artiklid on esimeste autorite tähestikulises järjekorras.

Mitme tehnikateadlase uurimistööde tulemustega võib süvendatult tutvuda Eesti TA ajakirjas "Eesti TA Toimetised. Tehnikateadused" avaldatud artiklite vahendusel. Ajakiri ilmub alates 1996. aastast.

*Rein Küttner*

Eesti TA Informaatika ja Tehnikateaduste Osakonna juhataja  
Tallinna Tehnikaülikooli professor

# MIKROSTRUKTUURSED MATERJALID JA DEFORMATSIOONILAINED

*Jüri Engelbrecht, Andrus Salupere, Arkadi Berezovski*

Tallinna Tehnikaülikooli küberneetika instituut, Mittelineaarsete Protsesside Analüüsi Keskus

Materjaliteadus on tänapäeval kiiresti arenev multidistsiplinaarne teadusvaldkond. On ju materjalid kasutusel pea kõigil elualadel. Kõrvuti looduslike materjalidega seob tehnoloogia areng meid ikka rohkem tehismaterjalidega, mis peavad rahuldama etteantud omadusi väga laial skaalal. Kui heita pilk minevikku, siis uus materjal sündis tavaliselt katse-eksituse meetodil. See arusaam muutus, kui hakati aru saama materjalide struktuurist ja selle seostest materjali kui terviku omadustega. Seega on vaja hästi tunda materjalide mikrostruktuuri alates aatomite tasandist kuni komposiitmaterjalide struktuurini. See aga tähendab, et materjaliteaduses põimuvad tänapäeval termodünaamika, kristallograafia, mehaanika, keemia, tahkise- ja kvantfüüsika tervikuks, mis lubab analüüsida nii faasiüleminekuid kui purunemist, materjalide omaduste muutumist temperatuuri mõjul, elektromagnetilises väljas või ka välisjõudude toimel, materjalide kohandamist bioloogilistesse süsteemidesse jne, jne.

Üks vana ütlus kõlab, et materjalid on nagu inimesed: variatsioonid ja puudused teevad nad huvitava-

vaks. Ja nii pole kristallstruktuurid regulaarsed, hulk materjale on amorfseid, kasutusel on funktsionaalselt skaleeritud materjalid, materjalides esinevad mikropraod...

Seega klassikaline kristallstruktuuri üldistus pidevaks keskkonnaks ilmselt ei suuda kirjeldada kõiki materjalide omadusi ja vaja on ühendada materjali mikrostruktuuri (peenstruktuuri) ja makrostruktuuri (konstruktsioonielemendi) kirjeldus tervikuks.

TTÜ küberneetika instituudi Mittelineaarsete Protsesside Analüüsi Keskus (inglisekeelse akronüümiga CENS) on viimasel ajal suurt tähelepanu pööranud lainelevi protsesside modelleerimisele mikrostruktuuriga materjalides. Kui materjaliteaduse põhiprobleemideks on materjalide tootmine, struktuur, omadused, käitumine, siis CENSi vaateväljas on nende käitumine dünaamilistel koormustel ja omaduste määramine. Seda tihedas koostöös Pariisi, Torino, Saarbrückeni jt keskuste teadlastega. Alljärgnevalt on toodud sellest tegevusest lühiülevaade (vt ka <http://cens.ioc.ee>).

## MATEMAATILISED MUDELID

Mikrostruktuurse materjali üheks tunnusjooneks on teatava sisemise mastaabi või karakteristliku pikkuse olemasolu, mis kirjeldab kristallvõre perioodi, graanulite või täiteaine iseloomulikku mõõdet, mikropragude vahelist kaugust, komposiitmaterjalide kihtide paksust või muud iseloomulikku mõõdet. Taolise sisemise mastaabi olemasolu toob otseselt mängu deformatsioonilainete dispersiooni. Vastava teooria loomine võib alata kas materjali diskreetsuse (kristallstruktuur) või pidevuse kontseptsioonist. Esimesel juhul on tegemist

atomaarset struktuuri kirjeldavate punktmasside süsteemiga, mille liikumisvõrrandid tuletatakse liikumishulga jäävuse seadusest [Maugin, 1999]. On võimalik eristada punktmasse ja nendevahelisi jõude, kuid loomulikult on saadud süsteem liiga suur praktilisteks arvutusteks. Pideva keskkonna kontseptsiooni kasutades on üks võimalus võtta arvesse materjali omaduste sõltuvust koordinaadist ning omistada kõik füüsikalised parameetrid igale materjali ruumielemendile. Teine võimalus, mille puhul saab paremini haarata füüsikalist oma-

pära, on eristada makro- ja mikrostruktuur ning formuleerida jäävusseadused mõlema jaoks eraldi [Eringen, 1966, 1999; Mindlin, 1964]. Lisaks on siis võimalik vaadelda mikrostruktuuri mitteinert-

siaalsena, mis viib sisemuutujate formalismini [Maugin, 1990].

Uuringud CENSis haaravad deformatsioonilainete ja faasisiirdefrontide levi analüüsi.

## DEFORMATSIOONILAINED MIKROSTRUKTUURSETES MATERJALIDES

Mikrostruktuursetes materjalides toimuva lainelevi uurimisel on CENSis rakendatud Mindlini ja Kortewegi-de Vriesi tüüpi mudeleid.

### MINDLINI TÜÜPI MUDELID

Viimastel aastatel oleme üha rohkem tähelepanu pööranud Mindlini [1964] teooriast lähtuvatele mudelitele, kus on ühildatud

- sisemiste mastaapide mõju mitteklassikalise pideva keskkonna teooria raames;
- lainehierarhiate kontseptsioon [Whitham, 1974];
- makro- ja mikrostruktuuri mittelineaar-sus.

Teooria ise ei sisalda algselt mastaape, selleks on vaja asümptootilisi teisendusi, mille tulemusena on jõutud füüsikalisel "läbipaistvate" mudeliteni. Tüüpiline ühedimensionaalne pikilaine võrrand mikrostruktuuriga materjalis on järgmine [Engelbrecht jt, 2005; Janno, Engelbrecht, 2005a]:

$$U_{TT} - bU_{XX} - \frac{\mu}{2}(U_X^2)_X - \delta(\beta U_{TT} - \gamma U_{XX} - \delta^{1/2} U_{XX}^2)_{XX} = 0, \quad (1)$$

kus  $X$  ja  $T$  on vastavalt aeg ja koordinaat;  $b, \beta, \gamma, \mu, \lambda$  – materjali parameetrid ning  $\delta$  – mastaabitegur, mis näitab mikrostruktuuri iseloomuliku mõõdu ja lainepikkuse suhet. Võrrandi (1) integreerimisel lisanduvad alg- ja rajatingimused. Ka intuiitiivselt on selge, et väikeste  $\delta$  väärtuste korral (lainepikkus oluliselt suurem kui mikrostruktuuri mõõde) laine "tunnetab" vähem mikrostruktuuri olemasolu ja suurte  $\delta$  väärtuste korral hakkab mikrostruktuur olulist rolli mängima.

Varasemad tulemused haarasid dissipatsiooni arvestamist [Engelbrecht, Pastrone, 2003; Sillat, Engelbrecht, 2003] ja mikrostruktuuri mittelineaar-suse modelleerimist [Engelbrecht, Pastrone, 2003].

Hiljuti on läbi viidud põhjalik dispersioonianalüüs [Engelbrecht jt, 2005, 2006; Peets, 2006] ja üldis-

tatud matemaatilisi mudeleid. On nimelt näidatud [Engelbrecht jt, 2005], kuidas tuletatud mudel on seotud Eshelby pingega ja pseudoimpulsi (ingl *pseudomomentum*) kontseptsiooniga [Maugin, 1993] ja kuidas üldistada teooriat multimastaapse juhu jaoks (st mikrostruktuuri sees on veel väiksem struktuur oma skaalaga). Viimane tulemus on eriti oluline seoses nanoskaalat arvestavate rakendustega. See kõik loob tugeva aluse lainelevi protsesside analüüsiks ning konkreetsete ülesannete, k.a pöördülesannete, lahendamiseks. Viimaste korral on eesmärgiks määrata materjalide omadusi, teades lainete levi iseloomustavaid suurusi (faasikiirused, amplituudid jne).

### KORTEWEGI-DE VRIESI TÜÜPI MUDELEID

Kui mudelvõrrand (1) on laiendus klassikalisele lainevõrrandile, siis matemaatilise füüsika viimaste aastakümnete tähelepanu on evolutsioonivõrranditel, mille tuntuimaks näiteks on Kortewegi-de Vriesi (KdV) võrrand [Zabusky, Kruskal, 1965]. KdV võrrand kirjeldab lainelevi ruutmittelineaar-suse ja kuupdispersiooni arvestamisega ning ta oli alul tuletatud kirjeldamiseks laineid madalas vees. Praeguseks on KdV võrrand ja tema modifikatsioonid leidnud laialdast kasutamist ka teistes valdkondades, sh lainelevi kirjeldamisel mikrostruktuursetes tahkistes.

CENSi tähelepanu on olnud suunatud martensiit-austeniit sulamitele, kus dispersioon on kõrgemat järku ja mittelineaarsust kirjeldab kahe miinimumiga elastne potentsiaal [Salupere jt, 2001]:

$$u_t + [P(u)]_x + du_{3x} + bu_{5x} = 0, \quad (2)$$

$$P(u) = 0,25u^4 - 0,5u^2,$$

kus  $d$  ja  $b$  on dispersiooniparameetrid. Teiseks oluliseks uurimisobjektiks on olnud granuleeritud materjalid, kus mudelvõrrand sisaldab kahte KdV operaatorit [Giovine, Oliveri, 1995], st analoogi-



liselt võrrandiga (1) on ka siin tegu hierarhilise süsteemiga:

$$u_t + uu_x + \alpha_1 u_{3x} + \delta(u_t + uu_x + \alpha_2 u_{3x})_{2x} = 0, \quad (3)$$

kus  $\alpha_1$  ja  $\alpha_2$  on dispersiooniparameetrid ja  $\delta$  – mastaabitegur. Kui klassikaline KdV võrrand kirjeldab üksiklaineid – solitone – kui koherentseid

tasakaalustatud laineid ning energiakandjaid, siis üldnimetatud füüsikalised süsteemid on keerulisemad ning tasakaal mittelineaarsete ja dispersiivsete efektide vahel võib siin realiseeruda ka üksiklainete komplekside näol [Ilison, Salupere, 2003b; Salupere jt, 2005]. Loomulikult on ka võrrand (1) teisendatav evolutsioonivõrrandi keelde [Randrüüt, 2006]. Tulemus erineb aga KdV-võrrandist keerulisema mittelineaarsuse poolest.

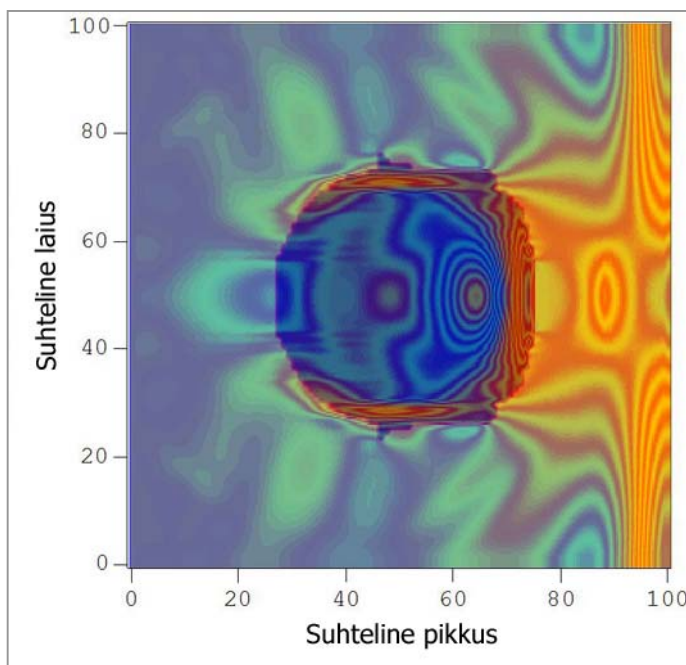
## FAASISIIRDEFRONDID

Kujumäluga sulamid on nn “nutikad” materjalid, mis kohanevad väliskeskkonnaga, tõstes nii konstruktsiooni efektiivsust või laiendades kasutusala. Martensiit-austeniit tüüpi sulamites on seega oluline faasisiire ja martensiitne kahestumine, mis nõuab protsessi kineetika täpset kirjeldust. Faasisiirdefrondi leviku kirjeldamiseks on esitatud uus meetod [Berezovski, Maugin, 2005a], mis põhineb pideva keskkonna teooria arendustel, süsteemide termodünaamil ja jäävusseaduste esitamise numbrilistel meetoditel. Erilise tähelepanu all on dünaamilisest pingeolukorrast tekitatud faasisiirded. On

konstrueeritud kõrge täpsusega algoritm faasisiirete määramiseks, mis nõudis nn lõpliku mahu meetodi täiustamist termodünaamika tingimuste lisamisega. See on tingitud faasisiirde protsessi mittetasakaalulisest olemusest. Probleemi lahendus on leitud diskreetsete süsteemide termodünaamika raames [Berezovski, Maugin, 2005a] mittetasakaaluliste termodünaamiliste tingimuste rahuldamisel [Berezovski, Maugin, 2004]. Esitatud on tingimused mahus ja faasiipiiridel, kus toimub entroopia lisandumine, ning määratud jõu kriitiline väärtus faasiipiiril [Berezovski, Maugin, 2005a].

Joonis 1.

Laine ja austeniit keskkonnas asuva martensiitse tera (inklusiooni) vastastikmõju (interaktsiooni) simulatsioon. Algselt oli martensiitne tera ringikujuline ning talle langes vasakult poolt pingelaine. Kuna lained martensiidis levivad aeglasemalt kui austeniit, siis toimuvad martensiitse ja austeniitse ala piiril faasimuutused, mille tulemusena muutub ka martensiitse tera kuju.



Termodünaamiliselt korrektne algoritm võimaldab lahendada mitmeid probleeme [Berezovski jt, 2000, 2003a, 2006; Berezovski, Maugin, 2001], seda ka mitmemõõtmelises seades, ning lubab üldistusi ka pragude arenemise modelleerimisel. Seejuures on kasutatud faasisiirdefrontide kui katkevuste põhimõttelist sarnasust ruumikatkevustega, st pragudega.

## TULEMUSI

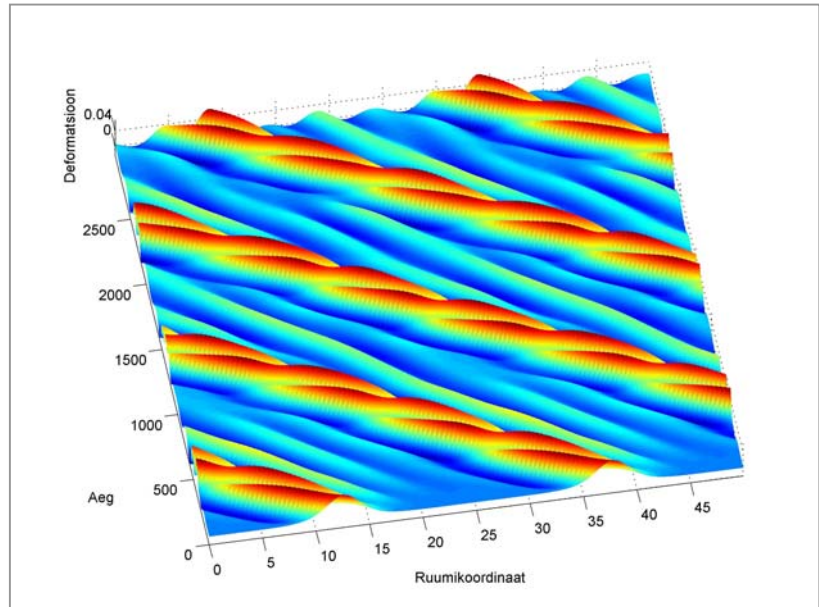
- On esitatud multimastaapsust arvestav matemaatiline mudel lainelevi kirjeldamiseks mikrostruktuursetes materjalides. Dispersioonianaaliis lubab hinnata asümptootiliste mudelite kasutusala [Engelbrecht jt, 2005; Janno, Engelbrecht, 2005a; Randrüüt, 2006; Peets, 2006].
- Numbriliste eksperimentide abil on analüüsitud lokaliseeritud häirituse levi mikrostruktuursetes tahkistes ja granuleeritud materjalides. Sel eesmärgil on integreeritud numbrilisel vastavald evolutsioonivõrrandid (2) ja (3). On selgitatud kuidas materjaliparameetrite väärtused ning häirituse amplituud ja iseloom mõjutavad lahendi iseloomu. Tulemusena on näidatud, millisel juhul on tegu solitoni-tüüpi lahenditega ja millisel juhul mitte.
  - ✓ Mikrostruktuursete materjalide korral on tuvastatud, et lokaliseeritud alghäiritusest võib välja kujuneda viis erinevat lahenditüüpi: mitteregulaarne lainete jada; regulaarne lainete jada; “palmiksolitonid”; kaks üksiklainet; üks üksiklainet [Ilison Salupere, 2003a, 2005, 2006; Salupere jt, 2005; Ilison, 2005].
  - ✓ Granuleeritud materjalide korral on uuritud nii harmooniliste kui lokaliseeritud alghäirituse juhtu. Harmoonilise algingimuse korral oli kõige huvitavamaks tulemuseks kahe solitonilise struktuuri – KdV solitonide ansambli ja võrdsete amplituudidega üksiklainete ansambli – samaaegne eksisteerimine [Ilison, Salupere, 2003a; Salupere jt, 2005]. Lokaliseeritud alghäirituse korral on tuvastatud viis erinevat lahenditüüpi: üksik KdV soliton; KdV solitonide ansambel; KdV solitonide ansambel koos nõrga sabaga; KdV

Üldistusel on aga sügavam teoreetiline tagapõhi – nimelt mõlemal juhul on vaja lisatingimusi täiendavate jõudude määramiseks, mis tuletatakse termodünaamika seaduste abil. Tööde tsükli “Faasisiirdefrontid martensiitsetes tahkistes” eest pälvis Arkadi Berezovski 2004. aastal Eesti Vabariigi teaduspreemia tehnikateaduste alal [Berezovski, 2004].

- soliton koos tugeva sabaga; KdV soliton koos saba ja lainepaketiga.
- On näidatud, et KdV mudeli korral on osadel solitonidel faasinihked paremale ja vasakule tasakaalus ning seetõttu on vastavad trajektoorid lähedased sirgjoontele. Nendest nn balanseeritud trajektooridest moodustub perioodiline muster, mis on stabiilne üle väga pikkade ajavahemike [Salupere jt, 2002, 2003ab; Engelbrecht, Salupere, 2005].
- Erinevalt nn KdV tüüpi mudelitest, võimaldab Mindlin tüüpi mudel (1) simuleerida paremale ja vasakule liikuvate lainete omavahelist interaktsiooni. Esialgsete numbriliste eksperimentide tulemused näitavad, et teatavate parameetrite kombinatsioonide korral on lokaliseeritud algingimustest formeervate üksiklainete käitumine interaktsioonil väga lähedane solitonide vastavale käitumisele. Lisaks selgus, et vastasuunas liikuvate võrdse amplituudiga solitonide interaktsioon toimub ilma faasinihketa, kuid erinevate amplituudide korral faasinihe esineb.
- On lahendatud teoreetiliselt rida pöördülesandeid, mis on aluseks materjali füüsikaliste omaduste määramiseks (akustodiagnostika algoritmid) [Janno, Engelbrecht, 2005bc]. On tuletatud kineetiline seos liikuva katkevuse kiiruse määramiseks. See tuleneb mittetasakaalulisest hüppetingimusest katkevusel, mis on formuleeritud kontaktsuuruste ning entroopia kasvu terminites. On näidatud, et lihtne oletus kontaktpingete pidevusest võimaldab määrata pingehüppe katkevusel ning tuletada vastavad kineetilised seosed [Berezovski, Maugin, 2005b]. Saadud kineetilist seost on edukalt rakendatud

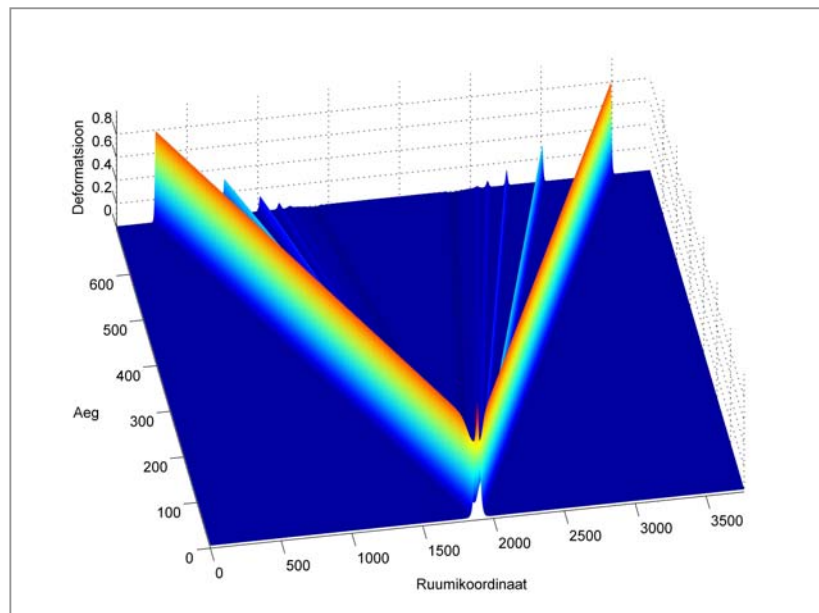
### Joonis 2.

Palmiksolitoni tekkimine algsest lokaliseeritud deformatsioonilainest KdV tüüpi mudeli (2) korral. Numbriline simulatsioon on läbi viidud perioodilistel rajatingimustel ning parema ülevaate saamiseks on joonisel kujutatud kahte ruumiperioodi. Joonisel esitatud koherentsest struktuurist eristub selgelt kahest omavahel interakteeruvast üksiklainest moodustunud palmiksoliton. Kuna vaadeldaval juhul on üksiklainete käitumine interaktsioonidel väga lähedane solitonide vastavale käitumisele, siis võib selline struktuuri element eksisteerida suhteliselt pika ajavahemiku jooksul.



### Joonis 3.

Kahe vastassuunas liikuva solitoni jada tekkimine algsest lokaliseeritud deformatsioonilainest Mündlini tüüpi mudeli (1) korral. Mõlemas jadas on viis solitoni, mille järel on võimalik eristada jada suhtes vastassuunas liikuvat ostsilleeruvat saba.



hapra prao leviku puhul. Sellel juhul on tekitatud jõud proportsionaalne prao tipust vabaneva energia määraga. Energia eraldumise määr on arvutatud dünaamilise J-integraali määramispiirkonna esitamise kaudu. Prao levi numbrilised simulatsioonid näitavad head ühildumist meie käsutuses olevate eksperimentaalsete andmetega.

- Löökkõrmusest põhjustatud faasiülemineku fronti levi numbrilised simulatsioonid ühe-

mõõtmelises vardas lubavad selgitada kujumäluga sulamite Ni-Ti deformatsiooni vähenemist martensiitse faasiülemineku tõttu [Berezovski, Maugin, 2005a].

- Mittelineaarse ühemõõtmelise lainelevi numbrilised simulatsioonid kihilistes mittehomogeensetes keskkondades näitavad, et eksperimentaalselt jälgitud kihiliste komposiitide reageerimist suure kiirusega löökkoormusele saab esitada nende koostisosade mittelineaarsete pingedeformatsiooni seoste abil [Berezovski jt, 2006].

Uuringute jätk on seotud sisemuutujate formalismi arendamisega multimastaapsete mikrostruktuurse-

te materjalide kirjeldamiseks, eesmärgiga tuletada dissipatsiooni ja termilisi efekte arvestavad mudelid.

Tähelepanu all on solitoni-tüüpi struktuuride tekke selgitamine keeruliste dispersiooniseaduste ja mittelineaarsete kombinatsioonil, mille siht on nii pingeanalüüs kui ka pöördülesannete lahendusmeetodite väljatöötamine.

Teoreetilisest vaatepunktist tundub endiselt põnevana solitonijadade tekkemehhanismi analüüs, mille jaoks on välja töötatud matemaatilised mudelid ja lahendusmeetodid.

## VIITED

Berezovski, A. 2004. Muutuvate omadustega materjalid. Eesti Vabariigi teaduspreemiad, Eesti Teaduste Akadeemia, Tallinn, 48-57.

Berezovski, A., Berezovski, M., Engelbrecht, J. 2006. Numerical simulation of nonlinear elastic wave propagation in piecewise homogeneous media. *Mater. Sci. Engng. A*, 418, 1–2, 364-369.

Berezovski, A., Engelbrecht, J., Maugin, G. A. 2000. Thermoelastic wave propagation in inhomogeneous media. *Arch. Applied Mech.*, 70, 694-706.

Berezovski, A., Engelbrecht, J., Maugin, G. A. 2003. Numerical simulation of two-dimensional wave propagation in functionally graded materials. *Eur. J. Mech. Solids*, 28/4, 299-313.

Berezovski, A., Maugin, G. A. 2001. Simulation of thermoelastic wave propagation by means of a composite wave-propagation algorithm. *J. Comp. Physics*, 168, 1, 249-264.

Berezovski, A., Maugin, G. A. 2004. On the thermodynamic conditions at moving phase-transition fronts in thermoelastic solids. *J. Non-Equilib. Thermodynamics*, 29, 37-51.

Berezovski, A., Maugin, G. A. 2005a. Stress-induced phase-transition front propagation in thermoelastic solids. *Eur. J. Mec. A/Solids*, 24, 1, 1-21.

Berezovski, A., Maugin, G. A. 2005b. On the velocity of moving singularities in solids. *Acta Mechanica*, 179/3-4, 187-196.

Engelbrecht, J., Berezovski, A., Pastrone, F., Braun, M. 2005. Waves in microstructured solids and dispersion. *Phil. Mag.*, 85, 33-35, 4127-4141.

Engelbrecht, J., Berezovski, A., Pastrone, F., Braun, M. 2006. Hierarchies of waves in non-classical materials. Delsanto, P.-P. (ed.). *The Universality of Non-Classical Non-Linearity with Applications to NDE and Ultrasonics*, Springer, New York et al., 29-48.

Engelbrecht, J., Pastrone, F. 2003. Waves in microstructured solids with strong nonlinearities in microscale. *Proc. Estonian Acad. Sci. Phys. Math.*, 52, 12-20.

Engelbrecht, J., Salupere, A. 2005. On the problem of periodicity and hidden solitons for the KdV model. *Chaos*, 15, 015114.

Eringen, A. C. 1966. Linear theory of micropolar elasticity. *J. Math. Mech.*, 12, 909-923.

Eringen, A. C. 1999. *Microcontinuum Field Theories. I Foundations and Solids*. Springer, New York.

Giovine, P., Oliveri, F. 1995. Dynamics and wave propagation in dilatant granular materials. *Meccanica*, 30, 341-357.

- Ilison, O. 2005. Solitons and solitary waves in media with higher order dispersive and nonlinear effects. PhD Thesis, Tallinn University of Technology.
- Ilison, O., Salupere, A. 2003a. On formation of solitons in media with higher order dispersive effects. *Proc. Estonian Acad. Sci. Phys. Math.*, 52, 1, 125-134.
- Ilison, L., Salupere, A. 2003b. Solitons in hierarchical Korteweg-de Vries type systems. *Proc. Estonian Acad. Sci. Phys. Math.*, 52, 1, 135-144.
- Ilison, O., Salupere, A. 2005. Propagation of sech<sup>2</sup>-type solitary waves in higher order KdV-type systems. *Chaos, Solitons & Fractals*, 26, 2, 453-465.
- Ilison, O., Salupere, A. 2006. On the propagation of solitary pulses in microstructured materials. *Chaos, Solitons & Fractals*, 29, 202-214.
- Janno, J., Engelbrecht, J. 2005a. Solitary waves in nonlinear microstructured materials. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 38, 23, 5159-5172.
- Janno, J., Engelbrecht, J. 2005b. Waves in microstructured solids. Inverse problems. *Wave Motion*, 43, 1-11.
- Janno, J., Engelbrecht, J. 2005c. An inverse solitary wave problem related to microstructured materials. *Inverse Problems*, 21, 2019-2034.
- Maugin, G. A. 1990. Internal variables and dissipative structures. *J. Non-Equilib. Thermodyn.*, 15, 173-192.
- Maugin, G. A. 1993. *Material Inhomogeneities in Elasticity*, London, Chapman & Hall.
- Maugin, G. A. 1999. *Nonlinear Waves in Elastic Crystals*, Oxford, Oxford University Press.
- Mindlin, R. D. 1964. Micro-structure in linear elasticity. *Arch. Rat. Mech. Anal.*, 16, 51-78.
- Peets, T. 2006. Dispersion in microstructured materials. MSc Thesis, Tallinn University of Technology.
- Randrüüt, M. 2006. Modelling of deformation waves in microstructured solids. MSc Thesis, Tallinn University of Technology.
- Salupere, A., Engelbrecht, J., Ilison, O., Ilison, L. 2005. On solitons in microstructured solids and granular materials. *Mathematics and Computers in Simulation*, 69, 502-513.
- Salupere, A., Engelbrecht, J., Maugin, G. A. 2001. Solitonic structures in KdV-based higher-order systems. *Wave Motion*, 34, 51-61.
- Salupere, A., Engelbrecht, J., Peterson, P. 2003a. On the long-time behaviour of soliton ensembles. *Mathematics and Computers in Simulation*, 62, 137-147.
- Salupere, A., Peterson, P., Engelbrecht, J. 2002. Long-time behaviour of soliton ensembles. Part I, Emergence of ensembles. *Chaos, Solitons & Fractals*, 14, 1413-1424.
- Salupere, A., Peterson, P., Engelbrecht, J. 2003b. Long-time behaviour of soliton ensembles. Part II, Periodical patterns of trajectories. *Chaos, Solitons & Fractals*, 15, 29-44.
- Sillat, T., Engelbrecht, J. 2003. Wave propagation in dissipative microstructured materials. *Proc. Estonian Acad. Sci. Phys. Math.*, 52, 103-114.
- Tamm, K. 2006. Deformatsioonilainete interaktsioonid mikrostruktuursetes tahkistes. MSc Thesis, Tallinn University of Technology.
- Whitham, G. B. 1974. *Linear and Nonlinear Waves*, New York, J.Wiley.
- Zabusky, N. J., Kruskal, M. D. 1965. Interaction of solitons in a collisionless plasma and the recurrence of initial states. *Phys. Rev. Lett.*, 15, 240-243.

# BIOMEDITSIINITEHNIKA – TERVISEINSENEERING

*Hiie Hinrikus, Jaanus Lass, Kalju Meigas, Ivo Fridolin*

Tallinna Tehnikaülikooli biomeditsiinitehnika keskus

## SISSEJUHATUS

Esimene insener, keda inimene peaks oma olemasolu eest tänama, on Loodus. Loodus on kokku pannud mehaanika (liigutused), hüdraulika (vereringe), energeetika (ainevahetuse), automaatika (kogu elutegevuse seostatuse), elektromagnetismi (protsesside elektrilise juhtimise) ja lõpuks olulisima komponendi – arvuti (aju), mis kogu süsteemi koordineerib ja juhib.

Biomeditsiinitehnika on kogu maailmas kiiresti arenev interdistsiplinaarne ala, mille eesmärgiks on tehnika ja tehnoloogia kasutamine tervise ning elu kvaliteedi parandamiseks.

Tallinna Tehnikaülikooli biomeditsiinitehnika keskus asutati 1994. aastal. Keskuse peamised tegevussuunad viimastel aastatel on bioelektriliste

signaalide interpreteerimine, kardiovaskulaarne diagnostika ja biovedelike optika. Vaatamata sellele näilikule mitmekesisusele ühendab kõiki tegevussuundi püüde saada täpsemaid teadmisi inimeses toimuvatest protsessidest, kasutades selleks uusi meetodeid ja kaasaegset signaalide analüüsi.

Peamine probleem ongi aru saada, millist informatsiooni registreeritud signaalid sisaldavad. Sealt midagi olulist välja lugeda ei ole kaugeltki lihtne, sest tegemist on keerukate protsessidega, mis sõltuvad paljudest üheaegselt mõjuvatest teguritest. Seepärast on bioelektriliste signaalide töötlemise ja interpreteerimise probleemid meditsiinis väga olulised. Keskus osaleb biosignaalide mittelineaarse analüüsi osas ka Eesti teaduse tippkeskuses Mittelineaarsete Protssside Analüüsi Keskus.

## BIOELEKTRILISED SIGNAALID

Miks peaks kehale kinnitatud elektrodide kaudu saadav elektriline signaal midagi ütleva inimese tervise kohta?

Kogu inimese elutalitus (närvitegevus, südame töö, liigutused) on tihedalt seotud elektromagnetiliste protsessidega ja elektriliselt juhitav. Meie keharakud vahetavad omavahel infot nii keemiliste kui elektriliste signaalide abil. Närvirakud, mis närvikiudude abil ulatuvad keha kaugematesse paikadesse, saadavad ja saavad elektrilisi signaale. Mõõtes bioelektrilisi signaale saab informatsiooni inimese erinevate organite seisundist: elektroentsefalograafia (EEG) kirjeldab aju, elektrokardiograafia (EKG) südant, elektromüograafia (EMG) lihaseid jne.

Biomeditsiinitehnika keskuses on uuritud EEG, EKG ja vähemal määral ka EMG signaale. Üheks

eesmärgiks oli uurida, kas EKG signaalis on võimalik leida eriomaseid muutusi enne eluohtliku rütmihäire tekkimist. Selgus, et kui jälgida südame taastusfaasi esimesi hetki, mil saab alguse enamik eluohtlikest rütmihäiretest, on selline ennustamine võimalik [Lass jt, 2002a].

Viimastel aastatel on peatähelepanu all olnud ajuuringud.

Kõige suurem ongi keerukuse aste just ajuuringutes. Esiteks, ajus on sada tuhat miljonit närvirakku, mis kõik on omavahel ühendatud mitmekordsete seostega. Sellise süsteemi tööst ei osata siiani kuigi põhjalikult aru saada. Teiseks, aju-tegevuse uurimine on kõige raskem – tegelikult mõõdetakse signaale peanahalt, aju sisse ju tungida ilma selle tööd häirimata ei saa. See meenutab arvuti korpusest tehtud mõõtmisi, mille põh-

jal oleks vaja mõista, kuidas arvuti töötab. Ajutegevuse mõistmine on ülimalt ahvatlev eesmärk, mis saab olla edukas vaid paljudest erinevatest vaatenurkadest lähenemiste sünergia kaudu. Aju närvirakkude ehk neuronite plinkimissagedus ulatub ainult 2000 hertsini. Kuidas siis saab aju-arvuti hakkama infotöötusega kaasaegsete arvutite võimalusi ületaval tasemel? Kuidas toimivad tunnetuslikud protsessid ja nende töötlus ajus? Kas ja kuidas on need protsessid mõjutatavad välise väljade poolt?

Kuna inimese juhtskeem on elektriline, siis on selge, et ka tehniliku väljaga võib mõjutada protsesse, mis toimivad inimese sees. Kindlate parameetritega välise välja mõju uurimine ajule aitab mõista ka neid protsesse, mis ajus endas toimuvad.

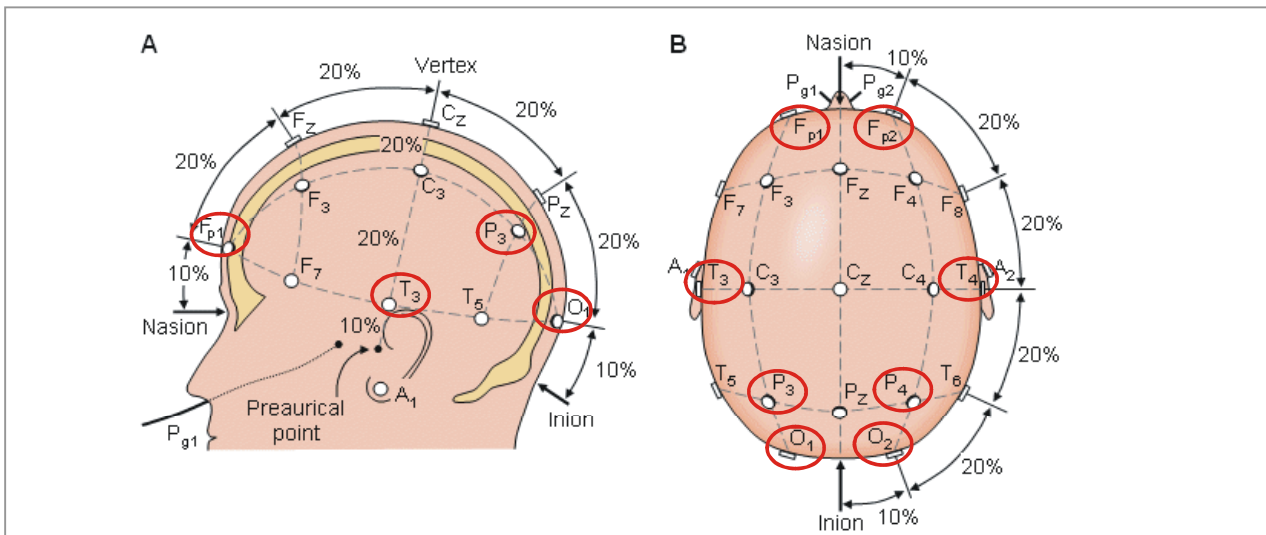
Raadiosageduslikku mikrolainekiirgust inimene ei näe, ei kuule ega tunnet mingil muul viisil. Et seda mõju mõista, tuleb jälgida aju EEG signaali kiirguse puudumisel ja selle olemasolul.

Esimeseks probleemiks on inimese poolt mittetunnetatava kiirguse mõju avastamine EEG signaalis. Selleks on välja töötatud uus EEG analüüsi meetod – erinevuste integreerimine, mis oluliselt tõstab tundlikkust. Häid tulemusi on andnud ka

TTÜ küberneetika instituudi teadlaste poolt loodud madala variaabelisusega löikude pikkuse jaotuse meetod [Bachmann jt, 2005ab]. Teiseks probleemiks on kiirguse võimaliku füsioloogilise mõju hindamine. Siin saab kasutada tulemuste võrdlemist teiste enamuuritud (keemilised ained) aju mõjutavate teguritega.

Katseid tehti neljal erineval vabatahtlike grupil [Bachmann jt, 2005ab; Hinrikus jt, 2004ab, 2005; Lass jt, 2004a]. Katse koosnes kümnest tsüklist: minut kiirgusega ja minut ilma kiirguseta EEG salvestusest. Katsealuseid mõjutati 450-megahertsise sagedusega mikrolainega, mida moduleeriti sagedustega 7, 14, 21, 40, 70, 217 või 1000 herts. Kasutati madala nivooga, tervisekaitse normidest umbes kümme korda nõrgemat kiirgust. Analüüsiti EEG teeta-, alfa- ja beetarütme erinevates kanalites otsmikult kuklani (joonis 1).

Selgus, et mikrolaine suurendab EEG aktiivsust. Mõju on suurem modulatsioonisagedustel, mis on kõrgemad või lähedased vastavate EEG rütmide sagedustele. Peamiselt mõjutab kiirgus aju kõrgemaid sagedusi (beeta-rütm, 20–40 herts), mis on seotud intellektuaalsete võimetega. Kui palju, see sõltub suuresti isikust. Koondandmed individuaalse tundlikkuse kohta on toodud tabelis 1.



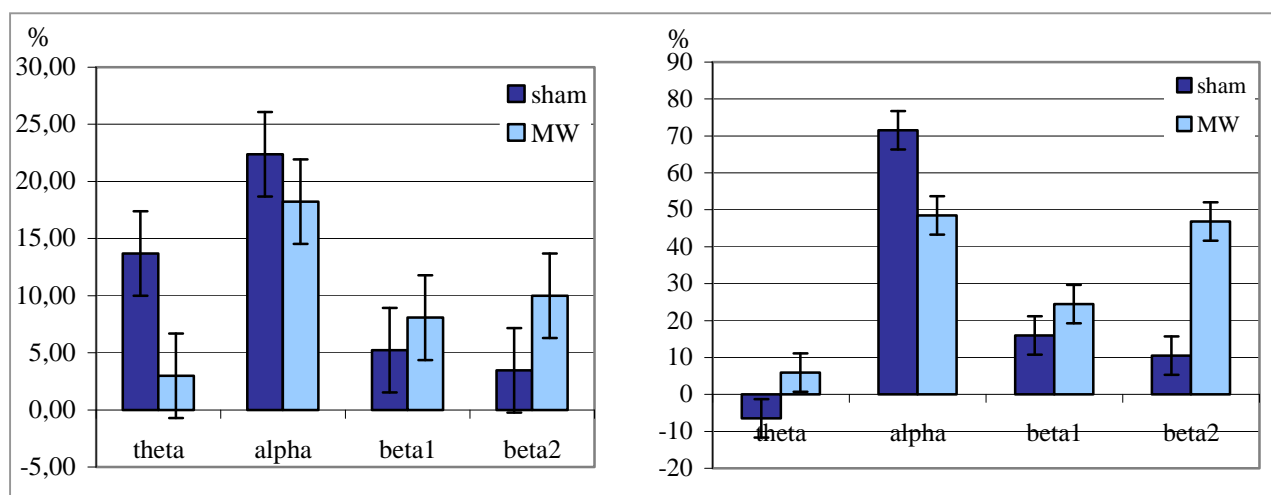
Joonis 1. EEG elektroodide paigutus peal.



Tabel 1

## Mikrolainekiirguse poolt oluliselt mõjutatud katsealuste osakaal

Modulatsiooni sagedus Hz	Katsealuste arv	Enammõjutatav EEG kanal	Enammõjutatav EEG rütm	Maks. indiv. suhteline muutus %	Mõjutatud katsealuste arv $p < 0.05$	Mõjutatud katsealuste osakaal
7	23	F			6	26%
14	13	P	Beta	150	4	30%
21	13	P	Beta	140	4	30%
40	15	T	Beta	110	3	20%
70	15	T	Beta	80	2	12,5%
217	19	T			5	26%
1000	19	T	Beta	70	4	21%



Joonis 2.

EEG signaali energia suhtelised muutused P-kanalites: helesinine kiirgusega, sinine ilma kiirgusega, vasakul kogu uurimisgrupi keskmine, paremal statistiliselt olulised muutused ühe katsealuse EEG-s.

Tulemused näitavad, et mikrolaine poolt mõjutatavate inimeste osakaal erinevates gruppides on 12–30%. See on isegi suurem kui mittespetsiifiliste keemiliste keskkonnamõjude puhul, mil vastavaks osakaaluks on hinnatud 2–10% elanikkonnast.

Beeta-aktiivsuse suurenemine on tüüpiliselt omane alkoholisõitlastele.

Uurisime ka mikrolainekiirguse võimalikku mõju inimese vaimsetele võimetele [Lass jt, 2002b; Rodina jt, 2005]. Selleks kasutasime erineva raskus-



astmega psühholoogilisi teste. Ilmnes, et raske-  
mate testide puhul väheneb kiirguse mõjul õigete  
vastuste arv umbes 5%.

Hiljuti infrastruktuuri projekti raames saadud apa-  
ratuur võimaldab peale rahuolekus oleva aju uuri-  
da ka ajus toimuvaid protsesse, näiteks nägemis-  
taju kajastumist EEG signaalis. Oleme lülitunud

## KARDIOVASKULAARNE DIAGNOSTIKA

Arteriaalne vererõhk on esmane näitaja, mis annab  
informatsiooni häiretest südame-veresoonkonna  
süsteemis. Oluline on sealjuures jälgida vererõhku  
mitte ainult aeg-ajalt, lastes seda arsti juures käes  
mõõta, vaid teada ka selle muutusi füüsilise koor-  
muse puhul, näiteks sportides. Südame-veresoon-  
konna seisund kajastub eelkõige vererõhu dünaa-  
mikas – kui kiiresti see koormuse puhul tõuseb,  
kuidas taastub jne.

Me kõik teame kui ebamugav on vererõhu mõõt-  
mine: käsi tõmmatakse mansetiga kõvasti kinni, et  
välise rõhu abil sulgeda arter. Kas lihtsamalt ei  
saaks? Pealegi, paljudel juhtudel on manseti kas-  
utamine peaaegu võimatu, näiteks vererõhu kont-  
rollimisel joostes või muus tegevuses olles.

Kindel koht vererõhu kontrollimisel on vererõhu  
ja pulsiline levi kiiruse seose kasutamisel. Pulsi-  
laine levi kiirus arteris sõltub reast parameetritest,  
mis omakorda sõltuvad vererõhust. Nii sõltub ve-  
rerõhust arterite seinte pingest, millest omakorda  
sõltub pulsiline levi kiirus. Meie poolt pakutud  
meetod kasutabki arteriaalse vererõhu ja pulsiline  
levi kiiruse vahelist seost [Hinrikus jt, 2002; Mei-  
gas jt, 2003; Lass jt, 2004c]. Registreeritakse aja-  
line intervall südame elektrilise aktiivsuse signaali  
(EKG) ja pulsiline kindlasse perifeersesse punkti  
saabumise momendi vahel. Vererõhu saab välja  
arvutada kindla algoritmi järgi iga südamelöögi  
puhul. Vaja on kaht andurit – EKG ja pulsiline  
detekteerimiseks. Meetod töötab väga hästi inten-  
siivravi palati tingimustes, mil patsient on voodis  
ja väheliikuv. Seal jääb sellise meetodi abil arvu-  
tatud vererõhu erinevus intensiivselt mõõdetud  
arteriaalsest vererõhust 10% piiridesse.

Euroopa koostööprogrammi COST B27 EEG ja  
tunnetuse vaheliste seoste uurimiseks ning COST  
281 mobiilside tervise mõjude hindamiseks. Loo-  
dame koos teiste maade uurijatega rohkem teada  
saada sellest, kuidas aju toimib ning anda oma  
panus EEG interpreteerimise ja välistegurite mõju  
hindamise osas.

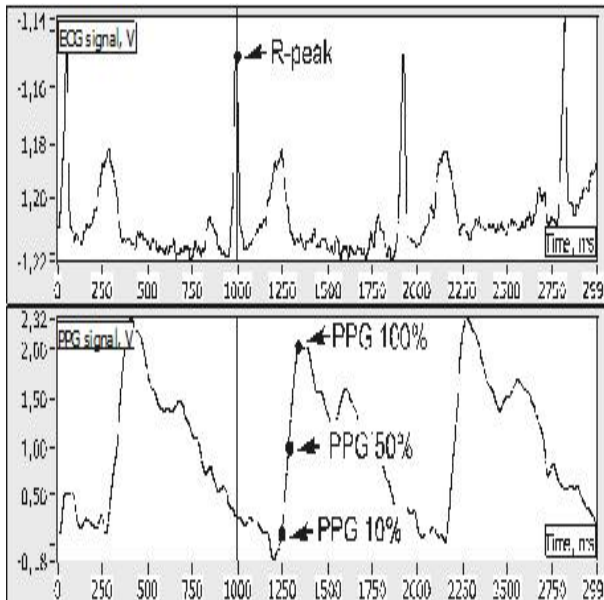
Tööstuslikult on siiani kättesaadavad monitorid  
vererõhu mitteinvasiivseks mõõtmiseks, milles on  
kasutatud auskultatoorset või ostsillomeetrilist  
meetodit. Mõõteaeg sealjuures on mõni minut,  
mõõtmiste vaheline aeg tavaliselt 15–20 minutit.  
Selliste mõõtmiste juures võib kaotsi minna olu-  
line informatsioon, mis iseloomustab just vererõhu  
dünaamikat.

Võimalus pidevalt jälgida vererõhku, kasutades  
selle seost pulsiline levi kiirusega, on paljulubav.  
Peamine probleem on realiseerida vererõhu pidev  
mitteinvasiivne jälgimine reaalses tingimustes,  
kus toimuvad liikumised, füüsilised pingutused  
jne. Meie uuringute peatähelepanu ongi pööratud  
pulsiline levi kiiruse ja vererõhu vahelise seose  
uurimisele erinevate koormuste puhul ning sead-  
me väljatöötamisele, mis võimaldab vererõhku  
pidevalt jälgida.

Biomeditsiinitehnika keskuses on välja töötatud  
originaalne seade TensioTrace arteriaalse vererõ-  
hu pidevaks mitteinvasiivseks jälgimiseks (foto 1)  
[Meigas jt, 2004ab; Lass jt, 2004b]. Uuringuid  
toetas EAS projekt. Seadmes TensioTrace kasu-  
tatakse pulsiline levija mõõtmist kui ajava-  
hemikku EKG signaali R-tipu ja pulsiline kindla  
punkti vahel perifeerses arteris (joonis 3). Kasu-  
tatakse kaht andmesisestuse moodulit: eraldi EKG  
signaalile ja fotopletüsmograafilisele (PPG) sig-  
naalile pulsiline registreerimiseks. Diskreetimis-  
sagedus on 500 Hz.

Seadme katsetused viidi läbi 61 tervel inimesel,  
kasutades koormustesti veloergomeetrit. Tulemusi  
võrreldi käsitsi õlavarremanseti abil mõõdetud  
vererõhu väärtustega. Joonisel 4 on näitena toodud

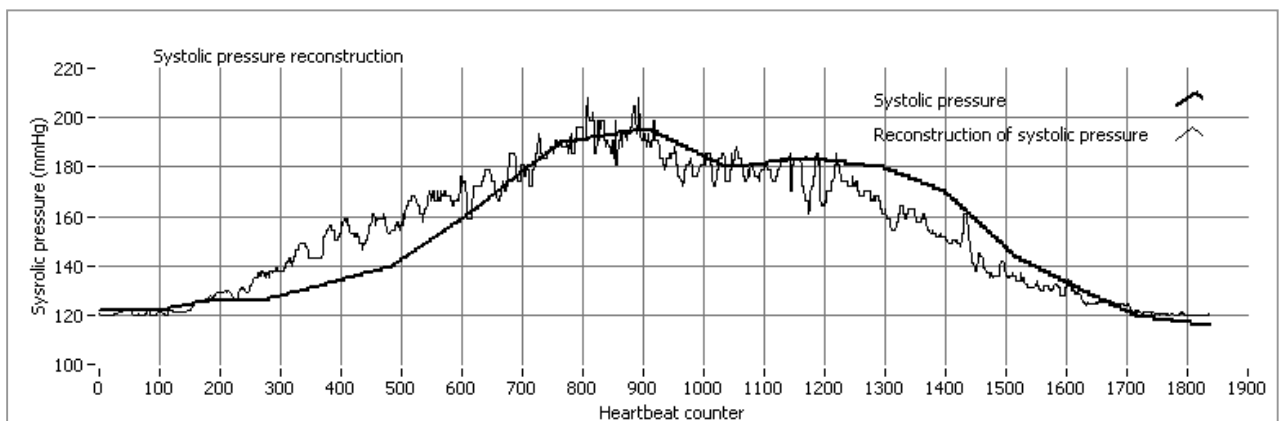
pulsilaine viiteaja järgi arvatud ja mansetiga mõõdetud vererõhu muutused koormustesti jooksul – koormuse tõustes ja taastumisel ühel katsealusel.



Joonis 3. Seadme TensioTrace abil saadud EKG ja PPG signaalid pulsilaine viiteaja arvutamiseks.



Foto 1. TensioTrace – seade vererõhu pidevaks mitte-invasiivseks jälgimiseks.



Joonis 4. Manseti abil mõõdetud vererõhu ja pulsilaine viiteaja järgi arvatud vererõhu muutus koormustesti ajal ühel katsealusel.

## OPTILINE TEHNIKA DIALÜÜSI JÄLGIMISEKS

Dialüüsi e neeruasendusravi sooritatakse patsientidele, kelle neerud on mingil põhjusel võimetud ainevahetuse jääkaineid ja üleliigset vedelikku organismist välja viima (foto). Ilma kunstneeruta sureks patsient üsna lühikese aja (mõne päeva) jooksul jääkainete ja liigse vee kuhjumisest tingitud komplikatsioonide tõttu. Hoolimata sellest, et dialüüsi on rakendatud juba rohkem kui 50 aastat, kannatavad patsiendid endiselt protseduuri ajal mittekvaliteetse või mitteoptimaalse dialüüsiga seotud faktorite tõttu: suur ajakulu, meditsiinilised kõrvalnähud, dialüüsifiltri ja fistuli ebaefektiivne või ebanormaalne funktsioneerimine jne. Seega on dialüüs patsiendile üheaegselt nii eluliselt vajalik kui ka ebamugav protseduur. Kliiniliselt on dialüüs kallis, ressursse ja aega nõudev protsess.

Dialüüsi kvaliteeti hinnatakse tänapäeval mitmete erinevate parameetrite abil. Neist kahe enamlevinu –  $Kt/V$  ja  $URR$  – väljaarvutamiseks kasutatakse üht metaboolset jääkprodukti, ureat.  $Kt/V$  ( $K$  on urea kehast väljafiltreerimise kiirus,  $t$  on dialüüsi kestus ja  $V$  vedeliku hulk kehas, kus urea esineb) ja  $URR$  (*urea reduction ratio*, st

urea vähenemise suhe) väärtused on paljude uurimuste põhjal otseselt seotud dialüüsipatsientide haigestumuse ja suremusega. Isegi kui püüda hoida dialüüsi parameetrid muutumatutena, esineb sageli üsna suur erinevus erinevate dialüüsides vahel. Erinevuste põhjusteks võivad olla verevoolu muutused ning dialüüsifiltri ja fistuli ebaefektiivne või ebanormaalne funktsioneerimine, millest võib olla tingitud patsiendi mittepiisav dialüüs. Olukorra parandamiseks oleks väga oluline vahetult dialüüsi käigus jälgida nii patsienti kui dialüüsi aparati.

Viimastel aastatel on dialüüsiprotsessi jälgimiseks välja töötatud mitmeid monitore: urea monitorid, mis põhinevad urea kontsentratsiooni mõõtmisel ensüümi ureaas abil, mõõtes kas ammoonium-ioonide juhtivust või summaarset ionidest tingitud juhtivust. Olemasolevate meetodite puuduseks on keemiliste reagentide kasutamine, keeruline mõõteteprotseduur ja saadavate tulemuste täpsuse sõltuvus mitmest dialüüsi parameetrist (vedeliku hulk patsiendi kehas, ionide membraantranspordi vastavus urea omale jne). Seejuures võimaldavad eksisteerivad meetodid registreerida ainult urea kontsentratsiooni.



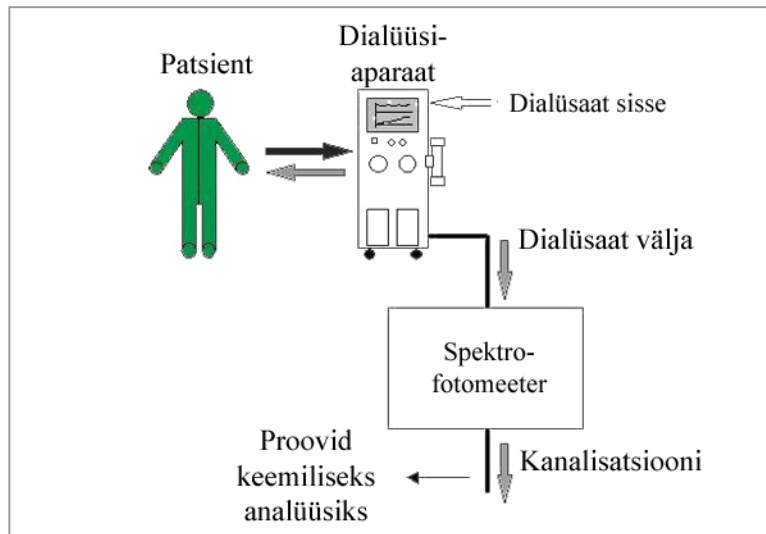
Foto 2 (K. Lauri).  
Patsient hemodialüüsil  
SA Põhja-Eesti Regio-  
naalhaigla Dialüüsi- ja  
nefroloogia osakonnas.

Hiljuti on välja töötatud uudne optiline meetod dialüüsi kvaliteedi hindamiseks [Fridolin, Lindberg, 2003; Uhlin jt, 2003, 2005, 2006]. See dialüüsi jälgimise meetod põhineb optilise signaali registreerimisel, ei kasuta keemilisi aineid, on kiire, tehniliselt lihtne ja võimaldab mõõta traditsioonilisi dialüüsi kvaliteedi parameetreid (nt Kt/V, URR). Uudne optiline meetod põhineb ultravioletse kiirguse sumbuvuse nähtusel, mida registreeritakse dialüüsimasinast väljuvas dialüsaadis. Membraantranspordi tulemusel filtreeruvad dialüüsi filtris verest dialüsaati erinevad jääkproduktid, mis transporditakse organismist välja. UV-sumbuvuse määramiseks kasutatakse dialüüsi aparaadiga ühendatud spektrofotomeetrilist süsteemi (joonis 5). Spektrofotomeetriline süsteem ühendatakse reaajas mõõtmiste ajal optilise küveti abil dialüüsi aparaadi väljundiga.

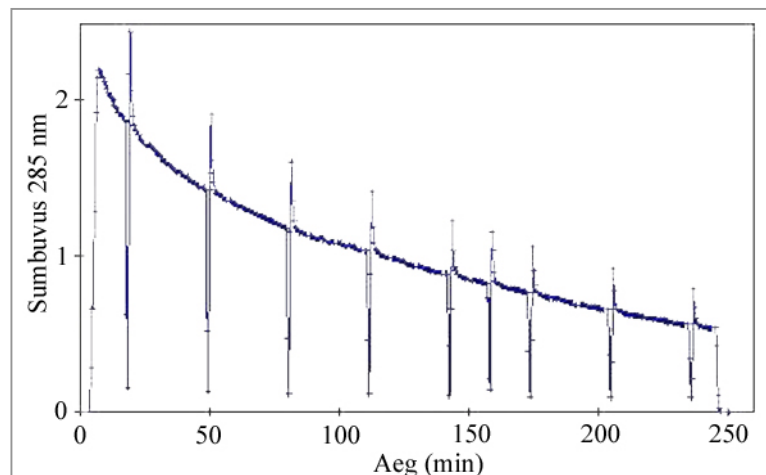
Ühe dialüüsi käigus saadud signaal on näidatud joonisel 6. Jooniselt on näha, et UV-absorptsioon on suur dialüüsi alguses, kui patsiendi kehas on jääkainete kontsentratsioon suurim, vähenedes järk-järgult proportsionaalselt jääkainete hulga vähenemisega kehas.

Samuti võime määrata dialüüsi kestuse, milleks on antud dialüüsi korral 240 min e 4 tundi. UV-absorptsiooni äkilised muutused vastavad dialüüsi aparaadi testidele, kui dialüsaat ei läbi filtrit.

Dialüüsi käigus registreeritud UV-sumbuvus on lineaarselt seotud mitmete kehas välja filtreeritud väikesemolekuliliste jääkproduktidega, nagu uurea, kreatiniin ja kusihape. See seos võimaldab hinnata dialüüsi kvaliteedi parameetreid (nt Kt/V). Samuti annab meetod võimaluse koheselt märgata ja reageerida dialüüsi protseduuri ajal toimuvatele



Joonis 5. Skemaatiline pilt kliinilisest mõõtesüsteemist.



Joonis 6. UV-sumbuvus, registreeritud reaajas ühe dialüüsi käigus lainepikkusel 285 nm.

kõrvalekalletele, mis on tingitud näiteks ebanormaalsest vere- või dialüsaadi voolu muutustest, dialüüsifiltri ja fistuli ebaefektiivsusest või ebanormaalsest funktsioneerimisest jne.

Konkreetselt pakub meetod lahenduse mitmele dialüüsi valdkonnas esinevale kitsaskohale, nagu dialüüsifiltri ja fistula ebaefektiivse või ebanor-

maalse funktsioneerimise detekteerimine, kvaliteetse ja optimaalse dialüüsi sooritamine jne. Peamised meetodi eelised:

- võimalus teostada dialüüsi protsessi pidevat e reaaliajast monitooringut;
- ei ole vajadust võtta vereproove;
- ei kasutata keemilisi aineid;
- mõõtmine toimub otse dialüsaadil, pakkudes seega lihtsaimat ühendamise võimalust, dialüüsi protsessi mingilgi moel häirimata;
- võimalus otsekohe ära tunda dialüüsi protseduuri kõrvalekaldeid ja nendest alarmeerida;
- võimalus kontrollida erinevaid parameetreid dialüüsi kvaliteedi hindamiseks – nii traditsioonilisi (Kt/V, URR) kui ka meetodi eripära tõttu mittetraditsioonilisi. Seetõttu oleks meetod suurepäraseks töövahendiks medikutele uute hüpoteeside kontrollil.

## VIITED

Bachmann, M., Kalda, J., Lass, J., Tuulik, V., Sakki, M., Hinrikus, H. 2005a. Non-linear analysis of the electroencephalogram for detecting effects of low-level electromagnetic fields. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 43, 142-149.

Bachmann, M., Säkki, M., Kalda, J., Lass, J., Tuulik, V., Hinrikus, H. 2005b. Effect of 450 MHz microwave modulated with 217 Hz on human EEG in rest. *The Environmentalist*, 25, 165-171.

Fridolin, I., Lindberg, L. G. 2003. On-line monitoring of solutes in dialysate using wavelength-dependent absorption of ultraviolet radiation. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 41, 3, 263-270.

Hinrikus, H., Bachmann, M., Tomson, R., Lass, J. 2005. Non-thermal effect of microwave radiation on human brain. *The Environmentalist*, 25, 187-194.

Hinrikus, H., Lass, J., Meigas, K., Tepner, I. 2002. Method for continuous non-invasive monitoring of arterial blood pressure. Estonian invention certificate EE00287U1, from 15.04.2002

Käesolevaks ajaks on firmas AS Ldiamon tootmiseelsesse faasi jõudnud esimene optiline dialüüsi adekvaatsuse monitooringu aparaat, DIAMON (DIAlysis Adequacy MONitor), mida võib kasutada kliinikus dialüüsi jälgimiseks.

Hetkel jätkuvad uurimistööd uudse ja täiustatud meetodi väljaarendamiseks, mis võimaldaks neerupuudulikkusega patsientide ravi kvaliteedi optilist multikomponentset monitooringut. Selline meetod võimaldaks kontrollida ja võrrelda alternatiivseid dialüüsi kvaliteedi hindamise parameetreid, mis põhineksid mittetraditsioonilistel ainetel ja oleks suurepäraseks töövahendiks medikutele uute hüpoteeside väljatöötamisel ja kontrollil kroonilise hemodialüüsi patsientidel esineva kliinilise pildi interpreteerimisel ning seejärel ravi-võimaluste modifitseerimisel.

Hinrikus, H., Lass, J., Tuulik, V. 2004a. Interaction of low-level microwave radiation with nervous system – a quasi-thermal effect? *Proc. Eston. Acad. Sci. Eng.*, 10/2, 82-94.

Hinrikus, H., Parts, M., Lass, J., Tuulik, V. 2004b. Changes in human EEG caused by low level modulated microwave stimulation. *Bioelectromagnetics*, 25, 431-440.

Lass, J., Hinrikus, H., Bachmann, M., Tuulik, V. 2004a. Microwave radiation has modulation frequency dependent stimulating effect on human EEG rhythms. *Proc. of the 26th Annual Int. Conf. of the IEEE EMBS San Francisco, USA, September 1-5, 2004*, 4225-4228.

Lass, J., Kaik, J., Karai, D., Hinrikus, H., Vainu, M. 2002a. Comparison of different ventricular repolarisation phases from ECG for identifying patents with increased risk of sudden cardiac death. *4th BSI Int. Workshop, 24<sup>th</sup>-26<sup>th</sup> June 2002, Villa Olmo, Como, Italy*, 393-396.

Lass, J., Meigas, K., Karai, D., Kattai, R., Kaik, J., Rossmann, M. 2004b. Continuous blood pressure

monitoring during exercise using pulse wave transit time measurement. Proc. of the 26th Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, San Francisco, USA, September 1-5, 2004, 2239-2242.

Lass, J., Meigas, K., Kattai, R., Karai, D., Kaik, J., Rossmann, M. 2004c. Optical and electrical methods for pulse wave transit time measurement and its correlation with arterial blood pressure. Proc. Eston. Acad. Sci. Eng., 10/2, 123-136.

Lass, J., Tuulik, V., Ferenets, R., Riisalo, R., Hinrikus, H. 2002b. Effects of 7Hz-modulated 450 MHz electromagnetic radiation on human performance in visual memory tasks. Int. J. Rad. Biol., 78, 10, 937-944.

Rodina, A., Lass, J., Riipulk, J., Bachmann, T., Hinrikus, H. 2005. Study of effects of low level microwave field by method of face masking. Bioelectromagnetics, 26, 571-577.

Meigas, K., Hinrikus, H., Kattai, R., Lass, J. 2003. Self-mixing in a diode laser as a method for cardiovascular diagnostics. J. Biomed. Opt., 8, 1, 152-160.

Meigas, K., Lass, J., Kattai, R., Karai, D., Kaik, J. 2004a. Method of optical self-mixing for pulse

wave transit time measurement in comparison with other methods and correlation with blood pressure. Coherence Domain Optical Methods and Optical Coherence Tomography in Biomedicine VIII, Proc. of SPIE, 5316, 5, 444-453.

Meigas, K., Rosmann, M., Kaik, J., Lass, J. 2004b. Apparatus for Blood Pressure Measurement. Estonian invention certificate EE00409U1, from 15.01.2004.

Uhlin, F., Fridolin, I., Lindberg, L. G., Magnusson, M. 2003. Estimation of delivered dialysis dose by on-line monitoring of the ultraviolet absorbance in the spent dialysate. Am. J. Kidney Dis., 41, 5, 1026-1036.

Uhlin, F., Fridolin, I., Lindberg, L. G., Magnusson, M. 2005. Estimating total urea removal and protein catabolic rate by monitoring UV absorbance in spent dialysate. Nephrol. Dial. Transplant., 20, 11, 2458-2464.

Uhlin, F., Fridolin, I., Magnusson, M., Lindberg, L. G. 2006. Dialysis dose (Kt/V) and clearance variation sensitivity using measurement of ultraviolet-absorbance (on-line), blood urea, dialysate urea and ionic dialysance. Nephrol. Dial. Transplant., 21, 8, 2225-2231.

# TEEL NANOTEHNOLOOGIA RAKENDAMISE SUUNAS

*Ilmar Kink, Kristjan Saal, Tanel Tätte, Valter Reedo, Ants Lõhmus*

Tartu Ülikooli füüsika instituut

Käesoleva kirjutise eesmärgiks on anda ülevaade arengutest Eesti nanotehnoloogias alates meie eelmisest kirjatükist Teadusmõtte sarjas ning pakkuda välja mõned tulevikuvisionid.

Viimastel aastatel on palju räägitud nanotehnoloogiast ja selle suurtest lubadustest. Kuigi revolutsioonilisi läbimurdeid igapäevaelu pole veel tõeks saanud, on järkjärguline ja üha kiirenev areng olnud üsna muljetavaldav. Teadaolevalt pole küll

ükski Eestis tehtud nanotehnoloogiline avastus või leiutus veel leidnud rakendamist igapäevaelus, aga teel selleni on viimasel paaril aastal tehtud märkimisväärseid edusamme.

Siinkohal peatume mõnel Tartu Ülikooli füüsika instituudi (TÜ FI) ja Eesti Nanotehnoloogia Arenduskeskuse (NanoTAK) koostöös väljatöötatud lahendusel nanotehnoloogia rakenduste valdkonnas.

## KEEMILISELT FUNKTSIONALISEERITUD PINNAD KÕRGTEHNOLOOGILISTEKS RAKENDUSTEKS

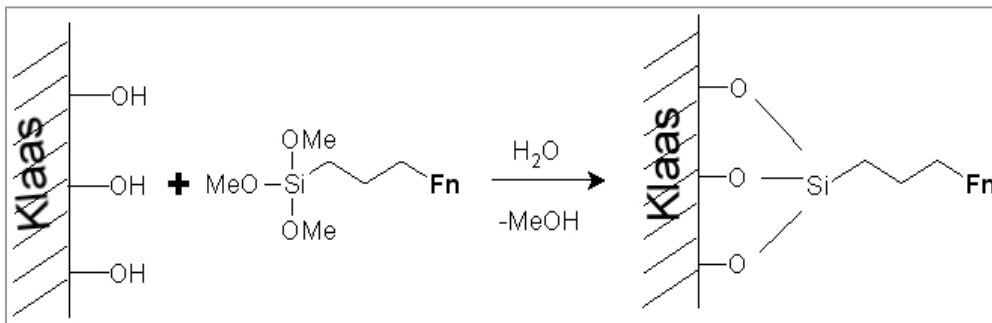
Pindade keemiline töötlemine eesmärgiga anda neile konkreetseid omadusi on tuntud aastatuhandeid. Materjalide keemilise töötamise vajaduse tingivad väga erinevad eesmärgid, nagu korrosiooni tõkestamine, nakkuvuse suurendamine, peegelduse vähendamine, staatilise elektri kõrvaldamine jpm. Nende n-ö madaltehnoloogiliste töötluste kõrval on tänapäeval jõudsalt arenemas pindade töötlemine kõrgtehnoloogilistel eesmärkidel, kus pinnakatte omaduste tundmine submikroonsel tasemel on kriitilise tähtsusega. Niisugustel juhtudel on olulisteks parameetriteks pinnale kantavate funktsionaalsete molekulide asend pinna suhtes, kontsentratsioon ja tekkiva ainekihi struktuur. Täpne kontroll kõigi nende parameetrite üle määrab ära valmistatava kõrgtehnoloogilise seadme efektiivsuse.

Tartu Ülikooli füüsika instituudi ja keemiaosakonna koostöös on aastast 2000 tegeldud klaasjate pindade keemilise funktsionaliseerimisega. Odava hinna tõttu on klaas igapäevaelus väga levinud materjal ning samal põhjusel rakendatakse seda ka kõrgtehnoloogias. Niisugustes rakendustes kasutatakse klaasi peamiselt alusena, millele "liimitakse" konkreetset ülesannet täitev ehk funktsionaalne

molekul. Näitena võib tuua DNA mikrojada-analüüsi, kus klaaspinnale kinnitatud DNA molekulide kohta saadakse informatsiooni spetsiaalsete fluorestseeruvate markerite kaudu, mis liidetakse DNA külge vastavate biokeemiliste reaktsioonide tulemusel. Väga oluliselt parandab nimetatud analüüsi tulemust klaasi pinna keemiline töötlemine, mis on vajalik selleks, et DNA molekul tugevasti ja sobiva orientatsiooniga pinnale fikseerida. Klaasi kovalentseks keemiliseks töötamiseks kasutatakse peaaegu eranditult alkoksü- või klorosilaane, mis reageerivad klaasi pinnal leiduvate hüdroksüülrühmadega (-OH). Kui kasutatav silaanimolekul sisaldab soovitud keemilist funktsionaalsust, saab selle hõlpsasti klaasile üle kanda (joonis 1).

Kirjeldataud viisil, s.o silaanide kaudu on võimalik klaasile väga tugevasti fikseerida praktiliselt kõiki keemilisi ühendeid ning anda sellele edasi nende omadusi. TÜ FIs on põhjalikult uuritud klaaside töötlemist aminofunktsionaalse silaaniga ( $F_n=NH_2$ ), mida kasutatakse biomolekulide (nt DNA) sidumiseks klaasi pinnale. Käsitletud on substraadi töötlemist lahjades silaanilahustes ja sool-geel meetodil [Saal, 2006]. Välja on töötatud paindlik ja lihtsasti optimeeritav meetodika aminofunktsionaal-





Joonis 1. Klaasi pinna funktsionaliseerimine alkoksüsilääniga. Fn – vastav funktsionaalne rühm, mille omadusi soovitakse klaasile edasi anda.

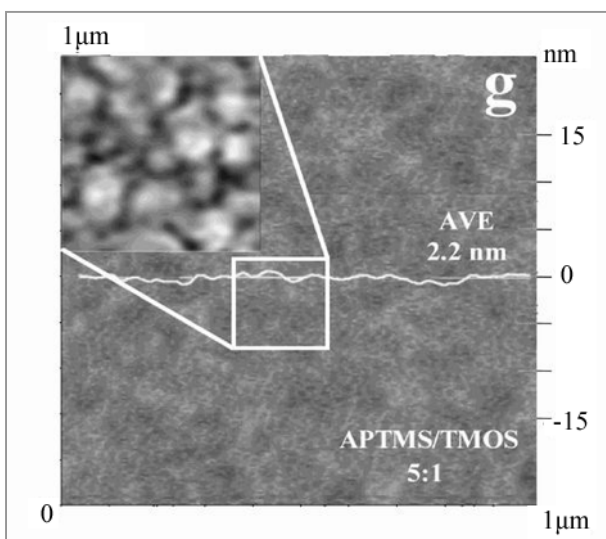
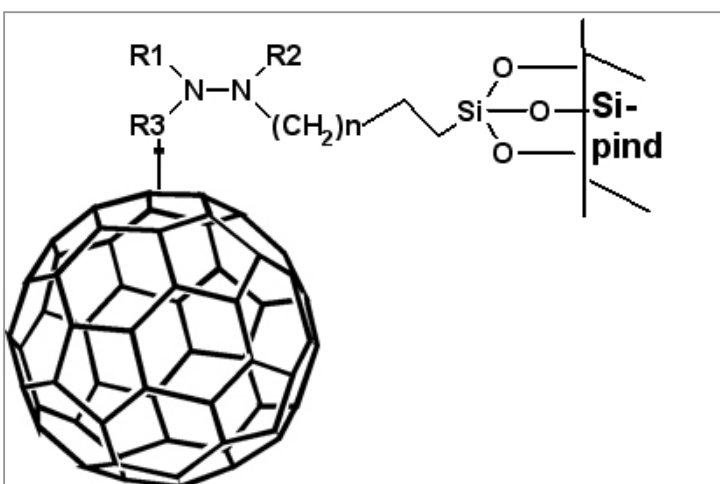


Foto 1. Aatomjõumikroskoobi pilt sool-geel meetodil valmistatud aminofunktsionaalsest silaanikilest klaasi pinnal. Suurendus pildi vasakus nurgas (200 x 200 nm<sup>2</sup>) näitab kile nanomeetrilist struktuuri, mis on tihede pakend üksteisega kovalentselt seotud siloksaani-osakekestest.



Joonis 2. Hüdrasiinosilaani abil kovalentselt räni pinnale seotud fullereeni molekul. R1, R2, R3 on hüdrasiinosilaani asendusrühmad, mille kaudu mõjutatakse süsteemi elektrilisi omadusi.

suse kandmiseks klaasile soovitud tiheduse ja struktuursusega. On tähelepanuväärne, et sool-geel meetodika võimaldab valmistada nanomeetriliselt homogeenseid ja siledaid silaanikilesid, mis siluvad klaasi pinna ebatahasusi ja tõstavad seeläbi rakenduse reprodutseeritavust (foto 1). Valmistatud kileid on edukalt rakendatud substraatidena DNA analüüsid [Saal, 2006].

Kirjeldatud tööst on tänaseks päevaks välja kujunenud uus ambitsioonikas projekt, mille käigus luuakse vastav keemiliste reaktsioonide komplekt nanostruktuurse süsiniku (fullereenid) kinnitamiseks räni pinnale. Teadaolevalt on fullereen-räni süsteemidel unikaalsed elektrilised omadused, mida üritatakse ära kasutada transistoride efektiivsuse tõstmisel [Chikamatsu jt, 2006]. TÜ FIs välja töötatava meetodika eripäraks on esmakordselt sünteesitud ühendite – hüdrasiinosilaanide – kasutamine fullereenide sidumiseks ränil. Nimetatud ühendid võimaldavad süsteemi lisada hulgaliselt erinevaid keemilisi rühmi, millega mõjuta-



takse selle elektrilisi omadusi ja kallutatakse neid rakenduse seisukohalt olulisse suunda (joonis 2). Toodud DNA ja fullereenide immobiliseerimine ei ammenda kaugeltki võimalike rakenduste loetelu. Mittemärguvad ja isepuhastuvad pinnad, värvi ja

läbipaistvust soovitult varieerivad pinnad, lainepikkuse-spetsiifiliselt läbipaistvad/peegeldavad pinnad, elektrit ja soojust juhtivad pinnad jne on kõik teoreetiliselt võimalikud sarnast tehnoloogiat rakendades.

## NANOMEETRILISED OPTILISED SENSORELEMENDID

Veel üsna hiljuti oli valdav seisukoht, et optiliste seadmete lahutusvõime ja väikseimad mõõtmed on määratud valguse lainepikkusega. Üldise tehnoloogiate miniaturiseerimise käigus on aga mitmele optika valdkonna probleemile leitud lahendid, mis kasutavad valguslainete selliseid omadusi, mis ei ole difraktsioonilimiidiga piiratud. Nii näiteks on mõnekümne nanomeetrise läbimõõduni teritatud klaasfiibri abil võimalik koondada valgust punkti, mille mõõtmed on vaid 1/10 valguse lainepikkusest. Kasutades sellist teravikku sensorina, võimaldab lähivälja optilise mikroskoobina tuntud seade klassikalise optilise mikroskoobiga võrreldes kuni 10 korda suuremat ruumilist lahutust.

Nanooptika on kindlasti üheks valdkonnaks, mida tasub silmas pidada potentsiaalsete rakenduste seisukohast. Kui nanotehnoloogiline optiline arvuti kuulub esialgu fantaasiamaailma, siis nanotehnoloogilised valgustusega seotud lahendused suruvad end üha jõudsamalt igapäevaellu. Aktiivelementidest nimetatakse siinkohal tavaliselt LED ja OLED (orgaanilistel molekulidel põhinev valgusdiod), laboratooriumi tasemel on aga ka mitmesuguseid teisi väljatöötusi.

Antud valdkonnas proovime ära kasutada oma üsna laiaulatuslikke teadmisi ja kogemusi soolgeel meetodi rakendamisel. Hiljuti läbiviidud uuringud on näidanud, et lähtudes alkoksiidsetest kontsentratsioonidest on sobiva sooli joa tõmbamisel võimalik valmistada nanomeetriliselt teravaid teravikke (teravusraadius 15–25 nm) nii tina kui ka titaani oksiididest. Selliseid fiibreid ja teravikke [Jacobsen jt, 2005] saab edukalt rakendada teadustöös optilise lähivälja sensoritena (foto 2, joonis 3), nende võimalikud igapäevaellu rakendused seisnevad aga kindlasti muudes valdkondades.

Sool-geel meetodi üheks trumbiks on struktuuridesse väga lihtne ja paindlik lisandite lisamise võimalus, mis avab täiesti uute võimalike rakenduste valdkonnad. Viimasel ajal on meie töögrupp põhilise tähelepanu suunanud optilistele materjalidele elektrijuhtivuse lisamisele. Võimalus varieerida struktuuride kuju, optilisi ja elektrilisi omadusi loobki eelduse ülaltoodud funktsionaalsete pindade ja muude struktuuride väljatöötamiseks.

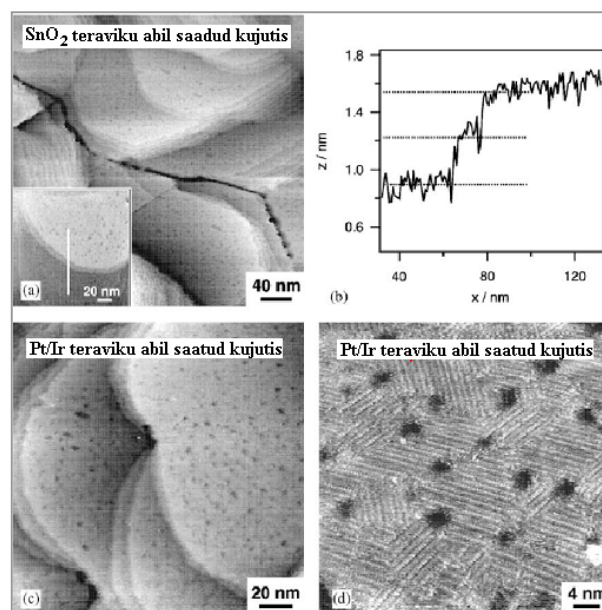
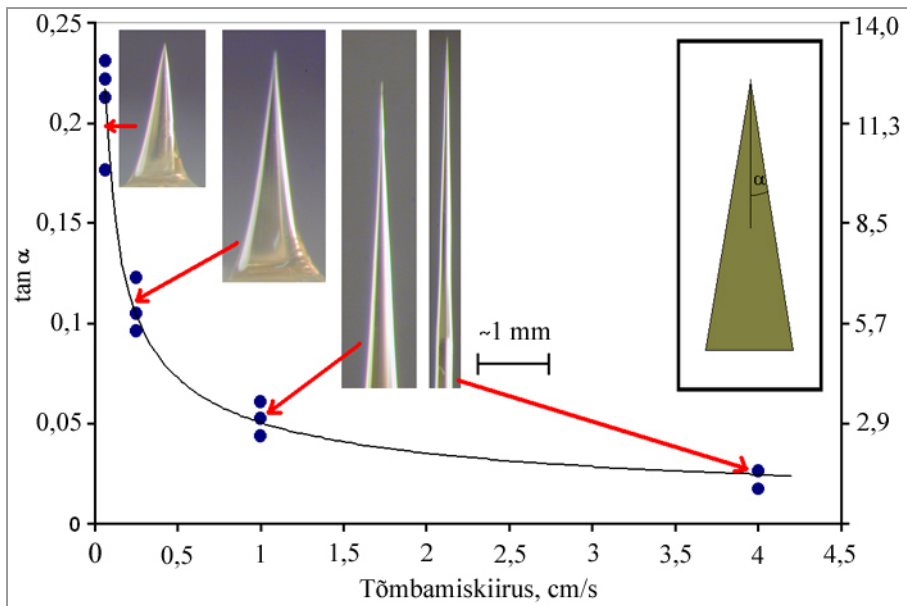
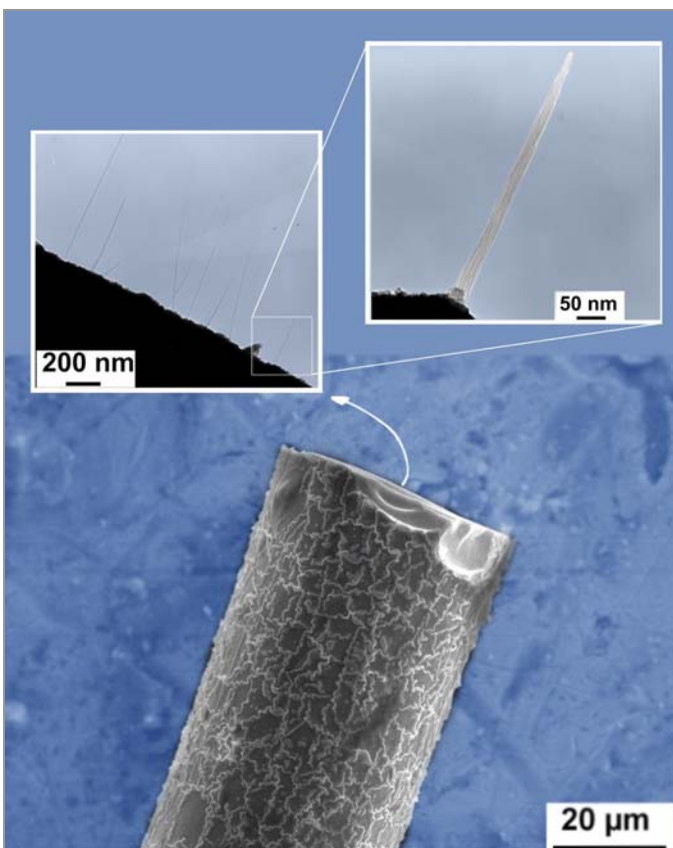


Foto 2.

Antimoni lisandiga tinaoksiidteraviku abil mõõdetud skaneeriva tunnelmikroskoobi kujutis võrrelduna vastava plaatina/iriidium-teraviku abil saadud kujutisega.



Joonis 3. Teraviku tipunurga sõltuvus tõmbamiskiirusest lähtematerjali viskoossuse 550 P ja õhuniiskuse 2–4% korral.



Näiteks fotol 3 on toodud süsinik-nanotorudega dopeeritud läbipaistev tinaoksiid-mikrofiiber. Esmapilgul tundub üsna “akadeemilise” ja rakenduslikkuse seisukohalt ebahuvitava objektina. Aga kui lisada fiibrile piisav elektrijuhtivus, mis on optiliselt varieeritav (ja me teame, kuidas seda teha), saame vägagi huvitava opto-elektronika elemendi, mille rakendused ei ole ilmselt kuvaritega limiteeritud. Analoogilisi näiteid võib tuua lõputult, aga kõikide nende rakenduste aluseks on piisav kontroll sool-geel protsessi lähtematerjalide omaduste, protsessi parameetrite ja lõppstruktuuride geometria üle. Selle saavutamisele ongi meie uurimisgrupi jõupingutused käesoleval ajal suunatud.

Foto 3. Süsinik-nanotorudega dopeeritud tinaoksiid-fiber (Elektronmikroskoopia kujutis, V. Mikli, TTÜ; J. Šulga, TÜ).

## MIDAGI "EKSOOTILIST"

Meie oskused luua kunstlikke mikro- ja nanostruktuure kahvatuvad looduse mitmekesisuse ja keerukuse kõrval. Evolutsiooni tulemusena on elusorganismid välja töötanud lugematul hulgal väga praktilisi, optimaalseid ja multifunktsionaalseid struktuure (foto 4). Kuigi iseorganiseerumisprotsesse on püütud rakendada juba pikemat aega, piirduvad inimkonna saavutused selles valdkonnas üsna lihtsate struktuuridega. Et aga funktsionaalsus on tihtipeale seotud struktuuri keerukusega, tundub looduslike struktuuride jäljendamise idee üsnagi mõistlik ja asjakohane.

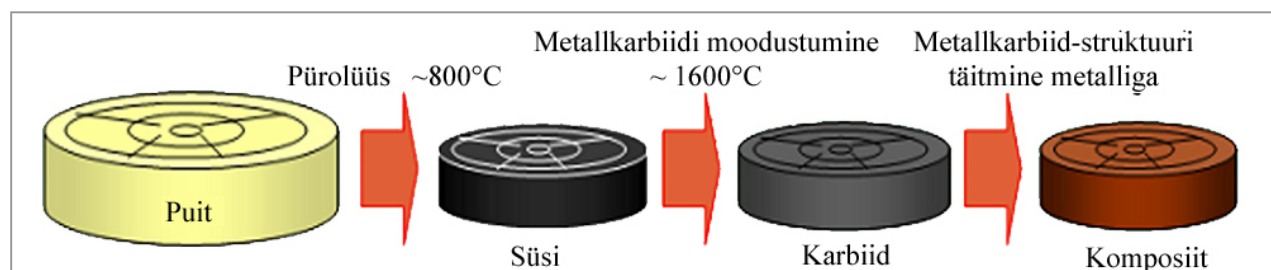
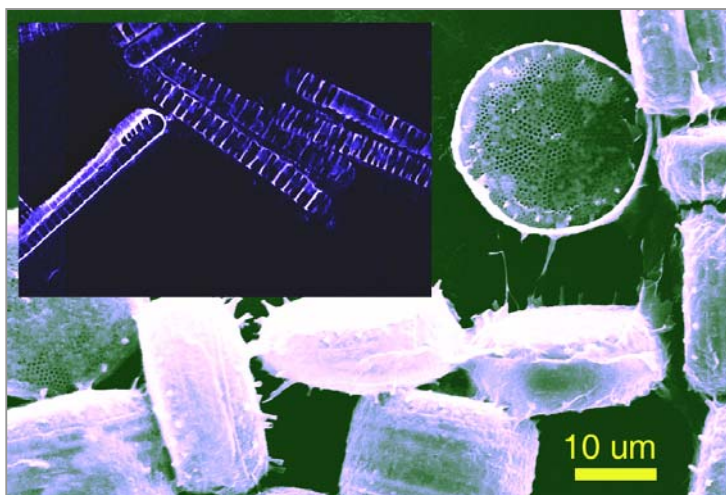
Meie uurimisgrupp pole valdkonnaga just eriti kaua kokku puutunud, aga üht-teist on juba saavutatud. Hetkel on käsil puidu rakustruktuuri muundamine metallkarbiidseks. Selline kõvast keraamikast struktuur oleks suurepärase armatuur anisotroopsete omadustega metall/metallkarbiid kõva-

sulami loomisel. Idee tuum seisneb just anisotroopsuses, mida kunstlikult on keeruline, kui mitte võimatu saavutada. Sellise kõvasulami omaduseks on olla ühest suunast hea teritatavusega ja teisest suunast vastupidav ja kulumiskindel ehk ideaalne lõiketera.

Sellise biomorfse kõvasulamkomposiidi valmistamise idee on suhteliselt lihtne. Esmalt valitakse välja sobiv tselluloosist rakustruktuur, pürolüüsitakse see süsinikuks ja kaetakse oksiidi moodustava kihiga, kasutades näiteks sool-geel meetodikat. Seejärel kuumutatakse materjal kõrge temperatuurini (umbes 1600 °C), mille tulemusena moodustub metalloksiidist ja süsinikust karbiidstruktuur, mida on sitkuse lisamiseks võimalik täita metalliga (joonis 4). Ilmselt on valdkonna uurimisobjektide ja potentsiaalsete rakenduste valik lõputu.

Foto 4.

Ränivetikad *Diatoma* üleval vasakul ja *Thalassiosira Baltica* all paremal (K. Olli, TÜ. Elektronmikroskoopia kujutis, T. Järveots, EMÜ; J. Šulga, TÜ).



Joonis 4.

Puidu struktuuri kopeerimine karbiid-metall komposiitse materjaliga.

## KOKKUVÖTE

Nanotehnoloogia on atraktiivne just eeskätt oma potentsiaalsete rakenduste tõttu, kuid seal leidub küllaldaselt ka fundamentaalteaduslikke aspekte. Olles aga kiiresti arenev, multidistsiplinaarne ja ilma selgete ning väljakujunenud tavade ja traditsioonideta, pakub nanotehnoloogia võimalusi ka väikeriikidele tehnoloogilises arengus kaasa rääkida. Erinevalt mõnest teisest valdkonnast, mille lõppturg on rangelt reglementeeritud ja seetõttu valdavalt suurte ettevõtete/riikide kontrolli all, leidub nanotehnoloogia rakenduste hulgas loendamatu väikseid nišše, mida arendades võib ühiskonnas terviklikult piisavalt kasu tekitada. Valdonna multidistsiplinaarsus seab aga sujuva koostöö erinevate osapoolte vahel üheks edu saavutamise võtmeteguriks. Eesti nanotehnoloogia arengu algusaastatel kujunes välja väga hea ja tõhus koos-

töö vastavate akadeemiliste institutsioonide vahel, kellest peamised olid ja on siiani TÜ füüsika instituut, TTÜ materjaliteaduse instituut ja materjaluuringu keskus ning TÜ keemiaosakond. Küll aga jäi nõrgemaks koostöö tööstussektoriga.

Olukord on märgatavalt paranenud seoses NanoTAKi loomisega, mis on väga palju kaasa aidanud tervikliku ja ühtse eesmärgi nimel töötava süsteemi loomisele. Ühest küljest saab akadeemiline pool nüüd oluliselt rohkem informatsiooni tööstust huvitavate probleemide kohta. Veelgi olulisem on aga tööstusele edastatav teave nende valdkonna võimalustest ja võimalikest arengutest. Lisaks muidugi ka otsesed tehnoloogia väljatöötused, mis on aga ressursside suhtelise piiratuse tõttu märgatavalt lokaalsema mõjuga.

## VIITED

Chikamatsu, M., Itakura, A., Yoshida, Y., Azumi, R., Kikuchi, K., Yase, K. 2006. Correlation of molecular structure, packing motif and thin-film transistor characteristics of solution-processed n-type organic semiconductors based on dodecyl-substituted C60 derivatives. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 182, 245-249.

Jacobsen, V., Tätte, T., Branscheid, R., Mäeorg, U., Saal, K., Kink, I., Lõhmus, A., Kreiter, M. 2005. Electrically conductive and optically transparent Sb-doped SnO<sub>2</sub> STM-probe for local excitation of electroluminescence. *Ultramicroscopy*, 104, 39-45.

Saal, K. 2006. Surface Silanization anti ts Application in Biomolecule Coupling. Tartu Ülikool, doktoritöö.

# SURVETORUDE HÜDRODÜNAAMIKA PROBLEEME

*Tiit Koppel, Leo Ainola, Anatoli Vassiljev*

Tallinna Tehnikaülikooli mehaanikainstituut

## SISSEJUHATUS

Artiklis antakse lühiülevaade Tallinna Tehnikaülikooli mehaanikainstituudis uurimist leidnud torude sisevoolamise probleemidest. Vaadeldakse mittestatsionaarse voolamisega seotud voolurežiimi

muutumise ja takistustegurite määramise küsimusi, soojusülekanne ajas muutuva vooluga torudes ja veevõrkude modelleerimise ning optimeerimisega seotud ülesandeid.

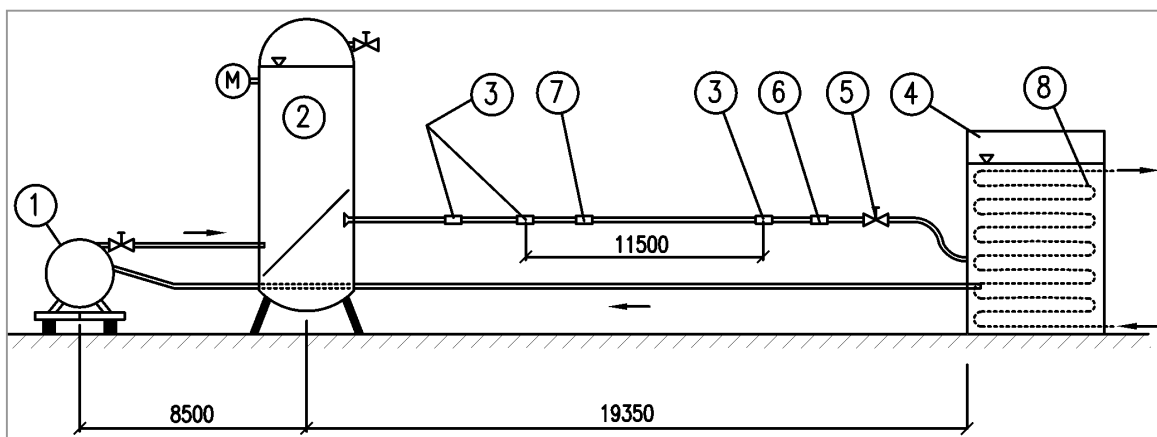
## MITTESTATSIONAARNE VOOLAMINE SURVETORUDES

Pärast ehitusteaduskonna kolimist Mustamäele 1965. aastal jätkus hüdromehaanika alane teadustöö Uno Liivi juhtimisel uues hüdraulika laboratooriumis peamiselt mittestatsionaarse voolamise kahes valdkonnas:

- mittestatsionaarse voolamise teoreetilised ja eksperimentaalsed uuringud [Liiv, 1991; Koppel, Liiv, 1977; Ainola jt, 1979, 1983];
- uute mõõteseadmete ja aparatuuri loomine mittestatsionaarse voolamise eksperimentaalsete uuringute läbiviimiseks – andmesalvestuseks, katsete kontrolliks, reaalses andmete töötluks, vooluhulga mõõtmiseks.

Eksperimentaalsete uuringute läbiviimiseks loodi mitmeid katsestende, mis võimaldasid voolamise kiirusi kuni 15 m/s ja kiirendusi kuni 500 m/s<sup>2</sup>. Tasandkiirusvälja mõõtmiseks kasutati laser-doppler-anemomeetrit ning hõõrdepingete mõõtmiseks toru seinal termoanemomeeter-tehnikat. Joonisel 1 esitatud katsestendil teostatud uuringute tulemusel leiti seosed voolamise kiirenduse ja hõõrdepingete ning hüdromehaaniliste takistuste vahel, mis võimaldasid parandada inseneripraktikas kasutatavaid arvutusalluseid.

Mittestatsionaarse voolamise probleemid on jätkuvalt aktuaalsed hüdraulilise löögiga seotud riskide



Joonis 1.

Katsestendi skeem: 1 – pump, 2 – survepaak (0,85 m<sup>3</sup>), 3 – rõhuandurid, 4 – vabapinnaga reservuaar (0,70 m<sup>3</sup>), 5 – kiiretoimeline klapp, 6 – elektromagnetiline vooluhulgamõõtur, 7 – hõõrdepinge andur, 8 – jahutussüsteem.

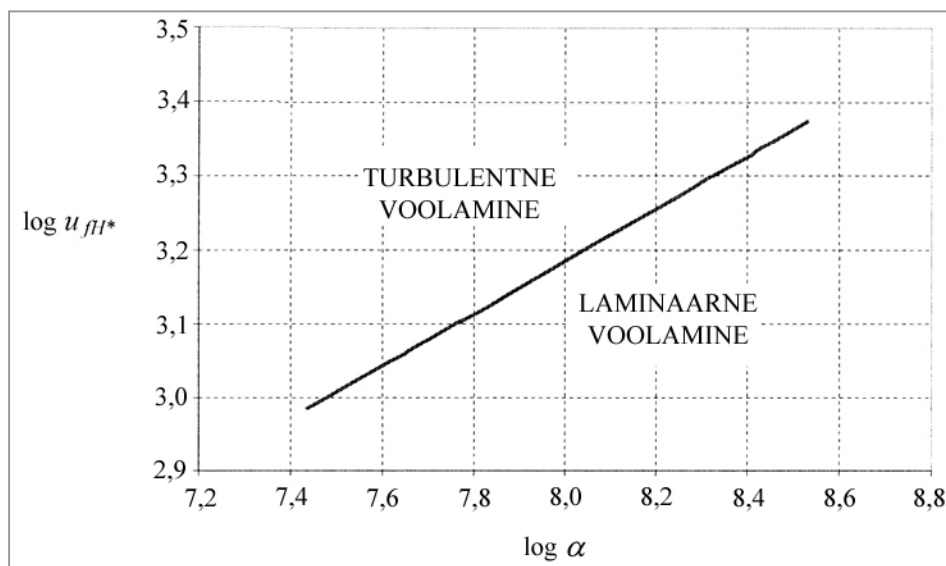
hindamisel nafta, vee ja teiste vedelike pumpamiseks kasutatavates survetorudes, veevõrkude leketekohtade määramisel ning hüdrauliliste võrkude arvutusmodelite dünaamilisel kalibreerimisel.

Mehaanikainstituudi töögrupis on viimastel aastatel arendatud teooriat kiirenevas voolus laminaarselt voolurežiimilt turbulentssele voolurežiimile ülemineku selgitamiseks. Suure kiirenduse korral tekib turbulents üle kogu toru pikkuse üheaegselt toru pinna lähedal. Nähtuse kirjeldamiseks on analüüsitud dünaamilise ääreaksi arenemist matemaatilise modelleerimise abil. See on aluseks nähtuse füüsikalisele põhjendamisele, mille kohaselt turbulents haarab kogu toru põiklõike ajal, mil pinnal tekkinud turbulents on hõõrdekiirusega läbinud

dünaamilise piirikihi. Teooria on heas kooskõlas eksperimentaalselt saadud tulemustega. Eksisteerib lineaarne seos turbulentsi tekkimise aja ja rõhugradiendi logaritmidest vahel [Koppel, Ainola, 2006] (joonis 2).

Tulemused on kasutatavad mitmesuguste üleminekuprotsesside kirjeldamiseks, näiteks lööklainete uurimisel torudes.

Mehaanikainstituut osaleb partnerina EL 6. Raamprogrammi integreeritud infrastruktuuri HYDRA-LAB III projekti "Mittestatsionaarne hõõre torudes ja kanalites" taotluses, mille raames on kavandatud eksperimentaalsete uuringute teostamine Hollandis Delft Hydraulics laboratooriumi katsestendidel.



Joonis 2. Voolurežiimi piirkonnad kiirenevas voolus ( $u_{H*}$  ja  $\alpha$  – dimensioonitud hõõrdekiirus ja rõhugradient).

## SOOJUSÜLEKANNE

Konvektiivse soojusvahetusega mittestatsionaarne voolamine on olulise tähtsusega kaasaja energiaaparatuurides, soojusvahetuse seadmetes, tehnoloogilises aparatuuris, autotööstuses, biomehaanilistes protsessides, ning nende uurimisega tegeletakse intensiivselt.

Uuringud on vajalikud arvutusmodelite loomiseks, termiliste pingete arvutamiseks, torustike jahutus-

efekti määramiseks, seadmete optimaalsete töörežiimide leidmiseks ning hõõrdetakistuse täpsemaks hindamiseks.

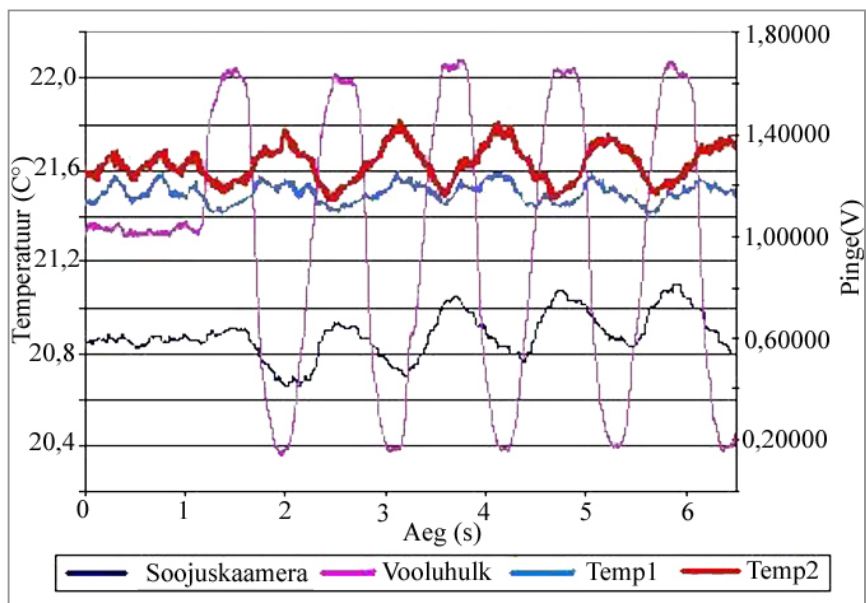
Koostöös Pori Tehnoloogiainstituudi ja TTÜ soojustehnika instituudiga on teostatud soojuskoormusega pulseeruva voolamise uuringuid ümar- ja sirgetorudes. Eksperimentaalsed uuringud teostati nii Soomes kui TTÜ hüdromehaanika laboratooriumis.



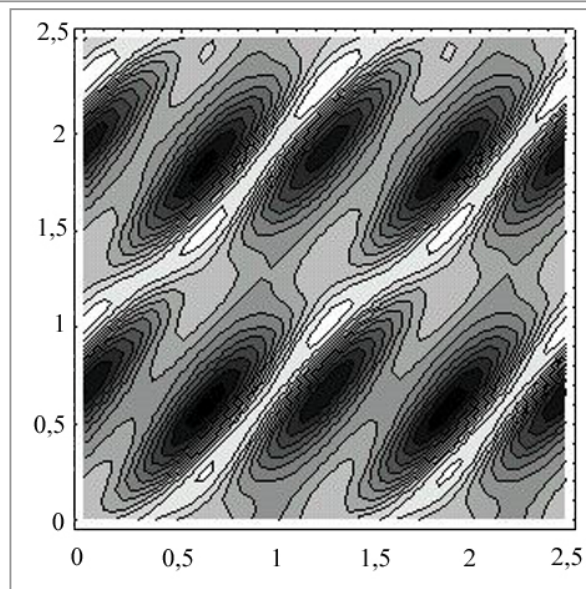
mis koostöös valminud katsestendil. Toru välisseina temperatuuri mõõtmiseks kasutati edukalt soojuskaamerat. Joonisel 3 on toodud pulseerival voolamisel salvestatud mõõtmistulemused: välisseina temperatuur soojuskaameraga, vooluhulk elektromagnetilise mõõturiga ja temperatuurid termopaaridega. Soojuskaamera võimaldas edukalt mõõta toru välisseina temperatuuri, mis tõi esile sissevoolu mõju soojusvahetusele ning tema arengule.

Loodud on energia võrrandi alusel muutuva soojuskoormusega pulseeruva voolamise matemaatiline mudel silindrilise toru jaoks [Koppel jt, 1998, 2000; Ainola jt, 1999]. Arvutustulemused langevad hästi kokku eksperimentaalsete tulemustega ning selgitavad ka sissevoolust tingitud temperatuuri amplituudi deformeerumist. Arvutuslik toru välisseina temperatuuri areng sõltuvalt dimensioonitust ajast ja teljesuunalisest koordinaadist on toodud joonisel 4.

Joonis 3.  
Pulseerival voolamisel salvestatud mõõtetulemused.



Joonis 4.  
Toru välisseina temperatuuri areng sõltuvalt dimensioonitust ajast (püstsuunas) ja teljesuunalisest koordinaadist (rõhtsuunas).



## VEEVÖRKUDE MODELLEERIMINE

Joogivee kvantiteedi ja kvaliteedi tagamise ja kaitse probleemid on viimasel ajal muutunud väga aktuaalseks. Seda ühelt poolt keskkonnale mitmesuguse reostuse ohtude kasvu ja teiselt poolt vee-süsteemide terroriohtudele avatuse tõttu. Alates 1997. aastast on hüdro- ja aeromehaanika õppetoolis tegeletud veevõrkude simulatsioonimudelite loomisega, mis võimaldavad analüüsida veevõrkude hüdraulilist olukorda, teostada veevõrkude rekonstrueerimise variantide võrdlust ning hinnata vee kvaliteedi muutumist veevõrgus. Modelleerimisel on olnud alustarkvaraks EPANET 2.0, millel on avatud kood ja võimalus lisada väljatöötusi. Õppetoolis loodud veevõrkude arvutusmodelite kalibreerimise algoritmid on koondatud ühtesse süsteemi, mis arvestab lekete jaotust veevõrgu geomeetria ulatuses ning lekete sõltuvust tarbimise muutusest ööpäeva kestel. Tavaliselt sisaldab modelleeritav veevõrk suurt hulka erineva vanusega torusid ning mudeli kalibreerimiseks on võimalik kasutada vaid piiratud arvu mõõteandmeid. Torude karedus sõltub peamiselt toru vanusest ja materjalist ning vee kvaliteedist. Samas puudub üldine seos toru vanuse ja kareduse vahel. Kasutatud on kalibreerimisel mitmeid optimeerimise algoritme, sealhulgas Levenberg-Marquardt'i algoritmi. Arvutuste alamprogrammid on ühendatud EPANET 2.0 tarkvaraga. Näiteks üle 2000 toru sisaldava mudeli torude karedused määrab arvutus-

programm 40–60 sekundiga. Joonisel 5 on Excel'i liides kalibreerimise parameetrite määramiseks.

Uuritud on veetarbimiste ja lekete dünaamikat veevõrkudes, mis võimaldab eraldada veekadudest lekked ja mitteregistreeritud tarbimised. Tarbimiste ja lekete ööpäevast dünaamikat kirjeldab joonisel 6 toodud analüütiline lahend, mis näitab lekete vähenemist ööpäevas tarbimise suurenemisel ja vastupidi.

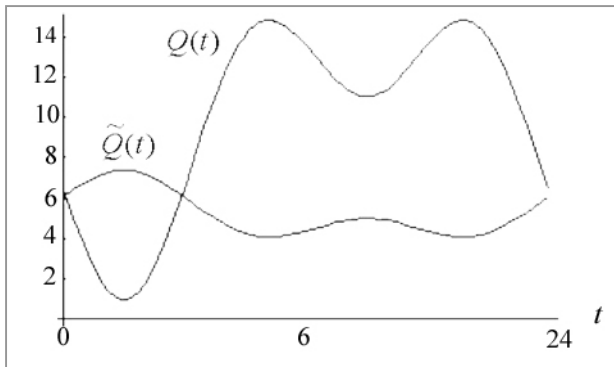
Veevõrkude arvutusmodelid vajavad aeg-ajalt täiendamist ning uuesti kalibreerimist. Joonisel 7 on toodud kalibreerimise protsessis saadud Tallinna ja Tartu linna veevõrkude torude kareduste teoreetilised väärtused. Tulemuste võrdlemisel peab arvestama seda, et Tartu linnas on kasutusel veevarustuses põhjavesi ning Tallinnas peamiselt pinnavesi. Tallinna veepuhastusjaamas rakendatud uus veepuhastustehnoloogia ning täiendav torude puhastamine on avaldanud mõju ka torude karedusele, mida näitavad viimased mudelite kalibreerimisel saadud torude kareduste väärtused.

Joonisel 8 on esitatud osa Tallinna veevõrgu mudelist. Mudeliga on võimalik teostada veevõrgu hüdraulilise olukorra erinevaid analüüse. Joonisel on toodud arvutuslikud survekõrguste vähenemised veevõrgus, kui Kristiine keskuses kahjutule kustutamiseks tarbitav vooluhulk veevõrgust on 100 l/s.

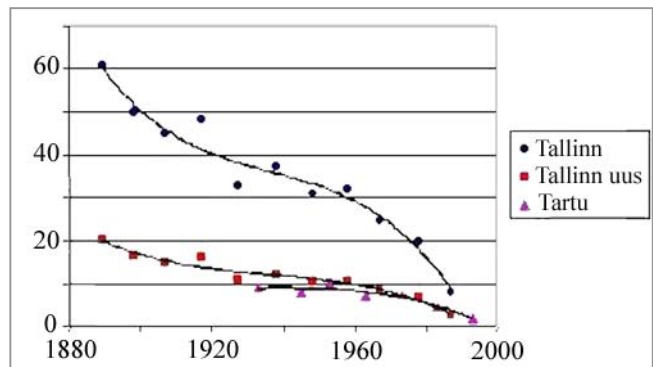
	A	B	C	D	E
1	<b>Number of groups</b>	<b>Number of iterations</b>	<b>Type of calibration</b>	<b>Epanet (inp) file name</b>	<b>Min. step along parameters</b>
2	2	100		sadama_2varAlg.inp	
3	<b>metal</b>	<b>e max</b>	<b>e min</b>	<b>exponent</b>	<b>0.0001</b>
4	<b>initial values</b>	10	0.1	0.5	
5	<b>fixed values</b>		0.1		
6					
7	<b>plast</b>	<b>e max</b>	<b>e min</b>	<b>exponent</b>	
8	<b>initial values</b>	5	0.001	0.5	
9	<b>fixed values</b>		0.001		
10					

Joonis 5.  
Veevõrkude arvutusmodelite kalibreerimise liides.



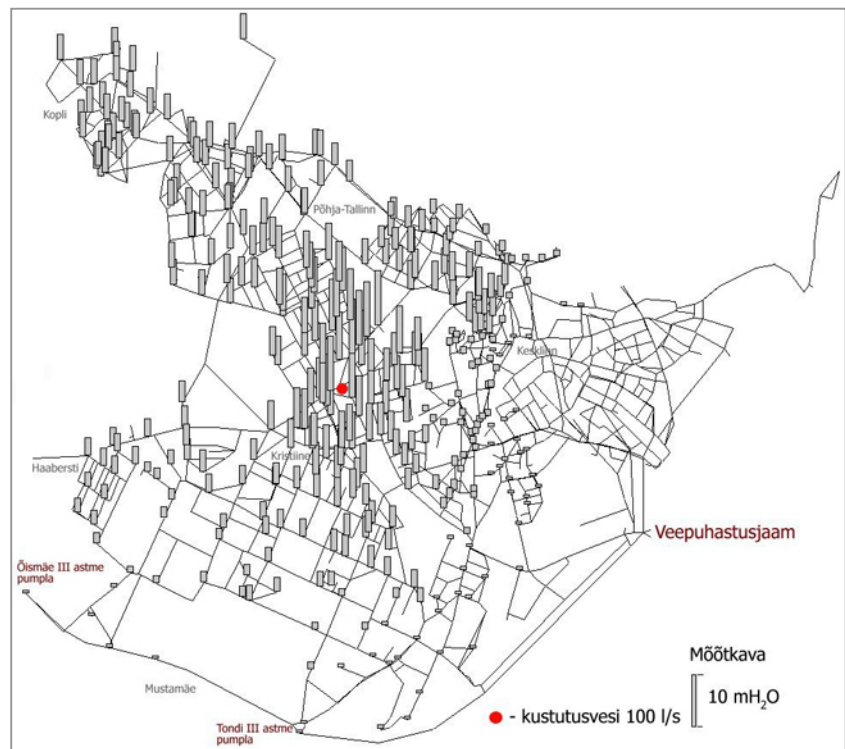


Joonis 6. Tarbimiste  $Q(t)$  ja lekete  $\tilde{Q}(t)$  ööpäevane dünaamika.



Joonis 7. Arvutuslikud torude karedused mudelite kalibreerimisel.

Joonis 8. Surve muutus veevõrgus tulekahju korral Kristiine keskuses.



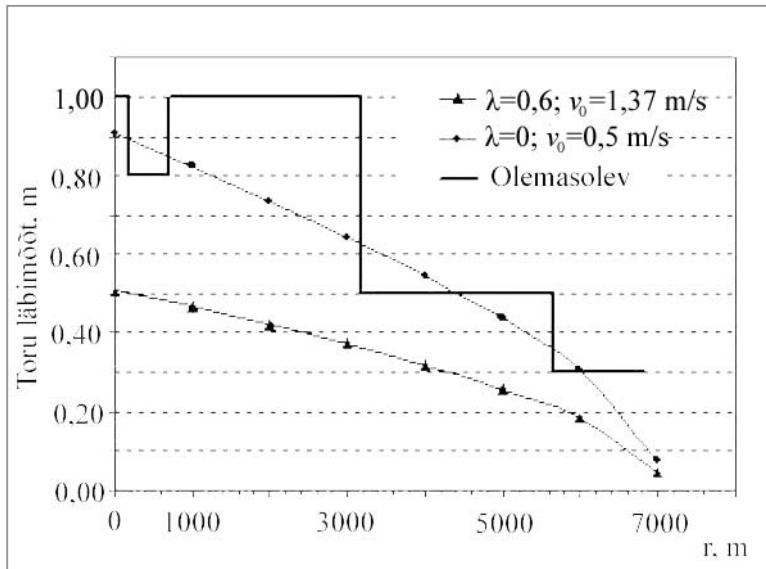
## VEEVÕRKUDE OPTIMEERIMINE

Veevõrkude optimeerimise probleemi raamides on vaadeldud mitut küsimust, nende seas peatorustiku konfiguratsiooni ja dimensioneerimise ülesannet. On leitud eeskirjad optimaalse kiiruse järgi peatorude läbimõõtude määramiseks, mida võib kasuta-

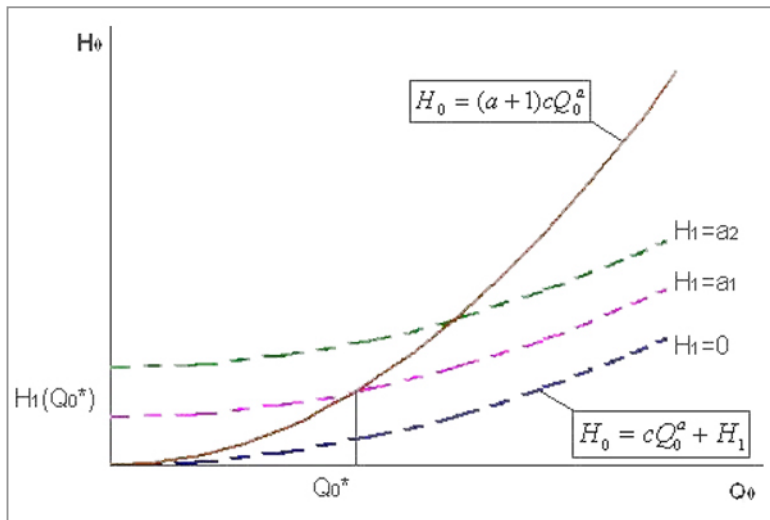
da veetorustike renoveerimisel. Üldjuhul on olemasolevad torustikud vee tarbimise vähenemise tõttu optimaalsest suuremate läbimõõtudega. Sellest tingitult kasvab tarbitava vee vanus võrgus.

Joonisel 9 on analüüsitud Tallinna ühe peatoru läbimõõtu. Toodud on olemasolev läbimõõt, nn isepuhastuva kiiruse 0,5 m/s alusel saadud läbimõõt ja majanduslik läbimõõt, mis arvestab toru rajamis- ja eksploatatsioonikulusid [Ainola jt, 2000]. Veevarustuse kaks olulist suurust – vooluhulk ja rõhk – on koondatud ühte näitajasse, mil-

leks on hüdrauliline võimsus [Ainola jt, 2003; Koppel jt, 2005]. See iseloomustab veevõrku energietiliselt. On antud algoritmid peatorude ja veevõrgu kui terviku energietiliseks optimeerimiseks. Veevõrgu hüdraulilise võimsuse kasutamise seisukorra iseloomustamiseks ja hindamiseks on kasutusele võetud vastavad efektiivsuse parameetrid (joonis 10).



Joonis 9. Optimaalsed peatoru läbimõõdud.



Joonis 10. Veevõrgu energietiliselt optimaalsed karakteristikud.

Veevõrgu optimeerimise oluliseks koostisosaks on pumplate töö optimeerimine. Selle käigus tuleb leida etteantud võrgukarakteristikust tulenevate

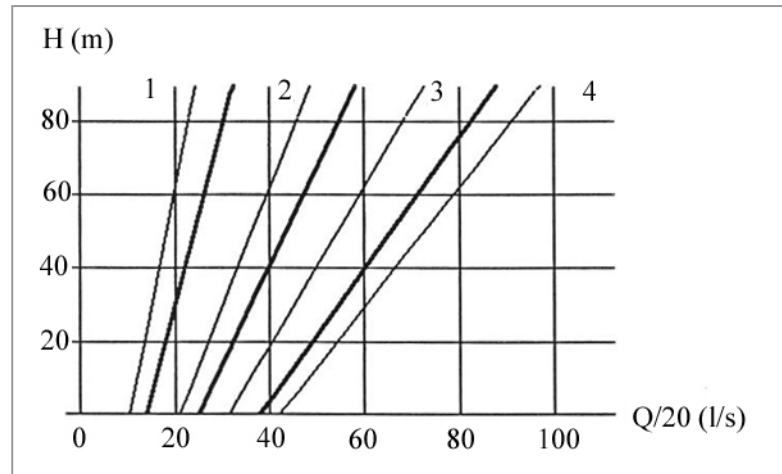
näitajate põhjal pumpade töörežiim, mille puhul elektrienergia vajadus on minimaalne. Tüüpiliseks ülesandeks on siin rööpühenduses töötavate pum-

pade arvu ja nende pöördesageduste määramine. On leitud algoritmid nende näitajate optimaalsete väärtuste leidmiseks. Joonisel 11 on näitena esita-

tud optimaalse pumpade arvuga piirkonnad (H,Q) tasandil ja pumpade arvule vastavad optimaalsed režiimid.

Joonis 11.

Optimaalse pumpade arvuga piirkonnad (H,Q) tasandil ja pumpade arvule vastavad optimaalsed töörežiimid.



## KOKKUVÖTE

Hüdrauliliste süsteemide mudelite kasutamine on muutunud tavaliseks praktikaks vee-ettevõtetes, konsultantsiooni- ning projekteerimisfirmades. Mudelite kasutusvaldkond on pidevalt laienenud, hõlmates viimasel ajal ka vee kvaliteedi ja riski hindamist süsteemides. Modelleerimise parema kvali-

teedi tagamiseks on vajalik teostada eksperimentaalseid uuringuid ning kasutada kaasaja arvutus- ja aeromehaanika õppetooli töögrupil on hea koostöö modelleerimise valdkonnas Eesti vee-ettevõtetega ning sadamate operaator- ja projekteerimisfirmadega.

## VIITED

Ainola, L., Koppel, T., Kändler, N. 2003. Energetic optimization by rehabilitation of oversized water distribution networks. Cabrera & Cabrera Jr. (eds.). Pumps, Electromechanical Devices and Systems Applied to Urban water Managements. Vol.1, A. A. Balkema Publ., Lisse, 3-9.

Ainola, L. J., Koppel, T. A., Lamp, J. J., Liiv, U. R. 1983. The skin friction coefficient during accelerated flows in pipes. Proc. XX Congr. IAHR, Moscow, 1983, 453-460.

Ainola, L. J., Koppel, T. A., Liiv, U. R. 1979. An investigation of turbulence generation and wall shear stress spectral analysis during unsteady flow in tube. Proc. XVIII Congr. IAHR, 3, Gagliari, Italy, 1979, 165-172.

Ainola, L., Koppel, T., Lähdeniemi, M. 1999. Heat transfer in the thermally developing region for pulsating tube flow. Proc. Eston. Acad. Sci. Eng., 5, 41-52.

Ainola, L., Koppel, T., Vassiljev, A. 2000. Complex approach in the water network model calibration and the leakage distribution. Blain, W. R., Brebbia, C. A. (eds.). Hydraulic Engineering Software VIII. WIT Press, Southampton, Boston, 91-100.

Koppel, T., Ainola L. 2006. Identification of transition to turbulence in a highly accelerated start-up pipe flow. ASME J. Fluids Eng., 128, 680-686.

Koppel, T., Ainola, L., Ekholm, A., Lähdeniemi, M. 2000. Heat transfer investigation in pipe by IR

thermography. Thermosense XXII. Proc. SPIE, 4020, 267-275.

Koppel, T., Ainola., Vassiljev, A. 2005. Hydraulic power analysis of flows in water distribution network. Computing and Control for the Water Industry. Vol. 2. Univ. Exeter, UK, 317-322.

Koppel, T. A., Liiv, U. R. 1977. Experimental investigation of the development of motion of liquid in conduits. Fluid Dyn., 12, 881-887.

Koppel, T., Lähdeniemi, M., Ekholm, A. 1998. Application of IR thermography for unsteady fluid flow research. Thermosense XX. Proc. SPIE, 3361, 40-48.

Liiv, U. 1991. An experimental investigation of shear stresses and velocity distributions of accelerated and decelerated flows in pipes. EURO-MECH 272. Response of shear flows to imposed unsteadiness. Jan 14-18, 1991, Aussois, France, 18-21.

# ÕHUKESEKILELISED PÄIKESEPATAREID PIHUSTUSPÜROLÜÜSI MEETODIL

*Malle Krunks*

Tallinna Tehnikaülikooli materjaliteaduse instituut

Käesolev kirjatükk püüab anda ülevaate Tallinna Tehnikaülikooli materjaliteaduse instituudis viimastel aastatel tehtud uurimistöödest pooljuhtkilede odavate keemiliste sadestustehnoloogiate arendamisel. Kuna instituudi peamine uurimissuund on päikesepatarei materjalide arendus, siis ka õhukeste kilede alane uurimistöö on sellesuunaline. Põhjendamaks odavate tehnoloogiate arendamise vajalikkust, antakse lühike ülevaade päikeseenergeetika arengusuundadest, päikesekiirgusest toodetud elektri kõrgest hinnast praegusel ajal ja selle alandamise võimalustest tulevikus.

Õhukeste kilede valmistamise keemilistest tehnoloogiatest tutvustatakse siinkohal keemilise pihustamise meetodit, metalli sulfiidide moodustumise keemilisi aspekte selles protsessis, päikesepatarei ühe tähtsama koostisosa – absorberkihi ( $\text{CuInS}_2$ )

## PÄIKESEENERGEETIKA ARENGUSUUNAD

Fossiilkütuste ammendumine ja järjest kuhjuvad keskkonnaprobleemid on seadnud elulise vajaduse leida alternatiivseid võimalusi elektrienergia tootmiseks fossiilkütuste põletamise asemel. Alternatiivsetest energiaallikatest on lootused pandud tuuma-, biomassi-, tuule- ja geotermaal-, eriti aga päikeseenergeetikale. Pooljuhtpäikeseenergeetika (PV), mille all mõistetakse elektrienergia tootmist päikesekiirgusest päikesepatareide abil, on puhas, keskkonnasõbralik elektrienergia tootmise viis.

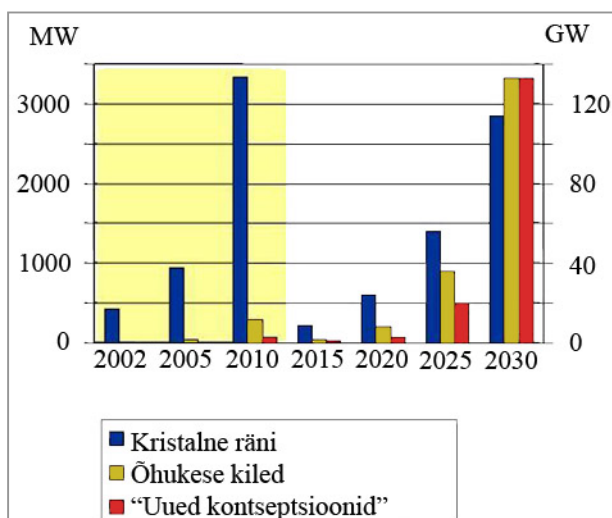
Vaatamata noorusele on pooljuhtpäikeseenergeetika üks kiiremini arenevaid energeetikaharusid ning juba järgnevatel aastakümnetel oodatakse tema olulist panust energiaprobleemide lahendamisse. Ollakse seisukohal, et aastal 2040 peaks päikesepatareide abil toodetav elektrienergia

mõningaid omadusi ning võimalikku rakendust päikesepatareis. Ülevaade põhineb TTÜs aastatel 1997–2006 läbi viidud keemiaalastel uurimustel ja kilede tehnoloogia arendustel aastatel 2000–2006.

Protsessi keemia valdkonnas on uurimistöö rahvusvaheline, osalevad Soome ja Ungari teadlased. Kilede tehnoloogia arendus on seotud mitme rahvusvahelise projektiga. Pihustuspürolüüsi temaatikas kaitsesid doktoritöö Olga Kijatkina (Bijakina) 2004 ja Arvo Mere 2006. Üks osa Valdek Mikli doktoritööst (2003) oli samuti pühendatud pihustuspürolüüsi meetodil valmistatud kilede uurimisele. Uurimistöö erinevatel aastatel ja etappidel on oma panuse tehnoloogia arendusse andnud doktorandid Ilona Oja, Tatjana Dedova, Atanas Katerski, Olga Volobujeva, teadur Helen Rebane, vanemteadur Tiit Varema, professor Enn Mellikov.

moodustama ligi 10% maailma elektritoodangust praeguse (2005) 0,01% asemel [Kazmerski, 2006].

2005. a võeti Euroopa Komisjonis vastu Euroopa Liidu 21. sajandi strateegiliste uurimissuundade reeglistik (tehnoloogilised platvormid) kuni aastani 2040 ja selles on pooljuhtpäikeseenergeetika nimetatud üheks eelisarendatavaks suunaks [A Vision..., 2005]. Selle dokumendi järgi peab Euroopa pooljuhtpäikeseenergeetika saama hinnalt konkurentsivõimeliseks aastaks 2030. Kuna PV-elektri hinnast moodustavad kõige suurema osa (ca 55%) patareimoodulid ise, siis tuleb eelkõige leida teed päikesepatareide hinna alandamiseks. Kui aastal 2005 oli PV paneeli valmistamise hind 3 €/W, siis aastal 2010 peaks see olema 2 €/W ja aastaks 2030 langema 0,5 €/W, mis võimaldaks toota



Joonis 1. Erinevate päikesepatareide tootmismahude prognoos kuni 2030. aastani.

elektrit hinnaga *ca* 0,05 €/kWh [A Vision..., 2005].

Seatud tähiseni jõudmiseks on valitud eelisarendatavateks suundadeks õhukesekeeliste fotovoltmuundurite ja uute kontseptsioonide – nii materjalide, konstruktsioonide kui tehnoloogiate mõttes – alased arendused [Compaan, 2006]. Praegusel ajal on ligi 90% toodetud PV-paneelidest valmistatud kristalse räni baasil. Päikesepatareide tootmise kasv viimastel aastatel on olnud väga kiire – üle 30% aastas, mis järjest suurendab nõudlust räni järele. Ollakse seisukohal, et ränipatareide hinna märkimisväärne alandamine nende kulutuste juures, mis on vajalikud sobivate omadustega ränipatareide tootmiseks, ei ole võimalik. Siit ka prognoos, et 2030. aastal peab nii õhukesekeelisel kui uutel kontseptsioonidel põhinevate päikesepatareide tootmine ületama ränipatareide tootmismahu (joonis 1).

## ÕHUKESEKILELISED PÄIKESEPATAREID JA UUED KONTSEPTSIOONID

Peamised õhukesekeeliste päikesepatareide materjalid tänapäeval on CdTe ja I-III-VI<sub>2</sub> tüüpi kalkopüriitse struktuuriga ühendid (CuInS<sub>2</sub>, CuInSe<sub>2</sub>, CuGaInSe<sub>2</sub> jt, lühendatult CIS) mille spetsiifiline omadus on suur valguse neelamise võime (> 10<sup>4</sup> cm<sup>-1</sup>). See on oluline omadus, mis võimaldab kasutada neid õhukeste kiledena (paksusega kuni paar mikromeetrit) enam kui 100 mikromeetrilise paksusega ränipatareide asemel.

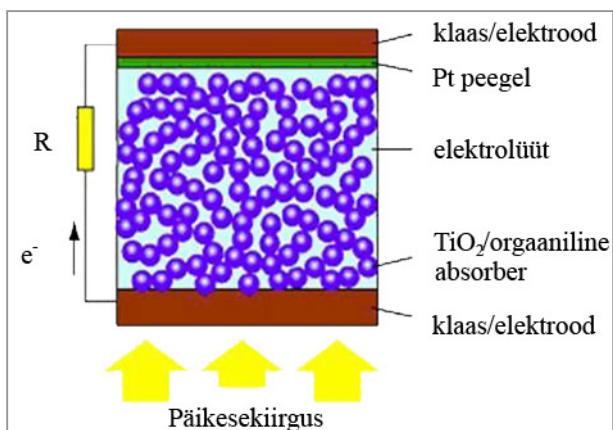
Laboris valmistatud õhukesekeeliste CIS-tüüpi päikesepatareide (CuInGaSe<sub>2</sub>/CdS/ZnO) valguse elektriks muundamise efektiivsus on 19%, tööstuslikult toodetud paneelide puhul *ca* 10–15% [Kazmerski, 2006]. Need patareid on valmistatud vaakumpõhiste meetoditega (v.a CdS puhverkiht, mis valmistatakse odaval keemilise vanni meetodil) ning nende hind ei ole veel madalam ränipatareide hinnast (3 €/W). Väljapääsuks oleks õhukesekeeliste patareide kõigi või osa koostelementide valmistamine odavamate tehnoloogiatega.

Uued kontseptsioonid hõlmavad nii uusi konstruktsioonilisi lahendusi, alternatiivseid materjale

kui ka tehnoloogiaid. Enamus uutest kontseptsioonidest põhineb nanostruktuursetel või -poorsetel kihtidel, kasutades odavaid materjale ja tehnoloogiaid. Suuri lootusi pannakse orgaanilise absorberkihiga, hübriidsetele ja ETA-tüüpi (üliõhukese anorgaanilise absorberkihiga) päikesepatareide arendusele. Orgaanilisel värvainel põhinevate patareide (DSSC) kasutegur on 8–10%, kuid lahendamata on degradeerumise ja moodulite valmistamise probleemid. Uurimise algstaadiumis olevate ETA- ja hübriidsete patareide kasutegur on praegu suurusjärgus 2–3%. Joonisel 2 ja 3 on esitatud orgaanilise värvainega ja ETA-tüüpi päikesepatareide skeemid.

Viimastel aastatel on õhukesekeeliste päikesepatareide valmistamiseks intensiivselt arendatud alternatiivseid odavaid, vaakumaparatuuri välis- ja välis- tavaid tehnoloogiaid. Suurimat edu on saavutatud elektrokeemilise sadestamise tehnoloogia rakendamisel, kus CIS-tüüpi absorberiga patareide kasutegur on 10% laboris valmistatud struktuuride ja 6% 30x30 cm<sup>2</sup> paneelide puhul [Lincot jt, 2004].

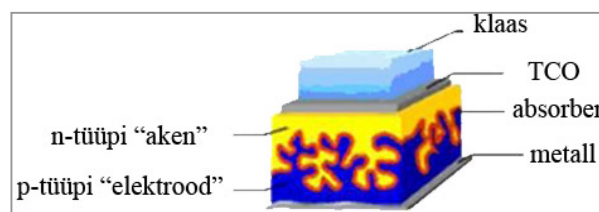
Vedeliksadestusmeetoditest pakuvad PV-kilede ja struktuuride valmistamisel huvi keemilise vanni, pihustuspürolüüsi, sool-geeli, jt sarnased meetodid, kuna nad on sobivad suurte pindade katmiseks ja lihtsad aparatuurse lahenduse poolest, seega odavad. Lisaks sellele on need tehnoloogiad



Joonis 2.

Orgaanilisest värvainest absorberkihiga päikesepatarei (DSSC) skeem.  $\text{TiO}_2$  nanokristallid, mis on kaetud orgaanilise värvainega (absorber), moodustavad poorse kihi. Porne kiht on sukeldatud elektrolüüti.

kergesti automatiseeritavad ja üleviidavad töötusesse. TTÜ materjaliteaduse instituudis leiavad kasutamist kõik eelpool loetletud vedeliksadestustehnikad, kusjuures kõige pikaajalisem kogemus on meie materjaluurijatel keemilise pihustamise tehnoloogia arendamisel.



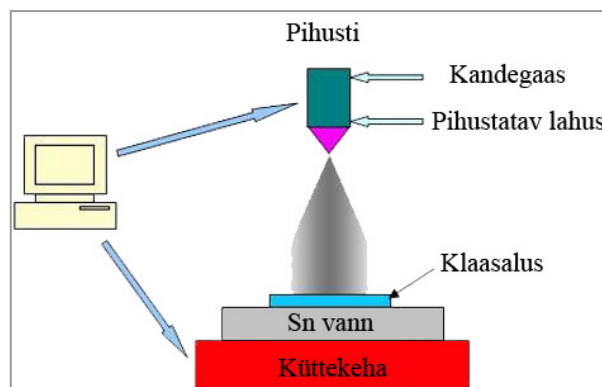
Joonis 3.

ETA-tüüpi (üliõhukese anorgaanilise absorberiga) päikesepatarei skeem. Üliõhuke absorberikiht kantakse n-tüüpi juhtivusega struktureeritud "akna" kihile ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ).

## PIHUSTUSPÜROLÜÜSI MEETOD ÕHUKESTE KILEDE SADESTAMISEKS. METALLI SULFIIDIDE SADESTAMISE KEEMILISED ASPEKTID

Pihustuspürolüüs (keemiline pihustamine) on protsess, kus sobivate lähteainete lahus pulveriseeritakse ülipeenikeste piiskadena eelkuumutatud alusplaadile. Kuumal alusel toimub lahuse komponentide või lahuses moodustunud uue lähteaine termiline lagunemine, mis päädub soovitud aine moodustumise ja tahkise kile kasvamisega kuumutatud alusel, kusjuures teised laguproduktid eralduvad soovitatavalt gaasifaasi. Pihustuspürolüüsi aparatuuri skeem on toodud joonisel 4.

TTÜ materjaliteaduse instituudis on uuritud päikesepatareide materjalide  $\text{CdS}$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{Cu}_x\text{S}$  ja  $\text{CuInS}_2$  kilede sadestamist pihustuspürolüüsi meetodil, seades eesmärgiks seadiskõlblike omadustega kilede tehnoloogia väljatöötamise. Erinevalt teistest uurimisgruppidest lähedases temaatikas on



Joonis 4.

Pihustusaparatuuri skeem.



meie lähenemise aluseks protsessi keemia tundmaõppimine ja selle kaudu tehnoloogiliste parameetrite valik ja materjali omaduste suunamine. Valmistatud kilede omadusi on uuritud võimalikult komplekselt ja katsetatud seadistes. Saadud tulemusi on kasutatud tagasisidestatult sadestustehnoloogia optimeerimisel.

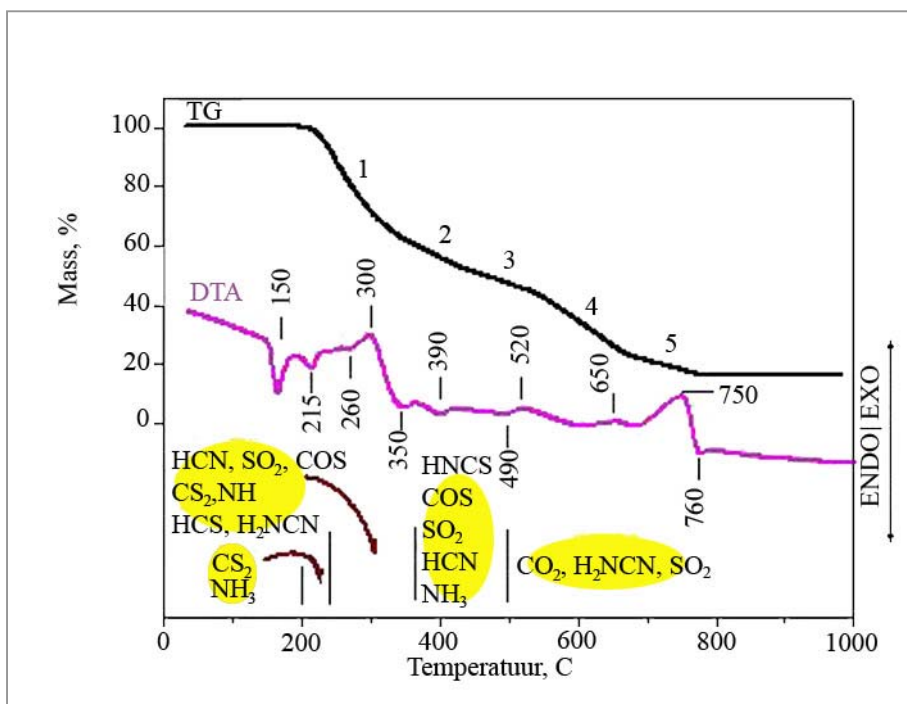
Metallisulfiidide sadestamiseks keemilise pihustamise meetodil kasutatakse metalliallikana peamiselt metallide kloriide või bromiide, väävliallikana tiokarbamiidi. Lähteainete vesilahuses moodustuvad kompleksühendid, mida võib esitada üldkujul  $Me(tu)_nX_m \cdot yH_2O$  ( $Me=Cd, Zn, Cu$ ;  $tu=SC(NH_2)_2$ ,  $X=Cl, Br$ ;  $n = 1, 2, 3$ ;  $m = 1, 2$ ;  $y = 0, 1/2, 1$ ) [Krunks jt, 1997; Bombicz jt, 2004, 2006]. Kilede sadestamise seisukohalt on nad vaheühendid, mille termiline lagunemine kuumal alusplaadil tingib vastava metalli sulfiidi tekkimise. Protsessi kemismi seisukohalt on need kompleksühendid aga mudelühendid, mida saab kasutada protsessi kirjeldamiseks.

Pihustuspürolüüsi protsessi kemismi uurimiseks eraldati ühendid lahustest ning identifitseeriti ele-

mentkoostise, infrapunase (IP) ja Raman spektrite järgi. Ühendite struktuur ja kristallograafilised parameetrid määrati sünteetitud monokristallide röntgenograafilistest uuringutest [Krunks jt, 1997; Bombicz jt, 2004, 2006]. Termilise käitumise uurimiseks viidi läbi kompleksne termiline analüüs, kus samaaegselt termogravimeetriaalsete muutuste ja kaasnevate termiliste efektide registreerimisega (TG/DTG/DTA analüüs) määratakse ka eralduvad gaasid kas IP- või mass-spektroskoopiliste meetoditega (EGA-FTIR, EGA-MS).

Termoanalüütilise uuringu näitena on joonisel 5 esitatud  $Zn(tu)_2Cl_2$  kui  $ZnS$ -i vaheühendi termilise analüüsi tulemused.

$Me(tu)_nX_m \cdot yH_2O$  kompleksühendite termiline lagunemine on keeruline ja mitmeetapiline protsess, olenemata ühendist. Pärast kristallvee eraldumist on kompleksid termiliselt stabiilsed kuni 200 °C-ni, millest kõrgematel temperatuuridel nad lagunevad. Kuumutamisel kuni lagunemiseni ühendid ei lendu, mis näitab nende spetsiifilist sobivust pihustusprotsessi lähteaineteks. Lagunemisetappide arv, temperatuurivahemikud ja lagunemisreaktsioo-



Joonis 5.  $Zn(tu)_2Cl_2$  termogravimeetriaalsete (TG) ja diferentsiaalse termilise analüüsi (DTA) kõverad. Katsekeha mass 24,1 mg, kuumutuskiirus 10 °C/min, keskkond õhk 80 mL/min. Termilise lagunemise etapid on tähistatud numbritega. Eraldunud gaasid määrati gaasifaasi IP-spektrite järgi.



nid sõltuvad oluliselt kompleksist ja keskkonnast, kus protsess toimub. Erinevatel lagunemise etapidel toimuvad keemilised reaktsioonid tuletatakse, määrates lagunemisetapi tahked lõpp-produktid ja etapil eraldunud gaasid [Krunks jt, 1997, 1998, 1999b, 2000a, 2003].

## CuInS<sub>2</sub> KILED JA FOTOVOLTSTRUKTUURID PIHUSTUSPÜROLÜÜSI MEETODIL

Pihustusmeetodil oleme valmistanud ja uurinud päikesepatarei kõigi komponentide (optilise akna kiht, puhverkiht, absorberkiht) omadusi. Kuigi patarei omadused sõltuvad kõigist struktuuri komponentidest, on määrava tähtsusega absorberkiht. Sel põhjusel tutvustame siinkohal pihustussadestatud CuInS<sub>2</sub> kihtide omadusi.

Vastavalt Cu<sub>x</sub>S-i ja CuInS<sub>2</sub> mudelainete termilise analüüsi tulemustele [Krunks jt, 1998, 1999b, 2000a] moodustub CuInS<sub>2</sub> juba 240 °C juures. Protsessi läbiviimisel avatud süsteemis muutuvad oksüdatsiooniprotsessid määravaks temperatuuridel üle 400 °C. Sellega on määratud ka kilede valmistamise temperatuuride ülemine piir. Temperatuurivahemikus 240–300 °C sadestatud kihid sisaldavad märkimisväärsel hulgal lagunemata tahkeid orgaanilisi ja anorgaanilisi võõrfaase, millele osutavad kilede IP-spektrid, ning kloori, süsiniku ja lämmastiku summaarne sisaldus (5–10%) on kiledes kõrge [Krunks jt, 2002]. Sobiv sadestustemperatuuride vahemik, mis tagab võõrlisandite sisalduse kiles alla ühe massiprotsendi, kusjuures oksüdatsioon ei ole veel märkimisväärne, on küllaltki kitsas – 350–380 °C.

CuInS<sub>2</sub> kilede struktuur, kristallilisus ja morfoloogia on peamiselt määratud vase ja indiumi lähtesoolade molaarsuhtega (Cu/In) pihustuslahuses [Kijatkina, 2004; Krunks jt, 2000b, 2005]. Indiumirikaste lahuste (Cu/In < 1) pihustamisel saadakse küll väga siledad ja homogeensed kihid, kuid kiled koosnevad väikestest kristallidest suurusega 10 nm ja sisaldavad In-rikka kolmikühendi – CuIn<sub>5</sub>S<sub>8</sub> faasi [Oja jt, 2005]. Vaserikaste lahuste (Cu/In > 1,5) pihustamine võimaldab kasvatada hästi kristalliseeritud kiled, mis koosnevad kuni

Kui vaheühendite koostis annab olulist infot selle kohta, milline peab olema lähtelahus, siis termooanalüütilise uurimistöö tulemused võimaldavad valida kõige sobilikumad sadestustemperatuurid, kandegaasid ja soovitatava sadestusatmosfääri. Lisaks sellele on termooanalüütika tulemustel oluline roll kile omaduste tõlgendamisel.

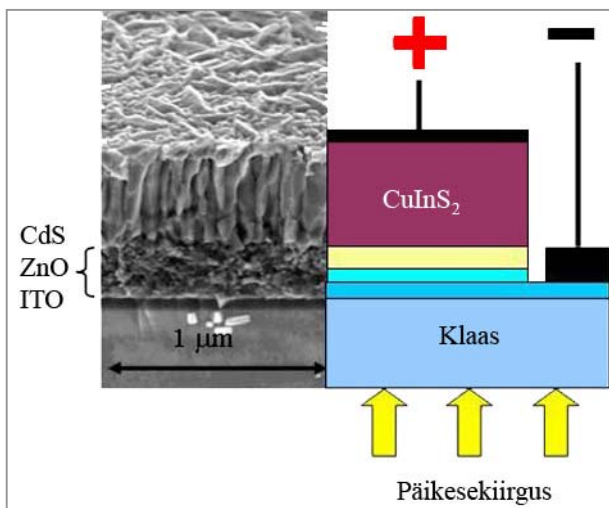
10 korda suurematest kristallidest, kuid kiled on väga ebahürtlase morfoloogiaga, mis loob soodsad tingimused lühiste tekkeks seadises [Krunks jt, 2005]. Suurte kristallide kasvu põhjustajaks on Cu<sub>x</sub>S faas, mis kile kasvamise käigus koguneb pinnale ja on sealt kergesti eemaldatav lihtsa söövituspõhise sadestusprotseduuriga. Faasi jaotus pinnal ei ole aga kontrollitav.

Parima tihedusega, ühtlased, hea adhesiooniga CuInS<sub>2</sub> kiled saadakse lahuse pihustamisel, milles Cu/In molaarsuhe on 1,0–1,1. Pihustussadestatud CuInS<sub>2</sub> kilede suhteliselt kõrge valguse neeldumise koefitsent  $\sim 5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$  ning keelutsooni laius 1,45 eV on sobivad parameetrid päikesepatarei absorbermaterjalile. Pihustatud CuInS<sub>2</sub> on p-tüüpi juhtivusega pooljuht, milles laengukandjate kontsentratsioon on  $ca 10^{16} - 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  [Mere jt, 2003; Mere, 2006].

Pihustatud absorberi baasil valmistati päikesepatareid, kus kasutasime kahte erinevat optilise akna materjali – ZnO ja TiO<sub>2</sub>, mis samuti sadestati pihustuse meetodil [Krunks jt, 1999a; Oja jt, 2006]. Üldlevinud konstruktsiooni puhul valmistatakse CIS-tüüpi absorberkiht vaakumpõhiste meetoditega klaasalusel olevale Mo elektroodile. Absorberile kantakse puhverkiht (tavaliselt CdS) keemilise vanni meetodil ning viimasele ZnO valgust läbilaskev nn “akna” kiht. Meie kasutasime nn “pööratud” konfiguratsiooni (*superstrate configuration*), kus patarei valmistamist alustatakse juhtivale klaasalusele sadestatud optilise akna kihist. Kihtide sadestusjärjestuse määravad ära patarei koostelementide sobivad sadestustemperatuurid pihustusprotsessis, mis alanevad järjekorras ZnO → CdS → CuInS<sub>2</sub>. Seadise valmistamine viiak-

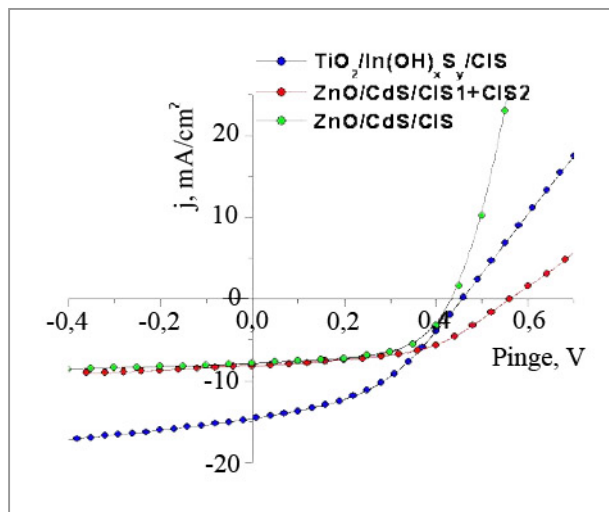
se läbi ühes etapis, vahetades vaid pihustuslahuseid ja alandades temperatuuri iga järgneva kihi sadestamiseks.

“Pööratud” konfiguratsiooniga ZnO/CdS/CuInS<sub>2</sub> patarei skeem koos skaneeriva elektronmikroskoobi mikrofotoga on toodud joonisel 6. Sellise struktuuri päikesekiirguse elektriks muundamise efek-



Joonis 6.

Pihustuspürolüüsi meetodil valmistatud ZnO/CdS/CuInS<sub>2</sub> päikeseatarei skeem ja skaneeriva elektronmikroskoobi foto. Kontaktmaterjalina kasutatakse Au või süsielektroodi.



tiivsus on 2,0%, kahekihilise absorberiga struktuuri (ZnO/CdS/CIS1+CIS2) puhul 2,4%. Struktuuris, kus “akna” materjaliks oli pihustatud TiO<sub>2</sub> kile, puhverkihiks In(OH)<sub>x</sub>S<sub>y</sub> ja absorberkihiks pihustatud CuInS<sub>2</sub>, saadi kasuteguriks 3,0%. Struktuuride volt-ampere-karakteristikud on toodud joonisel 7.

Struktuuri valmistamiseks vajalikele kemikaalidele kulub hinnanguliselt kuni 5% aluse maksumusest. Lihtne sadestusaparatuur ja lühike valmistamise aeg – vaid 30–40 minutit – on võimaldanud teha ilmselt ühe odavaima fotovoltmuunduri, mille valmistamise tehnoloogia on patenteerimisel.

Võrreldes vaakumpõhistel meetodil valmistatud CuInS<sub>2</sub> absorberkihil põhinevate patareidega (kasutegur 10–11%) on pihustusmeetodil valmistatud ja väljatöötuse algfaasis oleva muunduri kasutegur veel madal, kuid parim võrreldes teiste samal meetodil valmistatud struktuuridega, mille kasutegur on ~1%. Meie laboris valmistatud patarei on võrreldaval tasemel enamiku “uute kontseptsioonide” puhul saavutatuga (2–3%). Seega oleme näidanud, et põhimõtteliselt on pihustuspürolüüsi meetod kasutatav päikeseatareide valmistamiseks.

Kasuteguri tõstmiseks on vaja optimeerida patarei kõigi komponentide tehnoloogiaid ning rakendada järeltöötlust.

Joonis 7.

Pihustatud CuInS<sub>2</sub> absorberkihil põhinevate fotovoltstruktuuride volt-ampere-karakteristikud valgustamisel (valgustusintensiivsus 100 mW/cm<sup>2</sup>).

Näiteks ilmneb, et absorberkihi lühiajaline järeltöötus väävlit sisaldavas keskkonnas annab stöhhiomeetrilise koostisega võõrfaasidest puhta  $\text{CuInS}_2$  kile, millel on tunduvalt parem kristallilisus ja suurem keelutsoon ( $E_g=1,49$  eV) [Krunks jt, 2006]. Lisaks sellele tuleb pöörata tähelepanu piirpindade omadustele, sest nagu näitavad patarei väljundparameetrite, tühijooksupinge

temperatuursõltuvuse ( $V_{oc} = f(T)$ ) ning juhtivusspektroskoopia mõõtmised, on üks väljundparameetrid limiteeriv asjaolu rekombinatsioon p-n siirdel [Mere jt, 2004; Mere, 2006]. Kasuteguri suurendamiseks tuleb leida teed ka struktuuri elektritakistuse oluliseks vähendamiseks [Mere, 2006].

## VIITED

Bombicz, P., Madarasz, J., Krunks, M., Niinistö, L., Pokol, G. 2006. Multiple secondary interaction arrangement in the crystal structure of dichlorobis(thiourea-S)-zinc(II). *J. Coordin. Chem.*, (in press).

Bombicz, P., Mutikainen, I., Krunks, M., Leskelä, T., Madarasz, J., Niinistö, L. 2004. Synthesis, vibrational spectra and X-ray structures of copper(I) thiourea complexes. *Inorg. Chim. Acta*, 357(2), 513-525.

Compaan, A. D. 2006. Photovoltaics: Clean power for the 21-st century. *Sol. En. Mat. Solar Cells*, 90, 2170-2180.

Dedova, T., Krunks, M., Volobujeva, O., Mere, A., Oja, I. 2005. ZnS thin films deposited by spray pyrolysis technique. *Phys. stat. sol. (c)*, 2(3), 1161-1166.

Kazmerski, L. L. 2006. Solar photovoltaics R&D at the tipping point: A 2005 technology overview. *J. Electr. Spectr. Rel. Phen.*, 150, 105-135.

Kijatkina, O. 2004. Deposition of copper indium disulphide films by chemical spray pyrolysis. PhD Thesis on Natural and Exact Sciences. TTU Press, Tallinn.

Krunks, M., Bijakina, O., Mikli, V., Rebane, H., Varema, T., Altosaar, M., Mellikov, E. 2001. Sprayed  $\text{CuInS}_2$  thin films for solar cells: The effect of solution composition and post-deposition treatments. *Sol. En. Mat. Solar Cells*, 69(1), 93-98.

Krunks, M., Bijakina, O., Mikli, V., Varema, T., Mellikov, E. 1999a. Zinc oxide thin films by spray pyrolysis method. *Physica Scripta*, T79, 209-212.

Krunks, M., Kijatkina, O., Mere, A., Varema, T., Oja, I., Mikli, V. 2005. Sprayed  $\text{CuInS}_2$  films grown under Cu-rich conditions as absorbers for solar cells. *Sol. En. Mat. Solar Cells*, 87(1-4), 207-214.

Krunks, M., Kijatkina, O., Rebane, H., Oja, I., Mikli, V., Mere, A. 2002. Composition of  $\text{CuInS}_2$  thin films prepared by spray pyrolysis. *Thin Solid Films*, 403, 71-75.

Krunks, M., Leskela, T., Mannonen, R., Niinistö, L. 1998. Thermal decomposition of copper(I) thiocarbamide chloride hemihydrate. *J. Therm. Anal. Cal.*, 53(2), 355-364.

Krunks, M., Leskela, T., Mutikainen, I., Niinistö, L. 1999b. A thermoanalytical study of copper(I) thiocarbamide compounds. *J. Therm. Anal. Cal.*, 56(2), 479-484.

Krunks, M., Leskelä, T., Niinistö, L. 2000a. Formation of  $\text{CuInS}_2$  in spray pyrolysis as simulated by thermal analysis. *Jap. J. Appl. Phys.*, 39, 181-186.

Krunks, M., Madarasz, J., Hiltunen, L., Mannonen, R., Niinistö, L., Mellikov, E. 1997. Structure and thermal behaviour of dichloro-bis(thiourea)-cadmium(II). *Acta Chem. Scand.*, 51, 294-301.

Krunks, M., Madarász, J., Leskelä, T., Mere, A., Niinistö, L., Pokol, G. 2003. Thermoanalytical study of zinc thiocarbamide chloride, a single source precursor for zinc sulfide thin films by spray pyrolysis. *J. Therm. Anal. Cal.*, 72, 497-506.

Krunks, M., Mere, A., Katerski, A., Mikli, V., Krustok, J. 2006. Characterization of sprayed

CuInS<sub>2</sub> films annealed in hydrogen sulphide atmosphere. *Thin Solid Films*, 511-512, 434-438.

Krunks, M., Mikli, V., Bijakina, O., Rebane, H., Mere, A., Varema, T., Mellikov, E. 2000b. Composition and structure of CuInS<sub>2</sub> films prepared by spray pyrolysis. *Thin Solid Films*, 361, 61-64.

Lincot, D., Guillemoles, J. F., Taunier, S. et al. 2004. Chalcopyrite thin film solar cells by electrodeposition. *Solar Cells*, 77, 725-737.

Mere, A. 2006. Structural and electrical properties of spray deposited copper indium disulphide films for solar cells. PhD Thesis on Natural and Exact Sciences. TTU Press, Tallinn.

Mere, A., Katerski, A., Kijatkina, O., Krunks, M. 2004. Solar Cell Structures by Non-Vacuum Techniques Based on Sprayed CuInS<sub>2</sub> Absorber Layers. Proc 19-th Eur. Photovolt. Sol. En. Conf., Paris, 2004, 1973-1976.

Mere, A., Kijatkina, O., Rebane, H., Krustok, J., Krunks, M. 2003. Electrical properties of sprayed CuInS<sub>2</sub> films for solar cells. *J. Phys. Chem. Solids*, 64(9-10), 2025-2029.

Oja, I., Mere, A., Krunks, M., Nisumaa, R., Solterbeck, C.-H., Es-Souni, M. 2006. Structural and electrical characterization of TiO<sub>2</sub> films grown by spray pyrolysis. *Thin Solid Films*, 515(2), 674-677.

Oja, I., Nanu, M., Katerski, A., Krunks, M., Mere, A., Raudoja, J.; Goossens, A. 2005. Crystal quality studies of CuInS<sub>2</sub> films prepared by spray pyrolysis. *Thin Solid Films*, 480-481, 82 - 86.

A Vision for Photovoltaic Technology. 2005. Report by the Photovoltaic Technology Research Advisory Council (PV-TRAC). Office for Official Publications of the European Communities Luxembourg, 1-41.

# KAABELKONSTRUKTSIOONIDEST EESTIS JA MAAILMAS

## TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLI UURIMISTÖÖDE TAUSTAL

*Valdek Kulbach*  
Tallinna Tehnikaülikool

### SISSEJUHATUS

Kaabel- ja kaabeltoetatud konstruktsioonide tähtsaimateks esindajateks on rippkonstruktsioonid, vantsillad ja vantidega toetatud mastid. Rippkonstruktsioonide põhilisteks kasutusalaadeks on ripp-sillad ja katusekonstruktsioonid. Tänapäevaks on suurimad sillaavad lähenenud 2000 meetrile (Akashi Kaikyo sild Jaapanis sildega 1992 m, Suure Belti sild Taanis sildega 1624 m). Juba on koostatud projekt 3300 m avaga ripp-silla jaoks üle Messina väina Itaalias, järke ootab Hispaaniat Marokoga ühendav sild avaga kuni 5000 m. Avadel üle 1000 m pole ripp-sildadel praktiliselt võistlejaid.

Tänapäevaste rippkatuste areng algas 1950ndatel aastatel, katuste silled (läbimõõdud) jäävad piiresse kuni 200–250 m. Samal ajal iseloomustab rippkatuseid suhteliselt suurem mitmekesisus, on ehitatud nii erineva kujundusega tasandkandureid kui ka mitmekesiseid ruumkonstruktsioone. Iga rippkonstruktsiooni põhielementideks on spiraalsete keerdudega terastrossid kas ainult ümartraatidest või kiilukujulistest ja pealispinnal Z-kujulistest traatidest kombineeritud trossid või paralleeltraatidest kimbud. Enamasti on need vabalt painduvad ja nende paindejäikuse arvestamisest võib loobuda. Harvem kasutatakse väiksema või suurema paindejäikusega vardaid (ümarvardad või talaprofiilid). Tavaliselt koosneb rippkonstruktsioon põhielemendist-kaablist, jäigastuselemendist ja toekonstruktsioonist ning kujutab endast eelpingestatud süsteemi. Jäigastuselemendiks on kas pingestuskaabel (rippkatustes) või jäikustala (ripp-sildades).

Süsteemi eelpingestus realiseerub kontaktkoormuse kaudu peakaabli ja jäigastuselemendi vahel.

Kontaktkoormus kujutab endast tegelikkuses teatava sammuga rakendatud koondatud jõudude süsteemi, kusjuures nende arv võib olla suhteliselt suur. Praktilisel projekteerimisel kasutatakse arvutuse lihtsustamiseks kahte võimalikku asendusmudelit:

- sõlmede arvu vähendamine koos rakendatud jõudude suuruse ja sammu vastava suurendamisega; ruumsete võrkkonstruktsioonide puhul tuleb vastavalt suurendada ka kaablite ristlõikepindala;
- kindla sammuga rakendatud koondatud koormuste asendamine pideva joon- või pindkoormusega (asendades viimasel juhul tegeliku kaablitesüsteemi fiktiivse kahekihilise membraaniga, millest kumbki töötab tõmbel ühes suunas).

Enne järgneva juurde asumist tuleb autori arvates teha teatud korrektiive trossidest ehitatud konstruktsioonide alasesse eestikeelsesesse terminoloogiasse. Tähtsaimaks täpsustuseks peaks olema terminite TROSS ja KAABEL eristamine. Ehitusalases terminoloogias on terminid tross seni kasutatud enamasti nii toote kui ka konstruktsioonelemendi tähenduses (samaväärselt näiteks tala või kaarega). Peamiseks põhjuseks tundub siin olevat vene keele mõju. Konstruktsioonelementi tuleks siiski nimetada analoogiliselt inglise ja saksa keelega ka ehitusala terminoloogias kaabliks (inglise *cabl*e ja saksa *Kabl*e). Seni on eesti keeles seda terminit rakendatud ehitusalal ainult liitsõnas KAABEL-KRAANA. Kaablite abil ehitatud konstruktsiooni mõistet ei asenda ka kitsama tähendusega termin RIPPKONSTRUKTSIOON.

Termini laiendatud kasutamisel võiksime rääkida KAABELTOETATUD (inglise keeles *cable-supported*) konstruktsioonidest ja KAABELVÕRKUDEST. Siia kuuluksid nii rippkonstruktsioonid ja vantsillad (vandi all tuleks mõista sirget või ainult omakaalu mõjul väikest ripet omavat kaablit) kui ka vantidega mastid. Ehitusala terminoloogia selline korrastamine kõrvaldaks senise ebaselguse ter-

mini tross kasutamisel. Rippkonstruktsioonide kasutamise efektiivsus sõltub põhiliselt kaablite horisontaaljõu tasakaalustamise moodusest. Tasandkonstruktsiooni kaabli ankurdamisel kaldvantide abil mängib olulist rolli viimaste kaldenurk, kaabelvõrgu puhul on tähtsaimateks teguriteks kontuuri kuju ja jäikus.

## RIPP- JA VANTKONSTRUKTSIOONIDE ARENGUST

### RIPP- JA VANTSILLAD

Rippsillad on ajalooliselt palju vanemad kui rippkatused. Kui jätta kõrvale ajaloolised looduslikest kiud(roog-)materjalidest kaablitega elementaarsed üleviigud, võib tänaste ripsildade eelkäijateks lugeda järjestikustest lülidest koostatud ahelsildu ning nendega samasse liiki kuuluvaid kettsildu. Tänapäevaste ripsildade (foto 1) põhielementideks on peakaablid (need moodustatakse kas valmis trossidest, nende kimpudest või paralleeltraatide kimpudest) ning nende külge rippurite abil ühendatud jäikustalad koos sõidutee elementidega. Rippsilla peakaablid toetatakse püloonidele, mille ülemised otsad ühendatakse kas sirgete või silla külgsilteid katvate talade poolt koormatud ankurvantide kaudu ankurvundamentidega (ankurplokkidega). Sügava veekogu korral võib ankurvandid ühendada massiivsete ankurplokkide asemel silla jäikustalade otste külge (nn iseankurduv sild). Sel puhul on jäikustalad lisaks paindele koormatud ka pikijõududega, talade otsi toetavad sambad on aga koormatud ainult vertikaaljõududega.

Kaasaja ripsildadel pole võistlejaid suurte avade katmisel. 1000 m piir ületati juba 1931. aastal – Georg Washingtoni sild USA-s. Sellele järgnes arvukalt teisi ripsildu USA-s, kaasa arvatud Kuldvärava sild kesksildega 1280 m. Tähtsat osa ripsilla käitumises mängivad jäikustalad. I-profiiliga jäikustalade kõrguse ülemäärane vähendamine viis 1940. aastal Tacoma silla varisemisele puhangulise tuule toimel. Pärast seda hakati enam tähelepanu pöörama jäikustalade ristlõike kuju valikule. Voolujoonelise ristlõikega jäikustala kasutamisel on selle kõrgust vähendatud alla 1 : 400 sildest.

Lisaks voolujoonelise ristlõikega täisseinalistele taladele kasutatakse jäikustaladena ka paralleelvöödega sõrestikke. Vaatamata varasemast suuremale selgusele silla jäikustalade ristlõike valikul, soovitavad sildade projekteerimismid viia enne ripsilla ehitamist läbi mudelkatsetused tuuletunnelis.

20. sajandi teisel poolel kandus suureavaliste ripsildade ehitus Euroopasse (Forth Road sild avaga 1006 m Šotimaal, Tagus sild avaga 1013 m Portugalis, Hõga Kusteni sild avaga 1210 m Rootsis ning Humberi sild 1981. aasta kohta rekordilise 1410 m avaga), sajandi lõpul aga Aasiasse (Tsing-Ma sild Hong-Kongis 1977. aastast sildega 1377 m, Yangtze sild 1998. aastast sildega 1385 m Hiinas ning sissejuhatuses nimetatud Akashi Kaikyo sild Jaapanis). Eestis seni ehitatud ripsildu esindavad tagasihoidlike avadega (kuni 60 m) rekonstrueeritud ajalooline Viljandi ripsild (projekti koostas käesoleva artikli autor koostöös prof Siim Idnurmega, foto 2), Võru linna Rooside saarega ühendav sild ning Jakobsoni talu-muuseumi juurde ehitatud Kurgja ripsild. Ka Soomes ehitatud ripsildade avad on suhteliselt tagasihoidlikud – suurima kesksildega (220 m) on Karjalansalmi ripsild.

Vantsildade põhiliseks eeliseks võrreldes ripsildadega ongi ankurplokkide puudumine ning jäikustala lihtsam montaaž. Samal ajal nõuavad nad kõrgemaid püloone ning raskemaid jäikustalasisid. Ripsildadega võistlusvõimelised on nad keskmistel silletel (200–800 m). Senised rekordid kuuluvad Prantsusmaal 1999. aastal ehitatud Normandia sillale (foto 3, sille 856 m) ja 1999. aastal Jaapanis ehitatud Tatara sillale (sille 890 m). Neid re-



kordeid on purustamas Hiina, kus on ehitamisel vantsild kesksildega üle 1000 m. Eestis ehitatud vantsildadest võib esile tuua Tartu ja Pärnu ning autori konstrueeritud Linnamäe hüdrojaama (foto 4) vantsildu.

Foto 1.  
“Hordlandi kolmnurga” üks ripsildadest Norras.

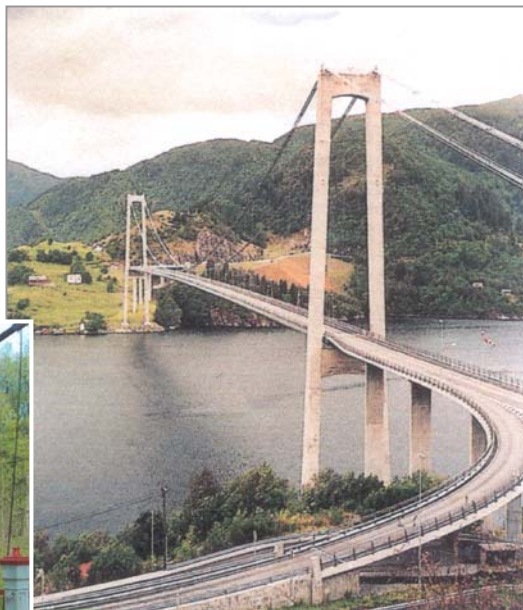


Foto 2.  
Viljandi ajalooline ripsild pärast restaureerimist.

Foto 3.  
Rekordilise sildega Tatara vantsild Jaapanis.



Foto 4.  
Jägala jõe vantsild Linnamäe hüdroelekt-  
rijaama juures.

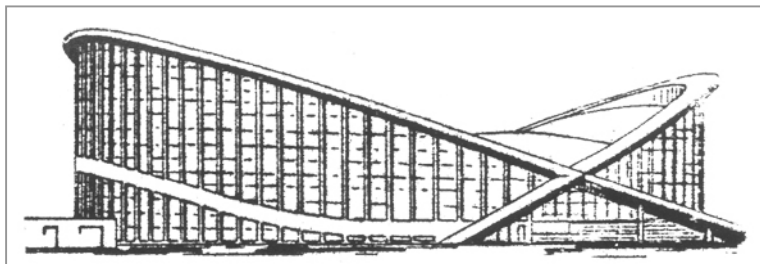
## RIPPKATUSED

Rippsildade pikemaajalise arengu taustal on tänapäevaste rippkatuste ajalugu suhteliselt lühike. Esimesed märkimisväärsed näited kuuluvad 1950ndatesse aastatesse. Neist ühe märkimisväärsema – USA-s 1953. aastal valminud Raleigh-Arena kahele kaldkaarele toetatud võrkkatuse (joonis 1) konstruktsiooni võnkumine tuule toimel nõudis katuse lame osa kandekaablite ühendamist hoone välisseintega lisakaablite abil. Püüdlused ripp-sillale omaste konstruktsioonide ülekandmiseks katusekonstruktsioonidele saavutasid küll mõningat levikut tänu Rootsi inseneri D. Jawerthi projektidele, kuid ankurvante aladel tekkivatele “surnud tsoonide” tõttu jääb nende kasutamine piiratuks. See võib osutada otstarbekaks vaid siis, kui kaablid saab ühendada tribüünialuste kaldtalade otstega või külglöövide korrusraamidega.

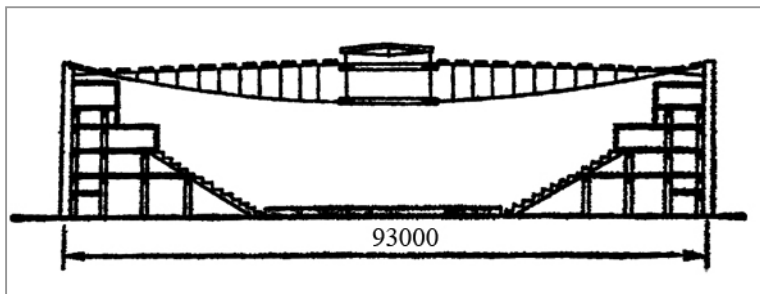
Rippkonstruktsioonide kasutamise tähtsam areng katusekanduritena on seotud kaabelvõrkude ning radiaalkaablite süsteemi kasutamisega. Mõlemal juhul tuleb lugeda põhivariandiks eelpingestatud kahekordse kaabelsüsteemi (kande- ja pingestuskaablid) kasutamist. Kontuurirõngale toetatud radiaalkaablitega konstruktsiooni korral, olenevalt kande- ja pingestuskaablite vastastikusest asendist, võib katuse olla kas kumer (siseruumis kujuneb kande-

kaablistest nõgus lagi) või nõgus (sadevee ärajuhtimine nõuab radiaalsuunalise torustiku kasutamist). Sobivaks võib osutada kahe kontuuri- ja kahe tsentrirõngaga kombineeritud variant (joonis 2). Hoone interjööri kujundamiseks pakub variante sadulakujuline rippkatuse. Enamik seni ehitatud katuste puhul on kaabelvõrk toetatud kahest tasapindsest kaldkaarest kontuurile. Katusepinna lame-dad tsoonid kaare luku piirkonnas on ebasoodsad tuule puhangulise toime seisukohalt. (Tallinna laululava erakordse kujuga kõlaekraani (foto 5) puhul takistavad võnkumist suhteliselt suure paindejäikusega katusepaneelid). Kontuurikaarte toetamiseks tuleb kasutada massiivseid kontraforsse (foto 6).

Sujuva katusepinna saame hüpari (hüperboolse paraboloidi) kujulise kaabelvõrgu kasutamisel. Sellist võrgu pinda saab kõige sobivamalt rakendada plaanis ellipsikujulise kontuurirõnga korral. Meie ettepaneku alusel võib kontuurirõnga kokku monteerida 16–32 (5–8 erinevast) torulõigust, mis keevitatakse omavahel ellipsikujuliste põkkõmblustega. Sobivaks näiteks on Tartu laululava kõlaekraan (foto 7), mis on tavalisest katusest keerukama toetusega. Selle konstruktsioonid modelleeris ja projekteeris käesoleva artikli autor koostöös prof Karl Õigeri ning ehitiste projekteerimise instituudi aspirantidega.



Joonis 1.  
Kaartele toetuv Raleigh Arena võrk-rippkatuse USA-s.



Joonis 2.  
Peterburi spordipalee radiaalkaablitega rippkatuse.



Foto 5.  
Tallinna laululava üldvaade.

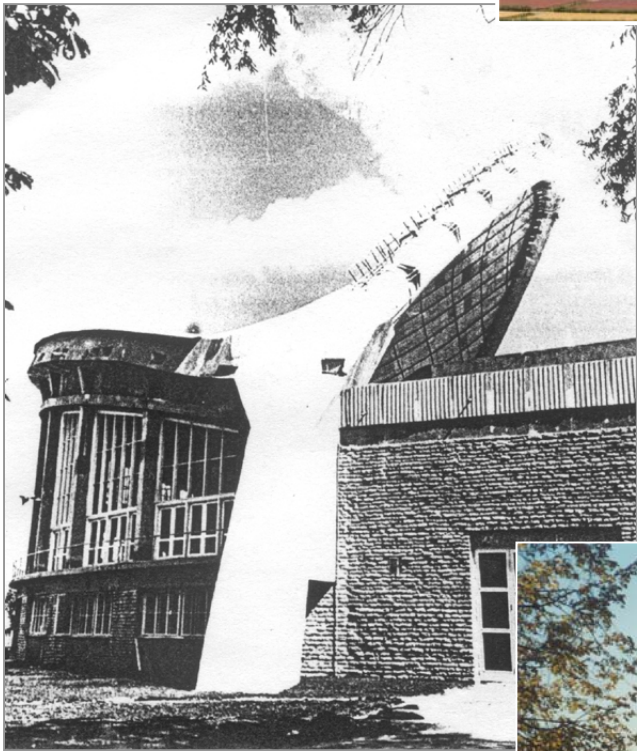


Foto 6.  
Tallinna laululava kõlaekraani kontuurkaared toetuvad massiivsetele kontraforssidele.



Foto 7.  
Tartu laululava üldvaade.

## KAABELKONSTRUKTSIOONIDE UURIMISEST, ARENDAMISEST JA PROJEKTEERIMISEST TTÜs

Rippkonstruktsioonide uurimine TTÜ (sel ajal TPI) ehitusteaduskonnas 1950ndate aastate lõpus oli seotud probleemidega Tallinna laululava uni-kaalse kõlaekraani projekteerimisel “Eesti Projek-tis” (projekti autor arhitekt Alar Kotli). Tähelepa-nu väärrib asjaolu, et enne seda oli ehitatud vaid üksikuid sadulakujulisi rippkatuseid. Tallinna lau-lulava kõlaekraani kujundamist komplitseeris selle esikaare vahepealsete tugevate puudumine (toeta-mine ainult otsmistele kontraforssidele). Prof Heinrich Lauu esialgsete konstruktiivsete kaalu-luste alusel ehitati selleaegses ehituskonstruksioo-nide kateedris terastraatidest võrgu ja raudbe-toonist kontuurikaartega mudel (M 1 : 20), mille katsetamise (dots Allan Sumbak) tulemused ning esialgsed ligikaudsed kontrollarvutused olid alu-seks kõlaekraani põhimõõtmete valikul. Nimeta-tud mudelit kasutati pärast kaablitevõrgu katmist puitlaudisega ka ekraani akustiliste omaduste hin-damisel (prof Helmut Oruvee).

Ekraani ehitustööde käigus asendati kaablitevõrku toetav algselt raudbetoonist projekteeritud esikaar osaliselt betooniga täidetud terastoruga. Seda asendamist on küll korduvalt kritiseeritud, kuid käesoleva artikli autori arvates oli see õigustatud nii ehitustööde kiirendamise (laulupidu oli ukse ees) kui ka kaare vajaliku väändejäikuse tagamise seisukohalt. Küll võiks tänaste teadmiste alusel väita, et esikaare valmistamiseks oleks võinud kasutada mõnevõrra väiksema läbimõõduga (1,6 m 2,0 m asemel) terastoru. Ekraani kaabelvõrgu pingestamise ajal tuli allakirjutajal koos oma sel-leaegse kolleegi prof Johannes Aarega lahendada rida tehnoloogilisi probleeme. Neist tähtsamateks olid kaablite sisejõu mõõtmise seadme konstrueerimine ja tareerimine ning kaablitevõrgu pingesta-miseks vajalike seadmete projekteerimine. Vii-maste hulka kuulusid pikaõlaliste võtmete haardesõlmed ning suhteliselt suurte (kuni 300 kN) eelpingejõudude realiseerimiseks vajalike tugi-laagrite ja dubleeritud (pingestamis- ja fikseeri-mis-) mutritega tugiosad. Kõlaekraani ehitamisele järgneval aastal toimusid konstruktsioonide vii-

mistlustööd koos võrgukaablite sisejõudude täiendava reguleerimisega. Viimane viis vaid piiratud tulemuseni, säilis sisejõudude teatav ebahütlus ning märgatav erinevus võrreldes projekteeritud suurustega.

Tallinna laululava kõlaekraaniga seotud probleemid ajendasid käesoleva artikli autorit jätkama tööd rippkonstruktsioonide, aga ka teiste kaabel-toetatud konstruktsioonide (vantidega toetatud montaažimastid) uurimisel. Alates 1960ndatest aastatest juhendas autor aspirante (hiljem magist-rante ja doktorante), kelle väitekirjad puudutasid erinevaid rippkatuseid, hiljem ka rippildu ja kaabeltoetatud tõstemaste. Sirgetest varrastest kontuuri ja kaablitevõrgu koostööd uuris Jüri Engelbrecht, kahest tasandkaarest kontuuriga rippkatuse käitumist Karl Öiger, elliptilise kontuurirõngale toetatud ortogonaalse võrgu käitumist Arvi Rava-soo, hiljem ka Tiina Hallang ja Indrek Tärno. Kombineeritud elementidest kontuuri ja kaablite-võrgu koostöö uurimisele olid pühendatud Urmas Männi ja Andres Talviku tööd.

Vastavate publikatsioonide ülevaade on toodud Eesti Teaduste Akadeemia Toimetiste erinumbris [Special issue..., 2002] Nende tööde koostamise ajal võeti kasutusele autori poolt põhjendatud meetod (koos vajalike tingimuste arvestamisega) pingelekkude superpositsiooni printsipi kasutamiseks geomeetriliselt mittelineaarsete konstruktsioonide arvutamisel [Kulbach, 1999]. See võimaldas kontinuaalse arvutusmudeli rakendamist ühepoolsetel koormatud konstruktsioonidele. Vajalikku tähelepanu pööras autor ka eelpingestatud rippkonstruktsioonide algkuju määramisele ning kaabelvõrgu pingestamise strateegia väljatöötamisele.

Seni põhiliselt võrkkatuste jaoks kasutatud arvutusmetoodikat laiendati 1960ndate aastate lõpul üksikkaablitele ning kande- ja pingestuskaablitega eelpingestatud tasandkonstruktsioonidele [Kulbach, 1995b]. Hiljem leidsid lähemat käsitlemist radiaalkaablite ja ringikujulise kontuurirõngaga rippkatuste arvutamise küsimused [Kulbach, Lääne,

1999], aga ka erinevate rippkonstruktsioonide dünaamikaprobleemid [Engelbrecht, 1971]. Kaabelkonstruktsioonide uurimise ja projekteerimise omaette valdkonna moodustasid montaažimaste toetavate vantide kui eritüüpi (eelpinge suhtes eriti tundlike) kaablite arvutusküsimused, mis on lähedalt seotud raskete seadmete ning kütuse-reservuaaride montaaži probleemidega. Mastkraana viimase tüübi mudeli katsetamist ning sellele vastava 1000-tonnise massiga reaktori montaaži illustreerivad fotod 8 ja 9.

1980ndate aastate lõpul kerkisid päevakorda Tartu laululava autori poolt pakutud lahendusele vastava hüparikujulise kaabelvõrguga kõlaekraani projekteerimise ja tegeliku töö uurimise küsimused. Ehitati mudel (M 1 : 10), mille katsetamisega pidi me kindlaks tegema ühepoolset toetatud elliptilise kontuuriga konstruktsiooni käitumise iseärasused [Kulbach, 1995a]. Prof K. Õigeri ettepanekul võeti arvesse kaablitevõrgu koostööd kolmekihilise puitlaudisega. Autori aspirant Peeter Paane viis läbi mudeli staatilise katsetamise ning K. Õigeri

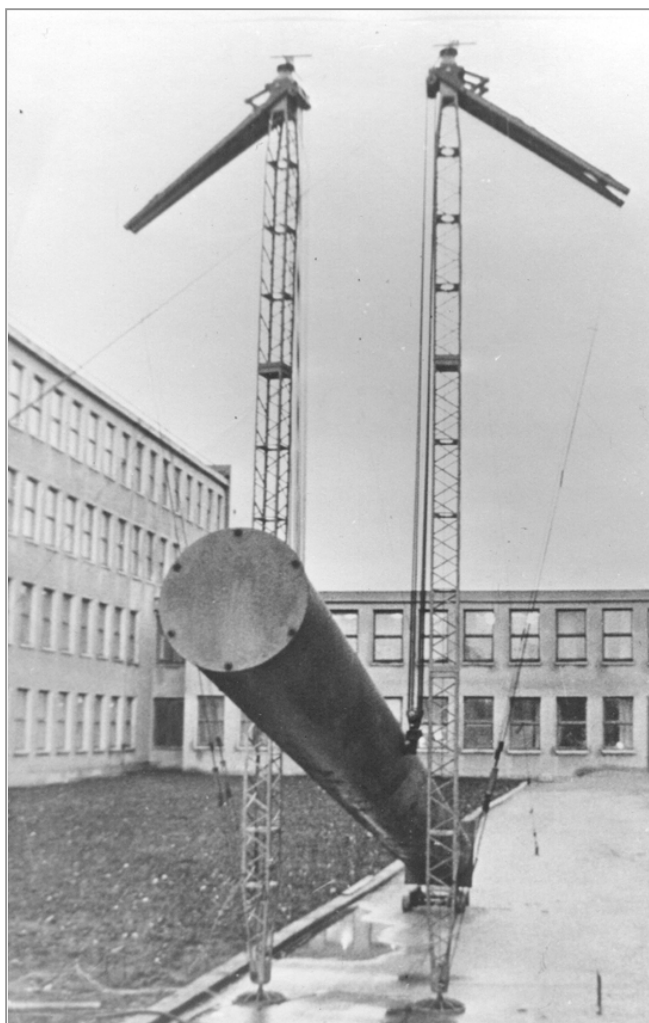


Foto 8.  
1000 t tõstejõuga mastkraana mudeli katsetamine TTÜs.

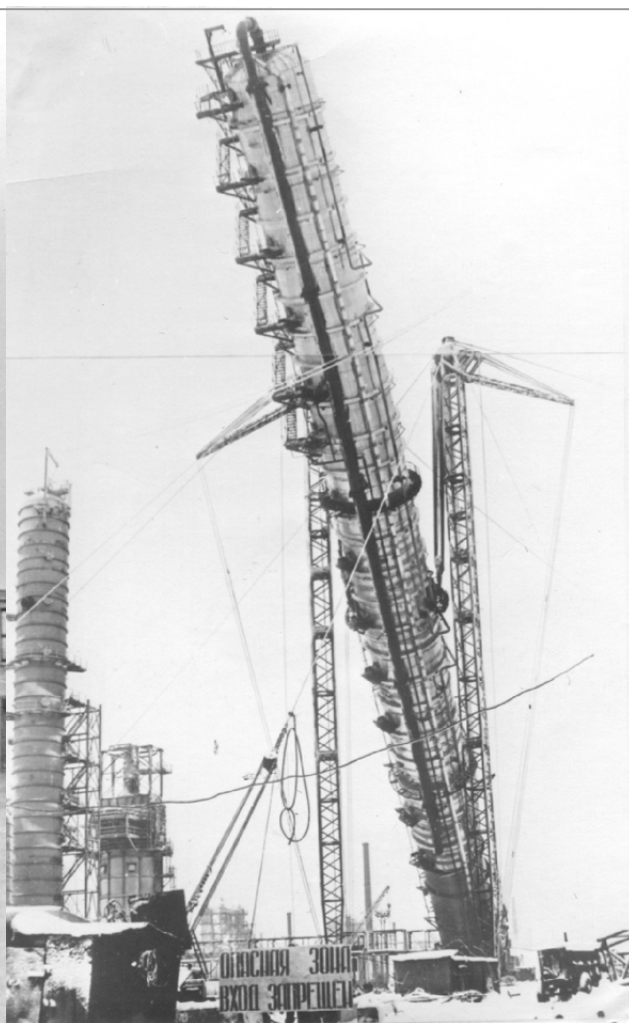


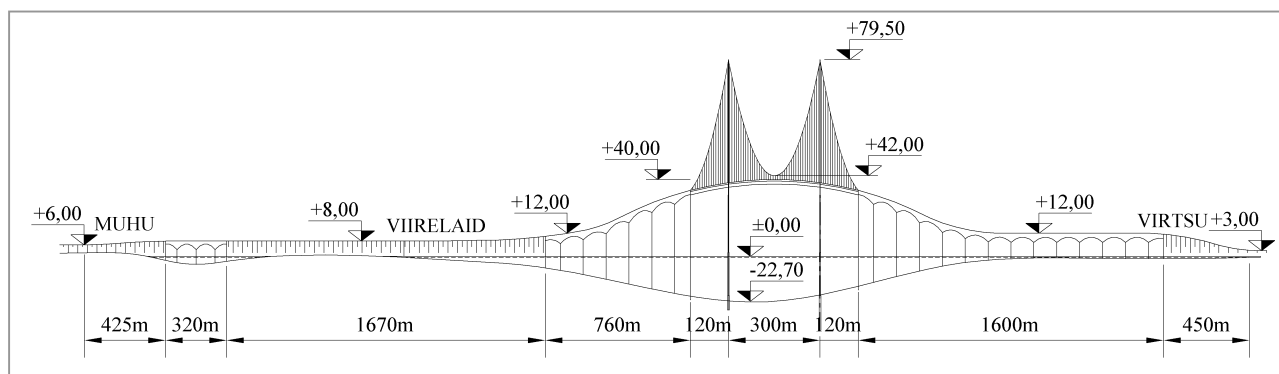
Foto 9.  
TTÜ osavõtul loodud mastkraana 1000 t reaktori montaažil.

aspirant Ivar Talvik konstruktsiooni dünaamilise käitumise uurimise [Õiger, Talvik, 2001]. Kõlaekraani projekteerimise ja ehitamise ajal tuli käesoleva artikli autoril koos prof K. Õigeriga lahendada arvukalt tehnoloogilisi ja tehnilisi küsimusi. Algselt ette nähtud spiraaltrossid asendati ümarterasest varrastega. Konstrueeriti ümarvarraste ankurdussõlmed ja pingutuslукud, lahendati ekraani puitlaudise kontuurirõnga ühendamise probleemid jne, jne.

Käesoleva artikli autori tegevus rippildade valdkonnas algas üksikkaabli arvutusmetoodika laiendamise taladega jäigastatud rippkonstruktsioonidele [Kulbach, Talvik, 2001], kus lisaks kirjandusest teadaoleva metoodika analüüsile töötati välja lihtsustatud arvutusmeetod, milles üksikkaabli arvutusparameetrina esineb vaid jäikustala suhtelise paindejäikuse parameeter. Meetodi esimeseks rakenduseks praktikas oli Viljandi lossisilla rekonstrueerimise projekt (koos prof Siim Idnurmega). Tõsisemal kujul kerkisid rippildade uurimise ja projekteerimise küsimused päevakorda seoses osavõtuga tolleaegse Saare maavanema Juhan Saare juhitud Saaremaa püsiühenduse komisjoni tööst. Eesti Maanteed Tehnokeskuse tellimuse ning Eesti Teadusfondi grantide alusel tehti erinevate sillavariantide (eeskätt selle keske, laevatatava osa) võrdlev analüüs ning hinnati nende maksumust. Uurimistöös osalesid autori doktorandid Juhan Idnurm ja Egon Kivi ning dots Ivar Talvik.

Suure väina silla tüübi ja kesksilde suuruse valikul olid algselt uurimise all suhteliselt suure (maailmarekordilise või sellele lähedase) sildega rippildad. Suure väina vaatlusalust profiili iseloomustavad suhteliselt järsud sügavuse muutused, mille tõttu suurematele silletele vastab ankurplokkide oluliselt väiksem rajamissügavus ning maht. Arvestades aga rippilla (nagu ka vantsilla) pikkusühiku ca 2,5-kordset maksumust võrreldes tavalise talasillaga, võeti edasise uuringu aluseks laevatatavuse nõudest tulenevaid sillagabariite ning otsustati piirduda sildega 300–480 m. Ehitati tavalise rippilla mudel (M 1 : 100), mis järgnevalt ehitati ümber nn “iseankurduvaks” konstruktsiooniks ning lõpuks kombineeritud ripp-vantsillaks (foto 10). Ümberehituse põhjuseks oli tavalise, sügavate ankurplokkidega silla ning “iseankurduva” rippilla ehitushinna võrdlus erinevatel silletel, mis näitas viimase märgatavalt väiksemat maksumust Suure väina silla trassi reaalsete parameetrite puhul. Rippilla täiendamine vantidega on otstarbekas silla jäikustalade montaaži seisukohalt (see on soodus ka silla töötamise seisukohalt ühepoolisel koormamisel). Silla üldskeem on toodud joonisel 3 ja selle keskosa ruumiline kujutis fotol 11.

Kombineeritud ripp-vantsilla projekteerimine nõuab nn diskreetse arvutusmudeli kasutamist. Viimase rakendamist nii tavaliste rippildade kui ka kombineeritud ripp-vantsilla arvutamisel silla üldisel ja ka kohalikul koormamisel kajastavad koos J. Idnurmega avaldatud tööd [Kulbach jt, 2000].



Joonis 3. Saaremaa püsiühenduse üldskeem autori ettepaneku alusel.

Foto 10.  
Suure väina kesksilla mudel TTÜ ehitiste projekteerimise instituudi laboris.



Foto 11.  
Suure väina kesksilla arvutijoonis.



Suure väina silla projekti konstruktiivsete küsimuste lahendamisele lisaks on TTÜ ehitiste projekteerimise instituut teinud prof Ilmar Pihlaku

juhendamisel põhjalikud tasuvus- ja arvamus-uuringud [Saaremaa püsiühendus, 2000].

## RIPPKONSTRUKTSIOONIDE KÄITUMIST ISELOOMUSTAVATEST ARVUTUSMEETODITEST

### RIPPKONSTRUKTSIOONIDE ARVUTUSPROBLEEMIDE KÄSITLUSEST RAHVUSVAHELISTES VÄLJAANNETES

Rippkonstruktsioonide arvutusmeetodite areng on toimunud koos konstruktsioonide endi arenguga. Seetõttu on rippildade arvutusmeetodite areng

eelnenud rippkatuste arvutusmeetodite arengule. Rippildade arvutamisel kontinuaalse mudeli alusel kasutatakse F. Bleichi koostatud tasakaalu diferentsiaalvõrrandi transsendentset lahendit. Selles sisalduva kaabli jõu sidumiseks silla läbipain-



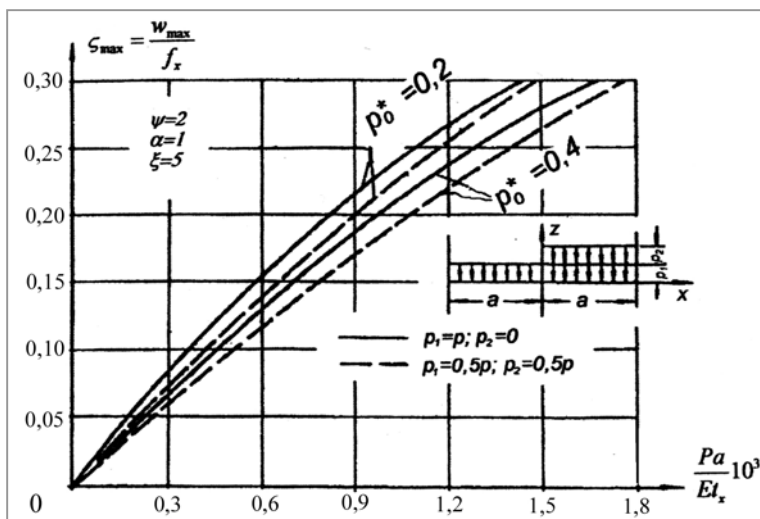
dega võrdsustatakse kaabli üldine pikenemine, lähtudes ühelt poolt silla läbipaindest ning teiselt poolt kaabli sisejõu muutusest. Enamik autoreid on siiski lähtunud diskreetsest arvutusmudelist [Smirnov, 1975; Bangash, 1999], eelistades enamasti kas tavalist või modifitseeritud lõplike elementide meetodit. Eri tüüpi (näiteks “iseankurduvate”) sildade arvutamise küsimusi on käsitletud konkreetsete sildade kontekstis [Ochendorf, Billington, 1999]. Ka tavaliste rippildade projekteerimise probleeme käsitletakse koos konkreetsete sildade kirjeldusega [Clark, 1999; Jorgensen jt, 1999].

Rippkatuste arvutamist käsitlevate trükiste avaldamise buum kuulub möödunud sajandi esimese poole lõpuaastatesse ning sajandi teise poole. Avaldati arvukalt monograafiaid [Otto, Schleyer, 1966; Kosenko, 1966; Kuznetsov, 1969; Dimitrijevič, Kasilov, 1968; Kollar, Szabo, 1984; Leonard, 1988; Buchholdt, 1998] ning korraldati rahvusvahelisi konverentse. Kuigi avaldatud töodes esineb arvukalt soovitusi üksikkaablite ja rippkatuste projekteerimiseks, põhineb enamik neist mudelkatsetuste ja ehituskogemuste kirjeldamisel, neis puudub erinevate konstruktsioonide arvutamise üldistav süsteem. Reeglina lähtutakse mitte täpsetest elastsusõpetuse seostest, vaid lihtsustatud valemitest. Üksikkaabli võrrandites on põhisuuruseks kaabli sisejõud, mille määramiseks kasutatakse

kuupvõrrand [Matselinskij, 1950; Katshurin, 1962] on lahendamiseks ebamugav, sageli ka ebatäpne. Seda on raske kohaldada eelpingestatud liitkonstruktsioonide arvutamiseks, sageli on ignoreeritud tugevate järeleandvuse mõju arvutustulemustele.

#### TTÜS VÄLJATÖÖTATUD UNIVERSAALSE ARVUTUSMETOODIKA ISEÄRASUSED

- TTÜs väljatöötatud, kontinuaalsel mudelil põhineva universaalse arvutusmetoodika lähtekohtaks (erinevalt teistest kirjanduses pakutavatest lihtsustatud meetoditest) on geomeetriselt mittelineaarse elastsusõpetuse täpsed võrrandid.
- Arvutuse võtme parameetrikaks on konstruktsiooni suhteline läbipaine. See määratakse kuupvõrrandist, milles kasutatakse dimensioonita parameetreid (joonis 4). Neis võrrandites on määravaks lineaarne liige, mis võimaldab võrrandit lihtsalt lahendada iteratsiooni teel (ka graafiliselt).
- Kaabli (konstruktsiooni) suhtelise läbipaine kui võtme parameetri kasutamine võimaldab selle suhteliselt lihtsat rakendamist eelpingestatud liitkonstruktsioonide arvutamisel, tänu põhikaabli ja jäigastuselementide ühisele läbipainetele. Mittelineaarsete lähtevõrrandite integreerimisel on kasutatud nii täpseid (üksikkaabli ja pingestuskaabliga eelpingestatud konstruktsiooni puhul) kui ka vajaliku täpsusega ligikaudseid arvutusmudeleid. Ligikaudseid mu-



Joonis 4. Erinevate rippkonstruktsioonide suhtelise läbipaine sõltuvus koormusest.

deleid on kasutatud juhtudel, kui täpne lahend puudub (hüparikujuline rippkatus) või on kasutamiseks tülikas (rippsild).

- Arvutustulemusi (ja konstruktsiooni käitumist) oluliselt mõjutav tugede järeleandvuse võetakse otseselt arvesse kaablite geomeetrisel vastavuse võrrandites (nende integreeritud vormis). Tugede siirded avaldatakse kaabli (võrgu) horisontaaljõudude lineaarse funktsioonina. Selle õiguspärasus on tõestatud autori töödes.
- Konstruktsiooni arvutamiseks ühepoolse (või mõne teise ebasümmeetrilise) koormuse mõjumiis kasutatakse pingeleolukute superpositsiooni printsiipi; selle kehtivust geomeetrisel mittelineaarsete konstruktsioonide puhul ja selle rakendamiseks vajalike lisatingimuste arvestamist on kirjeldatud artikli autori varasemates töödes.
- Paralleelselt kontinuaalse mudeliga on välja töötatud kaablite diskreetsetest lõikudest koosnevate konstruktsioonide arvutusmetoodika dubleeritud kaablitest ja talaga jäigastatud

kaablitest konstruktsioonide ning võrk-rippkatuste jaoks. Nende kasutamine on vajalik konstruktsiooni koormamisel suurte kesken- datud jõududega, aga ka juhtudel, kui kontinuaalse arvutusmudeli kasutamine pole otstarbekas.

- Kirjeldatud arvutusmeetodite paikapidavust on kontrollitud TTÜs läbi viidud mudel- katsetuste abil ja ka meil uuritud konstruktsioonide projekteerimise kogemustega nii rippkatuste (Tallinna ja Tartu laululavade kõlaekraanid) kui ka ripsildade (Viljandi lossisilla rekonstrueerimise projekt ja Suure väina silla eelprojekt) osas.
- Erinevate rippkonstruktsioonide arvutamiseks kasutatavaid valemeid iseloomustab nende ühtne struktuur. Kõigi vaadeldavate puhul määratakse konstruktsiooni suhteline läbipaine prevaleeriva lineaarse liikmega kuupvõrrandist (tabel 1). Arusaadavalt lisanduvad võrrandi kordajatesse, aga ka kaablite sisejõudude avaldistesse üleminekul keerukamatele konstruktsioonidele täiendavad kordajad.

## ETTEPANEKUD

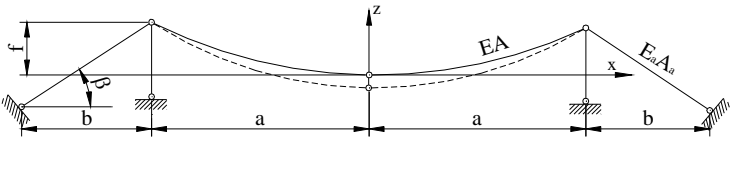
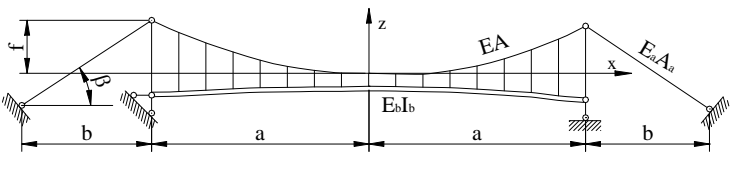
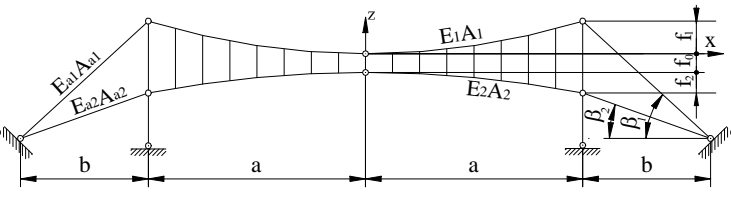
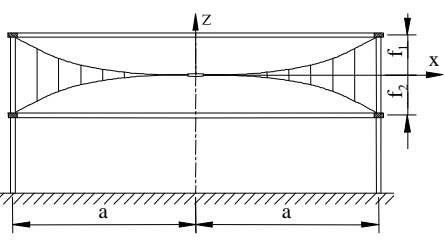
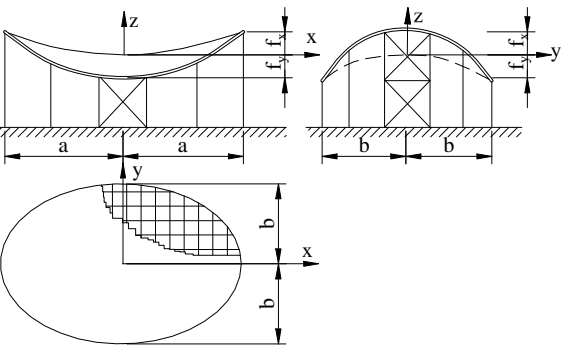
### KAABELKONSTRUKTSIOONIDE EHITUSKOGEMUSTE RAKENDAMISEKS EESTIS

Viimase poolsajandi jooksul on Eesti ehitus- ja projekteerimisorganisatsioonid kokku puutunud mitmekesiste kaabeltoetatud konstruktsioonide valmistamise ja montaaži probleemidega. On loodud unikaalseid võrkkatuseid, huvitavaid ripp- ja vantsildu ning osaletud mitmesuguste side- ja montaažimastide püstitamisel. Samal ajal pole kasutatud kõiki võimalusi seda tüüpi kergkonstruktsioonide laialdasemal rakendamisel, rääkimata spetsialiseerumisest nende projekteerimisel ja ehitamisel. Pole arenenud arvestatav koostöö ehitus- ja projekteerimisorganisatsioonide ning selle ala kõrgkompetentsiga teadlaste vahel. On püstitatud ehitisi, kus efektiivsete rippkonstruktsioonide asemel on kasutatud suurema materjali- ja isegi töömahuga tarindeid. Sellise olukorra peamiseks põhjuseks on meie projekteerijate teatav umbusk ja ehitajate liiga väikesed kaasaegsete kaabeltoetatud

konstruktsioonide ehitamise kogemused. Paljudel juhtudel (näiteks sidemastide puhul) on loobutud konstruktsioonide valmistamisest ja montaažist välisfirmade kasuks.

Allakirjutanu arvates võiks kaabel- ja kaabeltoetatud konstruktsioonide ning nende ehitamise areng Eestis toimuda kas ühe spetsialiseeritud firma käivitamise teel või vastava allüksuse loomise teel mõnes arenenud ehitusfirmas, silmas pidades koostööd Euroopa Liiduga. Selline firma *resp* allüksus võiks oma peale võtta enamiku Eestis, aga ka naabermaades püstitatavate vantidega toetatud mastide ja ripsildade ehitamise, silmas pidades ka lähitulevikus ehitatavat Suure väina silda. Samal ajal võiks välja arendada ka rippkatustega kaetud spordi- ja vaatesaale. Siinkohal on huvitav silmas pidada Hiina kogemust.

Erinevate rippkonstruktsioonide läbipained ja kaablite sisejõud

Rippkonstruktsiooni skeem	Kuupvõrand konstruktsiooni suhtelise läbipainde määramiseks
	$\zeta_0^3 + 3\zeta_0^2 + (2 + p_0^*)\zeta_0 = p^*$ $\zeta_0 = \frac{w_0}{f} \quad \delta = \frac{f}{a}$ $p_0^* = \frac{H_0}{\Phi} \quad p^* = \frac{P}{\Phi} \quad P = \frac{pa^2}{2f}$
	$\zeta_0^3 + 3\zeta_0^2 + (2 + \rho + p_0^*)\zeta_0 = p^*$ $\zeta_0 = \frac{w_0}{f} \quad \delta = \frac{f}{a}$ $p_0^* = \frac{H_0}{\Phi} \quad p^* = \frac{P}{\Phi} \quad P = \frac{pa^2}{2f}$
	$(1 + \psi)\zeta_0^3 + 3(1 - \alpha\psi)\zeta_0^2 + [2(1 + \alpha^2\psi) + (1 + 1/\alpha)p_0^*]\zeta_0 = p^*$ $\zeta_0 = \frac{w_0}{f_1} \quad \delta_1 = \frac{f_1}{a}$ $p_0^* = \frac{H_0}{\Phi} \quad p^* = \frac{P}{\Phi} \quad P = \frac{pa^2}{2f_1}$
	$(1 + \psi)\zeta_0^3 + 3(1 - \alpha\psi)\zeta_0^2 + [2(1 + \alpha^2\psi) + p_0^*(1 + 1/\alpha)]\zeta_0 = p^*$ $\zeta_0 = \frac{w_0}{f_1} \quad \delta_1 = \frac{f_1}{a}$ $p_0^* = \frac{H_0}{\Phi} \quad p^* = \frac{P}{\Phi} \quad P = \frac{pa^2}{6f_1}$
	$(1 + \psi + 4\xi)\zeta_0^3 + 3[(1 - \alpha\psi) + 2(1 - \alpha)\xi]\zeta_0^2 + \{2[(1 + \alpha^2\psi) + (1 - \alpha)^2\xi] + p_0^*(1 + 1/\alpha)\}\zeta_0 = p^*$ $\zeta_0 = \frac{w_0}{f_x} \quad \delta_x = \frac{f_x}{a}$ $p_0^* = \frac{H_0}{\Phi} \quad p^* = \frac{P}{\Phi} \quad P = \frac{p_1 a^2}{2f_x}$ $\mu = 1 + 1/\psi$

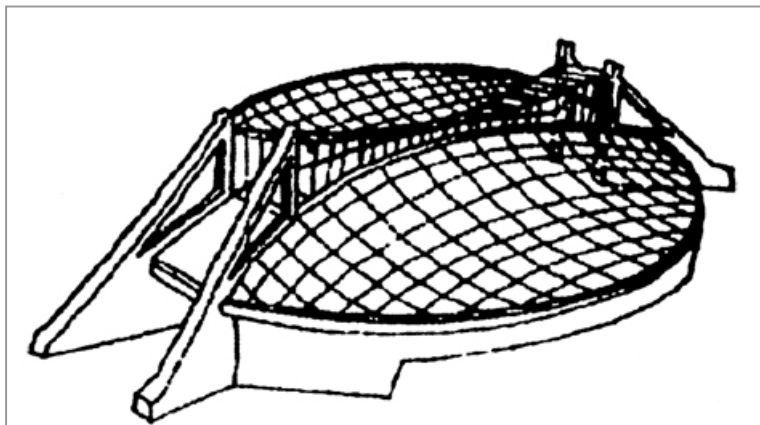


Tabel 1

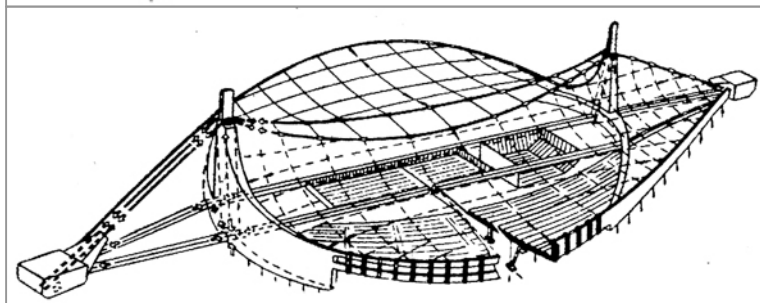
Kaabli sisejõu juurdekasv kN(kN/m)	Kaabli tõmbejäikus kN(kN/m)	Jäikusparameetrid
$H - H_0 = \Phi \zeta_0 (2 + \zeta_0)$	$\Phi = \frac{2EA\delta^2}{3(1 + \kappa + \vartheta)}$	$\vartheta = \frac{EAb}{E_c A_a a \cos^3 \beta}$
$H - H_0 = \Phi \zeta_0 (2 + \zeta_0)$	$\Phi = \frac{2EA\delta^2}{3(1 + \kappa + \vartheta)}$	$\rho = \frac{8 E_b I_b}{3 \Phi a^2}$ $\vartheta = \frac{EAb}{E_c A_a a \cos^3 \beta}$
$H_1 - H_{01} = \Phi \zeta_0 (2 + \zeta_0)$ $H_2 - H_{02} = -\psi \Phi \zeta_0 (2\alpha - \zeta_0)$	$\Phi = \frac{2E_1 A_1 \delta_1^2}{3(1 + \kappa_1 + \vartheta_1)}$	$\psi = \frac{E_2 A_2 (1 + \kappa_1 + \vartheta_1)}{E_1 A_1 (1 + \kappa_2 + \vartheta_2)}$ $\vartheta_1 = \frac{E_1 A_1 b}{E_{a1} A_{a1} a \cos^3 \beta_1}$ $\vartheta_2 = \frac{E_2 A_2 b}{E_{a2} A_{a2} a \cos^3 \beta_2}$
$H_1 - H_{01} = \Phi \zeta_0 (2 + \zeta_0)$ $H_2 - H_{02} = -\psi \Phi \zeta_0 (2\alpha - \zeta_0)$	$\Phi = \frac{2EA\delta^2}{3(1 + \kappa + \vartheta)}$	$\psi = \frac{E_2 A_2 (1 + \kappa_1)}{E_1 A_1 (1 + \kappa_2)}$
$H_x - H_{0x} = \Phi \zeta_0 [(2 + \zeta_0) + 2(1 - \alpha + \zeta_0)\xi]$ $H_y - H_{0y} = -\beta^2 \Phi \zeta_0 [(2\alpha - \zeta_0)\psi - 2(1 - \alpha + \zeta_0)\xi]$	$\Phi = \frac{5Et_x \delta_x^2}{9(1 + \kappa_x)(1 + \mu\xi)}$	$\psi = \frac{Et_y a^4 (1 + \kappa_x)}{Et_x b^4 (1 + \kappa_y)}$ $\xi = \frac{5Et_y a^3 \sqrt{a/b}}{72E_c I_c (1 + \kappa_x)}$

Viimase aja ehitusboom Hiinas haarab mitte ainult kaabeltoetatud sildu, vaid ka massiliselt ehitatavaid rippkatusega spordihooneid. Tähelepanu äratavad Hiina kogemused spordihoonete ehitamisel keskastme koolide juurde. Näitena võib tuua Sichuani Gümnaasiumi ja Chaoyangi Gümnaasiumi hoonete (joonis 5) katusekonstruktsioonid [Recent spatial..., 2006]. Nimetatud hoone võrkkatvus on

lähedane Jaapani olümpiastaadioni katusekonstruktsioonile (joonis 6). Laialdasemaks kasutamiseks Eestis ja meie naabermaades võiks siiski soovitada kõige ökonoomsemat katusekonstruktsiooni, mille kontuurirõngas on ellipsikujuline, pikilõige on kumera ja põiklõige nõgusa parabooli kujuline (foto 12).



Joonis 5.  
Hiina Chaoyangi Gümnaasiumi spordihoone katusekonstruktsiooni skeem.



Joonis 6.  
Jaapani olümpiahalli katuse konstruktsiooni skeem.

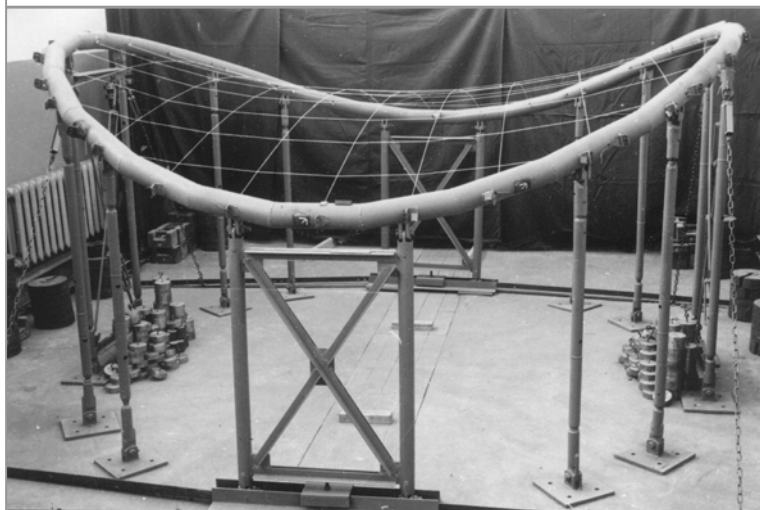


Foto 12.  
Hüperboolse paraboloïdi kujulise rippkatuse võimaliku tüüpkonstruktsiooni mudel.

Sel puhul saab soodsalt ära paigutada keskväljaku areeni ning katuse tõusvate osade alla astmelised tribüünid pealtvaatajatele. Muidugi ei saa välis- tada ka teisi konstruktiivseid lahendusi – otstar- bekateks võivad kujuneda ühest või kahest sadu- lakujulisest võrgust kolme või nelja toetava kaare- ga katused, ringikujulise kontuuri ja radiaalkaab- litega eelpingestatud süsteem, trapetsikujulise kontuuriga sadulpindade kombinatsioon, aga ka muud võimalused.

## VIITED

- Bangash, M. Y. H. 1999. Suspension and cable- stayed bridges. Prototype bridge structures. Thomas Telford Publ., London.
- Buchholdt, R. 1998. Introduction to cable roof structures. Thomas Telford, London.
- Clark, J. 1999. Triple-jump triumph (The Kuru- shima Kaikyo bridges). Bridge Design and Eng., 15, 27-31.
- Dmitrijev, L. G., Kasilov, A. V. 1968. Cable Roofs. Budivelnik, Kiev, (in Russian).
- Engelbrecht, J. 1971. A nonlinear dynamic analy- sis of hanging structures. Research Conf. 50 years of Building Research Institute of the Technical University of Prague. Prague, 26-32.
- Jorgensen, G.-R., Petersen, A., Pettersson, L. 1999. Hoga Kusten Bridge, Sweden. Struct. Eng. Internat., 9, 106-108.
- Katshurin, V. K. 1962. Theory of Suspension Sys- tems. Strojizdat, Moscow. (in Russian).
- Kollar, L., Szabo, J. 1984. Structural design of cable-suspended roofs. Ellis Horwood, Chichester.
- Kosenko, I. S. 1966. Suspension roof structures. Stroyizdat, Moscow, (in Russian).
- Kulbach, V. 1995. A new hypar-network in Esto- nia. Proc. Nordic Steel Constr. Conf. 95. Stock- holm, 2, 733-740.
- Kulbach, V. 1995. Statical analysis of girder- or cable-stiffened suspended structures. Proc. Eston. Acad. Sci. Eng., 1995, 1, 2-19.
- Kulbach, V. 1999. Half-span loading of cable structures. J. Constr. Steel Res., 49, 167-180.
- Kulbach, V., Idnurm, S., Idnurm, J. 2000. Static analysis of suspension bridges loaded by concent- rated forces. J. Struct. Mech. Helsinki, 34 (2), 3- 14.
- Kulbach, V., Lääne A. 1999. Analysis of sus- pension structures with radial cables. Proc. of 6th Int. Conf. on Modern Building Materials, Struc- tures and Techniques, Vilnius, Technika, 208- 213.
- Kulbach, V, Talvik, I. 2001. Bridge structures for the fixed link Saaremaa. Krokeborg, J. (ed.). Strait Crossings 2001. Balkema, Lisse, 221-226.
- Kuznetsov, E. N. 1969. Introduction to the Theory of Cable Systems. Strojizdat, Moscow, (in Rus- sian).
- Leonard, J. W. 1988. Tension Structures. Behavi- our and Analysis. Mc Graw-Hill, New York.
- Matselinskij, R. N. 1950. Static calculation of fle- xible suspension structures. Gosstroyizdat, Mos- cow, (in Russian).
- Ochendorf, J. A., Billington, D. P. 1999. Self- anchored suspension bridges. J. Bridge Engin., 4, 151-156.
- Otto, F., Schleyer, F. K. 1966. Zugbeanspruchte Konstruktionen. Verlag F. Otto, Berlin.
- Recent Spatial Structures in China. 2006. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Special Issue, 47, 2.
- Saaremaa püsiühendus. Tasuvusuuring. 2000. EV Maanteeameti Tehnokeskus.
- Smirnoff, V. A. 1975. Long-span Suspension Bridges. Vyshaja Škola, Moscow, (in Russian). Special issue on prestressed suspension structures. 2002. Proc. Eston. Acad. Sci. Eng., 8, 2.
- Õiger, K., Talvik, I. 1990. Determination of dy- namic characteristics of saddle-shaped suspension roof. Trans. Tallinn Techn. Univ., 721, 32-37.

# KAS JA MILLISEID MATERJALIUURINGUID OOTAB EESTI TTÜ MEHAANIKATEADUSKONNALT

*Priit Kulu*

Tallinna Tehnikaülikooli materjalitehnika instituut

## MILLEGA ON TEGELETUD VIIMASED 50 AASTAT?

Materjalid ja materjalitehnoloogiad on üks valdkondadest, mida on Eestis viljeletud tolleaegses Tallinna Tehnikainstituudis, nüüdses Tallinna Tehnikaülikoolis (TTÜ) selle loomisest peale, s.o alates 1936. aastast.

“...Nii oli TTÜ juures asuva Riikliku Katsekoja ülesandeks mehaaniliste ja füüsikaliste katsete, analüüside ja proovimiste, tehniliste mõõduriistade ja tööstusmasinate uurimise ja normimise läbiviimine. ...Katsekoja mehaanilise osakonna tegevus piirdus mitmesuguste tööstuses ja ehitustegevuses tarvitavate materjalide (teras, malm, tina, vask, pronks, tsement, lubi, betoon, looduslikud kivid, telliskivid ja muud kunstkiivid, isolatsioonimaterjalid jm) katsetustega tellija ülesandel. ...Tähtsamaist lahendada tulnud küsimustest võiks mainida Eesti Rahvusliku Jõukomitee ülesandel läbiviidavaid mehaanilisi ja metallograafilisi uurimistöid vanade aurukatelde materjalidega, ehitatavate sildade ehitusel tarvitavate mitmesuguste materjalide kõlblikkuse uurimisi ja rida teisi.” [Eesti Vabariigi..., 1939].

Enne 1950ndaid puudusid Tallinna Tehnikaülikooli tolleaegsetel kateedritel kindlad uurimissu-

nad, seda ka mehaanikateaduskonna kateedritel. Aastat 1955 võib lugeda kulumisalaste uurimistööde alguseks TTÜs, mil avati aspirantuur ja võeti vastu aspirandid, kelle teemad olid seotud erosioonkulumisega.

Järjepidevalt on 50 aasta jooksul väitekirjade (üle 30) ja firmade poolt tellitud uurimistööde näol kujunenud mahukas teaduslik pagas, sealhulgas originaalne katsetusmetoodika ja -aparatuur ning energeetiline löögiteooria [Kulu, 2006].

Kulumisalase teadustemaatika kõrval käivitus 1960ndate aastate alguses teine kulumisega tiheidalt seotud – pulbermetallurgia ja kulumiskindlate pulbermaterjalide – temaatika, millele 1990ndate keskpaiku lisandus kulumiskindlate pinnete ja pinnatehnoloogia temaatika.

Viimatinimetatud temaatikad hõlmavad materjalide loomise põhimõtteid, uusi originaalseid kulumiskindlaid materjale ja pindeid, kulumise modelleerimist ja komposiitstruktuuriga materjalide erosioonkulumise teooriat. Ilmunud on 6 monograafiat ja arvukalt rahvusvaheliselt aktsepteeritud teaduspublikatsioone.

## MILLIST TEADUST VILJELEDA?

Kas seada eesmärgiks uuringute läbiviimine, kindlustamiseks heatasemelist õppetööd? Põhineb ju kvaliteetne ülikooliharidus tugeval teadustööl, tagades samas ka teaduse rahvusvahelise konkurentsivõime.

Või läbi viia uuringuid, mille peamiseks liikumapanevaks jõuks on Eesti, – s.o tehnika/tehnoloogiapõhised uuringud. Sel juhul on määravaks

majanduse konkurentsivõime arendamine, teaduse toetamine uute innovaatiliste toodete ja teenuste turuletoomiseks [Küttner, 2003].

Kas Eesti peaks kaasa lööma teaduse prioriteetsetes tehnoloogiavaldkondades (bio- ja geenitehnoloogia, info- ja kommunikatsioonitehnoloogia, materjalitehnoloogia) või eelkõige arendama valdkondi, mis on elutähtsad Eesti majandusele (ener-

geetika, transport, puidu- ja keskkonnatehnoloogiad)? Vastust küsimusele tuleks otsida suundu-

mustest materjalitehnoloogiate valdkonnas Euroopas.

## SUUNDUMUSED TEHNOMATERJALIDE VALDKONNAS EUROOPAS

Euroopas teaduse rahastamiseks mõeldud raamprogrammide kõrval on suured lootused pandud tehnoloogiaplatformidele. Tehnoloogiaplatform on suhteliselt uus organisatsioonivorm, mille eesmärgiks on viia erasektor kokku avaliku sektoriga. Eesmärk on arendada keskmise- ja pikemaajalisi teadus- ja uurimisprojekte ning tehnoloogiat ja luua turgu saavutatav mahaüümiseks.

Käesolevaks ajaks realiseerunud 30st erinevast tehnoloogiaplatformist on materjalitehnoloogiaga seotud:

- kolm energeetikat puudutavat platvormi (päikeseelemendid, vesiniku- ja kütuseelemendid, null-emissiooniga jõujaamad);
- kaks nanotehnoloogiat puudutavat platvormi (üks neist meditsiiniga seotud);
- nüüdistehnomaterjalide tehnoloogiaplatform.

Nüüdistehnomaterjalide tehnoloogiate (*Advanced Engineering Materials Technologies* – AEMT) platvormi EuMaT koostisosadeks on [EuMaT Roadmap, 2006]:

- üldtehnoloogiad (omased paljudele erinevale tehnoloogiaplatformidele);
- täiesti uute materjalisüsteemide arendamine (nano-, komposiit- ja multimaterjalid);
- materjalide degradatsiooni mehhanismidest arusaamine;
- materjalide ja toodete juhtimise kontseptsioonid;
- materjalitehnoloogiate rakendused.

EuMaT uurimistegevus on suunatud järgmiste nüüdistehnomaterjalide gruppidele:

- multifunktsionaalsed gradientsete omadustega tehnomaterjalid;
- tehnomaterjalid tööks ekstreemsetes tingimustes, sh kõrgetemperatuursus ja kergekaalulisus;
- multihübriidmaterjalide süsteemid (nüüdistmaterjalid kombinatsioonis tavamaterjalidega);

- kaasnevad materjalitehnoloogiad (nt töötlemine, liitmine);
- materjalide ja protsesside multiskaalal modelleerimine.

EuMaT põhitemaatika ja peamised arendusvaldkonnad on järgmised:

### MATERJALID ENERGIATOOTMISEKS JA KESKONNAKAITSEKS

- materjalid energia ülekandeks ja akumuleerimiseks;
- materjalid elektritootmiseks ja puhtad kütused;
- materjalide projekteerimine ja valik lähtudes uuendamisest ja korduvkasutamisest;
- materjalid energia konserveerimiseks ja efektiivselt kasutamiseks.

### UUED MATERJALID JÄRGMISE GENERATSIOONI TRANSPORDI TARVIS

- uued kergmaterjalid sõidukikerede jaoks;
- uued interjöörimaterjalid;
- uued kergtraatmaterjalid;
- uued materjalid elektrirongide jaoks;
- kütuse transpordi jaoks energiaefektiivsete materjalide saamise protsessid;
- uued liite- ja montaaži/demontaažitehnoloogiad;
- uued nanostruktuursed materjalid integreeritud andurite ja aktuaatoritega;
- uued summutavate omadustega komposiitmaterjalid.

### NANOSTRUKTUURSED MATERJALID MIKROKOMPONENTIDE JA -SÜSTEEMIDE TARVIS

- keerukate nanoobjektide modelleerimine, projekteerimine ja maatriksid nanoobjektide jaoks;
- tehnoloogiate arendus nanoobjektide ja -materjalide tootmiseks ning kirjeldamiseks;
- nanoobjektid ja -materjalid autodusele, biomeditsiinile ning energeetikale.

## NÜÜDISTEHNOMATERJALIDE PROJEKTEERIMINE

Näeb ette uue “integreeritud multiskaalal koostöövõrgustiku” arendust, mille põhielementideks on keeled ja moodulid kompleksi

struktuur – omadused – töökindlus – protsessid kirjeldamiseks: strateegiamoodul, komplekteerimismoodul, moodulid spetsiifilisteks otstarveteks projekteerimiseks multiskaalal, andmete ja teadmiste ning visualiseerimise moodulid.

Nüüdistmaterjalide tehnoloogiate platvormi EuMaT realiseerimisest oodatav kasu ja väljundid on eelkõige järgmised:

- intermetalliidid ekstreemseteks ja biomeditsiini rakendusteks;
- metall-keramikakomposiitmaterjalid;
- uued gradienttalitusomadustega materjalid ja multipinded;
- kasutusrisi (purunemise tõenäosuse) vähendamine;
- nanostruktuursete materjalide projekteerimise ja kasutuse paindlikkus;
- “rohelise projekteerimise” ideede toetamine.

## NÄGEMUS TTÜ TEADUS–ARENDUSTEgevuse LÄHIAJA SUUNDUMUSTEST TEHNOMATERJALIDE JA MATERJALITEHNOLOOGIATE VALDKONNAS

Oma materjalitehnoloogia arenguprogrammiga on TTÜ kindlaks määranud teadus- ja arendustegevuse prioriteedid uute teaduspõhiste materjalide ja tehnoloogiate väljatöötamiseks [Materjalitehnoloogia 2005–2008, 2005]. Nende materjalide ja tehnoloogiate valdkondadeks on kavandatud:

- mikro- ja nanotehnoloogilised materjalid (päikeseenergeetikamaterjalid ja -seadised);
- multimaterjalid ja -tooted (multifunktsionaalsed metall-keramikased ja keramikametalsed pulbermaterjalid, sh tribomaterjalid; toodete kiirvalmistustehnoloogiad; materjalide korduvkasutus);
- polümeer- ja komposiitmaterjalid;

- mineraalsed loodusmaterjalid (looduslike ehitusmaterjalide ja muude looduslike materjalide kasutusvaldkondade mitmekesistamine ja looduslike materjalide füüsikalise-keemiliste muutuste selgitamine).

Materjalitehnoloogia arenguprogrammi väljundiks on 4 baaslaborit ülnimetatud valdkondades. Põhiesmärgiks on rahvusvahelisel tasemel teadustöö ja ka oma osa andmine materjalidele ja materjalitehnoloogiale toetava ettevõtluse arengusse, innovatsiooni toetamine nii Eestis kui ka kogu maailmas, doktoriõppe toetamine ja selle kõrge efektiivsuse tagamine. See realiseerub aga vaid juhul, kui Eesti riik on valmis investeerima antud valdkonna infrastruktuuri.

## MILLIST TEADUST VAJAB EESTI VABARIIGI TÖÖSTUS?

Eesti majanduse vajadusi ja jätkusuutlikkust silmas pidades on märksõnadeks tootearendus, materjalide säästtehnoloogiad, materjali ringlus (korduv- ja taaskasutus). Seni eraldi vaadeldud tootearendust, tootmistehnikat, materjalitehnoloogiat käsitletakse tänaste arusaamade järgi ühe protsessina – toote kogu elutsükli realiseerimisena (*product realisation*), s.o projekteerimisest kuni kasutatud toote ümbertöötlemiseni.

Toodete disaini ja materjalide kõrval on oluliseks toodete valmistamine – innovatiivsete toodete ja

tootmistehnoloogiate evitamine tootmises. Innovaatiivsed tööstustehnoloogiad – materjalide töötlemismeetodid (plasma-, laser-, vesi- jt hübriidtootlusmeetodid jm), kiirvalmistustehnoloogiad (sh töövahendite kiirvalmistamine, prototüüpide kiirvalmistamine) ning väikeseeriatootmise kaasaged tehnoloogiad (*Amino* tehnoloogiad, *Dieless NC* vormimine) – on valdkonnad, kuhu on suunatud põhitähelepanu lähiaastatel. Silmas peetakse mitte ainult nende loomist, vaid ka olemasolevate evitamist – tehnosiiret.

Materjalide säästkasutus ja säästtehnoloogiad haakuvad tihedalt selliste nähtustega nagu korrosioon ja kulumine. On ju ca 80%-l juhtudest detaili, masina või konstruktsiooni rivist väljalangemise põhjusteks korrosioon ja kulumine. Sellistes valdkondades nagu mäendus, paberi- ja tselluloositööstus jm, on ca 40% toote elutsükli kuludest seotud kulumise ja varuosadega, 25% energiaga, 5–10% tööjõukuludega ning ainult 15–20% esialgse soetus/kapitalikuludega [EuMaT Roadmap, 2006].

Kaitse korrosiooni ja kulumise vastu haakub otseselt uute gradienttalitusomadustega materjalide, kulumiskindlate tribomaterjalide (pinnamodifitseerimine, pinded, uued pindamistehnoloogiad; hõõrdematerjalide osas näiteks kõrgete hõõrdomadustega pidurikettad ning ka kergekaalulised, kõrgetemperatuuri- ja termoväsimuskindlad materjalid) loomisega.

Kulumine on valdkond, millega on TTÜs tegeletud enam kui 50 aastat. Need on uuringud kulumise mehhanismide ning kulumiskindlate materjalide ja pinnete valdkonnas, kus on saavutatud arvestatav rahvusvaheline tase. See on suund, mille jätkamist tuleb pidada otstarbekaks. Olgu see siis seotud:

- materjali pinnaomaduste ning kulumise pinna-mehhaanika uurimisega;
- uute metall-keramikiliste ja keramika-metallsete pulberkomposiitmaterjalide ja -pinnete loomisega;
- metallsete materjalide pinna modifitseerimise ja gradientomadustega materjalide loomisega;
- materjalidega põlevkivienergeetika tarvis.

EuMaT tehnoloogiaplatvormiga on TTÜ materjalitehnoloogidel koostöö kogemus, eelkõige läbi

## SUUNAD TEHNOLOOGIAARENDEUS- JA TIPPKESKUSTELE

Tänase teaduse puuduseks ühelt poolt tuleb lugeda selle liigset akadeemilisust, teiselt poolt tööstuse vähest huvi teadusuuringute tellimisel ja ka ülikooli tagasihoidlikkust ning vähest initsiatiivi rakendusuuringute vastu. Ülikoolihariduse (doktorriõppe) toetamisel tuleb suund võtta uute mater-

Soome firma METSO tütarfirma METSO *Powdermet*, mis tegeleb uute metall-keramikiliste komposiitmaterjalide ja -pinnete väljaarendamisega. See on ka EUMaTi üks põhivaldkondi.

Toodete elutsükkel ja materjalide ringlus on teine oluline valdkond, mis haakub “roheline projekteerimise” ideedega. Tooraine ja tehnomaterjalide ressursse silmas pidades (enamik metallide varudest ammendub lähema 30–50 aasta jooksul) on nii nende ringlus (aja ära elanud toodete korduvkasutus, ümbertöödeldud materjalide taaskasutus) kui ka materjalide säästtehnoloogiate kasutus muutumas üha aktuaalsemaks.

Kui senine tegevus antud valdkonnas on olnud põhiliselt suunatud materjalide ja toodete tugevdamisele (kaitse kulumise ja korrosiooni vastu), kasutatud materjalide uute ümbertöötlusseadmete ja -tehnoloogiate väljatöötamisele (desintegraator-jahvatussüsteemid, jahvatusseadmete töökindlus), siis tulevikus tuleb põhirõhk suunata materjalide ja toodete kogu elutsüklile – materjali saamisest ja sellest toote valmistamisest kuni nende utiliseerimiseni välja.

Eesti masinaehituse, metallitööstuse ning aparaadi- ja elektroonikatööstuse ettevõtete huvi kasvab selliste tehnoloogiate vastu nagu:

- uued materjalid ja tooted (sh komposiit- ja multimaterjalidest tooted), nende ümbertöötlustehnoloogiad;
- uutest materjalidest toodete valmistamise säästtehnoloogiad (kõrg- ja ülitäppistöötlustehnoloogiad, täppisvalu, PM/HIP-tehnoloogia, uued survetöötlus- ja liitetehnoloogiad, kiirvalmistustehnoloogiad);
- teise jäätmetoorme kasutus (uued kasutusvaldkonnad, uute toodete loomine).

jalide ja innovatiivsete toodete turuletootmisele ja seda läbi riikliku või rahvusvahelise tippkeskuse.

TTÜ innovatsioonisüsteemi arendamiseks ning tehnoloogia ja oskusteabe siirdeks tuleks oluliselt panustada teaduse ja tootmise vahelistesse struk-

tuuridesse. Olgu näitena toodud 1999. a loodud Sihtasutus TTÜ Materjalitööstustehnoloogiate Siirdekeskus või juba mõnda aega kavandatud eelkõige masina- ja aparaadiehitusele orienteeritud tehnoloogiaarenduskeskus (TAK). Tõsi küll, esimeses TAKde voorus ei osutunud see väljavali- tuks, aga TTÜ mehaanikateaduskond ja Eesti Ma-

## VIITED

Eesti Vabariigi Tallinna Tehnikaülikooli Aastaraamat I, 1939.

EuMaT Roadmap, Version 27, June 2006 (Proposed priorities for the FP7 calls).

Kulu, P. 2006. 50-aastat erosioonkulumise alastest uuringutest TTÜ-s. Tallinna Tehnikaülikooli aastaraamat 2005, TTÜ kirjastus, 396-399.

sinatööstuse Liit (EML) on endistviisi seda meelt, et taoline lüli tööstuse ja ülikooli vahel on vajalik. Selge on ka asjaolu, et see realiseerub ainult ühiste pingutuste tulemusel – kui ettevõtted soovivad panna innovatsiooni ja tehnoloogiasirdesse ning ülikoolil kasvab huvi rakendusühtsuste vastu.

Küttner, R. 2003. Teadus- ja arendussüsteemi reformist. Tallinna Tehnikaülikooli aastaraamat 2001, TTÜ kirjastus, 313-317.

Materjalitehnoloogia 2005-2008. Teadus- ja arendustegevuse infrastruktuuri arendamise programm, 2005.



# KOMPLEKSSETE TEHNILISTE SÜSTEEMIDE OPTIMAALNE PROJEKTEERIMINE – TOODETE KONKURENTSIVÕIME TAGAMISE EELTINGIMUS

*Rein Küttner, Martin Eerme, Kristo Karjust Jüri Majak, Meelis Pohlak*  
Tallinna Tehnikaülikooli masinaehituse instituut

## SISSEJUHATUS

Raalprojekteerimise erinevate süsteemide (CAD/CAM/CAE süsteemide) kasutamine on muutunud ettevõtetes igapäevaseks praktikaks. Ka traditsioonilisel projekteerimisel kasutatakse üha enam arvutitel põhinevaid meetodeid, mis toetavad projekteerijat parimate ja vähem aega nõudvate lahendite leidmisel, integreerides erinevaid aspekte, nagu toote geomeetria, tehnoloogilised võimalused, ressursside olemasolu, toote maksumus, allhanke otstarbekus, ostutoodete kasutamine jms. Sealjuures iseloomustab arenguid üleminek üksiku toote projekteerimiselt sarnaste toodete pere projekteerimisele; ühe ettevõtte ja selle võimaluste ning ressursside arvestamiselt ettevõtete koostöövõrgule. Töötatakse välja ja evitatakse uusi tarkvara vahendeid, meetodika arendus pälvib üha enam teadlaste tähelepanu.

Projektlahendite otsimise ja optimeerimise (DSO – *Design search and optimization*) meetodika areng on kestnud ligi nelikümmend aastat ja käesoleval ajal on projekteerijate käsutuses mitmed võimsad

DSO-d toetavad süsteemid [Hopp, Spearman, 2001; Messac jt, 1996]. Üha olulisemaks saab vajadus kasutada otstarbekalt olemasolevaid vahendeid ja meetodeid, tagamaks ettevõtte konkurentsivõime.

Üldjuhul võib projektlahendite optimeerimist defineerida kui lahendite otsimist, mis annavad minimaalse (või maksimaalse) väärtuse etteantud sihifunktsioonidele ja rahuldavad etteantud piiranguid (tõkkeid) [Ravindran jt, 1987]. Sihifunktsioonideks on tavaliselt toote maksumus, tarneaeg, toote tasuvus ning mitmed toodete tehnilis-majanduslike omadusi kirjeldavad näitajad. Lahendeid piiravad tehnilised piirangud toodete parameetritele, tootmissüsteemist ja tehnoloogiast tulenevad piirangud, kasutada olevad ressursid jm. Optimeerimiseks kasutatavad seosed võivad sealjuures olla esitatud matemaatiliste avaldistena või saadud töömahukate simulatsioonidena arvutil või eksperimentidest/vaatlustest.

## PROJEKTLAHENDITE MULTIDISTSIPLINAARSE OPTIMEERIMISE MEETODID

Multidistsiplinaarne optimeerimine (MDO) on valdkond, mis uurib optimaalse projekteerimise probleeme toodete projekteerimiseks, integreerides mitmeid erinevaid inseneriteaduse valdkondi (aspekte). Meetodeid kasutatakse näiteks autode, laevade, elektroonikatoodete, arvutustehnika jms projekteerimiseks. Kõige laialdasemalt on MDO kasutatud aga lennu- ja kosmosetehnika projekteerimisel [Keane, Nair, 2005]. MDO lähtub vajadusest projekteerida kogu toote elutsükkel, arvesta-

des toote projekteerimisel muuhulgas ka tehnoloogilisi aspekte, tootmise otstarbekat korraldust jms.

MDO-d võib iseloomustada järgmiselt [AIAA Technical..., 1991]:

MDO on projekteerimiseks kasutatav inim-masin keskkond,

- mida kasutatakse tehniliste süsteemide projekteerimiseks konfliktsete tehniliste ja majanduslike eesmärkide ning piirangute tingimustes;

- mis kasutab samaaegse projekteerimise meetodeid, võimaldades lühendada projekteerimise aega;
- mis baseerub erinevate aspektide analüüsil, simuleerimisel ja hindamisel ning erinevate valdkondade projekteerimismeeskondade koostööl;
- mis kasutab üldistatud projekteerimismeetodeid ja -vahendeid, integreerides analüüsi parimate lahendite valikuprotsessiga.

Optimaalsete projektlahendite leidmine eeldab enamikel juhtudel multikriteeriaalse optimeerimise meetodite kasutamist. Erinevad kriteeriumid – toote hind, kasum, töömaht, toote tehnilised näitajad jne – seovad erinevaid projekteerimisetappe ja on sealjuures enamasti vastuolulised. Arvestades seda, kasutatakse projekteerimisel multikriteeriaalseid optimeerimismeetodeid, nagu eesmärgile orienteeritud (*Goal Programming*) ja füüsikalise planeerimise (*Physical Programming*) meetodid koos erinevate Pareto optimaalsete lahendite leidmise meetoditega [Keane, Nair, 2005; Küttner, Karjust, 2006; Messac jt, 1996].

Tallinna Tehnikaülikooli (TTÜ) masinaehituse instituudi teadustöö eesmärgiks on, kasutades ja arendades optimeerimise meetodeid, võimaldada kiiret otstarbekate projektlahendite leidmist mehhanotehnika valdkonna toodetele. Üldiseks eesmärgiks on tõsta toodete ja nende valmistamisprotsesside konkurentsivõimet, integreerides üheks tervikuks toodete, nende valmistamistehnoloogia projekteerimise ning tootmisressursside planeerimise. Oluliseks probleemiks sealjuures on projekteerijale otstarbeka arvutitoe leidmine.

MDO keskkonna realiseerimisel on kirjandusest teada mitmed lähenemised [Keane, Nair, 2005; Küttner, 2002]:

- Järjestikune multidistsiplinaarne lähenemine.
- Täielikult integreeritud optimeerimine (ühe tasemega süsteemid). Siin domineerib püüd esitada kogu projekteerimise protsess ühe mudelina (kasutades *all-at-once* tüüpi mudeleid). Sobib lihtsamate ülesannete puhul ja ei pruugi olla realiseeritav keerukamate ülesannete lahendamisel.

- Täielikult integreeritud mitmetasemelised süsteemid (*multi-level optimization*), kus erinevate ülesannete lahendus koondatakse sõltumatutesse alamsüsteemidesse. Probleemiks on sealjuures erinevate ülesannete vahel andmevahetuse ja koordineerimise tagamine.
- Kahetasemelised süsteemid (*Bi-level Integrated System*) [Keane, Nair, 2005; AIAA Technical..., 1991]. Taoline arhitektuur sobib kõige enam projekteerimise organiseerimisele ettevõttes, kus koordinaatoriks on projekti juht ja erinevateks alamsüsteemideks erinevate erialade projekteerijatest koostatud meeskonnad.
- Evolutsioonilised süsteemid (*Co-evolutionary Genetic systems*). Põhinevad looduslikele (bioloogilistele) süsteemidele iseloomulike geneetiliste algoritmide kasutamisel.

Masinaehituse instituudis on uuringud orienteeritud põhiliselt kahetasemeliste süsteemide kasutamisele, mille alamsüsteemides rakendatakse erinevaid optimeerimise tehnikaid ja meetodeid.

#### TOODETE OPTIMAALNE PROJEKTEERIMINE

Masina- ja aparaadiehituslikud tooted koosnevad paljudest komponentidest (detailidest, koostudest), mis üldjuhul projekteeritakse eraldi. Toote projekteerimist võib esitada mitmetasemelise, erinevate komponentide projekteerimisega seotud hierarhilise protsessina. Sealjuures tuleb projekteerimisel arvestada komponentide vastastikuseid seoseid.

Näiteks teleskoopliigendtõstuki projekteerimisel (vt joonis 1a) tuli rakendada raalintegreeritud projekteerimisvahendeid, loomaks toodet, mis vastaks esitatavatele nõuetele ning lisaks sellele eristuks turul olevatest. Projekteeritud tõstuk erineb oma konkurentidest järgmiste tunnuste poolest:

- Transportpikkus on 5,60 m (peakonkurendil 7,88 m). Transportpikkuse vähendamine võimaldab sõita kitsastel teedel, vähenevad transportdikulud.
- Maksimaalse teleskoobi väljasirutuse (12 m) korral on tõstuki korvis lubatud koormus 230 kg (2 inimest + tööriistad), peamisel konkureerival tootel 80 kg.

- Tõstuki stabiilsus on tagatud standardset tugi-  
jalgade toetusala suurendamata, mis suurendab  
paindlikkust tööde teostamisel.
- Konstruktsiooni optimeerimisega on tõstuki  
mass viidud alla 2500 kg.

Tõstuki projekteerimisel kasutati tootepere  
ideoloogiat, mis võimaldab luua erineva modifi-  
katsiooniga tooteid vastavalt tellija vajadustele või  
siis turunõudmisele.

Optimaalse projekteerimise teise näitena võib tuua  
komposiitmaterjalist valmistatud vanni (vt joonis  
1b). See toode on keeruka geomeetriaga ja suhteli-  
selt suur. Kuna tegu on suhteliselt kalli ja eksklu-  
siivse tootega, on kvaliteet eriti oluline. Kvaliteedi  
tagamiseks ja samas ka hinna mõistlikul tasemel  
hoidmiseks tuleb toote projekteerimisel kasutada  
keerukaid arvutusprogramme, mis on integreeritud  
optimeerimise süsteemiga. Et kasutatavad materja-  
lid on kallid, on mõistlik materjali kulu optimeeri-  
da, tagades samal ajal toote vastupidavuse. Toote  
keeruka kuju tõttu on mõistlik see valmistada eri  
piirkondades erineva paksusega, st materjalikulu  
lokaalselt varieerida. Kõlab küll lihtsalt, kuid see  
kujutab endast keerukat (st ka arvutusmahukat)  
ülesannet, sest kasutatavaid materjale on keeruline  
modelleerida, tuleb arvestada ka valmistamise  
protsesse jne. Joonisel 1b on näidatud optimeeri-

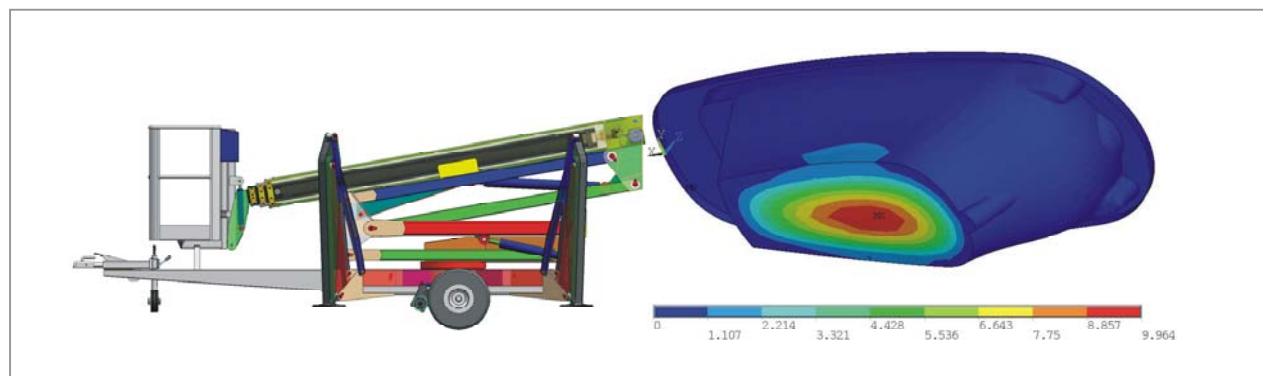
tud vann koormatud olekus. Erinevate värvitooni-  
dega on tähistatud erinevad deformatsiooni vää-  
rused.

Toodete projekteerimisel leiab üha enam ra-  
kendust topoloogia optimeerimine, mis hõlmab  
väga erinevaid valdkondi. Viimasel aastakümnel  
on eriti aktuaalne topoloogia optimeerimise kasu-  
tamine komposiitmaterjalist konstruktsioonide ja  
suuremahuliste konstruktsioonide projekteerimisel  
(materjali armatuuri optimaalne orientatsioon,  
kihtide paksused ja järjekord) [Majak, Hannus,  
2003].

Näitena võib tuua Euroopa suurima lennuki Air-  
bus 380 projekteerimise [Bendsoe jt, 2006]. Topo-  
loogia optimeerimise probleemi võib formuleerida  
järgmiselt

$$\begin{aligned} \min_{u, \rho} I^T u \\ K(\rho)u = f, \\ \sum_{i=1}^n v_i \rho_i \leq M, \\ \rho_i \in [0,1], \quad i = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

Võrratusena esitatud kitsendus on piirang kogu-  
massile ( $M$ ), kus muutujad  $\rho_i$  ja  $v_i$  on vastavalt  
 $i$ -nda elemendi tihedus ja ruumala. Kui  $\rho_i$  väärtus  
on 1, siis vastav element kuulub optimaalse konst-



a)

b)

Joonis 1.

Optimeeritavate toodete näited: a) teleskooptõstuk; b) komposiidist vann.

ruksiooni koosseisu, kui 0, siis mitte. Võrdusena antud kitsenduses on  $K$  jäikusmaatriks ning  $u$  ja  $f$  on vastavalt siirete ja koormuse vektorid.

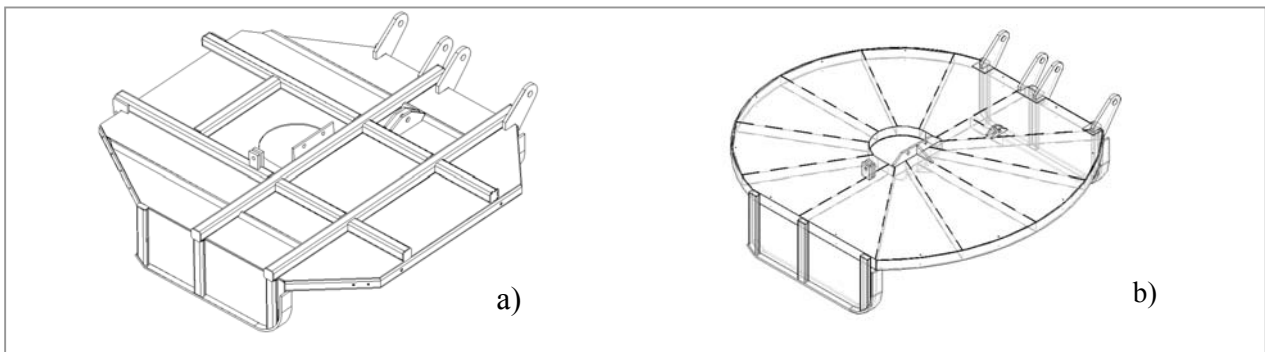
Topoloogia optimeerimise praktilise näitena on joonisel 2 toodud TTÜ masinaehituse instituudis projekteeritud kettniiduki tööorgani korpus [Eerme jt, 2004]. Eesmärgiks oli korpuse massi vähendamine, tagades liikurmasina (traktori) suurema stabiilsuse. Kettniiduk on mõeldud kasutamiseks võsalõikurina ja tasandusniidukina kraavikallastel ja teepeenardel kasvava võsa ning heina niitmiseks.

Korpus kujundati *sandwich* struktuurina. Selline lahend annab hea jäikuse ja massi ning hea tuge-

vuse ja massi suhte. Optimaalseks ribide asetuse määramiseks kasutati inseneriarvutuste programmi ANSYS topoloogia optimeerimise algoritme. Töö tulemusena vähenes korpuse mass 180 kg-lt 118 kg-ni (~35%).

#### TOOTEPERE OPTIMAALNE PLANEERIMINE

Tootepere projekteerimist võib käsitleda projekteerimisprotsessi hierarhia kõrgeima tasemega. Kooskõlas sellega tuleb esitada tootepere optimeerimise sihifunktsioonid (*analytical target cascading*) ja piirangud (*constraint based reasoning*). Näitena vaatleme tervisekapslite (joonis 3) tootepere optimeerimist AS WellSpa näitel [Küttner jt, 2006].



Joonis 2.

Kettniiduki korpuse topoloogia optimeerimise näide: a) esialgne versioon; b) optimeeritud versioon.



Joonis 3.

Tervisekapslite tootepere esindajad.

Tootepere optimaalsel planeerimisel määratakse pere üksikute toodete (derivaattoodete) valmistamise otstarbekad mahud ja toodete funktsioonide otstarbekas jaotus derivaattoodete vahel. Tootepere optimaalse planeerimise ülesande püstitus on järgmine [Küttner jt, 2006]: leida toodete pere  $p_i, i = 1, \dots, n$  tootmismahud  $X_i$  ja toodete omaduste  $F_{j,i}$  otstarbekas jaotus erinevate derivaattoodete vahel, mis tagab

MAKSIMAALSE kasumi tootepere tootmisest,  
MINIMAALSE tarne (valmistamise) aja

ja rahuldab tõkkeid, nagu:

- minimaalsed ja maksimaalsed müüginahud antud ajaperioodil;
- piirangud töökohtade/seadmete koormusele;
- piirangud materjalide ja ostutoodete (komponentide) tarnemahtudele.

Lahendusnäide on esitatud tabelis 1. Nimetatud ja ka järgnevate optimeerimisülesannete näidete lahendamiseks arvutil on kasutatud kombineeritud täisarvilise ja lineaarse planeerimise (*Excel Solver*) ja mittelineaarse planeerimise vahendeid.

Tabel 1

Tervisekapslite tootepere optimaalse planeerimise näide

Derivaattooted	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	
$X_1, X_2, X_3, X_4$	42	0	44	10	Tootmismahud
$F_{1,i}$	1	0	1	0	Täiendav tooteomadus-1
$F_{2,i}$	0	0	0	0	Täiendav tooteomadus-2
$F_{3,i}$	1	0	1	0	Täiendav tooteomadus-3
$F_{4,i}$	0	0	0	0	Täiendav tooteomadus-4

#### TEHNOLOOGIA

##### OPTIMAALNE PROJEKTEERIMINE

Tehnoloogia optimaalset projekteerimist võib vaadelda kahel tasandil:

- optimaalse töötlemismarsruudi planeerimine;
- operatsioonide optimaalne projekteerimine.

Tehnoloogia optimaalne projekteerimine tooteperele kasutab sihifunktsioonidena maksimaalset kasumit, püüdes samaaegselt hoida kulutused tootmisele (aeg, maksumus) minimaalsed. Tõketeks on vajadus toota antud parameetritega tooteid, tagada töökohtade lubatud koormus, materjalide, töövahendite jms kasutatavus. Marsruut tehnoloogia planeerimisel lähtutakse nn "tüüp marsruudist" tooteperele, mis sisaldab operatsioonide võimaliku järjestuse ja kasutuse (joonis 4).

Ülesande püstitus on järgmine [Küttner jt, 2006]: Leida vastuvõetavad tehnoloogiad (operatsioonide järjestus) tooteperele, mis annavad

MAKSIMAALSE kasumi,  
MINIMAALSE töötlemisaja

ja rahuldavad järgmisi tingimusi:

- igale seadmele ja/või töökohale lubatav koormus,
- piirangud materjalide/komponentide kasutatavusele,
- nõuetele vastavate toodete/detalide valmistamine.

Optimaalse marsruudi näide tervisekapslite tooteperele on esitatud tabelis 2.

Mehaanilise töötlemise operatsioonide kasutamise kontrolliks on töötatud välja närvivõrkude kasutu-

sel põhinevad mudelid (vt allpool ASENDUS-MUDELID PROJEKTLAHENDITE VÄLJUNDSÖLTUVUSTE MODELLEERIMISEKS).

Operatsioonide optimeerimise alal on instituudis pikaajalised kogemused. Sellele on lisandunud uued kasutusvaldkonnad, näiteks lehtmaterjali sammvormimise operatsiooni optimeerimine, kus püstitus on järgmine [Pohlak jt, 2004]:

Leida operatsiooni parameetrid  $p_z$ ,  $R$  ja  $\alpha$ , mis annavad maksimaalse tootlikkuse (minimaalse aja):

$$T = T(L, p_z, R, f, \alpha) \rightarrow \min$$

ja rahuldavad järgmisi tingimusi:

$$FD(R, p_z, \alpha) \leq [FD],$$

$$Ra(R, p_z, \alpha) \leq [Ra],$$

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max},$$

$$R_{\min} \leq R \leq R_{\max},$$

$$p_{z\min} \leq p_z \leq p_{z\max},$$

$$t(\alpha) \geq [t],$$

$$f \leq [f],$$

kus  $T$  on valmistusaeg,  $L$  – vormimise tööraja pikkus,  $p_z$  – vertikaalne sammusügavus,  $R$  – vormiva tööriista raadius,  $\alpha$  – vormitava geomeetria kalle vertikaali suhtes,  $FD$  – tasapinnaliste pindade tasapinnalisuse hälve,  $Ra$  – pinnakvaliteet,  $t$  – seina

paksus pärast vormimist,  $f$  – ettenihe (vormiva tööriista liikumise kiirus).

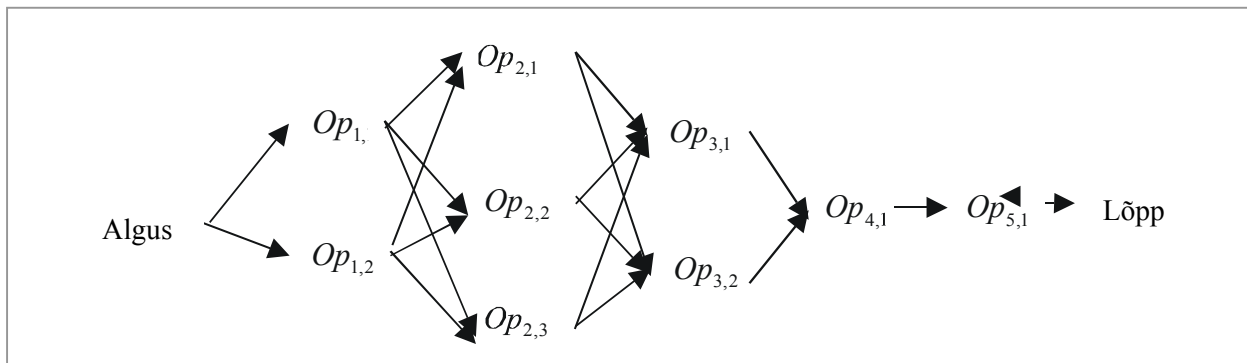
#### TOOTMISRESSURSSIDE OPTIMAALNE PLANEERIMINE

Tootmisressursside optimaalsel planeerimisel jaotatakse (aasta, kvartali) tootmisprogramm lühematele perioodidele (kuu, nädal, päev jne), määrates igale perioodile otstarbekad tootmis- ja müügimahtud, laoseisud jms. Ülesannet nimetatakse tootmise agregaatplaneerimiseks. Selle püstitus on järgmine:

Leida tootmise plaan, mis tagab maksimaalse kasumi ja minimaalse töötlemise aja, arvestades piiranguid tootmisressurssidele, turunõudlusi ja nendest tulenevaid piiranguid müügimahtudele, jms ning rahuldab tõkkeid:

- nõudlus toodetele igas ajavahemikus;
- töökohtade/seadmete koormus igas ajavahemikus;
- tootmis- ja müügimahtude ning laoseisude omavaheline kooskõla;
- nõutav toodete varu suurus.

Lihtsustatud tootmisplaani näide tervisekapslite tooteperele on esitatud tabelis 3.



Joonis 4.

Tootepere üldistatud (tüüp)marsruut ( $Op_{1,1}$  ja  $Op_{1,2}$  esitab alternatiivseid vaakumvormimise tehnoloogiaid;  $Op_{2,1}$ ,  $Op_{2,2}$ ,  $Op_{2,3}$  – erinevaid lõikamise tehnoloogiaid;  $Op_{3,1}$ ,  $Op_{3,2}$  – korpuse tugendamise variante ja  $Op_{4,1}$ ,  $Op_{5,1}$  – koostamist).

Tabel 2

Ostarbekas marsruut tehnoloogia tervisekapslite tooteperele (joonis 3)

Op <sub>1,1</sub>	Op <sub>1,2</sub>	Op <sub>2,1</sub>	Op <sub>2,2</sub>	Op <sub>2,3</sub>	Op <sub>3,1</sub>	Op <sub>3,2</sub>	Op <sub>4,1</sub>	Op <sub>5,1</sub>
0	1	0	0	1	1	0	1	1

Tabel 3

Optimaalse tootmisplaani näide

	<i>Period t=1</i>				<i>Period t=i</i>				<i>Period t=tl</i>			
	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$
Derivaattooted												
Tootmismahud	14	0	14	2	14	0	16	4	14	0	14	4
Müüginahud	15	1	16	4	16	1	16	4	15	1	16	4
Lao jäägid	3	2	2	0	1	1	2	0	0	0	0	0
Lao algseis	4	3	4	2	-	-	-	-	-	-	-	-

## ASENDUSMUDELID PROJEKTLAHENDITE VÄLJUNDSÕLTUVUSTE MODELLEERIMISEKS

Projektlahendite multidistsiplinaarse optimeerimise rakendatavuse üheks olulisemaks kriteeriumiks on kulutused optimeerimisele. Sealjuures on projekteerimise keerukuse vähendamise üheks võimaluseks väljundsooltuvuste modelleerimisel asendusmodelite (surrogaatmodelite) kasutamine (RSM – *Response Surface Methods*), asendades mahukaid simulatsioone (näiteks tugevusarvutusi lõplike elementide meetodil). RSM on defineeritud kui kogum meetodeid, mis võimaldavad vähendada optimeerimisprotsessi keerukust, lahendada piiratud arvutiressursside puhul keerukaid projekteerimisülesandeid. RSM kasutamine eeldab tehisintellekti meetodite rakendamist ja ostarbekalt valitud õpetava kogumi kasutamist.

On pakutud erinevaid soovitusi [Keane, Nair, 2005] õpetava kogumi valikuks – juhuslik valik, katsete planeerimine, sh täis- ja osafaktoriaalne

plaan, tsentraalne komposiitplaan, mitmesugused ortogonaalsed katseplaanid (Plackett ja Burmani, Box-Benkeni ja Taguchi skeemid) jt [Keane, Nair, 2005]. Projektlahendite modelleerimisel tuleb sageli arvestada projektlahendite muutumispirkonna ebaregulaarsust (mittesidusust), piirkonnas kehtivaid piiranguid jm.

Peamiseks probleemiks sealjuures on kulutused, mis on seotud nii õpetava, kui ka surrogaatmodeli kvaliteeti hindava testkogumi realiseerimisega. Projektpiirkonna surrogaatmodelite kirjeldamiseks on kasutusel erinevaid meetodeid [Keane, Nair, 2005]. Põhiliselt kasutatakse lineaarse, ruut- või kõrgemat järku polünoomi parameetrite hindamist regressioonanalüüsi abil.

Näide asendusmodelitest lehtmaterjali sammvormimise protsessi kirjeldamiseks on järgmine [Pohlak jt, 2004]:

$$t = 0,163 + 0,638\alpha ,$$

$$FD = 0,259 - 0,00284R + 0,16p_z + 0,157\alpha - 0,024R\alpha - 0,204p_z\alpha ,$$

$$Ra = 1,2 + 0,0932R - 0,478p_z - 0,319\alpha - 0,17Rp_z - 0,145R\alpha + 4,15p_z\alpha ,$$

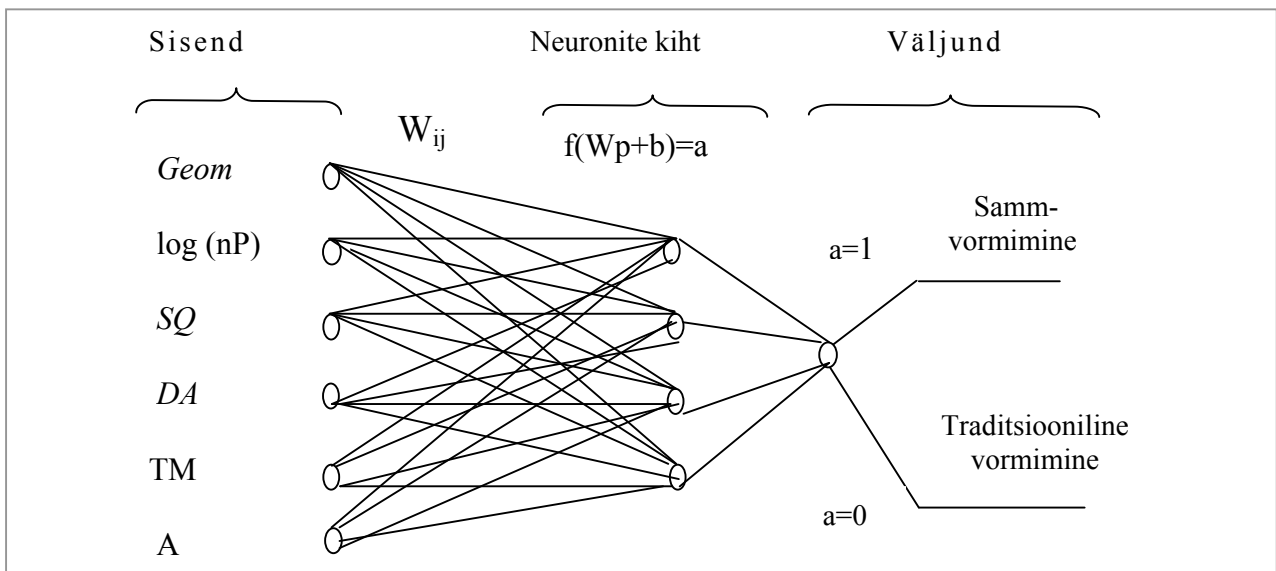
$$FMD = 6,47 - 0,0466R + 3,25p_z - 1,47\alpha - 3,72p_z\alpha ,$$

kus  $t$  on seina paksus pärast vormimist,  $\alpha$  – külgselina tõusnurk radiaanides,  $FD$  – tasapinnaliste pindade tasapinnalisuse hälve,  $R$  – vormiva tööriista raadius,  $p_z$  – vertikaalne sammusügavus,  $Ra$  – pinnakvaliteet,  $FMD$  – kujuhälve.

Oluline on hinnata teooria sobivust vaadeldavate ülesannete klassidele ja hinnata tulemuste usaldusväärsust, sh ka saadud mudelite tundlikkust tingimuste muutusele ja vigadele. Üheks projekteerimisele iseloomulikuks probleemiks meetodi valikul on vajadus kasutada projekteerimispiirkonna kirjeldamiseks samaaegselt nii nn “klassifitseerimise mudeleid” (oma olemuselt diskreetsete suuruste, nagu materjalid, erinevad tehnoloogiad, töövahendid jms, mõju hindamiseks ja/või valikuks) kui ka arvutus- või regressioonmudeleid (pidevate suuruste mõju hindamiseks). Mitmete “uute”, sh näiteks närvivõrkude kasutamisel põhinevate meetodite eeliseks on võimalus õpetada mõlemat tüüpi mudeleid [Haykin, 1999].

Närvivõrkude lihtsa kasutusnäitena on toodud lehtmaterjali sammvormimise ja traditsioonilise vormimise tehnoloogia valiku ühetasemelise närvivõrgu mudel (piisav antud näite puhul). Mudeli sisendparameetrid: detaili geometria  $X_1$  –  $Geom$ ; detailide partii suurus,  $X_2$  –  $\log(nP)$ ; nõutav pinna kvaliteet,  $X_3$  –  $SQ$ ; mõõdu täpsus,  $X_4$  –  $DA$ ; tarne aeg,  $X_5$  –  $TM$  ja detaili külgselina kaldenurk,  $X_6$  –  $\alpha$ . Mudeli signaalgraafi näide on toodud joonisel 5.

Valdavalt lähtutakse RSM kasutamisel seisukohast, et puuduvad eelnevad teadmised piirkonnas kehtivate mudelite/sõltuvuste kohta. Tehniliste süsteemide projekteerimise valdkonnas ei saa aga nii väita, sest enamikel juhtudel on olemas teadmised uuritavatest nähtusest või protsessidest ja taoliste teadmiste kasutamine võib oluliselt tõsta modelleerimise efektiivsust, vähendada töömahtu.



Joonis 5. Sammvormimise valiku mudel (kahetasemeline närvivõrk).



## KOKKUVÖTE, PROJEKTI EESMÄRGID JA LAHENDATAVAD ÜLESANDED

Tehniliste süsteemide optimeerimise meetodite arenguid iseloomustab püüe integreerida ühtsesse süsteemi üha rohkem ülesandeid. Sellega kaasneb projekteerimisülesannete keerukuse ning lahendite kvaliteedi kasv. Valdakonna taolisi arenguid võib käsitleda kui uut paradigmat projekteerimise meetodika ja arvutipõhiste vahendite arengus. Põhiliseks eesmärgiks on sealjuures luua arvutipõhine projekteerimiskeskond, mis võimaldab kõige otstarbekamal viisil toetada inseneri tööd, tagamaks majanduslikult ja tehniliselt optimaalsete lahenduste leidmise antud tootmisvõimaluste juures. Kirjeldatava töö eesmärgiks on uusima oskusteabe siirde ja meetodite edasiarendus, tagamaks masina ja aparaadiehituse toodete rahvusvahelise konkurentsivõime, sh tootmise kasumi suurendamise ja tarneaegade lühenemise.

### VIITED

AIAA Technical Committee on Multidisciplinary Design Optimization (MDO). 1991. White Paper on Current State of the Art.

Bendsoe, M., Kocvara, M., Lund, E., Stingl, M., Stolpe, M., Stegmann, J. 2006. Optimal structural design with composites: free material and laminate design. ESCM 2006 Proc. CD, Budapest.

Eerme, M., Enok, M., Roosimölder, L., Küttner, R. 2004. Design of sandwich support structures. Proc. Eston. Acad. Sci. Eng., 10, 4, 300-307.

Haykin, S. 1999. Neural Networks, a comprehensive foundation. Prentice Hall, Inc. USA, 842.

Hopp, W. J., Spearman, M. L. 2001. Factory Physics. Foundation of Manufacturing Management. McGraw Hill Publishing Companies, Inc., 698.

Keane, A. J., Nair, P. B. 2005. Computational Approaches for Aerospace Design. John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, England, 582 pp.

Küttner, R. 2002. A framework of collaborative product and production development system. Proc.

Kuna eeldame meetodika rakendusi esmajoones piiratud võimalustega VKE jaoks, on oluline keskkonna loomine, mis integreerib otstarbekalt inseneride teadmised ja oskused arvuti ning matemaatiliste meetodite ja tarkvara võimalustega.

Uusi teooriaid ja vahendeid on kontrollitud ettevõtete praktilistel näidetest, lahendades integreeritult järgmisi projekteerimisülesandeid [Küttner jt, 2006]:

- sarnaste toodete tooteperede optimaalne planeerimine;
- tooteperede valmistamise optimaalsete tehnoloogiate valik (sh ka töövahendite projekteerimine/valik);
- tootmise ressursside optimaalne planeerimine.

of the 3rd Int. Conf. on Industrial Engineering – New Challenges to SME. April 2002, Tallinn, Estonia. TTU, 34-37.

Küttner, R., Karjust, K. 2006. Coordination of the complex engineering product and manufacturing process optimization tasks. Proc. Eston. Acad. Sci. Eng., 12, 3-1, 163-176.

Küttner, R., Karjust, K., Pohlak, M. 2006. Integrated optimal planning of product family and manufacturing technology of its components. Advances in Manufacturing Technology - XX: 4th Int. Conf. on Manufacturing Research, ICMR2006, Liverpool, UK. Liverpool, Liverpool John Moores University, 55-60.

Majak, J., Hannus, S. 2003. Orientational design of anisotropic materials using Hill and Tsai Wu strength criteria. Mechanics of Composite Materials, 39, 6, 509-520.

Messac, A., Gupta, S. M., Akbulut, B. 1996. Linear physical programming: a new approach to multiple objective optimization. Trans. Operational Res., 8, Oct, 39-59.

Pohlak, M., Küttner, R., Majak, J. 2004. Modelling and optimal design of the incremental forming process. Proc. Eston. Acad. Sci. Eng., 10, 4, 261-269.

Ravindran, A., Phillips, D., Solberg, J. 1987. Operation Research Principles and Practice, 2. edition. John Wiley&Sons, NY, 637 pp.

# LAINIKUTE RAKENDAMINE DIFERENTSIAAL- JA INTEGRAALVÖRRANDITE LAHENDAMISEKS

Ülo Lepik

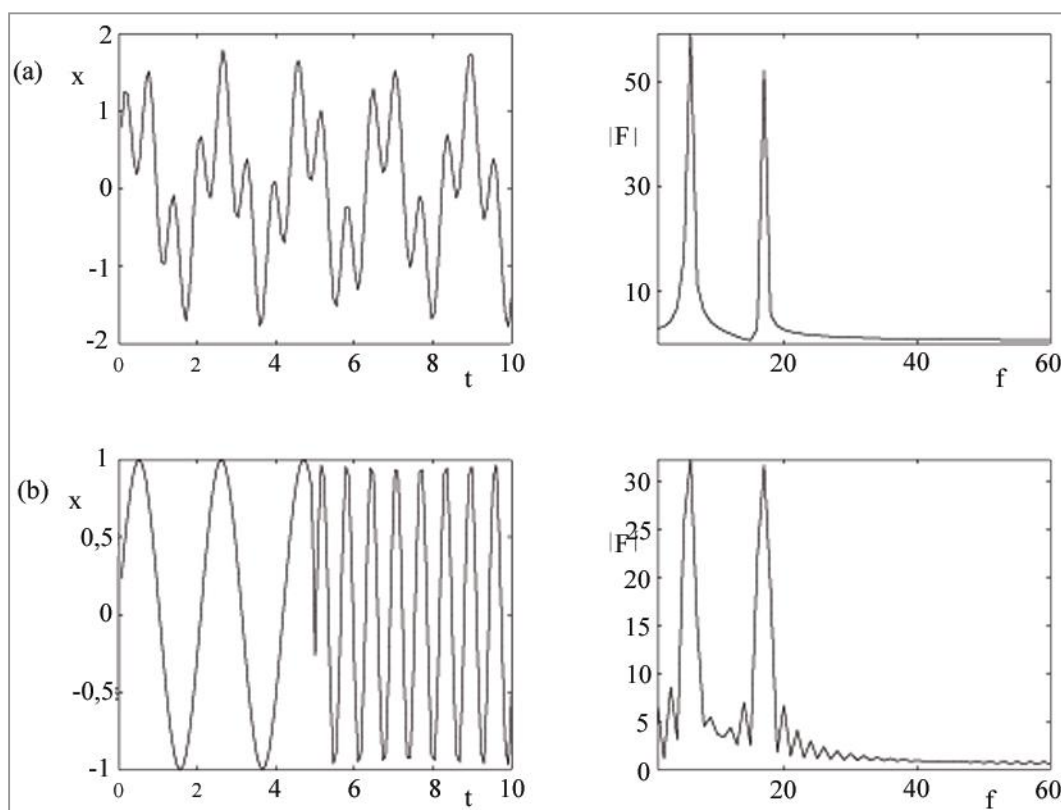
Tartu Ülikooli rakendusmatemaatika instituut

## MILLEKS ME VAJAME LAINIKUID?

Igapäevases elus puutume kokku mitmesuguste ajas muutuvate protsessidega, nagu ehitiste ja aparaatide võnkumised, südame võnkediagrammid, merelainetus ja palju muud. Neid liikumisi kirjeldab mingi aegrida  $x = x(t)$ . Et selgitada nende protsesside olemust, tuleb antud signaali töödelda. Seda tehakse sageli Fourier meetodil. Fourier teisendus võimaldab sageduste spektrile  $\omega$  seada vastavusse spektri võimsuse  $P(\omega)$ . Õeldu illustreerimiseks on joonisel 1 toodud kaks aegrida

ja nende Fourier diagrammid. Kuigi on tegemist kahe täiesti erineva liikumiskäiguga, on ometi nende Fourier diagrammid väga sarnased (mõlemas diagrammis on kaks piiki). Matemaatilises keeles öeldakse: "Fourier meetod omab head lahutusvõimet sageduste osas, kuid ei võimalda lokaliseerida protsessi ajalist käiku".

Üks võimalus sellest puudusest üle saamiseks ongi lainikute kasutamine.



Joonis 1. Aegread ja nende Fourier' diagrammid.

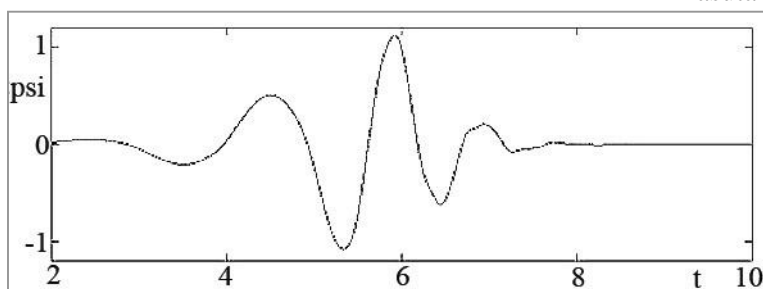
## MIS ON LAINIKUD?

Lainikute (inglise keeles *wavelet*) juurde jõuame järgmisel viisil. Defineerime mingi funktsiooni  $\psi = \psi(t)$ , mida nimetatakse EMALAINIKUKS (*mother wavelet*). Sellest moodustame teisendusega

$$\psi(t, j, k) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j} t - k)$$

kahedimensionaalse LAINIKUTE PERE. Parameetrit  $k$  nimetatakse TRANSLATSIOONIKS. Selle muutmine võimaldab nihutada emalainikut  $\psi(t)$  piki ajatelge. Parameeter  $j$ , mis on naturaalarv, määrab lainiku TASEME (*level*);  $j$  suurendamisel muutub lainik laiemaks ja madalamaks. Sel viisil saadud funktsioon võimaldabki lokaliseerida liikumise ajas.

Emalainiku  $\psi(t)$  valikuks on meil üsna suur vabadus, seda kasutades saame mitmesuguseid lainikute peresid. Esimene kasutuskõlblik lainik esitati 1985. a. Kõige enam on aga tuntud lainik, mille konstrueeris belglanna I. Daubechies 1988. a.

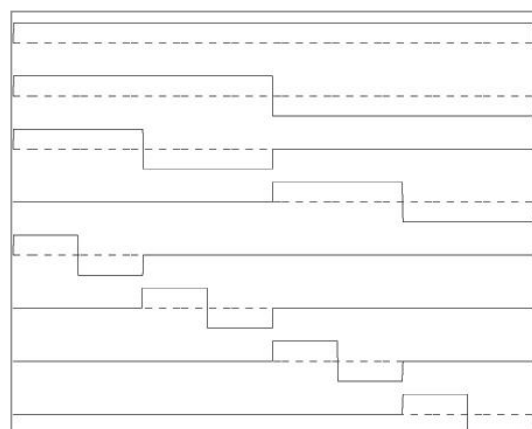


Joonis 2.  
Daubechies'i lainik tasemega  $J = 6$ .

## HAARI LAINIKUD

1910. a võttis A. Haar kasutusele funktsioonid, mis koosnevad tükati konstantsete funktsioonide paaridest. Nende baasil konstrueeriti 1980. aastate teisel poolel lainikud, mis sisuliselt on Daubechies lainikud tasemega 1. Kaheksa esimest Haari lainikut on esitatud joonisel 3. Matemaatilises mõttes Haari lainik on lihtsaim ortonormaalne lainik kompakitse kandjaga. Haari lainikuid on lihtne analüütiliselt integreerida suvaline arv kordi.

Joonis 3.  
Kaheksa esimest Haari lainikut.



Haari lainikutel on aga ka oluline puudus – nad pole pidevad ja seetõttu pole katkemispunktides diferentseeritavad. Sellest raskusest võib üle saada vähemalt kahel viisil. Esiteks võib lainikut siluda, mingi interpoleeriva splaini abil. See aga komplitseerib arvutusi ja Haari lainikute põhiline eelis – lihtsus – läheb kaduma.

Teise võimaluse esitasid 1997. a Chen ja Hsiao. Nad soovitasid Haari lainikute järgi arendada ritta

## INTEGRAALVÖRRANDID

Paljud teaduse ja tehnika probleemid, nagu võnkumised, kiirgusenergia hajumine jms, on taandatavad integraalvõrrandi

$$u(x) = \int_a^b K(t, x, u(t))dt + f(x)$$

lahendamisele. Siin on  $K$  ja  $f$  teadaolevad funktsioonid,  $u(x)$  otsitav funktsioon. Funktsiooni  $K$  nimetatakse integraalvõrrandi tuumaks. Kui  $a$  ja  $b$  on konstandid, saame Fredholmi integraalvõrrandi, kui aga  $b = x$ , siis Volterra võrrandi.

Otsime võrrandi lahendit kujus

$$u(x) = \sum_i a_i \cdot h_i(x),$$

kus  $h_i(x)$  on Haari lainikud,  $a_i$  – lainikute kordajad,

## DIFERENTSIAALVÖRRANDID

Diferentsiaalvõrrandite tähtsus tänapäeva teaduse ja tehnika probleemide lahendamisel on väga suur. Juba Newton ütles, et loodusseadused on kirjutatud diferentsiaalvõrrandite keeles. Kui otsitav funktsioon sõltub ainult ühest argumentist (nt  $u = u(t)$ ), saame harilikud diferentsiaalvõrrandid. Mitme argumenti korral on tegu osatuletistega diferentsiaalvõrranditega.

Allpool vaatame juhtu  $u = u(x, t)$ , kus  $x$  on ruumikoordinaat ja  $t$  – aeg. Oleme rakendanud Haari lainikuid järgmiste diferentsiaalvõrrandite lahendamiseks (alumised indeksid märgivad tuletisi):

- (a) difusioonivõrrand  $u_t = Au_{xx}$
- (b) Burgers'i võrrand  $u_t + uu_x = \nu u_{xx}$
- (c) sine-Gordoni võrrand  $Au_{xx} - u_{tt} = \sin u$ .

mitte otsitava funktsiooni enese, vaid võrrandis esineva selle funktsiooni kõrgeimat järku tuletise järgi. Madalamat järku tuletised (ja funktsioon ise) leitakse integreerimise teel.

See idee on viimasel ajal leidnud teadustöodes laialdast rakendamist. Meie oleme seda kasutanud diferentsiaal- ja integraalvõrrandite lahendamisel. Neid töid ongi allpool lühidalt refereeritud.

mis tulevad leida. Lahendusmeetodit võib valida mitmeti. Meie kasutame siin nn KOLLOKATSIOONIMEETODIT, mille kohaselt integraalvõrrand rahuldatakse  $n$  punktis (kollokatsioonpunktid).

Võrrandis esinev integraal on analüütiliselt leitav. Lahenduskäik on väga lihtne, eriti kui kasutada programmide pakettis MATLAB toodud maatriksarvutust. Tulemus on küllalt täpne isegi väikese kollokatsiooni punktide arvu korral (näiteks 8 või 16 punkti korral).

Lahenduskäiguga võib tutvuda artiklite [Lepik, Tamme, 2005, 2007; Lepik, 2006] vahendusel.

Niisugustel võrranditel on palju rakendusi nii loodusteadustes kui ka tehnikas (soojuse leviku probleemid, difusioon, lainete levik mitmesugustes keskkondades jne).

Ülaltoodud võrrandite lahendamiseks kasutasime järgmist metoodikat. Esmalt diskretiseerisime võrrandi ajas, kasutades selleks näiteks Crank-Nicholsoni meetodit. Edasi arendasime koordinaadi järgi ritta võrrandis esineva kõige kõrgemat järku tuletise. Madalamat järku tuletised saime integreerimise teel, kusjuures integreerimiskonstandid määrati antud võrrandi alg- ja rajatingimustest. Jällegi selgus, et tulemuste täpsus on küllalt hea juba väikese arvu võrgupunktide korral. Lahenduskäiguga ja arvutustulemustega võib tutvuda artiklite [Lepik, 2003, 2007] abil.

## KOKKUVÕTE

Haari lainikute meetod diferentsiaal- ja integraalvõrrandite lahendamiseks on täiesti konkurentsivõimeline klassikaliste meetoditega.

Selle eelisteks on lahenduskeemide lihtsus, väike võrgupunktide arv ning sellest tulenev lühike arvutiaeg.

## TÄIENDAVAKS LUGEMISEKS

Lepik, Ü. 2003. Numerical solution of differential equations using Haar wavelets. *Math. Comput. Simul.*, 68, 127-143.

Lepik, Ü. 2006. Haar wavelet method for nonlinear integro-differential equations. *Appl. Math. Comput.*, 176, 324-333.

Lepik, Ü. 2007. Numerical solution of evolution equations by the Haar wavelet method. *Appl. Math. Comput.*, (accepted).

Lepik, Ü., Tamme, E. 2005. Application of the Haar wavelets for solution of linear integral equations. 5.-10. July 2004, Antalya, Turkey – *Dynamical Systems and Applications, Proc.*, 395-407.

Lepik, Ü., Tamme, E. 2007. Solution of nonlinear integral equations via Haar wavelet method. *Proc. Eston. Acad. Sci.*, (submitted).

# ELEKTRILISE KAKSIKKIHI KONDENSAATORITE JA SÜSINIKMATERJALIDE UURINGUD TARTUS 1997–2006

*Enn Lust, Alar Jänes*

Tartu Ülikooli füüsikalise keemia instituut

Üheks tänapäeva industriaalühiskonna väga pakulist lahendamist vajavaks probleemiks on kõrg-efektiivse loodussõbraliku energiamajanduse, s.o energiatootmise ja säilitamise süsteemide väljarendamine. Tänapäeva energeetika peab olema oluliselt efektiivsem kui seni Eestis kasutuselolev põlevkivienergeetika, millel on oluline roll selles, et Eesti on Euroopa Liidu “must lammas” oma ülimaldala energeetilise efektiivsusega (s.o kasutatud energiahulgalt toodangu kohta). Seni on Eestis väga visalt juurdunud elektrienergia ja soojusenergia koostootmise süsteemid, mille energeetiline efektiivsus on oluliselt suurem kui Carnot’ termodünaamilisel tsükli põhinevate soojus- ja elektrienergia efektiivsus. Nobeli preemia laureaat W. Ostwald näitas juba 1896. aastal, et elektrokeemiliste kütuseelementide teoreetiline kasutegur on oluliselt suurem kui Carnot’ soojusmasina kasutegur. Väga suure elektrilise kasuteguriga energia salvestamise seadeldis on elektrilise kaksikkihi kondensaator (EKKK) [Arulepp jt, 2004; Eikerling, 2005; Jänes jt, 2004abc; Leis jt, 2001; Lust jt, 2003, 2004abc], kus nii positiivse kui ka negatiivse elektrodina kasutatakse ülisuure eripinnaga nano-mesopoorset süsinikku (tabel 1), mis saadakse väga erinevaid lähteaineid ja valmistamismeetodeid kasutades [Arulepp jt, 2004, 2006; Jänes jt, 2004abc, 2006; Jänes, Lust, 2005, 2006ab; Leis jt, 2001, 2006; Lust jt, 2003, 2004abc]. USAs, Jaapanis, Šveitsis jm uuritakse ülisuure elektrimahtuvusega elektrokeemiliste kondensaatorite kasutamise võimalusi tsükliiselt töötavate fotoelektriliste ja tuuleturbiinide ning hüdroelektrienergia energiasalvestitena. Samuti on EKKKd väga efektiivsed impulss-vooluallikad, mille elektriline kasutegur on 94–97% ning kus piikvoolutugevus võib ulatuda tuhandettesse ampritesse ning seda 10 ja enama sekundi jooksul sõl-

tuvalt kondensaatori mahtuvusest ja muudest tehnilistest detailidest. Sellest tulenevalt on autofirmade (Ford, Toyota Motors, BMW jne) konstruktorite ettekujutuse kohaselt EKKKd asendamatud efektiivsete elektriautode, busside ja vedurite konstrueerimisel, kus neid lisaks stabiilses režiimis töötavale kütuseelemendile või liitium-ioonpatareile kasutatakse energiaimpulsside saamiseks kiirendusel. Tänapäeva tehnoloogia võimaldab pidurdamisel genereeritavat elektrienergiat kasutada EKKK taaslaadimiseks.

Elektrilise kaksikkihi kondensaatorid jaotuvad kaheks suureks grupiks: vesilahuse- ja mittevesilahuse-kondensaatorid, sõltuvalt nende maksimaalse potentsiaalierinevuse väärtusest positiivselt ja negatiivselt laetud elektrodide vahel ( $\Delta U$ ). Kahjuks on vee lagunemise termodünaamiline ülepinge (1,23 V) kaks kuni neli korda väiksem kui mõningate orgaaniliste solventide lagunemise ülepinge (4–5 V) ning seega on vee baasil valmistatud EKKK  $\Delta U \leq 0,8$  V, kuid atsetonitriili (AN) või propüleenkarbonaadi (PC) baasil valmistatud EKKK  $\Delta U = 2,7–3,4$  V, sõltudes oluliselt vee (lisandi) kontsentratsioonist EKKKs [Arulepp jt, 2004; Eikerling, 2005; Jänes jt, 2004abc, 2006; Jänes, Lust, 2005, 2006ab; Leis jt, 2001; Lust jt, 2003, 2004abc].

Tartu Ülikooli füüsikalise keemia instituudis (TÜ FKFE) alustati süsinikmaterjalide (klaassüsinik, grafiit, kõrgorienteeritud grafiit, poorne ning kare klaassüsinik) elektrokeemilise käitumise uurimist 1991. aastal, kasutades nii vee kui ka AN baasil valmistatud erinevaid elektrolüüte. 1997. aastal tuli ahvatlev pakkumine asuda uurima nanopoorsete süsinikmaterjalide omadusi koostöös ettevõttega AS Tartu Tehnoloogiad, kellega edukas koostöö jätkub tänaseni.

Tabel 1

## Selekteeritud süsinikmaterjalide gaasifaasi karakteristikud

Parameeter	Lähtekarbiid				
	$\alpha$ -SiC	TiC	Mo <sub>2</sub> C	B <sub>4</sub> C	Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>
Lähtekarbiidi kristallograafiline struktuur	romboeedriline	kuubiline	heksagonaalne	romboeedriline	romboeedriline
$S_a / \text{m}^2\text{g}^{-1}$	1085	1505	1490	1525	1470
$S_m / \text{m}^2\text{g}^{-1}$	1030	1205	0	930	1130
$V_m / \text{cm}^3\text{g}^{-1}$	0,46	0,60	0	0,43	0,57
$V_k / \text{cm}^3\text{g}^{-1}$	0,49	0,75	1,50	0,99	0,74
$D_{\text{NLDFT}} / \text{nm}$	~0,7	~0,8	~4,0	~1,3	~0,8

$S_a$  – Brunauer-Emmett-Telleri meetodil (BET) määratud eripind

$S_m$  – nanopooride eripind

$V_m$  – nanopooride ruumala

$V_k$  – pooride koguruumala

$D_{\text{NLDFT}}$  – NLDFT meetodil (*non-local density functional theory*) arvutatud keskmine pooridiameeter

## NANOPOORSE SÜSINIKU VALMISTAMINE JA ELEKTROKEEMILINE ISELOOMUSTAMINE

AS Tartu Tehnoloogiad ja TÜ FKFE koostöö tulemusena töötati välja meetodika nanopoorsete materjalide elektrokeemiliste uuringute läbiviimiseks ning esimesed olulised tulemused saadi 1999. aastal (Gunnar Nurk, Alar Jänes, Mati Arulepp jt). Sellest ajast alates on uuritud väga palju erineva poorijaotuse ja eripinnaga süsinikmaterjale, mis on sünteesitud Anti Perksoni, Jaan Leisi, M. Arulepa, Marko Läti jt poolt). ASs Tartu Tehnoloogiad on uuritud põhiliselt binaarsetest karbiididest kloreerimisel saadud nn skeletonsüsinikmaterjale, mis on väga kitsa poorijaotusfunktsiooni maksimumiga (joonis 1) ja ülisuure eripinnaga (kuni 2000 m<sup>2</sup>/g). Poorijaotusfunktsiooni maksimumi asukohta on võimalik muuta nii diameetri kui ka nanopoori ruumala järgi, kasutades erinevaid lähtekarbiide (TiC, Mo<sub>2</sub>C, B<sub>4</sub>C, Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>,  $\alpha$ -SiC), aga ka erinevaid süsiniku järeltöötlemise tingimusi (töötlemine veeauruga, CO-ga jne). Samuti on oluline sünteesitemperatuur, sest kõrgemal kui 1100°C hakkab toimuma amorfse süsiniku grafitiseeru-

mine, mis vähendab eripinda. Samuti on uuritud nanopoorse süsiniku sünteesimise võimalusi TiC ja TiO<sub>2</sub> segudest, et vähendada üliväikeste nanopooride osa saadavas süsinikus [Arulepp jt, 2006; Leis jt, 2006]. Klorineerimismeetodil saadakse üliheade elektrokeemiliste omadustega nanopoorset süsinikku (tabel 2, 30% paremad kui traditsioonilistel meetoditel valmistatud), kuid kahjuks on lähtematerjalide hinnad väga kõrged ja klooriga töötamine tervistkahjustav ning keskkonnoohtlik [Arulepp jt, 2004; Eikerling, 2005; Jänes jt, 2004abc; Leis jt, 2001; Lust jt, 2003, 2004abc]. Seepärast on TÜ FKFEs alates 2002. aastast uuritud teisi meetodeid ja lähteaineid nanopoorse süsiniku tootmiseks. Põhiliselt on selleks kasutatud nanokiudpolümeere, aga ka maailmaturult ostetud erinevaid süsinikkangaid ja nanopoorse süsiniku pulbreid, mida on täiendavalt aktiveeritud kas veeauru, süsinikoksiidi või muude reagentidega. Joonisel 2 on toodud diferentsiaalse pooriruumala sõltuvus pooridiameetrist, millelt on nä-



ha, et nanopoorse süsiniku veeauruga töötlemine tõstab oluliselt mesopooride ( $d > 2,0$  nm) osakaalu ning vähendab nanopooride ( $d < 2,0$  nm) ruumala ja tõstab materjalis ioonide Gibbsi adsorptsiooni ehk elektrilist mahtuvust. Saadud on karbiidsetele süsinikele sarnase piirilise mahtuvusega  $C_s \sim 120$  F/g

nanopoorseid süsinikmaterjale [Jänes jt, 2006], mis on palju odavamad kui skeletonsüsinikud. Elektrijuhtivuse parandamiseks kaetakse õhukese kihiline süsinikelektrood ühelt poolt ülipuhta vaakumaurustatud Al-kihiga, millele omakorda keevitatakse Ar-atmosfääris üliõhuke Al-plekk.

Tabel 2

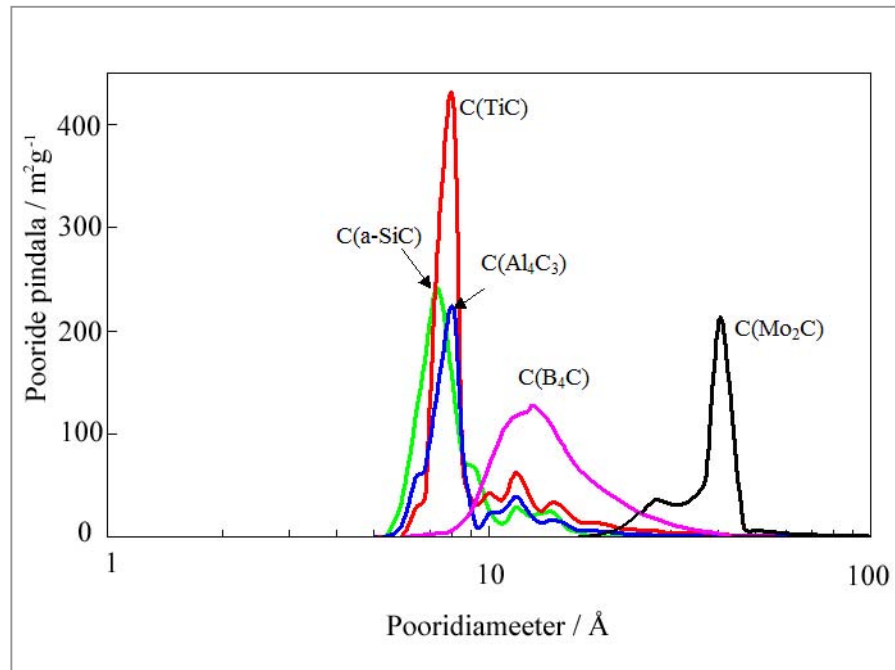
Karbiidset päritolu nanopoorsete süsinikmaterjalide elektrokeemilised karakteristikud 1M (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub>CH<sub>3</sub>NBF<sub>4</sub> atsetonitriili lahuses

Nanopoorne süsinik	$E_{\min}/V$ vs SCE	$C_s/F\text{ cm}^{-2}$	$C_s/F\text{ g}^{-1}$	$C_s/F\text{ cm}^{-3}$	$f_{\max}/\text{Hz}$
C(TiC)	0,31±0,02	0,69±0,05	98,3±0,8	62,2±0,5	1990
C(α-SiC)	0,30±0,02	0,14±0,03	16,3±0,4	12,8±0,3	630
C(Mo <sub>2</sub> C)	0,31±0,02	0,63±0,05	120,0±0,8	52,0±0,5	790
C(Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub> )	0,30±0,02	0,60±0,05	82,3±0,5	53,0±0,5	1255
C(B <sub>4</sub> C)	0,24±0,02	0,47±0,04	70,9±0,5	41,8±0,4	1255

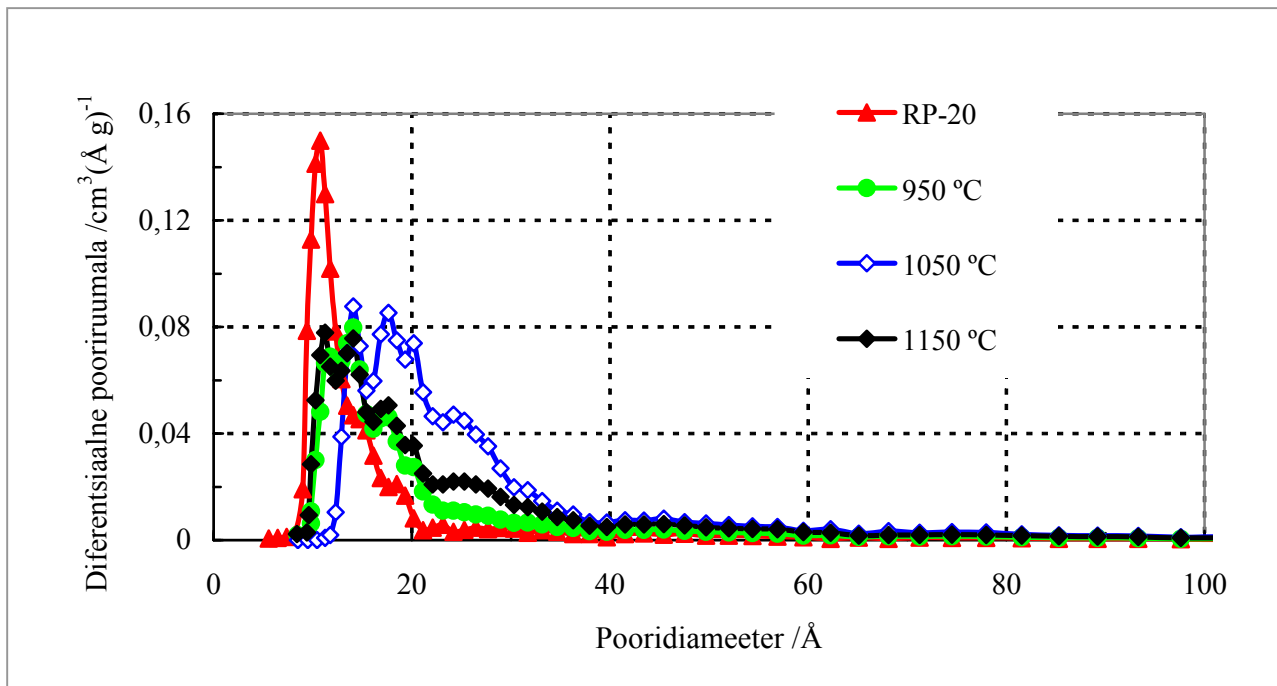
$E_{\min}$  – diferentsiaalmahtuvuse potentsiaalset sõltuvuse kõverate miinimumi potentsiaal küllastatud kalomelektroodi suhtes (SCE)

$C_s$  – järjestikune diferentsiaalmahtuvus  $E = -1.4$  V (vs SCE) ja  $f = 10$  mHz juures

$f_{\max}$  – karakterne sagedus



Joonis 1. Binaarsetest karbiididest kloreerimise teel valmistatud süsinikmaterjalide poori- jaotuse sõltuvus lähtematerjalist.



Joonis 2.

Eelnevalt aktiveerimata ja erinevatel temperatuuridel (toodud joonisel) veeauruga aktiveeritud nanopoorse süsiniku RP-20 diferentsiaalne poorijaotus.

## NANOPOORSETE SÜSINIKELEKTROODIDE JA EKKKde IDEAALSE POLARISEERITAVUSE ALA LAIENDAMINE

Teiseks väga oluliseks probleemiks on olnud vajadus suurendada süsinikelektroodide ja EKKKde ideaalse polariseeritavuse ala  $\Delta U$  (s.o rakupotentiaali ulatust), kuna nii EKKKde võimsustihedus  $P$  kui ka energiatihedus  $E$  sõltub paraboliselt  $\Delta U$ -st ( $E = f(\Delta U^2)$  ja  $P = f(\Delta U^2)$ ).

Põhilised tegurid, mis määravad  $\Delta U$ , on solvendi ja elektrolüüdi ning nanopoorse süsinikmaterjali veesisaldus, aga ka elektrokeemiliselt aktiivsete gaaside ( $O_2$ ,  $H_2$ ,  $SO_x$ ,  $NO_x$ ,  $H_2S$ ) absorptsioon/adsorptsioon nanopoorides või orgaaniliste ühendite (aldehüüdid, alkoholid, ketoonid jne) ja ioonsete lisandite ( $Li^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $F^-$ ,  $HSO_4^-$ ) esinemine elektrolüüdis. Seepärast teostatakse kõik eksperimentaalsed uuringud TÜ FKFEs hermeetilises

katsekapis, kus  $O_2$ , veeauru,  $SO_x$  ja  $NO_x$  sisaldus on viidud alla 1 ppm. Kasutatakse pikaajaliselt vaakumkuivatuskapis kuivatatud süsinikelektroode ning molekulaarsõeltega A4 täiendavalt kuivatatud ülikuiivi solvante. Elektrolüütidena kasutatakse veevabu tetraalküülammoonium-tetrafluoro-boraaite [Arulepp jt, 2004, 2006; Eikerling, 2005; Jänes jt, 2004abc, 2006; Jänes, Lust, 2005, 2006ab; Leis jt, 2001, 2006; Lust jt, 2003, 2004abc]. TÜ FKFEs loodud tingimustes on saavutatud süsinikelektroodide jaoks  $\Delta U \approx 3,6$  V [Jänes jt, 2006; Jänes, Lust, 2005, 2006ab], mis on ligikaudu võrdne kahekordse energiatiheduse juurdekasvuga, võrreldes maailmas seni laialdaselt saavutatud  $\Delta U = 2,6$  V-ga [Arulepp jt, 2004; Jänes jt, 2004abc; Leis jt, 2001; Lust jt, 2003, 2004abc].

## SOLVENTIDE MÕJU EKKK ÜHIKRAKU OMADUSTELE

Et asendada mürgine atsetonitriil (AN) loodussõbralikumate solventidega (etüleenkarbonaat (EC), etüülmetüülkarbonaat (EMC), dimetüülkarbonaat (DMC), propüleenkarbonaat (PC), etüülatsetaat (EA), metüülatsetaat (MA), metüülformaat (MF)) uuriti kaheelektroodsetes ühikrakkudes binaarsete, ternaarsete ja kvaternaarsete solventide süsteemide ja elektrolüütide  $(C_2H_5)_3C_4H_9NBF_4$ ,  $(C_2H_5)_4NBF_4$ ,  $(C_2H_5)_3CH_3NBF_4$ ,  $(CH_3)_3C_2H_5NBF_4$  baasil valmistatud lahuste mõju elektrilise kaksikkihi kondensaatorite ühikrakkude omadustele. Leiti, et nii mitmedki solventide segude baasil valmistatud ühikrakud on ideaalselt polariseeritavad väga laias potentsiaalide vahemikus ( $\Delta U$  kuni 3,5 V), mis lubab järeldada, et AN asendamine vähemmürgiste ja loodussõbralikumate elektrolüütidega on võimalik [Jänes, Lust, 2005, 2006ab]. Leiti, et suurim madalsageduslik piiriline elektriline mahtuvus on etüleenkarbonaadi (EC), dimetüülkarbonaadi (DMC) ja etüülatsetaadi (EA) ekvimolekulaarsel segul ( $C_s = 125 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ ), aga samuti EC ja EA ekvimolekulaarse segu baasil valmistatud ühikrakul. Kasutades impedantspektroskoopia andmeid, määrati kindlaks ühikrakkude laadimise ja tühjenemise ajakonstandid  $\tau_R$ , mis olid küll veidi suuremad kui AN baasil valmistatud ühikrakkudel, kuid oluliselt lühemad kui  $\gamma$ -butürolaktooni või propüleenkarbonaadi baasil valmistatud EKKKdel, mida seni põhiliselt laiatarbe EKKKdes kasutatakse [Arulepp jt, 2004; Eikerling, 2005; Jänes jt, 2004abc; Jänes, Lust, 2005, 2006ab; Leis jt, 2001; Lust jt, 2003, 2004abc].

Kasutades impedantspektroskoopia andmeid EKKKde või ühikrakkude jaoks arvatati kondensaatoripatarei või ühikraaku kompleksvõimsus  $S(\omega)$  ja selle reaali- ning imaginaariosad ( $P(\omega)$  ja  $Q(\omega)$ ) vastavalt valemitele:

$$S(\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) \quad (1)$$

Võimsuse reaalosa  $P(\omega)$  on arvatav kui

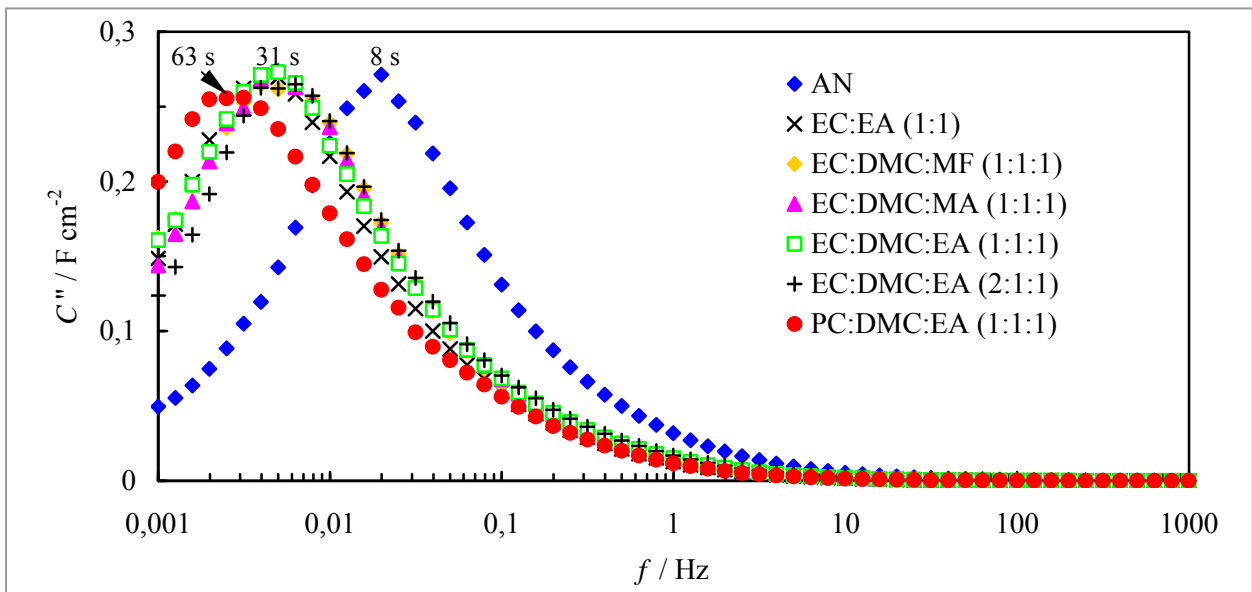
$$P(\omega) = \omega C''(\omega) |\Delta V_{\text{rms}}|^2 \quad (2)$$

ja võimsuse imaginaarosa  $Q(\omega)$  kui

$$Q(\omega) = -\omega C'(\omega) |\Delta V_{\text{rms}}|^2, \quad (3)$$

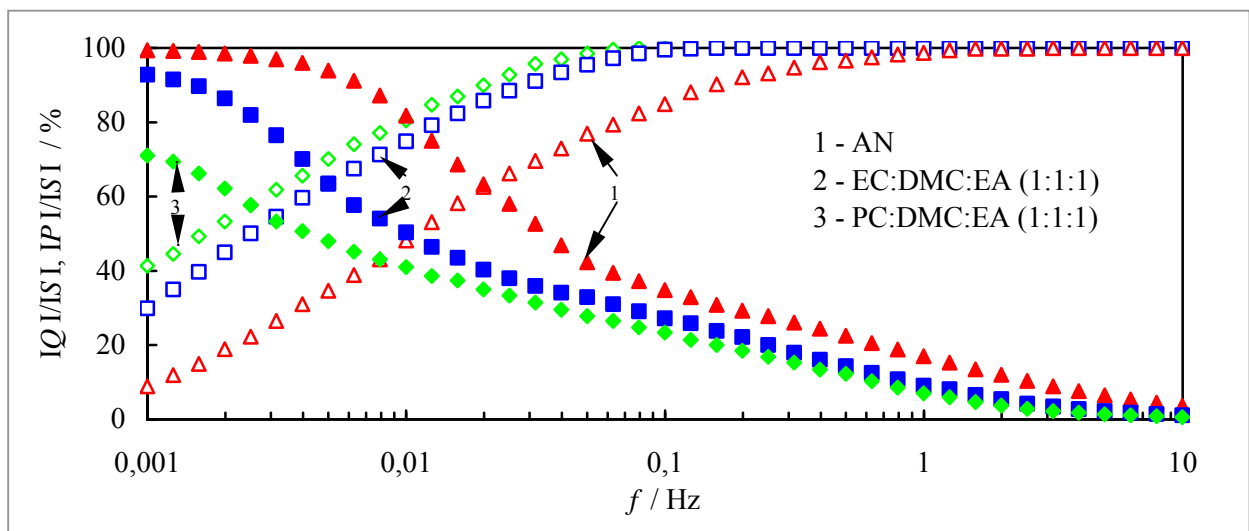
kus  $\omega = 2\pi f$  on vahelduvvoolu nurksagedus,  $|\Delta V_{\text{rms}}|^2 = \Delta V_{\text{max}} / \sqrt{2}$  (kus  $\Delta V_{\text{max}}$  on vahelduvvoolu maksimaalne amplituud), ning  $C''(\omega)$  ja  $C'(\omega)$  on mahtuvuse imaginaar- ja reaalosa (toodud joonisel 3). Kui kondensaatoripatarei käituks ideaalse mahtuvusliku süsteemina, siis oleks koguvõimsus määratud võimsuse imaginaar-komponendiga. Meie poolt uuritud EKKKde korral esinevad mõlemad komponendid (joonis 4) ning seega ostsilleeruvad kondensaatorid kahe piirjuhu vahel: käituvad takistuslike elementidena kõrgetel vahelduvvoolu sagedustel  $\omega$  ja ligilähedalt ideaalse mahtuvusliku takistina ülimaldalatel sagedustel. Vahepealsetel sagedustel käituvad EKKKd lõpmatult pika takistus-mahtuvusliku RC ahelana, mis sisaldab väga palju üksikuid RC elemente. Jooniselt 4 määratud sagedusest arvatatud iseloomulik ajakonstant  $\tau_R = (2\pi f_R)^{-1}$ , mis vastab normaliseeritud  $P(\omega)/(S)$ ,  $\log f$ - ja  $Q(\omega)/(S)$ ,  $\log f$ -sõltuvuste lõikepunktile, iseloomustab erinevate EKKKde iseloomulikke laadimisaegu, mis sõltuvad oluliselt elektrolüüdi mooljuhtivusest (põhiliselt solvendi viskoossusest), muutudes 8-st sekundist 1 M  $(C_2H_5)_3CH_3NBF_4$  + AN korral kuni 63 sekundini 1 M  $(C_2H_5)_3CH_3NBF_4$  + PC korral.

Binaarsete ja ternaarsete solventide segude baasil valmistatud ühikrakkude  $\tau_R$  väärtused varieeruvad 20–61 s, kusjuures selgub, et  $\tau_R$  määrab ära solvent, millel on suurim ajakonstandi  $\tau_R$  väärtus. Selgus, et  $\tau_R$  kasvab oluliselt, kui elektroodide aktiivkihi paksus kasvab või kui konstantse paksuse korral temperatuur alaneb [Jänes, Lust, 2005, 2006ab]. Samuti tehti kindlaks, et  $\tau_R$  kasvab, kui elektrolüüdi kontsentratsioon väheneb, st  $\tau_R$  sõltub ioonide Debye ekraneerimispikkusest lahuses. Samuti sõltub  $\tau_R$  mõnevõrra nanopooride/mesopooride keskmiste diameetrite või keskmiste ruumalade suhtest, s.o aktiivkihti moodustava süsiniku omadustest, olles pikim materjalide korral, milles on rohkem väiksema diameetriga nanopore. Seega on massiülekanne nanopoorides aeglane ja selleks, et tõsta võimsustihedust konstantse energiatiheduse juures, tuleb osa nanopore muuta



Joonis 3.

Nanopoorse süsinikkanga AUVM ( $S_a = 1500 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ,  $d_{\text{NLDFT}} = 1,42 \text{ nm}$ ) baasil valmistatud ühikraku mahtuvuse imaginaarosa sõltuvus vahelduvvoolu sagedusest 1 M  $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{CH}_3\text{NBF}_4$  lahustes erinevate solventide segudes (toodud joonisel) ( $\Delta U = 3 \text{ V}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ).



Joonis 4.

Nanopoorse süsinikkanga AUVM ( $S_a = 1500 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ,  $d_{\text{NLDFT}} = 1,42 \text{ nm}$ ) baasil valmistatud ühikraku normaliseeritud aktiivvõimsuse  $|P|/|S|$  (täidetud märgid) ja reaktiivvõimsuse  $|Q|/|S|$  (tühjad märgid) sõltuvused vahelduvvoolu sagedusest 1 M  $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{CH}_3\text{NBF}_4$  lahustes erinevate solventide segudes (toodud joonisel) ( $25^\circ\text{C}$ ).

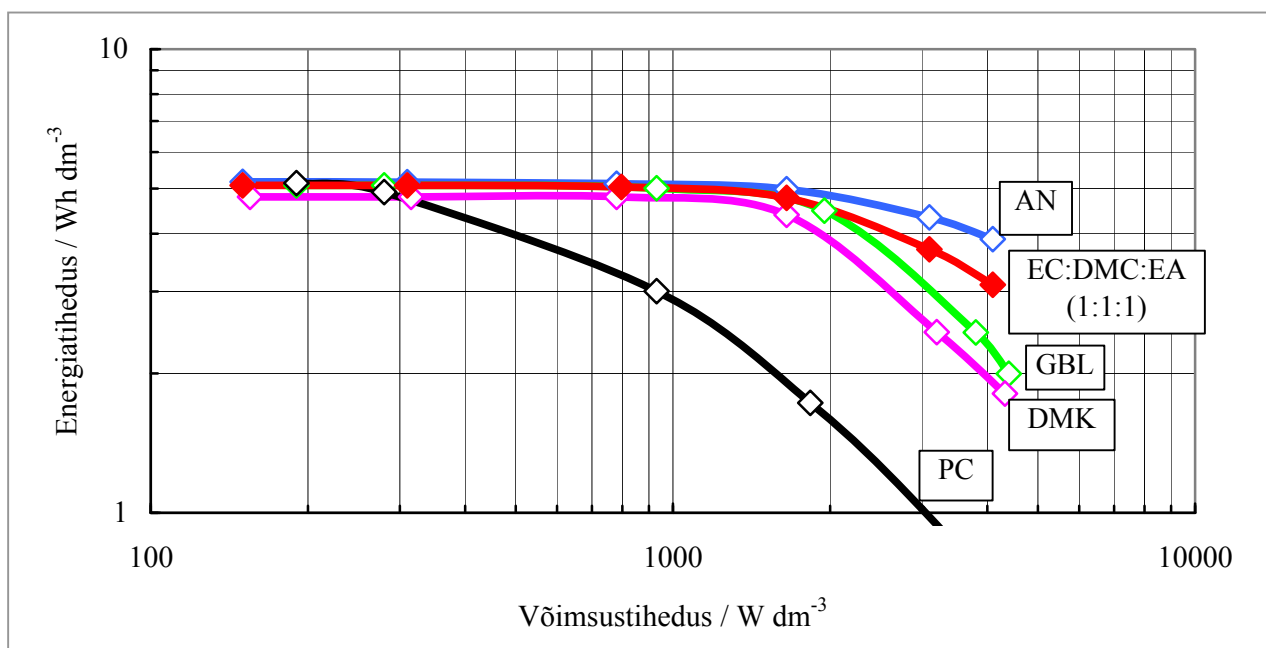
mesopoorideks, nii et summaarne mahtuvus ei väheneks (s.t optimeerida poride jaotusfunktsiooni süsinikmaterjalis). Seda, et EKKKde materjal on seni halvasti optimeeritud, näitavad mudelarvutused, mis põhinevad erinevatel empiirilistel, aga ka Eikerlingi, Kornyshevi ja Lusti poolt väljatöötatud nn nano/mesopoorse süsinikmaterjali hierarhilisel mudelil [Eikerling, 2005]. Sellest mudelist

tuleneb, et kaasajal osatakse elektrilaengu salvestamiseks (s.o ionide adsorptsiooniks) efektiivselt ära kasutada ainult 10–15% gaasifaasis aktiivsest eripinnast. Ülejäänud nanopoorid on kas blokeeritud adsorbeerunud (kemosorbeerunud) solvendimolekulide poolt või on nende raadius nii väike, et osaliselt solvateeritud/desolvateeritud ionide liikumine on raskendatud.

## RAGONE’i (VÖIMSUSTIHEDUSE ENERGIATIHEDUSEST) SÕLTUVUSED

Koostöös ASga Tartu Tehnoloogia ja California Davis’e Ülikooliga [Arulepp jt, 2004, 2006; Leis jt, 2006] uuriti nii ühikrakkude kui ka suurte EKKK patareide Ragone’i sõltuvusi, mille tüüpilisemad näited on toodud joonisel 5. Joonistelt on näha, et Ragone’i sõltuvuste kuju sõltub väga oluliselt nii elektrolüüdist (mooljuhtivusest), tempe-

ratuurist kui ka elektroodimaterjali paksusest. Elektrolüüdi viskoossuse kasvades leiab aset oluline võimsustiheduse vähenemine konstantse energiatiheduse korral. Parimaid tulemusi näitab AN ja halvimaid PC baasil valmistatud EKKK. Temperatuuri alanedes vähenevad võimsustiheduse väärtused seda kiiremini, mida viskoossem on



Joonis 5.

Energiatiheduse sõltuvus võimsustihedusest nanopoorse süsinikkanga AUVM ( $S_a = 1500 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ,  $d_{\text{NLDFT}} = 1,42 \text{ nm}$ ) baasil valmistatud ühikraku korral, mis on täidetud 1 M  $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{CH}_3\text{NBF}_4$  lahusega erineva koostisega solventides (toodud joonisel) ( $25^\circ\text{C}$ ).

elektrolüüt. Aktiivmaterjali kihi paksuse kasvades võimsustiheduse väärtused kahanevad seda kiiremini, mida viskoossem on elektrolüüt (solvent) või madalam temperatuur. Binaarsete segude (EC : EA (1 : 1) ja EC : E : EA (1 : 1 : 1) baasil (joonis 5) valmistatud EKKKd näitavad AN baasil valmistatud EKKKdele lähedasi omadusi väikeste ja keskmiste võimsus- ja energiatiheduste alas [Jänes, Lust, 2006bc]. Suurte energiatiheduste alas on need seni disainitud nanopoorsete materjalide korral valmistatud EKKKde jaoks kahjuks mõnevõrra väiksemad, mis on tingitud binaarsete

ja ternaarsete solventide segude baasil valmistatud elektrolüüdi suuremast viskoossusest kui AN ning seega väiksemast elektrolüüdi juhtivusest nano- ja mesopoorides.

Kokkuvõttes tuleb öelda, et nanopoorset süsinikmaterjalid omavad väga laialdasi rakendusvõimalusi EKKKdes, mida saab kasutada nii pika-aegsete energiasalvestitena, impulssvooluallikateks kui ka muudes elektrilistes seadmetes.

Ilmunud on üle 15 CC publikatsiooni ja kaitstud 1 doktoritöö.

## VIITED

Arulepp, M., Leis, J., Lätt, M., Miller, F., Rumma, K., Lust, E., Burke, A. F. J. 2006. The advanced carbide-derived carbon based supercapacitor. *J. Power Sources*, (accepted).

Arulepp, M., Permann, L., Leis, J., Perkson, A., Rumma, K., Jänes, A., Lust, E. 2004. Influence of the solvent properties on the characteristics of a double layer capacitor. *J. Power Sources*, 133, 320-328.

Eikerling, M., Kornyshev, A. A., Lust, E. 2005. Hierarchical model of high energy density double layer capacitor. Toward optimisation of the electrical double layer capacitor characteristics. *J. Electrochem. Soc.*, 152, E24-E33.

Jänes, A., Kurig, H., Lust, E. 2006. Characterisation of activated nanoporous carbon for supercapacitor electrode materials. *Carbon*, (accepted).

Jänes, A., Lust, E. 2005. Organic carbonate – organic ester based non-aqueous electrolytes for electrical double layer capacitors. *Electrochem. Comm.*, 7, 510-514.

Jänes, A., Lust, E. 2006a. Electrochemical characteristics of nanoporous carbide-derived carbon materials in various non-aqueous electrolyte solutions. *J. Electrochem. Soc.*, 153, A113-A116.

Jänes, A., Lust, E. 2006b. Use of organic esters as co-solvents for electrical double layer capacitors

with low temperature performance. *J. Electroanal. Chem.*, 588, 285-295.

Jänes, A., Permann, L., Arulepp, M., Lust, E. 2004a. Electrochemical characteristics of nanoporous carbide-derived carbon materials in non-aqueous electrolyte solutions. *Electrochem. Commun.*, 6, 313-318.

Jänes, A., Permann, L., Arulepp, M., Lust, E. 2004b. Voltammetric and electrochemical impedance spectroscopy studies of nanoporous carbon | 1M (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub>CH<sub>3</sub>NBF<sub>4</sub> electrolyte solution interface. *J. Electroanal. Chem.*, 569, 257-269.

Jänes, A., Permann, L., Nigu, P., Lust, E. 2004c. Influence of solvent nature on the electrochemical characteristics of nanoporous carbon | 1M (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub>CH<sub>3</sub>NBF<sub>4</sub> electrolyte solution interface. *Surface Sci.*, 560, 145-157.

Leis, J., Arulepp, M., Kuura, A., Lätt, M., Lust, E. 2006. Electrical double-layer characteristics of novel carbide-derived carbon materials. *Carbon*, 44, 2122-2129.

Leis, J., Perkson, A., Arulepp, M., Käärik, M., Svenssdon, G. 2001. Carbon nanostructures produced by chlorinating aluminium carbide. *Carbon*, 39, 2043-2048.

Lust, E., Jänes, A., Arulepp, M. 2004a. Influence of electrolyte characteristics on the electroche-

mical parameters of electrical double layer capacitors. *Solid State Electrochem.*, 8, 488-496.

Lust, E., Jänes, A., Arulepp, M. 2004b. Influence of solvent nature on the electrochemical parameters of electrical double layer capacitors. *J. Electroanal. Chem.*, 562, 33-42.

Lust, E., Jänes, A., Pärn, T., Nigu, P. 2004c. Influence of nanoporous carbon electrodes thickness on

the electrochemical characteristics of nanoporous carbon | x M (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>NBF<sub>4</sub> acetonitrile solution. *J. Solid State Electrochem.*, 8, 224-237.

Lust, E., Nurk, G., Jänes, A., Arulepp, M., Nigu, P., Möller, P., Kallip, S., Sammelselg, V. 2003. Electrochemical properties of nanoporous carbon electrodes in various nonaqueous electrolytes. *J. Solid State Electrochem.*, 7, 91-105.

# PROAKTIIVSED TEHNOLOOGIAD MEIL JA MUJAL

Leo Mõtus

Eesti Teaduste Akadeemia, Tallinna Tehnikaülikooli automaatika instituut

Merik Meriste

Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituut

## KOKKUVÕTE

Meie igapäevane elu muutub üha enam sõltuvaks nn tarkvaramahukatest (ingl *software-intensive*) tehissüsteemidest, mis on ehitatud taaskasutatavate komponentide (dünaamiliselt muutuva) võrguna, toimivad tihedas koostöös nii neid ümbritseva keskkonna kui ka tegelike kasutajatega (st meie endiga). Suur osa selliste süsteemide funktsionaalsusest on paindlikult muudetav, kuna ta on defineeritud tarkvaraliselt. Paljude taoliste süsteemide käitumist mõjutavad oluliselt neisse (või nende komponentidesse) sisse projekteeritud ning ehitatud sihifunktsioonid ja nn “eetilised printsiibid”. Selliseid tehissüsteeme nimetatakse proaktiivseteks. Proaktiivsete tehissüsteemide projekteerimiseks luuakse uusi ja täiendatakse mitmeid traditsioonilisi teooriaid. Nende realiseerimiseks kasutatakse kiiresti laienevat gruppi tehnoloogiaid, mille koondnimetuseks võiks olla proaktiivsed tehnoloogiaid ehk lühemalt proaktiivtehnoloogiaid.

## SISSEJUHATUS

Tarkvaramahukate süsteemide ja proaktiivtehnoloogiate arengu on esile kutsunud tehissüsteemide keerukuse ja neile esitatavate töökindluse, turvalisuse ning hinna nõuete ranguse kasv, aga samuti bioloogilise elu ja looduslike süsteemide toime mehhanismide kohta saadud uued teadmised. Väga lihtsustatult võib ju väita, et ka bioloogiline elu põhineb proaktiivsete tarkvaramahukate seadmete koostööl, kus tarkvara toimimise aluseks on DNAs olev informatsioon.

Tänaseks on maailmas tekkinud järjekordne isekorralduvate tehissüsteemide (ingl *self-organising systems*) uurimise ja rakendamise laine. Võrreldes

Uute teooriate ja proaktiivtehnoloogiate eesmärgiks on võimaldada paremini hallata süsteemide kiirelt kasvavat keerukust, vähendada nende potentsiaalset ohtlikkust ühiskonnale ja langetada hinda, tagades:

- süsteemis kasutatavate komponentide autonoomsuse kasvu,
- komponendi võime iseseisvalt jälgida oma lähikeskkonda (vastavalt vajadusele),
- komponendi võime muuta oma käitumist vastavalt keskkonnas toimuvale (reaalselt võimalikes piirides),
- komponentide süsteemiks integreerimise lihtsustamise ja
- valmis süsteemi hooldamise ning modifitseerimise lihtsustamise.

Käesolev artikkel tutvustab proaktiivtehnoloogiate alase tegevuse mõningaid aspekte Eestis ja mujal maailmas.

eelmise lainega (1960ndatel aastatel) on inimkonna tehnoloogiline ja teoreetiline baas oluliselt paranenud, mistõttu uued tehissüsteemid mõjutavad märgatavalt meie igapäevast elu. Reeglina on taolised tehissüsteemid ehitatud komponentide (dünaamiliselt muutuva) võrguna ning toimivad tihedas koostöös nii neid ümbritseva keskkonna kui ka tegelike kasutajatega. Neid tehissüsteeme iseloomustab tarkvaramahukus – st suur osa nende funktsionaalsusest on defineeritud tarkvaraliselt – ja nende ehitamiseks on väljatöötamisel grupp tehnoloogiaid, mida võib nimetada proaktiivtehnoloogiateks. Loomisel on teooriad taoliste süsteemide omaduste verifitseerimiseks.



Proaktiivtehnoloogiate kasutamise näiteid võib leida paljudelt elualadelt. Üks nende rakendamise esimesi valdkondi hõlmas autosid ja lennukeid. Kaasaegsed lennukid on reeglina vahetult arvutite poolt juhitavad. Piloodid töötavad tegelikult arvutioperaatoritena (kuigi paljud neist ise nii ei arva). Kui tavaautomaatikat on kasutatud lennukites juba aastakümneid, siis nn vahetu lennuki juhtimine arvuti poolt (ingl *fly-by-wire technology*) leidis laiemat kasutust alles alates 1990ndatest aastatest. Sellisel režiimil lennates puudub piloodil (hüdro-mehaaniline) otseühendus lennuki juhtorganitega – lennuki juhtimine toimub vaid läbi arvuti.

Lennukites kasutatavate protsessorite arvu kasvust annab ettekujutuse Boeing 747 ja 777 sardsüsteemides olevate protsessorite hulga võrdlus. Vanemas mudelis on umbes 100 erinevate funktsioonidega protsessorit, uuemas mudelis on protsessorid üle 1000. Igal pikemal lennul on protsessorite probleemide tõttu vaja lennuki arvutikonfiguratsiooni ja funktsioonide jaotust dünaamiliselt muuta. Muutused toimuvad reeglina ilma inimese sekkumiseta.

Autodes ei ole arvuti poolt auto vahetu juhtimise (ingl *drive-by-wire*) tehnoloogia – st tehnoloogia, kus autojuht rooliratta keeramisega juhib arvutit, mitte ei muuda hüdro-mehaaniliste seadmete abil rataste pöördenurka, veel igapäevasesse praktikas jõudnud. Sellegipoolest on igas kaasaegses autos (sõltuvalt hinnaklassist) 2–40 protsessorit. Arvutite hooleks küttesegu segamine, selle mootorisse sissepüstitamine, sisse- ja väljalaskeklappide õigeaegne avamine ja sulgemine, pidurite juhtimine, rataste koormusjaotuse dünaamiline juhtimine, autopiloodid, parkimisabisüsteemid, navigeerimise abistamise süsteem, mis kasutab ka GPS (*Global Positioning System*) ja muid abivahendeid.

Mobiiltelefonid, digi-TV, Skype, IP telefon ja pangautomaadid on tarkvaramahukad rakendused, mis ei vaja tutvustamist. Iseküsimus, kui palju on neisse seadmetesse sisse ehitatud proaktiivseid omadusi. Eestis veel suhteliselt vähetuntud on arupuru (ingl *intelligent dust, motes, etc.*) ja RFID

siltide (raadiosagedust peegeldavad passiivsed märgised, mis toimivad unikaalsete identifikaatoritena) kasutamine turvasüsteemides, keskkonnanseires, logistikas ja protsessijuhtimises. Sedalaadi vahendite ja nendega tihedalt seotud arvutite spon-taanvõrkude uurimine on Eestis alles algusjärgus.

Uute tehnoloogiate ühisjooneks on üha suurenev vajadus realiseerida tehissüsteemide funktsioone tarkvaras ning arvutite vahetu interaktsiooni möödapääsmatus arvutite ja arvutivälises keskkonnas toimuvate füüsikaliste protsesside vahel (lisaks liidesele inimesega). Enamikul juhtudel on tegemist nn peidetud (e märkamatu) arvutitega ja nähtamatute, kuid (ajas) püsivalt toimivate situatsioonitundlike arvutustega (ingl *ubiquitous, pervasive or invisible computing*), mida tavakodanik ei pruugi üldse märgata.

Selliste süsteemide komponendid on sageli omakorda küllaltki keerulised süsteemid, st sisuliselt on tegemist süsteemide süsteemiga (ingl *system of systems*), mida töökindlana toimima saada on äärmiselt raske ülesanne. Süsteemide süsteem on suhteliselt uus mõiste, mis tähistab laiahaardelise interdistsiplinaarse probleemi lahendamiseks loodud kompleksset vahendit – tüüpiliselt mitme heterogeense, hajussardsüsteemi tihedat koostööd eeldav ja tihti ka inimorganisatsioone sisaldav ühendus.

Süsteemide süsteemi iga komponent (ja ka kompleks tervikuna) on mõjutatud teda ümbritsevast keskkonnast. Kuna keskkonna kohta saada olev informatsioon on põhimõtteliselt mittetäielik, siis ei saa ka komponentide sisesed ja välised interaktsioonid olla rangelt põhjuslikud (nagu seda on konventsionaalse arvutiteaduse algoritmide ja programmide vahelised ühendused). Seetõttu tekib süsteemide süsteemis ja tema komponentides nn ILMNEV KÄITUMINE (ingl *emergent behaviour*). Ilmnev käitumine ei ole ennustatav üksikute komponentide käitumiste põhjal, mis raskendab süsteemide süsteemi töökindlusele ja käitumisele esitatud piirangute garanteeritud rahuldamist. Nime-tatud probleemi lahendusi otsitakse kompleksi eesmärgipärase isekorraldumise võime – PROAK-

TIIVSUSE – loomises ning isekorraldumise protsessi juhtimise võimaluste (näiteks adaptiivsuse, struktuuri ja funktsionaalsuse dünaamilise rekonfiguratsiooni, iseõppimise) uurimises.

Proaktiivsuse realiseerimise eeltingimus on süsteemi osade autonoomsus, mis omakorda eeldab komponendipõhiseid süsteeme, kus komponendid käituvad eesmärgipäraselt (vastavalt dünaamiliselt tekkivale situatsioonile) ja autonoomselt. Selliseid komponente nimetatakse sageli agentideks. Agendid realiseerivad süsteemile vajalikke töid ehk teenuseid. Teenustepõhise töökorralduse puhul kasutavad agendid oma eesmärkide saavutamiseks

## PÕHIMÕISTED – AUTONOOMIA, ILMNEV KÄITUMINE, PROAKTIIVSUS, SITUATSIOONITUNDLIKKUS

Enamus formaalseid teooriaid on tegelikus maailmas eksisteerivate nähtuste ja protsesside ligikaudsed kirjeldused. Ainsaks erandiks võiks lugeda matemaatika, mis uurib iseennast ja iseenda sees tekkivaid seoseid. Teooria muutmine võetakse ette siis, kui teooria kirjeldab tegelikkust liiga ligikaudselt. Väidet illustreerivad konventsionaalsel algoritmiteoorial põhineva arvutiteaduse laiendamise katsed, mis algasid 1970ndate keskel ja koguvad üha enam populaarsust. Muutmise vajaduse tingis olemasoleva teooria puudulik võime selgitada ja analüüsida uutele arvutirakendustele olulisi omadusi ning toetada vajalike omaduste teadlikku ning sihipäraselt saavutamist süsteemide arendamise käigus.

Nii näiteks selleks, et tõsisemalt arutada süsteemi-osadele autonoomia võimaldamist, oli vaja liikuda algoritmikesksel mõtlemisel põhinevast ja täielikult teadaolevatel põhjuslikel seostel ülesehitatud mõnusast, kuigi pisut stagneerunud ja piiratud võimalustega maailmast interaktsioonikesksel mõtlemisel põhinevasse maailma. AUTONOOMIA on esimene oluline eeldus võitluseks kiiresti kasvava keskse juhtimise keerukusega. Selleks, et jõuda bioloogilistes süsteemides laialdaselt kasutatava iseorganiseerumise paradigma rakendamiseni tehissüsteemides, peame süsteemi komponentidele tagama mõõduka autonoomia.

vastavalt situatsioonile ja vajadusele teiste agentide teenuseid. Süsteemi kui tervikut käsitatakse füüsilises keskkonnas paikneva agendiperena ehk agentsüsteemina (ingl *multi-agent system*).

Edasises käsitleme lühidalt põhimõisteid, tutvustame proaktiivsete tehnoloogiate ja proaktiivse modelleerimise pilootrakendusi Eestis, anname lühilevaate proaktiivsete tehnoloogiate uurimise ja arenduse suundadest maailmas ja Eestis. Kokkuvõtte asemel, nähes tõsist ja põhjendatud vajadust proaktiivsete tehnoloogiate alase uurimis- ja arendustöö intensiivistamiseks ja sihipäraseks suunamiseks Eestis, esitame mõned soovitusel.

Kuna enamik tegevusi on võimalik läbi viia mitme erineva algoritmi põhjal, muutub süsteemi projekteerimise algetapil konkreetse algoritmi valikust märksa tähtsamaks see, kuidas me tegevuse tulemuse teistele asjast huvitatud osapooltele teatavaks teeme. Teiste sõnadega, interaktiivses süsteemis pole primaarne mitte konkreetsete algoritmide vaheline põhjuslik seos, vaid otstarbeka ja õigeaegse interaktsiooni korraldamine kahe algoritmi klassi vahel, mis sisaldavad kõikvõimalikke vajalike tööde tegemiseks sobilikke algoritme. See annab meile mõningase autonoomia konkreetsete algoritmide valimiseks igas konkreetses situatsioonis ja muudab primaarseks INTERAKTSIOONI korraldamise kahe algoritmi vahel.

Interaktsioonikesksete süsteemide näiteks on sard-süsteemid, arvutivõrgud ja eriti spontaansed arvutivõrgud (ingl *mobile, ad hoc networks*), autonoomsed robotid ning muud eespool kirjeldatud arvutirakendused, mis koosnevad selgelt eristatavatest komponentidest ja on vahetus interaktsioonis neid ümbritseva keskkonnaga. Niipea kui komponentidele lubada piiratud autonoomiat, muutub süsteemi kui terviku käitumine keerulisemaks. Terviku käitumist ei ole enam võimalik tuletada tema osade käitumisest, tekib nn ILMNEV KÄITUMINE (ingl *emergent behaviour*), mis lisaks komponentide omadustele sõltub ka komponentide

omavaheliste interaktsioonide dünaamikast ning komponentide interaktsioonidest keskkonnaga, mille kohta on olemas vaid osaline informatsioon. Ilmnevat käitumist saab vältida, kui süsteemi realiseerimisel pidada rangelt kinni algoritmiteooria eeldustest, kuid paljudel juhtudel ei rahulda selline süsteem tegelikke vajadusi.

Autonoomsete komponentide korral tekib võimalus sihipäraselt valida ja/või muuta komponentide reaktsioone ning neis toimuvat arutluskäiku. Selleks fikseeritakse tavaliselt igale komponendile eesmärk, mis on määratud tema sihifunktsiooniga. Kui komponent teeb enamuse oma otsuseid ja valikuid nii, et optimeerida oma sihifunktsiooni väärtust, on selline komponent proaktiivne.

PROAKTIIVSE SÜSTEEMI looja peaks oskama valida süsteemi komponente ja nende sihifunktsioone nii, et komponentide interaktsioonide tulemusena süsteem tervikuna optimeeriks oma sihifunktsiooni. Tingituna ilmneva käitumise olemasolust ja selle mõjust süsteemi kui terviku käitumisele ei ole see lihtne ülesanne ja hetkel puuduvad teoree-

tilised vahendid sellise ülesande üldjuhu lahendamiseks.

Proaktiivsete süsteemide ja komponentide korral on oluline koht ka situatsiooni mõistel ja komponendi/süsteemi situatsiooniteadlikkusel. Paljude muude parameetrite kokkulangemise korral võib SITUATSIOONITEADLIK PROAKTIIVNE SÜSTEEM [Liu, Tsui, 2006] sõltuvalt situatsioonist käituda täiesti erinevalt. Näiteks võib sama otsus ühes konkreetses situatsioonis olla tõene, teises aga väär. Situatsiooni iseloomustavate muutujate valik on vahetult seotud sihifunktsiooni argumentidega, komponendi ja/või süsteemi käitumisele seatud kitsendustega ja ka keskkonnale oluliste omadustega. Välisest dünaamiliselt muutuvatest faktoritest (st situatsioonist) sõltuva arvutusprotsessi formaalse kirjeldamise uurimine on maailmas alles algusjärgus.

Tänase päeva seisuga ei ole olemas vahendeid proaktiivse situatsioonitundliku süsteemi projekteerimiseks nii, et süsteem garanteeritult rahuldaks oma sihifunktsiooni ja samal ajal tema ilmnev käitumine jääks lubatud piiridesse.

## MÕNEDE PROAKTIIVTEHNOLOOGIATE PILOOTRAKENDUSTE NÄITEID EESTIS

Kaks esimest näidet on seotud interaktiivsete (geograafiliste) digitaalkaartide dünaamilise töötlemise agentsüsteemiga [Meriste jt, 2005; Preden, 2006]. Digitaalkaardi (digikaardi) rakendused põhinevad geneerilisel agentsüsteemide arenduskeskkonnal KRATT, mis on realiseeritud Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudis ja on praktiliselt kasutatav tehnoloogiline lahendus. Kolmas näide viitab töödele, mis käsitlevad agenttehnoloogia rakendusvõimalusi molekulaarbioloogia nähtuste ja inimorganisatsioonide kirjeldamisel ning analüüsil ja keskendub esialgu pigem modelleerimise metodoloogiale ning mudeli analüüsi meetoditele kui mudeli sünteesile.

Interaktiivse digikaardi koostamise ja töötlemisega tegelevasse agentsüsteemi kuuluvad aluskaardi osi otsivad ja edastavad agendid, täiendavaid vektorikte edastavad agendid, kaardiobjektidega seotud lisainfot haldavad agendid, mobiilseid objekte jälgivad agendid ja teenistuslikud agendid. Pro-

aktiivne agendipere loob situatsioonile vastavate infokihtidega kaardi, ajakohastab regulaarselt sellel esitatud täiendavat informatsiooni ja mobiilsete objektide liikumist ning võimaldab kasutajal kaardile lisada täiendavat infot.

### MOBIILSETE OBJEKTIDE SEIRE (GPSga)

Firma on huvitatud oma autode liikumise jälgimisest. Iga üksiku auto jälgimiseks piisaks laialt levinud GPS-põhisest tarkvarast. Mitme auto jälgimisel on mõistlik, kui iga auto teavitab regulaarselt oma asukohast interaktiivset kaardisüsteemi. Interaktiivne kaardisüsteem kogub ja esitab saadud andmed ühisel kaardil. Selline pidevalt muutuv interaktiivne kaart peab arvutivõrgus olema tavapäraste vahenditega kättesaadav mitmele kasutajale samaaegselt. Iga kasutaja saaks interaktiivsel kaardil valida oma seirepiirkonna ja/või autode koosluse, mille kohta ta hetkel infot vajab. Sellise süsteemi prototüüpi arendab TÜ tehnoloogiainstituut koostöös firmaga Autoseir OÜ. Näitefrag-

ment Võrumaa interaktiivsest kaardist ja n-ö auto-infost on toodud joonisel 1.

#### MOBIILSETE OBJEKTIDE LOKALISEERIMINE JA SEIRE (ilma GPSta)

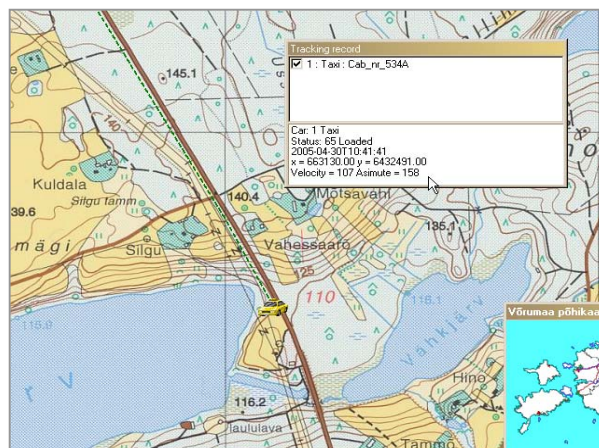
Paljudes kohtades ei ole GPS kasutatav – näiteks hoonetes, allmaarajatistes, suurlinnades ja muudes kohtades, kus GPS signaalilevi on raskendatud. Sellisel juhul tuleb eelnevalt tekitada teadaolevate koordinaatidega “majakatest” koordinaatvõrk, mille alusel saab määrata teiste objektide asukohta ja/või liikumist. Selline ülesanne tekib andmete kogumisel spontaanses andurite võrgust, nende andmete töötlemisel ja interpreteerimisel. Spontaanne andurite võrk (ingl *ad hoc sensor network*) moodustub laialipuistatud arupurust (ingl *intelligent dust, motes, etc.*). Situatsioonitundlikus rakenduses on kogutud info ühilduvuse hindamiseks oluline teada iga võrgu sõlme asukoht.

Sellises rakenduses on kasutatav sama Kaardikrati tarkvara, mis eelmises näites. Ainult aluskaardiks kasutatakse geograafilise kaardi asemel rajatise plaani või lihtsalt majakatest moodustatud koordinaatvõrku. Kirjeldatud probleemide uurimiseks on Tallinna Tehnikaülikoolis alustatud asukohtade dünaamiliseks määramiseks kasutatavate meetodite teoreetilist uurimist ja ehitatud ka eksperimentideks sobiv katsepolügoon [Preden, 2006].

Robotautol paiknev mobiilne spontaanvõrgu sõlm määrab kindlate koordinaatidega majakatega “vesteldes” oma asukoha koordinaatide hinnangud. Kui enda asukoht on teada, leitakse ruumis paiknevate statsionaarsete andurite asukohtade hinnangud (foto 1). Spontaanvõrgu sõlmede asukohad registreeritakse püsiühendusega arvutivõrgus paiknevas kaardiserveris koostataval interaktiivsel kaardil. Spontaanvõrgu sõlmede asukoha hinnangud kaardil paranevad järk-järgult ja alusplaani algsel puudumisel tekib pikapeale ka ligikaudne rajatise plaan. Tekkiv kaart on allalaaditav piisava arvutivõimsusega mobiilsele või paiksele spontaanvõrgu sõlmele (joonised 2, 3).

Samal katsepolügoonil realiseeritakse ka ITEA (*Information Technology for European Advancement*) projekti nr 05018 “*Gene-Auto: Automatic*

*Code Generation for Real-time Embedded Systems*” katseülesanne, mille eesmärgiks on katsetada automaatset koodigeneraatorit spontaanvõrgu sõlmede reaalaja tarkvara genereerimiseks.



Joonis 1.  
Interaktiivne kaart TÜ TI tarkvaras Kaardikratt.

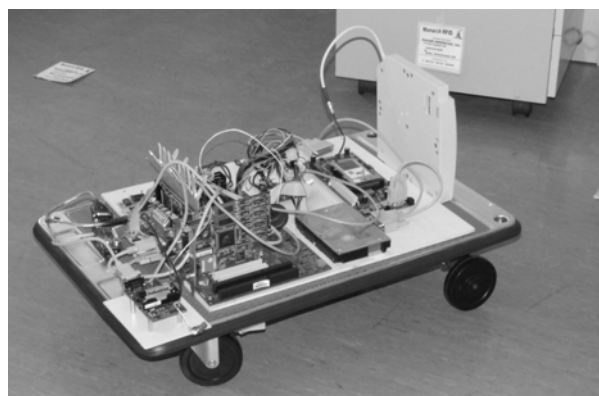
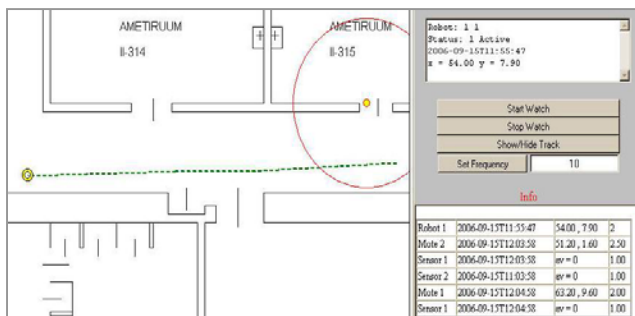
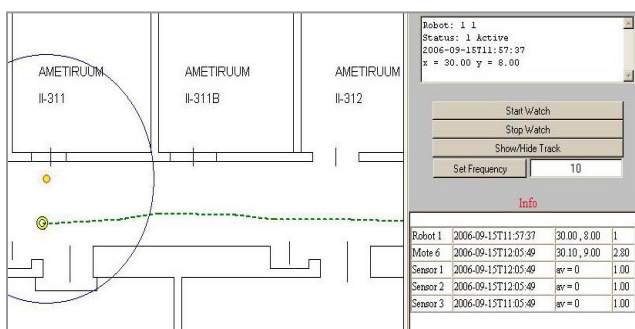


Foto 1.  
Robotautol asetsev juhtimisseade ja spontaanvõrgu sõlm, põrandal ja kapil on näha RFID silte.



Joonis 2.  
Spontaanvõrgu kaart hetkel 11:55:47.



Joonis 3.  
Spontaanvõrgu kaart hetkel 11:57:37.

## PROAKTIIVSE MODELLEERIMISE NÄITED

### RAKU METABOLISMI MODELLEERIMINE [Lints, 2005]

Üherakulise bakteri elutegevust on ligikaudselt modelleeritud agentsüsteemina. Esimeses lähenduses on agentsüsteemis neli ülimalt lihtsustatud kirjeldusel põhinevat ja üksteist mõjutavat agent –

## PROAKTIIVTEHNOLOOGIATE ARENDAMINE JA SELLEGA SEOTUD UURIMISTÖÖ

Proaktiivsete süsteemide ja tehnoloogiate arendamine on maailmas kiirelt uuenev tegevusvaldkond. Proaktiivsed tehissüsteemid on peaaegu eranditult tarkvaramahukad, mistõttu tänast otsingutestadiumi iseloomustab uute arvutuslike kontseptsioonide ja tõlgenduste paljus – *situation-aware, service-based, ubiquitous, pervasive, autonomous,*

tinglike nimedega Keskkond, Bakter, DnaA\_vabrik ja DNA. Keskkond on iseloomustatud bakterile sobiva toidu kogusega. Bakter haldab bakterisiseseid agente (DnaA\_vabrik ja DNA) ning pooldub, kui bakteri DNA dubleerimine on lõppenud. DnaA\_vabrik toodab DnaA valku sõltuvalt keskkonna tingimustest ja rakus olevatest aktiivsetest promootoritest ning DNA käivitab vajalike eeltingimuste korral DNA dubleerimise. DNA dubleerimise protsessi modelleerimine on esialgselt mudelist välja jäetud. Sellelgi poolest vastab neljast agendist koosneva süsteemi ilmnev käitumine kvalitatiivselt üsna täpselt katsetulemustele ning mõningase parameetrite sobitamise korral vastab mudel katsetulemustele ka kvantitatiivselt.

### ILMNEVA KÄITUMISE MODELLEERIMINE ORGANISATSIOONIDES [Savimaa, 2005]

Tegemist on dünaamiliselt muutuv keskkonnas opereeriva multifunktsionaalse keskkonnaga, mille tegevusele on reeglina seatud ranged ajakitsendused (näiteks politsei, päästeamet jne). Seni maailmas kasutusel olevad organisatsioonimudelid ei ole võimelised tekkinud ilmnevat käitumist piisava täpsusega analüüsima. R. Savimaa näitab [Savimaa, 2005], et uut tüüpi mudel, mis kombineerib traditsiooniliste organisatsioonimodelite head omadused ajatundlike arvutuste analüüsi ja proaktiivsete osade agentmudelitega, annab tegeliku käitumisega märgatavalt paremini ühilduva tulemuse. See võimaldab uut tüüpi mudelit kasutada organisatsiooni restruktureerimise plaanide analüüsil ja nii vältida väheefektiivseid (või isegi kahjulikke) ümberkorraldusi.

*agent-based* ja muud mittetraditsioonilised arvutuslikud kontseptsioonid. Proaktiivtehnoloogiate arendamise probleemidele lahenduste otsimine peegeldub erinevates uurimisvaldkondades erinevalt. Arvutiteaduses (*computer science*) on aktuaalseks arvutatavuse mõiste laiendamine – näiteks interaktiivse arvutuse mudelid ja situatsioonitundliku in-

teraktiivse arvutuse mudelid, mis märgatavalt laiendavad Church-Turingi "mõttes" arvutatavate funktsioonide klassi. Tarkvaratehnikas (*software engineering*) otsitakse uusi lahendusi süsteemide ehitamisel autonoomsetest ja proaktiivsetest komponentidest, jättes sealjuures komponentide adaptiivsusest ja õppimisest tekkivate spetsiifiliste nähtuste uurimise teistele erialadele, kuid üritades siiski tegelda ilmneva käitumise põhjuste väljaselgitamise ja mõjutamisega. Arvutiteadus ja tarkvaratehnika on kaks peamist võtmevaldkonda proaktiivtehnoloogiate väljatöötamisel ja edukal realiseerimisel.

Proaktiivtehnoloogiate arengut toetavad oluliselt ka agendisüsteemide, spontaanvõrkude, autonoomsete robotite, arukate seadmete ja materjalide (näiteks arupuru, ingl *intelligent dust*) ning viimastel aastatel taas esile kerkinud kompleksüsteemide (*complex adaptive systems*) uurimisvaldkonnad. Ilmekaks näiteks on nn bio-inspireeritud arvutused (ingl *nature-inspired computing* [Liu, Tsui, 2006]). Autonoomsete proaktiivsete komponentide rakendamine huvitab tarkvaratööstust nii uute rakendusalaade hõlmamise, tarkvaratootmise efektiivsuse parandamise kui ka toodete elujõulisuse (*viability*) tõstmise seisukohalt.

## MUJAL

Alates käesoleva sajandi algusest tegutsevad suured firmad sihipäraselt proaktiivsete tehnoloogiate arendamisel. Vaatame näiteks IBM *autonomic computing*, Microsofti initsiatiivi *universal plug and play* ja Inteli *proactive computing* uurimisprogramme [Want jt, 2003]. Need näited on otseselt seotud kõikjale tungiva arvutuse (*ubiquitous computing*) trendiga. Enamus loetletud initsiatiividest põhineb proaktiivsetel süsteemidel ja tehnoloogiatel, mis koos agendiparadigma (*agent-based computing*) süstemaatilise rakendamise [Luck jt, 2005] moodustavad toimuva läbimurde kontseptuaalse ja tehnoloogilise aluse. Eeltoodud olid puhta arvutimaailma näited, lisanäideteks muudelt aladelt võiksid olla arukad majad (*intelligent buildings*), turvasüsteemid, len-

nukitööstus, autotööstus, materjalitehnika (uute materjalide projekteerimine ja tootmine).

## EESTIS

Proaktiivsete komponentide ja süsteemide sihipärase uurimise ja katselise rakendamisega alustati Eestis möödunud sajandivahetusel. Tallinna Tehnikaülikooli reaalarjasüsteemide grupi ja Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudi agendilabori koostööst on välja kasvanud interdistsiplinaarne proaktiivtehnoloogiate uurimisrühm üksikisikutest koosneva koostöövõrgustikuga (Lüübeki, Kuopio, Toulous'e, Browni ja Connecticuti ülikoolid). See uurimisrühm osaleb mitmes rahusvahelises võrgustikus (näiteks ESF COST Action 295, ERANET projektis Complexity-NET). Sidemeid praktikaga toetab lepinguline koostöö mitme firmaga (Airbus, AlcatelAlenia Space, EADS Astrium, Siemens Automotive VDO, Microsoft Research, Plenware, Cril Technologies, IB Krates, Webmedia, Autoseire OÜ, OÜ Eesti Veeprojekt, OÜ Maatark, Eli OÜ) erinevate rakendusuringute vormis.

Eesti uurimisrühm käsitleb proaktiivset süsteemi kui interaktiivsete, autonoomsete, proaktiivsete komponentide (agentide) muutuva topoloogiaga võrku dünaamiliselt muutavas keskkonnas. AGENT on süsteemi teatud kindla ülesandega komponent, millele on antud õigus ja võime seada oma volituste piires eesmärged ja mis võib käituda proaktiivselt nende eesmärkide saavutamiseks. Adegvaatseks käitumiseks süsteemi koosseisus peab autonoomne agent, sõltuvalt oma rollist süsteemis ja konkreetsest situatsioonist, oskama sobitada oma ontoloogia süsteemi teiste komponentide ja ka süsteemi kui terviku ontoloogiaga. Süsteemi komponentide interaktsiooniskeemid (ehk osalevate agentide ontoloogiatega kooskõlas olev infovahetus) ja situatsiooniteadlikkus vajavad samalaadset interaktiivselt kohanevat käsitlust.

Uurimishüpoteesi kohaselt moodustavad agentide situatsioonikäsitlused (teadmine ajast, kohast ja süsteemi olekust), interaktsiooniskeemid ja interaktsioonialalugu taustsüsteemi, mis võimaldab

seada kitsendusi agentide käitumisele ning reegleid ja tingimusi agentide ja süsteemi käitumise verifitseerimiseks. Rõhuasetus on seejuures hajustehtisintellektile omasest üksikagendi intellekti kujundamise kesksusest nihutatud agentide grupi interaktiivsusele ja selle grupi situatsioonimõistmise käsitlemisele ning agentsüsteemi kui terviku organisatsioonile.

Süsteemi ja tema komponentide verifitseerimise formaalseks aluseks on situatsiooniteadlik interaktiivne arvutusmodell. Vastava mudeli väljatöötamine, uurimine ja arendamine on käimasolevate alusuuringute põhieesmärk. Hüpotees, mille kohaselt agendisüsteemi kui terviku ontoloogiat ja süsteemis osalevate autonoomsete agentide ontoloogiaid ühendavaks aluseks on agentide terviklikud situatsioonikäsitlused, on Eestis tekkinud ja senises uurimistöös kinnitust leidnud. Teisisõnu, vajatakse sellist interaktiivse arvutuse mudelit, mis kirjeldaks ka situatsiooniteadlike autonoomsete agentide ilmnevat käitumist. Meenutame, et ilmnevat käitumist on süsteemi käitumise osa, mida ei ole võimalik algoritmiliselt tuletada süsteemi ja tema komponentide staatilistest kirjeldustest.

Rakendusuuringud on suunatud tehnoloogiaplatvormi prototüübi arendamisele, tuginedes situatsiooniteadmisega interaktiivse arvutuse paradigmale ja realiseerides proaktiivseid pilootsüsteeme. Tehnoloogiaplatvormi prototüüp on realiseeritud agentsüsteemide ARENDUSKESKKONNANA KRATT, mis sätestab üksiku agendi ja/või agendisüsteemi arhitektuuri ning pakub vahendeid geneeriliste tarkvaraagentide programmeerimiseks ja häälestamiseks.

Arvutiteaduse traditsiooniline aparatuur on osutunud interaktiivse arvutuse kirjeldamisel sobimatuks. Algoritmilise arvutuse kontseptsiooni kohaselt ei tohi keskkonnas toimuvad sündmused mõjutada arvutust selle toimumise ajal (algoritmilise arvutuse mudelis eeldatakse, et kogu arvutustes kasutatav info on programmil teada juba enne arvutuste algust). Situatsiooniteadliku interaktiivse arvutuse uurimiseks vajaliku kontseptuaalse aluse moodustavad interaktiivse arvutuse

senituntud mudelid: Turingi c-machine (Turing, 1936), CCS (Milner, 1980), Q-mudel (Mõtus, 1983), CSP (Hoare, 1985),  $\pi$ -arvutus (Milner, 1992), atribuutautomaat (Meriste, Penjam, 1992), interaktsioonimasin (Wegner, 1995), püsiv Turingi masin (Goldin, 2004), jne. On tähelepanuväärne, et enamuse nimetatud mudeleid ei käsitle situatsioonitundlikku arvutust [Motus jt, 2005], vaid tavapäraselt interaktiivset arvutust. Erandiks on reaalarvutussüsteemide modelleerimisest välja kasvanud multivoo interaktsioonimasinat esitav Q-mudel ja kontekstitundlikku järjestikust interaktsioonimasinat esitav atribuutautomaat.

Situatsiooniteadliku interaktiivse arvutuse modelleerimise lähtekohaks on situatsiooniinfot esitavate täiendavate atribuutide lisamine autonoomse arvutusagendi lõpliku, aga fikseerimata pikkusega interaktsioonivoogude kirjeldustesse. See võimaldab sisse tuua situatsiooniatribuutide väärtustest sõltuvad verifitseerimisreeglid ja agendi valikuid piiravad kitsendused. Hetkel on selles töösuunas käsil ajateadmisega interaktiivse arvutuse mudeli koostamine püsiva Turingi masina baasil, seda koostöös Lüübecki ülikooli (prof W. Dosch), Browni ülikooli (prof P. Wegner) ja Connecticuti ülikooliga (prof D. Goldin).

Uue mudeli keskseks osaks on SITUATSIOONITEADLIKE AGENTIDE INTERAKTIIVSE ONTOLOOGIA defineerimine. Sellise ontoloogia alusel on omakorda võimalik kirjeldada agendi (ja agentide koosluse) käitumise verifitseerimise meetodeid ning uurida agendi (ja agentide koosluse) dünaamilist reageerimist situatsioonidele. Tulemusena peaks tekkima võimalus moodustada situatsiooniteadlikest autonoomsetest agentidest avatud süsteem, mis realiseeriks eelnevalt spetsifitseeritud käitumise, tagaks ilmneva käitumise püsimise etteantud piirides ja garanteeriks nõutava töövoime.

Eksperimentaalne töösuund on käesoleva uurimistöö lahutamatu osa, mitte ainult abivahend teooria järelduste kontrollimiseks (nagu sageli arvutiteaduses). Arenduskeskkonnas Kratt realiseeritud eksperimente kasutatakse käesolevas uurimistöös



nii pilootsüsteemide tegemiseks erinevates valdkondades kui ka teoreetilise arvutusmudeli võimaluste ning tegelike proaktiivsete, interaktiivsete arvutussüsteemide vajaduste vastavuse kontrollimiseks. Arenduskeskkonnana on Kratil veel tublisti kasvuruumi, eelkõige seoses situatsiooniteadliku agendi ontoloogia, agendisüsteemi organisatsiooni kujunemise ning interaktiivse arvutuse omaduste uurimisega ja selleks vajalike analüüsimetoditega. Enamus seni Kratil realiseeritud agentsüsteemide näiteid on seotud erinevate digitaalkaartide rakendustega. Kuid see ei ole põhimõtteline ja on põhjustatud vaid olemasolevast tööjõust ning olemasolevate lepingute sisust. Digi-

## SOOVITUS

Arvestades proaktiivtehnoloogiate alal maailmas toimuvaid protsesse ning Eesti hetkepositsiooni nendes protsessides, tundub olema otstarbekas pöörata rohkem tähelepanu proaktiivtehnoloogiate alase uurimis- ja arendustöö sihipärasele edendamisele Eestis. See võiks anda Eestile ainulaadse võimaluse olla jätkuvalt uute kõrgtehnoloogiliste toodete ning nende valmistamise oskusteabe loomise ja väljaarendamise liidrite hulgas. Arvestades optimistlik-realistlikult meile iseloomulikku väga pikka reageerimisaega ja minimeeritud investeringumahte, suudaksime ehk mõneks ajaks jääda tipust mitte väga kaugemale. Igal juhul annaks proak-

## VIITED

Lints, T. 2005. Bakteri rakus toimuvate protsesside esitamine multiagentsüsteemina DnaA tiitrimise mudelil põhineva agentmudeli näitel, TTÜ automaatika instituut, magistritöö.

Liu, J., Tsui, K. C. 2006. Toward nature-inspired Computing. *Communications of the ACM*, 49, 10, 59-64.

Luck, M., McBurney, P., Shehory, O., Willmott, S. (eds.). 2005. *Agent Technology Roadmap*, Agentlink III.

Meriste, M., Motus, L., Kelder, T., Helekivi, J., Marandi, A., Preden, J. 2005. Location awareness

taalkaartide rakenduste tegemiseks on Krati osadest tehtud tööriist (Kaardikratt), mis on samal ajal geneeriline agentsüsteem ja ka spetsialiseeritud arenduskeskkond. Senised Kaardikrati abil realiseeritud rakendused on näiteks mobiilse aruka tolmu jälgimissüsteemi prototüüp, Tartu linna tehnovõrku infosüsteem, Eesti suurkaevude kaardiagentuuri prototüüp. Loetletud rakenduste põhjal uurime situatsiooniteadlike agentide ja nende dünaamiliste koosluste omadusi ning nende käitumist erinevates stsenaariumides. Kaardiagentide tehnoloogiaplatvormi arendamine on kujunenud omaette töösuunaks, kus vastavat agendiperet ja selle oskusi arendatakse mahukate rakendusuringute raames.

tiivsete tehnoloogiate arendamine ja (lähitulevikus) kasutuselevõtt Eesti teadusmahukale ja IT tööstusele pikemas perspektiivis märgatava konkurentsieelise.

Senine proaktiivtehnoloogiate alane tegevus Eestis on vaadeldav üksikute entusiastide hobina, mida on osaliselt toetanud mitmesugused finantseerimiskogud. Avaldame tunnustust sihtfinantseerimisteemade 0142509s03, 0182565s03 ja ETF grantide nr 6182, 4860 rahastamisotsuste tegijatele, Eesti Töökindlate Arvutisüsteemide Tippkeskusele, EITSA-le ja EAS-le käesolevas artiklis kirjeldatud tegevuste osalise rahastamise eest.

of information agents. *Advances in Databases and Information Systems*, Springer Verlag, Lecture Notes in Computer Science, 3631, 199-208.

Motus, L., Meriste, M., Dosch, W. 2005. Time awareness and proactivity in models of interactive computation. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 141, 69-95.

Preden, J. 2006. Communication area based positioning. *Mobile Ad-hoc and Sensor Systems*. Proc. 3rd IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, 336-347.



Savimaa, R. 2005. Modelling Emergent Behaviour of Organisations. PhD thesis on Informatics and Systems Engineering, Tallinn University of Technology, TTÜ kirjastus, 212 pp.

Want, R., Pering, T., Tennenhouse, D. 2003. Comparing autonomic and proactive computing. IBM Systems Journal, 42, 1, 129-135.

# KEEVKIHT-PÕLETUSTEHNOLOOGIA

*Arvo Ots*

Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituut

## SISSEJUHATUS

Tahkekütuse keevkihis põletustehnoloogia on leidnud laiaulatuslikku kasutamist ja seda täiustatakse pidevalt. Tugeva tõuke selle meetodi arengule andis avanev võimalus edukalt põletada erineva kvaliteediga kütuseid. Kergemini on lahendatavad keskkonnahoiu probleemid. Üheks oluliseks küsimuseks tahkekütuste põletamisel on gaasiliste väävliheitmete probleem. Keevkiht-põletustehnoloogia rakendamisel on see suhteliselt lihtsasti lahendatav, vajamata kalleid lisaseadmeid.

Keevkihtpõletus kuulub madalatemperatuurse põletustehnoloogia valdkonda, kus kütuse põlemistemperatuur jääb vahemikku 750–900 °C. Seni laialdasel kasutusel oleva tahkekütuse tolmpõletuse puhul võib põlemisgaasi temperatuur ulatuda 1400–1550 °C-ni. Kütuse madal põlemistemperatuur muudab katla küttepindadele moodustuvate tuhasadestiste struktuuri ning võimaldab hõlpsa-

## KEEVKIHI OLEMUS JA REŽIIMID

Keevkiht on tahkeosakeste hõljum gaasivooluses, kujutades endast pulseerivat aerodünaamilist süsteemi, millel on vedelikuga ühised omadused. Seetõttu keevkiht on tuntud ka kui pseudovedelik. Keevkiht-keskkonnal on võimalikud erinevad režiimid ehk olekud, mis sõltuvad enim gaasivooluse kiirusest.

Kui inertse tahke materjali osakeste kihist läbi puhuda gaasi (õhku) nii, et osakestele toimiv aerodünaamiline jõud on võrdsustunud nendele mõjuva raskusjõuga, siis muutub kiht raskusjõuväljas “keevaks” ehk pseudovedelikuks. Gaasi kiirus seejuures ei tohi ületada nn tahkefaasi pneumotranspordi kiirust ehk teist kriitilist kiirust, sest vastasel juhul kantakse tahkeosakesed gaasiga täielikult kaasa ning lahkuvad seadmest. Kiirust,

mini lahendada katlatorude tuhasadestisest puhastamise probleeme, pärssides ühtlasi keskkonda mõjutavate lämmastikühendite hulka õhku paisatavas põlemisgaasis.

Oluliseks pöördepunktiks keevkiht-põletustehnoloogia arengus oli tsirkuleeriva keevkihi kasutuselevõtt, mis võimaldab hüppeliselt suurendada põletusseadmete ühikvõimsust.

Ka Eesti tähtsaima maavara – põlevkivi põletustehnika arengus on toimumas suured muudatused, tolmpõletus on asendumas tsirkuleerivas keevkihis põletustehnoloogiaga. 2004. a käivitati nii Balti kui ka Eesti elektrijaamas 215 MW-lise võimsusega tsirkuleeriva keevkihtkateldega energiaplodid.

Kirjutis tutvustab erinevat tüüpi tahkekütuste keevkiht-põletusseadmete töö põhimõtteid.

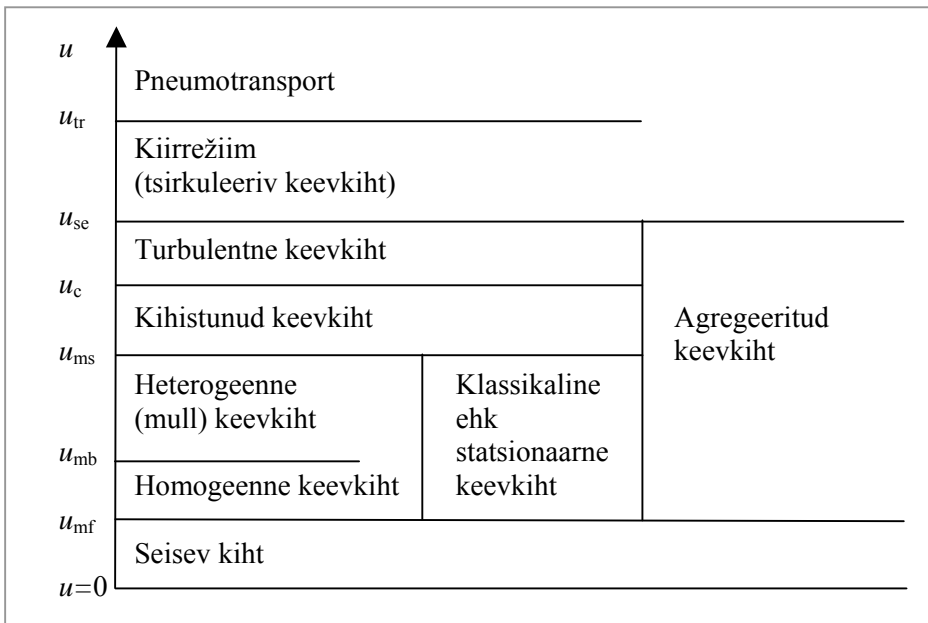
mille ületamisel viiakse osakesed gaasivoolusega kaasa, nimetataksegi transpordikiiruseks.

Osakestekihi kuumutamisel vähemalt kuni põletava kütuse süttimistemperatuurini ja suunates kihti kütuse voo, saavutame pideva põlemise, ilma et oleks vaja selleks kõrget temperatuuri. Keevkihi moodustamiseks vajalikuks tahkeks materjaliks on üsna sageli liiv või mineraalosaurikaste kütuste korral ka tuhk. Põlevkivi põletamisel keevkihis on kihi põhimaterjaliks samuti põlevkivi mineraal-osast moodustuv tuhk. Temperatuur keevkihis on tavaliselt 750–900 °C. Temperatuur 750 °C tagab enamuse kütuste korral stabiilse põlemise. Nii madal põlemistemperatuur on võimalik tänu intensiivsele soojusülekandele gaasilise keskkonna ja osakeste vahel pulseerivas süsteemis. Tempera-

tuuri ülempiir 900 °C on aga määratud kihi paakumisega. Mõlemad keevkihile iseloomulikud temperatuurid sõltuvad kütuse omadustest, eriti just viimane. Keevkihtkolde seadmestuse oluline osa on kolde põhjarest, mille kaudu juhitakse primaarõhk koldesse. Õhu ühtlane jaotumine kolde ristlõikes tagatakse resti küllaltki suure aerodünaamilise takistusega.

Kuna keevkiht on tahkeosakestest ja gaasifaasis olevast ainest koosnev heterogeenne süsteem, siis

võib ta eksisteerida kahe piiroleku vahel. Esimene nendest on seisev kiht ja teine eespool mainitud pneumotransport. Kihirežiimid jagunevad nelja kategooriasse – liikumatu kiht, agregeeritud keevkiht, kiirkeevkiht ja pneumotransport. Agregeeritud keevkihil võib olla neli alarežiimi – homogeenne, heterogeenne, kihiline ja turbulentne. Mainitud kahefaasilise süsteemi võimalikud režiimid vooluse kiiruse  $u$  tõusvas suunas on näidatud skemaatiliselt joonisel 1.



Joonis 1. Tahkeosakestest ja gaasilisest keskkonnast koosneva kahefaasilise süsteemi võimalikud aerodünaamilised olekud.

Väikesel kiirusel, kui osakestele mõjuv aerodünaamiline jõud on väike ega ületa raskusjõudu, jääb kiht restile püsima ning gaas (õhk) läbib osakestevahelised tühimikud. Püsikihi üleminek liikuvaks (pseudovedelikuks) algab kiirusel  $u_{mf}$  (tuntakse ka kui esimest kriitilist kiirust), siis kui osakesed hakkavad liikuma ja tekib kindlate omadustega keevkiht. Vahemikus  $0 \leq u < u_{mf}$  on osakesed liikumatud ja kihi poorsus ei muutu.

Kiiruse edasisel suurenemisel kasvab kihi poorsus ja kõrgus ning võib tekkida kas homogeenne või heterogeenne keevkiht. Homogeense või heterogeense keevkihi moodustumise vaheliseks kiiruse

piiriks on kiirus  $u_{mb}$  ning see sõltub osakeste läbimõõdust ja tihedusest. Heterogeense keevkihi ülemiseks kiiruslikuks piiriks on kiirus  $u_{ms}$ . Enamikel juhtudel tekib siiski heterogeenne keevkiht, mida teatakse ka kui mullilist keevkihti. Suurematel kiirustel kui  $u_{mb}$  kasvab koos kiiruse suurenemisega kihi poorsus ja kõrgus. Restipinna lähedases alas tekivad gaasimullid (tühimikud), mis kihis tõusevad ja pinnal väljuvad. Gaasimullide mõõtmed kasvavad kiiruse  $u$  suurenemisel. Kiht on stabiilne ja selge lahtuspinnaga. Keevkiht kiiruste vahemikus  $u_{mf} - u_{ms}$  on tuntud kui klassikaline ehk statsionaarne keevkiht.

Piirkiiruse  $u_{ms}$  ületamisel võib keevkiht ristlõike-  
liselt kihistuda – tihedamad piirkonnad vaheldu-  
vad vähemtihedate aladega. Kiiruse suurenemisel  
kihi kõrgus kasvab ja keskmine poorsus suureneb.  
Kihistunud keevkihi moodustumise tõenäosus on  
suurem väiksema ristlõikega kollete korral.

Kiiruse  $u$  edasisel suurenemisel hakkab kujunema  
suure kiirusega keevkihtkategoriasse kuuluv üht-  
lase struktuuriga turbulentne kiht. Hakkab toimu-  
ma teisest kriitilisest kiirusest kiiremalt liikuvate  
osakeste väljakandumine. Turbulentset kihti ise-  
loomustab osakestest moodustatud kolooniate ja  
gaasitühimike teke ning nende edasi-tagasi sööst-  
liikumine. Kihi lahutuspiind ei ole selgelt määrat-  
letav.

## KLASSIKALINE KEEVKIHT

Klassikalise keevkihiga põletusseadme põhimõtte-  
line skeem on toodud joonisel 2. Seadme üks põ-  
hiosa on rest ehk õhu jaotur, mille kaudu siseneb  
kihti primaarõhk. Resti alla antava primaarõhu  
rõhk peab olema piisav ületamiseks resti ja kihi  
aerodünaamilist takistust. Kütus suunatakse kas  
otse kihti või kihipealsesse ruumi, valgudes sealt  
edasi kihti. Kihipealsesse ruumi suunatakse tava-  
liselt ka täiendavalt õhku (sekundaarõhku), põleta-  
maks kihist kolde ruumi kandunud põlevgaasi  
komponente ja kihis põlemata jäänud osakesi.

Peale kütuse viiakse kihti veel teatud sorbent,  
sidumaks kütuses sisalduvat väävlit. Selleks on  
sagedamini kaltsiumi sisaldav lubjakivi. Koldesse  
suunatava väävlit siduva sorbendi hulk määratakse  
lähtuvalt Ca/S moolsuhtest, mis peab olema vä-  
hemalt 2,5–3. Kui kütus sisaldab aga ise vajalikul  
hulgal väävlit siduvaid ühendeid, siis väävlit sidu-  
vat sorbenti koldesse suunata muidugi vaja ei ole.

Kütuse mass klassikalise keevkihti moodustavas  
inertses materjalis on harilikult 5%.

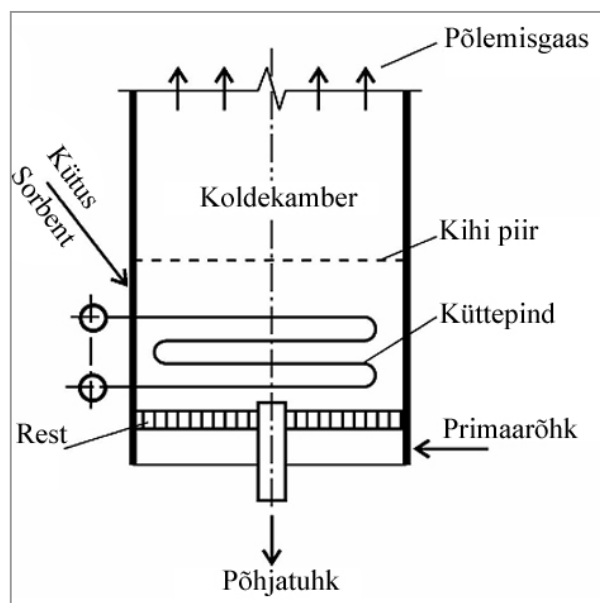
Gaasivooluse kiirus on harilikult piirides 1–3 m/s.

Klassikalise keevkiht-põletustehnoloogia kasuta-  
misel ei ole mitte alati võimalik ilma soojuse  
eemaldamiseta hoida kihi temperatuuri vajalikul  
tasemel. Seetõttu tuleb kihti paigutada torudest

Suurematel kiirustel kui turbulentsse oleku piir-  
kiirus  $u_{se}$  läheb turbulentsse süsteemi üle nn kiir-  
režiimile, kus palju osakesi kandub süsteemist välja.  
Taolisele režiimile ongi üles ehitatud tsirkuleeriva  
keevkihiga kolde tööprintsip. Nagu turbulentsse  
kihi puhulgi, puudub ka siin kihil selge lahutus-  
piind. Tsirkuleeriva keevkihtprotsessi korral püü-  
takse koldest koos gaasivoolusega väljuvad osa-  
kesed kinni ja suunatakse tagasi kolde restile. See-  
tõttu on restil edasi-tagasi sööstvate osakeste kont-  
sentratsioon suurem kui restipealses ruumis.

Suuremal kiirusel kui kiirrežiimi oleku piirkiirus  
 $u_{tr}$  algab süsteemis osakeste pneumotransport. Sel-  
les olekus puudub tahkefaasi suure kontsentrat-  
siooniga tsoon restipealses alas.

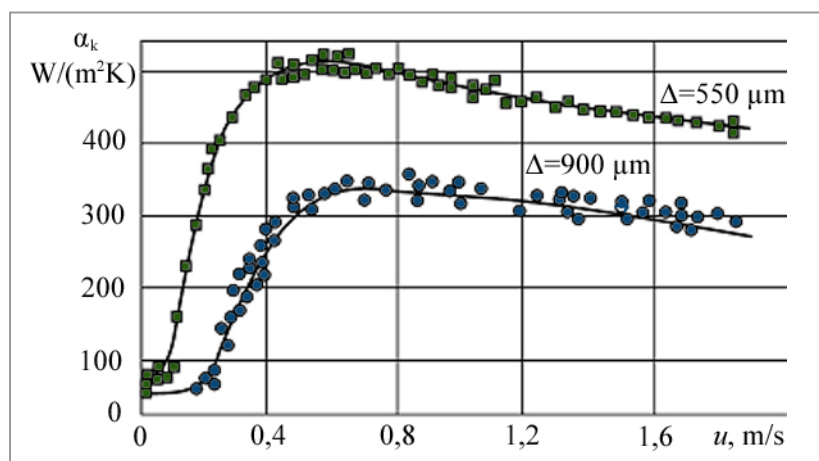
soojusvahetuspiind, mille suurus sõltub põletatava  
kütuse omadustest ja põletusrežiimist. Vajadusel  
kaetakse ekraantorudega ka kihipealse ruumi sei-  
nad.



Joonis 2.  
Klassikaline keevkiht.

Soojusülekanne keevalt kihilt seal paiknevale torudest moodustatud küttepinnale on väga intensiivne. Seda näitab joonisel 3 esitatud graafik, kus on toodud konvektiivsoojusülekande teguri sõltuvus gaasi kiirusest keevkihti asetatud silindrilisele pinnale kahe erineva läbimõõduga osakeste korral. Kui seisvas kihis on konvektiivsoojusülekande tegur ligikaudu  $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , siis esimesest kriitilisest kiirusest  $u_{mf}$  suuremal kiirusel soojusüle-

kandetegur kiiruse kasvades suureneb järsult, saavutab siis maksimaalse väärtuse ja hakkab aeglaselt langema. Soojusülekande teguri suurim väärtus (olenevalt tingimustest) on harilikult piirides  $300\text{--}550 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Kui keevkihi temperatuur ületab  $750\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$ , siis tuleb konvektiivse soojusvahetuse kõrval arvesse võtta ka soojuskiirguse osa. Kiirgusülekande teguri väärtus olenevalt peamiselt kihi temperatuurist on  $50\text{--}150 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .



Joonis 3.  
Konvektiivsoojusülekande teguri sõltuvus gaasi kiirusest keevkihti asetatud silindrilisele kehale.

### TSIRKULEERIV KEEVKIHT

Tsirkuleerivas keevkihis toimib kahefaasilise süsteemi kiirrežiimi aerodünaamiline olek.

Joonisel 4 on näidatud tsirkuleeriva keevkihiga kolle koos sellele järgneva konvektiivse gaasikäiguga. Ka tsirkuleeriva keevkihiga kolde põhjas paikneb rest, kuhu viiakse nii kütus kui ka väelveldioksiidi sorbent. Selleks, et tekiks kahefaasilise süsteemi kiirrežiimile vastav olek, peab gaasi kiirus kolde olema vahemikus  $6\text{--}12 \text{ m/s}$ .

Kütuse hulk tahkes faasis on väga väike, moodustades vaid  $0,5\text{--}2\%$ , mistõttu soojuse vabanemine kolde kõrguti on hajutatud ja suhteliselt ühtlane ning puudub vajadus soojusvahetuspinnaga paigutamiseks restipealsesse kihti. Kütuse põlemine võib kanduda ka separaatorisse.

Koldest läheb põlemisgaas koos tahkeosakestega separaatorisse (joonisel on näidatud tsüklonsepa-

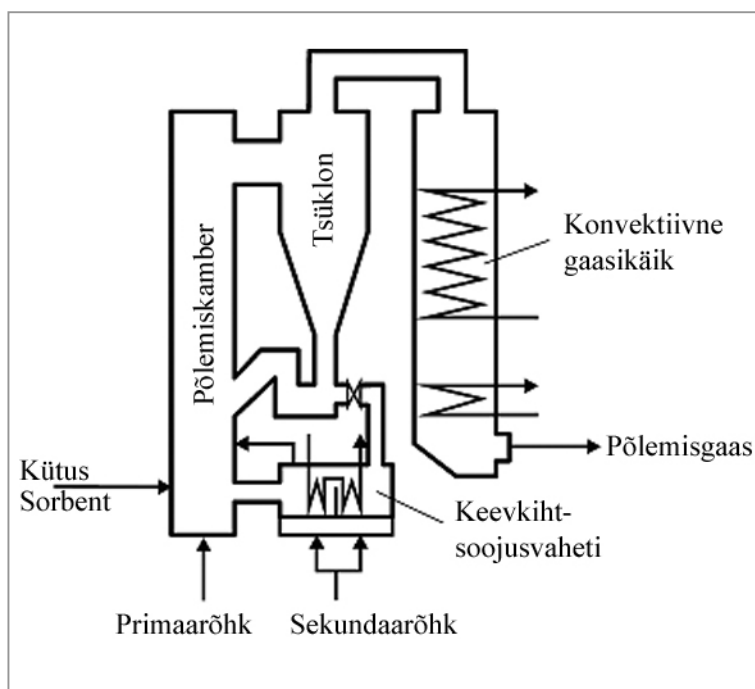
raator), kust suuremad ja raskemad osakesed juhatakse läbi tihendussõlme ja keevkiht-soojusvaheti tagasi kolde. Otse kolde tagasi suunduva ja soojusvahetisse mineva tuhavoogude vahetegur on reguleeritav. Sel viisil tekitatakse ringlev tahkefaasi kontuur (tsirkulatsioon ehk ringlus), milles tasakaal kolde antava kütuse ja ringleva materjali vahel saadakse osakeste pideva väljumise teel separaatorist. Separatuurist väljuv põlemisgaas koos sinna jäänud peenemate osakestega juhatakse katla konvektiivküttepinda.

Tsirkuleeriva keevkihiga kolde omapära on tihendussõlm separaatori ja kolde vahel, vältimaks põlemisgaasi tagasivoolu, kuna rõhk kolde siseses on kõrgem kui separaatoris. Oluliseks elemendiks kaasaja tsirkuleeriva keevkihiga katlas on separaatorist väljuval tahkefaasi voolusel paiknev keevkiht-soojusvaheti. Keevkiht-soojusvahe-

tus tekitatakse nagu klassikalise keevkihi puhulgi läbi resti puhutava õhu abil. Õhu kiirus keevkiht-soojusvaheti ristlõikes ei ületa tavaliselt 1 m/s.

Kihti läbinud kuumenenud õhk suunatakse sekundaarõhuna koldesse, tahkefaas aga kolde alla. Keeskihis paikneb konvektiivküttepind, milleks

võib olla näiteks aurutuse või auruülekuumendi soojusvahetuspinde. Keskkonna ja küttepinna vahel esineb väga intensiivne soojusvahetus (joonis 3), mis teeb keevkiht-soojusvaheti mõõtmetelt kompaktselt ja efektiivseks.



Joonis 4. Keeskiht-soojusvahetiga tsirkuleeriva keevkihiga katla skeem.

## PÕLEVKIVI KEEVKIHIS PÕLETAMISE ISEÄRASUSED

Klassikaline keevkiht-põletustehnoloogia tulenevalt põlevkivi omadustest ei sobi. Seevastu osutub põlevkivi puhul sobivaks rakendada tsirkuleeriva keevkihiga põletustehnikat optimaalse põlemistemperatuuriga koldes 850 °C.

Kuna põlevkivi põletamisel tekib palju tuhka, siis põlevkivi keevkihis põletamisel ei ole vaja keevkihi ja tsirkuleeriva tahke faasina kasutada lisamaterjali (liiva). Siin on keevkihti tekitavaks ja ringlevaks materjaliks põlevkivituhk.

Tuginedes tahkekütuse tsirkuleerivas keevkihis põletamise olemusele, tolmipõlevkivikatelde käitamiskogemustele ja läbiviidud uurimistöödele töötas firma Foster Wheeler välja tsirkuleeriva keev-

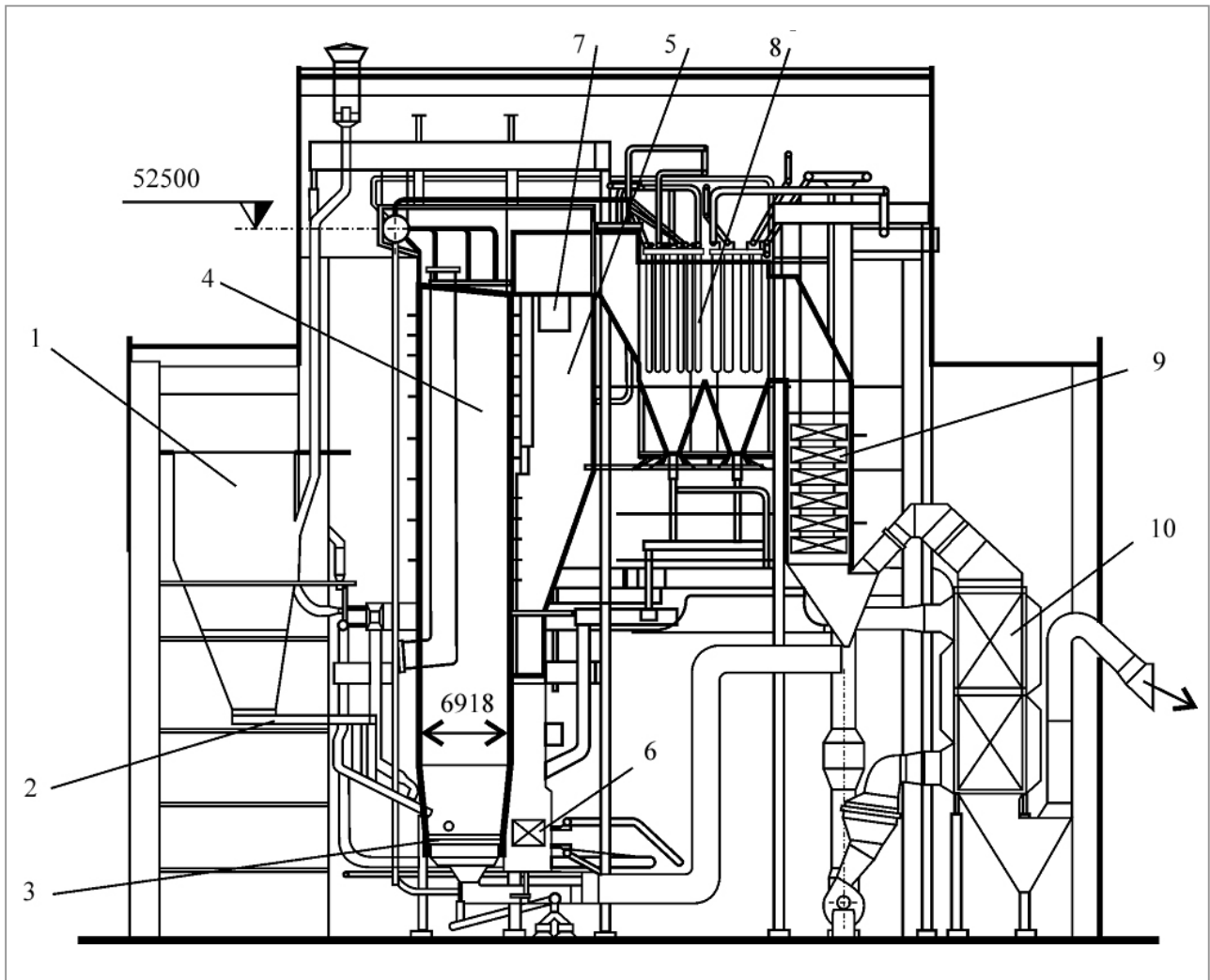
kihiga katla konstruktsiooni põlevkivil töötavale 215 MW elektrilise võimsusega energiaplokile, millel on kaks katelt. Andmed selle katla kohta: primaar/sekundaarauru tootlikkus 324/272 t/h, primaarauru rõhk 12,7 MPa ja temperatuur 535 °C ning sekundaarauru rõhk 2,4 MPa ja temperatuur 535 °C, katlasse siseneva toitevee temperatuur on 250 °C. Põletatakse järgmiste omadustega põlevkivi: niiskus 11–13%, tuhasus 45–47%, mineraalse süsihappegaasi sisaldus 17–19% ja alumine kütteväärtus 8,3–8,5 MJ/kg. Katla konstruktsioon on näidatud joonisel 5.

Aluseks on võetud osakeste koldesise separaatoriga aerodünaamiliselt juhitud skeem. Separaatoriga

eralduv jämedateraline tuhk suundub keevkiht-soojusvahetisse, kus paiknevad nii primaar- kui ka sekundaar-auruülekuumendite kõrgtemperatuurised väljumisastmed. Ülekuumendi madalama temperatuuriga sektsioonid, ökonomaiser ja õhuelsoojendi asetsevad iseseisvates koldejärgsetes gaasikäikudes. Küttepindade paigutuse skeem kolde

järel vastab põlevkivi tolmküttekatla küttepindade asetusele.

Põlevkivi põletamisel on oluline põlevkivis suurel hulgal sisalduvate karbonaatmineraalide käitumine koldes. Peamisteks karbonaatmineraalideks on kaltsiumkarbonaat ( $\text{CaCO}_3$ ) ja dolomiit [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ]. Põlevkivi tolm põletusel kõrgtemperatuurises kesk-



Joonis 5.

Tsirkuleeriva keevkihiga põlevkivikatel 215 MW elektrilise võimsusega energiaplokile. 1 – kütuse punker; 2 – kütuse sőtja; 3 – kolderest; 4 – koldekamber; 5 – separatsioonikamber; 6 – keevkiht-soojusvaheti; 7 – separaator; 8 – auruülekuumendi; 9 – ökonomaiser; 10 – õhuelsoojendi.

konnas karbonaatmineraalid lagunevad kaltsium- ja magneesiumoksiidiks ning süsihappegaasiks peaaegu täielikult. Keevkihis põletuse korral aga lagunevad karbonaadid vähemal määral, sest põlemistemperatuur on madalam ja põlevkivi teraline koostis jämedam. Karbonaatmineraalide mitte-täielik lagunemine tingib põlemisel eralduva soojushulga tõusu ja süsihappegaasi kui kasvuhooneefekti põhjustava gaasi hulga vähenemist.

Tahkekütuste põletamisel on tähtsaks probleemiks vääveldioksiidi emissioon õhukeskkonda. Väävliühendite kontsentratsiooni alandamiseks suunatakse tavaliselt keevkihtkoldesse samaaegselt kütusega ka väävli siduv sorbent, milleks on enamikel juhtudel kaltsiumoksiidi sisaldav aine.

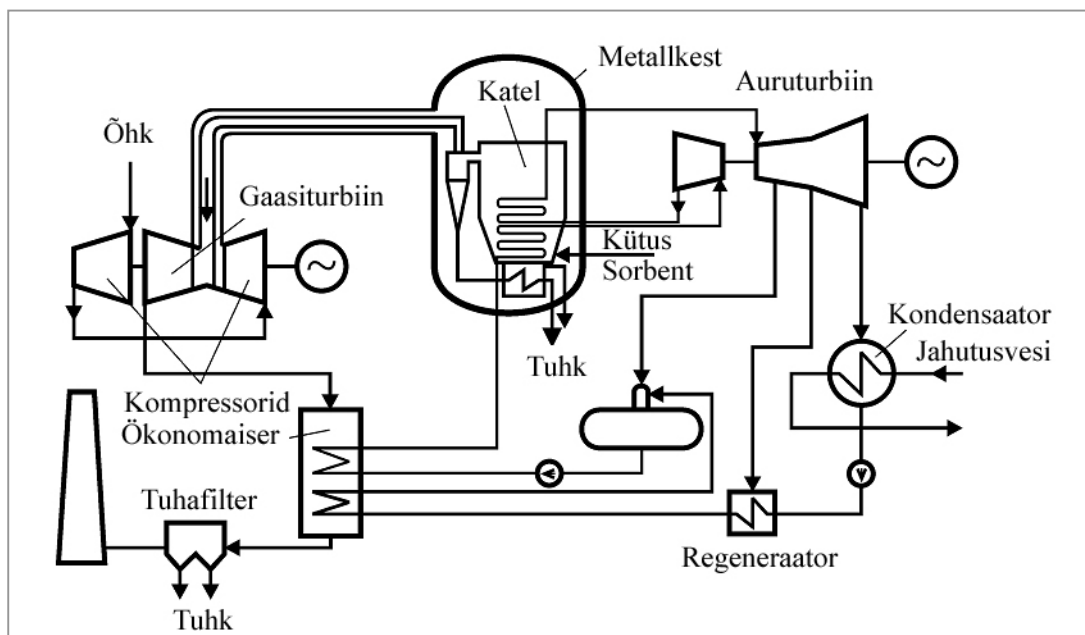
Põlevkivi omapäraks on suur kaltsiumoksiidi sisaldavate karbonaatmineraalide (lubjakivi) kogus. See välistab vajaduse väävli sorbendi täiendavaks suunamiseks koldesse. Kuna peamine väävli siduv aine on kaltsiumoksiid, siis moolsuhe Ca/S ei tohi olla väiksem kui 2,5–3. Põlevkivi puhul on see suhe aga palju kõrgem – vahemikus 8–10. Suur moolsuhe Ca/S ja sobiv põlemistemperatuur tagavad vääveldioksiidi ülimadala kontsentratsiooni põlemisgaasis, mis ei ületa 10–15 mg/m<sup>3</sup>.

Keskonnakaitse seisukohalt on oluline ka lämmastikoksiidide kontsentratsioon põlemisgaasis. Põlevkivi põletamisel tsirkuleeriva keevkihiga koldes ei ületa lämmastikoksiidide kontsentratsioon põlemisgaasis 140–160 mg/m<sup>3</sup>.

## KÜTUSE ÜLERÕHUL KEEVKIHT-PÕLETUSTEHNOLOOGIA

Kütuse ülerõhul põletamise tehnoloogia aluseks on termodünaamiline liitringprotsess. Sellele vastab kahest soojusjõumasinast koosnev soojusjõuseade – gaasiturbiin, mis töötab Brayton'i ringprotsessil ja auruturbiin Rankine'i ringprotsessi järgi. Taolise kooslusega gaasiturbiinseade on

avatud tsükliga, aurupoolse osa ringprotsess on aga suletud. Nendele põhimõtetele üles ehitatud klassikalise ülerõhul keevkihiga tahkekütusel töötava energiamuundusseadme üks võimalik tehnoloogiline skeem on toodud joonisel 6.



Joonis 6. Klassikalise ülerõhul keevkihiga soojusjõuseadme tehnoloogiline skeem.



Seadme põhiosa on klassikalise keevkihiga põlemiskamber (kolle) metallkestas, kus kütuse põlemisel vabanev energia kandub nii põlemisgaasile kui ka veele ja veeaurule koldesse paigutatud soojusvahetuspinna kaudu. Kütus söödetakse koldesse kas kuivalt või segatuna veega, nn pastana märgpumpade abil. Kui kütus ei sisalda vääveloksiide siduvaid komponente, siis antakse koldesse kas koos kütusega või sellest lahus väävlühendite sorbenti.

Kolle on ülerõhu all, kuhu antakse turbokompressoriga õhku rõhul 1,2–1,6 MPa, temperatuur koldeks on 800–900°C. Lenduharikas põlemisgaas suundub koldest kaheastmelisse tsüklontuhapüüdurplokki või keraamilisse filtrisse. Põlemiskambriks väljuv gaas paisub gaasiturbiinis, mis käitab elektrigeneraatori ja kompressori. Gaasiturbiini suunduvat põlemisgaasi kanalit ümbritseb kontsentriselt põlemiskambriks suunduv õhukanal, jahutamaks gaasikanalit.

Klassikalise keevkihtkolde omapära on soojusvahetuspinna keevkihis. Kütuse ülerõhul põletamisel on põlemisgaasil suur tihedus ja vajalik gaasi kiirus keevkihis väike, enamasti 0,7–0,9 m/s.

Gaasiturbiini järel paikneb toitevee eelsoojendi (ökonomaiser). Põlemisgaas siseneb eelsoojendisse temperatuuril 500–600 °C. Tuha soojuse utiliseerimiseks on soojusvahetid, mida tuhk läbib.

Põlevkivi ülerõhul põletamist on uuritud 1 MW soojusliku võimsusega klassikalisel keevkihtseadmel ettevõtte ABB Carbon laboratooriumis. Uuringud viidi läbi kihi temperatuuril 840 °C ja rõhul 1,2 MPa.

## VIITED

Cuenca, M. A., Anthony, E. J. (eds.). 1995. *Pressurized Fluidized Bed Combustion*. Blackie Academic & Professional, Glasgow, 603 p.

Grace, J. R., Avidan, A. A., Knowlton, T. M. (eds.). 1997. *Circulating Fluidized Beds*. Blackie Academic & Professional, London, 585 p.

Hotta, A., Parkkonen, R., Hiltunen, M., Arro, H., Loosaar, J., Parve, T., Pihu, T., Prikk, A. 2005. *Experience of Estonian oil shale combustion ba-*

*Katsed näitasid põlevkivi stabiilset põlemist ja head reguleeritavust. Kui põlevkivi atmosfääri-rõhul põletamisel klassikaline keevkihtrežiim ei ole rakendatav, siis ülerõhul põletamisel ei tekitanud see probleeme. Põlemine jäi kihi piiridesse ega kandunud sellest välja kihipealsesse ruumi. Sellel on kaks põhjust – esiteks rõhu mõju, teiseks väike gaasi kiirus kihis. Vasturõhk aeglustab lendosa eraldumist põlevkivist ja vähendab ka selle hulka. Väike kiirus keskkonna suure tiheduse tõttu on pidurdav tegur põlemise kandumisele kihis kihipealsesse ruumi.*

Põlevkivi ülerõhul põletamise eripära on veel see, et kaltsiumkarbonaat põlemisprotsessis termiliselt ei lagune. Karbonaatmineraalidest teatud hulga süsihappegaasi väljatõrjumine on põhjustatud selle eraldumisest magneesiumkarbonaadist ja kaltsiumkarbonaadis sisalduva lubja sulfatiseerumisest. Karbonaatmineraalide termilise lagunemise pidurdumine põlevkivi ülerõhul põletamise korral suurendab kütuse põlemisel eralduvat soojust ning vähendab atmosfääri paisatava süsihappegaasi hulka.

Põlevkivi väävel seotakse tuhaga täielikult, vääveldioksiid põlemisgaasis praktiliselt puudub.

Põlevkivi orgaanilise aine lämmastikuvaesuse tõttu on nii lämmastikoksiidide kui ka lämmastikdioksiidi kontsentratsioon põlemisgaasis madal. Lämmastikmonooksiidi kontsentratsioon põlemisgaasis on 120–200 mg/m<sup>3</sup>.

sed on CFB technology at Narva power plants. *Oil Shale*, 22, 4S, 381-397.

Kallaste, T., Liik, O., Ots, A. (eds.). 1999. *Possible Energy Trends in Estonia*. Vaba Maa, Tallinn, 190 p.

Oka, S. N. 2004. *Fluidized Bed Combustion*. Marcel Dekker, New York, Basel, 590 p.

Ots, A. 2006. *Oil Shale Fuel Combustion*. Tallinn, 834 p.

# BIOKÜTUSTE JA TUULEENERGIA ALASTEST UURINGUTEST TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLIS

*Aadu Paist, Teet Parve, Ülo Kask, Maaris Nuutre,  
Jüri Loosaar, Ants Veski, Indrek Pertmann*  
Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituut

## SISSEJUHATUS

Euroopa Liidu (EL) energiapoliitika alastes dokumentides on rõhutatud, et taastuvad energiaallikad on igas riigis kohalikud ja nende kasutamine vähendab oluliselt energiaimporti ning suurendab varustuskindlust. Lisaks sellele annab taastuvate energiaressursside kasutamine tööd kohalikele väikestele ja keskmistele ettevõtetele, soodustades sellega regionaalarengut.

Kaasaegsed biokütuste tootmis- ja energiatehnoloogiad võimaldavad efektiivselt ära kasutada praktiliselt kõiki metsa- ja puidutööstuse jäätmeid ning neid väärindada tahketeks (puitbriketiks, puitpelletiteks ehk graanuliteks), vedelateks ja gaasilisteks (puugaas, vesigaas) biokütusteks. Üha laiemat rakendamist kütusena leiab ka rohtne biomass. Arendatakse edasi biomassi gaasistamis- ja veeldamistehnoloogiaid. Uuritakse võimalusi toota biomassist vesinikurikast generaatorgaasi, mille edasise töötlemisega eraldatavat vesinikku oleks võimalik kasutada kütuseelementides.

Otseseid subsidiume ei ole biokütuste kasutamiseks energia tootmisel Eestis ette nähtud. Mitmete

katlamajade puitkütusele üleviimise projekte on ühekordselt toetatud riikidevaheliste kahepoolsete abiprogrammide raames ja rahvusvaheliste projektide poolt, kus Eesti-poolsete konsultantidena on osalenud soojustehnika instituudi teadurid ja õppejõud. Viimastel aastatel on neile lisandunud ühiskondliku mehhanismi abi ning EL struktuuri-fondide projektid.

TTÜ soojustehnika instituudis (STI) on viimase 14 aasta jooksul tegeldud erinevate biokütuste ressursside, põlemistehniliste näitajate ja kvaliteedi küsimustega. Uuritud on erinevate biokütuste ja nende segude koospõletamist nii katsekatteltes (20 ja 200kW) kui ka kaugkütte katlamajades, keskendudes seejuures eriti kütuse mineraalosa muutustele ja mõjule soojusvahetuse protsessile katlas.

Soojusülekanne alased uuringud on loonud eeldused kodumaiste uudse konstruktsiooniga efektiivsete väikekattelde väljatöötamiseks puitgraanulite (pelletite) põletamiseks ja nende tootmise juurutamiseks.

## BIO- JA TAASTUVENERGIA ALANE UURIMISTÖÖ NING OSKUSTEAVE TTÜ SOOJUSTEHNICA INSTITUUDIS

- Biokütuste ressurss, varustusvõrgustik ja kasutamine.
- Biokütuste, tuha ja katlasadestiste omadused.
- Sekundaarsed biokütused – biogaas, veeldatud biokütused; tööstus-, olme- ja põllumajandusjäätmed.
- Kohalikel biokütustel põhineva regionaalse soojus- ja energiavarustuse planeerimine.
- Laokomplekside ja kütuse etteande süsteemide lahendused.
- Väikese võimsusega ( $\leq 200$  kW) põletusseadmed, eelkolded, restid biokütuste põletamiseks (graanulid, hake, jäätmed).

- Tuuleressursi hinnangud ja tuuleparkide planeerimine.
- Kohalike kütuste kasutamise ja kaugkütte majanduslikud aspektid.
- Katsetus- ja konsultatsiooniteenused biokütuste tootjatele ja tarbijatele.
- Biokütuse põletusseadmete atmosfääriheitmed ja bilansikatsetused.

## BIOKÜTUSTE POTENTSIAAL

Eesti biokütuste (tahked, vedelad ja gaasilised) kogu primaarenergia potentsiaal on kuni 26 TWh/a, millest olulisema osa annavad väheväärtuslikel aladel kasvatatavad energiataimed (rohtne biomass või energiavõsa). Teiseks oluliseks ressursiks on

turbakütused. Tuginedes olemasolevatele andmetele võib väita, et võttes elektri tootmiseks kasutusele kogu biomassi ressursi, saaks Eesti elektri toodangust vähemalt viiendiku katta biomassi baasil ja sellevõrra vähendada põlevkivi osa.

Tabel 1

Eesti biomassi ressurss

Biomass	Primaarenergiana 2002 (TWh)	Teoreetiline potentsiaal 2006 (TWh)	Teoreetiline potentsiaal 2030 (TWh)
Puit ja puidujäätmed	6,3	10,1	4,6
Puitpellet ja brikett	1,1	1,2	1,2
Õled	-	0,4–0,6	0,8–1,0
Energiataimed	-	9,8	9,8
Roog	-	0,6	0,6
Biogaas	0,03	0,4	0,4
Toidujäätmed	-	0,1	0,1
Must leelis	0,2	0,2	0,2
Kütteturvas	1,67	8,3	8,3
KOKKU	8,1	31,1–31,3	25,8–26,0

## BIOKÜTUSTE LIIGID

### PUITKÜTUSED (METSAKÜTUSED)

Viimase metsaressursi hinnangul on Eestis 2,27 mln ha (51,5% pindalast) metsaalasid ja sellel kasvava metsa varu on 449 mln m<sup>3</sup>. Metsanduse arengukavas (2001–2010) on fikseeritud lubatavaks raiemahuks 13,1 mln m<sup>3</sup> aastas.

Tänapäeval veel vähekasutatud raiejäätmed (~2 mln m<sup>3</sup>) oleksid lähitulevikus peamiseks lisanduvaks puitkütuse liigiks.

### ENERGIAVÕSA (ENERGIAMETS)

Ligikaudu kolmandiku Eesti haritava maa boniteet on alla 32 hindepunkti. Nendel pindadel oleks

võimalik viljeleda energiametsandust, kus saaks kasvatada kiirekasvulisi puittaimi (paju, hübriidhaaba, leppa). Vähe kvaliteetsetel maadel kasvatatava paju teoreetiline energeetiline potentsiaal ulatub 9,8 TWh/a.

### PÖLLUMAJANDUSJÄÄTMED

Praeguse toodangutaseme juures ja arvestades, et 25% põhust saab kasutada energeetilistel eesmärkidel, tuleb lisaks 100 000–150 000 t biokütust (0,4–0,6 TWh/a). Viljakasvatuse intensiivistamise tingimustes võiks põhku saada kuni 200–250 tuh t, primaarenergia sisaldusega 0,8–1,0 TWh/a.

#### MÄRGALATAIMED

Eesti märgalade üldpindala, kus kasvab kõrge produktiivsusega biomass 0,5–1,5 kg/m<sup>2</sup>, on umbes 24 000 ha. Varakevadel koristatava pilliroo kütteväärtuse 4,0 MWh/t juures oleks võimalikelt niidetavatelt aladelt (11,3 tuh ha) saadava primaarenergia hulk 451 GWh/a.

#### BIOGAAS

Eesti loomakasvatuses tekkiva sõnniku baasil (arvestatud on IPPC farmid) oleks vastavates biogaasijaamades võimalik toota aastas biogaasi primaarenergia sisaldusega 0,4 TWh/a. Pääsküla prügilast kogutakse täna ca 6 mln m<sup>3</sup> biogaasi, mille primaarenergia sisaldus on ligi 40 GWh/a.

Tallinna heitveepuhastusjaamas tekib muda kääritamisel 2,8 mln m<sup>3</sup> (13 GWh/a) biogaasi, mida kasutatakse nii soojuse, elektri kui mehaanilise energia saamiseks.

#### TAHKED OLMEJÄÄTMED

Eestis tekkivate tahkete olmejäätmete primaarenergia hulgaks on hinnatud 1,8–2,2 TWh/a.

#### TURVAS

Eesti kogu turbavaru on 2,37 mld t. Turba tootmise alad on 21 tuh ha, millelt aastas kogutakse 0,34–0,56 mln t turvast sõltuvalt ilmastikuoludest. Eesti turbatootjate küteturba tootmispotentsiaal on 0,56 mln t, primaarenergia sisaldusega 1,7 TWh/a. Tegelikult koguti viimastel aastatel 1,0 TWh freesturvast ja 0,35 TWh tükkurvast.



Foto 1.

Hakkpuit:  $W^t = 40\text{--}55\%$ ,  $Q_a^t = 6\text{--}10$  MJ/kg,  $E^t = 0,7\text{--}0,9$  MWh/m<sup>3</sup>,  $A^k = 0,5\text{--}2,0\%$ ,  $S^k < 0,05\%$ ,  $N^k = 0,3\text{--}0,5\%$ .



Foto 2.

Metsahake (metsajäätmed):  $W^t = 45\text{--}60\%$ ,  $Q_a^t = 6\text{--}9$  MJ/kg,  $E^t = 0,7\text{--}0,9$  MWh/m<sup>3</sup>,  $A^k = 1\text{--}3,0\%$ ,  $S^k < 0,05\%$ ,  $N^k = 0,3\text{--}0,5\%$ .

Foto 3.

Talvine pilliroog:  $W^t = 15\text{--}20\%$ ,  $Q_a^t = 14,5\text{--}16$  MJ/kg,  $A^d = 3\text{--}4,5\%$ .

## BIOKÜTUSTE KASUTAMISE PROBLEEMID

Biokütuste koostise ja omaduste tundmine on nende ratsionaalse ning probleemivaba kasutamise eelduseks. Biokütuste koostisega on suurel määral seotud põletamisel tekkivad õhuheitmed ja katla küttepindade saastumine. Mineraalosa osakaal biokütuses on suhteliselt tagasihoidlik (tuhasisaldus  $\leq 5\%$ ), ent selle koostis võib varieeruda suurtes piirides sõltuvalt kasvutingimustest ning mõjutada oluliselt tekkiva tuha sulamisomadusi ning võimet

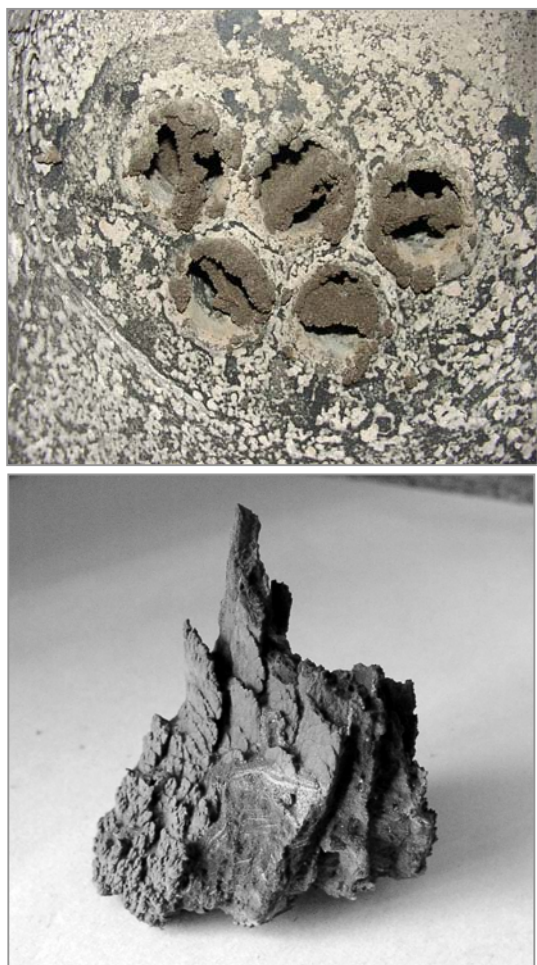


Foto 4. Pooleldi ummistunud lektorudega biokütuse katel (üleval) ja suurem sadestise tükk katla küttepinnalt.

tekitada katla küttepindadele raskesti eemaldatavaid sadestisi.

Eelöelduga seondub ka nii biokütuse tootjate kui tarbijate suur huvi STI uurimistöö alaste teenuste vastu, mille käigus määratakse biokütuste koostis ja põlemistehnilised parameetrid, tuha sulamistemperatuur, viiakse läbi katsepõletusi seoses uute kütuste kasutuselevõtmise ning uute põletusseadmete väljatöötamisega.

### TUHA SULAMIS- JA PAAKUMISPROBLEEMID BIOKÜTUSTE PÕLETAMISEL

Eelmisel aastal (2005) toodeti Eestis ligi 350 000 tonni puitpõhiseid saepurupelleteid, millest kuni 95% eksporditi Skandinaaviamaadesse ja Taani. Suurtest tootmiskahtudest tingituna on viimastel aastatel tekkinud kvaliteetse toormaterjali – hakkpuidu ja saepuru – defitsiit. Probleemi lahendamiseks otsitakse võimalusi uute biokütuste – kiirekasvuliste taimede ja biolagunevate jäätmete kasutamiseks. Need kütused on kõrgema tuhasisaldusega ning nende kvaliteedinäitajad (niiskus, kütteväärtus, tuhasus jne) kõiguvad suurtes piirides. Muutuv kvaliteet on üheks põhjuseks, et nende kütuste kasutamisel keskküttekateldes ilmnevad küttepindade saastumise ja tuha käitlemise probleemid.

Probleem on osutunud eriti aktuaalseks seoses uute biokütuste ning jäätmekütuste (põhupelletite, puukoore, pilliroo, hundinuiade, rapsi töötlemise jääkide, pelletite teraviljajääkide jne) kasutuselevõtmisega. Vaatamata sellele, et tänapäeval on olemas mitmeid teoreetilisi võimalusi tuhkade sulamis- ja paakumisomaduste hindamiseks (andmebaasid, faasimuutuste diagrammid, FactSage<sup>TM</sup>), on uurijad jõudnud ühisele arusaamisele, et kõige usutavama tulemuse annab siiski konkreetne katsepõletus või uuring.

Sünteesiliste tuhkade (soolade tahkete lahuste:  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) paakumise uurinud Taani Tehnikaülikoolis ja Åbo Akademi's (2002–2004 T. Parve) näitasid katseproovide valdavat paakumist ja sulamist allpool teoreetilist sulamispiiri.

## BIOKÜTUSTE PÕLETAMINE RESTIL

Eestis põletatakse biokütuseid enamasti tiheda kihiga kiht- ehk restkolletes.

Kolderestil paiknevas tihedas kihis toimub kütuse kuivamine, lendosade eraldumine ja koksi põlemine primaarõhu osavõtul. Ajaühikus põletatava kütuse hulka (seadme võimsust) saab muuta põhiliselt restile antava kütusekoguse ja primaarõhu koguse muutmisega.

Põlemisrežiim on hea, kui koldes ülekantud soojushulk on võimalikult suur ja põlemata aine kogus suitsugaasis minimaalne. Sel juhul seadme (kolde, katla) kasutegur on kõrge, atmosfääri ja küttepindade saastumine aga madal.

Leegi kuju, struktuur ja temperatuur ning suitsugaaside koostis sõltuvad kolde konstruktsioonist ja õhurežiimist. Läbiviidud katsete tulemusena on jõutud järeldusele, et biokütuste põletamisel saab põlemisrežiimi juhtida leegi kuju ja temperatuuri järgi. Kuna leegi temperatuuri mõõtmine on küllaltki keeruline, võib selle asendada leegi kiirgusvoo mõõtmisega. Selleks sobiv kiirgusvoo andur on suhteliselt lihtne, odav ja kergesti juhtimisüsteemiga ühildatav.

## ATMOSFÄÄRIHEITMED BIOKÜTUSTE PÕLETAMISEL

Õhuheitmete kogus on oluliseks parameetrikks uute biokütuste kasutusele võtmisel ning uute põletusseadmete väljatöötamisel. Erinevat liiki biokütuste põletuskatsete läbiviimisel on tekkivate õhuheitmete minimeerimine kogu põlemisprotsessi optimeerimise üks olulisemaid osasid. Alates 1999. aastast on STI mõõtelabor akrediteeritud õhuheitmete mõõtmise valdkonnas (tahked ja gaasilised komponendid – 50 erinevat). Mobiilse mõõtelaboriga on läbi viidud mitmeid regulaarseid suuremate biokütuse katelde õhuheitmete mõõtmisi (Kuresaare, Türi, Võru jne katlamajad). Samuti on läbi viidud mitmeid uute biokütuse katelde ja eelkollete vastuvõtukatsetusi ja õhuheitmete mõõtmisi (Sermet OY katlad Viiratsis ja Tamsalus, Agrosilva ja Tamuti eelkolded, keevkihtkolded Luunjas ja Jüris). Kogutud andmete alusel on koostatud erinevate biokütuste ja põletusseadmete õhu

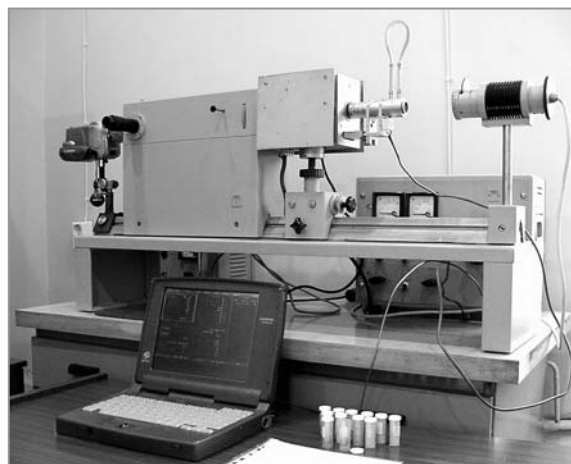


Foto 5.  
Kõrgtemperatuurine (1500 °C) mikroskoop tuha sulamisomaduste uurimiseks.



Foto 6.  
Kodumaised biokütuse katlad soojustehnika instituudi põletusseadmete katselaboris.



eriheitmete andmebaas ja täiendatud vastavate mõõtmiste läbiviimise meetodikat. Samuti leiavad kogutud andmed kasutamist uute biokütuse põletusseadmete väljatöötamisel.

Foto 7.  
Mobiilne õhuheitmete labor: TOC analüsaator FIDAMAT 6 ja FTIR spektromeeter GASMET DX 4000.

## TUULEENERGIA

Seoses energia hinna jätkuva tõusuga on huvi tuuleenergia ja tuuleparkide rajamise vastu ka Eestis tõusuteel. Uued tuulepargid on rajamisel mitmel pool Eestis (Viru-Nigulas 24 MW, Rõustes 12 MW, Läätsas 3 MW) ja Eesti Energia andmetel on elektrivõrguga liitumise taotlusi kogunenud juba rohkem kui 400 MW-le. Tuuleparkide rajamisel on oluliseks etapiks eeluuringute teostamine, mille käigus selgitatakse välja valitud koha tuuletingimused (ressurss) ja teostatakse vastavad majandusarvutused, veenmaks projekti rahastajaid selle tasuvuses.

Eesti elektrituulikute praegune koguvõimsus on ~32,2 MW ja see moodustab ~1,2% kogu installeeritud elektrivõimsusest (~2,6 GW). Umbes sama palju (~33 MW) kavatakse elektrituulikuid paigaldada ka 2006. aasta jooksul.

Võttes tuulikute keskmiseks kasutusteguriks 24%, võib öelda, et praeguste võimsuste juures saab Eestis aastas toota tuulest ca 67,7 GWh elektrienergiat ehk ligikaudu 0,8% Eesti elektritoodangust.

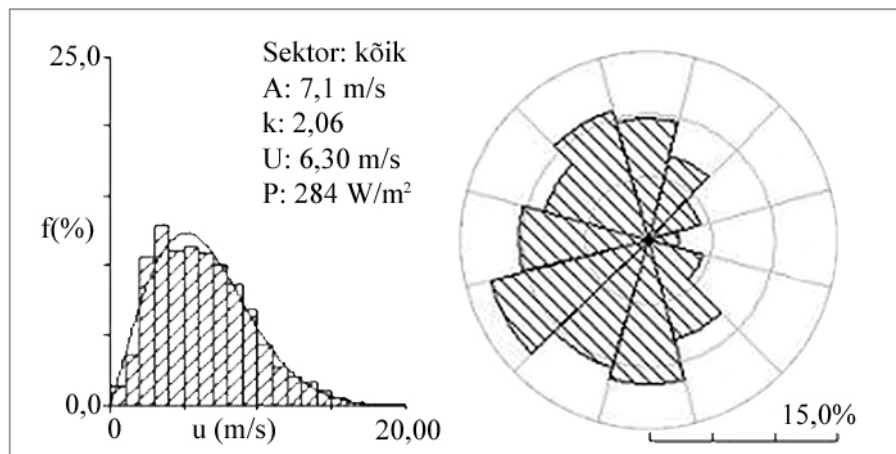
TTÜ soojustehnika instituut on viinud läbi tuulemõõtmisi ja ressursi uuringuid mitmel pool Eestis (Uulus, Virtsus, Pranglil, Tambas, Türisalus, Haapsalus ja Paldiskis). Lisaks konkreetsete projektide tasuvusarvutustele on saadud andmeid kasutatud ka Eesti tuuleatlase täiendamiseks.

Kõige uuem ja kõrgem tuulemõõtemast püstitati 2005. aasta aprillis Paldiskisse Pakri tuulepargi territooriumile. Masti üldkõrgus on 75,2 meetrit ja tuule kiirust registreeritakse kolmel erineval kõrgusel (33,7 m, 51,6 m ja 75,2 m). Saadud tuuleandmete baasil uuritakse täpsemalt tuule profiili ja turbulentsi kõrge pankranniku eritingimustes ja viiakse sisse vajalikud korrektuurid prognoositava elektritoodangu arvutusmetoodikatesse.

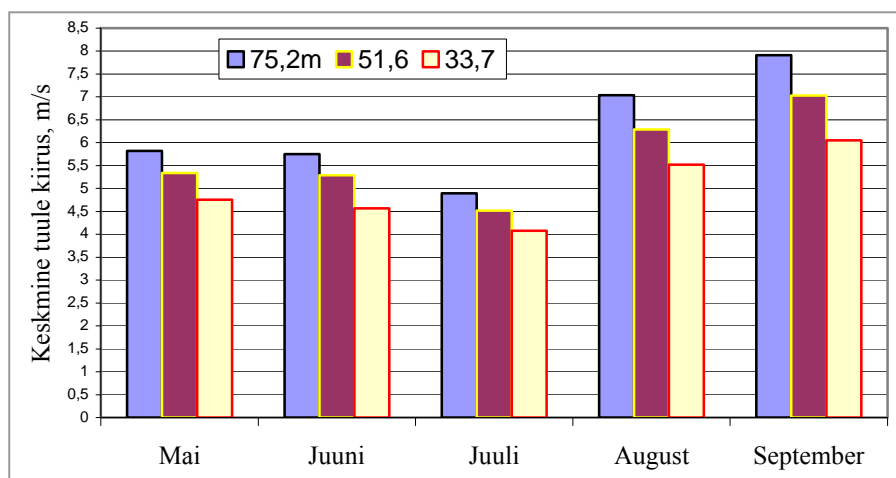
Enamasti registreeritakse 10 minuti keskmistena tuule kiirus, suund, õhu rõhk ja temperatuur. Et hinnata uuritava asukoha tuulekliimat, koostatakse registreeritud tuuleandmete põhjal Weibulli jaotus (tuulte jaotus erinevatesse tuuleklassidesse) ja tuulte roos (tuulte jagunemine erinevate ilmakaarte vahel).



Joonis 1.  
Pakri tuulepargi 5 kuu (mai kuni september 2005) tuuleandmete põhjal koostatud Weibulli jaotus ja tuulte roos.



Joonis 2.  
Keskmine tuule kiirus Pakri tuulepargi asukohas kolmel kõrgusel 5 järjestikusel kuul (mai kuni september).



## VIITED

Kask L. 2003. Eesti märgalade biomassi ressursid ja nende kasutamine energeetikas. TM väitekiri. STI, Tallinn, 49 lk.

Kask, Ü., Kask, L. 2003. Eesti pilliroo ressurss ja põlemistehnilised parameetrid. Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine : neljanda konverentsi kogumik. Tartu, 105-112.

Parve, T., Paist, A., Nuutre, M., Aluvee, R. 2004. Biokütuste tuha koostise mõju katla tööle. Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine : viienda konverentsi kogumik. Tartu, 60-63.

Paist, A., Kask, Ü., Kask, L. 2004. Pilliroo põletuskatsete tulemusi. Taastuvate energiaallikate

uurimine ja kasutamine : viienda konverentsi kogumik. Tartu, 53-59.

Paist, A., Kask, Ü., Kask, L., Sihtmäe, M. 2003. Eesti biokütuste energeetilise ressursi hinnang. Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine : neljanda konverentsi kogumik. Tartu, 34-44.

Paist, A., Kask, Ü., Kask, L., Vrager, A., Muiste, P., Padari, A., Pärn, L. 2005. Potential of biomass fuel to substitute for oil shale in energy balance in Estonian energy sector. Oil Shale, 22, 4S, 369-380.

Paist, A., Nuutre, M., Aluvee, R. 2001. Puitkütuste omadused. Ehituskaar, 9-10, 32-35.





Paist, A., Nuutre, M., Aluvee, R. 2002. Puit (põhiste) kütuste omadused ja kvaliteet. Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine : kolmanda konverentsi kogumik. Tartu, 109-117.

Paist, A., Ots, A., Kask, Ü. 2005. Tahked tavajäätmed kütuseks. Eesti põlevloodusvarad ja -jätmed. Tallinn, 18-20.

Paist, A., Poobus, A., Tiikma, T. 2002. Probes for measuring heat transfer parameters and fouling intensity in boilers. Fuel, 81, 1811-1818.

Vares, V., Muiste, P., Kask, Ü., Pihu, T., Soosaar, S. 2005. Manual for Biofuel Users - Biokütuste kasutaja käsiraamat. Tallinn, 172 lk. (inglise, eesti ja vene k.).

Veski, A., Tiikma, T. 2004. Biokütuste veekatteldes põletamise soojustehnilistest probleemidest. Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine : viienda konverentsi kogumik. Tartu, 88-96.

Veski, A., Tiikma, T., Borovikov, V. 2002. Combustion Air Control in Bio fuel-Fired Boilers. Proc. of Twelfth European Biomass Conf. Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Amsterdam, The Netherlands, 17-21 June 2002, 408-411.

Veski, A., Tiikma, T., Borovikov, V. 2002. Öhu reguleerimisest biokütuste respõletamisel. Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine : kolmanda konverentsi kogumik. Tartu, 134-141.

Foto 8.  
80-meetrine mõõtemast koos tuulikuga nr. 3 (üleval) ja Pakri tuulepargi üldvaade.



sejuhatuses oli sellest põgusalt juttu. Puudutatakse ka probleeme, mis nimetatud materjaliga on seotud, ja räägitakse uuematest uurimis- ja arenduste-

gevuse tulemustest Tallinna Tehnikaülikooli elektroonikainstituudis (TTÜ ELIN) pooljuhtseadiste uurimise alal.

## RÄNIKARBIID JA TEMAGA SEOTUD PROBLEEMID

Viimastel aastatel on uuringud ränikarbiidi (SiC) vallas oluliselt laienenud. Põhjuseks on asjaolu, et tänapäeval esitatakse pooljuhtelektroonikale aina karmimaid väliskeskkonnast tulenevaid nõudeid (nt võime taluda kõrgeid temperatuure) võrreldes nõuetega viie või kümne aasta eest. Tänu väga heale soojusjuhtivusele ( $\sim 5,0$  W/cm), väga kõrgele elektronide triivliikumise küllastuskiiruse väärtusele ( $\sim 2,7 \times 10^7$  cm/s) ja vastupidavusele kõrgetele elektriväljatugevustele ( $\sim 3$  MV/cm) on ränikarbiid muutumas eriti sobivaks materjaliks loomaks kõrgtemperatuurilisi, kõrgepingelisi, kõrgsageduslikke ja suurevõimsuselisi pooljuhtseadiseid, asendamaks täna kasutusel olevaid räni (Si) ja galliumarseniid(GaAs)tehnoloogiatel põhinevaid lahendusi. Si-l ja GaAs-l põhinevad pooljuhtseadised ei ole kahjuks võimelised taluma piisavalt kõrgeid töötemperatuure, rääkimata näiteks funktsioneerimisest keemiliselt aktiivsetes keskkondades.

SiC-st valmistatud pooljuhtseadised avavad tänu materjali eelnimetatud üliheadele omadustele uued perspektiivid elektronseadmete loomisel, kasutamata suuremõtmelisi jahuteid nii infot kui ka energiat muundavates seadmetes, mis omakorda võimaldab juba lähitulevikus oluliselt odavamaid tootelahendusi paljudes inimtegevuse valdkondades.

Siiski tuleb nentida, et vaatamata materjali paljulubavatele omadustele seisavad pooljuhtseadiste loojad ning ka kasutajad täna veel silmitsi mitme tõsise probleemiga. Mõned olulisemad neist on järgmised. Pooljuhtseadiste tarbeks lähtematerjalide tootmisel maailmas kehtiva ühe rusikareegli kohaselt loetakse antud materjaliga varustatuse tase pooljuhtseadiste tootjatele piisavaks, kui maailmas olemasolevad tootmisvõimsused tagavad toodangu mahu  $6,5 \times 10^3$  cm<sup>2</sup> tunnis. Hetkeseis on aga hinnanguliselt järgmine:

- Si  $6,5 \times 10^6$  cm<sup>2</sup> tunnis;
- GaAs  $6,5 \times 10^3$  cm<sup>2</sup> tunnis;
- SiC  $6,5 \times 10^{3/2}$  cm<sup>2</sup> tunnis.

Teiseks tõsiseks probleemiks on kasvatatud kristallilise alusplaadi kvaliteet. TTÜ EI uuringud on näidanud, et võrreldes Si ja GaAs-ga on SiC pooljuhtplaatidesse tekkivate defektide ja dislokatsioonide tihedus siiski ülikõrge ning esile tulevad sellised defektid, mis kahe esimesena nimetatud materjali puhul praktiliselt enam ei esine. Nimetatud probleemid mõjutavad otseselt ühelt pooljuhtplaadilt saadavate võimalike pooljuhtseadiste arvu, seega nende hinda. Viimasele lisandub ka SiC plaatide eneste oluliselt kõrgem hind, mis on tingitud kristalli valmistamise kõrgemast energiamahukusest võrreldes Si ja GaAs-ga. Joonisel 1 on näitena toodud SiC plaatides uurimisgrupi poolt fikseeritud erinevaid defekte plaadi pinnal ja joonisel 2 pooljuhtplaadi defektide topograafia. Kuid vaatamata nimetatud puudustele on SiC täna siiski ainuke tõsiseltvõetav materjal jõupooljuhtseadiste loomiseks. Seda väidet toetab ka prof Enn Velmre poolt koostatud *Roadmap* (joonis 3) [Velmre, 2005]. Esitatud “materjali puult” on selgesti näha, et oleme jõudnud ühe ajastu – räniajastu – lõppu ja pooljuhtseadiste loojaid ootavad lähiaegadel huvitavad väljakutsed nii jõu- kui ka mikroelektroonikas.

Kolmandaks tõsiseks probleemiks on kõrgekvaliteediliste kontaktide valmistamine (metalliseerimistehnoloogia) pooljuhtalustele, et tagada nõutud elektriliste ja termiliste karakteristikute ja parameetrite saavutamine seadiste töötamisel. Viimasega liitub otseselt korpustamise temaatika. ELIN uurimisgrupp ongi tegelenud just metalliseerimistehnoloogate uurimise ja väljatöötamisega SiC seadiste tarbeks. Hetkeolukorrast sügavam ülevaade on toodud Pärnu konverentsil esitatud ettekandes [Rang, Rang, 2005].

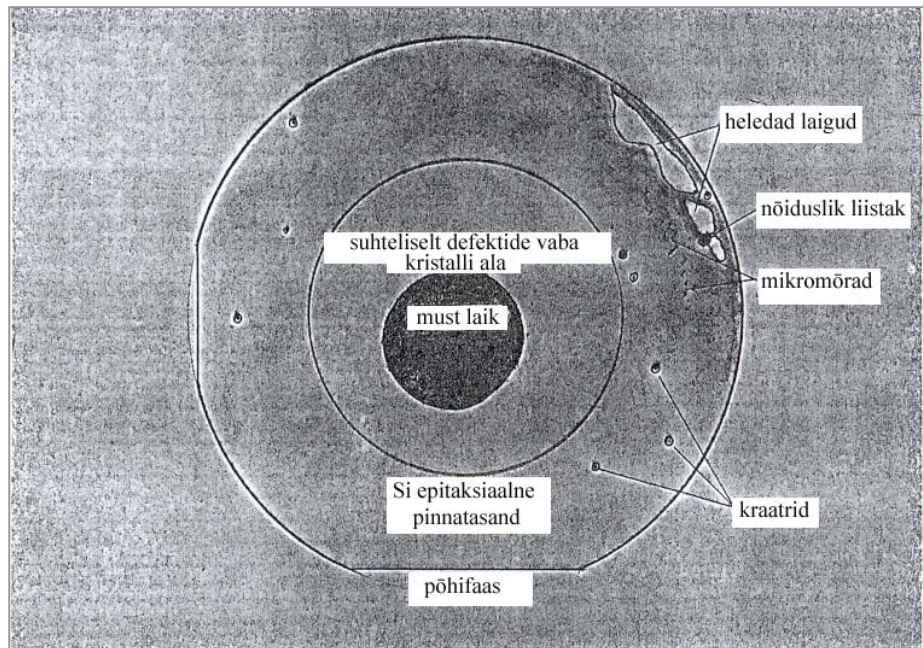


a)

b)

Joonis 1.

SiC kristalli defektid: a) komeedi saba tüüpi defekt (*comet tail*); b) mikrokanali tüüpi defekt (*micropipes*).



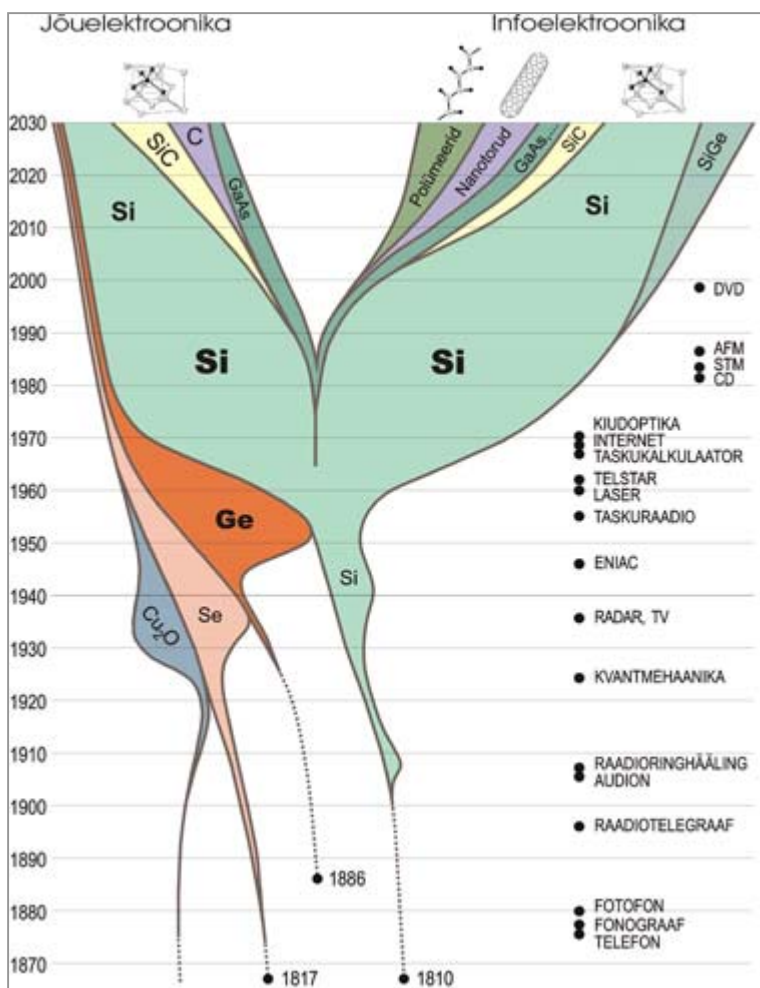
Joonis 2.

SiC plaadi Si-pinna topograafia.

## TULEMUSED TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLI ELEKTROONIKAINSTITUUDIS

ELIN uurimisrühm alustas tööd 1996. aastal ning on tänaseks saavutanud tuntuse SiC kontaktide valmistamise ja tehnoloogia uurimise vallas. Teadaolevalt on siiani avaldatud andmete alusel ELIN rühm ainuke GE (USA) firma uurijate kõrval, kellel on

õnnestunud valmistada nii Schottky alaldavaid kui ka oomilisi suurepinnalisi kontakte suhteliselt homogeensetele n- ja p-tüüpi 4H- ja 6H-SiC alustele (kontakti pindala 50 mm<sup>2</sup> ja enam). Töö tulemused on tähelepanu äratanud mitmetel SiC alastel



Joonis 3. Pooljuhtseadiste tarbeks kasutatavate materjalide Roadmap.

konverentsidel (nt ECSCRM ja ICSCRM, mille materjale refereeritakse ISIWeb of Science and-mebaasis). Modelleerimise alal on pikka aega toimunud koostöö Saarimaa Ülikooli ja Budapesti Tehnikaülikooli (viimasega koostööleping Eesti TA kaudu) spetsialistidega. Selle koostöö tulemusena loodi unikaalne elektrotermiline mudel kontaktialade mittehomoogeensuste mõju (voolukõverdumine) uurimiseks siirde staatilistele karakteristikutele [Rang, Blum, 1996]. Viimasel ajal on tihenenud koostöö Furtwängeni Rakendusteaduste Ülikooli mikrosüsteemide instituudiga (prof G. Higelin), USA firmaga TDI ning Joffe instituudiga Peterburis (prof L.V. Grehov).

Kvaliteetsete kontaktide valmistamiseks on tänapäeval kasutusel kas sadestamisel (*evaporation, sputtering*) või sidustamisel (*bonding, joining*) põhinevad tehnoloogiad. Elektrotehnika instituudis on loodud originaalne ja unikaalne tehnoloogia suurepinnaliste kontaktide valmistamiseks pooljuhtalustele. Suurepinnaliste Schottky diodide tarbeks töötati välja alaldavate ja oomiliste kontaktide üheaegse valmistamise tehnoloogia SiC alustele [Rang jt, 1999a], mille käigus osa tulemusi ka patenteeriti [Rang jt, 1999b]. Uurimistöö on edenenud tänu ETF grantidele ja sihtfinantseerimisele. Töö tulemusena leidis kinnitust hüpotees, et difusioonkeevitusega valmistatud p-tüüpi Schott-



ky struktuuride parameetrid ja karakteristikud on oluliselt paremad võrreldes sarnastest n-materjalist difusioonkeevitusega valmistatud struktuuridega [Korolkov jt, 2003b]. Tulemused on näha ka joonis 4.

Metalliseerimistehnoloogia tarbeks ehitati uni-kaalne difusioonkeevituse seade UDS-6. Loodud tehnoloogia eelisteks on:

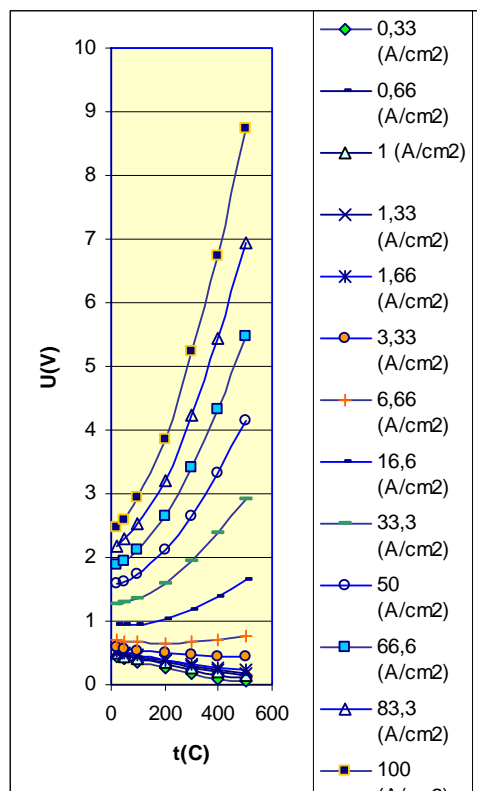
- energia kokkuhoid kontaktide valmistamisel, kuna on võimalik teostada metalliseerimisprotsessi samaaegselt pooljuhtplaadi mõlemal poolel;
- on võimalik luua pakse metallkontakte (paksus kuni 1 mm), mis on oluline jõuseadiste valmis-

tamisel ja mida erinevad sadestustehnoloogiad põhimõtteliselt ei võimalda;

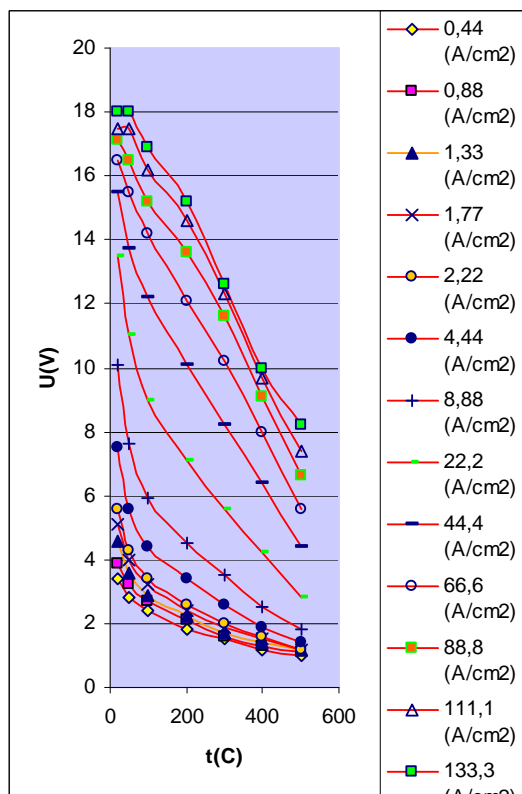
- tänu kontaktide ülikvaliteetsele nakkumisele kujuneb pärioleku takistus (või päripingelang) kuni 30% väiksemaks kui seda võimaldavad saavutada erinevad sadestustehnoloogiad.

Difusioonkeevituse protsessi eripära aitab selgitada joonis 5.

Ei tohi unustada, et metalliseerimine toimub rõhu all ja seetõttu antud tehnoloogia ei ole rakendatav otseselt mikroelektronikas, kus kristalli pind on väga ebatasane (lubatud ebatasasused ei tohi ületada 4  $\mu\text{m}$ ).



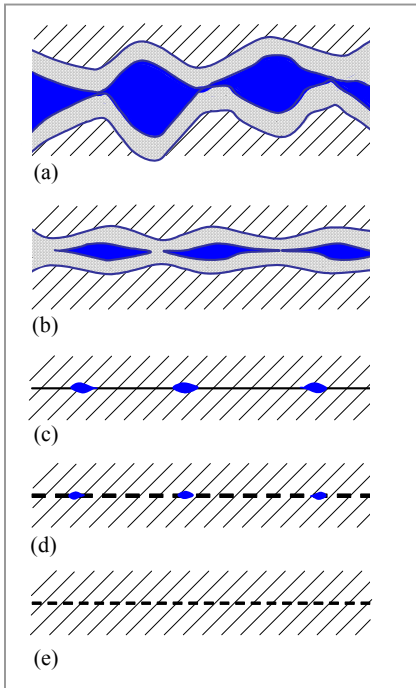
a)



b)

Joonis 4.

Päripingelang suurepinnalistel SiC Schottky diodidel: a) n-4H-SiC; b) p-4H-SiC.

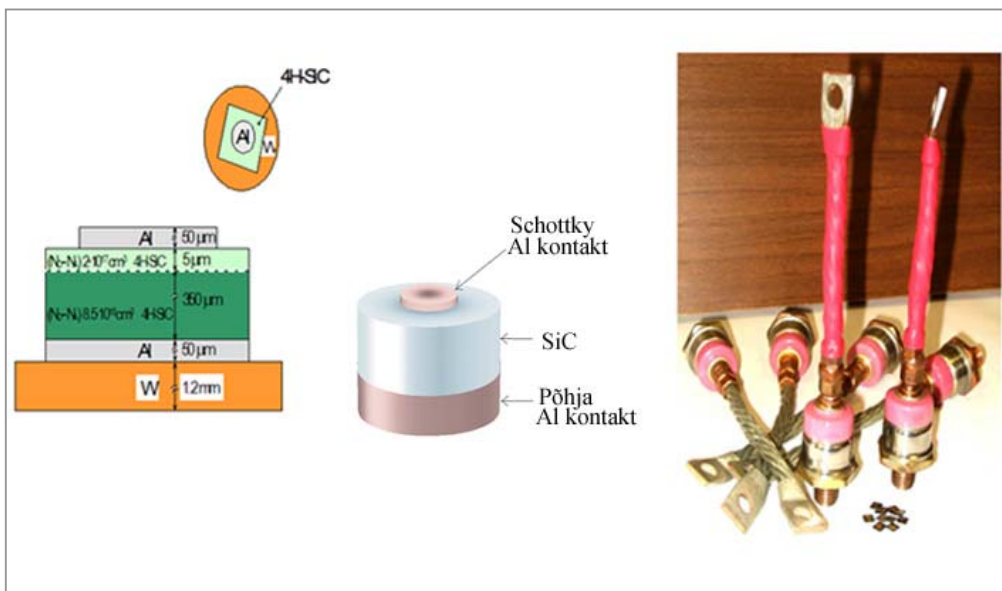


Joonis 5.

Difusioonkeevituse protsessi selgitus:

- algstaadium (punktkontakti olemasolu);
- protsessi jätkumisel kaovad oksiidikiled;
- protsessi lõpufaas, kus on alles jäänud üliõhuke oksiidikiht mõningates kohtades;
- protsess jätkub, mille tulemusel vakantside liikumine elimineerib järelejäänud oksiidijäänused;
- protsess on lõppenud ja kontakt on täielik.

Joonistel 6–7 ja fotol on esitatud pildid uurimisgrupi poolt loodud SiC Schottky jõudiodide näidistest ja  $U-I$  karakteristikud.



Joonis 6.  
Väljatöötatud 4H-SiC Schottky diodi ristlõige, struktuurne konstruktsioon ja näidised.

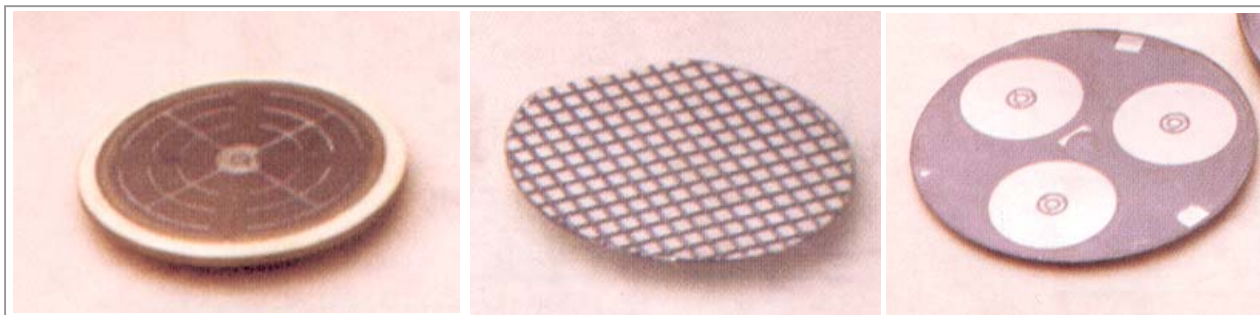
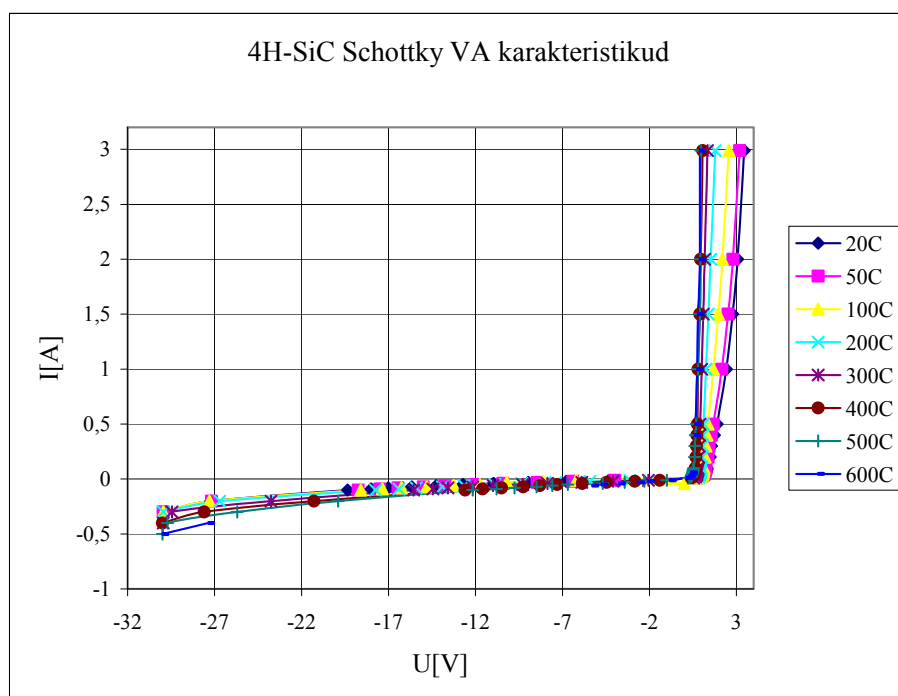


Foto.  
Erinevad metalliseerimisnäidised pooljuhtplaadil, mida difusioonkeevituse tehnoloogia võimaldab realiseerida.

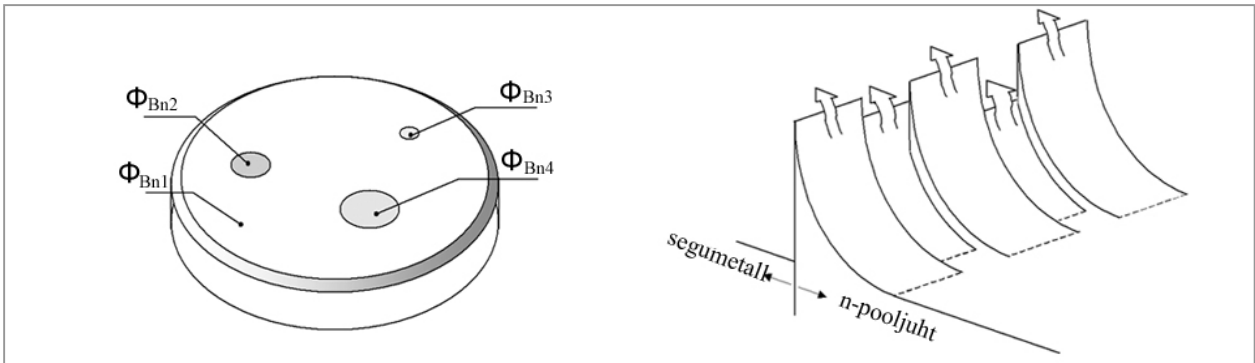


Joonis 7.  
Loodud Schottky diodide mõõdetud vastukarakteristikute temperatuurisõltuvused.

Uurimisgrupi teine temaatika on loodavate seadiste modelleerimine ja modelleerimise tarbeks mudelite väljatöötamine ning nende mudelite abil oluliste nähtuste uurimine. Tingituna aluskristalli defektirohkusest on ülimalt oluline uurida kontaktpotentsiaali kõrguse muutusest tingitud voolutranspordi jaotust kogu kontakti pinnal. Kuna nimetatud nähtust on pea võimatu mõõtmiste teel

uurida, siis jääb modelleerimine informatsiooni hankimisel ainukeseks võimaluseks. Antud nähtuse uurimiseks töötati esmalt välja askeemmodell ning seejärel täpsustatud numbriline mudel voolukõverdumisnähtuse uurimiseks SiC Schottky kontaktides. Potentsiaalibarjääri mittehomogeensusi kirjeldavat mudelit selgitab joonisel 8 näidatud olukord.



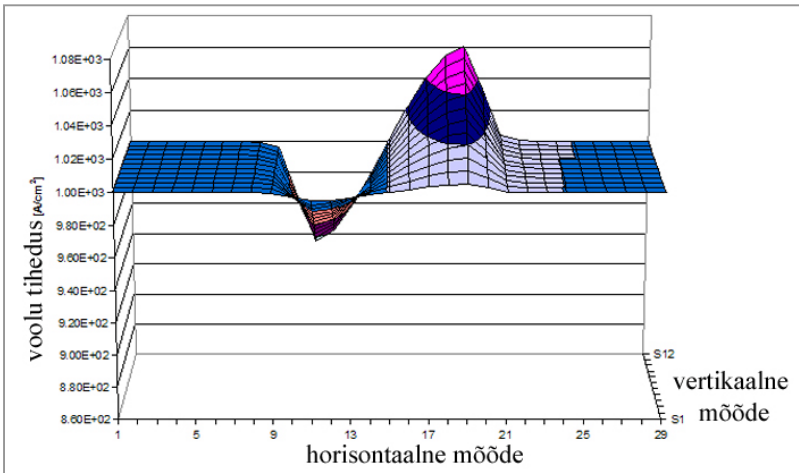


Joonis 8.

SiC plaadi pinnal esinevate defektide olemasolust tingitud potentsiaalbarjääri kõrguse skemaatiline kujutis.

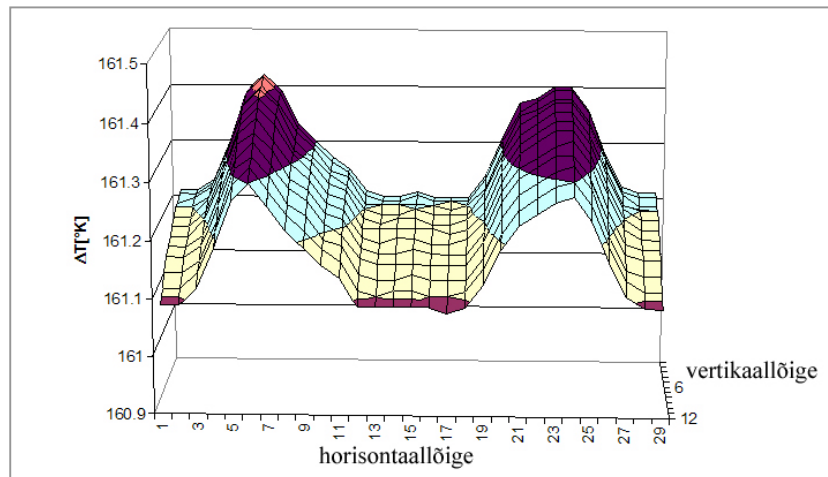
Joonisel 9 on näha voolukõverdumise nähtus erinevate potentsiaalbarjääri kõrguste korral 6H-SiC

Schottky kontaktil. Joonisel 10 on näha temperatuuri muutus tingituna voolukõverdumise nähtusest.



Joonis 9.  
Voolukõverdumise nähtus Me-6H-SiC üleminekuosas.

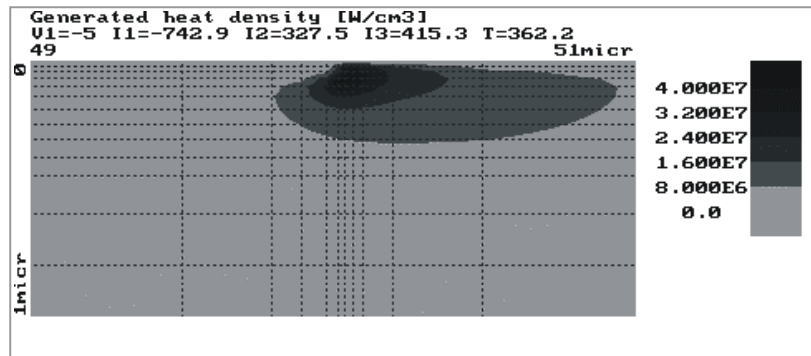
Joonis 10. Temperatuuri jaotus joonisel 9 näidatud voolukõverdumise nähtusest tingituna.



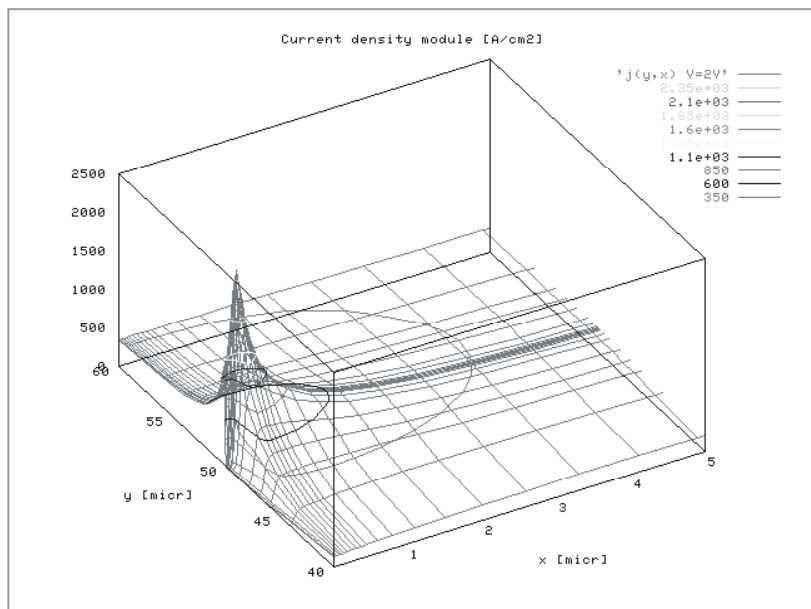
Joonisel 11 on näha samas struktuuris genereeritud soojuse levimine ning joonisel 12 genereeritud soojuse jaotus kolmemõõtmelises pooljuht-

struktuuris (mõõdmetega  $2\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ ) arvutatuna programmiga DYNAMIT-2D SCHOTTKY [Kurel, Udal, 2002].

Joonis 11.  
Genereeritud soojuse tihedus, mis on tingitud kontaktala mittehomo-geensusest 6H-SiC Schottky kontaktil.



Joonis 12.  
Genereeritud soojuse jaotus ning tippväärtuse asukoht.



Lisaks eelnimetatud mudelitele töötati ELINis välja lõplike elementide meetodil põhinev mudel kontaktide valmistamisel ja ekspluatatsioonil tekivate kombineeritud painete ja väänete uurimiseks [Korolkov, jt. 2005]. Kasutades simuleerimispakette MEDICI ja DYNAMIT2D-SCHOTTKY viidi läbi ulatuslikud uuringud SiC JBS tüüpi seadiste iseloomustamiseks. Detailsed tulemused on esitatud meie publikatsioonides [Rang, 2001;

Rang jt, 2005; Korolkov, Rang, 2001, 2002; Korolkov jt, 2006; Pikkov jt, 2006]. Pooljuhtstruktuuride modelleerimise ja tehnoloogia vallas on alates 1998. aastast kaitstud kokku 5 doktoritööd (vanemteadur Enn Velvre juhendamisel Andres Udal [Udal, 1998] ja prof Toomas Rangi juhendamisel Oleg Korolkov [Korolkov, 2004], Raido Kurel [Kurel, 2005], Rainer Taniloo [Taniloo 2005] ja Viktor Voitovich [Voitovich, 2006]).

## KOKKUVÕTE

Põhilised saavutused uurimistegevuse tulemustena:

- Tunnelmehhanismi kirjeldamine Schottky üleminekute tarbeks;
- Schottky üleminekuid kirjeldava *shape function* defineerimine ja selle funktsiooni sõltuvuse uurimine tehnoloogilistest parameetritest ning temperatuurist;
- Madala energiatarbega metalliseerimistehnoloogia väljatöötamine 6H- ja 4H-SiC pooljuhtalustele;

## VIITED

Baliga, B. J. 1996. Trends in power semiconductor devices. IEEE ED-43, 1717-1731.

Bhatinagar, M., Baliga, B. J., Kirk, H. R., Rozgonyi, G. A. 1996. Effects of surface inhomogeneities on the electrical characteristics of SiC Schottky contacts. IEEE ED-43, 150-156.

Korolkov, O. 2004. Formation of Diffusion Welded Al Contacts to Semiconductor Silicon Carbide, PhD Theses of Tallinn University of Technology, TUT PRESS, Tallinn, 91 p.

Korolkov, O., Rang, T. 2000. Comparative characteristics of diffusion welded Al contacts to 6H- and 4H-SiC substrates. Proc. BEC2000, Oct. 8-11, 2000, Tallinn, Estonia, 23-26.

Korolkov, O., Rang, T. 2001. Comparative characteristics of 6H- and 4H-SiC surfaces in diffusion welding. Proc. Eston. Acad. Sci. Eng., 7, 4, 347-353.

Korolkov, O., Rang, T. 2002. Large area 4H-SiC Schottky structure with defects in epitaxial layer. Yoshida, S., Nishine, S., Harima, H., Kimoto, T. (eds.). Silicon Carbide and Related materials 2001. Part 2, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 941-944.

Korolkov, O., Rang, T., Kurel, R. 2003a. Investigation of the combined stress and strain situation in diffusion welded rectifying elements. Brebbia, C. A., de Hosson, J. T. M., Nishida, S.-I. (eds.). Surface Treatment VI, WIT Press, 307-316.

- Suure pindalaga Schottky diodide väljatöötamine ja karakteriseerimine n- ja p-tüüpi 4H-SiC alustele;
- Kontaktala mittehomogeensusest tingitud voolukõverdušnähituse uurimise tarbeks mudeli väljatöötamine ning mudeli parameetrite defineerimine;
- GaAs *sandwich*-tüüpi kõrgepingeliste pingekordistite (*stacks*) tehnoloogia väljatöötamine firma Clifton Ltd tarbeks.

Korolkov, O., Rang, T., Syrkin, A., Dmitriev, V. 2003b. Diffusion welded Al contacts to p-type SiC. Bergman, P., Janzén, E. (eds.). Silicon Carbide and Related Materials 2002, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 697-700.

Korolkov, O., Rang, T., Syrkin, A., Dmitriev, V. 2006. Diffusion welding techniques for power SiC Schottky packaging. Devaty, R. P., Larkin, D. J., Sadow, S. E. (eds.). Silicon Carbide and Related Materials 2005. Trans Tech Publications LTD, Switzerland, 919-922.

Kurel, R. 2005. Investigation of Electrocal Characteristics of SiC Based Complementary JBS Structures, PhD Theses of Tallinn University of Technology, TUT PRESS, Tallinn, 98 p.

Kurel, R., Udal, A. 2002. Two dimensional non-isothermal analysis of the current crowding effect at non-uniform SiC Schottky contacts using device simulator DYNAMIT-2DT. Proc. BEC2002, Oct. 6-9, 2002, Tallinn, Estonia, 51-54.

Pikkov, M., Rang, T., Pokatilov, A. 2006. SiC Schottky diode for use in power converters. Proc. BEC2006, Oct. 2-4, 2006, Tallinn, Estonia, (in press).

Rang, T. 2001. Modelling of inhomogeneities of SiC Schottky interfaces (invited). Software for Electrical Engineering Analysis and Design V, WIT, WIT Press, Sothampton, Great Britain, 3-15.

- Rang, T., Blum, A. 1996. Two-dimensional modelling of alloy metal Schottky contacts to 6H SiC substrate. Silvester, P. P. (ed.). Software for Electrical Engineering Analysis and Design, Comp. Mech. Pub., 347-356.
- Rang, T., Korolkov, O., Kurel, R., Pikkov, M. 1999. Large area high quality interfaces to SiC substrates - technology and modelling. Winkler, T., Schubert, A. (eds.). Materials Mechanics; Fracture Mechanics; Micro Mechanics, IZM Publisher Druckhaus, Dresden, 574-579.
- Rang, T., Korolkov, O., Pikkov, M. 1999. Schottky Diode. Patent EE 99 00205 U1, 12.07.1999.
- Rang, T., Kurel, R., Higelin, G., Poirier, L. 2005. Current crowding phenomenon in JBS structures. de Hosson, J. T. M., Brebbia, C. A., Nishida, S.-I. (eds.). Computer Methods and Experimental Measurements for Surface Effects and Contact Mechanics VII, WIT Press, Southampton, 387-396.
- Rang, T., Rang, G. 2005. Silicon Carbide – new challenge for power semiconductor devices. Proc. of the 2nd Int. Symp. Topical Problems in Education in the Field of Electrical and Power Engineering, TTU, January 17-22, 2005, Kuresaare, Estonia, 36-42.
- Shenai, K., Scott, R. S., Baliga, B. J. 1989. Optimum semiconductors for high power electronics. IEEE ED-36, 1811-1823.
- Silicon Carbide. Product Specification 2000. CREE Research Inc.
- Taniloo, R. 2004. Design and Optimization of Economical Circuits and Components with Negative Differential Resistance. PhD Theses of Tallinn University of Technology, TUT PRESS, Tallinn, 93 p.
- Udal, A. 1998. Development of Numerical Semiconductor Device Models and their Applications in Device Theory and Design. PhD Theses of Tallinn University of Technology, TUT PRESS, Tallinn, 102 p.
- Velmre, E. 2005. Kui vana on elektroonika? Tallinna Tehnikaülikooli aastaraamat 2004, TTÜ Kirjastus, Tallinn, 291-296.
- Voitovich, V. 2006. Development of LPE Technology for GaAs High-Voltage Epitaxial Structures. PhD Theses of Tallinn University of Technology, TUT PRESS, Tallinn, 85 p.

# LAINETAV LÄÄNEMERI EESTI TEADLASTE PILGU LÄBI

*Tarmo Soomere*

Tallinna Tehnikaülikooli küberneetika instituut

## MERI TORMAB JA LAINETAB

Viimastel aastatel on meri käitunud väga agressiivselt. Kohe 2006 algul, 11. jaanuaril registreeriti Norra merel Põhja-Atlandi lainekõrguse kõigi aegade rekord (M. Reistad, Norra meteoteenistus, personaalne informatsioon). Oluline lainekõrgus (mis on ligikaudu 1/3 kõrgeimate lainete keskmisest kõrgusest ja väljendab üsna täpselt seda lainekõrgust, mida me merele vaadates lainete tüüpiliselt kõrguseks pakume) oli 17 meetrit ja kõrgeim üksiklaine üle 27 meetri. Inimesed on mere agressiivsusele jõudumööda vastanud – näiteks 2006 kevadtalv läheb annaalistesse Eestit viimasel ajal tabanud suurimate õlireostuste kaudu.

Eelmine (2005) aasta tuletas mitmes maailma paigas meelde, et mere jõud käib inimeste omast üle. Sügistormid Eestis möödusid õnneks suuremate vahejuhtumiteta. Väikesest hirmutamistest hoolimata vesi novembris siiski üle rannajoone ei tulnud. Märksa põnevam oli hoopis haruldaselt tugeva kagutuulega tekkinud lainetuse nähtus Soome lähel Helsingis toimunud kergejõustiku maailmameistrivõistluste ajal. Suvel ja sügisel püstitasid orkaanid Katrina, Wilma ja Rita järjestikku Mehhiko lahe ja Lääne-Atlandi tuule kiiruse rekordeid. Katrina ei osutunudki sisemaale jõudes nii kangeks, kui algul kardeti. Sellest hoolimata lõhkus ta New Orleansi kaitsetammid, tappis üle tuhande inimese ning tekitas astronoomilise materiaalse kahju.

## LAINeid ON LÄÄNEMEREL IKKA OLNUD

Märkmeid lainetuse omaduste kohta Tallinna Vanasadamas tehti juba 19. sajandi algul (R. Vahter, personaalne informatsioon). Eesti Meteoroloogia

Katrinale eelnenud poolaastal laekus järjestikku teateid laevu tabanud hiidlainetest [Didenkulova jt, 2007]. Kaks suurt matkalaeva, Grand Voyager (14. veebruaril Vahemerel) ja Norwegian Dawn (16. aprillil Kariibi merel), pääsesid kerge ehmatusega. Esimesel purunesid kaptenisilla aknad ja teisel mitmed veeliinist ligi 20 meetri kõrgusel paiknevad kajutite aknad. Kehvemini läks kaubalaeval Jökulfell, mille lained 7. veebruaril Fääri saarte lähistel kummuli keerasid ja mis viis endaga märga hauda kuus Eesti meremeest. 2004. aasta teisel jõulupühal tappis tsunami India ookeani rannikuil ligikaudu veerand miljonit inimest. Mõni kuu varem, 15. septembril 2004 püstitas orkaan Ivan kõigi aegade olulise lainekõrguse maailmarekordi 17,9 meetrit. Kõrgeim registreeritud üksiklaine oli 27,7 meetri kõrgune [Wang jt, 2005]. Maailmas on haruharva kohatud veel kõrgemaid laineid.

Nende sündmuste taustal tundub kohatu kõneleda Eesti randasid räsivatest tormidest ja nende poolt tekitatud lainetest. Isegi Gudruni-nimelises jaanuaritormis 2005 sai surma vaid üks vanamemm, kes ei tahtnud kodunt ära minna. Merel ei läinud põhja ühtegi laeva. Siiski tõi see torm maailma kindlustusfirmadele aasta neljanda väljamakse (Eesti Ekspress, 10(848), 9.03.2006). Kolm esimest olid eelnimetatud Kariibi mere orkaanid. Et sündmused meie kodusel Läänemerel on võrreldavad maailma suurimate tormidega, ei ole päris tavaline.

ja Hüdroloogia Instituudi mitmes rannikujaamas on aastakümnete jooksul regulaarselt vaadeldud lainetuse omadusi. Möödunud sajandi teisel poolel

koostati lainetuse omaduste atlased Läänemere avaosa ja Soome lahe kohta [Rzheplinsky, Brekhovskikh, 1967]. Lainetuse kohalike omaduste arvu- tusteta (1980ndatel aastatel enamasti Venemaa või Soome teadlaste poolt, edaspidi põhiliselt prof U. Liivi meeskonna poolt) pole teostatud ühtegi suuremat vesiehitusprojekti.

Süsteemaatilised avamerelainetuse omaduste uurin- gud Eestis ning nende tulemuste üldistamine tea- duspublikatsioonide näol algasid viimasel sajandi- vahetusel seoses Saaremaa süvasadama võimalike asukohtade hüdrodünaamilise ja geoloogilise analüüsiga [Elken jt, 2001; Liiv, Liiv, 2001; Soomere, 2001a, 2003b]. Uue sajandi algul kerkisid tähelepanu keskmesse kiirlaevalainetega seondu- vad küsimused [Soomere, Rannat, 2003; Soomere jt, 2003ab; Soomere, Kask, 2003], mille juurest jõuti ühe hiidlaineid tekitava mehhanismi mõist- miseni [Peterson jt, 2003; Soomere 2004, 2006b;

Soomere, Engelbrecht, 2005ab, 2006]. Laevalai- nete spetsiifika mõistmiseks oli kõigepealt tarvis põhjalikult analüüsida kohaliku tuulelainetuse omadusi. Lainetuse ja veetaseme alastele uuringu- tele andis hoogu juurde 2005 jaanuaritorm, mis oluliselt modifitseeris ekspertide arusaamu meie kandis võimalike kõrgeimate veeseisude [Suursaar jt, 2006] ja ekstreemsete lainetuse tingimuste kohta [Soomere, 2006a; Soomere jt, 2006a].

Kuna kõrged lained tekivad vaid tugevate ja so- bivast suunast puhuvate tuultega, piirneb lainetuse uuringutega seeria avamerel puhuvate tuulte ana- lüüsile pühendatud töid [Soomere, Keevallik, 2001, 2003; Keevallik, 2003ab; Soomere, 2001b]. Kaasaegseid lainemudeleid on rakendatud ka lainetuse mõju analüüsil põhjasetete kujunemisele ja liikumisele. Saadud tulemused on esialgu pub- litseeritud konverentsiettekannete tasemel [Elken jt, 2002; Soomere jt, 2006b].

## MEIE MERI ON TAVALISELT PÄRIS ARMAS JA RAHULIK

Lainetuse omadusi Eesti rannavetes on seoses 1980. a olümpiamängudega [Orlenko, 1984] ning hiljuti seonduvalt kiirlaevaliikluse problemaati- kaga kõige detailsemalt käsitletud Tallinna lahel [Soomere, 2003, 2005a]. See on üks tavaline Põhja-Eesti laht, mis on varjatud nii meil valit- sevate edelatuulte eest kui ka Soome lahel suhteli- selt sagedasti esinevate ida(kirde) ja läanetuulte eest [Soomere, Keevallik, 2003], kuid praktiliselt avatud loode- ja põhjatuulte jaoks. Just need tuu- led tekitavad tavaliselt põhjaranniku lahtedes kõr- geimaid laineid. Tallinna lahte pääseb Naissaare ja mandri vahelt ka osa Läänemere avaosas tekkinud laineid.

Aasta keskmine oluline lainekõrgus on lahe kesk- osas, ligikaudu Rohuneeme sadama traaversil, üs- na tagasihoidlik, vaid 40 sentimeetrit ehk paras põlvekõrgune loksumine. See on rehkendatud jää- katet ignoreerides. Kui ka jää arvesse võtta, oleks tulemus veel väiksem. Soome lahe keskosas on aasta keskmine oluline lainekõrgus 60 sentimeetri ringis. Samas näitavad arvutimudelid, et ühes kor- ralikus põhjalooode tormis võib oluline lainekõrgus

Tallinna lahe avaosas tõusta üle nelja meetri ning kõrgeimad üksiklained võivad ulatuda 7 meetri kõrguseni [Soomere, 2005a]. Nõnda juhtus tõe- näoliselt 15. novembril 2001, mil Helsingi lähistel mõõdeti oluliseks lainekõrguseks 5,2 meetrit [Pettersson, Boman, 2002].

Ekstreemne lainekõrgus on niisiis ligikaudu küm- me korda suurem keskmisest. See on märksa suu- rem erinevus kui keskmise ja ekstreemse tuule kii- ruse vahel. Aasta keskmine tuulekiirus on näiteks Soome lahel sõltuvalt mõõtekohast 6–8 m/s, kuid korralikus tormis “vaid” 20–25 m/s. Üks kord 100 aasta kohta võib Soome lahel kolme tunni kesk- mine tuulekiirus olla 24–26 m/s [Soomere, Kee- vallik, 2003]. Ülal nimetatud 2001 novembri- tormis ulatus kuue tunni keskmine tuulekiirus Soome lahel 23 m/s (T. Tomson, personaalne informatsioon) ja 2005 jaanuaritormis jäi alla 20 m/s [Suursaar jt, 2006]. Seega on ülitugevas tormis tuulekiirus vaid kolm korda suurem aasta keskmisest tuulekiirusest. Kirjeldatud erinevus peegeldab tõsiasja, et paljudel juhtudel kasvab lainekõrgus võrdeliselt tuulekiiruse ruuduga.

## LÄÄNEMERE KÕRGEIMAD LAINED

Kõrgete lainete tekkimiseks peab kõva tuul puhuma suhteliselt suurel merealal üsna pikka aega. Läänemeri on ookeanidest palju väiksem. Meie laiuskraadidel on ka tsüklonid suhteliselt väikesed, mistõttu tormid sageli ei kata Läänemerd tervikuna ühtlase tuulega, vaid erinevatel merealadel puhub tuul erinevatest suundadest. Seetõttu on lained Läänemere avaosas rusikareeglina kaks korda väiksemad kui avaookeanil ning Läänemere suuremates lahtedes (Botnia meri, Soome laht, Riia laht) veel kaks korda väiksemad.

Tormituuled puhuvad meie kandis enamasti edelast või põhjaloodest. Selle taga on põhiosas tsüklonite trajektoori iseärasused, aga natuke ka asjaolu, et Läänemeri on justkui lõunaedela-põhjakirde suunas välja venitatud tänav. Ja eks tuul kipub ikka puhuma piki tänavat. Kõrgeimad lained jõuavad seetõttu üldiselt kas Soome edelarannikule (riivates seejuures Saaremaa ja Hiiumaa rannavesi) või Poola looderannikule.

Läänemere põhjapoolses osas on seni registreeritud suurim oluline lainekõrgus 7,8 m Almagrun-

## LAINETAV LÄÄNEMERI 2005 JAANUARIS

Viimase 25 aasta jooksul registreeritud lainetuse andmete foonil tundusid 2005. a 8.–9. jaanuariks antud operatiivsed lainetuse prognoosid esialgu ulmelistena. Saksamaa ilmteenistus prognoosis Soome lahe suudmes oluliseks lainekõrguseks üle 12 meetri. Kõrgeimad üksiklained ulatunuksid üle 20 meetri, mis oleks tähelepanuväärne ka Kariibi mere kõige kangemate orkaanide puhul. Umbes sama kõrgeks hindas tekkivat lainetust ka Taani Meteoroloogia Instituut. Soome Mereinstituut prognoosis Hiiumaa ja Stockholmi vahel oluliseks lainekõrguseks ligi 11 meetrit [Soomere jt, 2006a].

Meie õnneks (ja lõunanaabrite õnnetuseks) liikus torm veidi vähem põhja poole kui algul arvatud ning laastas suurima jõuga Lätimaad, mis jäi pea-aegu ruutkilomeetri võrra väiksemaks [Eberhardts, Saltupe, 2006]. Ventspilsi sadama sissesõidutee sügavus vähenes tormi ajal 17 meetrilt 10–11

detil Rootsi ranniku lähistel ööl vastu 13. jaanuari 1984 [Broman jt, 2006]. Teistes allikates on nimetatud veel väärtusi 7,3 m ja 7,7 m [Kahma jt, 2003]. Samas tormis registreeriti ka 12,75 m kõrgune üksiklaine.

Paar päeva enne Kagu-Aasia tsunamit, 22. detsembril 2004 fikseeriti Hiiumaa ja Stockholmi vahel avamerel oluline lainekõrgus 7,7 m ja uus üksiklaine kõrguse rekord 14 m (Soome Mereinstituut, [www.fimr.fi](http://www.fimr.fi)).

Lainekõrgus üle 7 m on Läänemere üsna haruldane. Alates 1978. aastast on seda lisaks märgituule juhtunud veel kahel korral – 1999 detsembris [Kahma jt, 2003] ning viimati 2005 jaanuaritormis [Soomere jt, 2006a]. Tõenäoliselt olid lained väga kõrged ka 1993 jaanuaris; siis aga olid mõtteseadmised rivist väljas [Kahma jt, 2003]. Eksperdid olid varem arvamusel, et oluline lainekõrgus Soome lahes ei tohiks ületada 4 m [Pettersson, 2001]. Ilmataat ei olnud ilmselt sellega kursis ning puhus 2001 novembris välja 5,2 m [Pettersson, Boman, 2002] ja 2005 jaanuaris 4,5 m [Soomere, 2006a].

meetri [Soomere, 2005b]. Väinameri pesti sõna otseses mõttes kaks korda läbi Läänemere avaosas veega [Suursaar jt, 2006]. Kõrgeimad lained esinesid lainemõõturitest eemal, Saaremaast edelas, kus oluline lainekõrgus oli ligi kümme meetrit ja üksiklained võisid olla 17–18 meetri kõrgused [Soomere jt, 2006a]. Mõõdetud olulise lainekõrguse maksimumiks jäi seetõttu “vaid” 7,2 meetrit, mis on viies-kuues tulemus Läänemere kõigi aegade edetabelis.

Selle tormi puhul ei täheldatud erakordset tuulekiirust, mis näiteks Saksamaa ilmteenistuse mudeli alusel ulatus Läänemerele 10 minuti keskmisena veidi üle 29 m/s (A. Behrens, personaalne informatsioon 2005). Ühtlase läänetuulega oli kaetud kogu Läänemere avaosas [Soomere jt, 2006a]. Tavaliselt on tugeva tuulega kaetud ala märksa kitsam ja tuul pigem edelast või loodest. Kuna tuule suund Eesti mandriosas oli edelast, ei osanud

ka paljud kogenud eksperdid Gudruni karta. Kui aga jutt on mere reaktsioonist mingile tormile, olgu siis veetaseme või lainete seisukohalt, on olu-

line just see, mis toimub avamerel. Rannik on lihtsalt koht, kus tuule poolt veemassidele antud energia realiseerub.

## SUURUS POLE AINUTÄHTIS, EHK LAINETEL ON PEALE KÕRGUSE VEEL KA PIKKUS

Ägeda maruga võivad lained kasvada küll üsna kõrgeks, kuid pikad lained pole igapäevane nähtus. Selleks peab tugev tuul puhuma ulatuslikul merealal. Pindala poolest väikestes meredes ja järvedes on seetõttu tuulelained alati suhteliselt lühikesed.

Enamasti iseloomustatakse laineid nende perioodi kaudu, mida on märksa lihtsam mõõta kui lainete pikkust. Mida pikemad lained, seda suurem periood. Tallinna lahel on lainete perioodid tavaliselt 2–3 sekundit, tugevates tormides 5–6 sekundit ning vaid ekstreemsetel puhkudel (näiteks 15. novembril 2001) ulatuvad 7–8 sekundini. Ummiklainete periood on vahel 7–8 sekundit ja enamgi, aga samas on nende kõrgus tavaliselt mõnikümne sentimeetrit [Orlenko, 1984; Soomere 2003a, 2005a]. Suuresti kujundavad sellist lainekliimat Naissaar ning madalad alad lahe suudmetes, mis varjavad lahte Läänemere põhjaosast tulevate pikkade ja kõrgete lainete eest. Soome lahel on lainete tüüpilised perioodid ligikaudu sekundi võrra pikemad. Erakordselt pikad olid 2005. aasta jaanuaritormi lained: Soome lahel oli mitme meetri kõrguste lainete periood paljude tundide vältel 11–12 sekundit [Soomere, 2006a]. Lainete jõust selles tormis on vaid kaudseid märke, näiteks lõhutatud Aegna muul või Ristna sadam Harjumaal. Lainete pikkus kombineerituna kõrge veeseisuga oli tegelikult põhjuseks, miks paljud väikesadamad nii kõvasti räsida said.

Pikkade lainete tekitamise vallas ei suuda aga tuul võistelda kiir-laevadega. Kõrgeimate kiir-laevalainete perioodid on Tallinna lahel 8–15 sekundit [Soomere, Rannat, 2003], seega märksa suuremad kui tuulelainete perioodid siinkandi kangeimates tormides. Paljudes Tallinna lahe rannavööndi lõikudes ületab üle 8 sekundi perioodiga laevalainete kõrgus iga päev meetri, keskmiselt ulatub see kaks kuni kolm korda päevas üle 80 cm. Aegna lähistel

on päeva kõrgeimate laevalainete periood 10–15 sekundit. Kui 2005 jaanuaritorm välja jätta, võib julgelt öelda, et vähemalt viimase paarisaja aasta jooksul pole Tallinna lahe siseosas niisuguseid laineid olnud. Teisisõnu, need kujutavad endast kvalitatiivselt uut hüdrodünaamilise aktiivsuse komponenti [Soomere jt, 2003ab; Soomere, 2005c].

Kiir-laevalained ei pruugi laevatee lähistel olla sugugi kõrgemad kui tavalaevade lained või tuulelained. Pikad laevalained on avamerel vaevu märgatavad nagu tsunamigi ning ei sega seal kedagi. Nende spetsiifilised jooned avalduvad sageli laevateest kaugemal ning tulenevad pinnalainete üldistest omadustest. Sügavas vees liiguvad pikemad lained märksa kiiremini kui lühemad, mistõttu laevalainete energia hajub üsna kiiresti üha suuremale merealale. Madalas vees levivad erinevad lained aga peaaegu võrdse kiirusega. Pikkus on siin suhteline mõiste – pikad on need lained, mille pikkus on märksa suurem vee sügavusest. Põhiosa kiir-laevalainetest on Tallinna lahe tingimustes väga pikad, mistõttu käigulainete erinevad komponendid liiguvad peaaegu võrdse kiirusega. Seetõttu püsib kiir-laevalainete rühm kaua kompaktsena ning üksikute lainete kõrgus väheneb laevateest eemal üsna aeglaselt.

Teine mehhanism, mis piirab tormilainete kõrgust, on lainete difraktsioon ehk laineharjade pikene-mine. Selle tulemusena jaotub lainete energia jär-jest laiemale merealale. Kõrgeimad kiir-laevalained on ülipikkade, peaaegu sirgete harjadega juba tekkides. Seetõttu mõjutab harjade pikene-mine nende kõrgust märksa vähem. Just selline oli ka Kagu-Aasia tsunami kõrgeim, sirge laineharjaga osa, mis tegi palju pahandust veel Aafrika rannikul (Horisont, 2005, nr 2). Kiir-laevalainete rühmad võivad jõuda ohtlikult kõrgetena märkimis-väärselt kaugel paiknevatele aladele [Soomere,



2005c] ning suurendada seal tunduvalt hüdrodünaamilist aktiivsust. Kiirlaevalained jõuavad rannaaladele kaua aega pärast laeva möödumist, mil supleja või paadimees ei oska enam midagi karta. Rannikumere ja selle ökosüsteemi jaoks on taolised lained sageli midagi väga haruldast, eriti seetõttu, et laevalained tulevad vahel suunast, kust

tormilaineid pole oodata. Sellest ka nende mõju merepõhjale, mis esimeses lähenduses avaldub peeneteraliste setete resuspensioonina, merepõhja erosioonina ning vee kvaliteedi halvenemisena põhjalähedases veekihi [Soomere, Kask, 2003; Erm, Soomere, 2004, 2006].

## KIIRLAEVALAINED MÕRVARLAINETE MUDELINA

Möödunud sajandi lõpuni peeti jutustusi hiidlainetest, mis purustavad kõik inimkätega tehtu, osaks meremeeste mütoloogiast. Need lained, mida on sageli hüütud ka mõrvarlaineteks, olevat justkui tapvad veevallid, väidetavalt palju kõrgemad teistest sama tormi lainetest ning seejuures ülimalt järsud. Kuni vastavad instrumentaalselt mõõdetud andmed puudusid, olid eksperdid taoliste lainete osas skeptilised. Laevalt silmaga hinnatud või satelliitidelt kaudsete meetoditega mõõdetud lainekõrgused võivad ju vahel olla üsna ebatäpsed. Tuulelainete parameetrid on aga suhteliselt hästi teada. Üllatusi võivad muidugi pakkuda senistest tugevamad tormid või ebatavalisest suunast puhuvad tuuled.

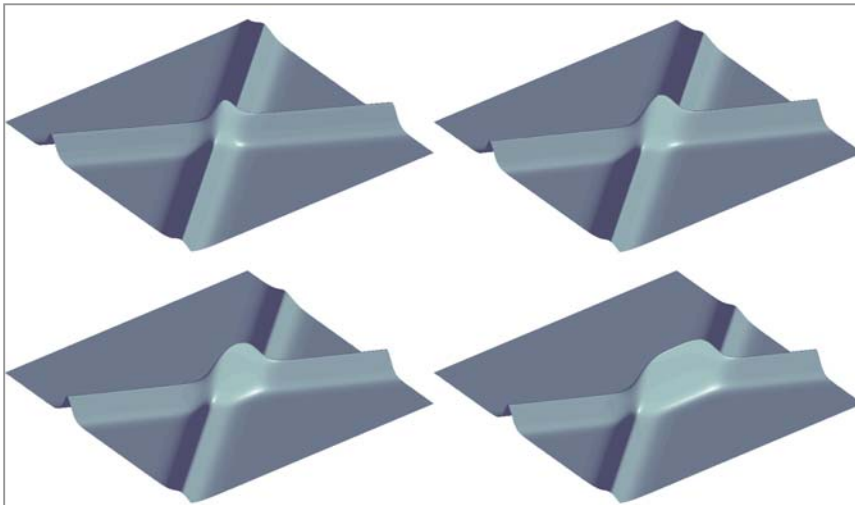
Praeguseks on veendunud, et mõrvarlained on täiesti reaalsed struktuurid. Lõuna-Aafrika lähistel Agulhase hoovuse piirkonnas on tihti kogetud ebanormaalselt kõrgeid ja järsked laineid, mis on lõhkunud hulga laevu [Lavrenov, Porubov, 2006]. Põhjamerel Draupneri naftaplatvormil fikseeriti 1. jaanuaril 1995, vaid mõni kuu pärast Estonia hukkumist, suhteliselt tagasihoidlikus tormis laine, mille hari ulatus merepinnast enam kui 18,5 meetrit kõrgemale. Lainekõrguste klassikalise statistika kohaselt tohiks selliseid laineid esineda vaid kord kümnete tuhandete aastate jooksul [Trulsen, 2007].

Väga kõrgeid laineid võib esineda paljudel põhjustel. Nii hoovused kui ka ebatasane merepõhi võivad koondada laineid ühte kohta nii, nagu suurendusklaas koondab päikesekiiri. Lainekõrgus suureneb märgatavalt, kuid lainepikkus ei muutu – seega on lained märksa järsemad. Agulhase hoovus on üks sellistest paikadest. Taoline ala paikneb ka Undva lähistel Saaremaa rannas, Harilaiust

veidi avamere poole [Soomere, 2001a, 2003b]. Lained võivad liituda ka väikeste saarte alltuulepoolisel küljel, kus seetõttu ei maksa tormivarju otsida.

Sageli registreeritakse aga üksikuid väga kõrgeid laineid, mida ei saa põhjustada ei hoovused ega veealused mäed. Möödunud sajandi keskel märgati, et teatava nurga all lainemurdja poole levivate lainete harjad võivad ulatuda märksa kõrgemale laine kahekordsest kõrgusest. Avamerelt saabuvad lained muutuvad madalas vees sarnaselt tsunamile solitonilaadseiks üksikute veevallidena levivateks laineteks. Saabuva ja peegeldunud laine harjad liituvad lainemurdja lähistel üheks tervikuks. Ühise harja kõrgus on enamasti lähedane lainete kõrguste summale. Kui aga laine kõrgus, selle harja ja lainemurdja vaheline nurk ning vee sügavus juhtuvad olema sobivas vahekorras, võib laine kõrgus tõusta neljakordseks.

Taoline mehhanism, mis on sisuliselt Machi peegelduse analoog, võib veepinna kõrgeks kergitada ka ilma peegeldava seinata. Selleks on tarvis kaht kindla nurga all lõikuvat solitoni. Tormisel merel on solitonilaadsed lained üsna haruldased. Nende lõikumine on eriti ebatavaline, kuna suuremad lained levivad enamasti ühes suunas. Selline protsess on võimalik näiteks üsna madalal Põhjamerel, kus võivad päris sageli kohtuda erinevatest suundadest saabuvad mitme meetri kõrgused lained. Nende interaktsioonil tekkivate struktuuride omadused ei erine kuigi palju Draupneri uusaastalaine omadustest [Soomere, Engelbrecht, 2006]. Kui see protsess avaldub Agulhase hoovuse piirkonnas, kujunevad sealsed lained tõelisteks mõrvariteks [vt viidet autorile töös Lavrenov, Porubov, 2006].



Sobiva nurga all lõikuvatest solitonidest võib moodustuda hoopis muus suunas leviv ohtlikult järsk laine.



Madalas vees tuleb solitoni-  
laadseid laineid ja nende lõi-  
kumist ette palju sagedamini  
kui oskame oodata. Tuleb vaid  
õige nurga alt vaadata. Detail  
Lauri Ilisoni fotost Kauksi  
rannas [Soomere, Engelbrecht,  
2006].

Sel moel tekkinud ülikõrgedained võivad olla pika elueaga. Nendega kohtumise tõenäosus on seega märksa suurem kui võiks arvata sobivate parameetritega solitoni-  
laadsete lainete tekkimise sageduse alusel. Muidugi ei lahenda ka see suhteliselt madalas, maksimaalselt saja meetri sügavuses vees toimiv mehhanism lõplikult mõrvarlainete tekkimise ja omaduste küsimusi. Avaookeanis toimuvaid nähtusi sellega selgitada ei saa.

Kõrge laine ei pruugi veel ohtlik olla. Solitonide lõikumisel toimib aga veel üks mehhanism, mis teeb olukorra märksa kardetavamaks. Nimelt surutakse veemägi pikisuunas tugevasti kokku, nii et veepinna maksimaalne kalle on kuni kaheksa korda suurem selle kaldest lõikuvates lainetes [Soomere, Engelbrecht, 2005a]. Kohtumine taolise järsu veevalliga võib lõppeda õnnetult isegi nüüdisaegsetele laevadele. Paljudel juhtudel, eriti siis,

kui lõikuvate lainete kõrgused erinevad märgatavalt, muudavad lainete harjad lõikumiskoha lähistel suunda [Soomere, 2004; Soomere, Engelbrecht, 2005b, 2006]. Väiksemat lainet ei pruugi siis laevalt keegi tähelegi panna, kuid suured lained tulevad äkitselt hoopis teisest suunast. Ootamatu löök laeva külje pihta on aga eriti ohtlik.

Tallinna lähel toimivad suurepäraste solitonide tekitajatena suured kiir-laevad [Soomere jt, 2005]. Liiklus on nii tihe, et laevade tekitatud lainete energia moodustab Tallinna lahe lainete koguenergiast 5–8% ja lainete koguvõimsusest 18–35%

## JALAD JÄISES VEES

Lõpetuseks tuleme veel kord tagasi 2005 jaanuaritormi juurde. Selle kõige vapustavamaks silmaga nähtavaks tulemuseks oli erakordselt kõrge veetaseme praktiliselt kogu Eesti rannikul [Suursaar jt, 2006]. Tavaliselt uputab meri väikest osa Eesti rannikust ning seni on veetaseme rekordid sündinud kas põhja- või läänerrannikul, mitte kunagi aga mõlemas kohas korraga.

Erakordselt kõrge veetaseme tekkimiseks peavad olema kõigepealt täidetud ülalmainitud tingimused kõrgete lainete tekkimiseks, pluss veel mõned nõuded. Tuule suund peab sobima ranna geometriaga, vähemalt sedavõrd, et tuul puhuks merelt maa poole. Lisaks sellele peab tuul olema kas väga ühtlane (sest ka väikese vaheaja puhul vajub tormi poolt üles aetud ajuline lihtsalt lai) või siis olema konkreetse mereala jaoks sobiva mustri (näiteks täpselt sobituma eelmise tormi poolt tekitatud veemasside liikumisega). Teisisõnu, korralik üleujutus saab tekkida ainult siis, kui merel on väga kõrged lained ning rahuldatud veel mõned tingimused. Seda mõttekäiku kinnitab ka statistika: kui alates 1978. aastast on oluline lainekõrgus Läänemerele ületanud 7 meetrit viiel-kuuel korral, siis Pärnus on vesi tõusnud üle kriitilise piiri vaid ühel korral.

Seekordne veetõus kestis Pärnus haruldaselt kaua, ligikaudu 12 tundi. Senised rekordid on sündinud lühiajaliste veetõusudena, mille kestuseks paar-kolm tundi [Suursaar jt, 2003]. Üleujutuse kestus

[Soomere jt, 2003ab]. Märgatava osa sellest moodustavad solitonilaadsed lained. Need on osutunud väga põnevateks mudeliks nii hiidlainete tekkimise analüüsil kui ka tsunami purustusjõu hinnangutes [Didenkulova jt, 2006]. Mittelineaarsete omaduste roll laevalainete summaarses mõjus võib sageli olla märkimisväärne [Soomere jt, 2005] ning nende lõikumisel tekkinud struktuurid võivad teha palju pahandust [Soomere, 2006b]. Nõnda on Tallinna lahe kiir-laevaliikluse analüüsist sündinud palju põnevat avamerel mõjuvate ohtude täpsemaks kirjeldamiseks ja vältimiseks.

on üks kriitilisi faktoreid. Kui Kagu-Aasia tsunamis oli tegemist peaaegu vannisooja veega ja maksimalselt mõnekümne minuti pikkuse veetulvaga, kus peamiseks ohuks rusude vahele jäämine, siis paljude tundide pikkuses hulpimises jaanuarikuuises Läänemere vees, isegi kui see ulatub vaid põlvini, on ellujäämise tõenäosus väga väike.

Vale oleks küsida, kas seda tüüpi ulatuslikud veetõusud Eesti rannikul saavad korduda. Tuleb hoopis küsida, millal ja kui kaugelt tuleb vesi sisemaale järgmises tugevas tormis. Vanajumal oli seekord tegelikult armuline. Kui tuule suund oluks vaid 20 kraadi võrra enam lõuna poole, oleks veetaseme Pärnus tõenäoliselt jõudnud 3 meetrini [Suursaar jt, 2006]. Tuul oli Liivi lähel juba natuke nõrgenenud võrreldes Läänemere avaosaga. See võinuks olla ka paari meetri võrra sekundis tugevam. Iga meeter sekundis annab hinnanguliselt 27–30 cm Pärnu veetasemele juurde [Suursaar jt, 2003].

Tuule suuna muutumise ja tugevnemise korral jõudnuksid Pärnu lahte märksa kõrgemad lained, mis omakorda oleks veetõusu vähemalt kümme-kond sentimeetrit panustanud. Kui Pärnu lahes on veetaseme ligi 3 m üle tavalise, saavad seal esineda märksa kõrgemad lained kui tavalistes tormides. Pisemaid põhjusi veetaseme tõusuks on veelgi, nii et praegustes klimatoloogilistes tingimustes tuleb lugeda veetaseme tõusu tehnilise maksimumi ligikaudseks hinnanguks Pärnus Gudruni-taoliste tormide puhul neli meetrit (Horisont, 2005, nr 3).

Ekstreemsete tormide puhul on sageli tegemist sündmustega, mis pole meie mäletamist mööda varem aset leidnud. See aga ei tähenda, et neid ei võiks juba järgmisel tormisel ajal tulla. Gudruni puhul näitasid mudelid juba kaks ja pool päeva varem, et lainekõrgus Läänemeresel saab tõenäoliselt olema kõrgem kõigi aegade mõõdetud maksimumist. Aega ettevalmistusteks, erinevalt Kagu-Aasia tsunamist, oli seega piisavalt. Nende kahe sündmuse võrdlus näitab hämmastavalt palju sarnaseid jooni. Eelmised analoogilised sündmused (Tšiili tsunami 1960, Pärnu üleujutus 1967) leidsid aset ligikaudu 40 aasta eest.

## VIITED

Broman, B., Hammarklint, T., Rannat, K., Soomere, T., Valdmann, A. 2006. Trends and extremes of wave fields in the north-eastern part of the Baltic Proper. *Oceanologia*, 48, S, 165–184.

Didenkulova, I., Slunyaev, A., Pelinovsky, E., Kharif, Ch. 2007. Freak waves in 2005. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (submitted).

Didenkulova, I.I., Zahibo, N., Kurkin, A., Levin, B., Pelinovsky, E., Soomere, T. 2006. Runup of nonlinear deformed waves on a beach. *Doklady Earth Sciences*, 411, 8, 1241-1243.

Eberhards, G., Saltupe, B. 2006. Hurricane Erwin 2005 coastal erosion in the Gulf of Riga. *The Baltic Sea Geology, The 9th Marine Geological Conference, August 27 – September 3, 2006, Jūrmala, Latvia. Riga*, 19-21.

Elken, J., Kask, J., Kõuts, T., Liiv, U., Perens, R., Soomere, T. 2001. Hydrodynamical and geological investigations of possible deep harbour sites in north-western Saaremaa Island: Overview and conclusions. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 7, 2, 85-98.

Elken, J., Raudsepp, U., Soomere, T. 2002. On the current- and wave-induced sediment redistribution patterns in the Gulf of Riga. *Terra Nostra*, 4, 401-406.

Mõlema puhul oli tegemist paljude haruldaste omaduste kombinatsiooniga. Mõlemad olid omaaoliste seas pealtnäha teisejärguliste füüsikaliste parameetrite osas (sirge lainehari tsunamil, ebataoline tuule suund ja muster Läänemeresel) teatavas mõttes unikaalsed. Mõlema puhul leiti hiljem, et vastav hoiatussüsteem pidanuks eksisteerima või olema palju efektiivsem. Mõlemas piirkonnas on deklareeritud, et hoiatus- või prognoosisüsteemid luuakse. Hea sõnum on aga see, et kaasageds mudelid on suutelised mere reaktsiooni siinkandi ekstreemsetele tormidele päris adekvaatselt ette nägema [Soomere jt, 2006a].

Erm, A., Soomere, T. 2004. Influence of fast ship waves on the optical properties of sea water in Tallinn Bay, Baltic Sea. *Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol.*, 53, 3, 161-178.

Erm, A., Soomere, T. 2006. The impact of fast ferry traffic on underwater optics and sediment resuspension. *Oceanologia* 48, S, 283-301.

Kahma, K., Pettersson, H., Tuomi, L. 2003. Scatter diagram wave statistics from the northern Baltic Sea. *MERI – Report Series of the Finnish Institute of Marine Research*, 49, 15-32.

Keevallik, S. 2003a. Tallinna lahe tuuled. *Publications Institutii Geographici Universitatis Tartuensis*, 93, 217-226.

Keevallik, S. 2003b. Possibilities of reconstruction of the wind regime over Tallinn Bay. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 9, 3, 209-219.

Lavrenov, I.V., Porubov, A.V. 2006. Three reasons for freak wave generation in the non-uniform current. *Eur. J. Mech. B Fluids*, 25, 574-585.

Liiv, T., Liiv, U. 2001. Saaremaa deep harbour layout design and computer simulation of the wave climate and sediment transport. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 7, 2, 174-192

- Orlenko, L.R. (ed.). 1984. [Studies of the hydro-meteorological regime of Tallinn Bay]. *Gidrometeoizdat*, Leningrad, (vene keeles).
- Peterson, P., Soomere, T., Engelbrecht, J., van Groesen, E. 2003. Interaction soliton as a possible model for extreme waves in shallow water. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 10, 6, 503-510.
- Pettersson, H. 2001. Aaltohavaintoja Suomenlahdelta. Suuntamittauksia 1990-1994. Directional wave statistics from the Gulf of Finland 1990-1994. MERI – Report Series of the Finnish Institute of Marine Research, 44, 37 pp., (soome ja inglise keeles).
- Pettersson, H., Boman, H. 2002. High waves and sea level during the November storm. Annual report 2001, Finnish Institute of Marine Research, Helsinki, 7.
- Rzheplinsky, G.V., Brekhovskikh, Yu.P. (eds.). 1967. [Soome lahe laineatlas]. *Gidrometeoizdat*, Leningrad, (vene keeles).
- Soomere, T. 2001a. Wave regimes and anomalies off north-western Saaremaa Island. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 7, 2, 157–173.
- Soomere, T. 2001b. Extreme wind speeds and spatially uniform wind events in the Baltic Proper. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 7, 3, 195–211.
- Soomere, T. 2003a. Tallinna lahe loodusliku lainetuse režiimist. *Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis*, 93, 227–241.
- Soomere, T. 2003b. Anisotropy of wind and wave regimes in the Baltic Proper. *J. Sea Res.*, 49, 4, 305-316.
- Soomere, T. 2004. Interaction of Kadomtsev-Petviashvili solitons with unequal amplitudes. *Phys. Lett. A*, 332, 1-2, 74-81.
- Soomere, T. 2005a. Wind wave statistics in Tallinn Bay. *Boreal Env. Res.*, 10, 2, 103-118.
- Soomere, T. 2005b. Estonia got storm warning from newspaper. *Scandinavian Shipping Gazette*, 4, 26-29.
- Soomere, T. 2005c. Fast ferry traffic as a qualitatively new forcing factor of environmental processes in non-tidal sea areas: a case study in Tallinn Bay, Baltic Sea. *Envir. Fluid Mech.*, 5, 4, 293-323.
- Soomere, T. 2006a. Unikaalsed lainetuse tingimused Läänemeres 2005. a. jaanuaris. *Publicationes Geophysicales Universitatis Tartuensis*, 50, 215-224.
- Soomere, T. 2006b. Nonlinear ship wake waves as a model of rogue waves and a source of danger to the coastal environment: a review. *Oceanologia*, 48, S, 185-202.
- Soomere, T., Behrens, A., Tuomi, L., Nielsen, J. W. 2006a. Wave conditions in the Baltic Proper and in the Gulf of Finland during windstorm Erwin/Gudrun. *Geophys. Res. Abstr.*, 8, Paper 02851.
- Soomere, T., Elken, J., Kask, J., Keevallik, S., Kõuts, T., Metsaveer, J., Peterson, P. 2003a. Fast ferries as a new key forcing factor in Tallinn Bay. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 9, 3, 220-242.
- Soomere, T., Engelbrecht, J. 2005a. Extreme elevations and slopes of interacting solitons in shallow water. *Wave Motion*, 41, 2, 179-192.
- Soomere, T., Engelbrecht, J. 2005b. Extreme elevations and slopes of interacting Kadomtsev-Petviashvili solitons in shallow water, in *Rogue Waves 2004*. Olagnon, M., Prevosto, M. (eds.). *Proc. of a workshop organized by IFREMER and held in Brest, France, 20-22 October 2004 within the SeaTechWeek 2004, IFREMER actes de colloques*, 39, Brest, 92-101.
- Soomere, T., Engelbrecht, J. 2006. Weakly two-dimensional interaction of solitons in shallow water. *European J. Mech. B Fluids*, 25, 5, 636-648.
- Soomere, T., Kask, J. 2003. A specific impact of waves of fast ferries on sediment transport processes of Tallinn Bay. *Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol.*, 52, 3, 319–331.

- Soomere, T., Kask, A., Kask, J. 2006b. Modelling of sand transport at Pirita beach and formulation of principles of beach nourishment. The Baltic Sea Geology, The Ninth Marine Geological Conference, August 27 – September 3, 2006, Jūrmala, Latvia. Riga, 93-95.
- Soomere, T., Keevallik, S. 2001. Anisotropy of moderate and strong winds in the Baltic Proper. Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., 7, 1, 35-49.
- Soomere, T., Keevallik, S. 2003. Directional and extreme wind properties in the Gulf of Finland. Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., 9, 2, 73-90.
- Soomere, T., Pöder, R., Rannat, K., Kask, A. 2005. Profiles of waves from high-speed ferries in the coastal area. Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., 11, 3, 245-260.
- Soomere, T., Rannat, K. 2003. An experimental study of wind waves and ship wakes in Tallinn Bay. Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., 9, 3, 157-184.
- Soomere, T., Rannat, K., Elken, J., Myrberg, K. 2003b. Natural and anthropogenic wave forcing in the Tallinn Bay, Baltic Sea. Brebbia, C. A., Almorza, D., López-Aguayo. (eds.). Coastal Engineering VI, WIT Press, Southampton, Boston, 273-282.
- Suursaar, Ü., Kullas, T., Otsmann, M., Kõuts, T. 2003. Extreme sea level events in the coastal waters of western Estonia. J. Sea Res., 49, 4, 295-303.
- Suursaar, Ü., Kullas, T., Otsmann, M., Saaremäe, I., Kuik, J., Merilain M. 2006. Hurricane Gudrun and modelling its hydrodynamic consequences in the Estonian coastal waters. Boreal Env. Res., 11, 143-159.
- Trulsen, K. 2007. Weakly nonlinear sea surface waves – freak waves and deterministic forecasting. Springer series in industrial mathematics, (in press).
- Wang, D. W., Mitchell, D. A., Teague, W. J., Jarosz, E., Hulbert, M. S. 2005. Extreme waves under hurricane Ivan. Science, 309, 896.

## AUTORITEST JA KAASAUTORITEST

Leo AINOLA (1929)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli tööstus- ja tsiviilehituse erialal 1953. Füüsika-matemaatikakandidaat 1957, füüsika-matemaatikadoktor 1968. Professor 1971. Tallinna Tehnikaülikooli emeriitprofessor, TTÜ küberneetika instituudi vanemteadur.

Arkadi BEREZOVSKI (1948)

on lõpetanud Novosibirski Riikliku Ülikooli mehaanika erialal 1971. Füüsika-matemaatikakandidaat 1978. Tallinna Tehnikaülikooli küberneetika instituudi vanemteadur.

Martin EERME (1968)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli masinaehitusinsenerina 1993. Tehnikadoktor 2001. Tallinna Tehnikaülikooli raalintegreeritud tootmise ja projekteerimise professor.

Jüri ENGELBRECHT (1939)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli tööstus- ja tsiviilehituse erialal 1962. Tehnikakandidaat 1968, füüsika-matemaatikadoktor 1982. Professor 1984. Eesti TA akadeemik 1990. Eesti Teaduste Akadeemia asepresident. Tallinna Tehnikaülikooli rakendusmehaanika professor, küberneetika instituudi mehaanika ja rakendusmatemaatika osakonna juhataja.

Ivo FRIDOLIN (1971)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli raadiotehnika erialal 1995. Tehnikateaduste doktor 2003. Tallinna Tehnikaülikooli meditsiinifüüsika professor, Tehnomeedikumi biomeditsiinitehnika keskuse meditsiinifüüsika õppetooli juhataja.

Hiie HINRIKUS (1934)

on lõpetanud Moskva Riikliku Ülikooli füüsika erialal 1960. Tehnikakandidaat 1967, tehnikateaduste doktor 1989. Professor 1991. Tallinna Tehnikaülikooli emeriitprofessor. Tallinna Tehnikaülikooli Tehnomeedikumi biomeditsiinitehnika keskuse erakorraline vanemteadur.

Alar JÄNES (1964)

on lõpetanud Tartu Ülikooli keemia erialal 1989. Filosoofiadoktor (füüsikaline keemia ja elektrokeemia) 1998. Tartu Ülikooli füüsikalise keemia instituudi vanemteadur.

Kristo KARJUST (1979)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli tööstuse tehnika ja juhtimise magistratuuri 2004. Tallinna Tehnikaülikooli masinaehituse doktorant, tootmistehnika õppetooli assistent.

Ülo KASK (1952)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli soojusenergeetika erialal 1975. Tehnikateaduste magister 2001. Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituudi teadur.

Ilmar KINK (1970)

on lõpetanud Tartu Ülikooli füüsika erialal 1992. Füüsikamagister 1994, füüsikadoktor 1999 (Lundi Ülikool). Tartu Ülikooli füüsika instituudi vanemteadur, Eesti Nanotehnoloogiate Arenduskeskuse juhatuse liige.

Tiit KOPPEL (1945)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli ehitusinsenerina 1969. Tehnikakandidaat 1975. Tallinna Tehnikaülikooli hüdro- ja aeromehaanika professor, mehaanikainstituudi direktor.

Malle KRUNKS (1949)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli keemiateaduskonna elektroonika erimaterjalide tehnoloogia erialal 1972. Keemiakandidaat 1985. Eesti TA uurija-professor Tallinna Tehnikaülikoolis alates 2005.

Valdek KULBACH (1927)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli tööstus- ja tsiviilehituse erialal 1951. Tehnikakandidaat 1955, tehnikadoktor 1973. Professor 1973. Eesti TA akadeemik 1986. Tallinna Tehnikaülikooli emeritprofessor.

Priit KULU (1945)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli masinaehituse erialal 1968. Tehnikakandidaat 1972, tehnikadoktor 1989. Tallinna Tehnikaülikooli metalliõpetuse professor, mehaanikateaduskonna dekaan.

Rein KÜTTNER (1940)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli masinaehituse tehnoloogia erialal 1965. Tehnikakandidaat 1971. Eesti TA akadeemik 1997. Eesti TA Informaatika ja Tehnikateaduste Osakonna juhataja, Tallinna Tehnikaülikooli tootmistehnika professor.

Jaanus LASS (1971)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli raadiotehnika erialal 1994. Tehnikateaduste magister 1996, loodusteaduste doktor 2002. Tallinna Tehnikaülikooli Tehnomeedikumi biomeditsiinitehnika keskuse vanemteadur.

Ülo LEPIK (1921)

on lõpetanud Tartu Ülikooli füüsika erialal 1948. Füüsika-matemaatikakandidaat 1952, füüsika-matemaatikadoktor 1958. Professor 1959. Eesti TA akadeemik 1993. Tartu Ülikooli emeritprofessor.

Jüri LOOSAAR (1948)

on lõpetanud Tartu Ülikooli pooljuhtide füüsika erialal 1971. Tehnikakandidaat 1987. Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituudi direktori abi.

Enn LUST (1956)

on lõpetanud Tartu Ülikooli keemia erialal 1980. Keemiakandidaat (elektrokeemia) 1989. Tartu Ülikooli füüsikalise keemia professor, füüsikalise keemia instituudi juhataja.

Ants LÕHMUS (1944)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli elektroonika erimaterjalide erialal 1969. Füüsika-matemaatika-kandidaat 1981. Tartu Ülikooli füüsika instituudi madalate temperatuuride laboratooriumi juhataja.



Jüri MAJAK (1961)

on lõpetanud Tartu Ülikooli rakendusmatemaatika erialal 1984. Matemaatikadoktor 1993. Tallinna Tehnikaülikooli masinaehituse instituudi vanemteadur.

Kalju MEIGAS (1951)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli raadiotehnika erialal 1974. Tehnikateaduste magister 1993, tehnikateaduste doktor 1997. Tallinna Tehnikaülikooli biomeditsiinitehnika professor, Tehnomeedikumi direktor.

Merik MERISTE (1959)

on lõpetanud Tartu Ülikooli rakendusmatemaatika erialal 1973. Tehnikakandidaat 1984. Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudi vanemteadur.

Leo MÕTUS (1941)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli automaatika ja telemehaanika erialal 1965. Tehnikakandidaat 1973, tehnikadoktor 1990. Eesti TA akadeemik 1993. Eesti Teaduste Akadeemia peasekretär, Tallinna Tehnikaülikooli reaalaja süsteemide professor.

Maaris NUUTRE (1952)

on lõpetanud Tartu Ülikooli keemia erialal 1974. Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituudi insener.

Arvo OTS (1931)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli soojusenergeetika erialal 1955. Tehnikakandidaat 1958, tehnikadoktor 1968. Professor 1969. Eesti TA akadeemik 1983. Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituudi vanemteadur.

Aadu PAIST (1947)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli soojusenergeetika erialal 1971. Tehnikakandidaat 1981. Tallinna Tehnikaülikooli soojusenergeetika professor, soojustehnika instituudi direktor.

Teet PARVE (1969)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli soojusenergeetika erialal 1993. Tehnikateaduste magister 2000. Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituudi teadur.

Indrek PERTMANN (1978)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli soojusenergeetika erialal 2002. Tehnikateaduste magister 2004 Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituudi teadur.

Meelis POHLAK (1975)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli tootmistehnika erialal 2000. Tallinna Tehnikaülikooli masinaehituse instituudi teadur.

Galina RANG (1953)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli elektroonika erimaterjalide tehnoloogia erialal 1976. Tallinna Tehnikaülikooli elektroonikainstituudi vaneminsener.

Toomas RANG (1951)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli elektroonika erialal 1975. Tehnikakandidaat (PhD) (Ungari Teaduste Akadeemia) 1981. Tallinna Tehnikaülikooli elektroonikadisaini professor, elektroonikainstituudi direktor, infotehnoloogia teaduskonna teadusprodekaan.

Valter REEDO (1980)

on lõpetanud Tartu Ülikooli orgaanilise keemia erialal 2004. Tartu Ülikooli orgaanilise keemia doktorant.

Kristjan SAAL (1977)

on lõpetanud Tartu Ülikooli bioorgaanilise keemia erialal 2000. Keemiamagister 2002, keemiadoktor 2006. Tartu Ülikooli füüsika instituudi teadur.

Andrus SALUPERE (1957)

on lõpetanud Tartu Ülikooli rakendusmatemaatika erialal 1981. Füüsika-matemaatikakandidaat 1991. Tallinna Tehnikaülikooli deformeeruva keha mehaanika professor, küberneetika instituudi vanemteadur.

Tarmo SOOMERE (1957)

on lõpetanud Moskva Riikliku Ülikooli matemaatika erialal 1980. Füüsika-matemaatikakandidaat 1984, matemaatikadoktor 1992. Tallinna Tehnikaülikooli rannikutehnika professor, küberneetika instituudi vanemteadur.

Tanel TÄTTE (1978)

on lõpetanud Tartu Ülikooli orgaanilise keemia erialal 2000. Keemiamagister 2002, keemiadoktor 2006. Tartu Ülikooli füüsika instituudi teadur.

Anatoli VASSILJEV (1946)

on lõpetanud Voroneži Ülikooli insener-hüdroloogina 1969. Geograafiakandidaat 1978. Tallinna Tehnikaülikooli mehaanikainstituudi vanemteadur.

Ants VESKI (1939)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli soojusenergeetika erialal 1963. Tehnikakandidaat 1973. Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituudi vanemteadur.

Sarjast TEADUSMÕTE EESTIS on ilmunud

2002	TEHNIKATEADUSED
2005	ARSTITEADUS
2006	TÄPPISTEADUSED