

TEADUSMÕTE
KÜBERNEETIKA
INSTITUUDIS

Esimene september on traditsiooniline päev, millal algab noore inimese koolitee. Esimesel septembril viiskümmend aastat tagasi algas Küber-needika Instituudi tee teaduse maailma.

Kasvades ja arenedes, uusi teadmisi ja kogemusi omandades, on Instituut jõudnud hinnatavale kohale Eesti teadusasutuste hulgas. Instituudi teadustulemused ja uurimistööde rakendused on tuntud lähedal ja kaugel, loomulikult ka väljaspool Eestit.

Nende kaante vahele mahub

- pilk Instituudi teadussuundade arenguloole koos kronoloogiaga,
- valik Instituudi teadlaste mõtteid ja arvamusi aegade jooksul avaldatud intervjuudest ning
- Eesti Vabariigi teaduspreemia laureaate ülevaateid oma tööst.

Raamatu avaldamist toetas Tallinna Tehnikaülikool

Raamatu koostajad:

Jüri Engelbrecht (vastutav toimetaja)

Mati Kutser (koostaja)

Galina Varlamova (tehniline toimetaja)

ISBN 978-9949-430-38-3

2010



Täna on meie koduks maja Akadeemia teel
ja koduleheks <http://www.ioc.ee>

SISUKORD

SAATEKS

Andrus Salupere	6
-----------------	---

INSTITUUT JA TEMA LUGU

Teadusmõttest Küberneetika Instituudis	
Jüri Engelbrecht	11
Küberneetika Instituut läbi aegade	
Mati Kutser	17
Kui küberi maja taga mõrgasid lövid.	
Mälestusi inimolendite inimlikust kasutamisest	
Tiit Kändler	41

MILLEST MÕTLEVAD TEADLASED

Kolme mehe kõnelused	49
Miks ma mõtlen nii, nagu ma mõtlen?	55
Üks eliitühmast	65
Mees nagu mitme tundmatuga võrrand	76
Arvutamine on loodusteadus	86
Et klaas ei puruneks	91

TEADUSPREEMIADE LOOD

2003. aasta teaduspreemia tehnikateaduste alal töö	
“Eesti keele tekst-kõne süntees” eest	103
2004. aasta teaduspreemia tehnikateaduste alal töö	
“Faasisiirdefrondid martensitsetes tahkistes” eest	110
2008. aasta teaduspreemia geo- ja bioteaduste alal tööde tsükli	
“Molekulaarne süsteemne bioenergeetika” eest	120
2009. a teaduspreemia innovaatilise tooteni viinud väljapaistva	
teadus- ja arendustöö “Integraalse fotoelastsusmeetodi teooria,	
mõõtmistehnoloogia ja aparatuuri väljatöötamine ja rakendamine	
jääkpingete mõõtmisel klaasitööstuses” eest	131

MILLEGA TEGELEVAD TEADLASED

Puust tulbid, muusikamatemaatika ja allveelaevad	151
Õlireostuse mustrid kujunevad seaduspäraselt	154
Füüsika püüab hõlmata juhusliku turu käitumist	156
Suuri hüppeid põhjustavad pisikesed muutused	159
Süsteemne lähenemine aitab mõista ka inimese südant	164

TÖÖTAJAD	169
----------	-----

SAATEKS

Küberneetika Instituut (Kübl) alustas tegevust 1. septembril 1960. aastal. Ku-na käes on 2010. aasta, siis on 1. septembril põhjust tähistada viiekümnendat sünnipäeva. Eesti mastaabis on viiskümmend aastat ühe teadusasutuse kohta väga soliidne iga. Sellisesse ikka jõudmine näitab, et instituut on olnud jätku-sutliik väga erinevates ühiskondlikes oludes.

Millised me siis juubeliaasta kevadel välja näeme? Kes meil töötavad? Milline on instituudi struktuur? Mida meie inimesed uurivad? Millised on olnud olulise-mad muutused viimasel kümnendil? Kuhu me liigume?

2010. aasta 1. mai seisuga töötab instituudis 110 inimest, kellest mehi on 69 ja naisi 41. Doktorikraadiga töotajaid on 50, kellest 5 on nn. VAK-i doktorid (DSc). Ülejäänud 45 omavad filosoofiadoktori (PhD) või omaaegse N. Liidu teaduste kandidaadi kraadi omal erialal. Instituudi perre kuulub 4 Eesti Tea-duste Akadeemia akadeemikut – Hillar Aben, Enn Tõugu, Jüri Engelbrecht ja Tarmo Soomere. Praegustest töotajatest on akadeemik Hillar Aben ainuke ini-mene, kes on instituudis töötanud selle asutamisest alates. Instituudi noorim töotaja on pisut vanem kui 20 aastat ja vanim pisut vanem kui 80. Välismaa-lasi on töotajate hulgas 15.

Ametliku struktuuri järgi koosneb instituut kolmest akadeemilisest osakonnast (koos laboritega), administratsioonist ja infoteenistusest. Akadeemilised osa-konnad on mehaanika ja rakendusmatemaatika, juhtimissüsteemide ning tark-vara osakonnad. Mehaanika ja rakendusmatemaatika osakonna all tegutsevad fotoelastsuse, süsteemibioloogia ja lainetuse dünaamika laboratooriumid ning juhtimissüsteemide osakonna all foneetika ja kõnetehnoloogia laboratoorium. Infoteenistus hõlmab raamatukogu ja arvutivõrgu administraatoreid.

Tegelik elu on natuke mitmekesisem ja läbipõimunum. Lisaks osakondadele tegutseb instituudi baasil kaks keskust: Eesti arvutiteaduse tippkeskus (EXCS) ja mittelineaarsete protsesside analüüsi keskus (CENS). EXCS on valitud Eesti teaduse tippkeskuste hulka aastaiks 2008–2015 ja ühendab endasse lisaks Kübl tarkvara osakonnale ning foneetika ja kõnetehnoloogia laboratooriumile veel töörühmi AS Cybernetica'st ja Tartu Ülikooli arvutiteaduse instituudist. CENS ühendab endasse suurema osa Kübl mehaanika ja rakendusmehaanika osakonnast ning juhtimissüsteemide osakonnast ja TTÜ automaatikainstituudi proaktiivtehnoloogiate teaduslaboratooriumi. CENS oli üks Eesti teaduse tipp-keskustest aastail 2002–2007 ja on hetkel üks kolmest TTÜ teaduse tippkes-kusest. Aastail 2002–2007 tegutses Kübl koordineerimisel veel teinegi Eesti teaduse tippkeskus: Töökindlate Arvutisüsteemide Uurimise Keskus (CDC). Praegune tippkeskus EXCS on moodustatud CDC tulemuste ja kogemuste baasilt.

Kübl on juhtiv instituut Eestis matemaatika rakenduste valdkonnas, mille uurimistemaatika on väga lai. Vastavalt Kübl teadusnõukogus 27. märtsil 2008 kinnitatud arengukavale aastateks 2008–2012 on instituudi uurimistöö sisuks matemaatiliste struktuuride, meetodite ja mudelite edasiarendamine ja kasutamine erinevates teadusvaldkondades, sealhulgas arvutiteaduses, automaatsuhtimises, informaatikas, keeletehnoloogias, matemaatikas, mehaanikas, rannikutehnikas ja süsteemibioloogias. Kui siia kõrvale seada erinevatest allikatest pärit küberneetika definitsioone (nende otsimise ja leidmise rõõmu jätan lugejale), siis tuleb pidada igati asjakohaseks, et Küberneetika Instituut ühendab endasse väga erinevates teadusvaldkondades teostatavaid uuringuid. Kasutades tänapäevast terminoloogiat, on suur osa uuringutest seotud kompleksüsteemidega.

Viimase kümnendi olulisemad struktuurimuutused on seotud lainetuse dünaamika laboratooriumi ja süsteemibioloogia laboratooriumi moodustamisega mehaanika ja rakendusmatemaatika osakonda. Mitte ükski asutus ei saa eksisteerida ilma rahata. Kuni 2009. aasta majandussurutise alguseni võis öelda, et rahastamine Eesti riigieelarvest (siht-, baas- ja infrastruktuuri finantseerimine, ETF grandid, teaduse tippkeskused) kasvas aeglaselt kuid pidevalt, mõningaid jõnkse põhjustasid vaid erinevad infrastruktuuri programmid. Selle kõrval on aasta-aastalt järjest suuremat rolli omandamas Euroopa Liidu ja muud rahvusvahelised rahastamisallikad. Näiteks EL raamprogrammide projektid (sh Marie Curie tegevused), *Wellcome Trust International Senior Research Fellowship* jne.

Mida toob tulevik? On üldteada, et ennustamine (ja eriti just tuleviku ennustamine) on väga keeruline ja tihti tänamatu tegevus. Ometi püütakse tähtpäevade puhul peaaegu alati teha plaane tulevikuks. Arvestades instituudi praegust isikkoosseisu, kus umbes pooled töötajatest on nooremad kui 35 aastat, publikatsioonide arvu kasvu, uute teaduslaboratooriumite teket ning samuti rahastamise dünaamikat viimastel aastatel, julgen öelda, et instituut astub julgel sammul uude aastakümnesse.

Andrus Salupere

INSTITUUT
JA
TEMA LUGU

Küberneetika

Küberneetika Instituut asutati aastal 1960, seega 50-aasta eest. Instituudi lugu on mitte ainult ühe teadusinstituudi lugu, see on lugu uutest teadussuundadest, teadusmõtte arengust, mida ei saanud takistada ka omaaegne totalitaarne süsteem ja eelkõige lugu inimestest, kes asutasid Instituudi, kes teostasid end Instituudi seinte vahel, kes õppisid Instituudi toel ja kes töötavad täna Instituudis. See peatükk räägibki teadusmõttest ja Instituudist läbi aegade. Kronoloogia on kindlasti vajalik osa ajaloos, kuid teadupärast veidi kuiv, seetõttu viimase osana selles peatükis võrstsitavad seda ka mälestused Instituudi algusaastatest.

Instituut 50

Kõik siin maailmas on suhteline. Inimese elus on 50 aastat pikk aeg, evolutsiooni vaatevinklist aga üpris lühike. Kuidas aga ajaga ringi käia teaduse arengu seisukohalt, on omaette küsimus. Mõnikord paneb paradigma muutus, nagu ütleb Thomas Kuhn, teadusmõtte uutele radadele vaata et üleöö, teinekord läheb hulk aega enne kui detailidest vormub uus teadmine. Nii või teisiti, 1.septembril 2010 aastal sai Küberneetika Instituut 50 aastat vanaks (või nooreks). Jätan siit meelega ära kuuluvuse suuremasse kooslusesse, mis aegade jooksul muutunud on – aastapäeva mõtiskluses on just juubilar tähelepanu fookuses.

Tänapäeval on mõistete selgitamiseks võimalus guugeldada. Tegin nii ka mina, sisestasin arvutisse sõna "teadusmõte" ning esimesed leheküljed eesti-keelses otsingumootoris andsid teavet sarjast "Teadusmõte Eestis", mille ma ise Eesti Teaduste Akadeemia nn "siniste raamatute" seeriana käivitasin. Täna naseks on ilmunud viis köidet ja hoolimata üldsuunitlusest, on kõigis neis juttu ka teadusmõttest Küberneetika Instituudis. Kui tehnika- ja täppisteaduste köidetes on see loomulik, siis arstiteaduse puhul on juttu ka rakuenergeetikast ja humanitaarias – kõnesünteesist. Lisaks on sinises sarjas ilmunud veel üks raamat – "Noored teadused" ja selles on samuti juttu nii arvutiteadusest kui ka biofüüsikast. Siit järeldeb, et teadusmõte Küberneetika Instituudis paistab silma. Aastapäeva puhul tuleks aga pilk pöörata tagasi ja küsida, kuidas asjad alguse said ja miks võime uhked olla nii sellele, mis omal ajal tehti ja sellele, mida tehakse täna.

Küberneetika Instituudi 40.aastapäeva puhul (2000. a) ilmus raamat "Küberneetika Instituut mööduvas ajas", kus kirjas nii kronoloogia kui ka mälestused ja ettevaated. Meie 50. aastapäeva tähistava raamatu kaante vahel on samuti üks kokkuvõte, mis loeb üles saavutusi ja olulisi tegijaid, nüüd juba kümme aastat pikemas ajavahemikus (vt M. Kutseri ülevaade). Seetõttu pole siin vajadust peatuda detailidel ega tunda muret, kas ikka kõigest ja kõigist juttu on tehtud, vaid mõtiskleda üldistel teaduse arengu radadel, otsida neid muutusi, mis tehti aastate eest ja mille viljad nüüd küpsed on ja uusi võrseid järjest tärkamas.

Küberneetika Instituudi tekkeloos mängisid olulist osa kaks meest – vastuoluline Gustav Naan, kel meeldis teatud piirides võimu üle mängida ja kes leidis 1960. a õige mooduse saada Moskvast vajalikud allkirjad ja sirge seljaga Nikolai Alumäe, kes oskas vaadata kaugemale kui teised. Puht kõrvalepõikena – kujutage ette, et tahate uut instituuti luua täna ja mõtelge, mida selleks on vaja teha. Kui keegi näeb selles küsimuses nutmist vanade aegade järgi, siis on see sügav eksimus. Lihtsalt aeg oli selline.

Nikolai Alumäe kujundas Küberneetika Instituudi vundamenti ja ladus esimesed kivid ehitisse, mis vaatamata muutustele ja ümberehitustele on põhiasas püsinud 50 aastat. Tema sihiseadmise ja töötahe nakatasid kõiki, kes algusaastail Küberneetika Instituudis töötasid, suur enamus olid neist noored inimesed. Eks mitmed tollased kolleegid pole enam meiega, kuid paljud mäletavad veel neid algusaegu, tahtmist midagi ära teha, olgu selleks kuulus M-3 – esimene Eesti elektronarvuti – või juhtimisprotsesside automatiseerimine, või programmeerimine, mis 50 aastat tagasi kõlas peaaegu nagu geenitehnoloogia täna – uudne ja piiramatute võimalustega. Ja mehaanikasektoris olid probleemid koorikute teooria keeruliste võrrandite lahendamisel. Instituudi aknad olid hilisööni valgled. Nikolai Alumäe tavatses öelda, et see ongi eduka teadustöö tunnus. Mul tuleb see ütlus alati meelde, kui praegugi hilisel tunnil Instituudist lahkudes näen valgustatud aknaid.

Mis pani neil möödunud sajandi kuuekümnendatel aastatel helged pead tegelema probleemidega, mis jätkusuutlikutena teadusarengu sisemiste seaduspärasuste kaudu on toonud meid tänaste uuringuteni? Kuidas on operatsiooni-analüüs, dialoogsüsteemid, tehisintellekt jm suunad transformeerunud arvutiteaduseks ja teiselt poolt süsteemtarkvara ja instrumentaaltarkvara arenenud tänaasteks rakendusteks? Ja kuidas on mittelineaarne koorikute teooria, see Nikolai Alumäe meelisteema arenenud kompleksüsteemide analüüsiks nii tahkistes kui ka vees, nii pehmistes kui ka biofüüsikas? Ja kuidas on membraanpingete eksperimentaalne määramine koorikutes viinud tensorvälja tomograafiani? Ning protsessijuhtimissüsteemide analüüs ja projekteerimine on tänapäevaks arenenud proaktiivseteks süsteemideks, kus põhiriõhk situatsiooni-teadlikel arvutusmudelitel lähtudes multiagentsüsteemide paradigmat. Võime arutada nii ja teisiti, küll ühiskonna arengutendentse jälgides või üldist teadmiste arengut silmas pidades, kuid unustada ei saa inimvaimu loovat poolt.

Kindel on see, et Küberneetika Instituudi algaastatel loodi atmosfäär teadusmõtte vabaks arenguks hoolimata sügavast nõukogude ajast. Jah, piirid olid suletud, kuid nii mõneski teadusvaldkonnas olid kontaktid parimate teadlastega meist ida pool, kes samuti ei hoolinud pealesurutud ideoloogiast. Ja nii kujunesidki arusaamad otsingutes silmitsi uuega. Eks teaduses on ju alati esteetiline nauding tehtust, olgu see siis teooria või töötav seade. Teadagi ei ole teadustöö kella üheksast viieni, see on eluviis. Sildade ehitamine uute teadmiste abil on vist üks tunnusmärke teaduse arengus, ka Isaac Newton oli ju sillaehitaja füüsika ja matemaatika vahel. Aga ega Nikolai Alumäe polnud üks sillaehitaja rollis. Küberneetika Instituudis on olnud tööl palju teadlasi, insenere ja üliõpilasi, läheb pikale kõiki üles lugeda (vt näiteks M. Kutseri ülevaade). Kes on jätnud jälje teadusesse, kes on aga saanud osa suhtumisest teadusesse ja kandnud seda edasi oma hilisemas tegevuses. Kõlab nii üdini positiivselt, et peab paratamatult küsima, kas tagasilööke pole siis olnud? Küllap on, minu jaoks oli kümnekonna aasta eest näiteks kurb tõdeda,

kui ühel evalvatsioonil öeldi ühe töögrupi kohta: "Ilmselt ei lähe kõigi teadurite energia teadustöök". Aga see pole iseloomulik nähtus, vaid ebatüüpiline hälve.

Kui nüüd vaadata Küberneetika Instituudi fenomeni laiemas kontekstis, siis tuleb kohe meelde C. P. Snow kuulunud Rede'i loeng kahest kultuurist, mille ta aastal 1959 Cambridge'is pidas. C. P. Snow rõhutas, et iseloomulikult Briti vaimuilmale on füüsikud (so need, kes tunnevad termodünaamika teist seadust) ja intellektuaalid (kes tunnevad Shakespeare'i) kaks teineteisest kauget kooslust, kes kuidagi ei suhtle ning, veelgi hullem, teineteisest lugu ei pea. See loeng tekitas palju vastukaja – kas ikka tõesti? Isegi aasta eest, loengu 50. aastapäeval, tekkisid uued vaidlused (vt *Nature*, 459, 2009). Tagasi vaadates Küberneetika Instituudi algusaastale, taolist probleemi polnud, sest Nikolai Alumäe isikus ja tema eeskujul ka terves instituudis oli selline vastuolu lihtsalt ebaoluline. Väga paljus oli see ilmselt tingitud Nikolai Alumäe muusikatumundmisest, mis ka teisi haaras. Mäletan, kuidas vedasime sõrmega Šostakoviči 7. sümfoonia partituuri, et jälgida kuulsa trummipõrina järjest tugevnevast jada. Kui nüüd räägin üliõpilastele matemaatilise modelleerimise loengus fraktaalsetest muusikast, siis tulevad aeg-ajalt meelde vestlused Nikolai Alumäega või Boris Tamme klaverimäng. Kahjuks on need muljed vaimujõu ühtsusest ühepoolsed, st füüsikute leerist ja ma ei ole päris kindel, kas ka teine leer on püüdnud aru saada matemaatikast või termodünaamikast. Ja ega laias laastus pole meilgi vastuolud kadunud, alles hiljuti kuulsin, kuidas üks "termodünaamika tundja" väitis, et kuna ühel humanitaaril pole kõrgelt tsiteeritud artikleid rahvusvahelises pressis, siis polevat loomulikult tegemist teadlasega. Küberneetika Instituudi arusaamad sellist suhtumist küll ei luba.

Teiseks võiks peatuda ühiskonna ja teaduse suhtel. Olen siin kasutanud analoogi J. Lotmani järgides, kes uuris märgisüsteemide suhteid rääkija ja kuulaja näitel. Kui ühiskond ja teadlased on kaks hulka, siis jätkusuutlik areng on võimalik vaid juhul, kui hulgad on osaliselt kattuvad. Kui teadlaste hulk on ühiskonnast eraldi, siis on tegemist teadlaste elevandiluuist torniga. Kui teadlaste hulk on kogu ulatuses suurema, st ühiskonna hulga sees, siis täidavad teadlased vaid ühiskonna tellimust. Need mõlemad situatsioonid pole jätkusuutlikud. Osaliselt kattuvad hulgad tähendavad aga seda, et ühelt poolt ühiskond usaldab teadlasi ja annab neile piisavalt vabadust käia tundmatutel radadel, teiselt poolt teadlased kui ühiskonna alamhulk peavad aru saama ühiskonna vajadustest, mis on ju seotud teadlaste vastutusega. Niisiis on teadlastel dualne roll – teha seda mida ühiskond veel ei tea, kuid teadlased peavad vajalikuks ja teha seda, mida ühiskond vajab. Pragmaatikud muidugi esimest rolli ei tunnusta, vaid ütlevad – vaja on teha asju! Neid sõnu on ilmselt paljud kuulnud ka Eesti teaduspoliitikas. Ei tahaks siin seda teemat pikemalt lahata, jutt läheks pikaks. Kuid Küberneetika Instituut on osanud läbi aegade täita seda dualset rolli. Näinud kaugemale ühiskonnast ja osanud leida uut ning teha ka

asju, mida kohe rakendada saab. Teadusmõtte vabadus kütkestab noori inimesi ja see on kestnud juba 50 aastat. Samas on meie teadlased seletanud ühiskonnale, mida Instituudi seinte vahel tehakse. Aga kunagi ei saa olla rahul ja eks seda seletamise rolli tuleks veelgi tõhustada.

Tugevad juured ja sealt tulenev oskus näha maailma tema mitmekesisuses on võimaldanud Küberneetika Instituudil hästi vastu pidada muutuste tuultele. Et eraldus KBFI, oli täiesti loomulik protsess, kuid tuleb rõhutada, et just Küberneetika Instituudi vabas atmosfääris oli tollal võimalik käima lükata täiesti uusi füüsika eksperimente. Loodi EKTA, et rakendused saaksid hoo sisse ja selle baasil on ju tekkinud rida tänaseid edukaid firmasid. Viimane suurem eraldumine oli AS Cybernetica teke, sest osal inimestel oli tahtmine end rohkem pühendada lepingulistele töödele ja otsestele rakendustele. Ma ei ole tuttav rakendustega tegelevate asutuste meelelaadiga, kuid julgen väita, et tänases TTÜ Küberneetika Instituudis on teadustöö väärtustamine sarnane Instituudi algaastate entusiasmile. On välditud aiapidamise mentaliteeti, mille kohaselt asutuse juht lõikab ainuisikuliselt oksa, st otsustab teadusteemade üle. Niisugune naljakas arvamus pärines ühe teadusjuhi suust. Küberneetika Instituut sarnaneb paljus Max Plancki Ühingu instituutidega, sest teadusteemade või laboratooriumide juhid on olulised teadustöö mootorid, keda omakorda veab direktor.

On üks oluline tahk Küberneetika Instituudi tegevuses nii 50 aasta eest kui ka täna – see on noorte inimeste toetamine. Nii oli möödunud sajandi kuuekümnendatel, kui noori inimesi saadeti aspirantuuri (loe: doktorantuuri) Moskvasse, Leningradi, Kiievi, ja Novosibirski. Nüüd on noored inimesed töötamas ja õppimas Pariisis ja Uppsalas, Seattle'is ja Grenoble'is, Oslos ja Berliinis jm. Aga on ka üks oluline erinevus – Küberneetika Instituut on ise samuti muutunud magnetiks, aastal 2009 oli ametliku statistika kohaselt meil tööil inimesi 14lt maalt. Mõned neist on end alaliselt Eestiga sidunud. Teine oluline tahk on tipptaseme rõhutamine. Ega ilmaasjata polnud meil aastatel 2002–2007 kaks Eesti teaduse tippkeskust (kokku oli neid 10) ja praegugi on järgmise programmi kohaselt meil arvutiteaduse tippkeskus.

Kunagi andsin intervjuud ühele Euroopa teaduspoliitika ajakirjale. Mu tees teaduse arendamisest järgis fraktaalsete struktuuride põhimõtteid – keeruline struktuur võib tekkida lihtsate reeglite abil, ainult neid tuleb järjepidevalt rakendada. Ning lihtsateks reegliteks on: esiteks – toeta ekstsellentsust ja teiseks – toeta noori ning mõlemat reeglit tuleb pidevalt kasutada. Küllap tuli see mõte mul alateadlikult järgides Küberneetika Instituudi tavasid.

Ajad muutuvad ja meie koos ajaga. Nikolai Alumäe vaatab meid seminariruumi seinalt, tema veidi muigel nägu peegeldab osasaamisrõõmu seminariettekannetest ja vaidlustest. Aga ilma vaidlusteta ei sünni uut ja seminarides kuu-

leb ju kõige varem uutest tulemustest. Seminariruum on pidevalt "kinni" ja see näitab otseselt teadustöö hoogu.

See raamat peegeldab teadusmõtet Küberneetika Instituudis nii nagu see lähiaegadel on paistnud läbi mitme prisma. Kui esimene peatükk on üldise iseloomuga, kus põhiosa on ülevaade läbi aegade, millele lisandub üks mälestuskild, siis järgnevad kolm peatükki on kõik iselaadsed. Peatükki "Millest mõtlevad teadlased" on kogutud kogenud teadusajakirjaniku Rein Veskimäe intervjuud Küberneetika Instituudi teadlastega, küllap annavad need hea pildi, kuidas kujuneb teadusmõte erinevates valdkondades. Ilmunud on need intervjuud "Horisonidi" veergudel. Peatüki "Teaduspreemiad" artiklid on pärit meie teadlaste sulest, kes on pärjatud Eesti Vabariigi teaduspreemiatega ja mis on ilmunud Eesti Teaduste Akadeemia vastava seeria raamatutes. Peatükki "Millega tegelevad teadlased" on kogutud kirjutised mitmest vallast teise kogenud teadusajakirjaniku Tiit Kändleri (kes ka ise on töötanud Küberneetika Instituudis) autorlusel, ilmunud on need "Eesti Päevalehe" teaduslehekülgedel.

Meie varasemas kogumikus "Küberneetika Instituut muutuv asjas", mis ilmus aastal 2000, olid kirjas inimeste nimed, kes kunagi kasvõi lühikest aega Küberneetika Instituudis töötasid. Nende inimeste hulk on suurusjärgus kahe tuhande ümber. Ja siia sobib meelde tuletada, mida ütles Ernest Hemingway: "If you are lucky enough to have lived in Paris as a young man, then wherever you go for the rest of your life it stays with you, for Paris is a moveable feast". Parafraseerituna võiks see mõte kõlada järgmiselt: "Kui teil on olnud õnne töötada noore inimesena Küberneetika Instituudis, siis see vaimus ja õhkkond jäävad alati teiega, sest Küberneetika Instituut tervikuna on teaduse tippkeskus".

SUUNDUMUSI

Viiekümne aasta jooksul jõuab üks inimene teha üsna palju. Üks instituut jõuab sama aja jooksul teha veelgi rohkem. Kui tahaks tehtud kuidagi kokku võtta, siis tuleb paratamatult teha mingi valik. Võiks hinnata instituudis saadud teadustulemusi, võiks rääkida tema tublidest inimest, võiks..., võiks...

Alljärgnevalt tahaksin väga lühidalt peatuda instituudi tegevuse erinevatel tahkudel, tema osal Eesti teadusmõtte, tehnoloogilise ja tehnilise kultuuri arengus.

Minu silmis on Küberneetika Instituut midagi rohkemat kui lihtsalt üks teadusasutus, kus tehakse tipptasemel uurimistööd. Lisaks teadusmõtte arengule on siit saanud alguse mitmed projektid, mis arenedes moodustasid suure osa teadmiste ja tehnoloogiliste oskuste baasist, millele tugineb Eesti infotehnoloogia areng kaasajal.

UUS INSTITUUT – UUS MÖTLEMINE

Viiskümmend aastat tagasi tunnetas Nikolai Alumäe vajadust uute teadusuundade arendamiseks ja noorte aktiivseks kaasamiseks teadusesse. Tundub loomulikuna, et idee luua Küberneetika Instituut paistis ahvatleva väljakutsena, sest tolelaegses Nõukogude Liidus oli küberneetikal kui teadusel veel tugev ketserluse maine. Uue instituudi loomiseks oli vaja saada selleks Moskvast NSVL Teaduste Akadeemia nõusolek. Kuidas see saavutati, seda on värvikalt kirjeldanud tolelaegse ENSV Teaduste Akadeemia asepresident Gustav Naan 1979. aastal ilmunud kogumiku "Teadus ja tänapäev" artiklis "Mis siis ikkagi kutsub loomingu". Võib vist teatava uhkusega märkida, et sellel kuundikul planeedist oli see esimene uurimisinstituut, mille nimes eksisteeris sõna "küberneetika".

Nikolai Alumäel õnnestus kaasata uude instituuti säravate silmadega teotahtelisi noori inimesi, kes enamikus olid nooremad kui kolmkümmend aastat ja täis soovi pühendada oma energia keerukate ülesannete ja huvitavate probleemide lahendamisele. Nikolai Alumäe oskas liita nad ühtseks töövõimeliseks kollektiiviks, mida iseloomustas nooruslik entusiasm kõiges, mida ette võeti. Vaadates tulevikku suunas Nikolai Alumäe suurema osa neist noortest õppima aspirantuuri sel perioodil parimatesse kättesaadavatesse teadusasutustesse. Instituuti tagasi pöördudes moodustasid nad selle tuumiku, millele rajanes pea kõik see, mis hiljem andis Küberneetika Instituudile tema näo. Tulemuseks oli edukas ja arenev instituut, kus soodustati igati uute teadusuundade teket ja arenemist. Täna võib öelda, et Küberneetika Instituudist võrsunud uurimissuunad ja tehnilised rakendused on leidnud oma koha nii Eesti kui kogu maailma teaduse ja tehnika kiiresti muutuval maastikul.

Kui Nikolai Alumäe asus juhtima Küberneetika Instituuti, siis oli üheks tema prioriteediks arvutustehnika arendamine. Ühest küljest nõudis koorikute teooria ülesannete lahendamine, mis olid tema enda teaduslike huvide keskes, järjest keerukamaid arvutusi, kuid teiselt poolt oskas ta hinnata arvutustehnika kasvavat rolli nii teaduses kui tehnoloogias. Seetõttu on üsna loomulik, et esimene Eestis ehitatud elektronarvuti M-3 hakkas Küberneetika Instituudis tööle juba 1960. aasta lõpul. Sellest ajast alates täienes instituudi arvutipark pidevalt uute arvutitega, mille saamisel mängis suurt rolli ka arvutuskeskuse spetsialistide, eriti Arnold Reitsakase, kõrge renomee arvuteid tootvas tehases. Nii saabusid Minski arvutitehasest arvutid Minsk-22 (1964) ja Minsk-32 (1969). Viimane neist oli üks esimesi arvuteid uuest seeriast ja selle sissetootamine usaldati Küberneetika Instituudile. Kuni 1988. aastani täienes instituudi arvutipark veel viie tolle aja kohta suhteliselt moodsa ja võimsa arvutiga. Pole huvitusetä märkida, et üks esimesi tsiviilkasutusse antud Elbrus tüüpi superarvuteid pandi üles Küberneetika Instituudi arvutuskeskusesse aastal 1987, kuigi selleks ajaks oli ta minetanud oma tähtsuse meie jaoks, sest arvutustehnika areng oli pöördunud teise suunda ja algas personaalarvutite võidukäik.

Hillar Abeni jõupingutuste tulemusel jõuti nii kaugele, et 7. detsembril 1979. aastal pani NSVL Teaduste Akadeemia asepresident V. Kotelnikov nurgakivi instituudi uuele hoonele. 1981. aastal kolis Mustamäele instituudi arvutuskeskus ja ülejäänud instituut mahutas end 1982. aastal instituudi vastvalminud B korpusesse. Lõplikult valmis hoonetekompleks 1986. aastal.

Kuid ei uued arvutid ega uus maja ei anna uusi teadmisi kui puuduvad ajud nende efektiivseks kasutamiseks. Meie küberneetikud oskasid kasutada uusi võimalusi täies ulatuses. Loodi uusi algoritmilisi keeli ning programmipakette, töötati välja integreeritud programmeerimisüsteeme ja täiustati programmeerimise tehnoloogiat. Natukene detailsemalt tuleb sellest juttu edaspidi.

Küberneetika Instituudil oli suur osa juhtimisteooria väljatöötamisel ja automatiseeritud juhtimissüsteemide rakendamisel Eestis. Meenutagem näiteks koostööd Kohtla Järve põlevkivitöötajatega, kus automatiseeriti nii formaldehüüdi kui formaliini tootmise tehnoloogiliste protsesside juhtimist ja Tallinna Veepuhastusjaama tehnoloogilise protsessi juhtimise süsteemi.

Eesti Teaduste Akadeemia poolt 1975 aastal heaks kiidetud probleemorienteeritud miniarvutite programmi realiseerimiseks loodi 1976. aastal instrumentaaltarkvara sektor Enn Tõugu juhtimisel ja instituudi juurde asutati arvutustehnika erikonstrueerimisbüroo EKTA, mis kujunes üsnagi iseseisvaks rakendusliku suunaga üksuseks. Nende sammude tagajärjel hakkas instituudi töötajate arv kasvama ja 1989. aastal töötas "suures" Küberis juba üle 600 inimese.

Võttes arvesse et viiekümne aasta jooksul on Küberneetika Instituudis töötanud lühemat või pikemat aega kokku üle kahe tuhande inimese, siis nende roll meie riigi töödes ja tegemistes ei ole väike. Kõik nad on suuremal või vähemal määral saanud osa sellest vaimususest ja eetilisest vundamendist, mis valitses andekate, selgete eesmärkidega noorte inimeste kollektiivis. Seda algelt suuresti tänu Nikolai Alumäe isiksusele tekkinud elutervet ja teaduslikku printsiipaalsust austavat õhkkonda suutsid säilitada ka kõik instituudi järgmised juhtkonnad.

Instituudis ja EKTAs huvitavate projektide realiseerimisel töötanud spetsialistid ning nende käsutuses olnud ajakohane riistvara löid hea praktikabaasi Tallinna Tehnikaülikooli tudengitele. EKTAs töötati välja kooliarvuti Juku, mida lõpuks toodeti tehases Baltijets üle 3 000 eksemplari. Selline hulk arvuteid parandas tuntavalt arvutiõpetust koolides.

Ükski teadlane pole palju väärt, kui ta ei anna oma teadmisi edasi järeltulijatele. Aastaid enne seda kui tõsteti päevakorda akadeemiliste instituutide sulatamine ülikoolide koosseisu, leidsid küberneetikud võimalusi koostööks Tallinna Tehnikaülikooliga ka üliõpilaste koolitamisel. Koostöö raames loodi 1984. aastal küberneetika baaskateeder, mis aastal 1993 kujunes reaalarvusteede õppetooliks ja 1995. aastal teoreetilise informaatika õppetooliks. Alates 1992. aastast tegutses edukalt rakendusmehaanika õppetool, kus erikursuseid lugesid Küberneetika Instituudi teadurid.

Küberneetika Instituudi ja EKTA teeneks tuleb lugeda ka seda, et seal sirgunud kogenud asjatundjate põlvkond suutis iseseisvunud Eesti uutes majanduslikes tingimustes, mis nõudis paindlikku reageerimist kiiretele muutustele, jätkata oma tööd, luues ühissettevõtteid välismaiste IT ettevõtetega ja *spin-off* firmasid, kes mängisid märkimisväärset rolli Eesti infotehnoloogilise keskkonna kujundamisel ja mitmed neist on edukad ka täna, kas iseseisvatena või oluliste tegijatena suuremates rahvusvahelistes ettevõtetes.

Teadus oma olemuselt ei ole isoleeritud süsteem. Ta vajab kontakte, et tunnetada, mis toimub meie ümber ja samal ajal mõjutada ümbrust uute teadmistega. Teaduste Akadeemia soosiv suhtumine võõrkeelte õppimisse ja instituudi noorte teadlaste aktiivne osalemine selles andis praktilise keeleoskuse, mis lubas kasutada kõiki avanevaid võimalusi välissuhtlemiseks, olgu need siis teaduslikud konverentsid kodu- või välismaal või teaduslikud komandeerinud. Tänu oma teaduslikule renomeele ja korralduslikule võimekusele usaldati Küberneetika Instituudile sageli suurte teadusnõupidamiste korraldamine. Juba seitsmekümnendatel ja kaheksakümnendatel aastatel oli instituut mitmete Euroopa ja ülemaailmsete teadusorganisatsioonide (AMPERE, IFAC; IUTAM, Euromech jt) konverentside ja kongresside korraldajaks.

Mitmeid instituudi teadlasi valiti rahvusvaheliste teadusorganisatsioonide juhtkonda. Neist võibolla silmapaistvamad näited on B. Tamm (IFAC president 1987–1990) ja J. Engelbrecht (ALLEA president 2006–, IUTAM büroo liige 1996–2008)

1988. aastal alanud Eesti-Soome informaatikaalane koostöö andis instituudile võimaluse juba 1990. aasta detsembris rajada internetiühendus välismaailmaga üle Soome, kasutamaks failivahetust ja e-posti pea kaks aastat varem kui Eesti ühines ametlikult interneti võrgustikuga. Koos Eesti Telekomiga ja Telecom Finlandiga 1993. a loodud ühisfirma AS ESDATA tagas rea aastate vältel töökindla andmeside välismaaga.

Üha rohkem osaleb instituut rahvusvahelistes teadusprojektides ja võrgustikes. Aktiivne osavõtt Euroopa Liidu teadusprogrammide ja -võrgustikest on tõstnud instituudi tuntust välismaal ja loonud tihedaid teaduslikke sidemeid. Kui veel mõni aasta tagasi siirdusid meie noored teadurid välismaistesse uurimisinstituutidesse ja ülikoolidesse end täiendama, siis viimastel aastatel on märgata ka vastassuunalist liikumist. Lühemat või pikemat aega on instituudis stažeerinud või stažeerimas rohkem kui tosina riigi teadlased. Euroopa riikide teadlaste kõrval on meie juurde leidnud tee ka selliste kaugete maade nagu Jaapani, Uus-Meremaa ning Trinidadi ja Tobago teadurid.

TUNNUSTUSI

Instituudi teadlaste tulemused on leidnud tunnustust nii kodu- kui välismaal. Küberneetika Instituudi töötajate ridadest on Eesti Teaduste Akadeemia liikmeks valitud 9 (Hillar Aben, Nikolai Alumäe, Jüri Engelbrecht, Ülo Jaaksoo, Endel Lippmaa, Leo Mõtus, Tarmo Soomere, Boris Tamm, Enn Tõugu). Erinevate nimetustega Eesti teaduspreemiad on antud instituudi töötajatele 14 korral, millele lisanduvad ka omal ajal saadud üleliidulised, või peale taasiseisvumist rahvusvahelise tunnustused (täpsemad andmed leiduvad kronoloogias).

Aastatel 2002–2007 olid kümne Eesti teaduse tippkeskuse hulgast kahe – Mittelineaarsete protsesside analüüsi keskuse CENS (juht Jüri Engelbrecht) ja Töökindlate arvutisüsteemide uurimise keskuse CDC (juht Jaan Penjam) – põhituumikuks Küberneetika Instituudi teadlased. Pea sama edukad oldi ka 2008. a kui seitsme Eesti teaduse tippkeskuse hulka aastateks 2007–2013 valiti Tarmo Uustalu juhitud Arvutiteaduse tippkeskus EXCS.

TEGEMISI JA TULEMUSI

Küberneetika Instituut on kogu oma ajaloo kestel olnud omalaadseks kasvulavaks, pinnaseks, kus said rahulikult areneda uued uurimissuunad. Mõned neist kasvasid kiiresti tugevaks ja iseseisvusi, teised jätkasid oma kasvu Küberneetika Instituudi rüpes.

Siinkohal pole võimalik anda ammendavat ülevaadet kõigest viiekümne aasta jooksul tehtust, kuid siiski tahaksin esile tuua mõned märksõnad, mis iseloo-

mustavad Küberneetika Instituudis viljeletud uuringute diapasooni ning praktiliste lahenduste ulatust. Loomulikult on see valik subjektiivne ja ei pretendeeri mingitele hinnangutele. Ka pole võimalik loetleda kõiki neid, kes andsid oma panuse ühe või teise probleemi lahendamisse. Tulemusi on püütud rühmitada temaatika, mitte instituudi struktuuri alusel.

FÜÜSIKA JA BIOKEEMIA

Esimene suurem pungumine toimus 1980. aastal kui füüsika ja biokeemia osakonnad panid aluse Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudile. Kuid veel Küberneetika Instituudi koosseisus olles arendati tahke keha kõrge lahutusega tuumamagnetresonantsmeetodi (TMR) teooriat ja loodi originaalne mõõtepea kõrge lahutusega TMR spektromeetritele, mis avardas oluliselt eksperimentaatorite uurimistöö võimalusi. Uuriti valkude biofüüsika ja fermentide füüsikalist toimemehhanismi ning selgitati fermentatiivse katalüüsi, eriti aga konformatsioonimuutuste osatähtsust. Töötati välja maomürkide fraksioneerimise meetod puhaste fermentide saamiseks ja nende füüsikalise-keemiliseks uurimiseks. Nüüdiseks on KBFI tuntud rahvusvaheline uurimiskeskus.

MATEMAATIKA

Küberneetika Instituut tunnetas varakult korrektse matemaatilise harituse vajadust ja toetas igati rakendusmatemaatika meetodite arendamist instituudis. Töötati välja mitmed dekompositsiooni ja agregatsioonimeetodid mittelineaarse programmeerimise ja optimaalse juhtimise paljumõõtmeliste ülesannete lahendamiseks ja nende seostamine hierarhiliste süsteemide üldiste koordineerimisprintsiipidega ning tuletisevabad meetodid mittelineaarsete operaatorvõrrandite ja ekstreemumülesannete lahendamiseks (S. Ulm). Loodi lahendusmeetodid tõenäosusfunktsioone sisaldava ekstreemumülesande lahendamiseks (E. Raik). Matemaatilise statistika valdkonnas esitati regressioonifunktsiooni hindamise meetodid (I. Petersen) ning erijuhtudel minimakshinnangute leidmise analüütilised meetodid (J. Kuks, V. Olman). Loodi linna-transporti simulatsioonimudel (J. Kajari). Loodi rakendusprogrammide pakk matemaatilise statistika ülesannete lahendamiseks suurtel andmemassiividel. Töötati välja liikluskahjude statistilise analüüsi ja prognoosi meetodid, algoritmid ja programmid Liikluskindlustuse fondile (I. Petersen). Põhjendati stohhastilise planeerimise ülesande lahendamise skeeme ja hinnanguid (R. Lepp, E. Tamm). Statistilise järjendanalüüsi ülesannetes leiti lahendusmeetod difusioonprotsessi optimaalse peatamise ülesandele (T. Tobias). Töestati integrodiferentsiaalvõrrandile püstitatud pöördülesannete korrektsus (J. Janno).

Leiti ja realiseeriti uued tõestusvõtted teoreemide automaatseks tõestamiseks klassikalise loogika raames (T. Tammet, G. Mints).



Teet Tobias

Publikatsioonid

Petersen, I. (1966). Katsete planeerimine. Valgus, Tallinn.

Levin, M., Ulm, S. (1977) Arvutusmeetodite käsiraamat. Teine täiendatud trükk. Valgus, Tallinn.

JUHTIMISTEORIA JA JUHTIMISSÜSTEEMID

Arvutustehnika kiire arengu algaastatel valitses arvamus, et arvutite kasutamiseks on võimalik kiiresti lahendada kõiki juhtimisega seotud probleeme. Juhtimisteooria ja juhtimissüsteemide valdkonnas lahendati nii teoreetilisi kui ka otseselt praktiliste ülesannetega seotud probleeme

Mitmemõõtmeliste dünaamiliste süsteemide dekomponeerimise tingimuste uurimise põhjal töötati välja meetod alamsüsteemide interaktsioonide analüüsiks ja töötati välja proportsionaalset-integraalset tüüpi mitmemõõtmeliste regulaatorite sünteesi meetodid (Ü. Jaaksoo).

Töötati välja diferentsiaalvormidel ja mittekommutatiivsete polünoomide teoorial põhinevad universaalsed algebralised meetodid pideva ja diskreetse ajaga mittelineaarsete süsteemide modelleerimiseks, analüüsiks ja juhtimiseks ühtselt vaatepunktist. Ühildumine toimib nii kontseptuaalsel, algoritmilisel kui ka arvutuslikul tasandil ning kasutab pseudolineaaralgebrat ja analüüsi ajaskaaladel. (Ü. Kotta).



Jüri Vain

Kasutades piisavaid stabiilsustingimusi püstitati ja lahendati robustse skalaarse väljundregulaatori sünteesi ülesanne (Ü. Nurges).

Arendati formaalmeetodeid ja rakendati neid reaalarja- ning hajussüsteemides, genereeriti mudelipõhiseid teste, arendati programmeerimisteooriat, ajaga automaatide õppimismeetodeid ning hajuskoordinatsiooni algoritme (J. Vain).

Alates instituudi loomisest moodustasid automatikute uuringutes suure osa tootmisega seotud probleemid ja kujunes välja koostöö Kohtla-Järve põlevkivi töötajatega. Kuuekümnendate aastate lõpul loodi formaldehüüdi tootmise optimaalse juhtimise meetod, mis haaras nii tehnoloogilise protsessi modelleerimist, juhtimisalgoritmide koostamist, uurimist ja katsetamist ning meetodi ellurakendamist tööstuses. Suurt tähelepanu pühendati tehnoloogiliste protsesside superviisorjuhtimise algoritmide loomisele ja nende realiseerimisele universaalsetel arvutitel. Olulisemaks tulemuseks võib lugeda formaliiniprotsesside tsentraliseeritud superviisorjuhtimise süsteemi FORSAL, mida rakendati mitmes NSVL keemiatehases. (R. Tavast, Ü. Jaaksoo). Kaheksakümnendatel aastatel võimaldasid mikroprotsessorite baseeruvad süsteemid hakata tegelikkuses ra-

kendama hajusjuhtimissüsteeme, mis kujutasid endast suurema või vähema intellektuaalsusega kontrolleritest ja juhtjaamadest koosnevat võrku, milles kõik lokaalsed juhtimisfunktsioonid teostati kontrollerite poolt vahetult juhitavatel objektidel, üldine juhtimine aga juhtjaamades. Praktikas realiseeriti hajusjuhtimissüsteem SATELLIIT. (Ü. Jaaksoo, R. Haavel, T. Tõnspöeg) Arendati välja reaalaraja süsteemide spetsifitseerimise teooria ning vastav tarkvara süsteem selle rakendamiseks (L. Mõtus).



Anti Ira juhtarvutite võrku haldamas

Publikatsioone

Kotta, Ü. (1995). Inversion Method in the Discrete-Time Nonlinear Control Systems Synthesis Problems. (Lecture Notes in Control and Information Sciences; 205). Springer, Berlin etc.

Мытус, Л.Л. (1990). Динамика программного обеспечения встроенных систем. Валгус, Таллинн.

Ariste, A., Lind, H., Mõtus, L., Tani, H. (1984). Mikroarvutid automaatikas. Valgus, Tallinn.

FONEETIKA JA KÕNETEHNOLOGIA

Kõneanalüüsi, -sünteesi ja -tuvastuse probleemid on olnud instituudi teadlaste huviorbiidis peaaegu instituudi algaastatest. 1982. aastal "kõneles" instituudis loodud mikroprotsessori juhitud süntesaator esmakordselt suvalist teksti vene keeles ja 1985 eesti keeles. 1990ndatel osaleti aktiivselt kõnekorpuste loomisel, sealhulgas rahvusvahelises projektis "BABEL-A Multi-language Database" ning saadi uusi originaalseid tulemusi eesti vokaali- ja vältesüsteemi eksperimentaal-foneetilisel uurimisel. 2002. aastal valmis koostöös Eesti Keele Instituudi ja firmaga FiloSoft eestikeelne difoonidel baseeruv kõnesüntesaator, mis pälvis 2003. a riigi teaduspreemia tehnikateaduste valdkonnas. 2000ndatel



Mart Rohtla spektrograafi
häälestamas

aastatel on tegeldud aktiivselt eestikeelse kõnetuvastusega – akustiliste mudelite treenimiseks on kogutud suuremahuline kõnekorpused ja arendatud keele-spetsiifilisi meetodeid keelemudelite loomiseks.

Alates 2006 osaleb labor riiklikus programmis “Eesti keele keeletehnoloogiline tugi (2006–2010)” kolme projektiga:

“Eestikeelse kõnetuvastuse meetodite uurimine ja arendamine”, mille üheks väljundiks on raadio vestlussaadete automaatse transkribeerimise ja indekseerimise prototüüp;

“Kõne analüüs ja variatiivsuse mudelid”, milles uuritakse kõneparameetrite varieeruvust erinevate kõnelejate ja kõnestiilide korral, sealhulgas ka aktsendiga kõnes;

“Kõnekeele ressursid ja kõnetehnoloogia andmebaasid” raames kogutakse kõnetehnoloogilisteks ja eksperimentaal-foneetilisteks uuringuteks vajalikke kõnekorpused (akadeemilised loengud ja konverentsiettekanded, raadiouudised ja vestlussaadet, aktsendiga kõne) ja luuakse korpuste haldussüsteem.

Publikatsioone

Eek A. (2008). Eesti keele foneetika 1. TTÜ kirjastus, Tallinn.

Lehiste, I., Aasmäe, N., Meister, E., Pajusalu, K., Teras, P., Viitso, T.-R. (2003). Erzya Prosody. Suomalais-Ugrilaisen Seura, Helsinki.

TARKVARA

Küberneetika Instituudi algaastail oli oluline ülesanne teha arvutite kasutamine tavatarbijatele võimalikult käepäraseks. Suure praktilise väärtusega oli numbrilise programmjuhtimisega frees- ja metallilõikepinkide informatsiooni ettevalmistamise programmeerimissüsteemi loomine (B. Tamm, J. Pruuden), probleemorienteeritud algoritmiliste keelte ja nende translaatorite väljatöötamine, milledest laiemalt said tuntuks MALGOL (M. Kotli) ja VELGOL (V Kuuksik), spetsialiseeritud insenerlike programmeerimiskeelte ja nende protsessori loomine. Töötati välja majandusandmete ankeettöötuse süsteem MATS (E. Sarv, L. Heinla) ja statistilise andmetöötuse tarkvara rakendusprogrammide süsteem (I. Petersen). Loodi metamonitorsüsteemide pere MEMO konkreetsete, rakendusliku orientatsiooniga tarkvarasüsteemide ja keelte hõlpsaks loomiseks (J. Pruuden). Osaleti juhtorganisatsioonina Ida-Euroopa maade

koostöös programmikompleksi väljatöötamisel raalprojekteerimissüsteemide tarkvara automatiseeritud loomiseks, testimiseks ja teenindamiseks (J. Pruuden, I. Melnikov).

Kaheksakümnendatel aastatel töötati välja programmide struktuurse sünteesi meetod ning rakendati programmeerimissüsteem PRIZ inseneritehniliste ülesannete lahendamiseks (E. Tõugu). 1985–1988 osaleti Nõukogude Liidu uue põlvkonna arvutite loomise projektis START, mille eesmärgiks oli luua viienda põlvkonna arvutite elementide viimistlemise ja katsetamise kontseptsioon. Selle töö tulemus kajastus ka instituudi arvutipargi moderniseerimises (E. Tõugu).

Instrumentaalsüsteemi ExpertPRIZ abil koostati masinprojekteerimise rakendusprogrammide pakette projekteerimisülesannete lahendamiseks masinaehituses ja ehituses (A. Kalja).

Kõigis piirkondlikes tolliinspektuurides ja Eesti Tolliameti keskuses evitati tolli info-ja kontrollisüsteem, mille abil töödeldi kõiki Eesti territooriumile või sealt väljatoimetatavate kaupade kaubadeklaratsioonid (J. Pruuden). Süsteem töötas kuni liitumiseni ühtse Euroopa tollisüsteemiga.

Instituudi arvutiteadlased ja tarkvaraspetsialistid on aktiivselt osalenud mitmete oluliste riiklike infosüsteemide väljatöötamisel.

Alates 2002. aastast on instituut aktiivselt osalenud Euroopa Liidu raamprogrammide tarkvara arendamisega seotud projektides .

Töökindlate Arvutisüsteemide Uurimise Keskus (CDC) kuulus aastatel 2002–2007 10 Eesti teaduse tippkeskuse hulka ja ühendas Küberneetika Instituudi, TTÜ, TÜ ja AS Cybernetica arvutiteaduse matemaatiliste aluste ja programmeerimiskeelte tehnika, süsteemiarenduse formaalmeetoditega, infoturve ja krüptograafia, digitaalsüsteemide disaini ja testimisega seotud probleemide uurijaid üheks meeskonnaks (J. Penjam).

Aastatel 2008–2015 arendavad Küberneetika Instituudi, Aktsiaselts AS Cybernetica ja Tartu Ülikooli arvutiteadlased ühiselt Eesti Arvutiteaduse Tippkeskuse (EXCS) raames töid programmeerimiskeelte ja -süsteemide, turvalisuse, tarkvaratehnika, teadus- ja inseneriarvutuste, bioinformaatika ning inimkeele- tehnoloogia alal. (T. Uustalu). Kõrgeks rahvusvaheliseks tunnustuseks meie arvutiteadlastele on nende kaasamine ühisprojektidesse ja -võrgustikesse, aga ka välismaa teadurite huvi stažeerimise vastu meie instituudis. Eraldi tuleks rõhutada pikaajalist rahvusvaheliste koolide ja nõupidamiste korraldamise kogemust. Nii mõnigi neist on muutunud traditsiooniliseks oma rohkem kui kümneaastase ajalooga.

Publikatsioone

Tyugu E. (2007). Algorithms and architectures of artificial intelligence. (Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, 159). IOS Press, Amsterdam.

Peetre, J., Penjam, J. (eds.) (2006). Semigroups and automata. Selecta Uno Kaljulaid (1941-1999). IOS Press, Amsterdam.

Morris, D., Tamm, B. (eds.)(1993). Concise Encyclopedia of Software Engineering. Pergamon Press, Oxford etc.

Kalja A., Tiidemann T., Tyugu E. (1991). Masinprojekteerimine. Valgus, Tallinn.

Hayes, J.E., Michie, D., Tyugu, E. (1991). Towards an automated logic of human thought. Clarendon Press, Oxford.

Кахро, М.И., Калъя, А.П., Тыугу, Э.Х. (1988). Инструментальная система программирования ЕС ЭВМ (ПРИЗ). Финансы и статистика, Москва.

Tyugu, E. (1988). Knowledge-based programming. Addison-Wesley, London.

Тамм, Б.Г., Прууден, Ю.И., Таваст, Р.Р. (1987). Анализ и моделирование производственных систем. Финансы и статистика, Москва.

Тыугу, Э.Х. (1984). Концептуальное программирование. Наука, Москва.

МЕХАНИКА

Nagu juba eelpool mainitud said mehaanikaalased uuringud alguse koorikute dünaamikast, kui Nikolai Alumäe esitas elegantse meetodi koorikute pingeloolorra erinevate komponentide separeerimiseks. Järgnesid mittestatsionaarsete lainete uurimine plaatide ja koorikutes (N. Alumäe, U. Nigul, L. Ainola) ja variatsioonprintsipiide formuleerimine (L. Ainola). Seitsmekümnendatel aastatel alustati akustiliste kajasignaalide tekke matemaatilise modelleerimisega, mis pakkus uurimisainet rohkem kui kümnendiks (U. Nigul, J. Metsaveer, N. Veksler, M. Kutser). Tuletati meetodeid ja programme kajasignaalide arutamiseks ning difraktsiooniülesannete lahendamiseks. Kaheksakümnendail aastail pöördus tähelepanu mittelineaarsete deformatsioonilainete mittestatsionaarsete protsesside modelleerimisele pärilikes (U. Nigul) ja aktiivsetes ning mikrostruktuuriga materjalides (J. Engelbrecht). Omaette huvitava kõrvalharu moodustas närviimpulsi levi mudeli esitamine (J. Engelbrecht), mis inspireeris üheksakümnendatel aastatel alustama uuringuid südame erutusmehhanismi matemaatilise mudeli loomiseks (O. Kongas) ning käesoleval sajandil südamelihase töö ning rakusisese energieetika matemaatiliseks modelleerimiseks (M. Vendelin).

Üheksakümnendail aastail avaldas J. Engelbrecht monograafiad asümmeetriliste üksiklainete teooria ja mittelineaarsete lainete teooria keerukuse ning lihtsuse kohta ning algas intensiivne uurimistöö üksiklainete (solitonide) valdkonnas. Töötati välja peidetud solitonide kontseptsioon ja diskreetse spektraalanalüüsi meetod solitonide käitumise uurimiseks (A. Salupere). Formuleeriti keerukate süsteemide modifitseeritud termodünaamika põhialused, täiendades klassikalist termodünaamikat lisapostulaatidega. Analüüsiti faasifrondi levi mehhanismi mälu materjalides kasutades termodünaamiliselt korrektseid numbrilisi meetodeid (A. Berezovski). Formuleeriti kontsertklaveri vilthaamri hüstereetilise mudel, mis arvestab haamri materjali omadusi (A. Stulov). Püstitati mittehomoogeensete materjalide ja eelpingestatud tahkiste akustodiagnostika ülesanne, mille lahendamiseks on käesolevaks ajaks

loodud erinevaid meetodeid (A. Ravasoo, J. Janno). Uuringud mikrostruktuuriga materjalide käitumisest dünaamiliste koormustel on teinud instituudi teadlased tuntuks kogu maailmas.

Fraktaalse iseloomuga nähtuste uurimisel üldistati turbulentsse difusiooni mudel kolmemõõtmelisele juhule, kirjeldati turbulentses voolus edasikanduva passiivse lisaine ruumilise jaotuse uudset multifraktaalset mõõtu, koostati juhuslike pindade statistilise topograafia mudel ja määrati isojoonte fraktaalne mõõt (J. Kalda).

2005. aastal kaitsti instituudis esimene doktoritöö, mida võiks klassifitseerida kuuluvaks ökonofüüsika valdkonda. Börsihindade aegjadadele koostatud skaalerimismudelid lubavad teatud tõenäosusega hinnata hindade liikumist ja riske ning näidati astmeseaduse paikapidavust hinnajadade pikaajalisel käitumisel (R. Kitt).

Paralleelselt koorikute dünaamikaga arenes mehaanika osakonnas täiesti iseiseisva uurimissuunana fotoelastsus. Hillar Abeni arendatud karakteristiklike suundade meetodi teooria osutus väga viljakaks ning pani aluse integraalsele fotoelastsusmeetodile ning tensorvälja tomograafiale. See uurimissuund pälvib 2010. aastal kõrgeima Eesti Vabariigi teaduspreemia ja fotoelastuse labor on kindlalt üks maailma tuntumaid laboreid selles valdkonnas.

Eesmärgiga koondada ja koordineerida mittelineaarset dünaamika alasid uurinuid Eestis loodi mehaanika osakonna juurde Mittelineaarsete protsesside analüüsi keskus CENS, mis aastatel 2002–2007 kuulus Eesti teaduse tippkeskuste hulka. CENS sidus uuringuid geomeetria alal Tartu Ülikoolis, lainedünaamika alal TTÜ Meresüsteemide Instituudis ning biosignaalide töötlust TTÜ Biomeditsiinitehnika keskuses uuringutega Küberneetika Instituudis ning täitis positiivset rolli nende temaatika arendamisel. Kümne tegevusaasta jooksul on CENS kujunenud rahvusvaheliselt tunnustatud uurimiskeskuseks, mille töös osalevad mitmete välisriikide teadurid.

Edukad uuringud biofüüsika ja biomehaanika valdkonnas lõid aluse süsteemi-bioloogia labori loomiseks 2007. aastal. Tulemuste taset iseloomustab seegi, et mainekas rahvusvaheline fond *Wellcome Trust* otsustas finantseerida südamelihase rakusiseste protsesside regulatsiooni ja vastasmõjude uurimist instituudis (M. Vendelin).

Selle sajandi esikümnel pöördus tähelepanu pinnalainetele, eriti hiidlainete tekkemehhanismi uurimisele. Määrati madalas vees levivate solitonide interaktsioonil tekkivate kahemõõtmeliste struktuuride omadusi ning teoreetilisi võimalusi ekstreemsete lainete tekkeks (P. Peterson). Lainetuse uurimine laienes tunduvalt peale T. Soomere tulekut instituuti 2005. aastal, haarates probleeme kiirlaevainete mõjust, rannikutehnikast, tsunamidest, hiidlainetest kuni Läänemere lainekliima muutuste analüüsini. 2009. aastal formeerus uurimisgrupp lainetuse dünaamika laboriks. Selle labori tulemused on tuntud kogu maailmas.

Publikatsioonid

- Quak, E., Soomere, T. (eds.) (2009). Applied Wave Mathematics. Selected Topics in Solids, Fluids, and Mathematical Methods. Springer, Heidelberg.
- Berezovski A., Engelbrecht J., Maugin G. A. (2008). Numerical simulation of waves and fronts in inhomogeneous solids. (World Scientific Series on Non-linear Science, Series A). World Scientific, New Jersey.
- Lepik, Ü., Engelbrecht, J. (1999). Kaoseraamat : [õpik]. Teaduste Akadeemia Kirjastus, Tallinn.
- Engelbrecht, J. (1997). Nonlinear Wave Dynamics: Complexity and Simplicity. Kluwer, Dordrecht et al.
- Jeffrey, A., Engelbrecht, J. (1994). Nonlinear Waves in Solids. Springer, Wien, New York.
- Aben, H., Guillemet C. (1993). Photoelasticity of Glass. Springer, Berlin etc.
- Engelbrecht, J., Uus A. (1993). Mittelineaarne dünaamika ja kaos. Eesti Teaduste Akadeemia Küberneetika Instituut, Tallinn.
- Engelbrecht, J. (koost.) (1992). Mehaanika meil ja mujal. Valgus, Tallinn.
- Engelbrecht J. (1991). An Introduction to Asymmetric Solitary Waves. Longman, Harlow.
- Векслер, Н.Д. (1989). Акустическая спектроскопия. Валгус, Таллинн.
- Engelbrecht, J.K., Fridman, V.E., Pelinovski, E.N. (1988). Nonlinear evolution equations. Longman Scientific and Technical, Harlow, Essex, England.
- Пелиновский Е.Н., Фридман В.Е., Энгельбрехт Ю.К. (1984). Нелинейные эволюционные уравнения. Валгус, Таллин.
- Engelbrecht, J. (1983). Nonlinear wave processes of deformation in solids. (Monographs and Studies in Mathematics). Pitman Advanced Publishing Program, Boston etc.
- Энгельбрехт, Ю.К., Нигул, У.К. (1981). Нелинейные волны деформации. Наука, Москва.
- Нигул, У.К. (1981). Нелинейная акустодиагностика. Судостроение, Ленинград.
- Метсавээр, Я.А., Векслер, Н.Д., Стулов, А.С. (1979). Дифракция акустических импульсов на упругих телах. Наука, Москва.
- Aben, H. (1979). Integrated photoelasticity McGraw-Hill, New York et al.
- Абен, Х.К. (1975). Интегральная фотоупругость. Валгус, Таллин.

FAKTE AJALOOST JA KRONOLOOGIA

Iga inimese või asutuse elus on sündmusi, mis kuidagi määravad tema saatust, märgivad tulemusi, mida tahaks meenutada kui õnnestumisi või sunnivad mõtlema miks läks kõik nii ja mitte teisiti. Mõned neist süüvivad mällu, mõned ununevad, kuid sündmuste rida aitab meenutada tehtut. Alljärgnevalt on esitatud mõned faktid Küberneetika Instituudi viiekümneaastasest ajaloost. Need ei pruugi olla kõik võrdse väärtusega ja nii mõnigi, mis tundub kellelegi väga tähtsana, võib olla välja jäänud, samal ajal kui mõni teisejärguline, kuid siiski huvitav fakt on mahtunud sellesse ritta.

INSTITUUDI DIREKTORID JA TEADUSDIREKTORID LÄBI AEGADE

Direktorid

Nikolai Alumäe, 1960–1969

Koondas noorte teadlaste tuumiku, mis pani aluse Instituudi teaduslikule potentsiaalile ja loominguolisele õhkkonnale

Boris Tamm, 1969–1976

Suunas oma energia arvutustehnika ja arvutiteaduse arendamisele ning rahvusvaheliste sidemete loomisele

Hillar Aben, 1976–1989

Suutis lisaks oma isiklikele silmapaistvatele teadustulemustele viia eduka lõpuni instituudi uue hoone ehituse

Ülo Jaaksoo, 1989–1997

Pani rõhu rakendusteadustele, mis võimaldas hiljem luua AS Cybernetica

Jaan Penjam, 1997–2009

Säilitas instituudi traditsioonid ja iseseisva mõtlemise uutes tingimustes

Andrus Salupere, 2009–

Lipukirjaks kvaliteet ja koostöö

Teadusdirektorid

Hillar Aben, 1967–1976

Jüri Engelbrecht, 1989–1994

Ülo Jaaksoo, 1984–1989

Ülle Kotta, 1998–2009

Jaan Penjam, 2009–

Ivar Petersen, 1969–1984

Boris Tamm, 1962–1969

Ants Wörk, 1976–1997

Tänase Küberneetika Instituudi teaduslikku nägu kujundavad Hillar Aben, Jüri Engelbrecht, Jaan Janno, Ülle Kotta, Einar Meister, Jaan Penjam, Tarmo Soomere, Enn Tõugu, Tarmo Uustalu, Marko Vendelin ja arvukad särasilmised noored, kes koguvad teri teaduse varasalve.

KRONOLOOGIA

ENSV Ministrite Nõukogu määrusega 7. juulist 1960 lubatakse ENSV Teaduste Akadeemial organiseerida Küberneetika Instituut.

ENSV Teaduste Akadeemia presiidiumi otsus 15. juulist 1960 asutada 1. septembrist 1960 uus uurimisasutus – Küberneetika Instituut.

1960

1. septembril alustas tegevust Küberneetika Instituut
detsembris anti ekspluatatsiooni arvuti M-3



Endel Lippmaa



Heiki Sumre arvutit M-3 häälestamas

1961

moodustati füüsika sektor (Endel Lippmaa)

1962

Boris Tamm valiti teadusdirektoriks

1963

moodustati arvutuskeskuse arvutustehnika laboratoorium (Arnold Reitsakas)

1964

anti ekspluatatsiooni arvuti Minsk-22

1965

Boris Tamm ja Juhan Pruuden pälvivad Nõukogude Eesti preemia numbrilise programmjuhtimisega freespinkide informatsiooni ettevalmistamise programmeerimissüsteemi loomise ja juurutamise eest

1966

loodi operatsioonanalüüsi sektor (Kalju Leppik) ja spetsiaalne konstrueerimisbüroo kilemälude alal (Mark Sinisoo)

1967

Hillar Aben nimetati teadusdirektoriks

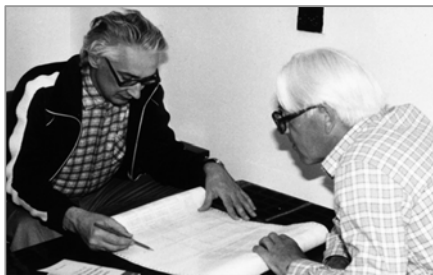
loodi teadusliku informatsiooni sektor (Heino Ruubel)

Raul-Roman Tavast ja Ülo Jaaksoo pälvisid Nõukogude Eesti preemia formaldehüüdi tootmise optimaalse juhtimise meetodi ja vajalike algoritmide kompleksi väljatöötamise ja rakendamise eest

1968

arvutuskeskus nimetati ümber matemaatiliste meetodite sektoriks (Ivar Petersen) ja arvutustehnika laboratoorium arvutuskeskuseks (Arnold Reitsakas)

moodustati kahekordse alluvusega algoritmiliste keelte sektor, mille tegevust finantseeris Moskvas asuv Elektroomsete juhtimismasinatate Instituut (Boris Tamm)



Tõnu Tiits (vasakul) ja Ivar Petersen kontrollivad programmi õigust

1969

instituudi direktoriks valiti Boris Tamm ja teadusdirektoriks Ivar Petersen

loodi isemajandav programmeerimisbüroo (Kalju Leppik) anti eksploatatsiooni arvuti Minsk-32



Enn Sarv (vasakul) ja Juhan Pruuden seminaril

1970

Nikolai Alumäe, Leo Ainola ja Uno Nigul pälvisid Nõukogude Eesti preemia elastsetes koorikutes levivate mittestatsionaarsete lainete uurimise eest

1971

anti eksploatatsiooni arvuti Ruta-110

Arnold Reitsakas nimetati ENSV teeneliseks inseneriks

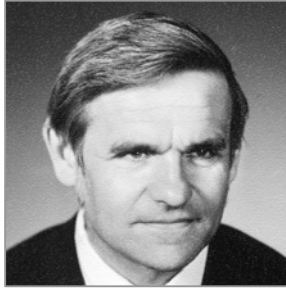
1972

loodi biokeemia sektor (Avo Aaviksaar)

Endel Lippmaa ja Boris Tamm valiti Eesti Teaduste Akadeemia liikmeks



Uno Nigul



Kalju Leppik



Mati Kutser

1975

automaatika sektoris moodustati protsessijuhtimise töörühm (Raul Tavast) ja magneetoonika töörühm (Mark Sinisoo). Kõne uurimine jätkus automaatika sektoris (Eugen Künnap)

teadussekretäriks nimetati Mati Kutser

Vello Kuusik, Enn Sarv, Leo Heinla pälvisid Nõukogude Eesti preemia majandusandmete ankeettöötluste süsteemi (MATS) ja programmeerimiskeele VELGOL arendamise ja rakendamise eest

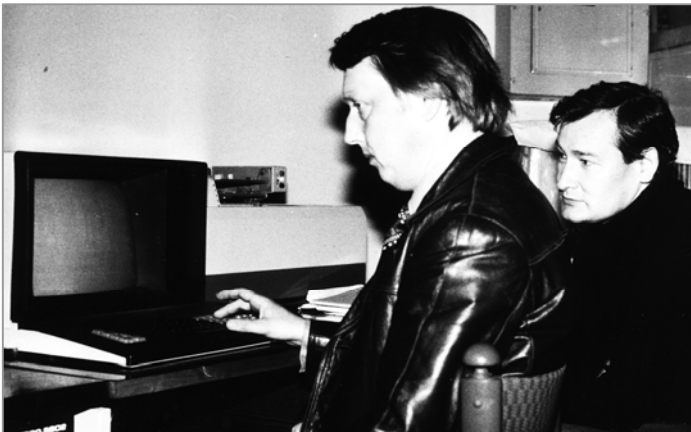
1976

instituudi direktoriks valiti Hillar Aben

instituudi teiseks teadusdirektoriks valiti Ants Wõrk

loodi arvutustehnika erikonstrueerimisbüroo EKTA (Kalju Leppik), mille koosseisu läksid ka programmeerimisbüroo ja magneetoonika töörühm anti ekspluatatsiooni arvuti EC-1022

operatsioonanalüüsi sektor reorganiseeriti instrumentaaltarkvara (hiljem tarkvara) sektoriks (Enn Tõugu)



Karel Martin
(vasakul) ja
Leo Mõtus



Raul Tavast



Ülle Kotta



Ants Wõrk

1977

moodustati juhtimissüsteemide sektor (Raul Tavast)
anti ekspluatatsiooni arvuti M 4030

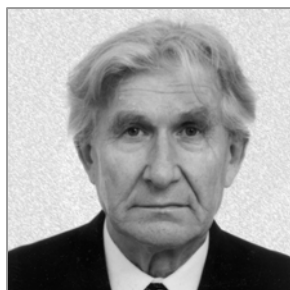
Hillar Aben valiti Eesti Teaduste Akadeemia liikmeks

1979

7. detsembril pani NSVL Teaduste Akadeemia asepresident V. Kotelnikov nurgakivi instituudi hoonekompleksile Mustamäel anti ekspluatatsiooni arvuti EC-1052

1980

füüsika ja biokeemia sektorid eraldusid
Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Insti-
tuudiks (Endel Lippmaa)
valmis EKTA hoone



Harry Tani

Arvuti EC-
1052 juhtpult



1981

valmis Küberneetika Instituudi hoonetekompleksi arvutuskeskus
Enn Tõugu valiti Eesti Teaduste Akadeemia liikmeks

1981–1982

rida formaalseid instituudi struktuuriüksuste ümbernimetamisi



Uue maja nurgakivi paneb NSVL
Teaduste Akadeemia asepresident
Vladimir Kotelnikov, tagaplaanil
Hillar Aben

Sellisena projekteeris meie uue
maja arhitekt Margus Koot



1982

Küberneetika Instituut kolis Mustamäele valminud B korpusesse
Raul-Roman Tavast, Vello Hanson, Matti Littover, Leo Mõtus, Henn
Pedak, Olavi Randma, ja Ingmar Randvee pälvisid Nõukogude Eesti
preemia karbamiidi tootmise automatiseeritud juhtimissüsteemi
MEDIUS loomise ja rakendamise eest.

1983

Taivo Arak sai Markovi preemia

1984

instituudi teadusdirektoriks valiti Ülo Jaaksoo
moodustati tõenäosusteooria sektor (Taivo Arak)

1985–1988

osaleti ametkondadevahelise ajutise kollektiivi START töös V põlvkonna elektronarvuti kontseptsiooni elementide viimistlemisel ja katsetamisel (Enn Tõugu)

1986

tõenäosusteooria sektor liideti matemaatika sektoriga

Tõnu Arulaane, Jüri Freiberg, Rein Haavel, Ülo Jaaksoo, Üllar Jõgevest, Erik Jürviste, Harro Kalda, Andres Kaukver, Vello Kempo, Jüri Lankots, Kaarel Martin, Rein Paluoja, Enn Talvis, Tõnu Tõnspoe

pälvisid ENSV Ministrite Nõukogu preemia tehnoloogiliste protsesside hajusjuhtimis-süsteemi SATELLIIT loomise eest

Ülo Jaaksoo valiti Eesti Teaduste Akadeemia liikmeks

1986–1990

toimus rida formaalseid muutusi osakondadesiseses struktuuris, mis olid seotud muutustega palgapoliitikas ja temaatika planeerimisel loodi fotoelastsuse labor (Hillar Aben)

1987

arvutuskeskuses seati üles arvuti Elbrus

Boris Tamm, Ahto Kalja, Milvi Kahro, Rein Lõugas, Mihhail Matskin, Imre Melnikov, Juhan Pruuden, Henn Saar, Niilo Saard, Enn Tõugu, Mait Harf, Aleksander Šmundak said NSVL Riikliku preemia inseneri-ülesannete tarkvarasüsteemide loomise ja arendamise eest

1988

anti ekspluatatsiooni arvuti EC-1066

1989

Jüri Engelbrecht valiti teadusdirektoriks

1990

detsembris rakendus koostöös Soome ülikoolidega internetiühendus välismaailmaga (failivahetus, e-post)

Jüri Engelbrecht valiti Eesti Teaduste Akadeemia liikmeks

1991

loodi foneetika ja kõnetehnoloogia labor (Einar Meister)

1992

Jüri Engelbrecht pälvis Eesti vabariigi teaduspreemia monograafia "An Introduction to Asymmetric Solitary Waves". London & Harlow, Longman, 1991 eest



Enn Tõugu



Instituudi 30. aastapäeval kingiti direktor Ülo Jaaksoole
kõige töökindlam arvuti

1993

likvideeriti sektorid osakondades ja pöörduti tagasi osakondadel
põhineva struktuuri juurde

loodi infotehnoloogia osakond (Ülo Jaaksoo)

Jüri Engelbrecht pälvis A.von Humboldti teaduspreemia

1994

Hillar Aben ja Claude Guillemet pälvisid Eesti vabariigi teaduspreemia
monograafia "Photoelasticity of Glass", Springer-Verlag, Berlin, Heidel-
berg, New York et al, 1993 eest

1995

loodi andmeside osakond (Tarvi Martens)

loodi ülikoolide informaatikakeskus (Jaan Penjam)

1996

Ülle Kotta pälvis monograafia "Inversion Method in the Discrete-Time
Nonlinear Control Systems Synthesis Problems", Springer, Berlin etc.
1995 eest Eesti vabariigi teaduspreemia

1997

Arnold Reitsakas pälvis IEEE Arvutiseltsi (*Computer Society*) medali
"Computer Pioneer Award", mis antakse isikule, kes on andnud eriti
suure panuse arvutustehnika arendamisse omal maal

asutati Küberneetika Aktsiaselts (AS Cybernetica) (Ülo Jaaksoo)

mehaanika ja rakendusmatemaatika osakond, juhtimissüsteemide osa-
kond, ülikoolidevaheline informaatikakeskus ja raamatukogu ühinesid
TTÜ-ga Tallinna Tehnikaülikooli Küberneetika Instituudiks



Reitsakate dünastia Küberneetika Instituudis: (vasakult) Jüri, Aleksander ja Arnold

Edasine areng toimus juba paralleelselt kahes erinevas harus:

- alusuuringud TTÜ Küberneetika Instituudis ning
- arendustööd aktsiaseltsis AS Cybernetica.

TTÜ Küberneetika Instituut

1998

Ülle Kotta kinnitati teadusdirektoriks

1999

Küberneetika Instituudis loodi Mittelineaarsete Protsesside Analüüsi Keskus CENS (Jüri Engelbrecht)

2002

Haridusministeerium nimetas Eesti teaduse tippkeskusteks aastateks 2002–2007 Küberneetika Instituudi baasil loodud Mittelineaarsete Protsesside Analüüsi Keskuse CENS (juht Jüri Engelbrecht) ja Töökindlate Arvutisüsteemide Uurimise Keskuse CDC (juht Jaan Penjam)

2003

Arvo Eek, Einar Meister, Meelis Mihkla ja Heiki-Jaan Kaalep pälvisid Eesti vabariigi teaduspreemia tehnikateaduste alal töö "Eesti keele tekst-kõne süntees" eest

2004

Arkadi Berezovski pälvis Eesti vabariigi teaduspreemia tehnikateaduste alal töö "Faasisiirdefrondid martensitsetes tahkistes" eest

- 2007
Tarmo Soomere pälvis Balti Assamblee teaduspreemia tööde tsükli "Natural and anthropogenic waves in Baltic Sea" eest
Marko Vendelin sai *Wellcome Trusti* rahvusvahelise grandii loodi süsteemibioloogia laboratoorium (Marko Vendelin)
Tarmo Soomere valiti Eesti Teaduste Akadeemia liikmeks
- 2008
Jüri Engelbrecht ja Marko Vendelin pälvisid Eesti vabariigi teaduspreemia geo- ja bioteaduste alal tööde tsükli "Molekulaarne süsteemne bioenergeetika" eest Valdur Saksa poolt juhitud kollektiivi liikmetena
Haridusministeerium nimetas teaduse tippkeskuseks kuni aastani 2013 Küberneetika Instituudi baasil loodud Arvutiteaduse tippkeskuse EXCS (juht Tarmo Uustalu)
- 2009
instituudi direktoriks valiti Andrus Salupere
Jaan Penjam nimetati teadusdirektoriks
loodi lainetuse dünaamika laboratoorium (Tarmo Soomere)
Hillar Aben (kollektiivi juht), Leo Ainola, Johan Anton ja Andrei Errapart pälvisid Eesti vabariigi teaduspreemia innovaatilise tooteni viinud välja- paistva teadus- ja arendustöö "Integraalse fotoelastsusmeetodi teooria, mõõtmistehnoloogia ja aparatuuri väljatöötamine ja rakendamine jääk- pingete mõõtmisel klaasitööstuses" eest
- 2010
Hillar Aben pälvis Ameerika Ühendriikide teadusliku ühingu *Society for Experimental Mechanics* kõrge autasu – William M. Murray medali, millega kaasnes austav ettepanek esitada ülevaate-ettekannet oma teadus- likes uuringuist nn Murray loeng ühingu aastakonverentsil aastal 2010 Indianapolises
Irina Didenkulova pälvis Euroopa Geoteaduste Ühingu 2010. aasta Pliniusse medali

AS Cybernetica

- 1998
asutati Cybernetica Tartu andmeturbekeskus
- 2000
AS Cybernetica osalusel asutati AS Privador andmeturbetoodete turus- tamiseks
- 2002–2007
osaleti tippkeskuse Töökindlate Arvutisüsteemide Uurimise Keskuse CDC tegevuses
- 2006
asutati seiresüsteemide osakond

2008

asutati infoturbe instituut

2008–2013

osaletakse Arvutiteaduse tippkeskuse EXCS töös

ARENDUS- JA ÜHISETTEVÕTTED NING SPIN-OFF FIRMAD

Kaheksakümnendate aastate lõpuks oli selge, et olemasolev organisatsioon Küberneetika Instituut + EKTA ei ole sellisel kujul uutes majandamistingimustes jätkusuutlik. Ühe võimalusena olemasoleva ajupotentsiaali säilitamiseks nähti ühisfirmade loomist koos välismaiste ettevõtetega ning arendusettevõtete loomist, mis suudaksid end ise majandada. See protsess osutus üsna edukaks. Allpool on toodud valik neil aastatel loodud firmadest. Osa neist jätkavad iseseisvatena, osa on muutnud oma nime ja omanikke, täpsustanud tegevussuundi, mõni on liitunud rahvusvaheliste suurfirmadega ja mõni ka hääbunud. Nende käekäigu jälgimine ei mahu selle raamatu raamidesse, kuid nende juured ulatuvad Küberneetika Instituuti ja me võime ka sellise arengu eest tänada neid inimesi, kes kunagi rajasid Küberneetika Instituudi.

Arendusettevõtte KOMPAKT, 1988

tööstusettevõtete integreeritud juhtimise ja infosüsteemide arendamine, projekteerimine ning evitamine (Raul Tavast)

Küberneetika Instituudi ja USA firma TIW Systems, Inc. ühisettevõtte
INTEX, 1989

arvutustehnika ja tarkvara arendamiseks ja turustamiseks (Ülo Jaaksoo)

Eesti-Šveitsi ühisfirma EKTATEX, 1989

arvutisüsteemide, tarkvara, mõõteaparatuuri ja tehnoloogia arendamine ning tootmine (partneriks Imatex S.A.) (Heinar Tammet)

Eesti-Soome ühisfirma EKTACO, 1989

arvutisüsteemide ning elektroonika ja arvutustehniliste seadmete arendamine, väikeseerialine tootmine ja turustamine (partneriks Datatutkimus OÜ) (Rein Haavel). Tänapäeval on EKTACO AS põhitegevuseks kujunenud riist- ja tarkvaral põhinevate andmekogumis- ning protsessijuhtimissüsteemide väljatöötamine, juurutamine ja hooldamine

AETEC koostöös Austraalia firmaga LABTAM, 1990

(Imre Melnikov) tarkvarasüsteemide väljatöötamisega, liitus hiljem Soome tarkvarafirmaga Profit Software

Univoice OÜ, 1990

mitmesugused IT lahendused, kassasüsteemid, hotellide haldustarkvara, telefonisüsteemid (Olev Künnap)

KAMITRA OÜ, 1991

trükkplaatide tootmine (Heino Lind, Igor Randmäe). On kaasajal edukalt töötav trükkplaaditehas, mis turustab oma toodangut nii Eestis kui välismaal

AS ASSERT, 1991

alustas süsteem- ning rakendustarkvara ning vastavate süsteemide arendamisega, (Niilo Saard), tihedad sidemed välispartneritega viisid liitumiseni Skandinaavia firmaga Mandator Group, käesoleval ajal kuulub AS Fujitsu Service'ile

SIENT OÜ, 1992

peamiselt peenmehaanikale spetsialiseerunud metallitöötlemine. Töötab edukalt allhangete valdkonnas ka tänapäeval (Ants Varjas)

AS ESDATA, 1993

asutajad Küberneetika Instituut, Telecom Finland ja Eesti Telekom tegeles andmetöötuse, andmeside ja internetiteenuse tagamisega (Ants Wõrk) pakus digitaalseid püsiühendusi, interneti püsiühendusi, interneti sissehelistamist, interneti välisühendusi, veebimajutust ning serverimajutust. Liitus Elioniga aastal 2003

InfoSys OÜ, 2003

(Juhan Pruuden) pakub tarkvarateenuseid majutusasutustele, reisikorraldajaile, teenusepakkujaile

GlasStress Ltd., 2003

klaasi jääkpingete määramise meetoodika väljatöötamine, mõõteaparatuuri tootmine ja turustamine (Hillar Aben)

KUI KÜBERI MAJA TAGA MÖIRGASID LÕVID MÄLESTUSI INIMOLENDITE INIMLIKUST KASUTAMISEST

Tiit Kändler (küberlane 1972–1980)

“Matemaatika on alati eksisteerinud ja avastatud inimeste poolt.”

Paul Dirac (1902–1984), inglise füüsik

“Pythagoras ütleb, et arv on kõigi asjade algus; tööpoolest on arvude seadus võti, mis keerab lahti universumi saladused.”

Paul Carus (1852–1919), saksa-ameerika kirjanik

“Eestis võib olla maailma parim allveelaevade leiutaja, aga Eesti ei ole riik, kus allveelaevatööstus iialgi saaks areneda.”

Boris Tamm (1930–2002), eesti küberneetik



Tiit Kändler

See kevadpäev aastal 1970 oli soe ja päikeseline. Vähemasti tundub mulle nõnda tagantjärele, kui mõtlen sellele, kuidas Lenini puiestee raamatukogu majja tindipotiplekiga rikastatud aurumasina kõrvalt uksest sisse astusin. Mitte et minna raamatukokku, vaid et minna ja kohtuda füüsika sektori juhataja Endel Lippmaaga ja püüelda, et saaksin seal teha oma kolmanda kursuse töö.

Et sihuke koht üldse olemas oli, seda kuulsin Tartus vilksamisi Tõnu Karu käest, kes õppis must füüsikat kursuse eespool ja soovitas kangesti, et mine ja vaata, sest tema oli end juba kuidagi sinna sisse saanud. Et see oli tegelikult Küberneetika instituut, seda teadsin ka, ja juba ammustest – oma arust – aegadest.

1.

Elasin koolipoisina majas Lenini puiestee 4, kus all oli ja kummalisel kombel on siiani Energia kohvik. Mälestusena ajast, mil selle maja ehitas Eesti Energia. Kui käisin Tallinna II keskkoolis – kool oli nii lähedal, et jäin alailma pea-aegu et hiljaks –, oli seal, kus praegu ilutseb maja, milles alul projekteeriti, lõpul aga maadevahetusega sahkerdati, suvetsirkus. See oli võimas asi, kui kevadel tuli Moskvast ЦИПК ja tõmbas hiiglasliku puldantelgi üles. Veeti kohale karud ja tiigid ja lõvid ja pärdikud ja mustkunstnik Kio ja kloun Popov, ja nende – see tähendab muidugi karude ja lõvide – mõirged täitsid mu koolipoisiunenägusid, päeval aga vudisid läbi hoovi kurjade pilkudega liliputid, kellest tuli hoiduda võimalikult kaugele, sest tundus, et nad kindla peale rebivad käest hiinaka ehk uhke hiina taskulambi, mille isa mulle oma Moskva komandee-

ringust kaasa toonud oli ja mille valgusvihu sai pimedal õhtul kenasti mistahes korteri aknast sisse lasta. (Karud ja tiigrid elasid umbes seal, kus praegu on raamatukogu internetituba.)

Ühesõnaga – see oli tegelikkuses inkarneerunud küberneetiline süsteem, mille terminit ma tollal muidugi ei teadnud.

Siis läks tsirkus ära, ja jäigi kusagile. Kopad löödi maasse ja ennäe – platsi äärde, mis pärast sai nime Punaste Küttide väljak, kerkis maja aastaks 1963, mille kohta hoovil öeldi, et see olevat mingi küberneetika. Mina õppisin sel ajal koolis parasjagu Nikita uue programmi hoogsal toel eelkõige tootmisega seotud alasid – meie puhul tähendas see autolukusseppa – ja pingutasin ühes teiste püüdlike koolilastega lõpetama keskkool ennetähtaegselt kümne aastaga. Aga küberneetikast olulisem oli raamatukogu maja, mis sai valmis samal ajal, sest selle taga hoovis sai mäest all palli taguda, kuni lõpuks puust plank ette löödi.

Nii et küberneetikaga on mul vägagi ammune vahekord, või vähemasti suhe. Nüüd aga edasi aastasse 1970. Lippmaa vaatas mulle küll otsa, nagu tahaks vastu seina naelutada, aga kauba saime siiski kokku ja suvepraktika paiga sain, mis tähendas mitmetest kohtadest kokku kirjutamist teemal, et mis asi see elu ikka on.

2.

Too aeg oli selle poolest huvitav, et meie füüsikutest suhtluseltskond Tartu ülikoolis võttis asja üsna laialt, ja luges kõike ja käis ka sihukestel loengutel nagu filosoofia ajalugu, mille eest filoloogid, kes pidi käima, kuid neid loenguid ei sallinud, ei silma otsas ega kõrva sees, pidasid meid üsna napakateks. Mida me muidugi ka olime, sest kuulasime ka noore Kangilaski kunstiajaloo loenguid ja lavastasime Beckett'i "Godot´d oodates", mille keski meist oli ise vist vene keelest tõlkinud ja saavutasime tunnustuseks, et Unt ja Hermaküla tulid meie proovi vaatama, mille jooksul esimene õige mitu korda raskelt ohkas ja teine vaikselt küsis, et kus see ootamine on.

Too aeg oli omamoodi küberneetiline tõepoolest. Äsja, 1969. aastal oli Boris Kaburi tõlkes ilmunud Loomingu Raamatukogus Norbert Wieneri "Inimolendite inimlik kasutamine. Küberneetika ja ühiskond" (pealkirja esimene lause küll esikaanele teed ei leidnud), mis sai mulle eredaks valgustajaks. Vene keeles ilmusid umbes 1970 Erwin Schrödingeri "Mis on elu?" ja tagatipuks 1972 Charles Percy Snow "Kaks kultuuri", mis olid Tartu raamatupoodidest kenasti ostetavad.

Et 1968 oli Praha kevad, tasub muidugi ka meenutamist. Ja seegi, et ülikooli kohvikus oli 1969 ja 1971 näitus, kus teiste seas Raul Meele pildid – osutamaks küberneetilisele võimalusele eri kultuuride kokkupuutel sündivast

imest (sünergia sõna tuli hiljem, siis olid õhus pigem Ilya Prigogine´i dissipaatiivsed struktuurid ja iseorganiseeruvad süsteemid).

Nojah, siis tuli 1972, mil õpetasin Lippmaa koostatud biofüüsika (teoreetilise füüsika) eriprogrammiga Tartu Riikliku Ülikooli, ja olingi Küberneetika instituudi teadur valmis. Olin seda seni, kuni Lippmaa aastaks 1980 KBFI valmis tegi.

Kui palju ma seal füüsika sektoris tajusin seda suuremat küberit, on iseasi. Maandusin lõpuks istuma nn teoreetikute tuppa, mis raamatukogu suitsetamisruumist näpistati, ja seal olid sihukesed väsimatud arvutajad nagu Vaige Salum ja Indrek Tart, kelle jutud oma malgolite ja algolite ja kes-teab-veel-milliste kollide üle ajasid ikka hirmu nahka küll, ent valgustasid veidi ka ülemiste korruste elu. Siiski oli saatus helde – ja Vaige lõpmata hea inimene ja Indrek jälle lõpmata kirjandushuviline inimene, nii et polnud sel arvtütjutlustamisel viga midagi.

3.

Aga olgu muuga kuis oli, tol ajal – ja loomulikult nüüd veel enam – olin kindel, et eks direktoritega oli meil ikka roppu moodi vedanud küll. Suhtlesin ju oma õpinguaegsetega ülikoolist, nii füüsikute kui lüürikutega, ja kuulasin silmad punnis nende ametkondlikuks kasutamiseks mõeldud pajatusi oma instituutide elust. Mul polnud neile öelda vastu muud, kui et näe, mis seal kõnelda, meil on nõnda, et Alumäe enam direktor pole, aga mitte ainult tema eestiaegne vaim, vaid ka ihu ringleb meie vahel ringi ja kaitseb meie hingi. Ja et Boris Tamm ei jää talle küll teps mitte alla selles, et vaadata maailma laialt, tõeliselt küberneetiliselt.

Pärast lõpetamist 1972 juhtus minuga sihuke lugu, et sai veel üliõpilasmalevas suvel töötatud ja seal miski jama isetegevusülevaatusel kokku keeratud, mille pühendasime tol ajal populaarsele NSVL mingile aastapäevale, vist oli see isegi 50. Ühesõnaga, keisrikoda sai solvatud ja mina olin siis vabatahtlik pealik, kes vastutab, sest teised veel nühkisid oma lõpetamise poole.

Mis seal ikka, pole mõtet ebameeldivatesse üksikasjadesse laskuda, aga ülikoolil oli siis sihuke tore rektor nagu Arnold Koop, ja too polnud kunagi kade mees ning eks selgi korral saatis miski lahke kirja TA Küberneetika Instituudi direktorile teele, et näe, mis poiss tegi, pange kinni või laske lahti. Miskipärast sattus see kiri just Alumäe lauale, kes teab, ehk oli Tamm kuskil puhkusel, ja tema muidugi, kujutan ette, et veidi sissetõmbunult muigas nagu tal kombeks oli, ja suisa mõnuga saatis selle kähku alla Lippmaale, ja Lippmaal muidugi ka lõbu laialt – mida ta muidugi otse välja ei näidanud –, kui ütles, et kui tuleb järgmine NSVL 50. juubel, siis ärge nii enam tehke. Ja ega ei tulnud ja ei teinud ka.

Teinekord jälle oli Alumäel, siis juba akadeemia liini pidi (käsuliini sõna oli siis tundmata), juhtkommunistidega jama Teadlaste Maja noortekomisjoni ja

noorkunstnike korraldatud Harku näitusega 1975, mis nüüdseks Eesti kunsti-ajaloos sees. Ja siis tagatipuks veel 1978 õnnestus raamatukogu fuajees püsti panna noorte arhitektide näitus, mille peale üle-tee-kommunistid hoiatasid, et akadeemia ärgu toppigu end riiklikusse kunstipoliitikasse, ja eks neil oli ju õigus solvuda ka, sest kes siis tahaks, et leivakannikas käest võetakse ja töötuks jäädakse.

Aga seda lugu teavad paremini Andres Kollist ja Tõnu Karu, kes meiltpoolt laskeavale viskusid, aga nagu näha on siiani terved ja tublid mehed.

Mis muidugi tänu Nikolai Alumäele ja Boris Tammele, ja Hillar Abenile, selge see. Aben omakorda sai ju teadlaste seas kuulsaks sellega, et kärutas puhvetist minema selle suure plekist silindri, mille peale igal hommikul kinnitati marli, mis küllap oli näinud veel Nikolai II õndsaid aegu, ja sellele marlile pandi siis kohvipuru meenutavat ainet, ja siis ronis sihukese pleklist moon-damismantlit meenutava valgevõitu kitliga heasüdamlik vene tädi ke logisevale toolile, kuuma vee plekkämber käes, ja kus siis kallas sinna vee peale, nii et pritsis laeni! Kohv sai vägev ja vett sai juurde kallata õhtani. Nojah, aga Aben ei hoolinud muinsuskaitsest mitte üks raas ja võitles lõpuks välja, et kohast sai ikka korralik kohvik, ja seda siis hakkas külarahvas nimetama Abenkohvikuks. Selle kohviku tagaseinale pandi Raul Meele õlimaal, ja see meeldis tädile, kes enne oli kuuma vett kohvipaksule kalkanud, nüüd aga koristajana päevi õhtasse veeretas, nii väga, et ühel heal päeval (hommikul, õhtul?) selle sooja klooriveest immutatud kaltsuga üle pesi, mille peale Raul kangesti solvus, sest ta ei teadnud, et kohe-kohe-varsti läheb moodi happening ja muu sihuke värk. Nojah, aga see pilt on siiani Abeni ja Meele auks ja rõõmuks seinal olemas.

4.

Nüüd muidugi arvab lugeja, et näe, teadusest ei pajatagi vennike midagi, aga mina jälle lohutan teda, et püüdsin kirjeldada, kuidas see Eesti esimene küberneetika omas ajas ja omal taustal oli, ehkki ega neist tollastest aegadest nooremal rahval polegi võimalik aru saada. Et asi oleks ebaküberneetiliselt selge, teen kokkuvõtte.

Et üles leida teadus sealt, kuhu loodus on selle peitnud, peab teadlasel olema vabadus mõelda. Raha ei pruugi olla, kuid mõttevabadus peab olema. Tol ajal, mida kirjeldan, oli imeasi, et sihukesed mehed nagu Alumäe, Tamm ja Aben suutsid instituudis mõttevabaduse tagada (ja tagama seda pidi, sest kübentroopiagi muudkui aga igasugu jama isepäi suurendama kipub).

Lähemalt ja sisulisemalt sain Boris Tammega õige mitu korda vestelda, kui juba teadusajakirjanikuna intervjuueerisin teda 1995. ja 1996. aastal. Tema tundis muret arendustegevuse olematuse üle ja rõõmu muusika võluvast matemaatikast. Ega minusugune teadnudki, et Tamm Villem Kapi juures heli-

loomist õppis. Rääkisime Gershwinist ja Pärdist, kes Ivar Peterseni juures oli matemaatikat konsulteerinud, ja Lauterist ja M-3 nimelisest arvutist. "Pärt meeldib mulle, sest Pärt näeb muusikas mingit matemaatilist struktuuri," ütles ta. Loen neid Boris Tammega vesteldud lugusid ja mõtlen Alumäe sirgele kehale ja hingele ja silmavaatele ja kuigi on veidi kurb, et mida kõike ei osanud neilt saada, on ometi meel küberneetiliselt helge – osaline ju servapidi oldud sai. Just osaluse oskamist on mu meelest need mu elu kolm esimest tõelist juhti õpetanud.

5.

Aga et jutt ei lõpeks liialt härdalt, siis saab minna Lippmaa kabinetti TA Küberneetika Instituudi füüsika sektoris, *anno* 1980, ja võtta üks mehine naps küberi ja selle direktorite terviseks – tõsi küll, *anno* 2010 ja Teatri Puhvetis.

MILLEST
MÖTLEVAD
TEADLASED

Kübarneetika

Ajakiri "Horisont" nägi ilmavalgust 1967. a. See ajakiri on kujunenud Eesti teadlaspere lahutamatuks lugemisvaraks ja suhtlemisallikaks üldsusega, kus leiavad peegeldust teadussaavutused ja -sündmused nii Eestis kui ka üle laia maailma. Omaette rubriigiks on pikemad intervjuud tippteadlastega ning neid on Instituudi seinte vahel töötanud palju. Sellesse peatükki on kogutud "Horisondi" veergudel viimasel ajal ilmunud intervjuud Instituudi juhtivate teadlastega, millest erandiks on 30 aasta eest ilmunud kolme mehe mõtted. Enamik intervjuusid pärineb Rein Veskimäe sulest. Küsimusi tippteadlastele on palju ja eks vastused peegeldavad nii erialaseid saavutusi kui ka tippteadlastele omast laia silmaringi ning nende tegemisi teaduse arendamisel Eestis, mitte unustades teadustegevust laias maailmas.

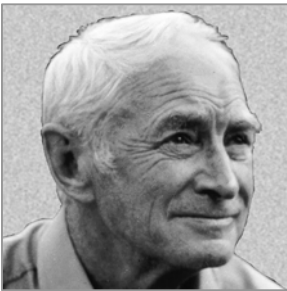
Instituut tänab "Horisonti" ja eelkõige Rein Veskimäed nende artiklite avaldamisloa eest.

Instituut 50

Arvutiteadus on viimaste aastakümnetega seitsmepenikoorma saabastega edasi astunud. Küberneetika valdkonnas on palju ära tehtud ka Teaduste Akadeemia Küberneetika Instituudis.

Mida nimelt?

Meenutavad akadeemik Nikolai Alumäe – instituudi direktor aastail 1960–1969, akadeemik Boris Tamm, instituudi asedirektor aastail 1960–1969, ja direktor kuni 1976. aastani akadeemik Hillar Aben, kes juhib kõnesolevat teadusasutust praegu.



Nikolai Alumäe



Boris Tamm



Hillar Aben

B. TAMM: 1960. aasta 1. septembril loodi Nõukogude Liidu esimene Küberneetika Instituut. See hakkas tegutsema meie Teaduste Akadeemia tiiva all ja tema asukohaks sai Tallinn. Verinoore instituudi ohjad anti akadeemik Nikolai Alumäe pihku, kes küll ise polnud küberneetik, vaid matemaatik-mehaanik, kuid mõistis suurepäraselt nüüdisaja arvutustehnika ja küberneetika probleeme. Esialgu oli koosseisus 30–40 inimest, enamikus sugugi mitte kõrgete kraadidega, aga see-eest noored ja küllalt tarmukad, täis entusiasmi.

N. ALUMÄE: Too aeg oli ärkamisaeg. Päris tühjale kohale instituut siiski ei tekkinud. Programmeerimiskunstiga vabariigis juba tegeldi. Tartu Riiklikus Ülikoolis käis hoogsalt noorte matemaatikute ettevalmistamine Ülo Kaasiku ja Leo Võhandu eestvedamisel. Hiljuti pühitses oma 20. sünnipäeva Tallinna Polütehnilise Instituudi automaatikakateeder, mille hälli juures seisid Hanno Sillamaa ja Heino Ross. Tähendab, ka TPI-s oldi valmis uuteks ettevõtmisteks. Professor Aleksander Voldek, hilisem akadeemik, koondas väga hea meeskonna Eesti NSV Rahvamajandusnõukogu Elektrotehnika Instituuti, mida juhtis Arnold Kress. 1959. aastal suunati sealt Moskvasse, Leningradi ja Kiievisse

end arvutustehnika alal täiendama praegused tuntud teadusmehed Andri Ariste, Kalju Tinn, Ülo Kess, Enn Tõugu, Harry Tani, Elmar Vaus ja teised. Nad läksid selleks, et tulevikus midagi ise ära teha.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia kaudu olid Moskvas ja Leningradis aspirantuuris Boris Tamm, Kalju Leppik, Mark Sinisoo ja Raul Tavast – mehed, kes on andnud Küberneetika Instituudile tooni algusest seniajani.

Tõsi, küberneetikud oleksid võinud jäädaagi Elektrotehnika Instituudi lipu alla, aga Teaduste Akadeemia tolleaegne asepresident Gustav Naan tuli välja patuse mõttega luua Küberneetika Instituut. Seda mõtet toetasid Eesti NSV TA president Johan Eichfeld, samuti asepresident Arnold Humal. Nii sai väike kollektiiv kokku pandud. Paari aasta pärast jõudsimise üksmeelsele seisukohale, et oli astunud õige ja vajalik samm.

Ka instituudi kandvamad sambad pandi peagi paika. Ivar Petersen tuli meile TPI-st. Instituudi esimesest päevast peale on ta oma õlgadel raskeid koormaid kandnud ning täidab peamatemaatiku ülesandeid praegugi. Pingeoptik Hillar Aben hakkas instituudis tegelema linna optimaalse planeerimisega. Kui sai valmis esimene arvuti M3, tuli meie juurde ka selle peategija Arnold Reitsakas. Nüüd on ta juba peaaegu 20 aastat arvutuskeskust juhtinud ning milised poleks ka arvutid olnud, alati neid parimas korras hoidnud.

H. ABEN: Ja kui aspirantuuri saadetud mehed pärast erialast väljaõpet koduvabriiki tagasi tulid, pandi põhirõhk instituudis programmvarustuse väljatöötamisele. Selleks oli oma põhjus.

Seoses arvutustehnika arendamisega kulutatakse veerand vahenditest arvutite valmistamisele ja kolmveerand programmvarustuse peale. Just viimane on arvutite efektiivse kasutamise sõlmküsimus, sest iga spetsialisti sooviks on esitada arvutile oma ülesandeid lihtsalt omandatavas keeles. Seepärast oligi kohe algusest peale tähelepanu keskpunktis tarkvara loomine.

B. TAMM: Kuivõrd instituut on tehnilise küberneetika kallakuga, ei saa mööda minna sellestki, et oma olemasolu kahekümne aasta jooksul on ta olnud juhtivaid asutusi Eestis eeskätt kodumaise arvutustehnika edendamisel ja rakendamisel. Praegu tegelevad selle evitamisega juba paljud vabriigi organisatsioonid ning seetõttu võib Küberneetika Instituut rahumeeli pühendada end teatud kindlate küsimuste sügavuti uurimisele.

Üleliidulises ulatuses on instituut etendanud olulist rolli arvutite Minsk 22, Minsk 32 jt juurutamisel. Et erinevad arvutid saaksid koos töötada, tuli nende jaoks teha uusi seadmeid ja programme. See kõik andis omal ajal paljudesse miljonites rubladesse ulatuvat majanduslikku efekti.

1970. aastate algul lülituti esimesena ka EC-seeriasse kuuluvate kolmanda põlvkonna arvutite evitamisega. Uuringute tulemusena tehti sääraseid täiendusi, mida hakati kasutama paljudes ettevõtetes.

N. ALUMÄE: Instituudi algaastail vajasid meie käsutuses olnud primitiivsed arvutid lihtsaid programmeerimiskeeli. Malle Kotli teeneks oli algoritmilise keele MALGOL loomine. Veidi hiljem koostas Moskva Riikliku Ülikooli lõpetanu Vello Kuusik programmeerimiskeele VELGOL, peamiselt majanduslikke arvutusi silmas pidades. Need keeled said Eestimaal ja mujalgi küllalt populaarseks.

Silmapaistvate tulemusteni jõudis Boris Tamm koos Juhan Pruudeniga. Nende loodud programmeerimissüsteem numbrilise juhtimisega lõikepinkidele oli 1960. aastatel Nõukogude Liidus täiesti uudne ja tõi autoreile 1965. aastal Eesti preemia.

Tammel ja Pruudenil läks esimesena korda koostada loomulikule keelele lähedane programmeerimiskeel, mille abil saab väga hõlpsasti kirjeldada lõiketera soovivat liikumist detaili töötlemisel. Samuti õnnestus neil luua säärane seade, mis nimetatud keeles üleskirjutatud töötlemisprotsessi mudeli koostab ja arvuti kaudu frees- või lihvpingile valmis juhtprogrammi väljastab. Hiljem loodi veelgi täiuslikum programmeerimissüsteem esialgsega võrreldes hoopis keerukama kujuga detailide valmistamiseks.

H. ABEN: Niimoodi anti inseneride käsutusse mugavalt kasutatavad programmid inseneriülesannete lahendamiseks peamiselt masinprojekteerimise teel. Nende tööde jätkuna loodud integreeritud programmeerimissüsteem on kujunenud sotsialismimaades kasutatava masinprojekteerimise tarkvara üheks alustoeks ja selle vastu tuntakse huvi ka mujal maailmas.

B. TAMM: Jah, palju arvutiga midagi ära ei tee. Proovige võtta pilti fotoaparaadiga, millel pole ees objektiivi ega sees filmi. Midagi ei tule välja. Kalli aparraadi all võivad seista tuhanded rublad täiesti asjata. Sama käib arvutite kohta: kui pole loodud vajalikku tarkvara, jäävad kasutamata juba miljonid.

Silmapaistvate tulemusteni tarkvara loomisel on jõudnud Enn Tõugu, kes 1970. aastail töötas välja nn moodulprogrammeerimise meetodi, tehes niiviisi väga palju kasulikku kogu meie maa arvutustehnikale originaalsete programmeerimissüsteemide väljatöötamise ja evitamisega. Kordaksin kunagi varem väljaöeldud mõtet: ei ole kasu orkestrist, kui pultidele pole asetada noote, mille järgi mängida. Just Tõugu juhendamisel tegutseval teadlaste rühmal läks korda luua uutele arvutitele baastarkvara näol niisugused noodid, mis muutsid miljoneid rublasid maksva riistvara tootvaks jõuks.

Sellesama eesmärgi nimel nuputavad Vello Kuusik, Henn Sarv ja Leo Heinla, kelle loodud ja evitatud nn. ankeetkeeltega programmeerimissüsteeme kasutatakse nüüd Nõukogude Liidu paljudes asutustes majandusülesannete lahendamisel.

H. ABEN: Ivar Peterseni juhtimisel loodud programmide pakett on seni täiuslikem N Liidus ja üle antud viiekümnele erinevale organisatsioonile. Praegu tut-

vub paketiga üks Soome arvutifirma eesmärgiga kasutada seda teisel pool lahte.

B. TAMM: Nüüd ja tulevikus jääb tehnilise küberneetika huviorbiiti tootmis-tegevuse juhtimine. Säärase ülitõsise loominguilise ülesande lahendamiseks tuleb koostada eeskätt tootmisprotsessi matemaatiline mudel. Kuna terves maailmas tegeldakse nimetatud küsimusega alles 10–15 aastat, on vaja ees-märgi saavutamiseks lahendada puhtteaduslikke probleeme, teha koguni fun-damentaaluuringuid. Ka Küberneetika Instituudis lööb selles valdkonnas edu-kalt kaasa rühm teadlasi ja insenere, kes on praeguseks välja kasvanud oma-ette juhtimissüsteemide sektoriks eesotsas Raul Tavastiga.

N. ALUMÄE: Juba 1967. aastal anti instituudile Kohtla-Järve formaliinitsehhi juhtimise väljatöötamise eest Nõukogude Eesti preemia. Hiljem rakendati seda juhtimissüsteemi paarikümnes Nõukogude Liidu formaliini tootvas tehases.

B. TAMM: Seepärast oli tulemus äärmiselt julgustav. Praegu ollakse niikaugel, et Kohtla-Järvel hoitakse võimsa arvutisüsteemi abil inimese täieliku kontrolli all tervet karbamiiditsehhi.

Kaks aastat tagasi hinnati seda tulemust kõrgelt ka Rahvusvahelisel Auto-maatjuhtimise Föderatsiooni kongressil.

Ja ega nende poolt tehtu seisne ainult Kohtla-Järvel asuva kombinadi auto-matiseerimises. Väga palju on tehtud ka tootmisprotsesside juhtimissüsteemi-de projekteerimise aluste väljatöötamiseks kogu meie maal.

H. ABEN: Eks kordaminekuid ole veel teisigi, aga kogu arvutustehnika raken-dustegevus sai alguse ikkagi mehaanikutest. Just neil eesotsas akadeemik Ni-kolai Alumäega oli esmane vajadus kasutada keerukate ülesannete lahenda-miseks arvuteid.

B. TAMM: Teaduslikult kvalifikatsioonilt ongi mehhaanika- ja rakendusmate-maatika sektor instituudis üks tugevamaid. Sellesse kuuluvad eranditult kõik akadeemik Alumäe enda õpilased. Neist neli – instituudi direktor Hillar Aben, sektorijuhataja Uno Nigul, vanemteadur Jaan Metsaveer ja praegune TPI ma-temaatikakateedri juhataja Leo Ainola – on doktorikraadiga mehed, kellele peagi lisa tulemas.

Selle sektori panus mehaanikateadusse, eeskätt õhukeseseinaliste koorikute ja lainelevikuprotsesside teooriasse ja praktikasse on pälvinud rahvusvahelise ja üleliidulise tunnustuse. Hillar Abeni näol on meil olemas veel väljapaistev teadlane fotoelastsusteooria alal. Tema ja Uno Niguli monograafiad on ilmu-nud Nõukogude Liidus, Ameerika Ühendriikides ja mujal ning alati poelettidelt kiiresti kadunud.

H. ABEN: Kuni käesoleva aasta veebruarini kuulusid meie instituudi koosseisu veel füüsika ja biokeemia sektor, kus uuriti edukalt tuumamagnetresonantsi ning analüüsiti ja sünteesiti fermente. Nüüd jätkuvad sellesuunalised uuringud Eesti NSV TA Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudis.

B. TAMM: Niisugune füüsika sektor võis Tallinnas jalad tugevasti maha panna ja välja kujuneda vaid Küberneetika Instituudis. Seda eriti sellise teadusmehe ja organisaatori juhtimisel, nagu seda on akadeemik Endel Lippmaa. Uue instituudi sünni võib aga pidada viimaste aastate suurimaks saavutuseks kogu Eesti NSV Teaduste Akadeemia jaoks. Eks selles seisne ka Küberneetika Instituudi oluline ühiskondlik missioon.

H. ABEN: Ühest viimaste aastate kordaminekust instituudi elus tuleks veel rääkida. Meie maal ületab nõudmine väikearvutite järele kümme korda pakku-mise. Lünga täitmiseks koondati Küberneetika Instituuti enamik vabariigi selle ala asjatundjaid eesotsas Harry Tani ja Andri Aristega, kes olid juba arvutite loomise eest saanud Eesti teaduspreemia. Moodustasime erikonstrueerimis-büroo Kalju Leppiku juhtimisel. Praegu projekteerime ja konstrueerime mikro-arvuteid.

B. TAMM: Seda oli vaja ilmtingimata teha seoses mikroprotsessorite ilmumi-sega maailmaareenile. Juba 1974. aastal sai välja töötatud väikearvutite siht-programm, et kaasa aidata mini- ja mikroarvutite arendamisele vabariigis ja Nõukogude Liidus tervikuna.

Vaatamata senistele kitsastele tingimustele on valmis ehitatud hulk uusi ja unikaalseid seadmeid mitmetele ülilmoodsatele arvutisüsteemidele mitmesu-guste rakenduste jaoks rahvamajanduses.

Agaralt löövad kaasa noored teadusmehed, keda instituut on välja valinud TRÜ-st ja TPI-st juba tudengipõlves. Nende õpetamisele aitavad suuresti kaasa instituudi enda teadlased, kellest mitmed on õppejõududeks TPI-s.

H. ABEN: Head meelt teeb veel see, et oleme juurde saanud võimsad arvutid. Praegu häälestatakse arvutit EC1052, millega saab lahendada suuremahulisi masinprojekteerimise, astrofüüsika ja muid ülesandeid.

Osaliselt on juba kohale saabunud üks esimesi NSV Liidu neljanda põlvkonna arvuteid ELBRUS, mis jääb meie juhtarvutiks arvatavasti aastani 2000.

B. TAMM: Kakskümmend aastat pole instituudi elus pikk aeg, kuid neil noorus-aastail teeniti välja neli Eesti teaduspreemiat. Täheandab, põhirõhk oli õigesti asetatud tarkvara väljatöötamisele, mille vajalikkust teaduse ja tehnika aren-gus pole alati ja mitte igal pool mõistetud.

N. ALUMÄE: Selle ajaga on Küberneetika Instituudil olnud head suhted teiste meie vabariigi uurimisasutustega. Tartu Riikliku Ülikooliga, Tallinna Polütehnilise Instituudiga, Elektritööstuse Planeerimis- ja Juhtimissüsteemide Teadusliku Uurimise ja Projekteerimis-Tehnoloogilise Instituudiga ja Ehituse Teadusliku Uurimise Instituudiga, kus samuti tehakse tõhusat tööd küberneetilise mõtte ja arvutiteaduse arendamisel.

Kahekümne aasta jooksul oleme üheskoos saavutanud seda, et küberneetika viljad on jõudnud ka humanitaarteadlasteni, näiteks filoloogide juurde Keele ja Kirjanduse Instituuti.

Oluline ongi just see, et küberneetilised vahendid ja meetodid leiaksid üha enam rakendamist kõikidel elualadel ning Küberneetika Instituudil süveneksid sidemed kõigi teadusasutustega ja ka ulatusliku inimtegevuse väljaga, mida nimetame praktikaks.

MIKS MA MÖTLEN NII, NAGU MA MÖTLEN?

Horisont, 5/2005, Rein Veskimäe

Eesti Teaduste Akadeemia kauaaegse presidendi ja praeguse asepresidendi, akadeemiku ja professorist õpetlase JÜRI ENGELBRECHTI mõtteid Akadeemiast, teadusest ja teadlastest, ühiskonnast ja Eestist ning iseenda tegemistest.

Horisondile intervjuu saamiseks esitas Rein Veskimäe mulle hulga küsimusi. Ja olen ka endale ise neid esitanud. Endale küsimuste esitamine on hädavajalik, eriti minu vanuses.



Jüri Engelbrecht

Inglise kirjanik Dylan Thomas on öelnud, et tuleb kuulata, kuidas aeg möödub. Ometi ei tohi lasta ajal mööduda, vaid hoopis mõelda, kuidas panna aeg tööle ning tegemised tähtsuse järjekorda. Välisimpulsid on teinekord olulised – nii kirjutatakse neid ridu Torinos, seljataga hommikune jalutuskäik kõrgel mäel asuva kiriku – Superga juurde, mille trepilt avaneb hingesööbiv vaade Alpide panoraamile! Olen käinud seal viimasel ajal pea igal kevadel ning alati saanud elamuse looduse ja inimtegevuse harmooniast.

Nüüd aga asja juurde.

Kümme aastat Teaduste Akadeemia presidendina. Sellest tegite kokkuvõtte eelmise aasta jõulukuul ilmunud esseede kogumikus "Mötterajad" (Jüri Engelbrecht. Mötterajad. Eesti TA, Tallinn, 2004).

Tõepoolest, püüdsin oma mõtteid ja meenutusi seal üheks tervikuks vormida. Samuti oli mul meeldiv kohustus teha möödunud aastatest kokkuvõtte Akadeemia üldkogu ees tänavu aprillis. Seda üle rääkides, läheks vastus siinkohal väga pikaks. Lühidalt summeerides – Akadeemia on osa teadusest Eestis ja tema kohus on tippteadlaste sõltumatu koguna ühendada akadeemikute vajadused nii teaduse edendamisel kui teadustulemuste suunamisel rakendusteks Eesti hüvanguks.

"Mitte alahinnates teiste institutsioonide, teadusasutuste, liitude ja ühingute tähtsust, on Akadeemial eriline koht – väljapaistvate teadustulemuste põhjal valitud tippteadlaste koguna on tal vastutus teadusmõtte harmoonilise arenemise eest riigi ja rahva elus. Selline vastutus on sätestatud seadusega, kuid veelgi olulisem Akadeemia koha määramisel on akadeemikute endi tegevus ja tahe." (Mötterajad)

Akadeemia on osalenud paljude meie teaduselu suunavate ametlike dokumentide ettevalmistamisel ja juhtinud tähelepanu kitsaskohtadele. Näiteid võib tuua palju. Seda on tehtud teadus- ja arendustegevuse strateegia väljatöötamisel ja Eesti teaduse tippkeskuste moodustamisel. On antud hinnang energeetika arengule, sealhulgas kurikuulsa NRG tegevusele, ja ajaloo objektiivsele käsitlemisele. Tõsi, Akadeemial pole enam uurimisinstituute, välja arvatud Underi-Tuglase Kirjanduskeskus, ning puudub seega vastutus otseste teadusuuringute eest. Isiklikult leian, et töötava süsteemi lõhkumine toimus kiirustades. Paljud pidasid süsteemi nõukogulikuks, jättes tähelepanuta algideed, olgu nendeks Max Plancki ühingu eeskuju Saksamaal või väiksemate riikide – Austria, Hollandi, ka muide Rootsi – kogemused. Küsimus pole nii võrd süsteemis, vaid eeskätt inimestes ja paindlikes sidemetes.

Ma toetan väga tugevaid ülikoole ning ei saa aru tahtmisest neid aina juurde luua. Siin tuleb esile inimeste, eeskätt heade (loe: tarkade – *R. Veskimäe*) inimeste probleem. Neid meil tõesti napib ning siin-seal on vohamas keskpärasuse sündroom. Ja veelgi hullem – Eestis ametlikult professori tiitlit omavast veidi üle viiesajast inimesest on pooled teadusmaailmas tundmatud! Selles peitub peamine argument heade inimeste koondumisest tugevatesse keskustesse, lugedes nende kohustuseks ka teadmiste edasiandmise üliõpilastele. Nii et argumente on *pro* ja *contra*.

Muide, hiljuti kuulsin, et kümmekond aastat tagasi oli terav vaidlus Berliinis – kas 3,4 miljoni elanikuga linnas on tõesti vaja kolme ülikooli, ehk piisab kahest? Uurimisinstituutide arv on aga Berliinis aukartustäratav. Otsus oli siiski kolme ülikooli säilimise kasuks. Vaidluse tulemusena on ühel neist nüüd tuli-uus moodsate laboratooriumidega linnak Schönefeldi lähedal Adlershofis. Siin on ka selgelt näha meie teine piirav tingimus – vahendid teadus- ja õppetöö korraldamiseks. See sunnib meid väga tõsiselt mõtlema tulevikule. Akadeemia pidas paar aastat tagasi noorte järel doktorite konverentsi, et kuulata homsete tegijate häält. Sõnum oli väga selge – noorte inimeste arvates on kõige olulisem teadustöö kvaliteet ja tase. Seda oli akadeemikutel rõõm kuulda, kui märki õigest teest. Oleks ainult taolisi noori inimesi rohkem!

Möödunud 10 aasta jooksul olin osaline mitmetes otsustuskogudes, küll *ex officio*, küll lihtsalt teadlasena või teadusjuhina.

“Neist tahaksin eraldi märkida Teaduskompetentsi Nõukogu (TKN), mille esimees oli mul au olla 6 aastat. See õhkkond ja vaim, mis seal valitses, oli erakordne. See oli missioonitunne, ja professionaalsus, ja vastutus ja palju muud. Ja me vaidlesime palju, sest ainult nii sai leida ühisosa ja jõuda tulemuseni. Otsustamine, eriti kui see puudutab raha, ei too sõpru juurde – see on üldtuntud tõde. Nii see ka oli, kuid samal ajal ütlesid paljud tõsised teadlased, et TKN-i töö oli parim, mida nende kitsenduste juures teha sai. See oli suur toetus, sest tuli inimestelt, kellest väga lugu pean.” (Mõtterajad)

Hea meel on sellest, teaduskompetentsi nõukogu viis sihtfinantseerimise kvaliteedihinnangutele, et tekkis järel doktorite institutsioon, et on olemas T&A strateegia. Loomulikult ei läinud kõik libedalt, nii sai näiteks paar aastat tagasi võimust keskpärasus, mis nõudis häälekalt raha kvaliteedinõuetele mittevas-tanud teadusuuringutele. Tänapäeva Euroopa teadusruumis oleks see mõeldamatu, sest arusaam eesliiniteaduse olulisest osast on ka riigijuhtide poolt akt-septeeritud.

Tippkeskused ja nende roll.

Teadustöö tiptase on alati olnud oluline. Viimasel ajal on aga süvenenud arusaam, et kohtades, kuhu on kontsentreerunud teaduspotsentiaal, on ka oodata palju uusi tulemusi.

“Maailm muutub kiiresti ja võib-olla on põletavaim küsimus mitte superarvutid ega disainitud ravimid või implantaadid, vaid hoopis see, kuidas inimene kiirete muutustega hakkama saab. See tundub teinekord väga keeruline olevat, kuid – pole midagi lihtsamat kui eilsed teadustulemused ja pole midagi keerulisemat kui need, mis ees seisavad.” (Mötterajad)

Teaduse tiptase ei ole pelgalt suurte riikide privileeg. Meie naabrid Soomes näiteks alustasid oma tippkeskuste programmiga juba aastaid tagasi. Skeem on põhimõtteliselt lihtne – tööplaan ja tulemused evalveeritakse nõudliku rahvusvahelise kogu poolt, tehakse otsus ja riik suunab sõelale jäänud uurimiskeskustesse täiendavaid vahendeid. Teaduskompetentsi Nõukogus algatasime Eesti tippkeskuste loomise umbes viis aastat tagasi. Soome kolleegid abistasid meid nõuete ja reeglistiku koostamisel ning samuti rahvusvahelise evalveerimise läbiviimisel. Esimesel etapil, 2000–2001, fikseeris Haridus- ja Teadusministeerium (HTM) otsuse kuue tippkeskuse nimetamisest ning teisel etapil, 2002–2006, on otsus 10 tippkeskuse asutamise kohta. See tähendab ka täiendavat finantseerimist, mis pole just suur, eriti võrreldes Soomega, kuid annab siiski tunduvalt vabamad käed tippkeskustele, kus suurt osa hõlmavad ka noortele inimestele suunatud vahendid.

“Tänapäevased tippkeskused on valitud just tulemuste ja eesmärgisulguse järgi, sestap peaksid need oma osaliste ja noorte inimeste teed tippu selgemaks tegema. Aga ega needki jäävad pole, üks peab olema lahti uutele tippkeskustele, sest maailm ju muutub. Siin on tegelikult väljakutse kõigile. Kas oleme teinud kõik, et igale inimesele selgeks teha: Eesti on parim koht oma eesmärkide realiseerimiseks? Ja seda ka neile noortele inimestele, kes teadusuuringutes oma sihti näevad ning suurimat püüavad. Ma tean, et see on raske, kuid kes on öelnud, et elu just kerge peab olema?” (Mötterajad)

Hiljutine tippkeskuste konverents näitas, et tegemist on tõesti tugevate teaduskeskustega, mille tulemused nii rahvusvahelisel foonil (ainuke mõeldav võrdlustase!) kui rakenduste poolel Eesti ühiskonnas on aukartusäratavad.

Meie kogemus on avaldanud muljet ka rahvusvahelises ulatuses. Hiljuti kutsuti näiteks mind tippkeskuste teemal rääkima Hispaania teadusuuringute nõukogusse, samuti on niisugustest kohtumistest huvitatud mitmed Euroopa Liidu uued liikmesmaat. Euroopa teadusruumis on meie tippkeskustel selge eeldus kujuneda suuremate võrgustike sõlmedeks.

Mainides teadusruumi, oleks sobiv tulla Akadeemia ja üldse teadlaste välissuhete juurde. Selles osas on Teil kohustusi kuhjaga.

Ükski inimene pole saar, ütles Inglise kirikutegelane ja luuletaja John Donne, nii ka pole üksi ükski riik keerulises teadusmaailmas. Akadeemia, samuti ka Eesti teadlaskond üldse, on seotud ametlikult või mitteametlikult kolleegidega ja teadusinstituutidega nii Euroopas kui ka kogu maailmas. Akadeemia on ametlik partner näiteks Rahvusvahelises Teadusnõukogus (ICSU), Euroopa teaduste akadeemiate assotsiatsioonis (ALLEA), Euroopa Teadusfondis (ESF) ja mujal. Rahvusvahelised erialaliidud koondavad teadlasi erialade järgi, nende rahvuslikud komiteed aga esindavad teadlasi ühest või teisest riigist. Eestis on rahvuslikud komiteed Akadeemia juures, seega on Akadeemial siin ühendav roll. Akadeemial on ka koostöölepingud paljude teiste akadeemiate ja nõukogudega, nende koostöölepingute alusel toimub teadusvahetus. Loomulikult on see vaid üks osa võimalikest mobiilsusskeemidest, kuid võimaldab selgesti sättida vahetust otse meid huvitavates valdkondades.

Olen ka ise esindanud Akadeemiat ICSU-s ja kuulun ALLEA juhtkomiteesse. Seal juhatasin paar aastat tagasi töörühma, analüüsima väikeste Euroopa riikide teadus- ja arendustegevuste strateegiat (ilmunud eraldi raamatuna), praegu olen ALLEA teaduskoostööd analüüsiva töörühma esimees. Mis momendil eriti põnev, on kuulumine Euroopa Liidu teadusvoliniku loodud väikesesse töörühma, kes paneb liikmeliselt kokku Euroopa Teadusuuringute Nõukogu (*European Research Council*, ERC). See nõukogu hakkab kavade kohaselt rahastama teadustegevust Euroopas, seades tingimuseks teadustöö uuduse ja kvaliteedi (nn eesliiniteadus). Valik on raske, sest otsustada tuleb näiteks Nobeli preemia laureaate vahel. Sihiks on saavutada liikmesriikide teadusvaldkondade tasakaalustatud esindatus, arvestades veel paljude asjaoludega. Ka sooline tasakaal on loomulikult oluline. Mis aga kõige tähtsam: nimetatud nõukogu peab tagama Euroopa teadusuuringute ekstsellentsuse tulevikus. Ülaltoodust järeldub, et pean tihti viibima Eestist eemal, nii Brüsselis kui ka mujal. Lisaks veel kohustused minu enda teadusvaldkonnas. Ja jälle – tegevused tuleb seada tähtsuse järjekorda.

Milline on see järjekord enda teadustegevuses?

Valituna 1994. aasta detsembris esmakordselt Eesti Teaduste Akadeemia presidendiks, ütlesin kolleegidele, et mu teadustegevus ei tohi katkeda. Olen hoid-

nud uuringud käimas, kuid õnnestunud on see eeskätt kolleegide – vanemate ja nooremate – toel. Mis teeb asja inimlikult meeldivaks, on see, et paljudest kolleegidest on saanud head sõbrad.

Aga nüüd, lained, kaos, mittelineaarne dünaamika ja palju muudki – eks see ole üks samm maailma tundmaõppimiseks. Meie ümber on ju kõik muutumas, sellest dünaamika. Ajaskaalad on erinevad, pingelainete juures on tegemist mikrosekunditega, südamerütmi juures on üheks skaalaks sekund, pinnalained vees aga mõõdetavad suuremate ajaühikutega. Mis aga oluline – säiluvad liikumismoment ja -energia, seega on dünaamilistel protsessidel kõikjal palju ühist.

Igapäevaelus oleme harjunud võrdelisusega, st lineaarsusega. Tegelik maailm on aga mittelineaarne ja seosed keerulised. See esimesel pilgul keerulisus põhjustab aga süsteemide kvalitatiivselt palju rikkama käitumise, kui seda võimaldab lihtne võrdelisus. Ja siin tulevad mängu nähtused, nagu bifurkatsioonid ja kaos, fraktalid ja ennustatavuse kadu. Läheb pikale hakata siin neid mõisteid lahti kirjutama, asjahuviline võib lugeda neist mu õpperaamatutest, viimane kirjutatud koos hea kolleegi professor Ülo Lepikuga.

Aga ikkagi, kaos? Igapäevaselt küll lihtne ja põnev, aga teaduslikult ikkagi vist keeruline?

Jah, kaos on teinekord mõistetav intuiivselt kui täielik segadus ehk tohuva-bohu, nii nagu see iidsetes raamatutes kirjas on. Praegusaja füüsikas on termin "kaos" kasutusel kui võimalik režiim mittelineaarsete süsteemide käitumisel, mis ei luba täpselt ette ennustada süsteemi detailset käitumist. Füüsikalisel kaosel on sisemine kord, see on määratav entroopiaga, mis on lõplik suurus (juhuslikel protsessidel lõpmatu!). Kuna enamik füüsikalisi süsteeme on loomult mittelineaarsed, siis võimalus kaootiliste režiimide tekkele on täiesti reaalne. Samas tuleb arvestada ka asjaoluga, et keeruliste süsteemide – igapäeva ilma mõjutavate õhurõhu, tuulte ja temperatuuri – täpne ennustamine hulk aega ette pole võimalik.

Samas võib esineda tasakaalus süsteeme, kus muutused minimaalsed ja seega ka ennustamine töötab. Kui eespool sai rõhutatud protsesside mittelineaarset olemust, siis mitte alati pole tulemuseks kaos. Esineb sääraseid tasakaalustatud protsesse, kus mittelineaarsus viib hoopis statsionaarsete tulemuseni. Siin on heaks näiteks soliton – see võib olla laine veepinnal, kus mittelineaarsus ja dispersioon kenasti tasakaalus. Dispersioon tähendab, et erineva sagedusega lained liiguvad erisuguste kiirustega. Mittelineaarsus viib aga laine "murdumiseni". Nende efektide tasakaal tekitab püsiva profiiliga laine, mida kutsutakse solitoniks. Ka Tallinna lähel võib näha kiirlaevade poolt põhjustatud solitone, mis võivad teinekord tekitada hoopis ohtlikke olukordi.

Kuidas see kõik kajastub uuringutes?

Juba aastatel 1998–1999 tekkis mul mõte ühendada Eestis kõik jõud, kes otseselt seotud mittelineaarsete probleemidega. Kriitiline mass oli oluline. Teiseks oluliseks ideeks oli haarata ka rahvusvahelist kogukonda. Nii saigi 1999. aastal loodud Tallinna Tehnikaülikooli Küberneetika Instituudi mehaanika ja rakendusmatemaatika osakonnale tuginedes mittelineaarsete protsesside analüüsi keskus (*Centre for Nonlinear Studies – CENS*). See ühendab Küberneetika Instituudi mehaanikuid, inimesi TTÜ biomeditsiinitehnika keskusest, mereuurijaid ja matemaatikuid Tartu Ülikoolist. Rahvusvaheline nõukoda haarab teadlasi Pariisist, Cambridge'ist, Eindhovenist, Aachenist, Uppsalast ja mujalt. Aastal 2001 sai CENS üheks Eesti teaduse tippkeskuseks, s.o aastateks 2002–2006. Meil on 15 PhD või DSc tasemel uurijat ja umbes 20 noorteadlast kraadiõppuritena. Tulemustest võib lugeda võrgust (<http://www/cens.ioc.ee>) või aastaaruannetest, ka tippkeskuste raamatutest. Me oleme saatnud noori inimesi paljudesse teistesse keskustesse, näiteks Grenoble'sse, Eindhoveni, Tokyosse, Seattle'i, Saarbrückenisse ja Pariisi. Oleme koostanud mitmeid rahvusvahelisi projekte ja loonud hulga kontakte teaduskonverentside või kraadiõppekoolide korraldamiseks.

Viimasel mehaanika maailmakongressil Varssavis 2001 oli CENS-il kokku seitse ettekannet. Oluline on nelja-aastane koostööprojekt Osloga, mis võimaldab avada rahvusvahelisi järel doktorite kohti ja kutsuda külalisuurijaid. HTM volitusel oleme osalised programmide võrgustikus, mis seob teadlasi üle kogu Euroopa keerukate dünaamiliste protsesside uurimisel jne. Samuti on tihedad sidemed Rahvusvahelise Teoreetilise ja Rakendusmehaanika Liiduga (IUTAM). Olen ise selle juhatuse liige juba kolmandat valimisperiodi ning seetõttu on ka mehaanika eesliniprobleemid mul hästi silme ees. Rõõmustab, et oleme kaasalõõjad päris mitmes kitsamas valdkonnas. Olgu selleks siis interaktsioonisolitonid ja ekstreemlained, faasipiiride dünaamika, rakendusenergeetika matemaatilised mudelid südamelihase pingeanalüüsis, fraktalite teooria kasutamine südamerütmide ja finantsjadade analüüsis, klaverihaamrite teoreetilises ja eksperimentaalses analüüsis, akustodiagnostikas ja mujal. Kindlasti tuleb mainida üht CENS-i tugevat külge – fotoelastsusmeetodite arendamist kolleegist akadeemiku Hillar Abeni juhtimisel.

Mis siis teeb mehaanika huvitavaks?

Maailm on ju ise äärmiselt huvitav ning just mehaanika on paljude teadusvaldkondadega seotud. Näiteks võib tuua materjalide käitumise väga kõrgetel sagedustel (geomeetriliselt on see nanoskaala), kus tuleb arvestada paljude efektidega. Biosüsteemide mehaanika on tihedalt seotud rakuenergeetikaga. Ka ekstreemlained veepinnal, faasitundlikud ehk nutikad materjalid ning paljud teised valdkonnad peidavad veel saladusi.

Ammugi lahkunud akadeemik Nikolai Alumäe pani minu põlvkonna juurdlema paljude probleemide üle, me püüame nüüd sama suhtumist edasi anda tänastele kraadiõppuritele. "Probleem peab olema raske, siis on, mille üle mõelda, siis on tegemist väga olulise õnne komponendiga", kõlas tema, kui minu mentori mõte.

Ja nii me tahamegi teada, kuidas tekivad solitonid, kuidas mõjutab ATP bilanss pingeid südamelihases, kuidas leida materjalide mikrostruktuuri omadusi, mõõtes nendes levivaid laineid, kuidas toimib difusioon turbulentses väljas jne.

Et asjad liiguksid, peab teaduskollektiivis olema hea atmosfäär. See on eelkõige perspektiivikate ideede toetamine, regulaarsed teadusseminarid, noorte kaasamine ja nende toetamine (ka materiaalselt!), rahvusvahelise kogukonna kaasamine ja palju muud. Lõpuks on teadus ka eluviis, mitte aga lihtsalt amet üheksast viieni. Ja see annab hulga rõõmu, olgu siis emotsioonid seotud tulemuse publitseerimisega tippajakirjas, eduka esinemisega mainekal teadusfoorumil või kordaläinud kraadi kaitsmisega.

Viimasel ajal oleme korraldanud ka väiksemastaabilisi intensiivnädalaid, kus paar kolleegi mujalt maailmast siin loenguid peavad ja siis kõik koos seminaril esinevad – läbitöötatud ja uued probleemid koos. Tulen ise just selliselt ürituselt Torinost, kus mu hea sõber Franco Pastrone korraldas meie eeskujul taolise ürituse oma kraadiõppuritele. Me seadsime nüüd eesmärgiks kokku tuua mitme keskuse kraadiõppurid, olgu selleks kokkusaamise kohaks siis Tallinn või Torino või mõni muu keskus – usun, et see on väga hea kapitalimahutus tulevikku silmas pidades.

"Teadlase siht olla oma eriala tipus ja tema missioon kodanikuna – need tuleb osata ühildada. Eks see ole rohkem tunnetuse asi, kuid kodanik, kes teeb hästi oma erialast tööd, ei pruugi sugugi olla teadlane. Teinekord on siin väärtarvamused kerged tulema. Kiputakse end teadlaseks nimetama ka siis, kui mõni asi päris põhjalikult endale selgeks tehtud on. Teadlane on aga looja ning tal peab olema ette näidata uued tulemused. Teinekord löövad selle vahetegemise pinnal emotsioonid oi kuidas lõkkele." (Mõtterajad)

Isiklikud suhted Euroopaga teadlasena?

Olen töötanud lühemat või pikemat aega mitmel maal. Heade teaduskeskuste atmosfäär on igal pool üsna sarnane, mistõttu on kerge sinna sisse elada. Ma tunnen end tõesti kodus nii Cambridge'is kui ka Aachenis, nii Torinos kui Prahas ja seda nimekirja võib päris pikaks venitada. Muidugi ei tähenda see kogemus vaid töötamist tipptasemel instituutides, nagu DAMPT Cambridge'is või Laboratoire de Modélisation en Mécanique Pariisi 6. ülikoolis. See kogemus tähendab osavõttu kohalikust elust ja kultuurimaailmast. Ka siis, kui kodutee lühike on, võib see sisaldada "ohte" – nii oli näiteks Cambridge'is, kui pidin ko-

duteel mööduma mitmest raamatukauplusest. Tihti on oluline mitte ainult suurte muuseumide külastamine (niikuinii ei jõua nendega põhjalikult tutvuda), kui atmosfääri tajumine linnas või selle ümbruses. Suures osas Euroopas on oluline avatus, seda eriti teaduskeskkonnas ja ajutised akadeemilised elanikud võivad seal kiiresti sisse elada. Küllap on see kultuuritraditsioon, mis mitmekesisuse omaks võtab. Ega see ei tähenda, et igaüks sõbraks tunnistatakse – tegemist on keeruliste traditsioonidega. Minul on vedanud, mul on sõpru väga mitmel maal. Küllap tunnen ma end eurooplasena, mis aga sugugi ei tähenda juurte kaotamist. Endiselt pean ma üheks ilusamaks loodusvaateks Karksi ja Viljandi vahelist maastikku ja endiselt otsib silm Euroopa lennujarmades tuttavat pääsukese värvidega lennukit kojutulemise rõõmus. Ja kui ma oma prantslasest sõbrale näitsin Türisalu pangal jääminekut ning luiki karge kevadpäikese all, siis jäi seegi päev meelde. Neid ridu kirjutades nägin Finnairi märgiga lennukit ruleerimas värava juurde, kus kojusõitu ootasin. Ka see on selge kodumärk.

Saan aru, et Teil on raske mööduda raamatukauplusest, eriti välismaal, sealt midagi huvitavat kaasa ostmata, sest olete suur raamatusõber. "Mõtteradu" lugedes, hakkavad silma ka Teie viimase aja lugemisela-mused.

"Pole kaua aega lugenud nii huvitavat novellidest koosnevat põnevikku, mis tegelikult päris igapäevaseid asju kirjeldab. Ajalugu, huvitavad leiud, põnev sõnaseade, üllatused, teadasaamise rõõm ja mida veel kõike asjadest, mis siinsamas ja iga päev meie elu saatmas on. Ja naerda saab ka! Tegemist on Henn Saari keeleminutite kogumikuga "Keelehääling"...

...Kui oma mälulehekülgi sirvin, siis samasuguse elamuse sain Toomas Pauli monumentaalteosest "Eesti piiblitõlke ajalugu". Hoolimata murjanimurrakute ja *lingua franca* pidevast rünnakust elab eesti keel täisväärtuslikku elu, ka teaduskeelena. Hiljuti päevavalgust näinud säravad universumi ja emakese Maa palgejooni kirjeldavad raamatud eesti teadlaste sulest või mitmed tõlked annavad tunnistust keele rikkusest ja paindlikkusest, hoolimata kollase kirjan-duse suurte tähtedega kirjutatud vaesusetunnistustest." (Mõtterajad)

Teie harrastustest võime vist teisele kohale seada nooruse spordipisi-kust ellu äratatud harjumused.

Spordipisik jäi mulle tõepoolest sisse mu kahest noorusearmastusest – suusa-tamisest ja sõudmisest. Jooksen ja suusatan tänaseni – mul on kodurada Glehni pargis.

"Olin keskkoolipäevil rohkem murdmaasuusataja ja tulin sõudmisse üliõpila-sena. Ja ikkagi, mis sõudja mina olin! Üks medal Eesti meistrivõistlustelt (TPI kaheksaste paadis – *Rein Veskimäe*), mõned Tallinna meistritiitlid – pole ju

midagi erilist. Nüüd hulk aastaid hiljem pean tunnistama, et sõudmisega pole ma aastakümneid tegelenud, küll aga viib minu tee regulaarselt metsa jooksa- ma ja suusatama. Süda aga hakkab vahest kripeldama küll, kui mingil moel sõudmine ette keerab..." (Mõtterajad)

Kas Eestil läheb Euroopa teadusruumis hästi?

Me paistame silma mitmel moel. On teada meie väikeriigile igati sobiv teadus- korraldus ja rahastamissüsteem, mis põhineb kvaliteedihinnanguil. See on praeguses Euroopas äärmiselt oluline. Meie tippkeskused on äratanud laiemat tähelepanu ja nii paljud meie nooremad ja vanemad teadlased on hästi tuntud. Ometi ei suuda me oma potentsiaali ära kasutada. Teadus- ja arenduste- gevuse rahastamine on allpool mõistlikkuse piiri ning me ise kulutame end asjatutes vaidlustes. Kui üks ülikool on aastaid väärtustanud teadustegevust ja paistab nüüd silma, siis heidetakse talle ette vaata et surmapatte. On kuul- da hääli, et teaduspublikatsioonid pole üldse vaja (!?). Otsused sünnivad mõ- nikord mitte argumenteerivalt, vaid valjemalt kõlavate häälte tahtmist mööda. Kõrgharidust andvate institutsioonide arv on üle mõistuse suur ning sellest tu- lenevad emotsioonid. Unustatakse ära, et ülikool on koht, kus õpetamine ja teadustegevus on lahutamatu seotud. Kui pole teadustegevust, pole ka üli- kooli. Kõige suurem oht on selles, et nii saavad paljud noored inimesed kaasa teadmise, et kõrgharidus antakse lihtsalt paari kursust kuulates ja muud po- legi vaja. Üks hiljutine ohtlik näide – nägin doktoriväitekirja, kus põhitulemu- sed olid avaldatud ajalehtedes – SL Õhtulehes, Päevalehes ja kõva sõnana Õpetajate Lehes. Väitekirjal seisis aasta 2005. Ma pole huvi tundnud selle väi- tekirja saatuse vastu, kuid mind paneb mõtlema asjaolu, et sellel seisis ka juhendaja nimi. Kuidas saab juhendaja sellist asja lubada? Ning siis olemegi silmitsi olukorraga, kus taolise teadlase õpilased astuvad ellu, lasevad lati veelgi madalamale ehk teisisõnu seisame teadusmaastiku allakäigutrepil. Ja siis kõlavad hääled – meile on vaja doktoriõppe kohti, ilma et mõeldakse juhendajatele.

Nii et küsimuse juurde tagasi tulles, põhimõtteliselt läheb meil hästi, aga oma väikses ühiskonnas teeme elu iseendale teinekord raskeks. Säärasel olukorras pole ka lihtne poliitikutel aru saada, mida on vaja teha, et allakäigutrepi üle- mistelt astmetelt vähemalt üleskäigutrepi alumiste astmeteni jõuda, enne kui hilja pole. Kahjuks on ka meie poliitiline kultuur alles kujunemas ning hetke- probleemid kaaluvad enamikul juhtudel üles kaugema tuleviku vajadused. Teadlased ju ei tule loosungitega Toompeale.

"Teadus pole poliitika, kus otsustatakse hääletamise teel – meeldib või ei meeldi, on kasulik (kellele?) või pole kasulik (kellele?). On objektiivne arutelu ja küsimused, millele otsitakse vastust. Kui vastuseid pole, ei kiirusta ükski teadlane järeldusi tegema. Nii tegutseb ka Akadeemia. Aga teinekord on Aka- deemiati ki püütud siduda küll koalitsiooni, küll opositsiooniga. On ülimalt vaja-

lik, et riigis oleksid sõltumatud organisatsioonid, Akadeemia on kindlasti üks nendest. Koosnedes akadeemikutest, pole Akadeemia lihtne intellektide summa. See on midagi rohkemat, kus vaimujõud peab põlema ja sütitama teisi." (Mõtterajad)

Oma raamatus olete võrrelnud ühiskonna erinevust teadusest...

"Ühiskonna ja teaduse erinevust võib võrrelda mitmeti. Teaduse liikumapanevaks jõuks on tahtmine teada ja sellega seotud ka teaduseetika. Ühiskonna liikumapanevaks jõuks on üsna tihti kasum ning eetiline pool on suuresti massimeedia kujundada. Hoolimata jõupingutustest, kipub viimane orienteeruma ka kasumile (ikka see *cash-in-cash-out* printsiip) ja mis seal salata, mitte väga kõrgete vaimsete huvidega ühiskonnaliikmetele. Teadus on looming. ...Jah, tehnoloogia on tõmbamas ja tõukamas teadusuuringuid, kuid objektiivsus ja falsifitseerimisprintsiip on ikka nurgakivideks. Seetõttu on teadus ka ühiskonna arenemise tugisambaks.

...ja ühiskonna reaktsiooni uute teadustulemuste suhtes.

"Ühiskonna reaktsiooni uute teadustulemuste suhtes võib võrrelda üleheliikiirusega lendava lennuki põhjustatud lööklainega. Kui ikka tulemus igati senise tavamõistuse piirid ületab, siis see "lööklaine" võib olla tõlgendatav mitmeti – üllatus, eituse, midagi puruneb jne." (Mõtterajad)

Miks Te mõtlete nii, nagu Te mõtlete? Sellelegi küsimusele saab vist parima vastuse siis, kui lugeda Jüri Engelbrechti enda esseede kogumikku "Mõtterajad".

"Miks ma mõtlen nii, nagu ma mõtlen? Tegelikult on mu töö ju põhiliselt mõtlemisega seotud. Teadlasena pean ma pidevalt käima tundmatutel radadel ning seetõttu alati mitu sammu ette kavandama. Mis on tähtsam, kas hetkeimpulss – nähtud, loetud, kogetud – või integreeritud minevik. Küllap nii see kui ka teine. On aga meeldiv, kui loetud mõttelõngal on samad värvid kui enda kootud lõimedel."

Eelmisel aastal ilmus Tallinna Tehnikaülikooli juubeliks raamat "Ühe masinaehituse rühma lugu", millest selgub, et üks sellest 1959. aastal Tallinna Polütehnilise Instituudi lõpetanud rühma noormeestest olete Teie, akadeemik Enn Tõugu. Kui see kogumik läbi lugeda, siis paneb imestama, et enamik neist, kui mitte kõik, on olnud väljapaistvad tööstus- ja teadusjuhid, konstruktorid ja leidurid, teadlased ja õppejõud.



Enn Tõugu

Meil oli tõesti tore rühm. Tuleb vist öelda, et on veel praegugi – käime ju omavahel läbi ja vahel teeme ka midagi koos. Raamatu kirjutasime oma lastele, ja ka selleks, et näidata tulevastele põlvetele, kuidas Eesti insenerid õppisid ja elasid nn Vene ajal. Kui poleks olnud aktiivseid inseneri ja mäenedžere, keda nüüd mõnikord põlglikult ka punaparuniteks kutsutakse, siis oleks kogu Eesti olnud täis Venemaalt tulnud õnneotsijaid ja näeks tervikuna veel praegugi välja nagu Narva, Kohtla-Järve või Peipsi-tagune ala.

Mis ajendas minema just masinaehitust õppima?

Polnud eriti valikut – meelisaine füüsika ja Tartu Ülikool olid mulle kättesaadamatud minu eluloo tõttu – kogu meie pere saadeti 1941. aastal välja ja ma olin perekonnast ainus, kes Eestisse 1953. aastaks tagasi jõudis. Kuna minu keskkooliklassist kolm tarka juba läksid masinaehitust õppima, otsustasin nendega liituda.

Kuidas algasid üldse Teie õpingud?

Esimesed kooliaastad möödusid Venemaal, osa ajast ka laagri lastekodus, sest minu vanemad surid Siberis asumisel olemise ajal. Ja kui ma sealt Eestisse tulin, asusin elama tädi juurde Haaberstisse. Tema oli väga südamlilik inimene.

Tehnika- ja eriti füüsikahuvi tekkis mul keskkooliäpövil, lugesin sellest valdkonnast kõike, mis ette juhtus. Poiste ettevõtmisi toetas koolijuhataja Osvald Kall, kes õpetas armastama matemaatikat, puutööd tegema ja raamatuid köitma. Omal käel ehitasime naabripoistega telefoniaparaate. Aga ta innustas ka muusikaga tegelema, tema õhutusel õppisin mängima mitmeid keelpille, et kooli orkestris mängida, vaatamata sellele, et pole kunagi laulda osanud.

Tehnikahuvist siis valisitegi masinaõpetuse eriala?

Pigem olude sunnil, kuid ei kahetse seda üldse, sest sattusin imetoredasse rühma. Kuigi lõpetasin keskkooli hõbemedaliga, sain tehnikaülikooli üle noatera, ja siin oli tõepoolest mängus tädi käsi. Olin just purjekaga "Vanemuine" teel Pärnust Riiga, kui mulle oli tulnud kutse sisseastumisvestlusele. Minu eest läks tädi. Talle siis öeldigi, et sellise elulooga poissi kooli võtta ei saa. Tädi vastu, et kui tal on mereluba, miks siis kooli ei võeta. Seepeale muutiski TPI direktor Ludwig Schmidt (üsna heasüdamlik mees) oma meelt – kui mereluba on, ju siis noormees rauakooligi kõlbab. Tegelikult polnud mingit mereluba. Pärnu ja Riia vahel, Irbeni väinast väljumata, oli ainult N Liidu sisevesi. Nii pääsesingi tädi leidlikkuse ja eestkoste tõttu kõrgkooli.

Nagu tollest raamatust lugeda võib, tegid teie rühma poisid Eesti esimese ekskavaatori – rühmavaimust kujunes meeskonnavaim.

Meil oli rühmas üsna palju andekaid noormehi. Kuus neist olid lõpetanud kooli medaliga, kolm kiitusega tehnikumi, esimese semestri lõpul said pooled kõrgendatud stipendiumi, seega kõik nende hindded olid väga head. Ja ilmselt seetõttu meeldisime ka dekaan Eugen Soonvaldile, kes meid suunaski tööle tulevasse ekskavaatoritehasesse. Seal ehitasime, õigemini projekteerisime, pärast lõpetamist tõepoolest ka esimese Eesti ekskavaatori, mida kasutati nii kuivendustöödel kui ka sõjaväes kaevikute kaevamisel, ja mille paljud erinevad tüübid leidsid peagi tee kümnetesse välisriikidesse.

Ometi tulid varsti Teie ellu ekskavaatorite asemel arvutid, kuigi arvuteid polnudki veel olemas? Arvutiteadus – miks just see ala köitis?

Jah, eraldusin tol ajal tehasest omapead. Minu puhul oli see asjade loomulik käik. Päevakorras oli küberneetika, juhtimissüsteemid, miks mitte siis ka masinate, sealhulgas ekskavaatorite ehitamise juhtimine tulevikus arvutite abil. Arvutiteadus ja küberneetika – need olid möödunud sajandi keskel omavahel tihedalt seotud. Sel ajal oli väga populaarne Norbert Wieneri raamat "Küberneetika". Selles räägiti juhtimisest tehis- ja looduslikes süsteemides, kuni inimeses toimuvate protsessideni välja, mis oli väga põnev ja täiesti uus teadusvaldkond. Oma aja kohta hiilgavaid tulemusi juhtimise alal saavutati tehissüsteemides – need olid kosmoseraketide inertsiaalnavigatsioon, lennukite esimesed korralikud autopiloodid jms. Puutusin peagi vahetult nende juhtimissüsteemidega kokku õpingute käigus Leningradis. Kordan veel, et juhtimisteadus ja arvutiteadus olid kohe omavahel tihedalt seotud.

Selle kohta kirjutab Enn Tõugu oma rühma raamatus nii:

"1959. aasta sügiseks olin töötanud Tallinna Ekskavaatoritehases kolm aastat ja selleks ajaks oli meie ühistööna valminud esimene Eesti ekskavaator. Kuigi konstruktoriamet oli huvitav, olin juba mõnda aega kõrvalt jälginud arvutus-

tehnikat kiiret arengut, mis oli küll suurel määral salastatud, kuid mille uudeid siiski tilkus ka avalikkuse ette. Esialgu N Liidus pseudoteadusena põlu all olnud küberneetika sai lõpuks tunnustuse ja hakkas tähistama kogu juhtimisteadust ja arvutiasjandust, saades lisaks külge salapärase hõngu, kuna oli otseselt seotud kosmoselendude juhtimisega.”

Just tol ajal, viiekümnendate keskel, rajas professor ja hiljem akadeemik Aleksander Voldek Elektrotehnika Teadusliku Uurimise Instituudi (hilisem mitme nime all olnud nn Pirita tee instituut) ning suunas mitmeid noori mehi end täiendama Leningradi ja Moskvasse. Ütlesin, et tahan ka seal õppida, kuid tema vastu, et mul pole ju vastavat eriala. Lubasin siis iseseisvalt omandada elektrotehnika teoreetilised alused, mida ka tegin ning nii pääsesin Leningradi Ülikooli, kuhu võeti kõrgharidusega füüsikuid, matemaatikuid ja elektroonikuid. Mina olin aga masinaehitaja. Kõik tulid siiski õpingutega kenasti toime. Loengud olid huvitavad, sest õppejõud olid oma ala parimad, olles ka ise arvutiala entusiastid.

Mainitud raamatus meenutab Enn Tõugu:

“Me õppisime nende inseneride ja teadlaste käe all, kes olid konstrueerinud ja programmeerinud kompuutrid raketite juhtimiseks, tuumapommide arvutamiseks, satelliitide trajektoore arvutamiseks jne. See oli põnev aeg.”

Mis aga veelgi tähtsam – saime kätt proovida. Projekteerisime kõrgahju juhtimise arvutit ja Kirovi (tänapäevase Putilovi) tehasele koguni arvutuskeskust. Seda oli vaja, sest andmetöötlus hakkas levima tehastes. Tol ajal oli selge, et raketid tõepoolest arvutiteta ei lenda, kuid tehaste andmetöötlus oli alles tekkiv arvutite rakendusala.

Eesti veel ei vajanud arvuteid, need olid kallid ja neid ei tuntud, ning pärast kaheaastast eemalolekut kodust ning tagasitulekut ei olnud meil töödki.

Enn Tõugu kirjutab:

Vestluses ühe tolle aja kõrgema Eesti majandusjuhiga saime soovitusel otsida tööd teatrist lavaelektrikuna.

Pärast küllaltki vaevarikkaid otsinguid leidsime Kirovi tehast ühe osakonnajuhataja, kes oli küberneetika entusiast. Tema probleemiks oli selle väga suure tehase töömahtude täpne planeerimine uue toodangu – võimsate traktorite jaoks, ning ta lootis saada arvutitest abi. Siin tulid appi minu masinaehituslikud teadmised metallide töötlemisest, lõikeprotsesside arvutamisest ja ajanduse leidmisest. Pakkusin välja, et teeme arvuti, mis suudab optimaalseid lõikeprotsesse leida ja nende põhjal kiiresti ajanduse arvutada, arvestades konkreetsete detailide mõõtmeid.

Praegu tundub uskumatuna, et sõlmisime tol ajal lepingu uue arvuti projekteerimiseks ja ehitamiseks, ja mis eriti oluline, et kokkuleppesse kirjutati tin-

gimus – saame garanteeritud kvaliteediga komponendid, mida Kirovi tehase tarbeks (tegelikult meile) kohustati valmistama ühte sõjatehast. Lepinguga oli nõus ka Elektrotehnika Instituut ning 1962. aastal läks tööks lahti. Kahe aastaga tegime arvuti, mis oli tolle aja kohta väike ime – sündinud oli miniarvuti STEM. Mis puutub otseselt minusse, siis projekteerisin selle algoritmid, tarkvara ja protsessori mikroprogrammjuhtimise. See oli 16-bitise sõnapikkusega ja interaktiivse tekstilise kasutajaliidesega arvuti, mis töötas ilma inseneride pideva järelevalveta ja spetsiaalse kliimaseadmeta. Miniarvutid hakkasid levi- ma alles aastaid hiljem.

Enn Tõugu kirjutab:

"Arvutis STEM kasutatud lahenduste põhjal kaitsti vähemalt neli väitekirja, ning ta äratas tähelepanu ka USA-s. Nimelt avaldas sealne N Liidu kõrgtehnoloogiat jälgiv ajakiri "Soviet Cybernetics" arvuti pildi koos selle lühikirjeldusega. Arvuti STEM oli eelkäijaks miniarvutitele, mis jõudsid laia kasutajakonnani alles aastakümne võrra hiljem. Oma aja arvutitest erines ta eelkõige kasutamise mugavuse ja hea töökindluse poolest. Tavaliselt teenindasid tolle aja arvutit, mis asus kliimaseadmetega varustatud ruumis, pidevalt insenerid. Juba tund tõrgeteta tööd oli hea saavutus, kuid STEM töötas ilma inseneride pideva järelevalveta tavalises büroos pidevalt mitmes vahetuses. Sisend-väljundseadmeks oli kirjutusmasin. Sellised "operaatori konsolidid" jõudsid isegi IBM-i suurarvutite külge alles seeria IBM/360 tulekuga.



STEM – esimene Eestis projekteeritud ja valmistatud digitaalarvuti.

See arvuti lahendas tehnoloogilisi ülesandeid, eeskätt arvutas lõikerežiime. Kui oli teada, millist materjali soovitud mõõtmetega töödelda, siis arvutas välja ettenihked, lõikekiirused ja -sügavused, selleks et suurtes tehastes saaks arvestada ajanormidega, olgu siis tegemist puurimise, lihvimise, lõikamise või treimisega. Kui see töö oli tehtud, trükiti välja vajalik dokumentatsioon. See oligi siis uudne lähenemine, ajani, mil tulid monitorid ja interaktiivne arvutikasutus.”

Mainisite, et enne masinaehitajate rühmaga ühinemist, olite just avamerepurjekaga “Vanemuine” teel Riia poole. Millal see huvi tekkis?

Purjetamine hakkas meeldima kohe siis, kui keskkooli klassivend Toivo, kes oli purjetamisega juba tegelenud, mind enda paati soodimeheks kutsus ja varsti ka Eesti noortemeistriks tulime. See oli 1950. aastal, mil Haaberstist maapoisina Tallinna 20. Keskkooli õppima olin tulnud. See huvi on kestnud tänapäevani, nii avamere purjetamisvõistlustest osavõtjana kui varem ka ka kohtunikuna. Huvitava elamuse pakkus mulle 1980. aasta olümpiaregatt, kus tegutsesin kohtunikuna. Praegu on mul väike purjekas, millega koos kaaslastega vahetevahel Soome või Rootsi seilame ja avamere purjeregattidest osa võtame.

Kui põhitegevuse juurde tagasi tulla, siis on hiljem Teie osaks saanud juhtimis- ja projekteerimissüsteemide tarkvara loomine. Milleks seda kasutati?

Kuna olin masinaehitaja haridusega, siis oli ju loomulik, et otsisin arvutite uudeid rakendusi masinaehitusest – selleks sai nii masinaosade kui nende valmistamise tehnoloogia projekteerimine. See ala oli alles tekkimas – võin öelda, et olin selle sünni juures. 1973. aastast olen rahvusvahelise organisatsiooni IFIP masinprojekteerimise töögrupi liige, kuigi esialgu ei õnnestunud mul selle töögrupi nõupidamistest ja konverentsidest osa võtta. Hiljem küll, oleme ka Tallinnas korraldanud selle töögrupi arupidamisi.

Just tol ajal läksin akadeemik Boris Tamme kutsel tööle Küberneetika Instituuti ja moodustasin seal oma töörühma. See oli väga tugev seltskond, kuid lagunes mitmete asjaolude tõttu Eesti Vabariigi taasiseseisvumise järel. Mitmed arukad inimesed läksid tööle Läände ja neid võeti seal vastu avasüli. Alanud oli ajude äravool. Minagi töötasin aastaid Stockholmis ja tulin tagasi, aga mitmed minu endised kolleegid on sinna jäänudki ja sellest on väga kahju.

Aga programmeerimissüsteemid?

Need tulid hiljem. Oleme oma töörühmaga teinud üsna mitu programmeerimissüsteemi, mis on teiste poolt kasutust leidnud: SMP, PRIZ, ExpertPriz, Nut. Nende omapäraks on tarkvara automaatne koostamine komponentidest. Võib

ka öelda, et tegemist on programmide automaatse sünteesiga ülesande püstituse ehk nn spetsifikatsiooni põhjal.

Millal sai võimalikuks rahvusvaheline koostöö ja milles see seisnes?

Piir itta oli ju kuni 1991. aastani kogu aeg avatud. Läänepiir hakkas avanema pisitasa 1980. aastatel. Just siis kujunes välja sisuline koostöö Soome, Rootsi, Soti, Ameerika ja Taani teadlastega. Põhiliselt toimusid vastastikused külastused, ühiste artiklite kirjutamine, kirjavahetus, mille kohta oma KGB toimikud lugedes sain teada, et kirjavahetus Läänega olevat olnud kahtlustäratavalt tihe. Arvutiteaduse ja informaatika alal sai Tallinn tuntuks ida- ja läänepoolsete teadlaste kohtumispaigana, sest siia oli Läänestki suhteliselt lihtne, ja Soome kaudu vahest julgemgi sõita, kui Venemaale. Sel ajal korraldas Küberneetika Instituut tihti konverentse ja töökohtumisi, kuhu tuldi igalt poolt meel-
sasti.

Kuidas sai Teist Rootsi Kuningliku Tehnikaülikooli professor? Mida andsid need aastad Teile ja mida andsite omalt poolt Rootsi kolleegidele?

1989. aasta kevadel olin mõned kuud külalisteaduriks Stanfordin ülikoolis Californias, ja see oli imetore aeg. Tagasi tulles ootas ees kurb pilt vaesest riigist ja ressursipuuduses vaevlevast teadusest. Kaks aastat olin sisuliselt olnud poliitikas, kuid pidasin silmas ka oma võimalikku jätkamist teadlasena. Kui Eestis hakati rääkima teadusest kui ühiskonna vesipeast ja teadlastest kui nõukogude sabarakkudest, küpses mul soov mujale minna. Tõenäoliselt oleksin saanud soovitusel põhjal professorikoha USA ühes ülikoolis, kuid abikaasa oli nii kauge maa taha minekule tugevalt vastu. Konkureerisin siis suhteliselt kodulähedases Stockholmi Kuninglikus Tehnikaülikoolis (KTH) professori kohale, ja osutusingi valituks.

Rootsi professoril on suur vabadus oma uuringute korraldamisel ja doktorantide juhendamisel. Muidugi, ka seal on probleem teadusuuringuteks raha saamisega, ja selleks peab olema piisavalt hea, et taotlused rahuldataks. Mina sain vabalt jätkata oma tegevust programmide sünteesi alal. Kutsusin ka Eesti kolleege lühemaks või pikemaks ajaks uurimistööle. Mulle tuleb meelde vähemalt kümme teadurit, kes minuga Rootsis olid, mõned pikemat aega ja korduvalt. Õpetamise osas pean oma saavutuseks uue Java-põhise Interneti programmeerimise kursuse sisseviimist KTH-sse alates 1996. aastast. See osutus eriti populaarseks – vabatahtlikku valikkursust kuulas igal aastal umbes 150 tudengit, rohkem ei saanud neid kursusele lihtsalt vastu võtta.

Kuidas on laabunud koostöö noorte kolleegidega ja nende õpetamine? Mille järgi kolleege valite?

Usun, et saan noortega veel päris hästi läbi, sest nad meeldivad mulle. Vaadake, Eesti reeglite järgi olen liiga vana, et kedagi valida. Meil ei ole üle 65-

aastastel enam õigust olla teaduses juhiks ega isegi korraliseks professoriks. Seega pigem valitakse mind, kui mina teisi. Abstraktselt rääkides, tuleks noori teadusesse valida nii andekuse kui töövõime järgi. Töövõime all pean silmas ka soovi ennastsalgavalt midagi teha, kas puhtast huvist ja seesmisest vajadusest, nagu muusikas ja kunstis, või siis auahnusest. Tänapäeva teaduses ei saa kuidagi läbi ainult kaheksa tundi päevas töötades. Vähemalt minu erialal on see nii nagu tippspordis. Vanemad inimesed saavad olla rohkem nagu treeneri rollis, kasutades selleks oma kogemusi.

Kuidas on võimalik jaotada oma aega nii, et teha tippteadust tehnika- valdkonnas ja omandada nii hea keelteoskus?

Keeled on olnud mu hobiks, räägin üsna vabalt eesti, vene, rootsi ja inglise keelt. Saan hädapärast hakkama ka saksa, prantsuse ja soome keelega. Rootsi keele õppisin üsna ruttu ära tänu eelnevale saksa keele oskusele. Kuid selle tulemusena kaotasin suurel määral võime saksa keeles end vabalt väljendada, sest sellele sarnase sõnavaraga rootsi keel kipub varem omandatud segama. Mu seitsmest lapselapsest neli kõnelevad peale eesti keele ka saksa keelt. Nendega saan hädapärast saksa keeles siiski veel hakkama. Tänu rootsi keelele saan suhelda ka oma kahe lapselapsega, kes ei oska eesti keelt, kuid räägivad norra keelt. Need skandinaavia keeled on küllalt sarnased.

Miks kandideerisite presidendi kohale? Kui Teist oleks saanud Eesti Vabariigi president, kas siis oleks tulnud teadustööle hüvasti öelda?

Loomulikult oleks tulnud oma senisest tavapärasest eluviisist loobuda. Tegelikult mul ju oli teatud poliitikukogemus nõukogude aja lõpust. Olin Gorbatšovi ajal Kremli kongressi saadik ja N Liidu Ülemnõukogu komisjonis informaatika alal. Sellest kongressist käisid läbi mitmed, kes hiljem Eesti poliitikat tegid või teevad, nagu näiteks Marju Lauristin, Endel Lippmaa, Siim Kallas, Edgar Savisaar, Arnold Rüütel, Ignar Fjuk ja Igor Gräzin. Ka sel ajal polnud mul aega teadusega tegelda.

Mis presidendivalimistesse puutub, siis teatud seltskonnal oli omal ajal arvamus, et president Lennart Meri võib oma teisel tegutsemisajal ettearvatult käituda. Õnneks need kahtlused ei õigustanud end, Lennart Meri valiti uuesti Eesti presidendiks, ja see oli kahtlemata õige valik.

Milline on praegu Teie eelistatuim uurimissuund?

Huvitavat on palju. Mind köidab endiselt tehisintellekt, kuigi sel alal just praegu suuri uudiseid ei paista olevat, toimub rohkem tehisintellekti meetodite rakendamine üha uutes valdkondades. Huvitavad tulemused on Interneti ja eriti veebi alal. See vaevalt kümneaastane süsteem hakkab suure tehisaju omadusi näitama – mõelge sellele tohutule mälule, mida me juba veebis Google'i abil

kasutame. Peale mälu oleks vaja ka mõistust, seda püütaksegi nüüd veebile lisada, milles ma jõudumööda kaasa löön.

Olete nüüd poliitikas osalemisest loobunud?

Paremaid poliitikuid on praegu külluses ja mul on oma huvitav tegevus.

Te valutate südant Eesti teadlaste hea käekäigu pärast? Mille üle muret tunnete?

Süda teeb sel puhul tõesti haiget. Teadusetegemine tuli Eestis täiesti ümber korraldada, sest nõukogudeaegsed tsentraliseeritud juhtimisega ja militaar-eesmärkidel rahastatavad struktuurid ei sobinud meile. Teadust võib võrrelda ühe ilusa aiaga, kus on rikkalik taimekooslus oma puude ja põõsastega, st uurimissuundadega. Et taimed saaksid elada, on vaja sobivat keskkonda ja toitu ning aeda on vaja loomulikult kasta. Ei saa ju loota, et üks puu kasvaks seal suureks paljalt otsuse peale, nagu vahel teaduses püütakse korraldada. Teaduse suunad on samuti nagu puud, mille kasv ja areng võtab aega. Kas 10 või isegi 20 aastat. Uurimisgrupid on aga nagu põõsad, mis kasvavad puudest võib-olla veidi kiiremini. Kui väga pingutada ja korralikult väetada, võivad nad edukalt vilju kanda ka viie aasta pärast. Aga kui põuaaastad vahele tulevad, on kasv kängus või kaovad taimed sootuks. Just nii juhtus Eesti Vabariigi algaastail mõnede Eestis edendatavate teadussuundadega. Põua-aastad tulid vahele, sest see juhtus ajal, kui vene rubla ei maksnud midagi ja meil polnud Moskvast enam midagi saada ka aparatuuri ja muude vahendite näol. Vaid kõige tugevamad grupid jäid ellu. Meie teaduse ümberkorraldamist võikski võrrelda näiteks Kadrioru pargi muutmisega vanade puude ja põõsaste väljajuurimise ning uute istutamise teel. Mitu aastat võtab aega, et uuendatud park hakkab kena välja nägema?

Teadusele tegi suurt kahju sellesse üleolev suhtumine ühiskonnas vabariigi esimestel aastatel. Selle tulemusena said teadusuuringud väga palju kannata. Kõige suurem kahju – lakkas järjepidevus töös noorte teadlastega. Doktorantuuri ei toimi tehnikaaladel seniajani, tehnikaülikoolist tuleb paar doktorit aastas. See on nullilähedane arv. Elujõulisemad rühmad füüsikute ja geneetikute näol, kel olid tugevad rahvusvahelised sidemed, elasid rasked ajad valutumalt üle. Informaatika, võrreldes füüsika ja bioloogiaga kannatas rohkem, sest näiteks füüsikutele ei ole firmades eriti tööd pakkuda. Head informaatikud leidsid aga, selle asemel et teadust teha, rakendust ka mujal. Nüüd on küll olukord paremaks läinud, aga seda teosammul. Kui tahame rääkida teaduspõhisest majandusest, peame tekitama teadlaste ja teaduse jaoks tunduvalt parema keskkonna.

Mida tuleks muuta, et ärevad ajad üle elada?

Õnneks tundub, et kõige ärevam aeg ongi möödas. Kuid siiski kollitavad veel teatud ohud. Esimene asi, mis meelde tuleb, on see, et üliõpilased kui hari-

duse tarbijad peavad teadma, mida nad selle taotlemisel tegelikult saavad. Meil on korrastamata kõrgharidus, mida pakuvad Eestis üle viiekümne kõrgkooli (!), neist paljud õpetavad akrediteerimata õppekavade alusel. Akrediteerimata õppekavaga kõrgkoolidesse minek on aja raiskamine. Neisse pürgivatele noortele hoiatuseks paneksin ma kooli uksele sildi: "Õppimine siin on teie tulevikule kahjulik". Suitsupakkidel on ju ka kirja pandud, et suitsetamine on kahjulik, kuigi sigarettide pahvimine on igapäevane vabatahtlik asi. Ma pole kindel, et niisugustesse õppeasutustesse minna soovijad ikka teavad, et nad riiklikult tunnustamata diplomi saavad.

Kus on väljapääs?

Mida haritumad ja teadmistejanusemad on noored, seda parem teadusele. Hea haridus on eelduseks teadlaseks saamisele, seega tuleb korrastada haridusmaastik. Õnneks elab Eesti teadus siiski oma elu edasi, ja seda just tänu rahvusvahelistele sidemetele. Sest me oleme üks osa maailmateadusest. Ja me oskame inglise keelt, mis on, näiteks, võrreldes Venemaaga suur asi. Eesti teadust päästab ehk seegi, et meil on neid noori, kes on hingelt teadlased, neile ei loe palk ega karjäär, neid huvitab valitud eriala, ja need inimesed jäävad uuringute juurde niikuinii. Neid pole küll palju, kuid nad on kõige väärtuslikumad. Meie ülesanne on tuua teadusesse rohkem noori – ka paljud haritud ja andekad noored, kes lähevad ärisse, võiksid teaduses kasulikumad olla. Ja vaat selleks tulebki teaduse mainet parandada ja ka sinna suunatavat raha suurendada.

Nii et suhtumine teadusesse ja teadlastesse on vildak?

Just. Võtame näiteks vana-aastaõhtu teleülekanded. Seal intervjuueeritakse kirjanikke, kunstnikke, sportlasi, poliitikuid. Olete seal kunagi näinud mõnda teadlast? Poliitikuna küll, aga ta pole siis enam teadlase rollis. Nendest näiliselt küll piasjadest algab ühiskonna suhtumine. Piltlikult öeldes, meile oleks vaja teaduse "onu Kalmerit", kes teeks teaduspõhiseid "Entel-Tenteli" saateid, nagu seda pikka aega tegi Kalmer Tennosaar lauldes, tuues muusikasse hulgaliselt noori. Tulemuseks on meil nüüd kümneid aastaid hiljem igati tasemel muusika. Ka teaduses oleks selliste saadete mõju pikaajaline.

Ajakirjanik kardab teadlasega vestelda, ta ei saa temaga hästi jutule. Haridus on, aga haritust iga kandi pealt pole. Äkki tuleks ajakirjanikele õpetada mingilgi määral ka teaduste elementaarseid aluseid, nagu Harvardi ülikoolis seda tegema hakati?

Õige küll, kuid ega see nüüd ajakirjanduse viga ka päriselt pole. Nõudmine puudub, ühiskond pole huvitatud teadlastest, pigem pseudoteadlastest ja teadmameestest, nemad on küll aeg-ajalt teenimatult au sisse tõstetud. Aga ajakirjanik, kui tal on missioonitunnet, peaks teadlasi ikka mõnikord ka rahva ette tooma. Meil on praegugi Eestis mitmeid väga nimekaid noori teadusmehi,

kellest avalikkus pole kuulnudki. Ka spordivõhik teab mitte ainult Erkki Noolt, vaid peaaegu igat olümpial käinut. Kes aga oma kodumaal tunneb maailmas tunnustatud noore põlvkonna Eesti teadlasi, näiteks molekulaarbioloogi Priit Kogermanni või informaatikuid Tarmo Uustalu ja Ahto Buldast ning mitmeid teisi? Need nimed ei ütle enamikule eestimaalastest midagi, kahjuks. Aga võiks ja peaks ütlema.!

Mida tähendab teaduse edendamine Eesti riigile, eriti nüüd Euroopa Liidu liikmesriigina?

Tuleb silmas pidada kahte asjaolu. Esiteks. Eesti on nii väike, meie panus kogu teadusesse on tühine – alla viiesajandiku Euroopa teaduse panusest, kui arvestada, et oleme sama head teadlased kui teiste riikide kolleegid. Teiseks. Teadus on rahvusvaheline ja me saame alati võtta ülemaailmsest teadusest seda, mida vajame. Selleks peab olema muidugi teatud kompetents, mida paljas kõrgharidus veel ei anna. Selleks ongi vaja teadlasi, et leida maailmateadusest meile kasulikke ivasid. Muidugi on siin ka vastuolu, millest eriti ei räägita. Tõeline teadlane kui loovisiksus ei ole huvitatud tellimustööst, vaid oma probleemi lahendamisest, mis on enamjuhtudel midagi muud kui majandusele kasulike ivade kättetoomine äriettevõtetele. Ainsa reaalse lahendusena näen sellise olukorra loomist, mis võimaldaks teadlasel teha nii oma huvidega seotud kui ka "majanduslikult kasulikke" uuringuid. Et need huvid ühtiksid, peab otsima sobiva uurimisprobleemiga tegelevaid teadlasi laiemast ringist ja meelitama neid tööle Eestisse, sõltumata kodakondsusest ja nahavärvist. Seda teed on läinud suuremadi riigid, eeskätt USA. Teine alternatiiv on maksta suure rahaga kinni teaduslik tellimustöö, kuid selliselt töötav teadlane võib kaotada oma kvalifikatsiooni, muutudes "teaduslikuks töötajaks" – termin, mis oli hästi tuntud N Liidus.

Kuidas on lood praegu teadlaskaadri ettevalmistusega? Mis teeb Teid ettevaatlikuks, ärevaks?

Tänapäeval on Eestis noorte tulek teadusesse kasin. Kordan veel: doktoritöid valmib loodus- ja tehnikateadustes umbes kümme korda vähem, kui vaja oleks. Aga just niisuguse haritusega inimesed määravad suuresti Eesti majandusliku arengu ning käekäigu tulevikus, ja mitte üksnes teadusuuringuid tehes, vaid ka tootmistegevust juhtides. Et sedasi on läinud, sõltub üldisest suhtumisest teadusesse ja ressursside vähesusest.

Milline on praegu meie ajupotentsiaal? Kui soodne on pinnas selle taastootmiseks?

Õnneks on teadlastega nii, et see, kes tõeliselt teadusest huvitub, ei vaata eriti palga suurust ega vali vaid majanduslikult kasulikku töökohta. Teadushuvilised noored ongi kõige väärtuslikumad meie teadusele ja Eesti tulevikule.

Meie jutuajamise algul väitsite, et "oma rühma raamatu" kirjutasite üheskoos kursusekaaslastega oma lastele. Kuidas on käinud nende käsi (ka võib-olla laiemalt – mõnede teiste rühmakaaslaste laste oma silmas pidades)?

Minu põlvkonna inimesed kipuvad nurisema tänapäeva elu üle – pension väike jne. Kuid meie tõeline saavutus on ikkagi tuleviku kättevõtmine lastele. Üldiselt muretseme palju Eesti rahva jätkusuutlikkuse üle, kuid igal konkreetsel juhul väljendub see ikkagi oma pere, oma laste ja lapselaste elus ja tulevikus. Sellega paistab meie rühmas kõik korras olevat. Meie laste hulgas on edukaid arhitekte, arste, insenere, majandusjuhte, õpetajaid, preestreid, viiulikunstnikke. Täielik loetelu tuleks üsna pikk. Minul on kolm last, igaühel neist oma huvitav tegevus ja omad lapsed. Kokku on mul seitse lapselast, kellest tunnen suurt rõõmu. Loodan, et nad kunagi loevad ka seda raamatut, mille me oma rühmaga kirjutasime, ja suudavad hinnata neid muutusi, mis on toimunud meie õpinguaastate järel.

MEES NAGU MITME TUNDMATUGA VÕRRAND

Horisont, 2/2008, Rein Veskimäe



Tarmo Soomere

2005. aastal tormihüüdega tuntuks saanud ja selle eest Aasta Inimeseks nimetatud Tarmo Soomere tegeliku edu aluseks on võrratute merevõrrandite lahendamine.

Teist sai laiem avalikkus teada kolme aasta taguse jaanuaritormi ettekuulutajana. Kuidas niisugune ennustamine käib? Tulemus polnud ju välja loetud kohvipaksult ega seapõrnalt, mille põhjal meedias kombeks inimesi laialt teavitada.

2005. aastal pääsesid mereteadlased tõesti ajakirjanduse esilehekülgedele. Tegelikult teati nende tegemistest juba alates 2002. aastast, mil uuringute eest Saaremaa süvasadama valikul omistati neile riiklik teaduspreemia. Nii selgus, et mereteadlased on olemas ja nad ka üht-teist oskavad. Kuid 2005. aasta jaanuaritormi ei ennustatud siiski Eestis ega ka modelleeritud siin. Prognoos tuli Taani kolleegidelt, kellega oleme koostööd teinud ammust ajast. Sealt saabus hoiatus uskumatult tugeva tormi tuleku kohta. Nii et mina ei prognoosinud, vaid "kleepisin" olemasolevad infokillud kokku ja panin juurde Eesti reaalaja andmed, mida registreeris tegelikult mereteadlasest kolleeg Tarmo Kõuts. Seisin piltlikult öeldes teiste õlgadel ja karjusin kõige valjemini. Pigem oli tegu julgusega minna vastuollu riikliku süsteemiga ja sellest üle hõigata.

KUUETEISTAASTASELT KULDMEDALIGA

Kohila, kus keskkooli lõpetasite, on merest kaugel. Kas ka tol ajal mere vastu huvi tundsite?

Kooli päevil lugesin kusagilt, et kui liustikud sulaksid, siis tõuseks meretase 50 meetri võrra. Arvutasin kähku välja, mis saaks siis Kohilast, ja leidsin suureks rõõmuks, et meri isegi säärasel juhul kodu enda alla ei napsaks. Tegelikult ei teadnud ma merest midagi. Küll aga viis koolivend Tiit Lukki minu kui eduka koolimatemaatika kokku mereteadlase professor Ain Aitsamiga. Ain pani mu nime kusagile kirja ja ütles, et kui soovid õppida kunagi Moskva Riiklikus Ülikoolis matemaatikat, siis katsub aidata koha leidmisel. Aga eksamid tuleb endal ära teha – ja väga korralikult.

Lõpetasin keskkooli 16-aastaselt ja nii noorelt ei tulnud üksi Moskvast elamine kõne alla. Seepärast oli igati loogiline alustada Tartust.

Kuidas saite lõpetada keskkooli nii noorelt?

Läksin esimesse klassi kuueaastaselt ja seitsmendas klassis ei käinud üldse. Praegu on kõigil hambus koolivägivald. Ega meie ajal teisiti olnud. Kiusamise vormid olid ehk vähem räiged. Suur osa minu näivast edukusest pärineb sellest, et olin vähemalt aasta klassikaaslastest noorem ja märksa nõrgem; samas korralik õppur, järelikult paras nohik. Eks lapsed kipuvad ikka liiga tege ma neile, kes teistsugused. Psühholoogiliselt oli raske aeg. Enese ülestöötamine sportlasena ja ühe klassi vahelejätmine oli hea võimalus olukorrast auga pääseda. Lapsepõlve rumalused on nüüdseks kauge minevik. Juba keskkooli ajaks olime mitmetega nendest, kellest tookord lahku läksin, väga head sõbrad. Polegi vaja laste lollusi meenutada, palju õigem on nendest õppida. Tegelikult oli see kõva karastus iseseisvaks eluks, samas võti kurjuse äratundmiseks juba kaugelt.

Küllap on koolielu praeguseks tublisti muutunud. Kindlasti on palju asju paremaks saanud. See on hea, sest kasvamine kitsastes tingimustes ei ole kerge. Aga steriilsel, justkui vati sees elamisel on oma miinused. Nõudmised kipuvad kasvama kiiremini kui võimalused. Inimesed ei ole üksteise kloonid. Seal, kus ühtedel on mõnus, on teistel ebamugav. Heaolu eesmärgiks seadmine teeb mu üsna rahutuks. Veidi utreeritult ütlesin, et üldine heaolu on pigem destruktivne ning kohati väga ohtlik. Heaoluühiskonnas kipub kaduma motiiv arenemiseks. Präänikuga on raske meelitada, kui präänikud igal pool vedelevad. Peab olema miski, mis inimest sunniks. Minu puhul miski toimis – tahtsin pääseda nohiku staatusest.

Lõpetasite kooli kaks aastat varem kui eakaaslased, tulite vabariikliku olümpiaadil matemaatikas teiseks, olete Eesti meister orienteerumises ja medalimees üleliidulistel võistlustel, nüüd kõva bridžikäsi. Kust säärane mitmekülgsus?

Olümpiaadidel ma muidugi käisin, 10. klassis võitsin vabariikliku olümpiaadi matemaatikas ja lõpuklassis sain teise koha. Õppisin peamiselt iseseisvalt. Juba 9. klassis oli mul läbi võetud kogu keskkooli matemaatika kursus. Õpetajad olid ääretult mõistlikud ning ei kohustanud mind tunnis käima või vähemalt ei pidanud ma seal tegelema sellega, mis klassikaaslased. Nii oli ka füüsikas ja keemias. Aga mis palju vahvam, õpipisik kandus üle ka mõnedele kaasõpilastele. See on samuti kogemus kogu eluks. Kui üks kolleeg on edukas, siis sirutavad teisedki end kõrgemale.

Tänutundega mõtlen tagasi oma koolile, mille õpetajad ei lasknud meid ühe külgseks kasvada. Spordis innustas kõiki õpilasi oma ala tõeline fanaatik, ke-

halise kasvatuse õpetaja Heino Vilipere. Ta vedas lapsi enda järel metsa jooksma, orienteeruma, ehitas staadioni, propageeris sporti tulihingeliselt. Orienteerumine on hea ala nohikutele, sest ei pea väga kiiresti lippama. Ma pole olnud kunagi hea jooksja. Orienteerumisrajal on vaja teha aga sadu otuseid. Võidab mitte kõige kiirem jooksja, vaid poiss või tüdruk, kes läbib raja lühima ajaga. See sobis mulle.

MATEMAATIKUKS TARTUS JA MOSKVAS

Õppisite matemaatikat Tartus ja siis siirdusite Moskvasse. Kuidas üleminek toimus?

Koht Moskva Riiklikku Ülikooli eraldati parajasti siis, kui lõpetasin Tartus kolmanda kursuse. Olin siis 19-aastane. Üleminek ei kujunenud aga lihtsalt õpin-gute jätkamiseks: Tartus tehtud eksameid Moskvas ei tunnistanud. Kuigi programm oli sama, soovis iga Moskva professor tingimata veenduda, kas oled tema ainega ka sisuliselt kursis. Kõik erialaeksamid tuli teha uuesti.

Tänu nimekatele õppejõududele olid Moskvas kuulatud loengud fantastilised. Nõuded üliõpilastele olid märksa suuremad kui Tartus. Eksami tegemise aluseks oli tavaliselt paar paksu raamatut, millest tuli teada iga fakti, ning osata kiiresti skitseerida iga teoreemi või väite tõestus. Ainest pidi sisuliselt mõistma. Oli ikka tõepoolest unikaalne õppejõudude koosseis. Nende meeste ja naiste õpikud on mul tänini riiulil. Algul oli muidugi raske leppida, et ligikaudu 200 kursusekaaslasest oli vähemalt 20 noort minust peajagu üle, ja nii palju üle, et oli selge – nii jääb elu lõpuni. Nõudis teatavat eneseületamist, et saada aru – olles Eesti meister, ei pruugi sa olla maailma mastaabis mitte keegi. Niisugune kogemus oli väga õpetlik ja sellest ka minu näiv edukus Eesti ulatuses.

ROSSBY LAINED JA MEREVÖRRANDID

Suure ülikooli diplom taskus, siirdusite Moskva Okeanoloogia Instituuti. Kuidas on ookeaniga seotud Teie meelistemaatika – diferentsiaalvõrrandid?

Okeanoloogia Instituudi aspirantuuri minek oli loogiline järg õpingutele ülikoolis. Kaalusin kaua, kas teoloogiaõpingud või okeanoloogia aspirantuur. Teoloogia õppimine oli tol ajal siiski keerukas, aasta oli 1980. Usuteaduse Instituuti minek oleks tähendanud täppis- ja loodusteadustest loobumist. Samas polnud selge, kas tollased võimuorganid lubanuksid mul teoloogiaõpinguid alustada..

Mulle on juba lapsest saati meeldinud lahendada võrrandeid, sest täpne lahend tekitab hea tunde. Praegune parim teadmine meie maailmast on selline, et põhiosas on maailm kirjeldatav diferentsiaalvõrranditega. Kõik teavad Newtoni teist seadust: $F = ma$. See on tegelikult teist järku diferentsiaalvõrrand.

Ka väljavenitatud vedru liikumist või kellapendli võnkumist või röövloomade ja jahisaagi populatsioonide arengut saab kirjeldada lihtsate diferentsiaalvõrranditega. Samuti on mere- ja rannikuteaduses. Näiteks tuule toetusel veemaside liikumisel meres ei saa me muud moodi veepinna kuju teada, kui kirjutame välja võrrandi, mis näitab pinna kalde sõltuvust tuule tugevusest ja vee sügavusest ning siis lahendame selle.

Teie doktoritöö oli seotud Rossby lainetega. Miks just need Teile huvi pakkusid?

Enne, kui astusin sisse Okeanoloogia Instituudi uksest, oli professor Aitsam välja valinud tulevase juhendaja – professor Kamekovitši, kelle raamatutest veel praegugi ookeani dünaamikat õpitakse. Kohtumisel pakuti välja kolm teemat. Ei saanud ühestki aru, panin pimesi ühele neist näpu peale ja liisk langeski. Niipalju mõistsin, et tulevane töö on seotud võrranditega, täpsemalt siis Rossby laineid kirjeldavate võrranditega.

Carl-Gustav Rossby oli Rootsi teadlane, meteoroloog. Tema järgi nimetatud laineid kajastavad võrrandid olid aga märksa hullemad, kui oskasin arvata. Kolm aastat kulus ühe võrrandi lahendamiseks arvutil. Mida taoline võrrand kirjeldab? Rossby laineid on atmosfääris ja ookeanis palju. Kui mis tahes viisil liigutada suuri õhumasse, tekivad alati Rossby lained. Nii tsüklooneid kui anti-tsüklooneid võib interpreteerida Rossby lainetena.

Ka üksikuid Rossby laineid on võimalik vaadelda. Kõrgemates õhukihtides puhub Eestist üle Venemaa, Kanada ja Atlandi kaudu ümber maakera läänekaarte tuul ehk läänevool. See paindub kord veidi põhja poole, kord lõunasse. Taolised looked ongi üks Rossby lainete avaldamise vorm. Kui kaks looget kokku saavad, tekibki keeris, ning seal sünnibki teatavas mõttes ilm.

Ka meres tekivad niisugusel juhul keerised, kuid need on kümneid kordi pisevad, kuid vahel sadu kordi tsüklonitest või antitsüklonitest pikema elueaga. Säärased keerised avastati ookeanis 1970. aastal. Eesti mereteadlased on nende avastamise pioneerid Läänemeres.

Minu väitekirj saigi alguse vaid kümnekond aastat hiljem. See oli siis kuum teema: selgus, et ookeani dünaamika erineb täielikult varem arvatust. Loomulikult oli vaja teada saada, kuidas Rossby lainete ja keeriste süsteem elab ning hingab. Juba Carl-Gustav Rossby oli tunnetanud nende tähtsust, ent 1970-ndatel näidati, et ligikaudu 80 protsenti ookeani lainetuse energiast kannavad Rossby lained. Kõigile muudele lainetele kokku, ka tõusule-mõõnale, siselainetele ja tormilainetele nende seas, jääb alla 20 protsendi. Rossby lained on meres võrdlemisi aeglased: periood on neil mõnikümmend päeva ja vee liikumiskiirus mõni sentimeeter sekundis. Ometi on neil tohutu energia, mida me ei oska ära kasutada. Isegi Golfi hoovus püsib suurelt jaolt tänu selle liikumist toetavatele ja stabiliseerivatele Rossby lainetele.

Minu eesmärgiks oli välja selgitada, mis saab Rossby lainete süsteemist siis, kui niisuguseid laineid on seal hästi palju – just seda pidi kirjeldama mulle lahendamiseks antud võrrand. Ülesanne on analoogiline klassikalise termodünaamika probleemiga. Surudes mingi gaasi anumasse, tekib seal teatud aja pärast tasakaal, mille korral rõhk on igal pool ühtlane. Kui süsteemis sünnib hästi palju Rossby laineid, millel pole kuhugi minna ega murduda, nii nagu üleni veega kaetud Maa peal juhtuks, kujuneb mingi aja pärast samuti teatavas mõttes tasakaaluline süsteem. Tasakaalus olevas gaasis on rõhk igal pool ühtlane, Rossby lainete tasakaalusüsteemis on asjad palju huvitavamad. Selgus, et teatavat tüüpi hoovus võib eksisteerida koos lainetega ühes tasakaalulises süsteemis. Enamgi veel, Rossby lained on suutelised tekitama hoovuseid, mis käituvad nagu läänevool. Teisiti öeldes – lainetest, mis tulevad ja lähevad, aga vesi justkui seisab paigal, tekib mõne aja pärast siiski hoovus, mis kannab tohutuid veemasse. Seda näeme Jupiteril, mis on vöödiline. Golfi hoovus on meile märksa olulisem näide, mida küll toetavad mitmed teised tegurid. Et ookeanis mööda paralleele voolavad hoovused esile kerkivad, aimati 1970. ja 1980. aastatel arvutisimulatsioonidest. Kuid uskuda ei suudetud ikkagi, ka minu seletust peeti rohkem puhtaks teooriaks, millele ehk kunagi leitakse mingi side igapäevaeluga. Praegu on see osa üldtunnustatud arusaamast merede ja ookeanide tsirkulatsiooni kohta.

Kuidas on mõjutanud Rossby lained Teie edaspidist teaduslikku tegevust?

Rossby lained on minuga kogu aeg kaasas käinud. Olen väga tänulik, et kõnealuse ülesande peale sattusin, sest siin on võimalik väga palju sullepeaga ära teha.

Omaaegsed tegemised on saamas uut hingamist meid kõiki puudutavates asjades, nagu näiteks võimalik suureustus Soome lahel. 2006. aastal pakkusime välja idee, kuidas saaks õlireostuse rannikule jõudmise tõenäosust vähendada või üldse vältida. Idee taga on eespool kirjeldatud mõte, et Rossby lained põhjustavad kindlat tüüpi voolamist. Soome lahes on suhteliselt korrastatud voolamine idast läände lahe teljest põhja pool, seega Soome pool küljes, piki suhteliselt lamedalt tõusvat merepõhja. Säärast voolu stabiliseerivad Rossby lained, mis on meres alati olemas. Väikese veepinna häirituse korral tekib pinnalaine. Kui suudaksime tekitada suurema laine, nagu Kuu ja Päike teevad tõusu-mööna ajal, siis sellest kujuneb Rossby laine sama moodi, nagu vette visatud kivist kujuneb pinnalaine. Ka kõvade tuulte ning madal- ja kõrg-rõhkondade vahelduva mõju tõttu on Rossby lained Soome lahes olemas. Enamasti me ei suuda neid puhtal kujul mõõta, sest nad on nõrgad. Nõnda on nad olemas mis tahes meres, kuigi vahel tühised. Nende elu käib oma seaduste järgi, kuid igal juhul toetavad nad hoovusi, mis avaookeanis kulgevad piki paralleele ja madalamates meredes mööda põhja samasügavusjooni. Kui-

gi säärased lained ei vii merre sattunud õli rannale lähemale ega sealt kaugemale, toetavad need ühte teatud tüüpi hoovust, mis kannab reostuse Soome lahest välja. Loogiline oleks panna laevad niisugust hoovust pidi liikuma.

VARAKULT MAAILMAPARANDAJA

Nüüdseks olete suutnud teadlasena küllalt palju ära teha. Aga oleks võinud ka teisiti minna, sest olite tudengipõlves tollaste võimude silmis probleemne figuur. Miks?

Olen pärit religioosest perest ja pole seda kunagi varjanud, samas taasiseseksunud Eestis ka mitte afišeerinud. Religioossus on Eestis tundlik teema. Raske öelda, kas tegemist on ajaloolise mälu või inimeste endi südametunnistusega. Isiklikus plaanis on see pigem küsimus sellest, kuhu inimene end maailmas positsioneerib. Kas ta seab enda tippu või kusagile mujale, kas ta positsioneerib end kõige valitsejaks või mitte. Teatav isiklik suhe religiooniga on osa minu elust olnud ja jääb selleks, ma loodan. Pean kirikut kui religioossuse välise vormi kandjat ühiskonna oluliseks komponendiks just enda koha leidmise võimaluste laiendamise mõttes, aga ka eetiliste tõekspidamiste hoidjana.

Nõukogude ajal oli kirikul ühiskonnas täiesti unikaalne koht. Religioossuse kaudu oli võimalik end positsioneerida kohustuslikust maailmavaatest erinevana. See oli ainuke kanal, mille kasutajaid kohe istuma ei pandud. Nagu paljud teised noored, olin minagi tol ajal maailmaparandaja. Mängisin kirikutes heliplaate ja kommenteerisin kuulajatele esitatud palu. Nii avanes tee inimeste juurde, et nendega kontakti saada. Tartu päevil sõitsin mööda Eestimaa kirikuid, ühel suvel oli üle 50 esinemise.

Ma ei varjanud oma meelsust ka ülikoolis. Tekkis väike mõttekaaslaste ringike, mis regulaarselt meie ühiselamutoas iga nädal tervelt kahe aasta jooksul koos käis. Seal arutleti filosoofilistel teemadel ja kuulati muusikat. Eks niisugune tegevus oli kõvasti pinnuks silmas küll.

Suurim tegu tudengiajal oli nii-öelda ideoloogiliselt ebasobiva kirjanduse paljundamise organiseerimine. Otseselt riigivastaseid kirjutisi tuli vältida, muidu oleks säärane töö väga lühiajaliseks jäänud. Muidugi oli see minu kui noore inimese nahaalsus võimuorganite nina all vähemalt paarsada nimetust ja tuhandeid raamatuid liikvele lasta. Ka oma ajakirja, mis levis üsna mitmekümnes eksemplaris, sai aasta aega iga kuu välja antud. Süsteemi käimashoidmine eduka õppetöö kõrvalt oli karm kool. Kestis see päris mitu aastat, enne kui 1980-ndate keskel kallale tuldi. Eks ma sain päris kõvasti ka sakutada. Aga õnneks jõudsin enne kraadi ära kaitsta, kui jaole saadi. Hiljem oli mind kui edukat noort teadlast juba raske istuma panna. Kõigi huvi oli toimunud summutada, tundub nüüd tagasi vaadates. Selline üsna mastaapne ettevõtmine oli üks osa minu kujunemisest. Ja küllap peegeldub siin mu soov teha oma

otsused alati sõltumata valitsevast korrast, kui olen kindel, et mingi tõsine idee vajab edastamist. Olen nii mõnikord talitanud hoolimata kõikidest vastuväidetest, esindades selles mõttes absoluutset jäärapäisust. Küllap jäänuks niisuguse kogemusega ka jaanuaritormi eelne sõnum edastamata.

Mainitud kirjastustegevuses oli palju kaasalööjaid, kümnekond masinakirjutajat, mitmed paljundajad nii Eestis kui ka Moskvas. Raha liikus just niipalju, kui töö nõudis, kasumit tuli vältida. Kasumi korral oleks olnud kindel trellide taha minek. Tegelikult oli mu saatus juuksekarva otsas, suurelt jaolt tõi pöördede kolleegide-teadlaste kindlameelsus ja õiglustunne. Kui toimik jõudis kohustusse, siis kolleeg, kellega oleme teaduslikes asjades peaaegu et vaenujalal, kirjutas minu kohta kuldse iseloomustuse ja nõudis, et mind õigeks mõistetak. Sellised asjad teevad südame soojaks ja näitavad inimeste tegelikku palet.

ÕNNELIK AASTA

Olete väitnud, et Teie akadeemikuks saamine oli väiksema tõenäosusega kui too kuulus jaanuaritorm.

Aastakümneid on akadeemiasse valitud inimesi, kes esindavad teatud struktuuride tippe. Mina aga ei ole täiesti teadliku valiku tõttu ühegi struktuuri tipus. Seepärast arvasin, et minu valimine akadeemiasse on äärmiselt ebatõenäoline. Struktuuri tipul on suured eelised, sest tal on kasutada struktuuri võimsus. Ta seisab nagu teiste õlgadel, aga neid õlgasid ju kõigile ei jätku. Olin loobunud laiema valdkonna vedamisest ega ole ka ühegi klassikalise eriala liider. Seepärast oli akadeemikuks valimine mulle täiesti ootamatu. Ma ei uskunud seda enne, kui tuli ametlik teade.

8. detsembril 2005, Teie Postimehe Aasta Inimeseks saamise korral kirjutas keegi internetis: "Väike vihje Eesti akadeemikutele. Sedavõrd võimekas spetsialist nagu Soomere võiks ehk kuuluda Eesti TA liikmete hulka. Ega TA-s hetkel ülemäära palju matemaatikuid vist pole." See unistaja sai ka kohe ühelt teiselt kommenteerijalt vastuse. "Õnneks ei valita akadeemikuid Postimehe seltskonnas ega ka Delfi anonüümsete kommentaaride põhjal. Tuntusest vabariigis ega Kapa-Kohilas ei piisa. Akadeemikutelt eeldatakse nende tulemuste laialdast rahvusvahelist tuntust sisuliste väärtuste alusel, mitte aga tuntust kodumaal osaluse tõttu mõne kohaliku infokanali mingil kommertslikul üritusel."

Paistab, et kadeduseussi on meist paljud kodustanud.

Akadeemikuid ei valita tõepoolest väljaspool akadeemiat. Ükskõik, kuidas hinnatakse ühe või teise šansse, otsuse teevad akadeemikud. Mis alusel nad seda teevad, on mulle suurelt jaolt veel teadmata.

Ma ei oska öelda, mis oli minu valimisel määrav. Arvan, et Aasta Inimese tiitel pigem takistas. See on akadeemilise maailma jaoks mitte teaduslik kõrgtase,

vaid lihtsalt populaarsus ühiskonnas, mida akadeemia kuigi kõrgelt ei hinda, samuti nagu ajalehtedes ilmunud nupukesti tormihoiatusest. Akadeemik ei suuda kedagi päästa, ta vaid räägib seda, mida ta teab, ja siis kui vaja, jättes otsustuse teistele professionaalidele. Nii palju kui tean, vaeti uute akadeemikute, ka minu valimisel eelkõige teadlaste kaalukust rahvusvahelises ulatuses ja sotsiaalse närvi olemasolu.

Paar asja on küll, millega ehk praegu uhkustada võiksin. Möödunud suvel ilmus Ameerika Mehaanikainseneride Seltsi ajakirjas *Applied Mechanics Reviews* mu pikem ülevaade mittelineaarsetest laevalainetest, mille peateljeks Eesti teadlaste kiiralaevalainete-alastest uuringutest välja kasvanud fundamentaalsed edusammud. Nimetatud ajakirja veergudele pääsevad üldiselt need, kes on maailmas oma valdkonnas uuringutega täielikku tunnustust leidnud. Seal ilmuvad lood, mis vähemalt lähema kümnendi jooksul peaksid kujundama oma valdkonna mõttemaailma. Teine pikem ülevaateartikkel solitonide liitumisest telliti käesoleval aastal kirjastuselt Springer üllitatavasse uude kompleksteaduste entsüklopeediasse *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, mille ligikaudu 6 000 leheküljele mahub vaid 300 artiklit. Ka seda pean erakordseks tunnustuseks.

Mulle tundub, et tookordne kadetseja oli ilmselt Teie lähikonnast.

Teadlased on üks huvitav seltskond. Nad on olnud valdavalt nii kesk- kui ülikoolis kõik priimused. Sattunud kõrvuti olema, pole nad harjunud sellega, et teiste varju jäävad. Veel enam – et keegi neist peab ka viimane olema.

Teadustulemusi ei saa hinnata väljastpoolt teadust; samuti ei saa öelda, kui palju täpselt mingi teoreem maksab. Seni parim meetoodika on eksperthinnang nendelt, kes on ise professionaalsed teadlased ja kaua aega teadust teinud.

Võib tunduda, et on kokkuleppe küsimus, mis on väärtuslik ja mis mitte. Elu on aga näidanud, et akadeemilised väärtused on universaalsed ja piisavalt suure süsteemi puhul ka isetaastuvad. Kui lõhkuda tipp-teadlaste seltskond, nagu Venemaal tehti, taastub akadeemiline kultuur ning sellel baseeruvad kokkulepped ja kriteeriumid paarikümne aastaga. Lössenko aeg sai mööda ning sündisid uuesti endised kokkulepped. Paistab, et need on universaalsed kogu maailmas. Niisugune on teaduse arengu sisemine loogika, käitumishorm. Ka siis, kui viisakalt käituvad inimesed likvideerida, tekib viisakus uuesti. Küllap on olemas side mingite energeetiliste printsiipidega ning tõenäoliselt funktsioneerib ühiskond nõnda paremini..

TSUNAMID KONTROLLI ALLA

2004. aasta detsembris tellisin Teilt kui mereteadlaselt Horisondile artikli selle kohutava Kagu-Aasia maid laastanud tsunami kohta. Kohe järgnes meilgi jaanuaritorm, millest samuti kirjutasite. Siis oli jutt veel

mõrvarlainetest ehk hiidlainetest ehk väga-väga kõrgetest lainetest väga kõrgete lainete hulgas. Neid asju olete ise modelleerinud, matemaatiliselt kirjeldanud. Mida võiksite tollal kirjutatule praegu lisada?

Meiega kollektiivis Küberneetika Instituudis töötavad koos mitmed noored andekad inimesed, enamik välismaalt. Üks neist on välja töötanud teooria, kus prognoositakse, millised tsunamid on ohtlikud, millised mitte. Me saame seda kontrollida, kasutades tsunami väikese mudelina kiirlaevalaineid siinsamas Tallinna lähel. Algust teeme juba eeloleval kevadel. Kokku tuleb unikaalne seltskond kogu maailmast, isegi Austraaliast: nii tsunami, kiirlaevalainete kui ka hiidlainete eksperte. Kahe kuu jooksul tahame kindlaks teha ja aru saada, mis peitub tsunami purustusjõu taga. Selge on, et kui tsunami jõuaks rannale täpselt sümmeetrilise siinuslainena, siis tal on üsna suur purustusjõud. Kui ta on aga ebasümmeetriline, esinõlv järsem kui taganõlv, siis ta tõuseb kordades kõrgemale ja jõuab kaugemale sisemaale. Niisuguse tsunami kuju on juba praegu võimalik merel mõõta, loodetavasti varsti ka prognoosida. Teades tsunamilaine kuju konkreetse piirkonna jaoks, saab inimesed vajalikule kaugusele evakueerida. Selleks jääb vähe aega, võib-olla tund või pool tundi, aga minna on ka vaid kilomeeter-paar. Kui on teada, kuhu tsunami tulla võib ja milliste omadustega ta on, saab rehkendada, kuhu ehitada majad ja kuidas planeerida evakuatsiooniteed. Kes niisuguste lainete kuju ja purustusjõu seostada suudab, on korda saatnud väga teo. Kas meil see õnnestub, ei tea. Kuid alust on siiski arvata, et oleme edukad. Kiirlaevalainete analüüsist võib saada läbimurre nende rannikute haldamisel, mis on seotud tsunamiga. See on asi, mida üks teadlane eluaeg ootab, mida nimetatakse sageli väljakutseks. Mõõtmistel on mitmes mõttes kombineeritud minu isiklik kogemus, samuti meie noorte kolleegide usk, hea ettevalmistus ja soov midagi ära teha. Tallinna lähe näol on meil olemas ka looduslik laboratoorium.

Sügisel organiseerisite Tallinnas rahvusvahelise teadusliku suvekooli. Mis oli eesmärk?

Eestis pole süstemaatiliselt õpetatud rannikute haldamist ja sealse ehitustegevuse spetsiifikat üle poole sajandi. Ühele mereriigile on niisugune asi lubamatu. Kutsusime välismaalt kohale tippspetsialistid, kes pajataksid, mida üks rannikuinsener peab teadma. Et korralikult õpetada, peame tundma asju kahest vaatepunktist – Eesti tingimusi ja maailma teadmiste taset kõnealuses valdkonnas. Selleks oligi 16 päeva kestnud suvekool korraldatud.

Viimastel aegadel olete töötanud palju läänes, eriti Saksamaal ja Norras. Millised on suhted Vene teadlastega, Moskvaga? Mis praegu seoses lainetemaatikaga päevakorral?

Venemaaga on sidemed kahjuks suurelt jaolt katkenud. Õppejõud ülikoolis olid peaaegu puhtad matemaatikud, kel rakendustöid polnud. Küll olen kasu-

tanud oma tolaegsete professorite raamatuid. Diplomitöö juhendaja Boriss Vainberg kirjutas hiljuti raamatu laevalainetest. Taoline paralleelsus oli mulle suur üllatus.

Ligi viieteist aastat on kestnud koostöö Saksa teadlase Klaus Hasselmanniga. Temas on liitunud väga mitme valdkonna teadmised: hariduselt ja kutsumuselt füüsikateoreetik, on ta märksa enam tuntud kliimaekspertina ja esimese adekvaatse lainemudeli WAM (ingl *Wave Model*) loojana. Tegemist on mudeliga, millega kogu maailm töötab, ka meie. Tema mõtleb praegu, millised võiksid olla tulevikus kliimamuutuste prognoosimise tehnoloogiad. On selge, et väljatöötatud mudelitel, mida on väga palju, on kõigil oma head ja vead. Samas pole võimalik praegu otsustada, milline on parim ja kas üldse üksi õige on. Teisalt on olemas strateegiad, millega saab ka ebatäpsete prognooside alusel palju olulisi asju teada. Lähipäevil kirjutatakse alla üleeuroopaline projekt, mis on suunatud just nende küsimuste analüüsile, ja meid on kutsutud osalema ühe partnerina. Meie ülesandeks on käsitleda sündmusi, mille tõenäosus on küll väga väike, kuid mille tagajärjed võivad olla katastroofilised. Läänemeri oma tormidega, mida klassikalise statistika valguses ei tohiks üldse mitte kunagi ette tulla, samuti tankerikatastroofi võimalusega, on jällegi sobiva katseala rollis.

Mis seob Teid veel Kohilaga?

Mälestused ja venna pere. Viimaste aastate töökoormus on olnud nii suur, et sealsesse suvekodusse olen jõudnud korra-kaks aastas. Niisugune olukord peab muutuma. Üleskutse endale – vaadata passist tihedamini sünniaastat!

ARVUTAMINE ON LOODUSTEADUS

Horisont, 2/2006



Tarmo Uustalu

Mis ajendas Teid valima teadlase karjääri?

Ma ei tea, mis. See oli loomulik valik. Ma pole kunagi tahtnud saada kellekski muuks kui teadlaseks, ja nimelt matemaatikuks. Või ainult ehk heliloojaks-interpretiks. Ma olen muusikat õppinud ning muusikaelamused võivad minus teatud nostalgiat tekitada küll. Matemaatika ja muusika on üsna ühesugused: mõlemad on kooskõlapüüdlused, üritused edasi anda midagi, mida lõplikult saab ainult igaüks üksi ära tunda, ning millegi aukartust ja alandlikkust äratavalt suure ja tegeliku imetelu. Mõlemad on väga intuiitiivsed.

Kindlasti mõjutasid mu teadusliku maitse arengut Peeter Lorents ja Grigori Mints (praegu Stanfordi ülikooli filosoofiaprofessor, USA), kellega puutusin kokku keskkooli ning ülikooli ajal Küberneetika instituuti külastades, aga mu valik oli tehtud ikka enne kohtumisi nendega.

Kuidas olete rahul valitud eriala ja tegevusalaga?

Väga olen rahul. Arvutiteadus, või siis vähemalt seda sorti arvutiteadus, millega mina tegelen, on matemaatika ning seejuures parimat liiki matemaatika, mida võiks tahta. Kõik "puhtad" matemaatikud, kadestage! Arvutiteadus on tehniliselt väljakutsuv ehk raske, see on uus ehk suuresti veel tegemata, olles relevantne ehk oluline, kuna puutub sellisesse tegelikkusse, mis mulle korda läheb, ning mulle on ta kanaliks, mille kaudu saada aimu looduse taga seisvast Suurest Tarkusest. Ning loogika ja semantika seovad matemaatika veel keele fenomeniga, mis ka on suur müsteerium. Milline teadus saab olla huvitavam? Ma peaksin vist igaks juhuks ütleva, et "kordaminev tegelikkus" ei tähenda mulle tehnoloogilisi rakendusi. Ma olen üsna ükskõikne tehnoloogia suhtes ning päris sageli tahan, et oleksin sündinud paar sajandit tagasi. Ma ei suuda huvi tunda oma mobiiltelefoni võimaluste vastu ega õppida neid kasutama...Pean silmas hoopiski seda, et arvutiteaduse objektiks olev arvutamine on midagi, mis on looduslik, arvutamine on olemas meist sõltumatult. Meie pole ju arvutamist välja mõelnud, ta on meist vanem ja igavene...On mõnети juhus, et see 20. sajandi teisel poolel seoses tehnoloogia arenguga päevakorda tõusis. Matemaatika võib seose loodusega kaotada ka ning takerduda tegelema iseenda konstrueeritud struktuuridega, loobuda päikeseloojangutest tööstusmaastiku kasuks, teate küll. Selline matemaatika on halvemat liiki.

Mulle pööraselt meeldib mõte, et matemaatikas tuleb leida õiged definitsioonid. Teooria, mis kukub välja kohmakas ja keeruline valede definitsioonide tõttu, ei ole intellektuaalne saavutus, vaid alpus ja lugupidamatus looduse suhtes. Vastupidiselt populaarsele õpetusele ei ole matemaatika sugugi mitte suvaline ja suunata konstrueerimine.

Kirjeldage lühidalt, millega Te tegelete. Miks see probleem Teid huvitab, miks on see oluline?

Minu valdkondadeks on loogika ja semantika. Need on moodsa programmi-keelte teooria alustalad. Selleks, et programmikeeled oleksid käepärased nii programmeerijale kui ka arvutile, peavad nad olema väga läbimõeldult disainitud ning sobima etteantud tüüpi arvutuseeskirjade kirjapanekuks nii hästi kui võimalik. Semantika on õpetus tähendusest ehk siis sellest, kuidas kirjeldada mingi tegelikkuse assotsieerimist keelekonstruktsioonidega. Kui ühel programmikeelel on selge semantikakirjeldus, on see hea alus näiteks kompilaatori ehitamiseks sellele keelele. Siia kuuluvad kompilaatorites pruugitavad programmide analüüsid, optimeerimised, tõlge riistvarale lähemasse keelde jne. Ent semantikal baseeruvad samuti ka vahendid programmide sügavamateks analüüsideks, nt funktsionaalse korrektsuse kindlakstegemine. Selliste analüüside esitamiseks on omaette keeled, mida kutsutakse programmioloogikateks. Neilgi on oma semantika. Programmioloogikad on nagu universaalne matemaatiline loogika, aga spetsialiseeritud programme ja arvutusi puudutavate väidete esitamiseks. Programmikeelete teoreetikute üheks suureks eesmärgiks on programmioloogikate võimalikult efektiivne automatiseerimine selles ulatuses, kus see on põhimõtteliselt võimalik.

Semantika, mida mina teen, on sageli kategoorne. See tähendab, et programmidele omistatakse tähendusi kategooriateoreetiliste konstruktsioonide terminites. Kategooriateooria on liik üsna abstraktset matemaatikat, struktuuriteooria, kui soovite. Kategooriateooria rõhutab ühtsust matemaatikas ning toob välja, et matemaatika eri harudes kasutatakse igal pool samu konstruktsioone.

Kategoorne semantika on eriti paslik nn funktsionaalsete programmikeelte jaoks. Funktsionaalkeelte poolt kirjeldatav arvutamine on kõige matemaatikapärasem liik arvutamist – funktsioonide rehkendamine ning selle väga ettevaatlikud laiendused. See võib tunduda riistvarakauge ning teatud arenguaja olidki funktsionaalkeeled teoreetikute eksklusiivseks mängumaaks, kuid täna realiseeritakse moodsaid funktsionaalkeeli nagu Haskell ja Ocaml juba väga hästi ja pilt on sellega täiesti muutunud. Et funktsionaalkeeled kultiveerivad kergele modifitseeritavusele ja korduvkasutatavusele suunatud distsiplineeritud programmeerimisstiili ning et nende semantika on inspireeritud matemaatikast ja seetõttu eriti otse matemaatilisele arutelule allutatav, siis on nad väga perspektiivikad.

Te läbisite doktorantuuri ja täiendasite end välismaal. Kus, kui kaua? Kuidas Te sattusite välismaale? Millise kogemuse saite välismaal õppimise/täiendamise ajal?

Minu esimene kokkupuude teadusetegemisega välismaal oli diplomiõpingute 4. aasta järel suvel, kui kirjutasin Trondheimis (Norras) oma magistritöö, mille kaitsesin aasta hiljem. Sattusin Trondheimi koos rühmakaaslase Teno Tee- maaga juhuslikult, nagu 1991. aastal kõik välismaale pääsemised olidki. Ma olin vaimustuses raamatukogust ja kirjanduse kättesaadavusest. Doktorantuuri ühes rootsipärase litsentsiaatuuriga selle sees tegin Stockholmis, Rootsi Kuninglikus tehnikaülikoolis 1992–1998. Sinna kutsus mind akadeemik Enn Tõugu, kes oli üsna vahetult enne saanud seal professorikoha. See oli lõppkokkuvõttes ilus aeg, väliseestlased ja mis kõik, aga teaduslikus plaanis keerukas: takerdumiste aeg – mu CV on nende aastate osas hõre – ja ettevalmistusaeg, ent kujunemiseks ilmselt oluline. Mul läks kuid ja aastaid oma teema leidmisele...

Stockholmi-perioodi teisel poolel sain tuttavaks Varmo Venega Tartust, kellega olen seni kõige rohkem koos teadusest kirjutanud. Pärast on mul alati olnud rohkem asju kavas, kui teha jõuab. Kindlasti jäin ma Stockholmi liiga kauaks, pärast kaitsmistki olin seal terve aasta. Selleks olid küll ka perepõhjused – paar kuud pärast kaitsmist sündis minu perre esimene laps.

Järeldoktorantuuris olin Portugalis, Minho ülikoolis, Bragas. See oli 2000–2002. Ma läksin sinna kindla kavaga saada teaduslikult iseseisvaks, leida endale oma uurimisprogramm ja oma rahvusvaheline kontaktvõrk. See kava sai täiega teoks tehtud. Ning teate, Portugal meeldib mulle pööraselt!

Millise kogemuse sain? Ma usun, et kõige põhilisem kogemus on kõigil välismaal õppinuil mitteteaduslik ja ühine. Me oleme suhteliselt kosmopoliitsed ega talu inimeste jagamist rahvuste järgi eelarvamuste põhjal. Ela "immigrandina" kusagil ning sa õpid koduvenelast enda kõrval nägema mõnevõrra teisiti. Teadlastel ei ole ka eriti kodu. Tööturg on selline, et on suur õnn, kui leiad töökoha omal maal. Meil siin on see õnn, et mingi koha saab alati. Mujal pole see nii. Üks teadusse puutuvam kogemus: maailm on täiesti ühesugune. Igal pool on olemas need, kes mõtlevad sinuga sinu erialakonverentsil samamoodi ja kes töötavad ülikoolis sellepärast, et tahavad tööajal tegelda oma hobiga, ning need, kes käivad mingitel muudel konverentsidel ning kelle jaoks sina oled andmebaasirida tema *impact factori* (mõjufaktori) uuringus.

Olete osalenud ka Prantsuse-Eesti koostöö Parrot' programmis. Kellega ja millist koostööd see Teile võimaldas?

Ma taotlesin granti esimesel Parrot' konkursil ja sain. See võimaldas kahe aasta vältel jätkata mu järeldoktorantuuri ajal Minhos alanud koostööd dr Gilles Barthe'i rühmaga INRIA (Prantsusmaa rahvuslik arvutiteaduse ja automaatika

uurimisinstituut) Sophia Antipolises paiknevas teaduskeskuses. Teisel korral kahjuks uuesti kaasa lüüa ei saanud. Konkursitingimuseks seati, et varem ei tohi olla sellel osalenud – see on ebaharilik nõue, ärge enam nii tehke... Aga koostöö INRIA-ga jätkub. Nüüd oleme partnerid suuremastaabilises Euroopa Liidu 6. raamprogrammi projektis MOBIUS, mille sisuks on nn tõestust kandva koodi tehnoloogia arendamine väikeste seadmete jaoks. Tõestust kandev kood on paradigma, mille kohaselt tarkvara tootja peab selle korrektsuse ja/või ohutuse tõestama. Tarvitaja saab tarkvara koos tootjapoolse tõestusega ning võib soovi korral seda kontrollida. Kui tõestus kontrollis läbi põrub, pole tarkvara usaldatav. Asja mõte on, et tõestamine on raske, aga tõestuste kontrollimine kerge ning raskema töö peab ära tegema see, kes raha küsis, ehk siis tarkvara tootja.

Kas Eestis on kerge teadlasena tegutseda? Milline on Teie kokkupuude siinsete teaduse rahastamise kanalitega?

Vaat see oli väga ettevaatamatult esitatud küsimus. Kohe äärmiselt ettevaatamatult. Kas te ikka tahate seda intervjuud avaldada üldse? Eestis on teadlane olla kerge selles mõttes, et lihtne on jõuda kohalikku tippu. See asjaolu pakub teatud eneseteostusvõimalusi, milleni mujal oleks raskem jõuda, aga üks ta ole odav ka. Ent Eesti riik ja ühiskond on läbi ja läbi teadusevaenulikud. Ühiskonna tasemel on muidugi tegu ebaküpsusest tuleneva väärtuste nihestumisega. Seda on täiesti võimalik mõista ja samas loota, et asjad kunagi ikka paranevad. Kuid riik seevastu on täiesti teadlikult pahatahtlik viisidel, mis on planeedil unikaalsed, mida ei ole võimalik õigustada ja millega leppimine oleks argpükslik ja ebamoraalne. Räägitakse, et Eesti olevat erakordselt ettevõtlusõbralik, ebabürookraatlik ja peaaegu maksudeta. Ma ei tea, kas see on tõsi, aga tegeva teadlase ja olude sunnil ka teadusadministraatorina kogen ma sootuks teiselaadset suhtumist teadusse igapäevaselt ning näen, et tegu ei ole juhuste, vaid süsteemiga. Te teate neid asju niikuinii, mida ma tahan nimetada, aga on ainult õiglane, et ka Horisondi lugeja neist kuuleb. Niisiis, maksumistesse puutuvalt näiteks:

- Doktoranti ega magistranti ei saa Eestis normaalselt saata teaduslähetusse, kui ta teadusasutuses ei tööta, vaid on kõigest selle kraadiõppur. Lähetusse saatmiseks tuleb ta kas fiktiivselt lähetusse ajaks tööle võtta või siis tasuda lähetuskulude pealt tulumaks (Samas on teaduse finantseerimisskeemide orientatsiooniks praegu, et doktorandid ja magistrandid ei peaks töötama, vaid õppetoetuste toel täiskoormusega õppima.)
- Välisest teadlast ei saa Eestisse normaalselt teadusvisiidile kutsuda. Kõigilt vastuvõtukuludelt tuleb tasuda tulumaks.
- Teadusasutuse töötaja ei saa Eestis normaalselt osa võtta omaenda asutuse korraldatud teaduskonverentsidest ja -seminaridest. Kõik tema kulud on erisoodustused ja neilt tuleb tasuda nii tulumaks kui ka sotsiaalmaks, kokku 75 protsenti!

Kui see ei ole ülikoormav maksustamine, siis mis seda on? Bürokratiasse puutuvalt: projektid Eesti rahastajatelt on reeglina väikesed, raha taotlused ja aruanded aga täiemõõdulised. Tulemuseks on tööpanuste väga suur killustatus pisiprojektideks ning meeletu ajakulu taotlustele ja aruandlusele.

Kokkupuuted teaduse rahastamise kanalitega: olen kokku puutunud kõigi Eesti kanalitega. Eks nad on erinevad nii sisuliste nõudmiste kui ka bürokraatia poole pealt. Sisu poolelt on probleemiks, et Eesti on väike ja võistlevad erialad omavahel, mitte erinevad teadusrühmad üksikute erialade sees. Välisretsensente projektide hindamisel ei kasutata või on nende valik üsnagi juhuslik ja valiku kriteeriumiks võimalikult väike vaev retsensendi saamiseks, mitte retsensendi kompetents. Arvutiteadus liigitub veel suurte erialade vahele ning retsensentide valiku toimetavad nende erialade esindajad, mistõttu kompetentset retsensiooni oma eriala spetsialistilt ei saa peaaegu kunagi.

Paberimajanduse poolelt on Teadusfond ja Teaduskompetentsi Nõukogu üsna mõistusepärased ning sama käib ka Infotehnoloogia Sihtasutuse Tiigriülikooli ja Archimedese Kristjan Jaagu stipendiumiprogrammi kohta. Ent ülibürokratlikud Eestis on Ettevõtluse Arendamise Sihtasutus ja Innove, kes administreevad Euroopa Liidu finantseeritavat riiklikku arengukava ehk RAKki. Euroopa Liidu Raamprogrammid, mida administreeb Euroopa Komisjon Brüsselis, on RAKiga võrreldes lapsemäng.

Kuidas näete oma tegevust 10 aasta pärast?

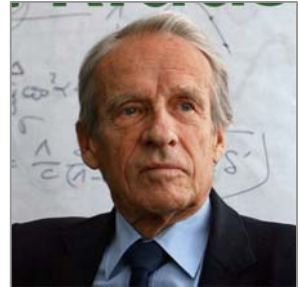
Ausalt – ei kujuta ette. Kui paari viimase aasta pealt peaks ekstrapoleerima, tuleks midagi hullu välja. Ma olen ju praegu administratiivsetesse kohustustesse uppumas, kusjuures need ei tulene mu ametikohast, vaid süsteemist. See tendents näib ainult hullemaks minevat. Midagi peab ikka muutuma! Aga mis suunas siis? Kui kümne aasta taha, 1995. aasta peale mõtlen, siis küll ei oleks osanud ette näha midagi tänasest päevast. 1998. a sattusin esimest korda MPC (programmide matemaatilise konstrueerimise) konverentsile. Ma poleks eladeski osanud mõelda, et 2006. a olen sellesama konverentsi programmi- ja orgtoimkonna esimees ja see sündmus toimub Kuressaares!

Vahetaksin parem teemat, lubage ma küsin ise ühe küsimuse ja vastan sellele ka ise.

Mis on kõige positiivsemad asjad teie teadustöö juures nimelt Eestis?

Teate mis: mu töökoht ja kolleegid. Ma naudin neid iga päev. Küberneetika instituut on uskumatu oas. Ning inimesed: kõik mu lähemad töökaaslased, on suur eesõigus ja lust töötada nendega sama katuse all!

Rühikas ja ülimalt tähelepanelik intelligentne härrasmees – niisugusena tunnevad akadeemik Hillar Abenit eeskätt nii kodu- kui välismaa kolleegid, aga ka paljud tema talendi austajad.



Hillar Aben

Ei ole tavaline, et TPI ehitusteaduskonna lõpetaja satub tööle uurimisinstituuti. Enamik läheb ikka insenerina ehitusplatsile. Teiega juhtus vastupidi. Kuidas kõik algas?

Lõpetasin Tallinna Polütehnilise Instituudi ehitusteaduskonna 1953. Veel aasta enne seda oli väga tõenäoline, et ehitusinseneri karjääri pean alustama ehitusplatsil. Hankisin endale isegi säärsaapad, et ehitusplatsi porisse mitte ära uppuda. Instituut aga oli otsustanud mind suunata edasi õppima ja nii alustasin 1953. aasta lõpul Eesti Teaduste Akadeemia ehituse ja ehitusmaterjalide instituudi aspirantuuris.

Esialgne kava oli hakata Teaduste Akadeemia korrespondentliikme Nikolai Alumäe juhendamisel tegelema koorikute mittelineaarse teooriaga. Seda kava muutis täielikult üks ootamatu sündmus. Nimelt toodi peagi meie instituuti Leningradi ülikooli katsetöökodades valmistatud fotoelastsusseadmete komplekt. See aparatuur oli tol ajal parim, mida Nõukogude Liidus toodeti. Aparatuur oli ka ülimalt haruldane, seda soovisid saada kümned laboratooriumid, jaotajaks oli Liidu plaanikomitee. Miks osutus väljavalituks üks väike Eesti teadusasutus, on müstika. Võib-olla seletab seda asjaolu, et Leningradi ülikooli katsetöökodade direktor oli eestisoost Nikolai Gommen. Hiljem saime temaga lähedasteks tuttavateks ja selle fotoelastsusaparatuuri varuosade hankimisega mul kunagi probleeme ei tekkinud.

Oletan, et fotoelastsusaparatuuri oli igaks juhaks aasta või paar varem tellinud Alumäe. Igatahes, kui selgus, et meile on sülle kukkunud ühe fotoelastsuse laboratooriumi aparatuur, oli Alumäel kohe ka selge, mida sellega uurima hakata. Nimelt on mittelineaarses plaatide teoorias üks probleeme stabiilsuse kaotanud plaadi membraan- ja paindepingeolukorra määramine. Alumäel oli idee, kuidas membraanpingeolukorda fotoelastsusmeetodil määrata, mille järel oleks paindepingete arvutamine olnud palju lihtsam. Fotoelastsusmeetodi rakendamine stabiilsuse kaotanud plaadi pingete määramiseks osutus siiski

palju keerulisemaks, kui esialgu oletasime. Nimelt on fotoelastsusmeetod lihtne, kui uurimisobjekti pinged on muutumatud kogu paksuse ulatuses. Nii stabiilsuse kaotanud plaatide kui ka ruumiliste pingeolekute puhul see nii ei ole. Klassikalised ja suhteliselt hästi läbi uuritud optika valdkonnad on geomeetiline optika, kus keskkond on mittehomogeenne (keskkonna füüsikalised omadused ei sõltu suunast), kuid isotroopne (omadused ei ole ühesugused), ja kristallide optika, kus keskkond on anisotroopne (keskkonna füüsikalised omadused sõltuvad suunast), kuid homogeenne, st omadused on ühesugused. Ruumiliste probleemide fotoelastsuses on aga keskkond optiliselt nii anisotroopne kui ka mittehomogeenne. Seetõttu on optilised nähtused sel juhul väga keerukad, tekivad mittelineaarsed nähtused ja mõõtmistulemuste tõlgendamine raske. Olin sattunud silmitsi väga keeruka, kuid ülimalt põneva probleemiga, mille täielikku lahendust ei ole tänini.

Teie kitsamat uurimisvaldkonda nimetatakse integraalseks fotoelastsusmeetodiks, mis kõlab tavainimese jaoks üsna keeruliselt. Palun lahake veidi nende uuringute olemust.

Kõigepealt, mis on üldse fotoelastsus. See on nähtus, mille kohaselt muutuvad läbipaistvad isotroopsed materjalid nagu klaas ja plastmassid mehaaniliste pingete mõjul kaksikmurdvateks nagu näiteks kristallid. Fotoelastsusefekti klaasis avastas Saksa füüsik Thomas Johann Seebeck, kes muide on sündinud Tallinnas. Oma klassikalised tulemused avaldas ta 1813 ja 1814. Kuigi Seebeckit tuntakse ennekõike kui termoelektrilise efekti avastajat, siis kuulsaks sai ta juba aastaid enne seda ning klaasi fotoelastsuse avastamine äratas omal ajal laialdast tähelepanu. Paar aastat hiljem avastas Inglise füüsik David Brewster, et mesilasevahast ja kampilist valmistatud materjal muutub kaksikmurdvaks kui seda koormata. See avastus pani aluse insenerlikule fotoelastsusmeetodile, mille puhul tehakse läbipaistvast plastmassist konstruktsiooni mudel, koormatakse seda analoogiliselt reaalsele konstruktsioonile ning mõõdetud fotoelastsusefekti põhjal leitakse pinged mudelis. Mudelil saadud tulemusi saab reaalsele konstruktsioonile üle kanda sarnasusteooria seoste abil.

Fotoelastsusmeetod on osutunud tõhusaks eeskätt tasapinnaliste pingeväljade määramisel. Märksa keerukam on määrata pingeid ruumiliste objektide sees. Meie otsustasime selleks kasutada eksperimendi seisukohast kõige lihtsamat moodust – asetada uuritav objekt valguse murdumise vältimiseks immersioonivanni ja valgustada läbi polariskoobis. Pingete mõjul kaksikmurdvaks muutunud objekt muudab niiviisi valguse polarisatsiooni ja seda muutust on võimalik mõõta. Nii saame igal valguskiirel teatud summaarset ehk integraalset informatsiooni pingete kohta kogu valguskiirel. Mitmetel juhtudel, näiteks telgsümmeetriliste objektide puhul, võimaldab see integraalne optiline informatsioon määrata ruumilist pingevälja.

Käesoleval aastal määrati Teie juhitud kollektiivile Eesti teaduspreemia integraalse fotoelastsusmeetodi väljatöötamise ja klaasitööstuses rakendamise eest. Millisel põhjusel hakkasite tegelema klaasi jääkpingetega?

Üks klaasi kvaliteedi näitajaid on selle jääkpinged. Klaastoodete valmistamisel muutub klaasimass, mis kõrgel temperatuuril on viskoosne, tahkeks klaasiks klaasistumistemperatuuril. Kuna klaasistumise ajal on klaastoote temperatuur ebaühtlane, sest selle välised osad jahtuvad kiiremini, siis algab klaasistumine toote välistest osadest. Kui seesmised osad püüavad klaasistumisel ja jahtumisel kokku tõmbuda, takistavad seda juba klaasistunud väliskihid. Nii jäävad klaastoote seesmised osad tõmbepingete alla ning väliskihtides tekivad survepinged. Need aga takistavad mikropragude levimist ja seega suurendavad klaasi tugevust. Möödunud sajandi teisel poolel hakkas klaasitööstus kasutama klaastoodete karastamist, st klaasi kiiret allajahutamist eesmärgiga suurendada survepingeid klaasi pinnal, et tõsta selle tugevust. Niisuguse protsessi juhtimiseks on vaja teada, millised jääkpinged tekivad ühe või teise tehnoloogilise režiimi juures. Integraalne fotoelastsusmeetod on siin parim lahendus, eriti keeruka kujuga klaastoodete nagu joogiklaaside, pudelite, kinesiikoo-pide ja elektrilampide puhul.

Esimest korda puutusin klaasitööstuse probleemidega kokku 1964. aastal. Tallinna tehas Tarbeklaas valmistas tol ajal elektrivalgustite kahekihilisi armatuure, mille seesmine kiht oli piimklaasist ja väline läbipaistvast klaasist. Et nende keemilised koostised on isesugused, erinevad ka kihtide termilise joonpaisumise koefitsiendid. Kui see erinevus on liiga suur, võivad armatuurid juba tootmisliinil puruneda. Ühel päeval oli tehases tekkinud olukord, kus tootmisliinilt tulid ainult killud. Töötasime siis välja mõõtmismetoodika välise klaasikihi pingete mõõtmiseks, mis lubas arvutada ka klaaside joonpaisumiskoefitsientide erinevuse. Kavandasime tehase tingimuste jaoks sobiva polaris-koobi, mille valmistas Eesti Teaduste Akadeemia erikonstrueerimisbüroo. Polariskoop anti üle tehasele Tarbeklaas. Loodetavasti aitas säärane riistapuu kahekihiliste armatuuride valmistamise tehnoloogiat paremini juhtida.

Töötades 1988. aastal professorina Poitiers' ülikoolis Prantsusmaal, külastasin Pariisis firma Saint-Gobain uurimisinstituuti Saint-Gobain Récherche, kus tutvusin instituudi fotoelastsuse laboratooriumi juhataja doktor Claude Guillemet'ga. Guillemet on loonud hulga originaalseid viise lehtklaasi pingete mõõtmiseks. Tol ajal töötas ta välja joogiklaaside karastamise ja õhukeseseinaliste õllepudelite valmistamise tehnoloogiat. Guillemet tellis meilt tehnoloogia nende objektide jääkpingete mõõtmiseks. Sellega saime kiiresti hakkama ning paari kuu pärast tutvustasin seda tehnoloogiat Saint-Gobain Récherche instituudis.

Koos Guillemet'ga tõdesime, et kuigi on olemas meetodid nii lehtklaasi kui ka keeruka kujuga klaastoodete jääkpingete mõõtmiseks, ei kasuta neid meetodeid klaasitööstus. Nende propageerimiseks otsustasime korraldada klaasi jääkpingetele pühendatud suvekooli, mis toimus 1992. aasta suvel Rahvusvahelises mehaanikauuringute keskusel Udines, Itaalias. Samuti otsustasime kirjutada klaasi fotoelastsusest raamatu "Photoelasticity of Glass", mille avaldas kirjastus Springer 1993. aastal. Need sammud aitasid kindlasti kaasa nüüdisaegse fotoelastsuse kasutuselevõtmisele klaasitööstuses.

Edasi järgnesid lepingulised tööd firmadega Asahi ja Philips seoses pingete määramisega kinesiograafides ja firmaga Arc International, mis on suurim karastatud joogiklaaside tootja maailmas. Praegu kasutavad meie integraalset fotoelastsusmeetodit realiseerivat polariskoopi ligi kaksikümmend klaasifirmat Euroopas ja USAs. Üks polariskoop asub Brasiilias ning teine Coca-Cola pudelitehases Dubais.

Olete ka osaühingu Glasstress juhatuse esimees. Äriühingut juhtiv akadeemik on üsna haruldane nähtus.

Arvan, et Tallinna Tehnikaülikoolis tehtava teaduse loogiline tulemus võiks olla äriühing või ingliskeelse terminoloogia järgi *spin-off* firma. See toetab Eesti majandust. Kui olime hulk aastaid müünud välisfirmadele oma integraalse fotoelastsuse polariskoope, siis ilmnes, et see tegevus ei mahu hästi ühe akadeemilise uurimisasutuse raamidesse. Polariskoopide valmistamine nõudis paljude detailide ostmist välisfirmadelt, lepinguid allettevõtjatega, sõite klientide juurde jne. Seepärast otsustasime oma kolleegidega fotoelastsuse laboratooriumist Johan Antoni ja Andrei Errapardiga luua osaühingu, mis oleks pühendatud klaasi pingete mõõtmise aparatuuri väljatöötamisele, valmistamisele ja turustamisele. Samal ajal jätkuvad teaduslikud uuringud küberneetika instituudi fotoelastsuse laboratooriumis. Klaasifirmad usaldavad äriühinguid rohkem kui ülikoole, kartes, et ülikooli pakutu on ebapraktiliselt akadeemiline.

Klaas on praegusaja linnapildis üks olulisemaid materjale kogu maailmas, viimasel ajal ka Tallinnas ja Tartus. Kuidas kontrollitakse tugevuse seisukohalt ehitusklaasi kvaliteeti?

Ehitusliku ja autoklaasi jääkpingete kontroll on samuti väga oluline. Selleks integraalne fotoelastsusmeetod ei sobi. Kui 2000. aastal alustasime Tallinnas klaasi pingete rahvusvaheliste suvekoolide korraldamist, kus tutvustasime eelkõige integraalset fotoelastsusmeetodit, siis mitmed kursandid tundsid huvi, kuidas määrata pingeid lehtklaasis. Praegu kasutatakse selleks ühes USA firmas toodetavat aparati, mis tugineb tunnelfektil valguse levimisel klaasi pinna lähedal, sest murdumisnäitaja on seal suur. See meetod praktikuid täielikult ei rahulda ja ei ole ka hästi automatiseeritav.

Mitmed aastad tagasi alustas kolleeg Johan Anton ühele teisele põhimõttele tugineva lehtklaasi pingete mõõtmisaparaadi SCALP väljatöötamist. Seda seadet on OÜ Glasstress müünud juba ligi 20 eksemplari. Aparaat on piisavalt täpne suhteliselt paksu ehituses kasutatava klaasi pingete mõõtmiseks. Praegu püüame seda sobitada ka autoklaasi pingete kontrolliks. Meie aparaadil on teiste omataoliste ees üks oluline eelis: seda saab kasutada ka juba olemasolevate hoonete klaasist seinte, põrandate ja treppide pingete määramisel. Just praegu mõõdetakse selle abil jääkpingeid 1400 klaasplaadis, mis moodustavad ühe – Šveitsis asuva kiirtee – helibarjääri.

Olete nimetanud oma suureks eeskujuks akadeemik Nikolai Alumäed. Selleks on ilmselgelt väga palju põhjusti.

Eesti mehaanika esimene korüfee oli akadeemik Ottomar Maddison, kes sai Venemaal kuulsaks mitmete raudsildade projekteerijana. Minu tulemise ajal teadusesse oli akadeemik Maddison alustanud pensionipõlve ja Eesti mehaanika liidriks oli saanud üks koorikute mittelineaarse teooria loojaid Nikolai Alumäe. Tema maine teadlaste ringkonnas oli ülimalt kõrge. Õpingute neljandal kursusel luges Alumäe meile ehitusmehaanikat. Ta tegi seda erakordselt süsteemselt ja ma ütleksin – elegantselt. See tekitas meist mitmetes huvi ehitusmehaanika ja üldse tugevusprobleemide vastu. Juhendajana järgis Alumäe mingil määral kuulsalt inglase Ernest Rutherfordi põhimõtet, kes andis oma õpilasele ülesande ja siis, kui see tuli küsima, mida edasi teha, vallandas ta. Alumäe juhendamise stiil oli pigem suunav, ta soovitas vajalikku kirjandust, juhtis tähelepanu meetoditele, mille rakendamine võiks olla otstarbekas, hindas kriitiliselt saadud tulemusi. Alumäe juurde oli mõtet minna siis, kui oskasid tõepoolest midagi konkreetset küsida.

Alumäe oli ka erakordselt laiade huvidega inimene, oleme temaga teaduse kõrval palju vestelnud muusikast, spordist, kunstist jne. Tänu temale õppisin tundma ja hindama Šostakovitši muusikat, mille suur austaja ta oli. Sageli läksime pärast tööpäeva lõppu sümfooniakontserdile Estonia kontserdisaali, mis asus otse meie instituudihoone vastas.

Alumäe on otseselt või kaudselt teaduslikult juhendanud tervet plejaadi Eesti mehaanikuid. Meid kõiki on mõjutanud tema printsiipiaalsus, ausus teadlasena ja avar maailmanägemus. Hindamatu oli Nikolai Alumäe roll Eesti Teaduste Akadeemia juhtimisel selle asepresidendina. Alumäe ohverdas oma isikliku teadusliku karjääri Eesti teaduse teenimisele, milleks ta oli veelgi vajalikum.

Te olete tegelenud ka linnaehituse probleemide matemaatilise modelleerimisega. Kuidas sattusite sellesse valdkonda?

1970. aastatel diskuteeriti Eestis linnaehituse probleemide üle. Linnade arengut kitsendas Nikita Hruštšovi kinnisidee, et kõige ökonoomsem on ehitada

viiekorruselisi hooneid (normid nõudsid lifti alates 6. korrusest). Tegelesime sel ajal küberneetika instituudis operatsioonianalüüsiga ja nii lineaarse kui ka dünaamilise programmeerimise mudelitega. Kuna oli ilmne, et ühetaoline madal hoonestus ignoreerib linnaehituse loogikat, siis tekkis ahvatlus püüda matemaatilisel formuleerida linna planeerimise ülesanne, et leida sellest tuge ratsionaalsemale lähenemisele linna planeerimisel. Koos kolleeg Jüri Kajariga koostasime lineaarse programmeerimise mudeli, eesmärgiga optimeerida elamurajoonide paigutus linnas kaasa arvatud hoonete korruselisus. Mudel võttis arvesse ka elanike ajakulu tööloenditel, mida mõjutab linna kompaktsus. Selkohase artikli avaldasime ajakirjas Arhitektura SSSR. Kuna sel ajal koostati just Tallinna generaalplaani uut varianti, siis pakkusime Eesti Projektile võimalust paralleelselt ametlikule generaalplaanile koostada ka generaalplaani matemaatilisel optimeeritud variant. See kava ka realiseerus tänu heale koostööle generaalplaani peaarhitekti Lorenz Haljakuga.

Kuigi ka linna matemaatilise modelleerimise problemaatika on väga huvitav, oli sellega tegelemine mulle siiski vaid lühiajaline hobi.

Juhtisite asedirektori ja direktorina Eesti Teaduste Akadeemia Küberneetika Instituuti kokku 21 aastat. Mida meenutate oma tegevusest suure teadusasetuse juhina?

Küberneetika instituudi direktoriks valiti mind 1976. aastal. Nikolai Alumäe ja Boris Tamme juhtimisel oli instituut selleks ajaks põhiliselt välja kujunenud ja teadusmaailmas hästi tuntud. Kuigi olin enne seda samas teadusala asedirektorina töötanud juba ligi kümme aastat, oli mulle üllatus, kui paljusid probleeme ma veel ei tundnud.

Olen vahel huumoriga pooleks öelnud, et mulle meeldib tegeleda paljude asjadega, aga pealiskaudselt. Igatahes võtsin direktori tööd väga tõsiselt. Lugesin läbi palju juhtimist käsitlevaid raamatuid, eriti Jaapani autorite sulest. Mul olid väga tugevad asedirektorid, Ivar Petersen ja Ants Wõrk. Esimesele delegeerisin teadusliku töö juhtimise probleemid ja teisele arvutustehnika hankimise, sest need olid instituudile elulise tähtsusega. Igal reedel arutasime direktsiooni koosolekul instituudi aktuaalseid probleeme. Nendest koosolekutest võttis loomulikult osa ka arvutustehnika erikonstrueerimisbüroo direktor Kalju Leppik, kelle tööd selle büroo juhtimisel hindan väga kõrgelt. Mulle oli suureks abiks ka instituudi kauaaegne teadussekretär Mati Kutser, kelle eemaletõmbamine otsesest teaduslikust tööst tekitab mulle veel praegugi südametunnistuspiinu.

Tol ajal tuli instituuti tööle kõrgesti hinnatud programmeerimise eriteadlane Enn Tõugu. Tänu temale lülitus küberneetika instituut superarvuti ELBRUS tarkvara väljatöötamise protsessi ning me saime ka lepingu selle arvuti ühe esimese eksemplari ostmiseks. Mul õnnestus N Liidu riiklikus plaanikomitees

hankida arvuti ostmiseks raha ja seetõttu raha probleeme instituudil peaaegu ei olnud. Osalemine arvuti ELBRUS väljatöötamisel oli tugevaks trumbiks meie taotlusele ehitada küberneetika instituudile hoone Mustamäel. Ehitajaks oli Enn Tammaru juhitud ehitusvalitsus, kes oli tuntuks saanud olümpiakompleksi rajamisega. Hoone projekteerijaks oli Margus Koot, kellega koostöö sujus suurepäraselt. Väga head tööd tegi ka instituudi kapitaalehituse insener Aare Kivisto. Veiniklaasi taga võiks pikalt rääkida trikkidest, mida me Kivisto ja Tammaruga välja mõtlesime, et tagada hoone ehitusjärjekordade katkematu valmimine.

Üks oluline algatus oli Küberneetika Instituudi spetsialistide saatmine tööle Helsingis asuvasse Soome-Nõukogude ühisfirmasse Elorg-Data. Aastate jooksul käis firmas tööl kümmekond instituudi spetsialisti, kes omandasid seal kogemusi IT projektide realiseerimise ja juhtimise alal. Oletan, et need hea nüüdisaegse infotehnoloogia alase koolituse saanud spetsialistid aitasid Eestil pärast taasiseseisvumist jõuda kiiresti selles valdkonnas rahvusvahelisele tasemele.

Olite 12 aastat Eesti Teaduste Akadeemia toimetiste peatoimetaja. Mida meenutate sellest ajast?

See aeg oli väga huvitav. Võib ju öelda, et teadus – see on publitseeritud teaduslikud tulemused. Kuigi maailmas on palju rahvusvahelisi teadusajakirju, kus ka eesti teadlased oma tulemusi avaldavad, on igal endast lugupidaval riigil ka oma teadusajakirjad. Nii võimaldavad kohalikud teadusajakirjad detailsemalt ja kompaktsemalt avaldada tulemusi just selle maa ajaloo, looduse, maavarade, geograafia jne kohta. Samal ajal oleme hoolitsenud, et TA toimetised oleksid igati rahvusvahelisel tasemel. Toimub artiklite rahvusvaheline eelretsenseerimine – ükski artikkel ei ilmu enne, kui selle kohta pole vähemalt kahte positiivset retsensiooni, üks välismaa ja teine eesti teadlaselt.

Teie vanemad Marie ja Karl Aben olid õpetajad. Kui palju olete ise vanemate eeskuju oma elus järginud?

Eks iga laps järgi suuremal või vähemal määral oma vanemate eeskuju. Mu ema oli saksa ja vene keele õpetaja, kes julgustas ka mind keeli õppima. Ta oli veel võimlemisõpetaja ja toetas igati minu sportlikke harrastusi. Ema oli ka kodutütarde juht ning meie perekonnas valitses patriootlik vaim. Mu ema on autasustatud isegi Kaitseliidu Valgeristiga. Olin innukas noorkotkas ja sõja ajal pärast Vene armee taandumist astusin omakaitseesse. Kuna mul oli jalgratas, siis olin seal vajalik sidepidaja ja virgatsina.

Mu isa oli samuti filoloog, Tartu ülikooli õppejõud. Pedagoogitöö kõrval tõlkis ta väga palju. Isa on eesti keelde tõlkinud nii Läti klassikute Janis Rainise ja Vilis Lacise kui ka hilisemate autorite töid. Olen alati imetlenud tema suurt

töövõimet. Tulnud ülikoolist loengult puhkas ta natuke ja asus siis jätkama poolerioleva raamatu tõlkimist. Tema toetas minu kavatsust minna õppima Tallinna Polütehnilisse Instituuti ja hiljem ka siirdumist aspirantuuri.

Kui paljusid keeli ise valdate ja milliseid neist on vaja läinud välisülikoolides õppejõu ametit pidades?

Olen kirjutanud teaduslikke artikleid ning pidanud ettekandeid ja loenguid eesti, inglise, saksa, prantsuse ja vene keeles. Kuna inglise keel on teaduse *lingua franca*, siis kasutavad seda reeglina kõik külalisteadlased. Kuid mitte alati. Minu teadusvaldkonnas on üks juhtiv ülikool Potiers' ülikool Prantsusmaal. Selle mehaanika instituuti juhtis palju aastaid professor Alexis Lagarde. Üks tema originaalne meetod kasutab meie laboratooriumis loodud ruumilise fotoelastsuse teooriat. Seetõttu tunneb ta hästi meie töid ja kasutab neid. Professor Lagarde ei valda hästi inglise keelt. Seepärast olime temaga alati vestelnud prantsuse keeles. Aastal 1988 kutsus ta mind üheks semestriks Poitiers' ülikooli külalisprofessoriks. Minu ülesandeks oli juhendada üht magistranti ja pidada loengukursus integraalsest fotoelastsusest. See üliõpilaste rühm, kellele pidin lugema loenguid, koosnes peamiselt alžeerlastest, kes ainsa võõrkeelena valdasid prantsuse keelt. Seega oli professor Lagarde mind kutsudes juba arvestanud, et pean loengud prantsuse keeles. Sellega mul probleeme ei olnud. Küll aga selgus alles nädal enne loengute algust, et õppejõud peab üliõpilastele andma iga loengutunni kohta kaheksa lehekülge kirjalliku materjali. Nii pidin ühe nädalaga koostama sisuliselt integraalse fotoelastsuse prantsuskeelse kursuse teksti. Kasutades keelelise toimetajana enda juhendatavat alžeerlast, sain sellega kenasti hakkama.

Prantsuse keelt on mul läinud palju vaja ka suhtlemisel firmade Saint-Gobain ja Verrerie Crystallerie d'Arques spetsialistidega. Viimases firmas viisin 1996. aastal läbi ühenädalase koolituse. Mitmeid kordi olen olnud oponentideks doktoriväitekirjade kaitsmisel Prantsuse ülikoolides.

Lähenete sel aastal oma elu 80. verstapostile ja teete seda üsna hoogsal sammul. Teie reipas olemises on kindlasti suur osa spordil. Olete olnud ju 1950. aastate algul vabariigi koondvõistkonna liige vehklemises, harrastanud mäesuusatamist ja juba kaua aega on Teie lemmiktegevus tennisemäng.

Spordil on minu elus tõepoolest olnud üsna oluline roll. Kooliajal tegelesin peamiselt korvpalli ja mäesuusatamisega Tartu Toomeorus. Mitu aastat käisin Uno Sahva juures riistvõimlemise trennis. Kooliaja lõpul hakkasin tennist mängima ja selle harrastuse juurde olen jäänud tänaseni. Huvitav oli periood, mil tegelesin vehklemisega. Jõudsin sel alal Eesti meistri tiitlini, mis ongi jäänud minu sportlike saavutuste laeks. Vehklejate seltskonnas oli palju toredaid inimesi, kellega oli meeldiv olla koos treeninglaagrites ja käia võistlustel. Mui-

dugi olen olnud oma poegadegi esimene treener nii tennisel kui ka mäesuusatamises.

Muusikasõbrana olete ilmselt sage kontsertide ja ooperimajade külastaja. Milline osa on Teie elus muusikal?

Muusikat armastan väga, kuigi viimasel ajal külastame abikaasaga kontserte suhteliselt harva. Erilist huvi on mulle pakkunud ooperimuusika. Selle üks põhjustaja on minu kooli fanaatiline muusikaõpetaja Kaarel Valdas. Nimelt korraldas ta Tartu ülikooli aulas ooperite "Carmen", "Padaemand" ja "Faust" kontsertettekanded, kus kooripartiid laulis meie kooli poistekoor ja solistid olid teatrist Vanemuine. Seega olen läbi laulnud nende kolme ooperi kooripartiid. See oli tõepoolest põnev muusikaelamus. Mäletan, et veel tudengiajal laulsime endiste koolivendadega seltskondlikel koosviibimistel katkendeid ooperikoorigest.

Meie pere käib läbi lavastaja Arne Miku perekonnaga. Tänu sellele oleme mingil määral kursis ka maailma ooperieluga. Hindan kõrgelt ka Arne enda lavastusi ja üldse Estonia ooperit.

Teaduslikel komandeeringutel olen püüdnud leida võimalusi ka teiste maade ooperiteatrite külastamiseks. Olles tudengiajal Moskvas ehituspraktikal, käisin korduvalt Suures Teatris. Ka olen viibinud Londoni Covent Gardeni, Pariisi Opéra Bastille't ja Milano La Scala teatri etendustel. Viimase puhul sain pileti vaid tänu sellele, et samal õhtul toimus jalgpallimatš Milano Juventuse osavõtul. Sügava mulje jättis Philadelphia sümfooniaorkestri kontsert, kuhu mind kutsusid Ameerika kolleegid.

Kodus kuulan vahel raamatu lugemise kõrvale taustamuusikana kas mahedat dzässit või Mozarti ja Beethoveni klaverikontserte.

Teie ja perekond.

Minu abikaasa Virve on tekstiilikunstnik. Ta on nüüd pensionil, kuid säilitanud sidemed oma erialaga, juhendades mõningaid käsitööringe. Vanem poeg Madis töötab makromajanduse analüütikuna ja noorem poeg Siim ühes konsultatsiooniäri firmas. Neil mõlemal on perekond ja nädalavahetustel saame sageli kokku, suviti rohkem meie suvekodus. Pole midagi meeldivat, kui istuda pühapäeva õhtul pärast tennisemängu pisut väsinuna suvila ees koos oma perekonnaga, juua kohvi ja vaadata lapselapsi, kes nagu murumunad mööda rohuplatsi veerevad.

TEADUSPREEMIATE
LOOD

Kübirneetika

Pole ju mingi üllatus, et Instituudi teadlaste tulemused on pärjatud teaduspreemiatega. Eesti Teaduste Akadeemia on alates 1997. a järjepidevalt avaldanud Eesti Vabariigi teaduspreemiade laureaatide ülevaateid oma tegevusest. Nendest väljaannetest on kogutud siia peatükki Instituudi teadlaste poolt või nende osalusel võidetud teaduspreemiade lood. Need peegeldavad loomulikult tiptulemusi ning kindlasti on neile tulevikus lisa oodata. Kahjuks pole varasematest teaduspreemia laureaatidest selliseid lugusid võtta, kuid kümme aastat varem on loetletud kronoloogia osas (vt ptk I). Selle peatüki lugudest selgub Instituudi teadustegevuse lai amplituud.

Instituut tänab Eesti Teaduste Akadeemiat nende artiklite avaldamisloa eest.

Instituut 50

2003. aasta teaduspreemia tehnikateaduste alal töö "EESTI KEELE TEKST-KÕNE SÜNTEES" eest

2002. a on Eesti keeletehnoloogia arengus märkimisväärne – eduka uurimis- ja arendustöö tulemusena on välja töötatud raketusteks sobiv eestikeelse kõnesünteesi tarkvara. Saavutuse aluseks on eestikeelse kõne foneetilis-fonoloogiliste uuringute tulemuste ja teksti lingvistilise töötamise meetodite oskuslik integreerimine tänapäeva infotehnoloogiliste võimalustega.

Eestikeelse kõnesünteesi tarkvara olemasolu avab tee uute kommunikatsioonitehnoloogiate arendamiseks ja kasutuselevõtuks ning on asendamatuks abivahendiks puuetega inimestele suhtlemisel arvutiga.

MIKS ON SEE TULEMUS OLULINE?

Info- ja kommunikatsioonitehnoloogia kiire areng viimasel aastakümnel on olulisel määral muutnud meie elu- ning tööstiili – personaalarvuti, Internet ja mobiiltelefon on saanud meie igapäevasteks kommunikatsioonivahenditeks. Tehnoloogiaarendus liigub vaieldamatult arvutiga loomulikus keeles suhtlemise suunas ja *Star Treki* visiooni realiseerumine on suurte keelte (eelkõige inglise, saksa, prantsuse) puhul lähiaastate küsimus.

Selline tehnoloogiline progress toob endaga kaasa keelelise diskrimineerimise – keeled, millel puudub vastav tehnoloogiline tugi, so. kõnesüntees ja -tuvastus, pole samaväärselt kasutatavad tuleviku infotehnoloogilises keskkonnas. Paratamatult tingib see keele järk-järgulise asendumise erinevates ühiskonnaelu valdkondades mingi teise, tugevama keelega. Sellist ohtu väiksematele keeltele ennustas 1992. a Euroopa Ko-



Arvo Eek



Einar Meister



Meelis Mihkla



Heiki-Jaan Kaalep

misjoni XIII peadirektoraadi tellimisel valminud nn Danzini raport¹; UNESCO andmetel häviv maailmas iga kuu keskmiselt kaks keelt², hinnanguliselt on 100 aasta pärast maailmas kasutusel vaid 50–10%³ täna eksisteerivast enam kui 6000 keelest.

Kui sada aastat tagasi oli keele säilimise tingimuseks kirjakeele tekkimine, siis nüüd on selleks saamas keele arvutitoe, st keeletehnoloogia olemasolu⁴. Ka eesti keel kuuluks nende ohustatud keelte hulka, kui keeletehnoloogilist uurimis- ja arendustööd Eestis ei tehtaks. Loodud kõnesünteesi tarkvara on eesti keele arvutitoe üheks oluliseks komponendiks.

EESTIKEELSE KÖNESÜNTEESI ARENG

Eestikeelse kõnesünteesi uuringuid on tehtud TTÜ Küberneetika Instituudis ja Eesti Keele Instituudis vahelduva aktiivsusega juba paarkümmend aastat. Teadmiste kogunedes ja tehnoloogia arenedes on liigutud samm-sammult edasi parema sünteeskõne kvaliteedi suunas.

1997. a alustati uuringuid difoonidel baseeruva kõnesüntesaatori väljatöötamiseks. DIFOONID on inimkõne segmendid, mis koosnevad kahest järjestikusest häälikust – nende algus fikseeritakse esimese hääliku stabiilse osa keskel ja lõpp järgmise hääliku stabiilses osas. Seega sisaldavad difoonid loomulikke häälikutevahelisi üleminekuid, mis lihtsustab nende rittaühendamist ja kokkusobitamist (vt joonis 1). Difoonide andmebaasi loomisel on lähtutud eesti vokaalide [Eek, Meister, 1998] ja konsonantide [Eek, Meister, 1999a] akustilispartseptiivsetest omadustest ning eesti keele foneetilises andmebaasis [Eek, Meister, 1999b] esitatud hääliku-, rõhu- ja prosoodilise süsteemi foneetilis-fonoloogilistest kirjeldustest. Eesti keele difoonide andmebaas hõlmab kõiki võimalikke häälikuühendeid: konsonant-vokaal, vokaal-konsonant, vokaal-vokaal, konsonant-konsonant, paus-vokaal, paus-konsonant, vokaal-paus, konsonant-paus – kokku umbes 2000 difooni [Mihkla jt, 1998].

Difoonide rittaühendamiseks kasutatakse spetsiaalset MBROLA algoritmi, mis on välja töötatud Monsi ülikoolis Belgias.

Kuid kõnesünteesiks ei piisa ainult difoonide andmebaasist ja MBROLA algoritmist. Vajalikud on veel kaks moodulit: sünteesitava teksti lingvistiline töötlus ja prosodiageneraator. Eestikeelse tekst-kõne süntesaatori [Mihkla jt, 1999a; 1999b] struktuur on esitatud joonisel 2.

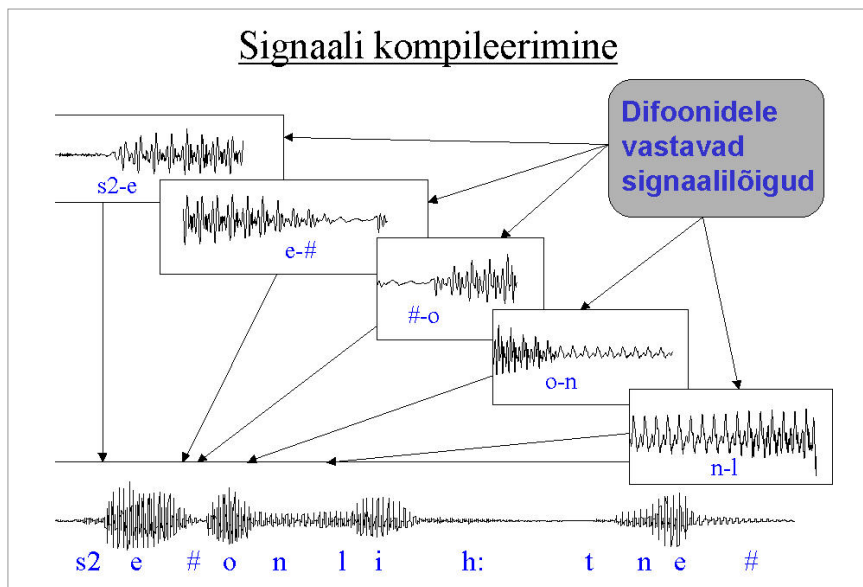
¹ Towards a European Language Infrastructure. Report by A. Danzin and the Strategic Planning Study Group for the Commission of European Communities (DG XIII). 31 March 1992.

² Atlas of the World Languages in Danger of Disappearing by Stephen A. Wurm. 2001, ISBN 92-3-103798-6.

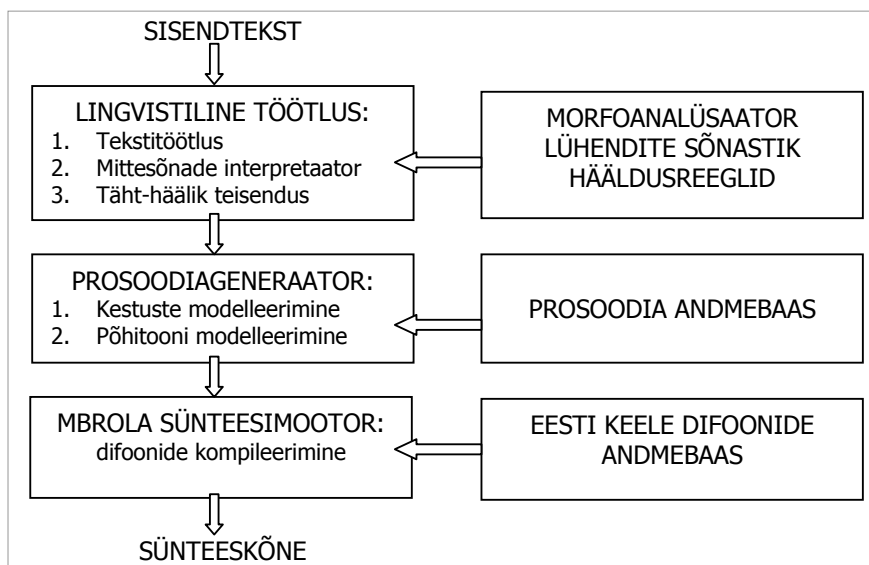
³ M. Krauss 1992. The world's languages in crisis. – Language 68, 4-10.

⁴ H. Öim 2001. Keeletehnoloogiast ja eesti keelest. – Keel ja Kirjandus 2001, nr 7, lk 499-501.

Signaali kompileerimine



Joonis 1.
Kõnesünteesil difoonide põhjal kõnelaine kompileerimine.



Joonis 2.
Eestikeelse tekst-kõne süntesaatori struktuurskeem.

LINGVISTILISE TÖÖTLUSE käigus teisendatakse ortograafiline tekst hääldustekstiks. Kuigi kirjutatud tekst on eestlasele kergesti hääldatav, valmistab see raskesti nii mitte-eestlasele kui ka arvutile, sest eesti kirjaviis ei ole täiesti foneetiline. Kirjapildis ei ole 2. ja 3. välde üldjuhul eristatavad, eristamata on palataliseeritud konsonandid palataliseerimata konsonantidest ja palju muud. Lisaks välte ja palatalisatsiooni märkimisele leitakse lingvistilise töötuse käigus ka liitsõnapiirid, sõnarõhud ja silbipiirid – need on vajalikud prosoodiageneraatori tööks (joonis 3). Kirjalikes tekstides esineb ka suur hulk tähejärjendeid ja märke, mis enne süntesaatorile edastamist tuleb kas sõna- või tähthaaval lahti kirjutada. Lingvistilise töötuse põhimooduliks on OÜ FiloSoft poolt loodud eesti keele morfoloogiline analüsaator [Kaalep, Vaino, 2001].

Erinevalt noodikirjast pole tavalises tekstis peale kirjavahemärkide ühtegi kõnetempot, helikõrgust, intonatsiooni, pausi või rõhku tähistavat märki. Teksti võib iga inimene küllalt vabalt interpreteerida, kuid arvutile on vaja ette anda reeglid, millise tempo ja intonatsiooniga tuleks üht või teist lauset lugeda. Kõnesünteesi üheks raskemaks ülesandeks ongi KÕNE PROSOODILISE STRUKTUURI MODELLEERIMINE, mis hõlmab häälikute kestuse ja lausetüübile vastava meloodiakontuuri genereerimist (joonis 4) [Mihkla jt, 2000a; 2000b].

2000. a valmis eestikeelse kõnesüntesaatori prototüüp, mis oskas juba päris korralikult rääkida, kuid ei olnud veel siiski sobilik laialdasemaks kasutuseks. Aastatel 2001–2002 teostatud mitmeetapilise sünteesikõne arusaadavuse testimise [Mihkla jt, 2001a; 2001b] ja sünteesimoodulite täiustamise järel ongi saavutatud tänane, kvalitatiivselt uus tase [Mihkla, Meister, 2002]. Võimaldamaks sünteesitarkvara kasutamist MS Windowsi keskkonnas, loodi SAPI (*Speech Application Programming Interface*) standardile vastav liidesprogramm ja testiti süntesaatorit erinevate programmide ning tekstidega.

KES KÕNESÜNTEESI KASUTAVAD?

Eestikeelse kõnesünteesi tarkvara on tasuta vabalt kasutatav mitteäriksel ja mittesõjalistel eesmärkidel. Seda on laialdaselt levitatud nägemispuuetega ar-

Lingvistiline töötlus

Sisendtekst:

See on lihtne, sisesta tekst ja käivita süntees.

Lingvistilise töötuse väljund:

s2e_on lih:tne3_slisesta tek:st_j7a k{ivita syntee:s

Joonis 3.

Teksti lingvistilise töötuse näide.

utikasutajate hulgas. Eesti Pimedate Liidu ja Põhja-Eesti Pimedate Ühingu kaudu on tasuta jagatud 100 sünteesitarkvaraga CD-ROMi, üle saja korra on seda alla laaditud Internetist (<http://www.phon.ioc.ee/synt>). Eriti oluline on eestikeelse kõnesünteesi tarkvara kasutuselevõtt nägemispuuetega laste õpetamisel Tartu Emajõe Koolis, sest seni kasutuses olnud soomekeelne kõnesüntees võis negatiivselt mõjutada laste keelelist arengut.

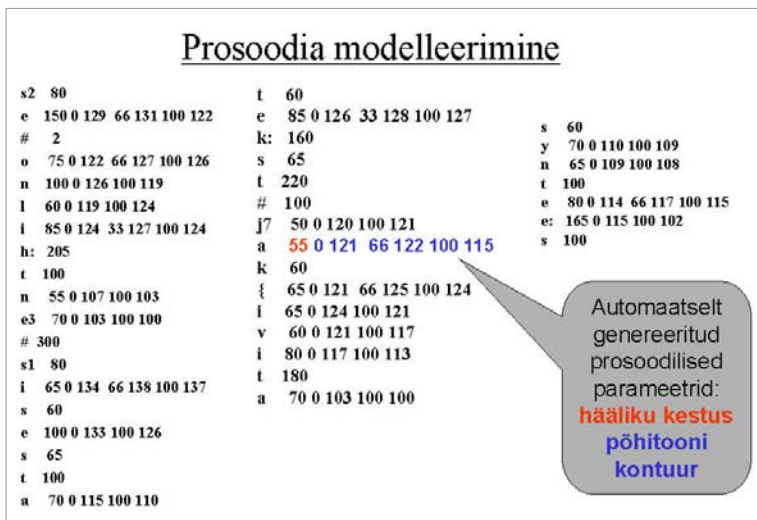
TULEVASED RAKENDUSED

Võimalikud tulevased rakendused on seotud mobiilside teenuste arendamisega, näiteks elektronposti ettelugemine mobiiltelefoni kaudu. Inimese ja arvuti vahelises suhtluses võib kõnesüntesaatorit kasutada mitmesugustes dialoogsüsteemides, väljastamaks informatsiooni sünteeskõne kujul, kuid seni, kui pole loodud eestikeelse kõnetuvastuse tarkvara, jääb sünteeskõne kasutus paratamatult piiratuks.

KAS EESTIKEELNE KÕNESÜNTEES ONGI NÜÜD VALMIS?

Kindlasti mitte. Sünteesikvaliteedi tõstmiseks on vajalik täiustada nii lingvistilise töötamise moodulit (süntaktilise analüüsi lisamine) kui ka lauseprosoodia mudeleid. Need ülesanded nõuavad aga veel põhjalikku uurimistööd.

Küll aga võib täie kindlusega väita, et eestikeelse kõnesünteesi kvaliteet on piisav selle raskusteta mõistmiseks ja sünteesitarkvara on küps laialdaseks kasutuselevõtuks.



Joonis 4.

Kõne prosoodilise struktuuri modelleerimine.

Eestikeelse kõnesünteesi tarkvara on vabalt saadav Internetist
<http://www.phon.ioc.ee/synt>,
<http://www.eki.ee/keeletehnoloogia/projektid/syntees/tks.html>, veebidemo
saab kuulata aadressil <http://kiisu.eki.ee>.
KOKKUVÖTTEKS

Eestikeelse kõnesünteesi tarkvara loomine on ilmekas näide keeleteaduslike uuringutulemuste edukast kasutamisest keeletehnoloogilise rakenduse loomisel.

Töö aluseks on suulise kõne akustilis-pertseptiivsetel [Eek, Meister, 1998; 1999a] uuringutel põhinev eesti keele häälikusüsteemi ja prosoodia foneetilis-fonoloogiline kirjeldus [Eek, Meister, 1999b], millest lähtuvalt on koostatud eesti keele difoonide andmebaas [Mihkla jt, 1998]. Täiendades kõnesünteesi prototüüpi [Mihkla jt, 1999a; 1999b] täiuslikumate teksti lingvistilise töötluse ja prosoodia moodulitega [Mihkla jt, 2000a; 2000b; Kaalep, Vaino, 2001] ning testides sünteesikaliteeti rahvusvaheliselt aktsepteeritud metoodika kohaselt [Mihkla jt, 2001a; 2001b], on saavutatud eestikeelse kõnesünteesi arengus kvalitatiivselt uus tase [Mihkla, Meister, 2002]. SAPI-liidese loomine on taganud sünteesitarkvara ühilduvuse MS Windowsi keskkonnaga ja andnud seega võimaluse sünteesitarkvara laialdaseks rakendamiseks uute mobiilside- ning IT-teenuste arendamisel.

Eestikeelse kõnesünteesi tarkvara kasutavad laialdaselt Eesti nägemispuuetega inimesed.

KIRJANDUS

Eek, A., Meister, E. 1998. Quality of standard Estonian vowels in stressed and unstressed syllables of the feet in three distinctive quantity degrees. Proc. of the Finnic Phonetics Symposium, Pärnu, 11.-14.08.1998. *Linguistica Uralica*, 3, 226-233.

Eek, A., Meister, E. 1999a. The perception of stop consonants: linking the strongest spectral region of the burst to the following vowel. Järvikivi, J., Heikkinen, J. (eds.) *Out Loud: Papers from 19th Meeting of Finnish Phoneticians*. *Studies in Languages*, 33, 10-23.

Eek, A., Meister, E. 1999b. Estonian speech in the BABEL multi-language database: Phonetic-phonological problems revealed in the text corpus. Fujimura et al. (eds.) *Proc. of LP '98*. Vol. II. Prague: The Karolinum Press, 529-546.

Kaalep, H.-J., Vaino, T. 2001. Complete morphological analysis in the linguist's toolbox. *Congressus Nonus Internationalis Fenno-Ugristarum*. Pars, V. Tartu, 9-16.

Mihkla, M., Eek, A., Meister, E. 1998. Creation of the Estonian diphone database for text-to-speech synthesis. Proc. of the Finnic Phonetics Symposium, Pärnu, 11.–14.08.1998. *Linguistica Uralica*, 3, 334-340.

Mihkla, M., Eek, A., Meister, E. 1999a. Text-to-speech synthesis of Estonian. Proc. of 6th European Conference on Speech Communication and Technology. Vol. 5. Budapest, 2095-2098.

Mihkla, M., Eek, A., Meister, E. 1999b. Diphone synthesis of Estonian. Proc. of the International Workshop on Computational Linguistics and its Applications. Vol. 2. Tarusa, 351-353.

Mihkla, M., Eek, A., Meister, E., Hein, I., Tatter, P. 2000a. Non-words interpreter, prosody generator and screen reader for the Estonian text-to-speech synthesizer. Narin'yan, A.S. (ed.) Proc. of the International Workshop Dialogue'2000. Computational Linguistics and Its Applications. Vol. 2 (Applications). Protvino, 399-407.

Mihkla, M., Eek, A., Meister, E. 2000b. Eesti keele tekst-kõne süntees: grafeem-foneem teisendus ja prosoodia modelleerimine. Hennoste, T. (toim.) Tartu Ülikooli üldkeeleteaduse õppetooli toimetised 1. Arvutuslingvistikalt inimesele. Tartu, 309-319.

Mihkla, M., Eek, A., Meister, E., Lasn, J. 2001a. Testing the quality of Estonian text-to-speech synthesis. Ojala, S., Tuomainen, J. (eds.) 21. Fonetikaan Päivät, Turku 4.-5.1.2001. Publications of the Department of Finnish and General Linguistics of the University of Turku. Turku, 40-45.

Mihkla, M., Meister, E., Lasn, J. 2001b. Quality evaluation of Estonian text-to-speech synthesis. Proc. of the International Workshop SPEECH and COMPUTER (SPECOM'2001), Moscow, Russia, 29-31 October, 163-166.

Mihkla, M., Meister, E. 2002. Eesti keele tekst-kõne-süntees. Keel ja Kirjandus, 2, 88-97; 3, 173-182.



Arkadi Berezovski

2004. aasta teaduspreemia
tehnikateaduste alal töö
"FAASISIIRDEFRONDID
MARTENSIITSETES TAHKISTES"
eest

MUUTUVATE OMADUSTEGA MATERJALID

MATERJALID KAASAEGSES TEHNOLOOGIAS

Inimkonna areng on olnud lahutamatult seotud igapäevaste materjalidega. Ajaloolased isegi klassifitseerivad ajastuid kasutusel olnud materjalide järgi: kiviaeg, pronksiaeg, rauaaeg Omal ajal olid hinnas looduslikud materjalid, tänapäeval seob tehnoloogiline protsess meid ikka rohkem ja rohkem tehis-materjalidega. Mitte ainult meie füüsiline eksistents – riided, ehitised, sõidukid ja loendamatud muud asjad, vaid ka meie vaimsed ja kultuurisaavutused tuginevad materjalidele.

Kahekümnenda sajandi viimast poolt iseloomustab teadmiste ja oskuste kiire kasv. See väljendub ka oskuses luua selliseid uusi materjale, millest varem, ütleme 100 aastat tagasi, ei osatud unistadagi. Me räägime tänapäeval materjaliteadusest, mille väljundid on suure kaaluga paljudes valdkondades. Alljärgnevalt mõned näited.

ELUKESKKOND. Looduskeskkonna olukord sunnib efektiivsemalt kasutama meie käsutuses olevaid maavarasid ja energiaallikaid. Materjaliteadus aitab meil luua uusi materjale energiatootmise tehnoloogiate tarbeks, suurema kasuteguriga seadmeid ja taaskasutatavaid, vähem loodust saastavaid materjale.

TERVISHOID. Haiguste ravi ja meditsiiniline hooldus on inimkonna heaolus esmase tähtsusega. Materjaliteadus koos biotehnoloogiaga võib pakkuda lahendusi nendele probleemidele, näiteks luues tehisorganeid, rakendades ohutuid ravimisskeeme, ehitades ökonoomseid veepuhastussüsteeme jne.

SIDE. Maailma globaliseerumine nõuab aina kiiremaid ja usaldusväärsemaid sidevahendeid. Infotehnoloogia ja sellega otseselt seotud arvutustehnika kiire areng sõltub oluliselt uute elektrooniliste, optiliste ja magnetiliste omadustega materjalide kasutuselevõtmisest.

TARBEKAUBAD. Tarbijad on harjunud eeldama, et kaubad ja teenused jõuavad nendeni kiiresti mõistlike hindadega. Materjaliteadus aitab parendada mitte üksnes kaupade kvaliteeti, vaid ka nende käsitlemise (näiteks pakendid) viise, mis tagavad kiirema kaubakäibe ja toote kõrgema kvaliteedi.

TRANSPORT. Olgu tegemist töö, puhkuse või kosmoseuuringutega, materjali-teadust on vaja, et luua pikaajalisi ja tugevaid materjale, mis teevad meie reisimise kiiremaks, ohutumaks ja mugavamaks. Nimekiri on pikk: kerged alumiiniumist autode korpused, kiirrongide pidurdussüsteemid, vaiksemad lennukid, kosmosesüstikute soojuskaitseplaadid jne.

VÄLJAKUTSE ALUSUURINGUTELE. Materjale seostatakse tavapäraselt ikka tootearendusega, ometi on oluline mõista eelkõige nende fundamentaalseid omadusi. Eriti oluline on aru saada materjalide mikrostruktuuri mõjust makrotasandil. See tähendab aga, et tuleb ühendada arusaamad, mis toimub aatomiskaalas, arusaamadega materjali vastupidavusest, purunemisest ja oleku stabiilsusest. Eksperimentide kõrval on oluliseks abivahendiks kujunenud matemaatilise modelleerimise meetodid, mis paljus tuginevad numbrilistele arvutustele. Selline lähenemine on kasutatav nii traditsiooniliste materjalide (nt teras) kui ka uute, nn "nutikate" materjalide puhul. "Nutikas" materjal muudab oma omadusi, kui välistingimused muutuvad. See on tegelikult uus paradigma materjaliteaduses. Loomulikult on selliste materjalide tundmaõppimiseks ja sünteesiks vaja tõsiseid alusuuringuid, mis reeglina ei too kohest, rahaliselt mõõdetavat kasu. Oskus vaadata tulevikku on aga läbi aegade olnud edasiviivaks jõuks teaduses. Seega on materjaliteaduses kindlasti vaja toetada ka alusuuringuid, seda eriti uuringute interdistsiplinaarse iseloomu tõttu – vaja on füüsikute, keemikute, inseneride, matemaatikute ja ka bioloogide kogemuste ja teadmiste ühendamist. Kindel teadmiste alus on eelduseks materjalide efektiivsele kasutamisele, olgu valdkonnaks nanotehnoloogia või biomaterjalid, standardsed või "nutikad" materjalid.

MATERJALITEADUS TÄNAPÄEVAL. Kui heita pilk minevikku, siis uus materjal sündis tavaliselt katse-eksituse meetodil. See "tehnoloogia" aga muutus, kui hakati aru saada materjalide struktuurist ja selle seostest makroomadustega. Tänapäeval on materjaliteaduse üheks eesmärgiks just sünteesida mingi rakenduse tarbeks kõige sobivam materjal, millel on sobiv keemiline koostis, sobiv mikrostruktuur ja selle olekud. Taoline arusaam ei sündinud aga üleöö, vaid kujunes praktiliselt välja viimase viiekümne aasta jooksul. Eelmise sajandi keskel oli materjaliteadus kindlalt inseneride pärusmaal. Tahkiste füüsika ja keemia edusammud lähendasid materjalide loomise aga loodusteadustele. Eri-nevates valdkondades oli areng siiski erineva kiirusega. Pooljuhtide kasutuselevõtmine toimus kiiresti tahkiste füüsika arengu tõttu. Edukas oli polümeeride keemia ja materjaliteaduse sümbioos. Konstruktioonimaterjalide arendamisel sundis protsesside keerukus uurima materjalide omadusi üle laia skaala –

mikroskoopilisest skaalast (tänapäeval juba nanoskaalast) kuni makroskoopilise skaalani. Oli vaja ka täiesti uusi matemaatilisi kontseptsioone, nagu näiteks renormalisatsiooniteooria faasimuutuste kirjeldamiseks, J-integraali kontseptsioon purunemismehaanikas, fraktaalgeomeetria klastrite kasvu ja kolloidsüsteemide kirjeldamiseks jne. Ühesõnaga – tänapäeva materjaliteadus on kujunenud füüsika, keemia, matemaatika ja tehnikateaduste lõikepunktiks.

MATERJALIDE MODELLEERIMINE. Matemaatiline modelleerimine eeldab kõigepealt füüsikaliste protsesside piisavalt täpset kirjeldust. Aatomite, s.o kristallstruktuuri tasandil on füüsikalised mudelid tõepoolest hästi kirjeldatud. Elastsus- ja plastsusteooria, purunemismehaanika, termodünaamika, elektromagneetiline väljateooria jne moodustavad modelleerimise vundamenti. Teiselt poolt on olemas rida matemaatilisi meetodeid, haaramaks pidevuskontseptsioone ja numbrilisi meetodeid materjalide käitumise simuleerimiseks. Mõlemad suunad kokkuvõetuna on andnud olulise tõuke materjaliteaduse arengule. Võiks visandada ideaalse modelleerimise kontseptsiooni, mis haarab kogu parameetrite ruumi materjali sünteesist ja töötlemisest kuni komponentide toime ja omadusteni – kõik matemaatiliste meetodite abil. Kuigi oleme sellest veel kaugel, näitavad kõik märgid, et sellise teoreetilise modelleerimise tähtsus järjest suureneb.

Kui lühidalt summeerida sellise modelleerimise põhijooni, siis võiks tuua esile järgmist:

- materjalide tootmine modelleeritakse igal etapil füüsikaliste/keemiliste seaduspärasuste baasil sihipäraselt lõppomadusi silmas pidades;
- omaduste ennustamine on kvantitatiivselt usaldusväärne;
- eri teadusvaldkondade sünergia loob uue kvaliteedi ja võimaldab oluliselt laiendada vajalikke skaalasisid (kvantmehaanikast pideva keskkonna teoriani).

MODELLEERIMISE TEHNIKA. Tinglikult võiks tehnika ulatuda "visualiseerimisest" kuni "täpsete" meetoditeni. Pole olemas universaalset meetodit, sest efektiivseim on modelleerimine, kus keerukuse aste vastab püstitatud ülesandele. Omal ajal oli põhieesmärgiks saavutada materjalide stabiilne kristallstruktuur. Täna võib eesmärk olla seotud stabiilsete olekute muutusega (vt allpool). Makronäitajad, nagu mahumoodul näiteks, ei tekita modelleerimisel probleeme, tähelepanu on eelkõige mikro- ja makroskaalas ilmnevate omaduste sünteesil. Hinnatakse ideid, mis loovad paremaid (kergemaid, tugevamaid, vastupidavamaid jne) materjale. Tihti eeldatakse vaikimisi, et modelleerimist piirab arvutite võimsus. Ilmselt see nii siiski ei ole, sest määravaks on teadmised ja kogemused, mitte aga tarkvara. Alustada tuleb ikkagi olulisest – eesmärgist, detailsuse astmest ja täpsusest. Sellele järgneb tulemuste interpreteerimine ning siis mudeli piirangute teadvustamine. Tegelikult on vaja jälgida matemaatilise modelleerimise põhinõudeid. Mõõtmiste täpsus ja füüsikaliste omaduste määramise meetodika on tehnoloogias, kaasa arvatud eksperimen-

taalsed uuringud, pidevalt paranenud. Tuleb rõhutada, et konstruktsioonide elemendid või seadmed muutuvad järjest väiksemaks (nt nanotorud), mis nõuab füüsikaliste piiride täpsemat arvestamist. Õeldu valguses on eriti oluline teoreetiliste uuringute (ka modelleerimise) ja eksperimentide sümbioos. Kindel on see, et korralik teoreetiline mudel ja selle abil tehtavad arvutused võimaldavad vähendada kulukate eksperimentide arvu. Eriti oluline on selline kokkuhoid plahvatuslikult kasvanud tehnoloogiliste nõudmiste tõttu, mis vajavad materjale väga laias skaalas.

Nii tuleks eristada:

- (a) materjali tüüpe – metallid ja nende sulamid, keraamika ja klaas, pooljuhid, nanostruktuurid, polümeerid ja neil baseeruvad komposiitmaterjalid, kermised, vedelkristallid, kolloidsed materjalid jm;
- (b) füüsikalisi omadusi – magnetilised, elektrilised (dielektrikud, isolatsioonmaterjalid, pooljuhid, ülijuhid), optilised, termilised (soojusjuhtivus, soojustakistus), mehaanilised (elastsusmoodul, voolavustugevus, kõvadus) jne;
- (c) mõõtmete skaalat – nanoskaalat (nm) ja mikroskaalat (μm) kuni makroskaalani (mm, m);
- (d) ajaskaalat – femtosekundist kuni sekundini, aastatest kuni geoloogiliste ajastuteni.

Modelleerimisel on erilise tähtsuse omandanud arvutusmeetodid. Kasutusel on isegi termin "arvutuslik materjaliteadus". Eriti oluline on see, kui tegemist on mõõtmete skaalade läbipõimumisega.

NÄITEID FÜÜSIKALISTEST PROBLEEMIDEST. Laialt kasutatav teras pole sugugi lihtne materjal. Ei maksa unustada, et vajalikud mehaanikalised omadused saavutatakse alles pärast terase termilist töötlemist, mis kutsub esile keerukad faasimuutused. Nende muutuste jaotus toote mahus ja mikrostruktuuri optimeerimine on aluseks protsesside mõistmisel ja juhtimisel. Tunda on vaja faasimuutuste kineetikat ja termodünaamilisi tingimusi, viimased on olulised nii tootes tervikuna kui ka liitepindadel ja vabadel pindadel.

Juba selle näite põhjal võib esitada küsimuse materjali oleku tasakaaluolekust. Materjali mikrostruktuur (kristalne või amorfne, anorgaaniline või orgaaniline, ka bioloogiline) võib olla ju ka mittetasakaalulises dünaamilises seisundis. Seega on oluline materjalide käitumise kineetikat uurida, kvantefektidest kuni purunemiseni.

Kahtlemata suureneb aatomkilesadestatud ja nanomaterjalide tehnoloogiline tähtsus. Võiks öelda, et miniaturiseerimine lõpeb alles siis, kui ilmuvad ühe elektroni/molekuli suurused "transistorid". Tuleb tunnistada, et meie teadmised on ikka veel puudulikud ja vaja on süvauuringuid. Mikrostruktuuride liitepindade kirjeldamiseks ei piisa näiteks ainult kristallograafia kontseptsioonidest, vaja on spetsiifilisi teisenduspiiranguid nt pinnadeformatsiooni in-

variantsust. Samuti on vaja aru saada liitepinna mobiilsuse ning seal tekkivate termodünaamiliste jõudude seostatusest kineetikaga.

Hübriidmaterjalid – anorgaanilised/metallilised, orgaanilised/bioloogilised materjalid on huvitavate omadustega, mille kasutusala on tehiskudedest kuni "nutikate" seadmeteni. Omaduste mittehomoogeensus, s.o muutumine ühes või teises suunas suurendab materjalide optimaalset kasutamist. Selliseid materjale nimetatakse funktsionaalselt skaleerituiks. Juba nimetus ütleb, et eesmärgiks on olnud luua funktsionaalselt sobivaid materjale teatud töötamis-tingimusteks. Mitmed juhtivad tööstusriigid (Jaapan, USA, Saksamaa) on algatanud rahvuslikke uurimisprogramme taoliste materjalide paremaks tundmaõppimiseks ja sünteesiks. Küsimus on seotud ka tehnoloogia odavamaks muutmisega. Ja jälle on võtmeküsimuseks faasidevahelised seosed, nende struktuur ja sümmeetria, allutatud termodünaamikale.

MARTENSIITSETE FAASISIIRDEFRONTIDE LEVIKU TERMOMEHAANILINE MODELLEERIMINE JA NUMBRILINE SIMULEERIMINE TAHKISTES

"NUTIKAD MATERJALID". Üheks uurimisvaldkonnaks, mis muudab oluliselt meie arusaama sünteetilistest materjalidest, aga samuti meie suhtumist ümbritsevasse, on "nutikad" (või "intelligentsed") materjalid. Erinevalt normaalsest, inertsetest materjalidest on "nutikad" materjalid loodud reageerima välis-tele mõjudele ja kohanema keskkonnaga, et tõsta konstruktsiooni efektiivsust, pikendada kasulikku elutsükli, säästa energiat või olla lihtsalt mugavam inimese jaoks. Luuakse materjale, mis on isekooperuvad, iseparanduvad või isehävituvad, sõltuvalt vajadusest, vähendades nii saastumist ja suurendades efektiivsust. "Nutikaid" materjale kasutatakse kombinatsioonis erinevate tavali-
ste materjalidega (metallid, keraamika, biomaterjalid) keerulistes süsteemides (näiteks purunemistundlikud andurid ja tehislühased). Kombineerides aatomiskaala (nanomaterjalide) loomise tehnoloogiaid bioloogiliste süsteemide jäljendamise (biomimeetika), on uute ja paremate materjalide loomise võimalused äärmiselt laiad.

KUJUMÄLUGA SULAMID JA MARTENSIITSED MUUTUSED. "Nutikate" materjalide näiteks on kujumäluga sulamid. Sõltuvalt koormusest ja temperatuurist võib nende sulamite juures märgata ebaharilikke efekte nagu kujumälu või superelastsus. Need nähtused on tingitud kristallvõre martensiit-austeniit faasisiirdest ja martensiitsest kahestumisest [Funakubo, 1984; Otsuka, Wayman, 1998]. Martensiitne faasisiire on kristallvõret moonutav, virtuaalselt difusioonivaba ja pööratav struktuuriline muutus, mis kutsutakse esile teatud metallsulamites kas temperatuuri muutuse või välisjõu mõjul. Faasisiirde ajal moodustub austeniit-
ses maatriksis uus struktuur, mida nimetatakse martensiidiks, mis ajas oma piire võib muuta. "Nutikate" materjalide käitumine on kutsunud esile uute tehniliste rakenduste tulva nii biomeditsiinis kui ka tehnilistes seadmetes (energia-muundurid, võnkeenergiasummutid jne). Oluliseks probleemiks on

“nutikate” struktuuride aktiveerimine. Selliste rakenduste konstrueerimine nõuab lisaks kujumäluga sulamite käitumise põhimõtete heale tundmisele ka korralikke matemaatilisi mudeleid nende käitumise kvantitatiivseks ennustamiseks. Viimase kahekümne aasta jooksul on loodud suur hulk selliseid erineva keerukuse astmega mudeleid [Fischer jt, 1994; Birman, 1997; Bernardini, Pence, 2002; Oidwai, Lagoudas, 2000; Abeyaratne jt, 2001].

KINEETIKA. Kristalliliste tahkiste martensiitsete faasisiirete kui huvitava füüsikalise protsessi edukas kasutamine on mõeldav, kui osatakse seda protsessi juhtida. Kõigepealt on vaja saada aru faasisiirete frondi termomehaanilisest käitumisest dünaamilistel koormustel. See eeldab teadmisi faasisiirdefrontide dünaamikast, kus probleemiks on frondile mõjuva jõu seostatus liikumisega. Tõsi, on olemas hulk kineetilisi mõõtmisi, kuid puuduvad üldistused. Seega, materjalide mikrostruktuuri kujunemine nõuab detailset kineetika uurimist.

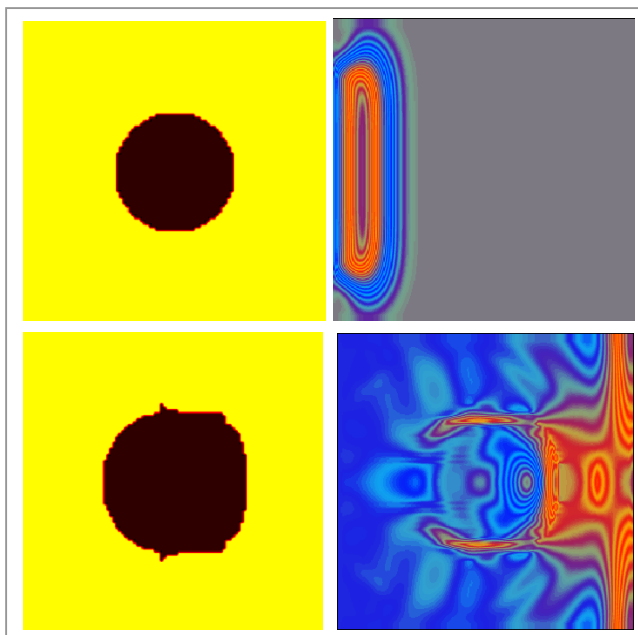
FAASISIIRDEFRONDI LEVIMINE. Faasisiirdefrondi leviku kirjeldamiseks on käesoleva uuringu raames esitatud uus meetod [Berezovski, Maugin, 2002b], mis tugineb pideva keskkonna mehaanika arendustel [Maugin, 1993; Kienzler, Hermann, 2000; Gurtin, 2000], diskreetsete süsteemide termodünaamikal [Muschik, 1993] ja jäävusseaduste esitamise numbrilistel meetoditel [LeVeque, 2002; LeFloch, 2002]. Erilise tähelepanu all on pingelainetest põhjustatud faasisiirded. Hiljuti on loodud kanooniline formalism termodünaamiliste kitsenduste kirjeldamiseks selliste katkevusfrontide, nagu lööklained ja faasifrondid termoelastsetes tahkistes [Maugin, 1993; Kienzler, Hermann, 2000; Gurtin, 2000]. See kanooniline formalism niinimetatud pseudo- ja kanooniliste momentide tasakaalu kasutamisega võimaldab üldistada mitmeid keeruliste süsteemide kontseptsioone. Termodünaamika teise seaduse täpsed ja pidevusnõudeid täitvad vormid ning kanooniliste momentide tasakaal liitpinnal seletavad entroopia kasvu frondil.

Lainete ja faasisiirdefrontide levik termoelastses keskkonnas allub samadele välja- ja olekuvõrranditele (vähemalt integraalses esituses). Lihtsaima mudeli, nagu lineaarse termoelastse keskkonna korral taanduvad need võrrandid klassikalisteks hüperboolseks lainevõrrandiks ja paraboolseks soojusvõrrandiks. Probleemid kerkivad termoelastsete lainete ja frontide levikul mittehomoogeenses keskkonnas. Praktilisest vaatepunktist on need probleemid eelkõige seotud sobivate numbriliste algoritmide konstrueerimisega. Kiired muutused vaadeldavate materjalide omadustes ning samaaegne surve- ja nihkelainete olemasolu nõuab algoritmides vähemalt teist järku täpsust. Sellised kõrge täpsusega ja suure efektiivsusega algoritmid on konstrueeritud nn lõplikumahu skeemidena [LeVeque, 2002; LeFloch, 2002]. Vastavad numbrilised meetodid baseeruvad kehtivate võrrandite integreerimisel üle kontrollmahu, mis haarab võrguelementi ja ajasammu. See tähendab, et tulemusena saadud numbriline skeem väljendub võrguelemendi keskmiste väljamuutujate ja piiride keskmiste voogude kaudu. Keskkonna olekuvõrrandid kehtivad samuti keskväärtuste suh-

tes. Kõrgema täpsuse saavutamiseks on muutujate astmeline jaotus asendatud tükati lineaarse (või isegi mittelineaarse) jaotusega üle võrgu [LeVeque, 2002].

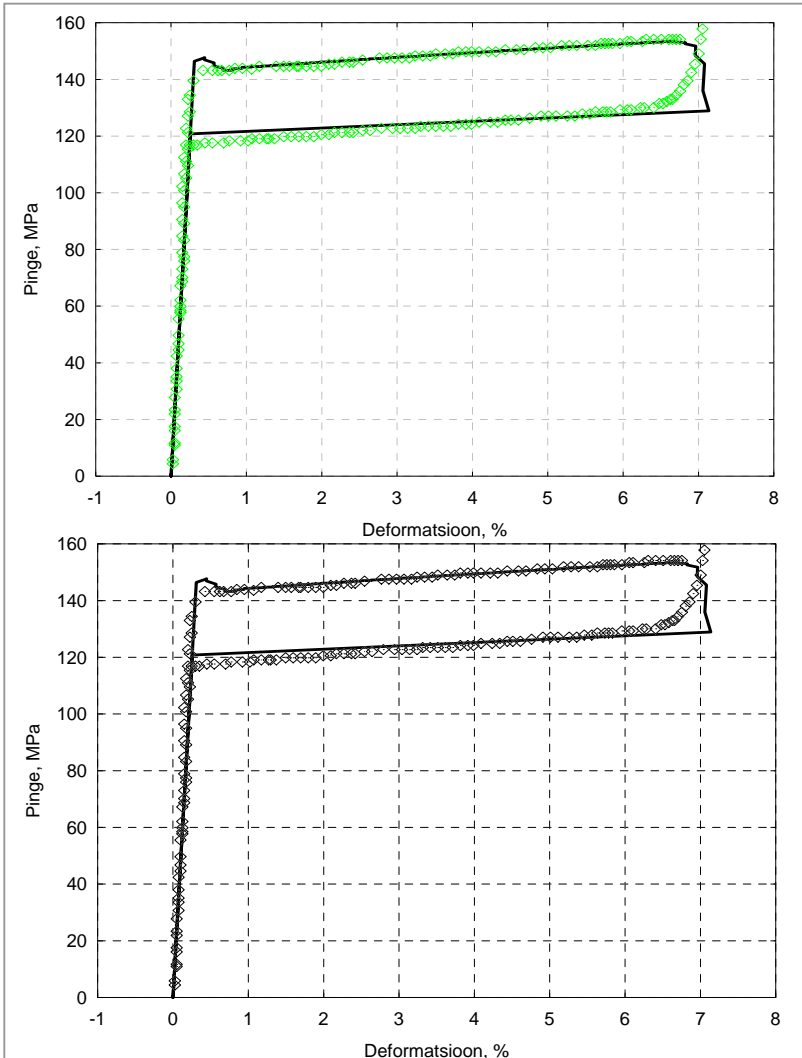
Selline skeem annab parema lähenduse matemaatilises mõttes, surudes arvutustes maha ebatõesed ostsillatsioonid. Ometi pole termodünaamika vaatepunktist selline skeem hea, sest see hävitab kohaliku tasakaalu võrguelementis. Järelikult pole kehtiv olekuvõrrand ja isegi termodünaamiliste muutujate (näiteks temperatuur ja entroopia) tähendus on küsitav. Samuti ei kehti tasakaalutingimused faasiipiiril, vähemalt faasimuutuse alguses. Pinge poolt esilekutsutud faasimuutus termoelastses tahkises on rangelt mittetasakaaluline protsess, liitepiiride leviku tõttu materjalis.

MITTETASAKAALULINE KIRJELDUS. Probleemi lahendus on leitud võrguelementides oleva mittetasakaalulise oleku kirjeldamisega diskreetsete süsteemide termodünaamika raames [Berezovski, Maugin, 2002b]. On eeldatud, et mittetasakaalulised termodünaamilised tingimused faasiipiiridel kirjeldavad faasisiirde frontide liikumist kristallilistes tahkistes [Berezovski, Maugin, 2004]. Kriitiliseks hüpoteesiks on seos vastasmõju energia ja niinimetatud kontaktsuuruste vahel, mis kirjeldavad diskreetsete süsteemide mittetasakaalulisi olekuid. Neid saab määrata mittetasakaalulistest termodünaamilistest tingimustest, mis on erinevad entroopiat tootvate ja mittetootvate protsesside jaoks.



Joonis 1. Kahedimensionaalne martensitstruktuuri muutus – vasakul, pärast pingelaine toimet – paremal. Ülemised skeemid – protsessi algus, alumised skeemid – protsessi lõppstaadium.

Viimane kaalutus dikteerib pidevustingimuste kasutamise: üks on kasutusel mahus (termoelastsete lainete korral), teine faasiipiiridel (kus toimub entroopia lisandumine).



Joonis 2.
Pingedeformatsioonikõver faasiipiiril austeniitstruktuuri taastumisel
x – eksperiment, pidev joon – arvutatud.

Faasimuutuste tekke alguse kriteerium tuleneb mõlema termodünaamilise tingimuse rahuldamisest faasiiriil [Berezovski, Maugin, 2002a; Berezovski jt, 2003a; 2003b; Berezovski, Maugin, 2003a; 2003b]. Tekitatud jõu kriitiline väärtus määratakse faasisiirde protsessi algtingimustest.

NUMBRILINE SIMULATSIOON. On loodud termodünaamiliselt lõplike mahtude numbriline meetod termoelastsete lainete ja frontide kirjeldamiseks [Berezovski jt, 2000; Berezovski, Maugin, 2001]. Selline formuleering lubab kasutada Godunovi tüüpi numbrilisi skeeme, mis põhinevad väljamuutujate keskvaärtustel mittetasakaaluliste olukordade kirjeldamiseks. Numbriliste simulatsioonide tulemused [Berezovski, Maugin, 2002a; Berezovski jt, 2003a; 2003b; Berezovski, Maugin, 2003a; 2003b] näitavad, et pakutud mudel langeb kokku eksperimentaalsete tulemustega, mis tulenevad teoreetilistest ennustustest, vaatamata protsessi idealiseerimisele mudelis. Tüüpiline näide faasifrontide dünaamikast on näidatud joonisel 1. Pildi vasak osa kujutab martensiitse lisandi kuju enne ja pärast pingelaine toimet, mis on näidatud paremal. Ühemõõtmelisel juhul on võimalik võrrelda numbrilise simuleerimise tulemusi katsetulemustega.

Joonisel 2 on esitatud arvutatud hüstereetilise pingedeformatsiooni seose võrdlus Cu-Zn-Al monokristallilise kujumäluga sulami jaoks eksperimendiga [Goo, LExcellent, 1997].

KIRJANDUS

Abeyaratne, R., Bhattacharya, K., Knowles, J. K. 2001. Strain-energy functions with local minima: Modeling phase transformations using finite thermoelasticity. Fu, Y., Ogden, R. W. (eds.). *Nonlinear Elasticity: Theory and Application*. Cambridge University Press, Cambridge, 433-490.

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. 2003a. Numerical simulation of thermoelastic wave and phase-transition front propagation. Cohen, G. C., Heikkola, E., Joly, P., Neittaanmäki, P. (eds.). *Mathematical and Numerical Aspects of Wave Propagation*. Springer, Berlin, 759-764.

Berezovski, A., Engelbrecht, J., Maugin, G. A. 2003b. Numerical simulation of waves and fronts in structured materials: a thermodynamic approach. *Proc. Estonian Acad. Sci. Phys. Mat.*, 52, 30-42.

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

Berezovski, A., Maugin, G. A. 2002a. Thermodynamics of discrete systems and martensitic phase transition simulation. *Technische Mechanik*, 22, 118-131.

- Berezovski, A., Maugin, G. A. 2002b. Thermoelastic wave and front propagation. *J. Thermal Stresses*, 25, 8, 719-743.
- Berezovski, A., Maugin, G. A. 2003a. Dynamics of impact-induced phase transition fronts. *J. de Physique IV*, 112, 167-170.
- Berezovski, A., Maugin, G. A. 2003b. Simulation of wave and front propagation in elastic and thermoelastic heterogeneous materials. *Computational Materials Science*, 28, 478-485.
- Berezovski, A., Maugin, G. A. 2004. On the thermodynamic conditions at moving phase-transition fronts in thermoelastic solids. *J. Non-Equilib. Thermodyn.*, 29, 37-51.
- Bernardini, D., Pence, T. J. 2002. Shape memory materials: modeling. Schwartz, M. (ed.). *Encyclopedia of Smart Materials*. Wiley, New York, 964-980.
- Birman, V. 1997. Review of mechanics of shape memory alloy structures. *Appl. Mech. Rev.*, 50, 629-645.
- Fischer, F.D., Berveiller, M., Tanaka, K., Oberaigner, E. R. 1994. Continuum mechanical aspects of phase transformations in solids. *Arch. Appl. Mech.*, 64, 54-85.
- Funakubo, H. (ed.). 1984. *Shape Memory Alloys*. Gordon and Breach, London.
- Goo, B. C., Lexcellent, C. 1997. Micromechanics-based modeling of two-way memory effect of a single-crystalline shape-memory alloy. *Acta Mater.*, 45, 727-737.
- Gurtin, M. E. 2000. *Configurational Forces as Basic Concepts of Continuum Physics*. Springer, New York.
- Kienzler, R., Hermann, G. 2000. *Mechanics in Material Space*. Springer, Berlin.
- LeFloch, P. G. 2002. *Hyperbolic Systems of Conservation Laws*. Birkhäuser, ETH Zürich.
- LeVeque, R. J. 2002. *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Maugin, G. A. 1993. *Material Inhomogeneities in Elasticity*. Chapman and Hall, London.
- Muschik, W. 1993. Fundamentals of non-equilibrium thermodynamics. Muschik, W. (ed.). *Non-Equilibrium Thermodynamics with Application to Solids*. Springer, Wien, 1-63.
- Qidwai, M. A., Lagoudas, D. C. 2000. On thermomechanics and transformation surfaces of polycrystalline NiTi shape memory alloy material. *Int. J. Plasticity*, 16, 1309-1343.
- Otsuka, K., Wayman, C. M. (eds.). 1998. *Shape Memory Materials*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.



Valdur Saks
kollektiivi juht



Jüri Engelbrecht



Enn Seppet



Marko Vendelin

2008. aasta teaduspreemia geo- ja bioteaduste alal tööde tsükli "MOLEKULAARNE SÜSTEEMNE BIO- ENERGEETIKA" eest

SÜSTEEMIBIOLOOGIA AJALOOLINE JA FILOSOOFILINE TAUST

Süsteemibioloogiast on hakatud tõsiselt rääkima ja kirjutama viimase kümnendi jooksul [Kitano, 2001, 2002; Klipp jt, 2005; Noble, 2006, 2008]. Sellele uurimissuunale bioloogia-teadustes pööratakse üha suuremat tähelepanu, paljudes maades luuakse süsteemibioloogia instituute ja laboratooriume. Põhjus seisneb selles, et bioloogiateadused elavad käesoleval ajal üle murrangulisi muutusi: toimub üleminek vanalt paradigmat – reduktsionismilt – uuele, süsteemibioloogiale, et mõista elusa organismi kui terviku funktsiooni. Kui reduktsionistlik lähenemine seisneb organismi, koe või raku komponentide üksteisest eraldamises ja nende struktuuri ning omaduste uurimises, siis süsteemibioloogia eesmärgiks on kõikide komponentide uurimine terviku raames, st integreeritud süsteemides, kus erinevate komponentide vastastikutule mõjude tulemusel tekivad uued nn süsteemitasemelised omadused (*system level properties*).

Nagu kirjutab üks kaasaja süsteemibioloogia rajajatest Hiroki Kitano [Kitano, 2002]: "Kõikide geenide ja valkude iseloomustus on nagu lennuki ehituseks vajalike komponentide nimekirja koostamine. Järgmisena on nendest komponentidest vaja lennuk kokku panna – selleks on vaja teada, kuidas nad omavahel seostuvad ja koos funktsioneerivad. Seega tuleb tunda kogu süsteemi käitumist, juhtimissüsteemi jne. See aga sarnaneb juba süsteemibioloogiaga."

Niisiis on tegemist põhimõtetlike suunamuutustega bioloogiateadustes, uue arenguetapiga, seni eraldi arenenud teaduste saavutuste ja meetodite ühendamisega üha keerukamate probleemide lahendamiseks. Siiski tuleb märkida, et integreeritud bioloogiliste süsteemide uurimine ei ole uus ala bio- ja meditsiiniteadustes ja, nii paradoksaalne kui see ka võiks paista, võib öelda, et süsteemibioloogia eksisteeris juba enne süsteemibioloogiat. See, mis praegu toimub bioloogiateadustes, järgib päris täpselt Hegeli põhjapanevat ideed dialektilisest ja spiraalsest arengust vanalt uuele ja siis uuesti vanale tagasi, kuid juba uuel tasemel (tees-antitees-süntees) [Russell, 1946]. Ajalooliselt toetub süsteemibioloogia paljude teadlaste töödele, sealhulgas Claude Bernardi homeöstaasiteooriale, Erwin Schrödingeri ainevahetuse ja negentropia printsiipidele ning Norbert Wieneri töödele küberneetika vallas.

Claude Bernard oli 19. sajandi väljapaistev prantsuse füsioloog, eksperimentaalfüsioloogia rajaja, kes töötas välja organismide sisekeskkonna (*milieu intérieur*) püsivuse (homeöstaasi) teooria [Bernard, 1865, 1984; Noble, 2008], mis kujutab endast ühte kaasaja meditsiini olulisematest alusteooriatest. Sisekeskkonna püsivuse saavutamiseks toimivad organismis väga efektiivsed tagasiside- ja regulatsioonimehhanismid. Nende mehhanismide uurimine meditsiinis ja tehnikas on küberneetika eesmärgiks.

Selle teaduse rajas möödunud sajandi keskel Norbert Wiener [Wiener, 1961]. Üks Claude Bernardi ideedest seisnes selles, et bioloogiliste süsteemide kirjeldamiseks on vajalikud kvantitatiivsed uurimismeetodid, seega arvutustehnika kasutamine: "Matemaatika rakendamine loodusnähtuste kirjeldamiseks on eesmärgiks kõikidele teadustele, sest loodusnähtuste seaduspärasuste väljendus peab alati olema matemaatiline" [Bernard, 1865]. Tema ajal oli eksperimentaalseid fakte siiski veel liiga vähe ja arvutustehnika peaaegu et puudus.

Nüüd on situatsioon muutunud. Süsteemibioloogia üks põhilisi lähenemisviise seisnebki täpsete ja mahukate eksperimentaaluuringute seostamises uuritavate süsteemide matemaatilise modelleerimisega, et mõista ja kvantitatiivselt kirjeldada süsteemiseseid seoseid ja uuritavate süsteemide käitumist. Sellise töö oluliseks väljundiks on uute täpsete hüpoteeside püstitamine edasiseks uurimistööks. Seega võimaldab süsteemibioloogia mitte ainult kirjeldada ja sünteesida olemasolevaid andmeid, vaid annab võimsa tõuke ka edasise teadusliku uurimistöö arenguks, uute teadussuundade tekkeks.

Ühe süsteemibioloogia aktiivse rajaja Denis Noble'i arvates võib isegi öelda, et süsteemibioloogia on tegelikult klassikaline füsioloogia kõrgemal tasemel [Noble, 2008], kus kasutatakse molekulaarbioloogia, küberneetika ning rakendusmatemaatika saavutusi ja meetodeid integreeritud rakusiseste protsesside uurimisel, seejärel seaduspärasuste kirjeldamiseks organi, organismi ja isegi populatsiooni tasemel. Paljudes maades on loodud süsteemibioloogia instituudid ning koostatud laialdased rahvusvahelised koostöö- ja uurimisprogrammid (nt P. Hunteri poolt juhitud programm "Physiome" jpt).

Möödunud sajandi keskel kirjutas Nobeli füüsikapreemia laureaat Erwin Schrödinger ühe kuulsaima raamatu teaduses "Mis on elu?" (*What is life?*) [Schrödinger, 1944], kus ta füüsika seisukohtadest lähtudes selgitas geeni-teooria olemust ning andis seega tõuke molekulaarbioloogia arenguks 50 järg-neva aasta jooksul. Selle väikesemahulise raamatu kuuendas peatükis kirjel-das ta aga ka teist bioloogiateaduste tähtsaimat probleemi elu olemuse mõist-miseks – ainevahetusprobleemide olemust füüsika seisukohalt ning nende uurimise tähtsust. Nende probleemide uurimisega tegelebki süsteemne bio-loogia molekulaarsel ja raku tasemel – molekulaarne süsteemibioloogia. Pilt-likult öeldes on bioloogiateadlased nüüd, pärast 50 aastast molekulaarbio-loogia hiilgavat arengut, asunud tõsiselt selle raamatu kuuendas peatükis kirjeldatud probleeme lahendama.

SÜSTEEMIBIOLOOGIA EESTIS: MOLEKULAARNE SÜSTEEMNE BIOENERGEETIKA

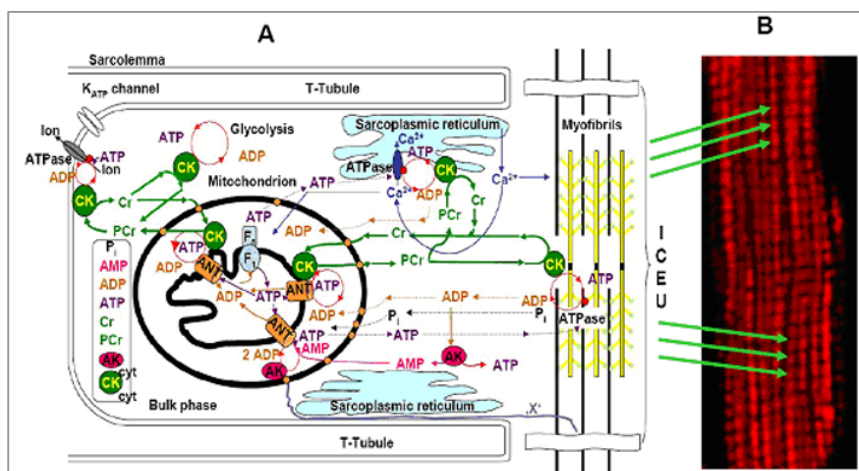
Eesti Vabariigis on akadeemikute Valdur Saksa ja Jüri Engelbrechti, professor Enn Seppeti ja doktor Marko Vendelini ühistöös ning koostöös paljude maade teadlastega (Prantsusmaa, USA, Saksamaa, Rootsi, Šveits ja Holland) praeguseks rajatud uus süsteemibioloogia suund – molekulaarne süsteemne bio-energeetika (MSB), mis on kaasa aidanud süsteemibioloogia paradigma arengule ja juurdumisele bioloogias. MSB kirjeldab integreeritud aine-, energia- ja informatsioonivahetuse protsesse nende ruumilises ja ajalises dünaamikas, kasutades selliseid uurimismeetodeid ja strateegiaid, mis ühendavad eksperimetaalsete uuringute andmed uuritavate protsesside matemaatilise modelleerimise ja teoreetilise analüüsiga. MSB peamisteks lähtealusteks on kaasaegsed teadmised rakkude ehitusest, struktuurset organisatsioonist ja ainevahetuvõrkudest koos arusaamaga, et rakukomponentide omavahelised seosed viivad uute süsteemitasandiliste omaduste (näiteks rakusisesed kompartmentalisatsiooninähtused, metaboolne kanaliseerimine jt) tekkele [Saks, 2007].

Teatud määral väljendab MSB areng Eestis üldist süsteemibioloogia arengu loogikat. MSB tugineb eksperimentaaluuringutele, mida on enam kui kolme-kümne aasta vältel läbi viidud akadeemik Valdur Saksa ja professor Enn Sep-peti poolt juhitud laboratooriumides ning mille tulemusena on välja selgi-tatud organiseeritud ensüümsüsteemide (sh kreatiinkinaaside) keskne roll li-hasrakkude rakusiseses energia ülekandes. Viimase 10 aasta jooksul on seda uut teadussuunda arendatud tihedas koostöös akadeemik Jüri Engelbrechti osakonnaga TTÜ Küberneetika Instituudis, kus on välja töötatud paljud mate-maatilise modelleerimise meetodid ja põhialused. Selle koostöö tulemusena on eksperimentaaluuringute käigus saadud andmeid edukalt rakendatud ener-geetilise ainevahetuse matemaatiliseks modelleerimiseks. Töö peamiseks ees-märgiks on olnud selgitada, kuidas elavates rakkudes reguleeritakse energia-vooge, st kuidas kindlustatakse mitokondriaalse hingamise ja ATP sünteesi

regulatsioon täpsas vastavuses ATP kulutamisega ATPaaside poolt, ehk mil viisil realiseerub energia ülekanne ja tagasiside mitokondrite ja ATPaaside vahel ning vastavalt tagasiside lihastöö mahu ning hingamisprotsesside vahel. Peamisteks uurimisobjektideks ja -probleemideks on olnud südame, skeetilihase, ajukoe ja maoepiteeli rakkude bioenergeetilised süsteemid, rakkude elutegevuse varustamine energiaga ning nende süsteemide häirete patofüsioloogilised toimed südame-, neurodegeneratiivsete ja mao-sooletrakti haiguste tekkes ja arengus.

Uurimistöõ innovaatilisus põhineb lähenemisviisil, kus füsioloogilised, biokeemilised ja molekulaarbioloogilised eksperimendid on ühendatud matemaatilise modelleerimisega ja mudelite numbrilise analüüsiga. On töötatud välja ja juurutatud originaalne hierarhiline formalism, mis on seotud sisemuutujate formalismi üldistamisega ning vastab nii kudedes kui ka rakkudes toimuvate protsesside tegelikule toimimisele. Tulemusena on õnnestunud mudelid siduda ühtsesse skeemi, silmas pidades termodünaamilisi piiranguid.

Töö ühe peamise tulemusena on formuleeritud originaalne hüpotees, mille kohaselt oksüdatiivsetes lihasrakkudes moodustavad mitokondrid ja ATPaasid täpselt lokaliseeritud komplekse e rakusisesid energiaüksusi (RSEÜd), kusjuures igas RSEÜs toimub mitokondrite ja ATPaaside vaheline energia ülekanne kreatiin- ja adenülaatkinaasete süsteemide vahendusel ning adeniinnukleotiidide otsese ülekande teel (joonis 1).



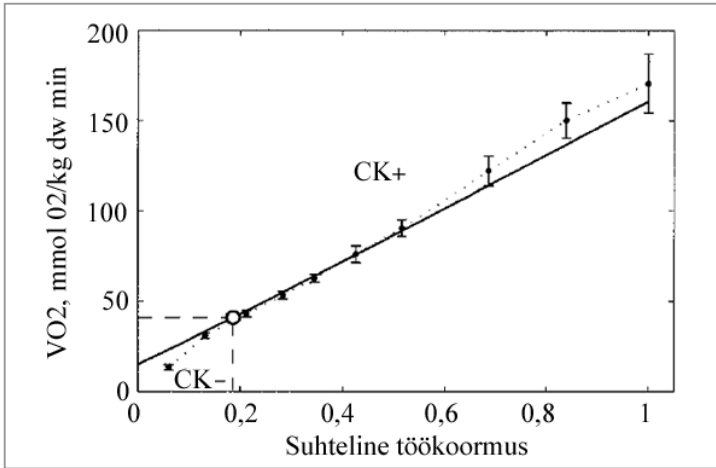
Joonis 1.

RSEÜd (A) on regulaarselt paigutunud südamerakus (B). RSEÜ sees kantakse energia mitokondritest ATPaasideni kreatiinkinaasidega (CK) ja adenülaatkinaasidega (AK) vahendatud mehhanismide abil ning ATP ja ADP otsese ülekande teel.

Erineva struktuurse organisatsiooniga südamerakkude (täiskasvanud looma kardiomiotsüüdid *versus* kardiomiotsüütide püskikultuuride rakud) võrdlemisel näidati, et rakkudes, kus mitokondrid paiknevad kaootiliselt ja nende asend pidevalt muutub, omavad mitokondrid palju suuremat näilist afiinsust eksogeense ADP suhtes kui täiskasvanud roti südamerakkudes [Anmann jt, 2006]. Teiselt poolt selgus täiskasvanud kardiomiotsüütide struktuuri analüüsides, et neis rakkudes paiknevad mitokondrid erakordselt korrapäraselt, moodustades kristallitaolise struktuuri [Vendelin jt, 2005]. Need uuringud viisid uue järelduseni, et mitokondrite organisatsiooni struktuur määrab otseselt mitokondrite hingamise regulatsioonitüübi rakkudes. Selle seose avastamine toetab RSEÜ kontseptsiooni ja viitab sellele, et mitokondrite hingamise regulatsiooniprotsessides *in vivo* osalevad spetsiifilised valgud, mis seovad mitokondreid sarkomeeridega, kuid takistavad ADP difusiooni üksusesisese ja -välise ADP varude vahel [Anmann jt, 2005, 2006]. Nende valkude lokaliseerimise selgitamiseks töötati välja uued RSEÜ funktsiooni kirjeldavad matemaatilised mudelid, mis võimaldasid simuleerida kahte eri võimalust adeniinnukleotiidide liikumise suhtes – ühtlaselt jaotunud difusioonitakistust ja lokaliseeritud difusioonitakistust ning lõpptulemusena näidata, et RSEÜ struktuuri moodustavad valgulised barjäärid lokaliseeruvad RSEÜ piiril või mitokondrite välismembraani tasemel [Vendelin jt, 2004; Saks jt, 2003].

RSEÜ kontseptsiooni järjekindel rakendamine ülalnimetatud kollektiivi poolt viis teise fundamentaalse tähtsusega avastuseni, mis käsitleb südame füsioloogia ühe põhilise seaduspärasuse – Frank-Starlingi seaduse bioenergeetilist mehhanismi. Teatavasti seisneb Frank-Starlingi seadus selles, et südamelihase vastab venitusele suurema pingearendusega, seega genereerib südamevatsake seda suuremat rõhku süstolis, mida rohkem ta täitub verrega diastolis. Juba selle seaduse üks avastaja Ernest Starling kirjeldas aastatel 1914–1926 nähtust, et vatsakesse siseneva verehulga suurenemisel kasvab koos vatsakese töökoormusega lineaarselt ka müokardi hapnikutarbimine. Vaatamata intensiivsele uurimistööle ei ole seni püstitatud hüpoteesid siiski suutnud selgitada, kuidas kindlustatakse seos südame töökoormuse ja hapnikutarbimise vahel. Selle protsessi kvantitatiivne analüüs matemaatiliste mudelite abil kinnitas, et lihase pikkuse muutudes aktiveeruvad RSEÜde struktuurimuutuste kaudu energiat tarbivad süsteemid ja energia ülekande süsteemid, mis kindlustavad metaboolse tagasiside ATPaasidelt mitokondriteni fosforüülgruppide ülekande ja lokaalsete ADP kontsentratsiooni muutuste teel [Saks jt, 2006c].

Tõenäoliselt kujutab RSEÜ endast oksüdatiivse lihasku energiabilise metabolismi peamist organisatsioonivormi, mille fundamentaalne omadus seisneb selles, et ta võimaldab raku töökoormust suurendades kiirendada energia ülekannet ja tagasisidet ATPaasidelt mitokondritele (joonis 2). Selline süsteemi omadus kindlustab energiavarustuse juurdekasvu täpselt vastavuses raku töökoormuse suurenemisele, tagades samal ajal maksimaalse ATP hüdrolyüsi va-



Joonis 2.

Hingamiskiiruse sõltuvus südame töökoormusest – Frank-Starlingi südame-seaduse ainevahetuslik aspekt. Punktiirjoon: eksperimentaalsed andmed; pidev joon – teoreetiline sõltuvus [Vendelin jt, 2000; Saks jt, 2007].

ba energia ja selle kaudu ökonoomseima energia kasutamise, mis ongi aluseks Frank-Starlingi seadusele.

Nende uuringute õigsust ja tähtsust on kinnitanud hiljuti ajakirjas *New England Journal of Medicine* avaldatud Oxfordi Ülikooli teadlaste kliiniliste uuringute tulemused. Professor Neubaueri juhitud uurimisgrupp leidis, mõõtes fosforiühendite tuumamagentresonantsspektreid tervete inimeste ja kardiomüopaatiaga haigete südamelihastes, et fosfokreatiini (PCr) ja ATP suhe on väga täpne diagnostiline indeks südamepuudulikkuse astme hindamisel [Neubauer, 2007]. Patsientide südames ATP hulk eriti ei muutu, küll aga väheneb PCr sisaldus ning PCr/ATP suhe, mille langus korreleerub patsientide suremuse kasvuga. Kõik kirjeldatud seosed on aga seletatavad ülalnimetatud Eesti teadlaste uuringute tulemuste alusel, sest PCr/ATP suhe on RSEÜ funktsiooni efektiivsuse näitaja.

Koostöös mitmete Tartu Ülikooli arstiteaduskonna kliinikutega ja Biomeedikumi instituutidega on saadud uusi andmeid mitokondrite rakusisese organsatsiooni ja funktsiooni mehhanismide kohta inimese eri kudedes ning nende mehhanismide kahjustuste kohta mitmete haiguste patogeneesis:

1. Näidati, et kroonilisi maksahaigusi põdevate patsientide verest isoleeritud autoantikehad inhibeerivad ADP-sõltuvat hingamist roti oksüdatiivsetes lihas-

rakkudes, seostudes sarkomeeri Z- ja M-liini valkudega. Tööst järelendus, et autoantikehad moduleerivad RSEÜ funktsiooni mõjustades raku tsütoskeletti. Seega võivad maksahaiguste puhul kujuneva südamepuudulikkuse põhjuseks olla autoantikehadest tingitud bioenergeetiliste protsesside häired [Kadaja jt, 2004].

2. Näidati, et inimese müokardis eksisteerivad RSEÜd, sest mitokondrite hingamise regulatsiooni kineetika adeniinnukleotiidide ja kreatiini toimel inimese südamekoja müokardis sarnanes sellele katseloomade müokardis, samuti demonstreeriti otsese adeniinnukleotiidide ülekande esinemist kojarakkudes [Seppet jt, 2005].

3. Selgitati välja, et üks inimese puusaliigese funktsiooni kontrollivatest lihastest – *m. gluteus medius* kuulub mitokondrite regulatsiooni tüübi poolest samasse klassi müokardiga, kus eksisteerivad RSEÜd ning et osteoartriooni puhul kahjustuvad mitokondriaalse hingamise kreatiinkinaasidega vahendatud regulatsioonimehhanismid *m. gluteus medius* rakkudes [Eimre jt, 2006].

4. Näidati, et mitokondrite hingamisahel kahjustub inimese südame rütmihäire (kodade virvendus) [Seppet jt, 2005] ning kroonilise gastriidi puhul [Gruno jt, 2006].

5. Prof Enn Seppet on koostöös Saksamaa kolleegidega formuleerinud uue mitokondriaalse meditsiini kontseptsiooni, mille kohaselt mitokondriaalse energiavarustuse häired vahendavad kõiki rakukahjustuse ja -surma mehhanisme. Kontseptsiooni praktiline väärtus seostub arusaamaga, et mitokondri kujutab endast farmakoloogilise ravi universaalset sihtmärki praktiliselt kõikide haiguste puhul [Seppet jt, 2007].

Akad Saksa, prof Seppeti ning akad Engelbrechti gruppide töötulemused raku bioenergeetika organisatsiooni ja regulatsiooni alal on leidnud laialdast rahvusvahelist tunnustust. Sellest kõnelevad viimasel ajal publitseeritud mahukad tööd ja ka saadud grandid:

- Akadeemik Valdur Saks on korduvalt toimetanud raku bioenergeetika probleemidele pühendatud rahvusvaheliste teadusväljaannete erinumbreid (*Mol Cell Biochem* 1994, 1998, 2004).
- 2007. a on Valdur Saks toimetatud ja paljude riikide teadlaste koostööna *Wiley VCH* poolt (Saksamaa) välja antud monograafia "Molecular System Bioenergetics. Energy for Life".
- Marko Vendelin oli üks kahest külalistoimetajatest tippajakirja *American Journal of Physiology: Cell Physiology* süsteemibioloogiale "Mitochondrial System Biology" pühendatud väljaannete koostamisel.
- Käesoleval aastal on RSEÜde uuringuteks saadud prestiižsed rahvusvahelised grandid: *Wellcome Trust International Senior Research Fellowship, UK* (M. Vendelin) ja *Agence de la Recherche, Prantsusmaa* (V. Saks), *EU Framework Programme 7 Project MyoAge* (E. Seppet ja V. Saks).

Ülalnimetatud väljaannetes on selgelt formuleeritud MSB eesmärgid, meetodid ja kontseptsioonid, mis on loonud soodsa pinna rahvusvahelise teaduskoostöö organiseerimiseks ja kontsentreerimiseks sellel huvitaval ja perspektiivikal teadussuunal. Lisaks on avaldatud palju teaduslikke artikleid ja ülevaateid teistes kõrgetasemelistes rahvusvahelistes väljaannetes (vt Kirjandus). Ühised uuringud, mida on finantseeritud ühisgrantide abil, on võimaldanud efektiivselt koondada TÜ, KBFI ja TTÜ Küberneetika Instituudi erinevate erialade spetsialistide kompetentsi ja metoodilised võimalused (sh dr M. Vendelini juhitud Süsteemibioloogia laboratooriumi rajamine TTÜ KÜBIs), et uurida bioenergeetiliste süsteemide käitumist elavas rakus.

Töötulemustel on oluline rakenduslik tähtsus, sest loodud on teoreetiline baas ja testide süsteem, mis võimaldavad hinnata kahjustavate faktorite toimeid ning potentsiaalsete ravimainete toimeid eri tüüpi rakkude energeetilisele metabolismile kui tervikule haiguste tingimustes. MSB rakendamine avab uued võimalused personifitseeritud raviskeemide väljatöötamiseks, sest ta võimaldab identifitseerida individuaalseid eripärasid raku energeetilise metabolismi patofüsioloogias ja reaktsioonides ravimitele. MSB printsiipide rakendamine võimaldab ka simuleerida eri haiguslikke seisundeid sõltuvalt eri raviskeemidest ja seega muuta ravimite kliinilised katsed efektiivsemaks ja ökonoomsemaks. Eesti tasemel võib MSB olla üheks integratiivseks teadusharuks, mis lubab seostada siinsete teadlaste saavutused geneetika, molekulaarbioloogia, evolutsiooniteaduse ja biotehnoloogia ühtseks tervikuks – näiteks eesmärgiga paremini mõista geenimutatsioonide rolli eri haiguste patogeneesis.

KOKKUVÕTTEKS

Süsteemibioloogia ühe olulise osa, uue teadussuuna – molekulaarse süsteemse bioenergeetika arendamine Eesti teadlaste poolt on kaasa aidanud bioloogiateaduste paradigma muutmisele ning võimaldanud paremini mõista rakkusiseste bioenergeetilise protsesside mehhanisme ja olemust terves ja haigestunud organismis.

KIRJANDUS

Anmann, T., Eimre, M., Kuznetsov, A. V., Andrienko, T., Kaambre, T., Sikk, P., Seppet, E., Tiivel, T., Vendelin, M., Seppet, E., Saks, V. A. (2005). Calcium-induced contraction of sarcomeres changes the regulation of mitochondrial respiration in permeabilized cardiac cells. *FEBS J.*, 272, 12, 3145-3161.

Anmann, T., Guzun, R., Beraud, N., Pelloux, S., Kuznetsov, A. V., Kogerman, L., Kaambre, T., Sikk, P., Paju, K., Peet, N., Seppet, E., Ojeda, C., Tourneur, Y., Saks, V. (2006). Different kinetics of the regulation of respiration in permeabilized cardiomyocytes and HL-1 cells. Importance of cell structure/organization for respiration regulation. *Biochim. Biophys. Acta*, 1757, 12, 1597-1606.

Beard, D., Vendelin, M. (guest eds.). (2006). *Am. J. Physiol. Cell Physiol.*, 291, 6: Special issue on Systems Biology of Mitochondrion.

Bernard, C. (1865, 1984) *Introduction a l'étude de la médecine expérimentale*. Flammarion, Paris.

Eimre, M., Puhke, R., Alev, K., Seppet, E., Sikkut, A., Peet, N., Kadaja, L., Lenzner, A., Haviko, T., Seene, T., Saks, V. A., Seppet, E. K. (2006). Altered mitochondrial apparent affinity for ADP and impaired function of mitochondrial creatine kinase in gluteus medius of patients with hip osteoarthritis. *Am. J. Physiol.*, 290, 5, R1271-R1275.

Gruno, M., Peet, N., Seppet, E., Kadaja, L., Paju, K., Eimre, M., Orlova, E., Peetsalu, M., Tein, A., Soplepmann, J., Schlattner, U., Peetsalu, A., Seppet, E. (2006). Oxidative phosphorylation and its coupling to mitochondrial creatine and adenylate kinases in human gastric mucosa. *Am. J. Physiol.*, 291, 4, R936-R946.

Guerrero, K., Wuyam, B., Mezin, P., Vivodtzev, I., Vendelin, M., Borel, J. C., Hacini, R., Chavanon, O., Imbeaud, S., Saks, V., Pison, C. (2005). Functional coupling of adenine nucleotide translocase and mitochondrial creatine kinase is enhanced after exercise training in lung transplant skeletal muscle. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, 289, R1144-R1154.

Kadaja, L., Kisand, K. E., Peet, N., Braun, U., Metskula, K., Teesalu, K., Vibo, R., Kisand, K. V., Uibo, R., Jockusch, H., Seppet, E. K. (2004). IgG from patients with liver diseases inhibit mitochondrial respiration in permeabilized oxidative muscle cells: Impaired function of intracellular energetic units? *Mol. Cell. Biochem.*, 256, 1-2, 291-303.

Kitano, H. (2001). *Foundations of Systems Biology*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

Kitano, H. (2002). Systems biology: a brief overview. *Science*, 295, 1162-1164.

Klipp, E., Herwing, R., Kowald, A., Wierling, C., Lehrach, H. (2005). *Systems Biology in Practice*. Wiley – VCH Verlag, Weinheim.

Neubauer, S. (2007). The failing heart – an engine out of fuel. *N. Engl. J. Med.*, 356, 1140-1151.

Noble, D. (2008). Claude Bernard, the first system biologist, and the future of physiology. *Exp. Physiol.*, 93, 1, 16-26.

Noble, D. (2006). *The Music of Life*. Oxford University Press, Oxford.

Russell, B. (1946,1996). *History of Western Philosophy*. Routledge, London.

Safiulina, D., Peet, N., Seppet, E., Zharkovsky, A., Kaasik, A. (2006). Dehydroepiandrosterone inhibits complex I of the mitochondrial respiratory chain and is neurotoxic in vitro and in vivo at high concentrations. *Toxicol. Sci.*, 93, 2, 348-356.

Saks, V. (ed.). (2007). *Molecular System Bioenergetics. Energy for Life*. Wiley – VCH, Weinheim.

Saks, V., Anmann, T., Guzun, R., Kaambre, T., Sikk, P., Schlattner, U., Wallimann, T., Aliev, M., Vendelin, M. (2007a). The creatine kinase phosphotransfer network: thermodynamic and kinetic considerations, the impact of the mitochondrial outer membrane and modelling approaches. Wyss, M., Salomons, G. (eds). *Creatine and Creatine Kinase in Health and Disease*. Springer, Dordrecht, The Netherlands.

Saks, V. A., Dzeja, P., Guzun, R., Aliev, M. K., Vendelin, M., Terzic, A., Wallimann, T. (2007b). System analysis of cardiac energetics – excitation – contraction coupling: integration of mitochondrial respiration, phosphotransfer pathways, metabolic pacing and substrate supply in the heart. *Molecular System Bioenergetics. Energy for Life*. Wiley – VCH, Weinheim, 367-406.

Saks, V., Dzeja, P., Schlattner, U., Vendelin, M., Terzic, A., Wallimann, T. (2006a). Cardiac system bioenergetics: metabolic basis of the Frank-Starling law. *J. Physiol.*, 571, 2, 253-273.

Saks, V., Favier, R., Guzun, R., Schlattner, U., Wallimann, T. (2006b). Molecular system bioenergetics: regulation of substrate supply in response to heart energy demands. *J. Physiol.* 577, 769-777.

Saks, V., Guerrero, K., Vendelin, M., Engelbrecht, J., Seppet, E. (2006c). The creatine kinase isoenzymes in organized metabolic networks and regulation of cellular respiration: a new role for Maxwell's demon. Vial, C. (ed.). *Creatine Kinase*. NovaScience Publishers, New York, 223-267. (*Molecular Anatomy and Physiology of Proteins*).

Saks, V., Kuznetsov, A., Andrienko, T., Usson, Y., Appaix, F., Guerrero, K., Kaambre, T., Sikk, P., Lemba, M., Vendelin, M. (2003). Heterogeneity of ADP diffusion and regulation of respiration in cardiac cells. *Biophys. J.*, 84, 3436-3456.

Saks, V., Monge, C., Anmann, T., Dzeja, P. (2007c). Integrated and organized cellular energetic systems: theories of cell energetics, compartmentation and metabolic channeling. Saks, V. (ed.). *Molecular System Bioenergetics. Energy for Life*. Wiley – VCH, Weinheim, 59-110.

Saks, V., Vendelin, M., Aliev, M. K., Kekelidze, T., Engelbrecht, J. (2007d). Mechanisms and modeling of energy transfer between intracellular compartments. Gibson, G. E., Dieselelds, G. A. *Handbook of Neurochemistry and Molecular Neurobiology*. Springer, 815-860.

Saks, V., Ventura-Clapier, R., Rigoulet, M., Gellerich, F. N., Leverve, X. (guest eds.) (2004). Bioenergetics of the cell : Organized metabolic systems. Focussed Issue of Molecular and Cellular Biochemistry, 256/257.

Schrödinger, E. (1944). What is Life? Cambridge University Press, Cambridge.

Seppet, E., Eimre, M., Anmann, T., Seppet, E., Peet, N., Käämbre, T., Paju, K., Piirsoo, A., Kuznetsov, A., Vendelin, M., Gellerich, F. N., Zierz, S., Saks, V. (2005a). Intracellular energetic units in healthy and diseased hearts. Exp. Clin. Cardiol., 10, 3, 173-183.

Seppet, E. K., Eimre, M., Anmann, T., Seppet, E., Piirsoo, A., Peet, N., Paju, K., Guzun, R., Beraud, N., Pelloux, S., Tourneur, Y., Kuznetsov, A. V., Käämbre, T., Sikk, P., Saks, V. A. (2006). Structure-function relationships in regulation of the energy transfer between mitochondria and ATPases in cardiac cells. Exp. Clin. Cardiol., 11, 3, 189-194.

Seppet, E., Eimre, M., Peet, N., Paju, K., Orlova, E., Ress, M., Kovask, S., Piirsoo, A., Saks, V. A., Gellerich, F. N., Zierz, S., Seppet, E. K. (2005b). Compartmentation of energy metabolism in atrial myocardium of patients undergoing cardiac surgery. Mol. Cell. Biochem., 270, 1-2, 49-61.

Seppet E., Gizatullina, Z., Trumbeckaite, S., Zierz, S., Striggow, F., Gellerich, F.N. (2007). Mitochondrial medicine: The central role of cellular energetic depression and mitochondria in cell pathophysiology. Molecular System Bioenergetics. Energy for Life. Wiley – VCH, Weinheim, 479-522.

Vendelin, M., Beraud, N., Guerrero, K., Andrienko, T., Kuznetsov, A., Olivares, J., Kay, L., Saks, V. A. (2005). Mitochondrial regular arrangement in muscle cells: a "crystal-like" – pattern. Am. J. Physiol. Cell Physiol., 288, 3, C757-C767.

Vendelin, M., Eimre, M., Seppet, E., Peet, N., Andrienko, T., Lemba, M., Engelbrecht, J., Seppet, E. K., Saks, V. A. (2004). Intracellular diffusion of adenosine phosphates is locally restricted in cardiac muscle. Mol. Cell. Biochem., 256/257, 229-241.

Vendelin, M., Kongas, O., Saks, V. (2000). Regulation of mitochondrial respiration in heart cells analyzed by reaction -diffusion model of energy transfer. Am. J. Physiol., 278, C747-C764.

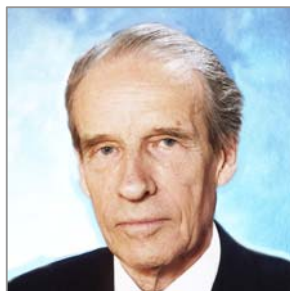
Vendelin, M., Saks, V., Engelbrecht, J. (2007). Principles of mathematical modeling and *in silico* studies of integrated systems of cellular energetics. Saks, V. (ed.). Molecular System Bioenergetics. Energy for Life. Wiley -VCH, Weinheim, 407-434.

Wiener, N. (1961). Küberneetika ehk juhtimine ja side loomas ning masinas. Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn.

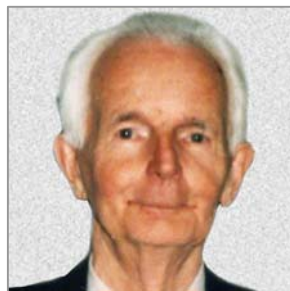
2009. a teaduspreemia innovaatilise tooteni viinud väljapaistva teadus- ja arendustöö "INTEGRAALSE FOTO-ELASTSUSMEETODI TEOORIA, MÕÕTMISTEHNOLOOGIA JA APARATUURI VÄLJATÖÖTAMINE JA RAKENDAMINE JÄÄKPINGETE MÕÕTMISEL KLAASITÖÖSTUSES" eest

SISSEJUHATUS

Fotoelastsusmeetod on eksperimentaalmehaanika meetod pingete ja deformatsioonide mõõtmiseks läbipaistvates, klaasist või plastmassist, katsekehades. Meetod põhineb fotoelastsusefektil – asjaolul, et mehaaniliste pingete mõjul muutuvad läbipaistvad isotroopsed materjalid optiliselt kaksikmurdvateks, nagu kristallid. Fotoelastsusefekti klaasis avastas Tallinnas sündinud füüsik Thomas Johann Seebeck 1813. aastal, uurides erineva kujuga ja erineva kiirusega allajahutatud klaasesemeid polariseeritud valguses [Seebeck, 1813, 1814]. Paar aastat hiljem avastas inglise füüsik David Brewster, et mesilasevahast ja kampilist valmistatud materjali tükk muutus pinge rakendamisel kaksikmurdvaks [Brewster, 1815]. Seebecki avastuse vastukajasid ning tema ja Brewsteri vahelist rivaliteeti on käsitletud artiklites [Aben, 2007, 2008]. Klaasi lõõmutusastme määramisel leidis fotoelastsusmeetod rakendamist juba 19. sajandil, esialgu lihtsalt klaastoodete vaatlemisel polariskoopides ja vaadeldavate interferentsvärvide kogemuslikul seostamisel klaasi tugevusega. Pingeväljade määramiseks mitmesuguste konstruktsioonide plastmassist mudelites hakati fotoelastsusmeetodit ulatuslikult kasutama 20. sajandi keskel. Praeguseks on insenerlik fotoelastsusmeetod teatud määral taandunud teiste eksperimentaalmehaanika meeto-



Hillar Aben
kollektiivi juht



Leo Ainola



Andrei Errapart



Johan Anton

dite (moiré, holograafia, siller) ning numbriliste meetodite ja arvutustehnika kasutamise ees. Samal ajal klaasi pingete hindamisel on fotoelastsusmeetod konkurentsitu.

Eestis algasid fotoelastsusmeetodi alased uuringud 1954. aastal Eesti Teaduste Akadeemia Ehituse ja Ehitusmaterjalide Instituudis tehnikadoktor Nikolai Alumäe algatusel. N. Alumäe tegeles sel ajal õhukeste plaatide mittelineaarse teooriaga ja lootis fotoelastsusmeetodil hõlpsasti määrata stabiilsuse kaotanud plaatides membraanpingeid, sest esialgse ettekujutuse järgi peaks läbi plaadi paksuse tasakaalus olevate paindepingete mõju plaadi läbivalgustamisel normaali sihisi elimineeruma. Nagu peagi selgus, on see nii vaid juhul, kui membraan- ja paindepingete peasuunad ühtivad. Üldjuhul see nii ei ole, peapingete suunad valguskiirel pöörduvad ja tekivad mittelineaarsed optilised nähtused, mille mõõtmine ja interpreteerimine on keerukas. Seega sattusime tegelema probleemiga, millel sel ajal veel lahendust ei olnud. Märgime, et suhteliselt hästi läbi töötatud optika harud on geomeetriline optika, mis käsitleb mittehomogeenseid kuid isotroopseid keskkondi, ning kristallide optika, mis uurib kaksikmurdvaid kuid homogeenseid keskkondi. Ruumilise objekti puhul on fotoelastne keskkond samaaegselt nii mittehomogeenne kui ka anisotroopne. Siit tuleneb ka selles keskkonnas tekkivate optiliste nähtuste keerukus.

Meie uuringute alguse ajal kasutati ruumiliste pingelekute määramiseks valdavalt nn külmutusmeetodit. Selle meetodi puhul valmistatakse uuritava konstruktsioonieleменти mudel plastmassist, nt epoksüüdvaigust. Mudelit koor-matakse sarnaselt tegelikule objektile ning kuumutatakse ligikaudu 100 °C-ni. Jahutades koormatud mudeli toatemperatuurini säilib mudelis koormisest tingitud kaksikmurdvus, mis on mudelisse nagu sisse külmutatud. See kaksikmurdvus säilib ka siis, kui mudel lõigata õhukesteks plaatideks. Viimastes saab aga pingeid uurida tasapinnalise fotoelastsuse meetoditega.

Plaatide mittelineaarse deformeerumise puhul, nagu üldse mittelineaarsete ülesannete lahendamisel, külmutusmeetodit kasutada ei saa. Seepärast püstitasime ambitsioonika ülesande – määrata ruumiline pingelek uurimisobjektis seda katki tegemata. Tõepoolest, valgustades pingete mõjul kaksikmurdvaks muutunud ruumilist keha polariseeritud valgusega, muudab see keha valguse polarisatsiooni. Seda muutust saab polariskoobis mõõta. Nii saame teatud integraalset informatsiooni keha pingeleku kohta. Probleem on selles, millistel tingimustel on saadud eksperimentaalne informatsioon piisav keha pingevälja määramiseks.

Selline mittepurustav pingete määramise meetod on vajalik ka klaasitööstuses. Klaastoodete valmistamisel jahutatakse vedelat klaasimassi, mis klaasistub temperatuuril 600–700 °C. Klaasistunud toote jahtumine toatemperatuurini toimub ebaühtlases temperatuuriväljas. Toote seesmises osas asuva

klaasi jahtumistingimused on halvemad ning toote seesmise osa kokkutõmbumist jahtumisel takistavad madalamat temperatuuri omavad välised osad. Seetõttu esinevad toatemperatuurini jahutatud klaastootes praktiliselt alati jääkpinged, mis toote seesmises osas on tõmbepinged ja pinna lähedastes osades survepinged. Kuna pindmised survepinged tõstavad klaasi tugevust, siis püütakse tänapäeval klaasi kiire jahutamise (karastamisega) pindmisi pingeid teadlikult suurendada. Selle protsessi juhtimiseks on aga vajalik täpselt teada erinevate jahutusrežiimide mõju jääkpingetele. Mittepurustav fotoelastsusmeetod on siin parimaks lahenduseks.

INTEGRAALNE FOTOELASTSUSMEETOD

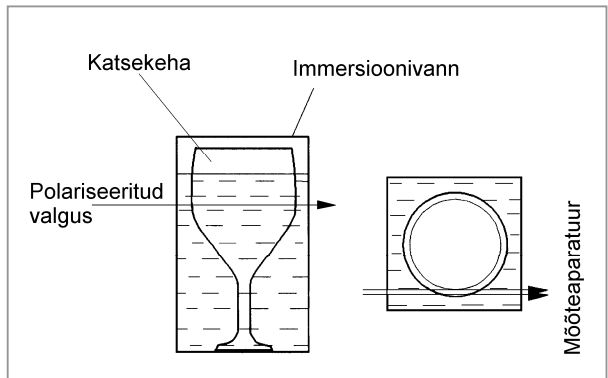
Integraalses fotoelastsuses asetatakse uuritav katsekeha immersioonivanni, et vältida valguse murdumist, ning valgustatakse läbi polariseeritud valgusega (joonis 1). Suurel hulgal valguskiirtel mõõdetakse polarisatsiooni muutus, mis on tingitud fotoelastsusefektist. Paljudel juhtudel võimaldab selliselt saadud integraalne optiline informatsioon määrata pingevälja katsekeha sees.

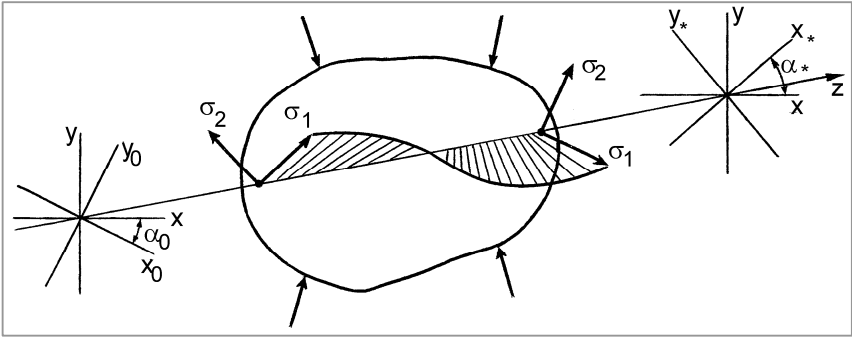
Esimeseks teoreetiliseks probleemiks oli välja selgitada, mis toimub polariseeritud valgusega pingete mõjul kaksikmurdvaks muutunud mittehomogeenses keskkonnas. Teatavasti saab tasapinnalise pingeoleku puhul fotoelastsusmeetodil määrata nn isokliini parameetri, st peapingete suuna. Mida saab aga määrata siis, kui see peapingete suund valguskiirel pöörduv? Meie uuringute algusperioodil sellele küsimusele teaduslikult põhjendatud vastust ei olnud. Levinud oli oletus, et kui valguse polarisatsioonitasand on paralleelne peapinge suunaga valguse sisenemispunkti, siis pöörduv polarisatsioonitasand katsekehas koos peapingete suunaga (joonis 2).

Lähtudes Maxwelli võrranditest tuletasime koos kolleeg E. Saksaga võrrandid, mis adekvaatselt kirjeldasid valguse polarisatsiooni muutusi mittehomogeenses kaksikmurdvas keskkonnas peapingete suundade meelevaldse pöördumise juhul [Aben, Saks, 1960].

Joonis 1.

Integraalses fotoelastsuses valgustatakse immersioonivanni asetatud katsekeha läbi polariseeritud valgusega ning mõõdetakse valguse polarisatsiooni muutus paljudel valguskiirtel.





Joonis 2.

Peapingete suundade pöördumise lihtsustatud käsitluse puhul pöördub valguse sisenemispunkti peapingega σ_1 paralleelne polarisatsioonitasand koos peapingega. Probleemi teaduslikult adekvaatne käsitlus näitab, et tegelikult eksisteerivad langeva valguse eelistatud polarisatsiooni suunad x_0 , y_0 , mille puhul ka objektist väljuv valgus on lineaarselt polariseeritud (suundades x^* või y^*). Reeglina ei lange need, nn karakteristiklikud suunad kokku peapingete suundadega ei valguse sisenemis- ega ka väljumispunkti.

Kuivõrd optiline kaksikmurdvus fotoelastsusefekti tõttu on reeglina nõrk, siis õnnestus need võrrandid viia suhteliselt lihtsasse kujusse, mis tegi võimalikuks võrrandite lahendi kvalitatiivse analüüsi. Näitasime, et vaadeldaval juhul kirjeldab valguse polarisatsiooni teisendust 2×2 unitaarne unimodulaarne maatriks. Selle maatriksi omadustest tulenes, et peavad eksisteerima kaks omavahel risti olevat langeva valguse polarisatsiooni suunda, mille puhul ka objektist väljuv valgus on lineaarselt polariseeritud. Neid suundi hakkasime nimetama vastavalt primaarseteks ja sekundaarseteks karakteristiklikeks suundadeks (joonis 2) [Aben, Saks, 1960; Aben, 1966, 1979].

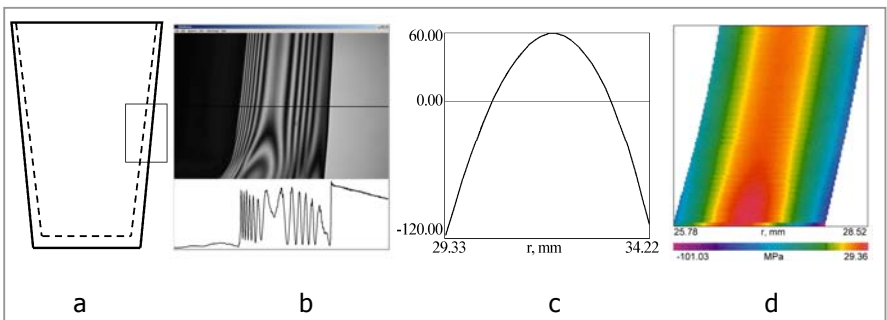
Tegelikult olime karakteristiklikud suunad eksperimentaalselt juba üles leidnud. Selleks kasutasime polariskoopi, mille polarisaator ja analüsaator olid autonoomselt pööratavad. Stabiilsuse kaotanud plaadi läbivalgustamisel õnnestus meil alati leida selline polarisaatori asend, mille puhul analüsaator teatud asendis summutas täielikult objektist väljuva valguse. Samal ajal oli ilmne, et hüpotees peapingete ja polarisatsioonitasandi koos pöördumisest ei pea paika. Tegelikult toimus mõnikord näiline polarisatsioonitasandi pöördumine peapingete pöördumise suhtes koguni vastassuunas. Seega olime karakteristiklike suundade eksisteerimise eksperimentaalselt tuvastanud ning unitaarsete unimodulaarsete maatriksite teooria andis võimaluse nende eksisteerimist ka matemaatiliselt tõestada.

Märgime, et karakteristlike suundade teooria on täielikus kooskõlas Poincaré ekvivalentsusteoreemiga [Poincaré, 1892] ja annab võimaluse arvutada Poincaré ekvivalentse süsteemi parameetreid.

Karakteristlike suundade teooria iseärasuseks on asjaolu, et seosed pingevälja parameetrite ja mõõdetavate karakteristlike suuruste vahel on mittelineaarsed [Aben, 1979, 1986a; Ainola, Aben, 1999, 2005]. See raskendab katseandmete interpreteerimise algoritmide väljatöötamist. Paljudel juhtudel saab kasutada integraalse fotoelastsuse lineaarse lähenduse võrrandeid [Aben jt, 1989; Aben, Guillemet, 1993]. Märgitud mittelineaarsuse tõttu on optilised nähtused ruumilistes mittehomoogeensetes kaksikmurdvates objektides keerukad. Eksperimentaalselt ja numbriliste arvutustega on näidatud, et vaadeldaval juhul võib polariskoobis täheldada interferentsribade kohatist kadumist (nn interferentslaike) ja bifurkatsiooni [Aben, Josepson, 1997; Aben, Ainola, 1998, 2000].

Karakteristlike suundade ja nendega seotud karakteristliku faasiinike eksperimentaalne määramine on üldjuhul keerukas. Nende mõõtmisel põhineb näiteks magnetfotoelastsusmeetod, mis võimaldab määrata läbi katsekeha paksuse tasakaalus olevaid pingevälju [Aben, 1970; Ainola, Aben, 2004b]. Telgsümmeetrilise pingeooleku puhul on primaarsed ja sekundaarsed karakteristikud suunad kollineaarsed ning nende määramine ei erine isokliini määramisest tasapinnalises fotoelastsuses [Aben, Guillemet, 1993].

Joonis 3 illustreerib jääkpingete mõõtmist karastatud joogiklaasis. Pingete määramine antud juhul põhineb integraalse fotoelastsuse algoritmil. Telgsümmeetrilise pingeooleku juhul seisneb see Fredholmi teist järku integraalvõrrandite süsteemi pöördülesande lahendamises. Intelligentne tarkvara võimaldab automaatselt määrata interferentsribade numbrid ning arvutada pingeaotuse läbi klaasi paksuse [Anton, 2002; Anton jt, 2004].



Joonis 3.

Joogiklaasi geometria (a), füüsikaline ja digitiseeritud interferentsribade pilt (b), pingeaotus läbi klaasi paksuse ühes lõikes (c) ja pingevälja uuritud piirkonnas (d).

AUTOMAATPOLARISKOOP

Polarisatsioonoptiliste mõõtmiste teostamiseks on konstrueeritud automaatpolariskoope AP. Nendest uusim mudel AP-07 on näidatud joonisel 4.

Polariskoobis AP-07 on kasutusel klassikaline mõõteskeem, kus valgusallikast väljuv polariseeritud valgus suunatakse läbi uuritava keha ning pärast analüsaatori läbimist salvestatakse interferentspildid kaameraga. Salvestatud piltide põhjal arvutab tarkvara pingete jaotuse.

Üks levinumaid AP-07 kasutusalasid on jääkpingete määramine karastatud joogiklaasides integraalse fotoelastsusmeetodi abil, kus suurte jääkpingete tõttu on interferentspildidel näha palju interferentsribasid ja telgpinge jaotuse leidmiseks piisab ühe interferentspildi analüüsimisest. Selleks on vaja leida ribade täpsed asukohad ning määrata ribade numbrid. Ribade nummerdamiseks kasutatakse ribade kordistamise ja võimendamise algoritme, mille abil saab väga veakindlalt määrata maksimaalse ja minimaalse käiguvahega ribad [Anton, 2002]. Seejärel nummerdatakse ribad järjestikku alates välispinnast, kusjuures riba numbrit pärast miinimumriba suurendatakse ja pärast maksimumriba vähendatakse. Saadud pingejaoitus kalibreeritakse tingimusest, et keskmine pinge läbi paksuse peab olema minimaalne (jääkpingete puhul on mis tahes lõikes keskmine pinge teoreetiliselt 0, sest väliskoormis puudub). Kuna ribade numbreid muudetakse täisarvu kaupa ja tegelikkusele mittevastavad jaotused annavad ilmselgelt pinnapingetega võrreldes ebareaalseid väärtusi, töötab praktikas selline lähenemine väga hästi.

Juhul kui klaasi pinged on madalad ja interferentsribade arv on väike, võimaldab polariskoop teostada karakteristliku suuna ja optilise faasinihke mõõtmist faasisammude meetodil.



Joonis 4. Automaatpolariskoop AP-07. Immersioonivannis on mõõdetav pudel.

Selle realiseerimiseks sisaldab polariskoobi optiline blokk karusselli kuue optilise elemendiga, mis on veerandlaineplaatide ja polaroidide erinevad kombinatsioonid. Karusselli pööramisega samm-mootori abil saab neid elemente ühekaupa asetada valgusallika ette objektile langeva valguse polarisatsiooni modifitseerimiseks, mida ongi vaja faasisammude meetodi realiseerimiseks. Polariskoobis on kasutusel originaalne faasisammude meetodi versioon, mis määrab üheselt ka esimese peapinge suuna [Aben jt, 1999].

Polariskoobis AP-07 on katsekeha täpse positsioneerimise koordinaatseade ja polariskoobi optiline osa ehitatud kokku ühe aluse peale, mistõttu on polariskoop kompaktna ja seda saab kasutada nii laboritingimustes kui ka tootmisliini läheduses. Kogu optiline osa valgusallikast kuni kaamerani on järgalt ühendatud, mis tõstab mõõtmiste täpsust ja vähendab vibratsioonitundlikkust.

HÜBRIIDMEHAANIKA

Nagu võis ka oletada, ei võimalda integraalse fotoelastsusega saadud katseandmed kõiki pingekomponente määrata. Näiteks kasutades telgsümmeetrilise pingeleku määramisel lineaarset lähendust, lubavad katseandmed otsest määrata telgpinge σ_z ja nihkepinge τ_{rz} jaotuse. Radiaalpinge σ_r ja rõngaspinge σ_θ määramiseks peame kasutama elastsusteooria seoseid. Eksperimendi andmete ja elastsusteooria võrrandite koos kasutamist pingeleukordade määramisel nimetatakse hübriidmehaanikaks.

Klaasitööstuses on üheks oluliseks probleemiks jääkpingete määramine telgsümmeetrilistes klaastoodetes nagu joogiklaasid ja pudelid. Kui klassikalistes hübriidmehaanika algoritmides kasutatakse tasakaaluvõrrandit ja pidevusvõrrandit, siis klaasi jääkpingete määramisel pidevusvõrrandit kasutada ei saa, sest jääkpingete tekkimise põhjuseks on jääkdeformatsioonide ebapidevus. Juhul kui pingegradiend telgsümmeetrilise katsekeha telje suunas puudub, kehtib klassikaline summareegel [O'Rourke, 1951]

$$\sigma_r + \sigma_\theta = \sigma_z. \quad (1)$$

Üldjuhul ei saa teljesuunalist pingegradiendi, mille põhjustajaks on nihkepinge τ_{rz} ignoreerida. Seega tekkis vajadus ülaltoodud summareeglit üldistada. Siinkohal on sobiv märkida, et kuivõrd klaasimassi klaasistumine on termiline protsess, siis võib klaasi jääkpingete käsitlemisel kasutada termoelastsuse võrrandeid [Bartenev, 1970]. Nendes esinevat temperatuuri nimetatakse klaasi jääkpingete puhul fiktiivseks temperatuuriks. Fiktiivne temperatuur tekitab klaasis pinged, mis vastavad jääkpingetele, kuid on vastasmärgiga.

Summareegli üldistamisel lähtusime termoelastsuse võrranditest telgsümmeetrilise pingeleku juhul. Kui teljesuunaline pingegradiend puudub, saab nendest võrranditest temperatuuri elimineerida ning tuletada klassikalise summareegli. Selgus, et termoelastsuse võrranditest saab temperatuuri elimineerida.

rida ka siis, kui teljesuunaline pingegradiend on nullist erinev. Sel juhul avaldub üldistatud summareegel kujus [Ainola, Aben, 2000, 2004c, 2008]

$$\sigma_r + \sigma_\theta = \sigma_z - 2 \int_0^r \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} dr. \quad (2)$$

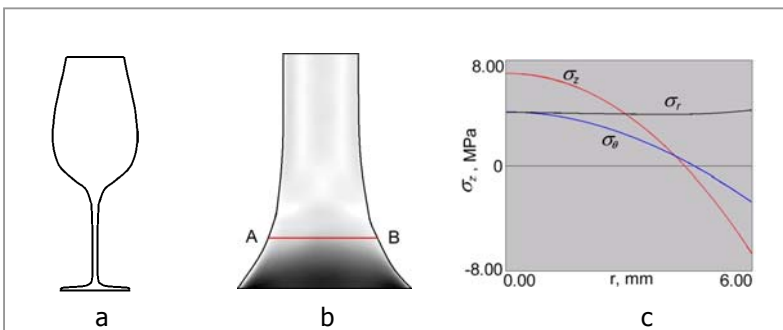
Üldistatud summareegel avas tee telgsümmeetriliste klaastoodete jääkpingete täielikuks määramiseks, mis on leidnud klaasitööstuses laialdast rakendamist [Aben jt, 2002, 2003, 2005, 2008].

Üldistatud summareegli kehtivust on kontrollitud nii numbriliste kui ka füüsiliste eksperimentidega [Ainola, Aben, 2000]. Üldistatud summareeglit saab kasutada ka telgsümmeetriliste termoelastsuse ülesannete lahendamisel kui täiendavat seost pingekomponentide vahel, mis ei sisalda temperatuuri.

Näitena on joonisel 5 toodud kõigi jääkpinge komponentide jaotus veiniklaasi jala alumise osa ühes lõikes.

FOTOELASTSUSTOMOGRAAFIA

Mitmesuguste objektide seesmise struktuuri uurimisel on laialdaselt kasutusel tomograafia. Tomograafias kiiritatakse uuritavat objekti ühes lõikes paljudes suundades mingi kiirgusega (nt valgus, röntgenkiirgus, akustilised lained jne) ja mõõdetakse kiirguse omadused pärast objekti läbimist. Nii saadakse hulgaliselt integraalset informatsiooni objekti seesmise struktuuri kohta, mille põhjal rekonstrueeritakse objekti pöiklõige. Kuna formaalselt sama tehakse ka integraalse fotoelastsuses, võib ka integraalset fotoelastsust vaadelda kui tomograafiat. Siiski eksisteerib traditsioonilise tomograafia ja integraalse fotoelastsuse vahel põhimõtteline erinevus.



Joonis 5.

Veiniklaasi geometria (a), interferentspilt klaasi jala alumises osas (b) ja pingekomponentide jaotus lõikes AB (c).

Traditsiooniline tomograafia on skalaarvälja tomograafia, st välja igat punkti iseloomustab üks suurus – skalaar. See võib olla näiteks röntgenkiirte neeldumiskoeffitsient, akustiline murdumis-näitaja jne. Integraalses fotoelastsuses püüame me määrata pingevälja. Pinge on aga tensor, mis igas välja punktis on määratud 6 skalaariga. Seega on integraalne fotoelastsus sisuliselt tensorvälja tomograafia, mis võrreldes skalaarvälja tomograafiaga, mille teooria on hästi läbi töötatud, on oluliselt keerukam.

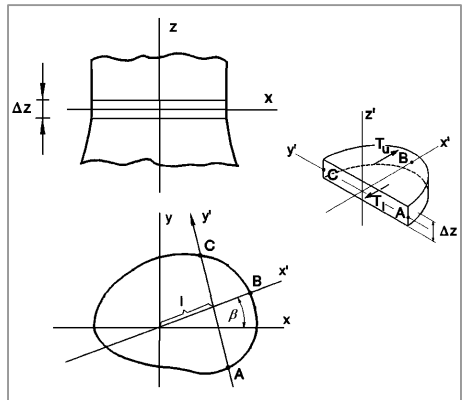
Eelpool nägime, et telgsümmeetrilise pingevälja määramine integraalse fotoelastsusmeetodi abil on võimalik, kui kasutada ka hübriidmehaanika seoseid. Telgsümmeetriliste objektide tomograafiat nimetatakse ühedimensiooniliseks tomograafiaks. Oluliselt keerukam on tensorvälja tomograafia algoritmi koostamine, juhul kui uurimisobjekt on meelevaldse kujuga. V. Sharafutdinov on tensorvälja tomograafia ülesande taandanud ääreväärtuse ülesandeks pingetensori komponendile, mis on paralleelne objekti pööramise teljele tomograafilistel fotoelastsusmõõtmistel [Sharafutdinov, 1994]. Selle meetodi puuduseks on asjaolu, et ta nõuab telgpinge eelnevat mõõtmist põiklõike kontuuril. Lisaks ei ole meetod kasutatav, kui põiklõike kontuur ei ole kumer kõver.

Praktikas on sobivamaks osutunud fotoelastsustomograafia dekompositsiooni-meetod [Aben, Guillemet, 1993; Aben jt, 2005]. Joonisel 6 on näidatud meelevaldse kujuga uurimisobjekt, mille pingeid lõikes xy on vajalik määrata.

Selleks teostatakse lõigetes $z = z_0$ ja $z = z_0 + \Delta z$ tomograafilised fotoelastsusmõõtmised, määrates paljudel valguskiirtel isokliini parameetri $\varphi(\beta, l)$ ja optilise käiguvahe $\Delta(\beta, l)$. Katsetulemused ühel valguskiirel avalduvad kujus

$$V_1 = \Delta \cos 2\varphi = C \int (\sigma_{z'} - \sigma_{x'}) dy', \quad (3)$$

$$V_2 = \Delta \sin 2\varphi = 2C \int \tau_{x'z'} dy'. \quad (4)$$



Joonis 6.
Fotoelastsustomograafia üldine skeem.

Valemist (3) saame elimineerida σ_x , kasutades segmenti ABC tasakaalutingimust

$$\Delta z \int_A^C \sigma_x' dy' = T_u - T_1, \quad (5)$$

kus T_u and T_1 avalduvad seostega

$$T_u = \frac{1}{2C} \int_l^B V_2' dx', \quad T_1 = \frac{1}{2C} \int_l^B V_2 dx' \quad (6)$$

ja V_2' on V_2 väärtus lõikes $z = z_0 + \Delta z$.

Tasakaalutingimus (5) võtab nüüd kuju

$$\int_A^C \sigma_x' dy' = \frac{1}{2C\Delta z} \left(\int_l^B V_2' dx' - \int_l^B V_2 dx' \right). \quad (7)$$

Asetades seose (7) valemisse (3), saame

$$\int_A^C \sigma_z' dy' = \frac{V_1}{C} + \frac{1}{2C\Delta z} \left(\int_l^B V_2' dx' - \int_l^B V_2 dx' \right). \quad (8)$$

Valem (8) on sisuliselt pingekomponendi σ_z Radoni teisendus. Pinge σ_z välja saab nüüd määrata skalaarvälja tomograafia Radoni pöördteisendusega. Sellega oleme tensorvälja tomograafia ülesande dekomponeerinud skalaarvälja tomograafia ülesanneteks üksikutele pingekomponentidele. Pöörates katsekeha tomograafilistel fotoelastsusmõõtmistel ümber telje x saame määrata normaalpinge σ_x jaotuse jne. Fotoelastsustomograafia teoreetilisi probleeme on käsitletud töödes [Aben, 1986b; Ainola, Aben, 2004a].

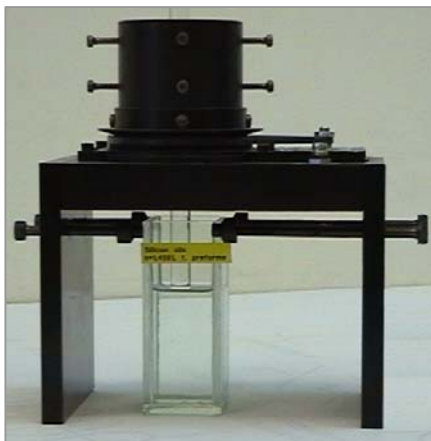
Fotoelastsustomograafia mõõtmiste automatiseerimiseks polariskoobis AP on konstrueeritud pöördeseade (joonis 7). Polariskoobis AP tagab seade fotoelastsusmõõtmised faasisammude meetodil objekti algasendi juures, pöörab seejärel objekti ümber vertikaaltelje etteantud nurga võrra, teostab jälle fotoelastsusmõõtmised, jne [Errapart, 2008].

Näitena on joonisel 8 näidatud nn kilipils tüüpi klaaskiu tooriku põiklõige ja telgpinge jaotus. Joonisel 9 on näidatud ühe kõrgsurvelambi geomeetria ning normaalpingete jaotus lõikes AB. Mõlemal juhul on tomograafilisi fotoelastsusmõõtmisi teostatud iga kraadi järel vahemikus 0–180°.

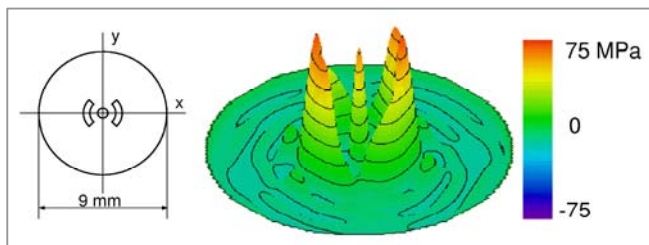
RAKENDUSTEST

Meie esimene rakendustöö oli seotud Tallinna klaasitehasega "Tarbeklaas" 1960ndatel aastatel. Tehas valmistas sel ajal suuremat partiid elektrilampide kahekihilisi armatuure. Nende armatuuride seesmine kiht oli valguse hajutamiseks valmistatud piimklaasist ning väline kiht läbipaistvast klaasist.

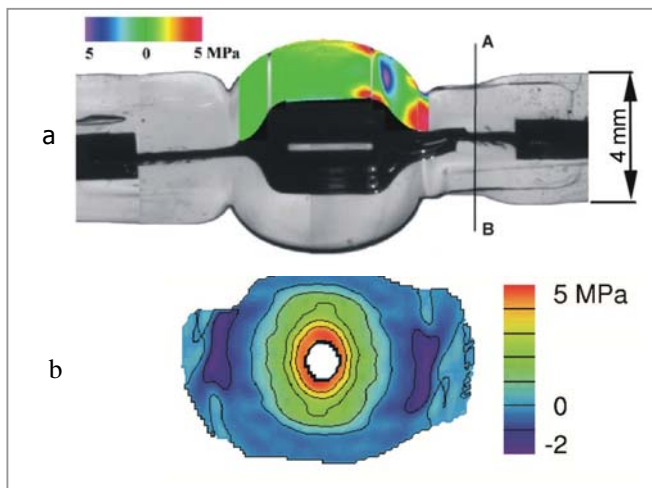
Joonis 7.
Pöördeseadme foto koos katse-
kehaga immersioonivannis.



Joonis 8.
Kikilips-tüüpi optilise kiu tooriku
põiklõige ja telg-
pinge väli.



Joonis 9.
Kõrgsurvelambi
geomeetria (a) ja
normaalpingete
jaotus lõikes AB.



Klaaside erineva keemilise koostise tõttu on sellisel juhul klaaside joonpaisumistegurid erinevad, mis võib viia armatuuride purunemiseni. Kihiliste klaastoodete joon-paisumistegurite sobitamine on üks klaasi tehnoloogi raskemaid probleeme. Meid kutsuti tehasesse probleemiga tutvuma, kus avanes üsna trööstitu pilt – tootmisliinilt tulid välja ainult killud.

Kahekihiliste armatuuride jääkpingete kontrollimiseks on klaasitööstuses kasutusel nn rõngaproov – armatuurist lõigatakse välja rõngas, mis lõigatakse ühes kohas läbi. Kui lõikekoha otsad tõmbuvad teineteisest eemale, siis on välise klaasi joonpaisumistegur suurem kui seesmisel. Vastasel juhul on suurem seesmise klaasi joonpaisumistegur. Vilunud tehnoloog suudab hinnata klaaside sobivust rõngas tekkiva prao või jõu suuruse järgi, mis on vajalik rõnga vabade otste eemaldamiseks teineteisest. Muidugi on see meetod vaid kvalitatiivne.

Kuna integraalne fotoelastsusmeetod oli meil selleks ajaks juba üsna täielikult välja arendatud, töötasime kiiresti välja meetodi klaaside joonpaisumistegurite erinevuse täpseks mõõtmiseks. Valgustades läbi armatuuri välise kihiga saime määrata selles kihis pinged. Kihiliste koorikute teooria lubas nüüd arvutada pinged ka armatuuri seesmises kihis, samuti klaaside joonpaisumistegurite erinevuse. Kavandasime kiiresti portatiivse polariskoobi, mis oleks kasutatav tehase tingimustes. Polariskoobi projekteeris ja ehitas Teaduste Akadeemia Erikonstrueerimisbüroo insener M. Veigel. Polariskoobi andsime üle tehasele.

Meie järgmine oluline rakendustöö oli seotud firmaga Saint-Gobain. Klaasi tehnoloogia alaste uuringute ja nende praktilise rakenduse tase Saint-Gobain'is on väga kõrge, firmat nimetatakse ka klaasi ülikooliks. H. Aben tutvus firma uurimisinstituudi Saint-Gobain Réchère fotoelastsuse laboratooriumi juhataja Dr. Claude Guillemet'ga Priisis 1988 aastal ühel fotoelastsuse seminaril. C. Guillemet oli välja töötanud rea meetodeid lehtklaasi jääkpingete mõõtmiseks, kuid integraalset fotoelastsusmeetodit ta ei tundnud. Aasta hiljem, ühes klaasi pingete talvekoolis Bulgaarias, esitas ta meile tellimuse kahele uuringule. Saint-Gobain töötas sel ajal välja uut tüüpi õhukeseseinalist õllepudelit ja oli alustanud joogiklaaside karastamist. Mõlema toote arendamisel oli hädavajalik osata määrata jääkpingeid. C. Guillemet palus meil uurida võimalust nende klaastoodete jääkpingete mõõtmiseks. Kuna olime just lõpetanud integraalse fotoelastsusmeetodi lineaarse lähenduse teooria, siis saime vajaliku meetodi väljatöötamisega kiiresti hakkama ning demonstreerisime uut meetodit 1989 aasta kevadel Tallinnas C. Guillemet'le, kes oli siin läbisõidul teel Rahvusvahelisele Klaasikongressile Leningradis. Sama aasta sügisel tutvustame meetodit seminaril instituudis Saint-Gobain Réchère ja andsime instituudile üle ka meetodi realiseerimise programmi.

Koos C. Guillemet'ga tõdesime, et kuigi on olemas meetodid jääkpingete mõõtmiseks nii lehtklaasis kui ka telgsümmeetrilistes klaastoodetes, ei tunne

ega kasuta neid meetodeid klaasitööstus. Otsustasime nende meetodite tutvustamiseks korraldada suvekooli Rahvusvahelises Mehaanikauuringute Keskuses Udines, Itaalias. Ühenädalane suvekool leidis aset 1992 aastal ja mängis ilmselt olulist rolli fotoelastsuse kaasaegsete meetodite propageerimisel klaasi-tehnoloogide seas. Samuti otsustasime koos C. Guillemet'ga kirjutada klaasi fotoelastsuse kohta raamatu, mis avaldati 1993 aastal Springeri kirjastuse poolt [Aben, Guillemet, 1993].

Veel tahaksime märkida klaasi pingete mõõtmise alast ühepäevast kursust, mille viisime läbi 1993 aasta sügisel Londonis rahvusvahelise fotoelastsusmeetodi alase konverentsi eel.

Ülalnimetatud kahel koolitusel osales insenere ka firmast Philips. 1995. aastal tekkis Philipsis probleem seoses kineskoopide valmistamisega. Nimelt on kineskoop üsna keeruline klaaskonstruksioon, mis koosneb kolme liiki klaasist. Ühest klaasist on ekraan, mille külge on keevitatud teist liiki klaasist lehter. Lehtri kitsa osa külge on keevitatud nn kaelatoru, mis on tehtud kolmandat liiki klaasist. Viimane keevitus ongi kineskoobi kriitiline koht, kus see kipub purunema. Philips saatis meile suure partii kaelatorusid jääkpingete määramiseks. Sellest alates on Philips olnud meie koostööpartneriks, tellides meilt alul mõõtmisi ja hiljem polariskoope ning saates Tallinnas alates 2000 aastast korraldatud klaasi pingete suvekoolidesse oma insenere õppima klaasi pingete mõõtmise kaasaegseid meetodeid.

Seoses H. Abeni osavõetuga rahvusvahelisest eksperimentaalmehaanika konverentsist Tokyos 1995 aastal saime kutse tutvustada oma meetodit firma Asahi Funabashi klaasitehases. Selgus, et tehases oli kineskoopide purunemisega sama probleem, mis firmas Philips. Sõlmisime selle probleemi operatiivseks lahendamiseks lepingu. Tagasi jõudnud Tallinnase panime ühe olemasoleva polariskoobi baasil kokku aparadi, mis võimaldas mõõta pingeid komplekteeritud kineskoobi kaelatoru keevituskohal. Sama aasta lõpul viisime polariskoobi Funabashi tehasesse ja koolitasime nädala jooksul välja kolm tehase inseneri seda aparati kasutama. Kuigi see polariskoop ei olnud automatiseeritud, omandasid terased jaapani insenerid kiiresti polariskoobi käsitlemise ja mõõtmisandmete töötlemise sülearvutil.

Londonis toimunud klaasi pingete mõõtmise kursusest võttis osa ka üks tehase Verrerie Crystallerie d'Arques insener. See prantsuse tehase on maailmaturu liider karastatud joogiklaaside valmistamise alal. Aastal 1996 viis H. Aben tehases läbi ühenädalase integraalse fotoelastsusmeetodi kursuse ja jättis tehasesse ühe AP tüüpi polariskoobi. See polariskoop oli veel manuaalne ja ei rahuldanud tehast täielikult. Aasta hiljem varustas J. Anton tehase polariskoobi videokaameraga ja installeeris pingete automaatse arvutamise programmi. Sellest ajast alates on see firma, mille praegune nimetus on Arc International, meie alaline koostööpartner, kellelt saame tagasisidet meie sead-

mete efektiivsuse kohta ja keda varustame oma automaatpolariskoobi uue-
mate mudelitega.

Firma Philips tellis meilt esimese automaatpolariskoobi 1998. aastal. Kineskoo-
bi kaelatoru pingete kõrval oli tehasel probleeme ka pingetega kõrgsurve-
elektrilampides ja teistes klaastoodetes. Tänapäevaks on firma meilt tellinud kaks
automaatpolariskoopi ning mitmed firma insenerid on osa võtnud meie klaasi
pingete suvekoolidest.

Head sidemed on meil ka Saksa juhtiva klaasifirma Schott uurimiskeskusega
Mainzis. Oleme neile müünud ühe oma polariskoobi, koolitanud nende insene-
re ja andnud konsultatsioone. Sama võib öelda Inglise klaasifirm Pilkington
uurimiskeskuse kohta Lathomis. Pilkington kasutab meie automaatpolariskoo-
pi floatklaasi pingete määramisel klaasist välja lõigatud riba mõõtmisel paral-
leelselt klaasi pindadele. Samal otstarbel kasutab seda polariskoopi ka Pilking-
toni tütarfirma Cebrace Brasiilias.

Meie polariskoopide kasutajatest tuleks veel märkida Türgi firmat SISECAM,
kes on üks Euroopa suuremaid joogiklaaside tootjaid. Aastal 2002 installeeris
J. Anton ühe polariskoobi USA firmas Emhart Glass. See firma on maailmas
juhtival kohal pudelite tootmise liinide valmistamise valdkonnas. Praegu töö-
tab firma välja pudelite karastamise tehnoloogiat. Firma Emhart Glass soovit-
sustel tellis 2004 Coca-Cola uus pudelitehas Dubais meilt ühe polariskoobi,
mida käis installeerimas A. Errapart.

Kuivõrd polariskoopide üsna ulatuslik valmistamine ja müük ei mahu hästi ühe
üliskooli uurimisinstituudi tegevuse raamidesse, siis lõime 2003 aastal osähi-
ngu GlasStress klaasi pingete mõõtmise aparatuuri valmistamiseks ja turusta-
miseks. Praegu valmistab see osähihing aparatuuri ka karastatud lehtklaasi
(arhitektuurilise klaasi) ja autoklaaside jääkpingete kontrollimiseks.

LÕPETUSEKS

Teaduse saavutuste juurutamisel praktikasse on põhimõtteliseks küsimuseks,
kui lähedale rakendusele peab minema teadlane. Küllalt levinud on seisukoht,
et teadlase kohus on publitseerida ja seega teha üldsusele teatavaks oma
uued tulemused. See, kes leiab, et need tulemused on praktikas rakenda-
tavad, võib siis neid tulemusi praktika suunas arendada. Elu näitab, et see
skeem ei taha töötada. Reeglina teab teadlane ise kõige paremini, kuidas saa-
dud tulemust saaks praktikas rakendada. Selleks on aga vaja teha täiendavat
tööd, mis teadlasele sageli ei meeldi – koostada rakendusalgoritme, arvutus-
programme, konstrueerida aparatuuri, jne. Praktikud ei ole reeglina võimeli-
sed lugema teaduslikest artiklitest välja seda, mida nad just oma spetsiifilise
probleemi lahendamiseks vajavad. Teiseks, ärgem tehkem illusioone – prak-
tikutel ei ole aega lugeda teaduskirjandust vähegi laiemalt kui nende kitsas
eriala. Klaasi tehnoloogid on reeglina keemikud, kelle teadmised pingetest ja

optikast on üsna pinnapealsed. Kui olime C. Guillemet'ga avaldanud raamatu klaasi fotoelastsusest [Aben, Guillemet, 1993], ootasime, et nüüd hakkavad klaasifirmad meie poole pöörduma ja tellima ühele või teisele probleemile lahendusi. Ei midagi sellist. Huvi meie mõõtmismeetodi vastu tekkis alles siis, kui me koolitustel lisaks loengutele demonstreerisime realselt töötavat aparatuuri, näidates kui lihtne on seda käsitseda ja saada tehnoloogile vajalikku informatsiooni.

Olles keerukates klaastoodetes pingete mõõtmise meetodika põhimõtteliselt välja töötanud, pöördusime kolme tuntud polariskoopide tootja poole ettepanekuga realiseerida see meetodika kaasaegsel tasemel ja varustada programmidega. See oli lootusetu ettevõtmine. Üks tuntud USA firma oli küll valmis müüma ühte oma standardset polariskoopi koos meie meetodi programmiga, kuid see polariskoop ei sobinud meile vajalikeks mõõtmisteks. Polariskoobi modifitseerimist peeti liiga keeruliseks. Üks Inglise firma tootis ainult kõige lihtsamaid polariskoopide ning kartis CCD kaameratel töötavaid süsteeme ja ei omanud nende loomiseks ka kompetentsust. Üks Saksa firma oli pea-aegu nõus võtma tööle programmeerija, kes realiseeriks meie algoritmid, kuid välja arvutanud, kui palju ta peab selle eest töötasu maksma ning mitte olles veendunud projekti edus, loobus ka tema.

Samal ajal on meie meetodi realiseerimiseks vajalik aparaat põhimõtteliselt küllaltki lihtne, ja selleks vajalikud optilised ja elektroonilised detailid tänapäeval kättesaadavad, sõltumata nende valmistamise kohast. Meie poolt kavandatud esimesed automaatpolariskoobid valmistas Tõraveres asuv firma Anko-Tata. Kuna mitmel meie grupi liikmel on loomupäraselt konstruktori kalduvusi, siis oleme viimasel ajal mõnede allettevõtjate abil ise realiseerinud teadusmahuka mõõtmismeetodika lõpptarbijale käepärases kujus, arutiga juhitava aparatuurina.

Kõik meie grupi liikmed on avaldanud teaduslikke publikatsioone ja tundnud sellest rahuldust. Samal ajal see rahuldus, mida oleme saanud klaasitehastes, kui oleme installeerinud oma aparatuuri ja näinud, millise innuga ruttavad kogemustega klaasi tehnoloogid seda kasutama, et lõpuks siiski oma silmaga näha millised jääkpinged ühes või teises klaastootes esinevad, on veelgi suurem.

KIRJANDUS

Aben, H. (1966). Optical phenomena in photoleastic models by the rotation of principal axes. *Exp. Mech.*, 6, 13-22.

Aben, H. (1970). Magnetophotoelasticity – photoelasticity in a magnetic field. *Exp. Mech.*, 10, 97-105.

Aben, H. (1979). *Integrated Photoelasticity*. McGraw-Hill, New York.

- Aben, H. (1986a). Characteristic directions in optics of twisted birefringent media. *J. Opt. Soc. Am.*, A3, 1414-1421.
- Aben, H. (1986b). Integrated photoelasticity as tensor field tomography. *Proc. Int. Symp. Photoelasticity (Tokyo, 1986)*. Springer-Verlag, Tokyo, 243-350.
- Aben, H. (2007). On the role of T. J. Seebeck in the discovery of the photoelastic effect in glass. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 13, 283-294.
- Aben, H. (2008). Ühest Thomas Johann Seebecki laineid lõonud avastusest optikas. *Akadeemia*, 20, 2240-2254.
- Aben, H., Ainola, L. (1998). Interference blots and fringe dislocations in optics of twisted birefringent media. *J. Opt. Soc. Am. A*, 15, 2404-2411.
- Aben, H., Ainola, L. (2000). Isochromatic fringes in photoelasticity. *J. Opt. Soc. Am. A*, 17, 750-755.
- Aben, H., Ainola, L., Anton, J. (1999). Half-fringe phase-stepping with separation of the principal stress directions. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 5, 198-211.
- Aben, H., Anton, J., Errapart, A. (2002). Residual stress measurement in axisymmetric glass articles. *Glass Technol.*, 43C, 278-282.
- Aben, H., Anton, J., Errapart, A. (2003). Automatic measurement of residual stress in glass articles of complicated shape. *Verre*, 9, 44-49.
- Aben, H., Anton, J., Errapart, A. (2008). Modern photoelasticity for residual stress measurement in glass. *Strain*, 44, 40-48.
- Aben, H., Errapart, A., Ainola, L., Anton, J. (2005). Photoelastic tomography for residual stress measurement in glass. *Opt. Eng.*, 44, 93601, 1-8.
- Aben, H., Guillemet, C. (1993). *Photoelasticity of Glass*. Springer, Berlin.
- Aben, H., Josepson, J. (1997). Strange interference blots in the interferometry of inhomogeneous birefringent objects. *Appl. Opt.*, 36, 7172-7179.
- Aben, H., Josepson, J., Kell, K.-J. (1989). The case of weak birefringence in integrated photoelasticity. *Opt. Lasers Eng.*, 11, 145-157.
- Aben, H., Saks, E. (1960). Optical phenomena by investigating shells. Polarization-optical method for stress analysis. Leningrad University, 208-221.
- Ainola, L., Aben, H. (1999). Duality in optical theory of twisted birefringent media. *J. Opt. Soc. Am. A*, 16, 2545-2549.
- Ainola, L., Aben, H. (2000). Hybrid mechanics for axisymmetric thermoelasticity problems. *J. Thermal Stresses*, 23, 685-697.

- Ainola, L., Aben, H. (2004a). On the optical theory of photoelastic tomography. *J. Opt. Soc. Am. A*, 21, 1093-1101.
- Ainola, L., Aben, H. (2004b). Theory of magnetophotoelasticity with multiple reflections. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 6, 51-56.
- Ainola, L., Aben, H. (2004c). A new relationship for the experimental-analytical solution of the axisymmetric thermoelasticity problem. *ZAMM*, 84, 211-215.
- Ainola, L., Aben, H. (2005). Principal formulas of integrated photoelasticity in terms of characteristic parameteres. *J. Opt. Soc. Am. A*, 22, 1181-1186.
- Ainola, L., Aben, H. (2008). Approximate solution of the inverse problem of axisymmetric thermoelasticity for residual stress measurement in glass. *J. Thermal Stresses*, 31, 165-175.
- Anton, J. (2002). Automatic fringe analysis in tempered axisymmetric glass. *Proc. BSSM Int. Conf. Advances in Experimental Mechanics. Stratford-upon-Avon*, 17-20.
- Anton, J., Errapart, A., Aben, H. (2004). Measurement of tempering stresses in axisymmetric glass articles. *Int. J. Forming Processes*, 7, 543-554.
- Bartenev, G. M. (1970). The structure and mechanical properties of inorganic glasses. *Wolters-Nordhoff Publ., Groningen*.
- Brewster, D. (1815). On the effects of simple pressure in producing that species of crystallization which forms two oppositely polarized images, and exhibits the complementary colours by polarized light. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 105, 60-64.
- Errapart, A. (2008). On the technology of photoelastic tomography. *Exp. Techniques*, 32, 31-35.
- Poincaré, H. (1892). *Théorie mathématique de la lumière*. Carré et Naud, Paris.
- Seebeck, T. J. (1813). Einige neue Versuche und Beobachtungen über Spiegelung und Brechung des Lichtes. *J. für Chem. Phys.*, 7, 259-298.
- Seebeck, T. J. (1814). Von den entoptischen Farbenfiguren und den Bedingungen ihrer Bildung in Gläsern. *J. für Chem Phys.*, 12, 1-16.
- Sharafutdinov, V. A. (1994). *Integral Geometry of Tensor Fields*. VSP, Utrecht.

MILLEGA
TEGELEVAD
TEADLASED

Kübirneetikaka

Teadlaste tegemiste olulisteks väljunditeks on teadusartiklid, patendid, lepingulised uuringud ja väljatöötused. Ometi peab ka ühiskond teada saama, millega teadlased tegelevad. Ühiskonnale arusaadavas keeles kirjeldatud tulemused on äärmiselt tähtsad nii ühiskonna retseptiooni saamiseks kui ka hariduse üllate eesmärkide täitmiseks. Sii peatükki on kogutud kogunud teadusajakirjaniku (ja/või füüsiku) Tiit Kändleri sulest ilmunud artiklid "Eesti Päevalehe" teaduslehekülgedelt. Jälle on teemade ring lai, nii programmjuhtimisest ja muusikamatemaatikast, nii turbulentsist ja juhuslikust turust, nii mittelinearsest dünaamikast ja südameenergeetikast.

Instituut tänab Tiit Kändlerit nende artiklite avaldamisloa eest.

Instituut 50

PUUST TULBID, MUUSIKAMATEMAATIKA JA ALLVEELAEVAD

Katkeid intervjuudest Boris Tammega, Tiit Kändler

LÖUNASÖÖGIL OLÜMPIA HOTELLI RESTORANIS, 1995
Eesti Päevaleht, 25. november 1995

“Siimaani ei ole see klaverimängija mänginud veel ühtegi lugu, mida mina ei oskaks mängida,” ütleb Boris Tamm äkki, tehes justkui märkuse oma taldrikul lebavale suitutatud lambafileeale. Aga klaverimängijana on juba hilja alustada, arvab ta, olles meeldivalt üllatunud restorani muusikavaliku üle. Ta ise lõpetas 1949. aastal muusikakeskkooli. “Lõpetasin kompositsiooni erialal Villem Kapi juures, kes oli erakordset huvitav õpetaja.”



Boris Tamm

Miks siis ikkagi tehnikaõpingud? Ja arvutiteadus? “Mõned asjad on seletamatud,” kostub vastuseks. “Mulle avaldas mõju see, millest tavaliselt vähem räägitakse – kuhu mu paremad sõbrad läksid. Sellepärast läksingi elektrotehnikat õppima.”

On raske määratleda, kas Boris Tamm on pigem küberneetik, automaatik, programmeerija või näiteks juhtimisteoreetik. “Nagu teadus on muutunud, on minu enese teaduslik nägu muutunud. Nõukogude ajal pidasid paljud suureks auks, et on tegelnud ühe ja sama probleemiga aastakümneid. See minule ei sobi. Minusugused ongi niisugused. Kõik arvutiteadlased tulid sel ajal inseridest.”

Viiekümnendate ja kuuekümnendate aastate vahetusel Moskvas aspirantuuris olles arvutas Tamm välja trajektoori esimesele nõukogude programmjuhtimisega löikepingile. “Minuga koos õppis mees, kes arvutas trajektoori esimesele nõukogude sputnikule. See oli ajal, mil Ameerika spioon Powers alal tõmmati. Siis lehvitas üks meie laboritest lippu ja teisel oli lipp laua all, sest üks arvutas trajektoore sellele polügoonile, kes Powersi alla tõmbas, aga teine sellele, kes mööda laskis,” meenutab Boris Tamm.

Arvuti oli tol ajal, mis Boris Tamm esimese eesti mehena programmeerima õppis, imeasi. “See M-3 nimeline riist tegi siis 30 tehet sekundis. Praegu teevad arvutid sama ajaga 50 miljonit tehet. Arvuti võttis enda alla umbes pool tuba.” Tamm poolitab käeviipega sisekujundaja poolt hoolega disainitud restorisaali. “Nüüd on masinad läinud mitu tuhat korda väiksemaks. Kui meie

programmeerisime, siis oli meil terve arvutimälu sisu peas. Romantiline. Tulede vilkumise järgi tajusime, mis masin teeb. Katsuge praegu seda järele teha!”

Aga muusikat saab arvutil kirjutada küll. “Kui vaadata parkümmend koraali läbi ja esimesi kolme-nelja takti silmas pidada, siis on seda programmi väga lihtne kirjutada. Parkümmend aastat tagasi leidsime Heino Jürisaluga, et paljud armastuslaulud algavad sekstiga,” ütleb Tamm.

“Atonaalne muusika on teine maailm,” reserveerib ta samas. “Mäletan, kui Arvo Pärt siin lähedal majas elas,” osutab Tamm käega tollase Heliloojate Maja suunas. “Mina elasin majas, kus kunagi elas Lauter. Ja Küberneetika Instituut oli siinsamas paarisaja meetri kaugusel. Kui Pärt käis konservatooriumis, astus ta ikka meie instituudist läbi, käis Ivar Peterseni juures matemaatikat konsulteerimas. Tema oli algebrafanaatik.”

Mõtted kuidagi selguvad kohvi juures. “Pärt meenus mulle, sest usun, et Pärt näeb muusikas mingit matemaatilist struktuuri.

KÜBERNEETIKA INSTITUUDIS MUSTAMÄEL

Eesti Päevaleht, 17. jaanuar, 1996

Mustamäel Küberneetika Instituudis on Boris Tamme kabinetis laua peal klaasvaas kolme puust tulbiga. Üks siniseks, teine mustaks ja kolmas valgeks vöõbatud, hakkavad puutuldid ühes rohelise puulehega muidu raamatu- ja paberirohkes töötoas kohe silma.

“Möödunud aastal rääkisid Eesti kaupade eksportijad, et meie parim tulemus oli puust lillede menu ühel Pariisi näitusel,” räägib akadeemik Tamm, nähes mu pilku peatumas sel absurdse võitu puukebanal. “On ikka saavutus küll! Selle vastu kui võiksite eksportida oma teadusele põhinevat kõrgtehnoloogilist kaupa. Tõin need puulilled mõnel pool näiteks, mis juhtub, kui riik arendustegevust alahindab. Ja siis kingiti need mulle sümboliks.”

50. aastate lõpul ühe esimese eestlasena arvutiteadust õppinuna ja programmeerima hakanuna oli Boris Tamm üks Eesti arvutiseerimise pioneere. Koos Nikolai Alumäe ja teiste teadlastega on ta üles ehitanud Teaduste Akadeemia Küberneetika Instituuti 60. aastatel, juhtinud seda ning Eesti Teaduste Akadeemia asepresidendina juhtimas tehnikateaduste suunda nüüdki.

Üks probleeme, millega nüüdne Küberneetika Instituudi peateadur ja Tehnikaülikooli professor dr Boris Tamm viimasel ajal tegeleb, on ekspertsüsteemide tehnoloogia. Iga inimene on huvitatud sellest, et otsustada võimalikult õigesti. Kas on võimalik ühe või teise otsustusprobleemi jaoks matemaatiline algoritm, mis muudaks otsustuse tegemise lihtsamaks, aga ka tulemuse objektiivsemaks? See küsimus on puhtmatemaatiliselt võetav ning seondub näiteks David Hilberti kuulsa otsustusprobleemiga – kas eksisteerib sellist üldist algoritmilist protseduuri, millega lahendada kõiki matemaatilisi küsimusi?

"Tunnetuslikest mõõtmistest on raske teha numbrilist algoritmi või luua analüütilist mudelit," kirjutab Boris Tamm ühes oma teadusartiklis. Kuid miks seda ikkagi teha püütakse? "Maailm on täis analoogsignaale. Maailmas ei ole musta ega valget. Kui tahame otsuseni jõuda, peame lähendama, olema ligikaudsed," ütleb Tamm.

Arvutid ongi arenenud kahe vastasmõjus oleva jõu – tarkvara ja riistvara omavahelise mõju väljas. "Eestis võib olla maailma parim allveelaevade leiutaja, aga Eesti ei ole riik, kus allveelaevatööstus iialgi saaks areneda," ütleb Boris Tamm. "Nii on ka arvutitega. Eestis tehti üks Nõukogude Liidu esimese kümne hulka kuuluvaid arvuteid. ... See meie M-3 polnud sugugi kehvem kui enamik selle klassi arvuteid toleaeegses USA-s. Mahajäämus tekkis hiljem. Kogu häda oli selles, et kõik salastati."

"See asjaolu, et Eesti teadus ei ole jõudnud oma praktiliste rakendusteni, on suurel määral riigi mure. Ent meie riigi juhtkond tegeleb pigem omaenese eksistentsiaalsete hädadega, selle asemel, et ajada riigi asju. Arendustegevuse programm tuleb luua aastateks. Ja peale hakata sellest, et end maailmale näidata."

ÕLIREOSTUSE MUSTRID KUJUNEVAD SEADUSPÄRASELT

Eesti Päevaleht, 28. jaanuar 2000, Tiit Kändler



Jaan Kalda

Füüsik Jaan Kalda on tuletanud valemi, mis senisest lihtsamal moel kirjeldab liikuvate ainete segunemist. Ta loodab oma tulemust kasutades kirjeldada, mil moel tekivad planeetide ja tähtede sees magnetväljad. Rakendusi on ka igapäevasemaid. Ainete segamisega on alatasa hädas nii keemikud kui toiduvalmistajad. Keskkondlasi huvitab, kui kiiresti lahustub korstnasuits õhus ning merre sattunud nafta vees. Alati pole sugugi nõnda, et mida kiiremini ja kauem segad, seda parem segu tuleb.

NAFTALAIKUDE LAHUSTUMISE TEADUS

Tahkuna poolsaare lähistele on sügistorm karile ajanud ühe mugavuslipu maa lipu alla seilava naftatankeri. Merre voolab kümneid tonne naftat. Keskkonnapäätjate tegevuse tulemusena koristatakse enamik sellest ära nädala jooksul. Hinnangute kohaselt jääb merre veel paar tonni naftat. Kui kaua võtab aega, et supelsaks saaks rahumeeli minna merre ujuma, kalur kala püüda ja kirjuhakk talvituda? Et sellele hüpoteetilisele küsimusele võimalikult täpselt vastata, tuleb teada, kuidas nafta veega seguneb.

Segunemine pole sugugi nii lihtne asi nagu esmapilgul tundub. Kes on kordki püüdnud kahest eri värvitoonist üht ja sobiliku kokku segada, see teab, kuidas sinise värvi laigud kollases imepäraseid mustreid moodustades üha edasi püsivad, vänta sa lahust puupulgaga nii kaua kui tahad. Ja saadud rohelist värvi seinale kandes ilmub sinna ikka veel mõni väiksem sinilaiguke, justkui mälestus suvisest taevast.

"Probleem on klassikaline ja vana, seda on tõsisemalt uuritud sada aastat," ütleb Küberneetika Instituudi teadlane Jaan Kalda ja näitab pildil, milliseid mustreid üksik sinine värvitriip kollases värvimeres segunedes tekitab. Tillukeste osakeste juhuslikku seiklemist vees läbi mikroskoobi jälgides pakkus Robert Brown juba 172 aasta eest välja, et vee molekulid pommitavad osakest, mis läbi too edasi ja tagasi heitlebki. Kuid alles 1905. aastal tuletas noor Albert Einstein valemi, mis lubas osakeste liikumist ka arvuliselt ennustada.

PUHHI PULGAMÄNGU TEOORIA

Kuid Einstein tegeles liikumatu vedelikuga. Kuidas aga kulgeb osake siis, kui vedelik liigub? Mäletate karupoeg Puhhi pulgamängu? Tuleb sillalt pulgad jök-

ke visata, ja kelle pulk enne teiselt poolt välja jõuab, see on võitja. Puhhi mängus pole võitjat niisama lihtne ennustada. Jõevool kord haarab pulgakese kaasa ja kihutab seda näiva võidumehena edasi, siis aga satub pulk veekeerisesse ja koos sellega veidi vastuvoolu liikudes laseb kõik teised konkurendid mööda. Kui vedelik liigub, pole Einsteini tarkusega suurt midagi peale hakata. Turbulentsiks nimetatav liikumine on palju keerukam.

“Kaua aega loodeti, et ainete suuremastaapne liikumine on sarnane molekulide omaga,” ütleb Kalda, “kuid paarikümne aasta eest see lootus luhtus.” Saadi aru, et suits kandub õhuvoolus, õlilaik merevees ja munarebu majoneesi õlis mingite eriliste seaduste kohaselt. Et aineid omavahel võimalikult kiiresti ja ühtlaseks segada, selleks peab teadma, kuidas laigud vooluga kaasa kanduvad ja pisemateks laiali pudenevad. “Pika aja möödudes võiks loota, et õlilaigud on kõik mereveega segunenud, kuid ikka ilmub välja laike, mis tekitavad pahan dust,” selgitab Kalda ning lisab, et see tuleb juba loodusseadustest, mitte inimese suvast.

Möödunud kevadel õnnestus Jaan Kaldal paberi ja pliiatsiga esimest korda lähendada, kuidas segunemise muster sõltub vedeliku liikumise omapärasest. Jaanuaris avaldas tema artikli prestiižne füüsikaajakiri Physical Review Letters. “Idee mõlkus peas pikalt, aga lõpuks kui ette võtsin, sain artikli kuuga valmis,” ütleb Kalda, kiites nii Küberneetika Instituuti kui ka Moskva Füüsika-Tehnika-instituuti, kus ta 1980. aastatel õppis ning plasmafüüsikast kandidaaditöö kaitses.

MAGNETVÄLJAD EIMILLESTKI

Ainete segunemise teadus ei tegele ainult värvisegamisega. Mängu tulevad ka planeedid ja tähed. Nende magnetvälju kavatseb Jaan Kalda oma teooriaga kirjeldama hakatagi. “Kui taevakeha tuum on vedel ja see vedelik elektrit juhib, siis on magnetvälja jõujooned justkui vedeliku osakeste külge kleepunud,” selgitab ta. Kui täht tõmbub kokku ja muutub neutrontäheks, siis tõmbuvad kokku ka magnetvälja jõujooned ja tekib ülitugev magnetväli. See elektrijuhtidest vedelike omadus on tekitanud näiteks Maa vedelas tuumas magnetväli eimillestki. Nii nagu teravikule asetatud pliiats pikali kukub, nii võimendab vedeliku liikumine peaaegu olematut magnetvälja.

Milline magnetväli näiteks planeetide liikumas vedelas tuumas tekib, seda on võimalik ennustada, kui vaid Kalda võrrandeid keerulisemale juhtumile edasi arendada. “Minu võrrandiga ennustatud pilt on eksperimendiga hästi kooskõlas,” kinnitab Kalda. “Hiljuti avaldati terve artikkel sama probleemi lahendamiseks arvuti abil numbriliselt rehkendades – mina saan oma valemist nende tulemuse kahe reaga kätte.”

FÜÜSIKA PÜÜAB HÕLMATA JUHUSLIKU TURU KÄITUMIST

Eesti Päevaleht, 5. august 2005, Tiit Kändler



Robert Kitt

Kes viib naha turule, see ärgu imestagu, et nahkade hind on äkitselt langenud alla igasuguse mõistliku piiri. Turg ei ole tänav. Kui teile tuleb tänaval vastu sada inimest, võite ennustada, kui palju on nende seas keskmise pikkusega, kui palju kahemeetriseid, kui palju meetriseid. Ning olla kindel, et kolmemeetrist te ei kohta. Turul aga võite näha ka kümnemeetrisid ja kümneseentimeetrisid. Kui räägime näiteks hinnakõikumistest. Hind võib kõikuda kuitahes suurtes ulatustes. Täpselt samuti nagu aine kriitilises olekus – näiteks vee ja auru vahel võivad esineda kohati kuitahes suured tiheduse kõrvalekalded ehk fluktuatsioonid.

ÖKONOFÜÜSIKA, UUS LÄHENEMINE MAJANDUSES

“Finantsturg on analoogne iseorganiseeruvalt kriitilistele süsteemidele,” kinnitab värske filosoofiadoktor, Küberneetika Instituudi teadlane Robert Kitt. Oma uurimistöodes on Kitt rakendanud füüsikat majandusteaduse ühe osa, börsi- ja hinnakõikumiste analüüsis.

“Rahanduses, täpsemalt börsi ja investeerimisega seonduvas, on matemaatikat ja füüsikat ikka kasutatud, sest mõnda aega võib küll börsil õnnemängijana tegutsejaid edu saata, kuid pinnal pikemalt püsimiseks tuleb osata võimalikult täpselt arvatada ja minimeerida riske,” kommenteerib Küberneetika Instituudi teadlane, füüsik Jaan Kalda, kes juhendas Robert Kitti tema doktoritöö tegemisel. “Efektiivse turu hüpoteesi kohaselt ei ole aktsiaturul kindlalt võitvaid algoritme ning nende otsimine on umbes sama perspektiivikas, kui igavese jõumasina leiutamine.” Kalda sõnul on optimeerimise juures füüsikast üldreeglinah rohkem kasu kui matemaatikast, sest börs kui paljude inimõistuste koostegutsemise viil on nii keeruline, et seda ei saa kirjeldada vaieldamatute valemite abil. “On vaja osata eraldada oluline ebaolulisest ja koostada lihtsustavaid ning arvutusteks jõukohaseid mudeleid,” ütleb ta.

Kui füüsikat majanduses rakendatakse, on seda hakatud kutsuma ökonofüüsikaks – nii nagu me tunneme füüsika rakendamist bioloogias biofüüsika ja geoloogias geofüüsika nime all.

JALJENDAMINE EDU EI TOO

Tipud ja kuristikud majanduses keelduvad allumast ennustustele. Kas siis majandus on olemuslikult ennustamatu, või me lihtsalt ei tea veel neid sea-

dusi, mille põhjal ennustada – nii nagu statistilise mehaanika eelne füüsika ei teadnud seadusi, mille järgi ennustada gaaside käitumist?

Börsihinnad ei käitu nii nagu gaasimolekulid. Nende kõikumises esineb ükskuid väga suuri kõrvalekaldeid, millised molekulide ansambliid kunagi ei tee. Kõikumisi võib olla kuitahes suuri, ent nende tõenäosus väheneb, kui need suurenevad. Tootehinnad on nagu hiired, kes sööki otsivad. Väikesel pindalal sagivad siia-sinna, ent kui toitu ei leia, siis punuvad kiiresti uude paika ja sagivad seal edasi. See toob toidu tõhusamalt nina alla, võrreldes sellega, et kogu aeg juhuslikult sagida.

“Krahhide tõenäosus on väga väike, kuid need ei ole midagi erilist, vaid täiesti tavaline osa turu käitumisest,” ütleb Kitt. Kui on ka teada, et turg käitub mastaabivabaduse kohaselt, siis ikkagi pole pikemas perspektiivis võimalik turu käitumist ennustada. Lühemas, minuti piires küll, aga tehing võtab aega ja raha, nii et kasu see ei too. Ja kui eeldame, et viimaks saabki turgu ennustada, siis ei saaks seda ju ikka teha, sest kõik ei saa ju ometi võita. Kas ei näita see vastuolu, et saame füüsikast teada vaid üldisi seadusi majanduse kohta, aga praktikas tuleb ikka käituda, nii nagu teine ees teeb?

“Füüsika annab vaid paremad võimalused kirjeldamiseks toimuvat,” nõustub Kitt. Kui oskame mineviku sündmusi kirjeldada, siis on meil kahtlemata paremad võimalused tulevikku vaadata. Häda on selles, et ühe väärtpaberi hinda määrab tohutu hulk sisendmuutujaid, milliste osatähtsus samuti pidevalt muutub. “Ma arvan, et finantsturul kellegi jälgendamine ole eriti edukas strateegia. Pigem annab tulemuse oma eesmärkide selge formuleerimine ning sihispärane tegutsemine. Ja kindlasti peab olema omal kohal ka majanduslik analüüs,” ütleb ta.

TURG POLE JUHUSLIK

Robert Kiti töös on kolm uudset asja, mis on asjatundjate arvates maailma taustal uudsed. Lisaks detailsele ülevaatele ökonofüüsika minevikust ja olevikust on selles arendatud uudne teooria multifraktaalsete aegriidade uurimiseks ja uudne teooria portfelli paremaks juhtimiseks. “Viimane valdkond on mul pooleli – doktoritöös sai välja toodud küll teooria ning esialgsed tulemused, kuid teooria kinnistamiseks oleks vaja veel kõvasti teha empiirikat,” ütleb Kitt.

Uudne portfelliteooria tugineb just ökonofüüsika peamisele alustalale – eeldusele, et turg ei ole tavamõistes juhuslik. Klassikaline portfelli käsitlus ignoreerib asjaolu, et turgudel on krahhid ning suured fluktuatsioonid ja opereerib üksnes ruutkeskmise hinnakõikumisega. “Meie teooria pakub võimaluse ennast kaitsta suurte languste vastu, jättes tähelepanuta paari-kolme standardhälbe suurused kõikumised,” selgitab Kitt. “Lennukiehituses tähendaks see, et lennukisalongis ei pea olema mitte üksnes minimaalne vibratsioonitase, vaid ka lennuki allakukkumise tõenäosus tuleb viia miinimumi. Sest olgu vii lennuki alla-

kukkumise tõenäosus vaid üks miljardik, allakukkunuid see ei lohuta,” toob Kalda omakorda näite.

Et ökonofüüsikast ka praktilist kasu leitakse, näitab see, et rakenduslikumat laadi ökonofüüsika jääb saladuseks. “Tegemist on äärmiselt rakenduslike mudelitega, mida kasutatakse väga kitsastes segmentides, kus arvatakse, et on võimalik ebaefektiivsustest raha teenida,” kommenteerib Kitt. “Minu töö oli suunatud akadeemilisse keskkonda. Kui läbi viia arvutused mingi konkreetse aktsia või indeksi käitumise kohta, siis saaks minu pakutud teooriatest teha mudeleid, mida on võimalik turgudel rakendada. Praegu ma seda rakendanud ei ole, kuid läbikäidud tee ning omandatud teadmised on juba kindlasti kaasa aidanud minu juhitavate Hansa pensionifondide tootlustele,” ütleb ta.

Tema sõnul on tööst kasu peamiselt investoritele, kes soovivad oma raha edukalt kasvatada. “Samas on minu töös elemente, mis parandavad pankade riskijuhtimist ning seega võiks potentsiaalne huviliste ring olla laiem.”

SUURI HÜPPEID PÕHJUSTAVAD PISIKESED MUUTUSED

Eesti Päevaleht, 29. juuli 2006, Tiit Kändler

Üks Eesti teaduse tippkeskustest kannab nime "Mittelineaarsete protsesside analüüsi keskus". Akadeemik Jüri Engelbrehti juhtimisel töötavad teadlased on uurinud nii laineid kui südant, nii klaverihaamreid kui nafaalaid. Ja leidnud neis sarnast matemaatikat, mis kirjeldab keeruliste protsesside toimumist.



Jüri Engelbrecht

Mida tähendab, et maailm pole lineaarne?

Kui ütleme, et maailma ei anna sirgjoonte abil seletada, tähendab, et seosed maailmas ei ole võrdelised. Sirgjoon on võrdelisuse tunnusmärk. Tegelik olukord on keerulisem. Maailm seisab koos paljudest asjadest ja nende omavahelised seosed on keerukad. Mitu asja koos tekitavad uusi nähtusi. Üks pluss üks ei ole vahel kaks, seda teadsid juba vanad kreeklased, kes ütlesid, et summa on suurem, kui liidetavad kokku.

Kas see võib ka pisem olla?

Tõepoolest võib. Need suhted on olulised tunduvalt laiemad kui füüsikalise ja matemaatilises mõttes. Sotsiaalsed süsteemid näiteks on tunduvalt keerukamad. Ei ole nõnda, et anname palka juurde ja teemegi rohkem tööd. Või et teeme elu materiaalselt muudkui paremaks ja kõik läheb ainult paremaks. Sellest on hakatud aru saama eriti viimasel ajal, mil on leitud sarnasused eri valdkondade vahel ja hakanud tekkima üldised seaduspärasused. Mõni nimetab seda kõiksuseks (*ubiquity*), mõni kompleksüsteemideks, mõni väikeseks maailmaks (*small world*), milles kehtivad väga huvitavad seaduspärasused. Kasvõi et kui lähedal on sinust näiteks Ameerika president või suguharu pealik vihmametsades.

Kuus käepigistust. Selle võiks lahti seletada.

Meil igaühel on tutvus- või sõprusringkond. Tuttavatel jälle omaette ringkonnad. Sidemed on nii selgelt väljendatud, et sõprusringkondadest edasi minnes tekib üha enam võimalusi, ja see viib ruttu välja selleni, et iga inimeseni saab jõuda keskmiselt kuue inimese läbi.

Mõned on aga erakud.

Me räägime siiski keskmisest. Lihtne katse on tehtud nööpide ja niitidega. Viisatakse juhuslikult nööbid põrandale. Ja siis hakatakse neid juhuslikult ühen-

dama niitide abil. Alul tekib sidemeid vaid nööbipaaride vahel. Edasi aga jõuame nööpideni, mis on juba mõne teisega ühendatud. Tekivad klastrid ehk kogumid. Ühest hetkest peale on järsku kõik hakanud omavahel ühinema. Üks hea näide on internet.

Kuid inimene näeb, et kui läheb poodi ja maksab kaks korda enam raha, saab kaks kilo suhkrut. Nii et siin on ikka tegu perfektse lineaarsusega. Või hakkab astuma, ja astub kaks tundi, jõuab kaks korda kaugemale kui tunniga.

Nii nagu Newtoni seadused pole Einsteini poolt ümber lükatud, kehtivad meie igapäevases elus, nii on ka lineaarsed lähendused igapäevaelus omal kohal.

Eksponentsiaalset sõltuvust on raske intuiitiivselt hoomata.

Jah, kompleksüsteemides tavaintuitsioon ei tööta. Kompleksüsteemid võivad tekkida nõnda, et sõidate küll oma arust kaks korda kiiremini, aga sõidate teisele otsa, tekib liiklusummik ja ongi lineaarsus läbi.

Miks inimene seisab kahel jalal, tool aga kahel jalal ei seisa?

Siin tuleb mängu tagasiside. Nii nagu sõidame jalgrattaga. Tagasiside on kompleksüsteemides väga oluline. Suuremad väljundid mõjutavad tagasi sisenemist.

Üheks moesõnaks on mastaabivabad süsteemid või astmeseadus. Selle kohaselt toimuvad maavärinad, relvakonfliktid, liivavaringud.

Kui logaritmilises skaalas saad sirge, on see astmeseadus. Pole selget mastaapi, mis oleks teistest parem. Kõik on mõnes mõttes ühetähtsad.

Kas me ei saagi ennustada, kui suur tuleb järgmine maavärin?

Protsess on ise põhjuslik. Kuid seda mõjutab liiga palju komponente, mis omakorda mõjutavad väljundeid, nende vahelised suhted on nii keerulised, et polegi põhimõtteliselt võimalik ennustada ei järgmise maavärina aega ega suurust.

Inimene võib ennustada, millise tõenäosusega tuleb talle vastu inimene pikkusega meeter või kaks meetrit. Sest keskmise pikkusega inimene on olemas. Kas siis keskmise suurusega maavärinat ei ole olemas?

Jah, seda see tähendab. Kuid muidugi seab äärmustele Maa ise siin oma suurusega oma piirid.

Internetis puhul on imekspandav, kui kiiresti saab kätte maakera iga punkti. Kuid selles võrgustikus pole ju kõik punktid ühetähtsad.

Jah, sõlmed on olulisemad. Interneti võrgustik on tekkinud spontaanselt. See pole ehitatud nagu satelliitide võrgustik, mis on seatud katma kogu Maa. Internet on tehissüsteem, mis tekkis paarikümne aastaga, aga huvitav on see, et selle tehissüsteemi omadusi uurime samal moel nagu looduslikku süsteemi, mis on tekkinud võrreldamatult kauem, miljardite aastatega.

Kas teadusvaldkonnad, mis on inimese poolt lahterdatud – nagu füüsika ja bioloogia ja keemia – töötavad kompleksüsteemide uurimisel koos?

Väga palju on leitud ühiseid seaduspärasusi. Neid üldistatud seaduspärasusi proovitaksegi kompleksüsteemide vallas uurida. Näiteks rakusisesed protsessid, rakuenergeetika on modelleeritavad matemaatiliselt, ja kui oskame neid matemaatiliselt modelleerida, suudame raku lõhkumata selle tööd mõista. Nii nagu teeme seda koostöös akadeemik Valdur Saksaga. Omal ajal oli elusa uurimiseks kaks meetodit, *in vivo* ja *in vitro* ehk elusast peast ja katseklaasis, nüüd on lisaks ka *in silico* ehk ränis. See tähendab siis arvutites, mille töö tagavad räni baasil ehitatud osised.

Seda integreerumise juttu on räägitud aastakümneid. Mis siis nüüd muutunud on?

1960. aastatel ei tuntud enesesarnasust, kaost, fraktaleid. See on viimaste aegade tulemus. Alul oldi neist avastustest eufoorias, kuid aatomis toimib ikka kvantmehaanika. Ja rannajoone mõõtmisel liivaterast täpsemaks minna ei saa. Kaos on määratud süsteemi käitumine ebakorrapäraselt, kus on siiski olemas mingid reeglid, see ei ole päris juhuslik. Imelik küll, aga kaose kohta on olemas ka mõõdud.

Me ei tea kunagi, mida võivad teha väikesed muutused pika aja jooksul. See on kuulus Lorenzi näide, et liblika tiivalööök võib muuta ilmastikku ka üle ookeanide. Võibolla ka ühiskonnas on nõnda, et arusaamade ja mentaliteedi pisikesed muutused kuhjuvad, kuni ükskord oleme fakti ees, et asi on hulluks läinud. Pole ilmingimata vaja Suurt Sotsialistlikku Oktoobrirevolutsiooni.

On olemas ka keerukuse teooria. Selles püütakse välja peilida ülesanded, mida ei olegi võimalik kogu universumi ressursside rakendamisel lahendada.

Jah, terminiga "lahendamatud ülesanded" märgistatud probleeme on väga palju. Meie põhineme selle, et üksikute komponentide koosmõjus tekib uus kvaliteet, kas siis enesesarnasus, difusioonimustrid, üksiklained solitonid...

Nii et ilus helesinine unistus, et lõpuks saab inimkond tõe teada, ei reaalseeru.

Teadmised kasvavad jónksuhaaval, paradigma muutustega. Võib küsida, et kus on siin lagi? Teadmised kasvavad, kas saame nendega hakkama?

Mul on kogu aeg mõttes mõlkunud, et teeme igasuguseid asju, kõik areneb, läheb keerulisemaks, kultuurid pörkuvad, kliima muutub. Kuidas aga inimene selle kõigega hakkama saab?

See on videomaki paradoks. Tehnoloogia areneb, aga sellist video- või DVD-mängijat, mida oleks mugav kasutada, pole võimalik ehitada.

Mobiltelefonistki peab iga kord uuesti funktsioone üles otsima. Kiievi Küberneetika instituudis on tehtud lastetelefonid, millel on vaid kolm nuppu – isa, ema, kodu. See on kõik, mis vajalik väiksemale lapsele. Suured firmad aga on vastu, ei ole kasulik, on liiga odav.

Stephen Hawking on seda meelt, et inimesele järgneb evolutsiooni käigus masinimene, kes võtab meie koha üle ja areneb edasi.

Me avaldame siamaani Underi või Ristikivi kirjavahetust. Aga kust võtta tänaste tegelaste kirjavahetust? Nemad istuvad arvuti taga ja saadavad maile. Keegi pole suuteline neid koguma. Siin on üks väga oluline probleem – kogu salvestamine on elektroonne ja salvestatu saab lihtsalt kätte, kuid kuidas me seda alles hoiame, et mitmesaja aasta pärast oleks salvestatu ikka olemas? Või paneme viiekümne aasta pärast tekste kokku tükkidest nagu iidised käsikirjad? Ei ole vahendit, mis kindlustaks, et teave oleks kogu aeg saadaval..

Paber pole ju ka igavene.

Kuid siiani oleme hakkama saanud. Royal Society näiteks trükkis oma ajakirju väga kvaliteetsele paberile. Kestab siiani perfektelt. Elektroonilisi mälukandjaid peab ju kogu aeg ümber tegema. Olid viietollised, siis tulid väikesed disketid, seda aga ei saa enam igal pool sisse pista. Nüüd on CD. Kus kogu teavet uemate kandjate peale ümber võtta?

Infotulvaga on siiani siiski hakkama saadud. Kas ka edaspidi?

Ma ei julge piiri ennustada. Inimeste võimekus on üks asi. Inimene on ühiskondlik olevus ja üks inimene ei saa kõike teha. Võtmeküsimus on, kuidas oskame inimeste kogumeid kavalasti ära kasutada? Üks kogum on riik, mis vajab infrastruktuuri ja inimesi, kes seda ülal hoiavad. Nelja-viiemiljoniline kogum saab hakkama, väiksematel on hirmus hulk probleeme. Tavaliselt teeme oma probleemid väiksemaks ja lahendame need ära. Kuid oskus asju pärast tagasi tervikuks kokku panna puudub. Kui ka pilt kätte saadakse, on raam ikka puudu. Meil ei jätku inimesi, kes paneks tükkidest asjad kokku. Haritus tähendab, et meil oleks inimesi, kes suudavad asju tükkidest üles ehitada.

Kas Euroopa kartusel, et jäädakse innovaatsuse poolest maha Ameerikast ja Jaapanist, on alust?

Mingisugune alus selleks on. Noortel teadusnimestel on Euroopas raske leida töökohta. Parimad saavad muidugi. Euroopa teaduses arvatakse olevat puudu 700 000 inimest, et oma eesmärged täita. Hiina tudengeid läheb massiliselt USA-sse õppima. Siiani tahtsid sinna jääda. Nüüd aga lähevad Hiinasse tagasi. Neile pakutakse seal ideaalseid tingimusi. Euroopa skeemid on aga väikesed.

Hiina supikatel on hiigelsuur, seal on ehk võimalik head lobi ka ainult ühes nurgas keeta.

Nojah, eks seegi ole mittelineaarne nähtus.

SÜSTEEMNE LÄHENEMINE AITAB MÕISTA KA INIMESE SÜDANT

Eesti Päevaleht, 14. juuni 2007, Tiit Kändler



Marko Vendelin

Kui teil süda valutab, siis ei pruugi see olla mustast südametunnistusest. Vaid sellest, et teie südamelihase rakud ei saa suurema koormuse puhul piisavalt energiat. Kuidas aga need lihasrakud, mis ei tohi eales väsida ega puhata, toidetud saavad? Sellele küsimusele on teadlased püüdnud vastust leida juba alates peaaegu kahe aastatuhande taguse arsti Claudius Galenose aegadest.

Lahenduse pakkus uue mõtlemise, süsteemi-bioloogia tulek. Ja selle tuleku pioneeride seas on ka Eesti teadlasi.

Nende töö innovatiivsuse tõendusena pälvis Tallinna Tehnikaülikooli (TTÜ) teadlaste uurimisrühm hiljuti 17,2 miljoni kroonise toetuse maailma ühelt suuremalt heategevusfondilt Wellcome Trust. See on mõeldud viie aasta peale ja toetama Tallinna Tehnikaülikooli Küberneetika Instituudi vanemteaduri Marko Vendelini rühma uuringuid südamelihase energivahetuse uurimiseks.

Juba 2001. aastal kaitstud doktoritöös alustas praegune TTÜ Küberneetika Instituudi vanemteadur Marko Vendelin südamelihase mehaaniliste ja ainevahetusprotsesside vaheliste seoste matemaatilist modelleerimist. Tema töögrupi uuringute tulemused on tänaseks laiendanud oluliselt meie teadmisi südame töö kohta ning aidanud selgitada südamelihases toimuvaid protsesse.

"Teadaolevalt on see üks suuremaid toetussummasid, mis on *Wellcome Trusti* poolt Eestis antud valdkonnas Eesti teadlaste toetuseks eraldatud," Kinnitab TTÜ Küberneetika Instituudi teadussekretär Mati Kutser.

KUIDAS SÜDA TUksUB

"See on tõepoolest üks väga tähelepanuväärne sündmus, mis kroonib meie kolmekümneaastast tööd, millest üle kümne aasta on tehtud koos akadeemik Jüri Engelbrechti grupiga," kommenteerib akadeemik Valdur Saks. Tema sõnul märgiti ära tööd, mis on viinud uue teadusliku suuna loomisele. See suund on molekulaarne süsteemne bioenergeetika, süsteemibioloogia üks osa, mis on võimaldanud paremini aru saada ka näiteks südamelihase tööst.

Vendelin on uurinud südamelihaste tööd. Eesmärgiks oli leida side rakusiseste biokeemiliste protsesside ja südamelihase mehaanilise kokkutõmbumise vahel. Selgus, et südamelihase töö on esitatav lihtsa tagasisidemehhanismi abil. Raku

energiavabrikus mitokondris toodetud adenosiintrifosfaadi (ATF) kogus ja selle tarbimise suurus on tasakaalus. Vendelin arendas mudeli, millest selgus, kuidas reguleeritakse hingamist mitokondris ja sellega kaasnevalt ATF-I tootmist. On teada, et südame koormusest sõltub südamelihaste rakkude hingamise ulatus. Hapniku tarbimise ja südame koormuse vahel on aga lihtne lineaarne seos. Kuid seni pole veel lõplikult selge, millise signaali abil reguleeritakse hingamist. Vendelini ja ta kaastöötajate analüüsi tulemusena saab väita, et nähtust on võimalik seletada lihtsa tagasisidemehhanismi abil, kui arvestada eri molekulide liikumist ning interaktsiooni südamelihase rakus.

Edasise töö käigus tungisid Vendelin ja tema kolleegid Valdur Saks, kes töötab nii Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudis kui Grenoble'i Fourier' ülikoolis, Jacqueline Hoerter Paris-Sud'i ülikoolist, Holly Shiels ja Rikke Birkedal Manchesteri ülikoolist ja Enn Seppet Tartu ülikoolist sügavamale südame töö saladustesse. Neid huvitas, kuidas ikkagi energiat kandvad molekulid ATF ja adenosindifosfaat ADF raku organellide vahel liiguvad. Selgus, et nende difusioon on takistatud ning sõltub mitokondrite lähedusest. Töötati välja ka meetod, mille abil mitokondrite asetust rakkudes kirjeldada.

Kõik see on eluliselt oluline teave, mis aitab parendada südame ravi ja ennetada haigusi.

Marko Vendelini ja tema kolleegide edu on tulnud uue bioloogilise mõtlemise, süsteemibioloogia rakendamisest. Veel viis-kuus aastat tagasi võimutsesid bioloogiamaaailmas reduksionistid, kes süsteemse lähenemise tegelasi ironiseerisid: kui ei mõista, mis toimub, siis räägid süsteemist. Praegu on maailmas alanud süsteemibioloogia buum. "Süsteemibioloogia püüab realiseerida oma lubadusi, mõõtes ja kaardistades bioloogilisi vastasmõjusid rakkudes, kudedes, organites ja organite süsteemides ning ennustada, kuidas paljudest üksteist mõjutavatest komponentidest koosnevad süsteemid käituvad," määratleb Vendelin.

MATEMAATILINE SÜDA

Mehanoenergeetiline seostumine südamelihastes on olnud siiani mõistatuseks. Ja sellepärast, et ei uuritud asja süsteemselt. Akadeemik Valdur Saks, Marko Vendelin ja nende kolleegid on uurinud raku bioenergeetikat. Siin on kogu aeg võistelnud kaks koolkonda. Ühelt poolt reduksionistid, kes on saavutanud edu. Nemad räägivad, et peab eraldama mingi raku elemendi ja kirjeldama selle struktuuri. Seejärel järgmise. Kui me kõiki elemente teame, siis teamegi kogu tõe. Üksikuid elemente väga hästi tundes tunneme tervikut. Vendelin ja tema kolleegid aga arvavad, et tervik on suurem kui elementide kogum. Tekivad omavahelised seosed.

Pole veel küllaldane teada kõiki elemente. On vaja teada elementide integratsiooni.

Süsteemse bioloogia juttu on pajatatud vähemalt 30 aastat, kuid seda peeti ikka rohkem filosoofiliseks. Jutt oli, aga konkreetseid tegusid ei olnud. Ringe, kaste, kolmnurki seostega on joonistatud lõputu hulk. Nüüdseks on asi muutunud reaalseks.

Integreeritud süsteemide filosoofiat pooldas väga väike osa inimesi. Põhiliselt oldi reduktsionistid, kes ütlesid, et kõige tähtsam on teada, mis on geeni struktuur. Et peab raku lahti võtma, riiuli peale panema ja läbi uurima. Teadlaskonna kogu jõud läkski senini elementide struktuuri uurimisele. Pärast seda, kui Seattle's ja Uus-Meremaal loodi süsteemibioloogia instituudid ja ajakiri *Science* avaldas nelja aasta eest jaapanlase Hiroaki Kitano lühiülevaate süsteemibioloogiast, pöördusid kõik korraga süsteemsuse suunas. Ja läksid ühest laagrist teise laagrisse üle.

Nii et ei jää üle muud, kui oodata uusi süsteemseid tulemusi. Seda enam, et viimase uudisena otsustas TTÜ Küberneetika Instituudi nõukogu avada 1. augustil mehaanika ja rakendusmatemaatika osakonnas süsteemibioloogia labori Marko Vendelini juhtimisel.

"Kavas on leida, kuidas on südamelihase rakus takistatud molekulide ATF ja ADF liikumine," räägib Vendelin tulevikust. "Meie varasemad uuringud näitasid, et need molekulid ei liigu südamelihase rakus vabalt, vaid kohtavad ootamatuid takistusi. Kus täpselt ja milleks need takistused on, pole veel selge. Minu grandi peaesmärk on nendele küsimustele vastus leida." Saadud tulemused peaksid aitama mõista, kuidas rakusisesed takistused mõjutavad südamelihase tööd nii normaalses südames kui ka peale isheemiat.

TÖÖTAJAD
LÄBI
AASTATE



Need inimesed on töötanud Küberneetika Instituudi kaubamärgi all alates 1960. aastast.

Nimekirja koostamise aluseks on olnud peamiselt tööraamatute registreerimise raamatute andmed. Selle tulemusena ei pruugi nimekiri olla täielik.

Reeglina on näidatud esimese tööletuleku ja viimase lahkumise aasta, kuna esineb vaheaegu töötamisel (aspirantuur, sõjaväeteenistus, töötamine välismaal jms).

Kui nimekirjas on ainult üks aastaarv, siis on töötamise periood alla aasta.

Käesoleval ajal TTÜ Küberneetika Instituudis või AS Cybernetica's töötavate inimeste tööperioodi tähistatakse NIMI eesnimi tööletuleku aasta-

AABLOO Alvo 2000–2007
 AALJA Urmas 1984–1993
 AAMISEPP Virve 1985–1989
 AAN Helen 2002–2003
 AAN Mare 1981
 AAN Silva 1983–2006
 AARE Karl 1961–1965
 AARE Mart 1980
 AARE Ülo 1963–1967
 AARE (Jaanla) Maie 1962–1970
 AARIN Tõnu 1970
 AARMA Hannes 1969–1970
 AARNA Olav 1964–1966
 AARSOO Helle 1980–1982
 AAS Tõnu 1990–1992
 AASANURM Elfriede 1984
AASMÄE Marit 1984–
 AASVER Toomas 1978
 AAVIKSAAR Aavo 1973–1980
 ABEL Toivo 1977
 ABELS Artur 2005–2006
ABEN Hillar 1960–
 ABRAMS Peeter 1981–1982
 ADAMEIKO Svetlana 1965–1965
 ADAMSON Liidia 1984–1988
 ADAMSON Ille 1965–1992
 ADELBERT Alide 1983, 1988
 ADERMANN Riho 1987, 1989–1993
 ADLER Peeter 1985–1991
 AFANASJEVA Tatjana 1968
 AGURAIUJA Arvo 1962–1980
 AGURAIUJA (Püss) Reet 1965–1980
 AHVEN Arne 1984–1991
AINOLA Leo 1961–1971, 1997–
 AIT Riho 1974–1981
 AKKEL Peeter 1985–1992
 AKKERMANN Antonina 1973–1975
 AKSEL Kristo 1979
 AKTŠURIN Rostislav 1981–1991
 ALANGO Villem 1980–1981
 ALBA Evi 1965–1968
 ALBA Salme 1963–1970
 ALBER Urmas 1990
 ALBERT Alvar 2007–2008
 ALBRI Virve 1984–1986
 ALEKSEJEVA Liina 1973
 ALEKSEJEVA Vaike 1969–1974
 ALEMAA Maire 1977–1980
 ALJAS Ülo 1990–1992
 ALLA Anne 1962–1963
 ALLA Madis 1964–1980
 ALLAS Silvi 1993–1995
 ALLIK Kaarel 1980–1991
 ALLIK Vello 1960–1961
 ALLIKAS Arne 1961–1962
 ALLIKMAA Anne 1981–1982
 ALLIKSOO Ille 1975–1989
 ALLIKSOO Kristjan 2008–2009
 ALLIKIVI Andres 1991–1993
 ALMISTE Peeter 1991–1993
 ALUMÄE Nikolai 1960–1964,
 1977–1988,
ALUMÄE Tanel 2003–
ALUOJA Silver 2007–
 AMBROSEN Helgi 1975–1976
 AMBROSIUS Reet 1986–1991
 AMBROZEVITŠ Marina 1989–1992
 AMENBERG Aare 1983–1991
 AMER Tarmo 1987–1988
 ANDERSON Lembit 1991–1992
ANDRUSENKO Alexander 2008–
 ANIER Teet 1992–1994
 ANIMÄGI Tiit 1985–1990
 ANNSOO Vahur 1988
ANNUK Siim 2010–
 ANNUS Evi 1988–1990
 ANONEN Anatoli 1995–1996
 ANONEN Tatjana 1983–1988
ANSPER Arne 1990–
 ANTON Heino 1962
ANTON Johan 1993–
 ANTON Meelis 2003–2005
 APINIS Kalmer 2007
 APS Ülo 1973–1974
 ARAK Taivo 1981–1985
 ARAK Vello 1966

ARAKAS Ulvi 1978–1983
 ARENG Andres 1978
 ARET Larissa 1973–1979
 ARGUS Tõnis 1984
 ARISTE Andri 1976–1995
 ARISTE (Laani) Ülle 1976–1991
 ARONOVITŠ Adir 1972–1979
 AROSON Mariann 1975
 ARRO Anu 1990–1991
 ARRO Ilmar 1985–1991
 ARU Aino 1983
 ARU Eimar 1988–1994
 ARUKAEVU Hindrik 1972–1977
 ARULAANE Tõnu 1982–1992
 ARUMÄE Vello 1985–1990
 ARUMEEL Kari 1985–1989
 ARUNURM Hendrik 1985
 ARUS Erki 1988–1992
 ASSER Hele 1988–1992
 ASTANOVSKI Aleksander 1981–1993
 ASTANOVSKI Jevgeni 1993–1996
 ASTOK Villu 1977–1981
 ASTROV Igor 1985–1988
ASTROVA Irina 2008–
 ASU Harri 1969–1976
 AULE Udo 1975
 AUS Valentine 1985–1991
 AVER Priit 1974–1980
 AVIKSOO Kai 1984–1986
 BAIRAVTŠENKO Merike 1970–1970
 BALLOT Alfred 1974–1975
 BELIKOV Juri 2006
 BELOUSSOVA Jekaterina 2002–2009
 BERAUD Nathalie 2008–2009
BEREZOVSKI Arkadi 1988–
BEREZOVSKI Mihhail 2003–
 BERGSON Anne 1970–1981
 BIDENKO-TARANUHA Raissa 1973
BIRKEDAL NIELSEN Rikke 2009–
 BITTER Jaak 1967–1982
 BOBROVSKI Viktor 1985–1985
BOGDANOV Dan 2007–
 BOGDANOV Oleg 1999
 BOGDANOVA Natalja 1982
 BOLDINA Valentina 1971–1980
 BOODE Sirje 1990–1997
 BORMEISTER Marju 1969–1972
 BORONA Pavlina 1989–1991
 BOROVIKOVA Inna 1987–1992
 BOŽITS Inna 1985–1986
 BRAND Rita 1977–1981
 BRANDT (Kaselaan) Ene 1978–1991
BRANOVETS Jelena 2009–
 BRATSKE Erik 1997
 BRAUN Iigar 1960–1964
BRAUNBRÜCK Andres 1997–
 BRENERS Jakob 1987–1988
 BROSMAN Edvard 1970–1978
 BRUDKO Olga 1982
 BRÜGEL Jüri 1978–1985
 BUBNOV Anatoli 1993–1996
 BUBNOVA Galina 1993–1996
 BUDARIN Vladimir 1966–1969
 BUIVOLOV Aleksander 1985–1992
 BULDAKOV Oleg 1987–1992
BULDAS Ahto 1997–
 BUNEVA Mall 1985–1991
CAPOBIANKO Silvio 2008–
 CASAGRANDE Daniele 2006
CHAPMAN James 2009–
 CHECHKIN Oleksii 2008
 DALETSKAJA Tatjana 1988
 DANIEL Milvi 1989–1990
 DANIEL Raul 1985–1991
 DANILOV Vladimir 1978
 DANILSON Otto 1978–1980
 DAVTJAN Hatšatur 1990
DELPECHE Nicole 2008–
DERIBASKO Juri 1995–
DIDENKULOVA Irina 2006–
 DJOMKINA Sofia 1978–1979
 DOBÖTŠIN Vassili 1986–1999
 DOLPHIN Tony 2008–2009
 DORODNEV Valeri 1974–1978
 DORONITŠEV Valeri 1978–1984
DOROŽKIN Nikolai 1998–

DUDARENKO Evi 1969–1976
 DUNAJEVA Natalija 1973–1986
DZJUMENKO Andrei 1989–
 EBRUK Adolf 1990–1991
 EBRUK Urmas 1986–1991
 EDRO Martin 1974–1976
 EEK Arvo 1993–2007
 EEK Tõnu 1969–1970
 EELMA Jüri 1963
 EENLO Ott 1987–1992
 EENMA Jaan-Martin 1978–1980
 EENMAA (Telliskivi) Ullamari
 1988–1997
 EHATAMM Margus 1987–1990
 EHIN Helja 1978–1994
 EHIN Ivar 1987–1988
 EHVERT Sirje 1976
 EHVERT Urmas 1981–1993
 EINASTO Liia 1970–1989
 EINAMA Eva-Johanna 1999–2002
EINBERG Riina 2009–
EINBERG Heiki 2007–
 EISEN Malle 1973–1980
 ELBRE Meelis 1996
 ELJAS Helle 1965–1966
 ELLANDI Enn 1978–1981
 ELLER Arvo 1969–1992
 ELLER Gerli 1993–1997
 ELLER Maie 1992–1993, 1998–1999
 ELLER Vahur 1985–1985
 EL-ZAWAWY Mohamed 2008–2010
 EMME Mart 1961–1962
 END Helle 1980–1984
ENGELBRECHT Jüri 1969–
ENGELBRECHT (Povar) Kaja
 1974–1980
 ENNET Peeter 1998–1990
 ENNI Viivi 1970–1980
 ENOK Alma 1964
 EOMOIS Peep 1979–1989
 EPPENDAHL Adam 2004–2005
 ERIN Asta 1961–1968
 ERM Heiki 1971–1992
 ERM Jüri 1979–1983
 ERM Pille 1984–1990
 ERMAS Ervin 1996–2000
 ERNITS Juhan-Peeter 1997–2008
ERRAPART Andrei 1999–
 ESE Urve 1966–1967
 ESNAR Avo 1968–1669
 ESTORN Silvi 1974–1992
 ETVERK Toomas 1968–1973
 EVARDT Ene 1967–1980
 FATAHHOV Timur 1983–1991
 FAZÕLOVA Rimma 1991–1992
 FEDJUKOVICH Grigory 2009
 FEDOROVA Irina 1996–1997
 FEDOTOV Sergei 1988–1991
 FELDBACH (Rauman) Hugo
 1961–1962
 FELDMANN Mati 1984–1991
 FELDT Udo 1979–1992
 FELDT Velve 1988–1989
 FEODOROVA Darja 1972–1974
 FILATOVA Veera 1979–1981
 FILIPPOVA Edibä 1966–1992
 FILIPPOVA Helina 1988
 FIRONOVA Margarita 1988
 FISCHER Andreas 2009
 FJODOROVA Zoja 1977
 FLAIM Bryna 2009
 FLOCHOVA Jana 2006
 FOGEL Jevgeni 1987
 FREIBERG Asta-Ellen 1987–1999
 FREIBERG Jüri 1971–1992
 FREIMUTH Evald 1987–1990
FREUDENTHAL Margus 2000–
 FRIDMAN Ljudmilla 1986–1992
 FRIDMAN Mihhail 1977–1981
 FRIEDENTHAL Jaan 1976–1983
 FUREJEVA Jelena 1976–1979
 FURIK Valentina 1989–1995
 GALALANOV Nikolai 1987
 GEDE Tarmo 1986–1989
 GELB Aleksander 1960–1964,
 1970–1991

GELB Arkadi 1978, 1980, 1982–1983
 GELB Daisi 1974–1993
 GERM Eduard 1964–1992
 GETSMAN Tatjana 1977–1979
 GILDEMANN (Kisant) Evi 1977–1984
 GILDEN (Pirnipuu) Tiina 1986–1993
 GILTS Boris 1977–1992
 GLADIN Marek-Rein 1983–1984
 GOLOVIN Vladimir 1982–1991
GOLOVTŠENKO Mihhail 1995–
 GOLUB Galina 1965–1974
 GOLUBINSKAJA Žanna 1979–1981
GONZALES Madeline 2010–
 GOOR Heili-Astrid 1989–1990
 GORBOVSKI Paul 1966–1967
GRAFOV Oleg 1996–
GRATŠEV Vladimir 1998–
 GREIM Andres 1981–1982
 GRETŠIŠKIN Aleksei 1989
 GRIGORENKO Olga 1972
GRIGORENKO Pavel 2005–
 GRIGORENKO Valeri 1987–1995
 GRIGORJEVA Maria 1978–1979
 GRIIN Rein 1964–1968
 GRIM Andres 1981–1982
 GROMOV Lauri 1987–1988
 GROSSBERG Peeter 1979–1980
 GROSSFÜRST Ivo 1991
 GROSSSMIDT Gunnar 2004–2005
 GUREVITS Jefim 1963–1965
 GUSSEV Vladislav 1990–1992
 GUTEL (Sokolovskaja) Irina
 1979–1991
 HAAK Heldur 1980–1994
 HAAMER Andres 1967–1980
 HAAS Esko 2001–2003
HAAV Hele-Mai 1980–
 HAAVANDI Helin 1985–1988
 HAAVEL Ingrid 1983–1985
HAAVEL Rein 1968–1979, 1981–1992,
 1998–
 HAAVEL Tõnis 1989–1992
 HABICHT Aigi 1986–1989
 HABICHT Anne 1989–1991
 HAGA Mati 1973–1980
HALLEN Karin 1999–
 HALJAS Manivald 1976–1979
HALLIK Ville 1997–
 HALLIKAS Ene 1978–1980
 HANKO (Laufer) Pia 1960–1966
 HANNI Aili-Malle 1971–1973
 HANNUS Olev 1979–1991
 HANNUS (Käppa) Virve 1977–1986
 HANSEN Erich 1985–1994
 HANSON Inda 1993–1997
 HANSON Vello 1966–
 HANTSOM Taissia 2002
HARF Mait 1977–
 HARUTJUNJAN Avetis 2007–2008
HASTŠINSKI Vjatšeslav 2001–
 HAUG Uudo 1979–1991
HEERO Kristo 2001–
HEIBERG Sven 1999–
 HEIDELBERG Mait 1979–1981
 HEIDELBERG Mihkel 2009
 HEIN Tiina 1991–1992
 HEIN Agnes 1977–1979
 HEIN Tiit 1979–1981
 HEINAP Helgi 1983–1989
 HEINLA Ahti 1989–1990
 HEINLA Leo 1960, 1963–1991
 HEINLA Ülle 1980–1993, 1997–2006
 HEINLAHT Mare 1979–1993
 HEINMAA Irja 1985–1991
 HEINMAA Ivo 1977–1980
 HEINMAA Jüri 1979–1983
 HELDNA Irene 1972–1974
 HELM Lisetta-Maria 1975–1988
 HENDLA Haldur 1979–1988
 HERBST Regina 1973–1980
 HERMANN Erki 2005–2008
HERRMANN Heiko 2006–
 HERZMANN Valdo 1981
 HIIESALU Hannes 1985
 HIIS Marju 1981–1989
 HINTO Oskar 1983–1991

HION Juhan 1996
 HIRSCHON Eha 1968–1981
 HIRVESOO Aili 1988–1989
 HODÕREV Anatoli 1993–2000
 HODÕREVA Antonina 1993–2000
 HOLMBERG Eda 1987–1989
 HOLSTING Kaio 1979
 HOOLMA Mare 1966–1989
 HUBERG Mati 1988–1991
 HUNT (Saartsen) Malle 1980–1987
 HURT Eino 1972–1980
 HURT Taivo 1968–1984
 HUUM Riina 1980–1991
 HÄMARIK Uno 1977
 HÄRM Härmo 2005–
 HÄRMAORG Toivo 1985–199
 HÄRMASOO Konstantin 1978
 HÄRMASTE Kristi 1960–1964
 HÖŠENKOV Aleksander 1984–1992
 HÜÜS Eva 1985–1992
 IDNURM Ida 1962–1965
 IDNURM Siim 1970–1991
 IGNATJEVA Marju 2009–
 IGUMNOVA Natalija 1974–1978
 ILISON Lauri 2002–
 ILISON Olari 1997–
 ILJIN (Vatter) Erika 1980–1983,
 1988–1992
 ILLASTE Ardo 2006–
 ILVES Ellen 1980–1984
 ILVES Natalija 1999–2000
 ILVEST Valdur 1976–1991
 INDERMITTE Ain 1988
 INDLA Ann 1970
 INKINEN Eha 1975–1989
 IRA Anti 1975–1988
 IRD Vahur 1993
 ISOTAMM Raul 2005–2009
 ISRAFILOVA (Baškova) Svetlana
 1982–1987
 ITSKOVITŠ Margarita 1977–1983
 IVANOVA Tatjana 1974–1986
 IVASK Küllike 1980–1984
 JAAKSON Andres 1965
 JAAKSOO Kermo 1985–1988
 JAAKSOO Ülo 1961–
 JAANIMÄGI Vladimir 1975–1990
 JAEGER Jaanus 2006–
 JAGODIN Andrei 1998
 JAGOMANN Urmas 1978–1979
 JAGOMÄGIS Roman 2008–
 JAGONOV Leida 1981–1982
 JAIK Jüri 1991–1997
 JAKIMAINEN Aune 1973
 JAKOBSON Gabriel 1976–1980
 JAKOVLEVA Tamara 1978–
 JAKSEN Lii 1970–1986
 JAKUBIAK Janusz 2008
 JAKUŠEV Sergei 1985
 JALAKAS Piret 1986–1988
 JALAKAS Riina 1984–1990
 JAMŠTIKOVA Ludmilla 1963–1967
 JANKEVITŠ Veera 1983–1985
 JANKOVENKO Zinaida 1981
 JANNO Jaan 1987–
 JANSON Madis 2000–
 JATRUŠEVA Lilian 1975–1977
 JAUK Kristi 1985–1986
 JEFREMOVA Inga 1979–1988
 JEGORUŠKIN Sergei 1978–1993,
 2003–
 JELINKIN Viida 1993–2001
 JELIZAROV Valeri 1986
 JELLE Kaido 1988–1992
 JENK Asta 1962–1966
 JEPHIIHINA Natalija 2009–
 JEROŠKOVA Vera 1991–1995
 JOA Kersti 1980–1981
 JOALA Vahur 1980–1993
 JOAMETS Enn 1970–1984
 JOAMETS Heli 1970–1990
 JOANDI Elmer 1998
 JOHANNES Uno 1969–1972
 JOON Enno 1978–1980
 JOONASE Maimo 1999–
 JOONSON Siiri 1978–1979

JOSEPSON Jüri 1974–1995
 JOSEPSON (Sonk) Aili 1974–1983
 JOSSIFOVA (Tsvikunova) Maria
 1972–1995
 JUUS Hannes 1991–1993
 JULEGIN Aleksander 1995–1997
 JULEGIN Jüri 1988–1994
 JURKIN Raul 1999–2003
JUSKE Kristi 2008–
 JUSS Mall 1976–1980
 JUSS Mathilde 1976–1982
 JUURIK Silver 2009
 JÕELEHT Elle 1999–2004
 JÕELEHT Hillar 1986–1987
 JÕELEHT Koit 1986
 JÕESAAR Hilja 1976–1991
 JÕESAAR Jana 1985
 JÕESALU Aivo 1985
 JÕEVEER Anne 1970–1982
 JÕGEVEST Üllar 1977–1992
 JÕGI Aare 1976–1982
 JÕGI Aet 1976–1992
 JÕGI Erik 1990–1992
 JÕGI Mihhail 1971–1982
 JÕGIOJA Mart 1977
 JÄGEL Arvo 1989–1992
 JÄNES Kadri 1988–1989
 JÄRG Andrus 1994–1998
 JÄRVE Lemmi 1983–1985
 JÄRVE Rita 2008–2009
 JÄRVE Tõnu 1977–1978
 JÄRVELA Marju 1969
 JÄRVES Ida 1978–1979
 JÄRVET Jüri 1979–1980
JÜRGENSON Aivo 2010–
 JÜRVIKSTE Erik 1981–1992
 KAAR Ene-Kaja 1968–1976
 KAAR Aare 1984–1985
 KAAR Hans 1971–1974
 KAAR Mati 1991–1993
 KAARET Enn 1970–1991
 KAARLEP Hille 1962–1965
 KAAROJA Mare 1978–1991
 KABAKENE Ljubov 1983–1986
 KABER Anna-Mirjam 1976–1992
 KABER Peeter 1985–1988
 KADAKAS Tarmo 1981–1983
 KADAKAS Vahur 1980–1987
 KADARIK Aive 1993–1997
 KADARPIK Toomas 1990–1992
 KADARPIK Vello 2005
 KADU Heiki 1993–1995
 KAGANOVITS Mihhail 1976–1989
 KAHAR Urmas 1989–1990
 KAHRO Arvi 1984–1991
 KAHRO Milvi 1976–1991
 KAHRU Anne 1978–1980
 KAIL Senja 1976–1985
 KAISEL Ülo 1963–1967
 KAIIV Jüri 1987
 KAJARI Jüri 1964–1988
 KALBUS Liina 1968–1969
 KALBUS Kaida 1972
 KALD Helgi 1965–1966, 1971–1972
 KALDA Harro 1982–1992
KALDA Jaan 1990–
KALDA Mari 2005–
 KALDLAUR Maidu 1979–1992
 KALDMA Aavo 1985–1992
 KALDMA Henn 1972–1977
 KALDMA Sirje 1969–1970
 KALDMA Tarmo 1989–1992
 KALDMAA Agnes 1983–1993
 KALDMAA Rita 1979–1980
KALJA Ahto 1977–
 KALJAKIN (Loov) Ruth 1982–1985
 KALLAS Ollar 1972–1992
 KALLAS Rain 1984
 KALLAS Viljo 1979
 KALLASTE Tiia 1968–1969
 KALLIKIVI Peeter 1992–1993
 KALLION Norma 1971–1994
 KALMA Ivar 1980–1981
 KALME Toomas 1983–1991
 KALMURAND Eve 1984
 KALMUS Hilda 1982

KAMENIK Valdeko 1984–1986
KANN Eve 1993–
 KANAVAL Tiit 1991–1992
 KANGRO Andrus 1992–1994
 KANGRO (Parts) Inga 2003–
 KANGRO Melanie 1986–1988
 KANGRO Raul 1988–1991
 KANGRO Urve 1988–1991
 KANGUR Galina 1980–1991
 KANGUR Paavo 1975–1977
 KANGUR Ülo 1968–1969
 KANN Urmas 1979–1980
KANNEL Martin 2007–
 KANTER Külli 1985–1992
 KANTER (Klementi) Anne 1988–1993
KAPARIN Vadim 2007–
 KAPLAN Simon 1967–1968
 KAPP Urmo 1980–1982
 KAPPET Ilmar 1996–1997
 KAPSTA Aivar 1984
KAPSTA Tiina 1982–
 KAPSTA Vello 1988–1990
 KARDAŠEVA Natalia 1976–1979
 KAREL Tõnis 1984–1985
 KARM Reet 1989–1993
 KARO Jaanus 2000–2008
 KAROLIN Malle 1965–1991
 KARPENKO Ruslan 1968–1969
 KARPENKO Tatjana 1968–1969
 KARPOV Vassili 1977–1980
 KARPOVA Nadežda 1977–1980
 KARRO Ülo 1978–1979
KARTAU Katri 2009–
 KARTAU Madis 1977–1985
 KARTAU Olev 1989–1992
 KARTAU (Männa) Marika 1982–1991
 KARTAU (Koit) Tiia 1965–1980
KARTOFELEV Dmitri 2008–
 KARU Eeva 1976–1991
 KARU Ivar 1979–1981
 KARU Tõnu 1970–1980
 KARULA Zoja 1977
 KARUS Siim 2006–2010
 KASE Anna 1977–1980
 KASE Jaanus 1999–2000
 KASEMAA Raivo 1981–1992
KASK Andres 2009–
 KASK Ebe 1970–1972
 KASK Eeri 1987–1988
 KASK Heiki 1987–1992
 KASK Heljula 1971–1989
 KASK Kalev 1986–1988
 KASK Peet 1975–1980
 KAST Vilma 1972–1979
 KASK Toomas 1997–2003
 KASVAND Marika 2003–2005
 KAUGE Reet 1990–1994
 KAUK Jaan 1972–1973
 KAUKVER Andres 1980–1993
 KAUN (Maksimovski) Elle 1965–1982
 KAUPAL Arvi 1980
 Kaur Marit 1971–1980
 KAZAKOV Sergei 1984–1992
 KEELMANN Edna 1985–1992
 KEERD Tatjana 1969–1970
 KEERT Inge 1978–1989
 KEIS Igor 1965–1992
 KELAM Ume 1984–1990
 KELK Malle 1965–1968
 KELL Kaja 1974–1975
 KELL Kalle-Jüri 1982–1993
 KELL Ülari 1963–1964
 KELL (Eelmäe) Kaia 1984–199
 KELLO Krista 1971–1977
 KELMAN Evald 1982, 1987
 KELPŠAITE Loreta 2007–2009
 KEMPO Vello 1979–1991
 KENS Ilme 1978–1979
 KERBO Meelis 2002–2004
 KERNU Urmas 1983–1992
 KERNUMEES Merle-Helju 1969–1970
 KESKKÜLA Kai 1965
 KESKÜLA Liina 1986–1991
 KESS Alar 1988–1989

KESVATERA Tõnu 1975–1980
 KESVATERA (Vennikas) Kersti
 1973–1980
 KEVVAI Kaido 1984–1992
 KIIK Urmas 1982–1987
 KIIK Vaike 1975–1976
 KIIL Argo 1989–1992
 KIIL Heinrich-Helmut 1980–1992
 KIIREND (Parts) Ene 1962–1980
 KIISK Toivo 1980–1982
 KIISK Toomas 1998–2002
 KIISKI Jelena 1985
 KIISLER Kiira 1989–1991
 KIISLER Siim-Valmar 1988
 KIISON Hiie 1968–1970
 KIIVER Ingrid 1983–1991
 KILGAS (Toom) Õie 1966–1982
 KILGAS Vilma 1960–1974
 KIMBER Veera 1980
KINDEL Kristiina 1997–
 KINGSEPP (Nevvonen) Irja
 1973–1978
 KINGU Malle 1979
 KINK Lembi 1986–1987
KIPPER Rein 2001–
 KIPPER Tiiu 1969
 KIRME Tiina 1977–1978
 KIRS Marika 1980–1985
 KIRT Toomas 2006–2009
 KISS Juta 1976–1992
 KITER Leili 1966
KITT Robert 2002–
 KIVI Luule 1976–1981
 KIVIKAS Arvo 1984–1989
 KIVILO Edgar 1993–1999
 KIVINUK Lilli 1983
 KIVIRAND Ülo 1975–1989
 KIVISALU Ilme 1960–1966
 KIVISTIK Anne 1962–1968
 KIVISTO Aare 1976–1987
 KLAAR Peeter 1962–1963
 KLAAS Piret 1989–1990
 KLAASSEN (Gildemann) Ene
 1977–1978
 KLAUSEN Tea 1961–1963
 KLEMENT Eve 1984–1992
 KLEMENTI Toomas 1986–1989
 KLEPATŠ Galina 1986
 KLOCH Krista 1987–1988
 KLÖTŠKOV Andrei 1989–1996
 KOGAN Larissa 1972–1973
 KOGER Enn 1975–1977
 KOHALOO Levi 1963
 KOHLA Mati 1997
 KOHV Evi 1986–1997
 KOHV Henno 1985–1991
 KOIK Grete 2002–2006
 KOIT Ülle 1970–1972
 KOKK Aino 1960–1961
 KOKK Urmas 1982–1983
 KOKLA Tõnu 1997–2000
 KOLLIN Emilie 1988–1990
 KOLLO Ants 1973–1980
 KOLLOM Kairi 1985
 KONGA Sirje 1977
 KONGAS Olav 1993–2004
 KONGI (Martinson) Eve 1983–1992
 KONI Kersti-Kai 1997–1998
 KONJUHHOV Peeter 1984–1993
 KONT Toomas 1979–1980
 KONTOR Ülo 1979–1993
 KOOK Helgi 1982–1983
 KOOK Karin 1978–1981
 KOOSL Raul 2001–2003
 KOOSKORA Helgi 1973–1980
 KOOST Emma 1974–1979
 KOOV Merike 1979–1993
 KOOVIT (Raiend) Tiiu 1969–1990
 KOPATŠEVA Valentina 1985
 KOPELMA Tiia 1981–1994
 KOPLE Heli 1998–2010
 KOPLIMAA Tõnu 1976–1977
 KOPLIMAA Tiia 1974–1976
 KOPPEL Albert 1976–1978

KOPPEL Jüri 1978–1980
 KOPPEL Rein 1998–2001
 KORDOVA (Jossifova, Gretšiskina) Tatjana 1964–1999
 KORITSKAJA Tamara 1970–1971
 KORJUS Triin 2007–2009
 KORNEL Andres 1990
 KORROVITS Tarvo 1983–1984
 KORSANOV Aleksei 1986–1993
 KOSE Gunnar 1968–1977
KOSINSKAJA Jelena 1999–
 KOSKEL Peeter 1972–1979
 KOSMATŠOV Valeri 1977–1993
KOSMATŠOVA (Gorjunova) Tatjana 1979–
 KOSS Renne 1971–1973
 KOTILEVITŠ Ludmilla 1962–1963
KOTKAS Vahur 1999–
 KOTLI Malle 1960–1966
 KOTOVA Niina 1981
KOTTA Ülle 1970–
KOTTA Palle 1998–
 KOTTER Avo 1990–2005
 KOVROV Jüri 1981
 KOVROV Vladimir 1976–1980
 KOŽEVIN Gennadi 1973–1974
 KOŽEVNIKOV Valeri 1982–1993
 KRAAM Heiki 1983–1991
 KRAAV Ervin 1976–1978
 KRAPIVIN Aadu 1979–1982
KREE Mihkel 2005–
 KRIIS Tarmo 1981–1984
 KRIISA Aavo 1973–1975
 KRIISKA Katrin 1972–1979
 KRIST Alari 1978
 KRISTAL Jüri 1974–1976
 KRISTJUHAN Riho 1964–1968
 KRISTJUHAN (Kudeviita) Kai 1976–1991
 KRJUKOVSKAJA (Truškova) Natalja 1978–1983
 KROON Andrus 1989–1990
 KRUMM Andres 1983–1984
 KRUTOB Viktor 1991
 KRUIK Ene 1978–1979
 KRUIUS Aivar 1984–1991
 KRUIUS Andri 1995–1997
 KRUIUS Sven 1978–1990
 KRUIUS (Kriit) Krista 1964–1968
 KRUIUSER Rein 1974–1976
 KRUIUSMAA Jüri 1978–1979
 KRUIUSMAA Siim 1985–1992
 KRUIUSMANN (Parnabas) Mall 1971–1983
 KUBLINA Militša 1976–1981, 1986
 KUHI Kristjan 2000–2003
KUIV Sulev 1984–
 KUKEMILK Vello 1974–1977
 KUKK Illar 1985–1991
 KUKK Eve 1990–1992
 KUKK Kersti 1969–1974
 KUKK Leida 1985–1991
 KUKK Martti 1999–2002
 KUKK Vahur 1970–1971
 KUKKE Endel 1966
 KUKS Jaak 1965–1983
 KUKS Kärt 1969–1993
 KUKS Kirke 1984–1985
 KULDERKNUP Helja 1977–1995
 KULIGINA Tatjana 1979–1990
 KULL Andres 1983–1984
 KULLERKUPP Enn 1975–1982
KULMAN Rafael 1997–
 KULOV Aleksander 1984
 KUNDLA Enn 1964–1980
 KUNDRÄ Lya 1977–1978
 KURAJEVA Lidia 1994–1996
 KURENNOY Dmitry 2008–2009
 KURJAMA Arne 1978–1990
 KURM Karl 1981
 KURREL Ülo 1971–1982
 KUSLAPUU Jüri 1980–1991
KUSTAVUS Paul 2008–
KUTŠER Mati 1966–
 KUTŠERAVLJUK Raissa 2002–2003
 KUTŠINSKAJA Lilja 2000–2005

KUTTI Eerik 1977, 1979–1991
 KUUBEN Rein 1964–1967
 KUUS Jaan 1976–1992
 KUUSIK Alar 1990–1992
 KUUSIK Argo 1993–1995
KUUSIK Jüri 2009–
 KUUSIK Priit 1983
 KUUSIK Vello 1961–1988
 KUUSIK (Laane) Luule 1963–1989
 KUUSIKU Iloona 1971–1979
 KUUSK Valdek 1979–1980
 KUZMINA Jelena 1980–1981
 KUZNETSOV Dmitri 1984–1992
 KÕBU Aime 1979–1983
 KÕIV Enn 1968–1970
 KÕIV Erki 1990–1993
 KÕLAMETS Anu 1981
 KÖNNUSAAR Milvi 1983–1986
 KÖPP Mari 1983–1992
 KÖRSMAA Kaido 1984–1985
 KÖVASK Erast 1974–1976
 KÄNDLER Tiit 1972–1980
 KÄRNER Andrei 1991–1992
 KÄRNER Külli 1971–1989
 KÄRSNA Kaia 1979–1994
 KÄÄP Jaak 1987–1989
 KÄÄR Andres 1975–1991
 KÄÄRAMEES Kalev 1970–1993
 KÄÄRAMEES Marko 1993–2004
 KÄÄRMANN Marju 1980–1992
 KÄÄRMANN (Talts) Lembe
 1969–1991
 KÄGU Kalle 1980
 KÄGU Väino 1980–1992
 KÄHRIK Ülo 1972–1979
 KÖSTNER Ott 1985–1990
 KÜBAR Hilja 1991–1992
 KÜLA Raivo 1982
 KÜLV Hillar 1984–1985
 KÜLV Margo 1989
 KÜNAMÄGI Heli 1981–1982
 KÜNAMÄGI Olaf 1979–1991
 KÜNGAS Peep 1997–2002
 KÜNNAP Eugen 1960–1992
 KÜNNAP Olev 1969–1982
 KÜNNAPUU Edgar 1961–1968
 KÜTT Ivar 1989–1992
 KÜTT Tarmo 1986–1987
 KÜTTIS Viivi 1977–1991
 KÜÜTS Peeter 1970
 LAAGUS Heiki 1960–1962
 LAANE Andres 1985
 LAANE Kalle 1988–1992
 LAANEKÜTT Lembit 1991–1992
 LAANISTE Lembit 1975–1991
LAANSOO Raul 2007–
 LAASALU Jaan 1987–1992
 LAASBERG Juta 1979–1980
 LAASBERG Tiit 1977–1980
LAASMA Tiina 2008–
LAASMAA Martin 2008–
 LAASMÄE Raul 1989–1990
 LAHE Andres 1968–1975
 LAHT Aare 1971–1980
 LAHT Liivi 1977–1978
 LAHT (Sarapuu) Tiiu-Maie 1972–1980
 LAID Eerik 1983
 LAID Sulev 1983–1990
 LAID Vilma 1986–1990
 LAIGNA Maimu 1983–1990
 LAIGO Rein 1990–1991
 LAINEMÄE Aivar 1990
 LAISAAR Salme 1963–1972
 LAKSPERE Enn 1988–1995
 LAMP Eleri 2002–2003
 LAMP Ille 1972–1994
 LAMSTER Peeter 1970–1990
 LANG Indrek 1985–1992
 LANKOTS Jüri 1981–1992
 LANTIN Johanna 1982–1984
 LANTS Ülo 1979–1982
 LANTSMAN Aleksander 1977–1980
 LAPIMAA Triin 2004–2007
 LASN Jürgen 1999–2004
 LASSMANN (Mikalai) Katrin
 1985–1991

LAUBA Kai-Maarja 1971–1981,
 1990–1993
LAUD Peeter 1998–
 LAUK Rein 1964
LAUR Märt 2000–
 LAURING Sirje 1970–1971
 LAURINGSON Arne 1961–1976
 LAUS Merle 1968–1971
 LAUSEN Arnold 1984–1986
 LAUTON Merle 1980–1983
 LEE Külliki 1979–1997
 LEEDJÄRV Jaan 1971
 LEEDJÄRV Mare 1972–1973
 LEEDJÄRV (Koemets) Sirje
 1973–1974
 LEEMET Paul 1986
 LEER Veronika 1987–1988
 LEESMENT Jüri 1972–1973
 LEHT (Nukk) Krista 1970–1976
 LEHT Raivo 1977
 LEIBAK Alar 1993–1998
 LEIBUR (Rebane) Epp 1977–1991
 LEIGER Tõnu 1983
 LEINI Kari 1990
 LEINI Vladimir 1977–1991
 LEIS Leho 1990–1992
 LEITAM Rein 1979–1980
 LEITEN Zinaida 1985
 LELUMEEES Enno 1962–1992
 LEMBA Maris 1997–2007
 LEMBERG August 1987–1989
 LEMBIT Allan 1985
 LEMBIT Tamara 1979–1993
 LEMBIT Tõnu 1983–1992
 LEOSTE Hillar 1998–2000
 LEOVER Viktor 1961–1962
 LEPIK Andres 1978–1992
 LEPIK (Sarkovski) Esta 1980–1992
LEPMETS Marion 2009–
LEPP Alar 1986–
LEPP Johanna 2009–
 LEPP Jüri 2001–2005
 LEPP Olga 1973–1975
 LEPP Raido 2005–2006
 LEPP Riho 1970–2008
 LEPP Tiiu 1991
 LEPPIK (Kask) Imbi 1965–1994
 LEPPIK Kalju 1960–1992
 LEPPIKSON Viktor 1968–1969
 LEPPSALU Tiiu 1980–1992
 LEVIN Moïše 1960–1964
 LI Valentin 1985
 LIBE Helda 1969–1990
LIBLIK Kerli 2008–
 LICHFELD Jüri 1966
 LIDERS Einike 1968–1973
 LIIAS (Mägi) Mari 1972–1982
 LIIDERS Maris 1978–1980
 LIIK Tiina 1990–1992
 LIIN Lukreetsia 1966–1969
 LIIV Reet 1969–1976
 LIIVA Rein 1974–1975
 LIIVA Taivo 1963–1964
 LIIVAK Heino 1982–1992
 LIIVAK Jüri 1968–1975
 LIIVAK Peeter 1992–1993
 LIIVAMÄGI Ülo 1984–1991
 LIIVAT Margus 1981–1981
 LIIVIK Tõnu 1960–1964
 LILLEPUU Kirsten 1985
 LIND Heino 1978–2005
 LIND Terje 1980–1981, 1983–1985
 LIND Vello 1978
 LINDEBERG Valve 1979–1990
 LINDPERE (Eller) Riina 1972–1982
 LINDRE Milda 1988–1989
 LINDVERE Kalle 1970–1982
 LINDVERE (Pints) Leida 1967–1984
 LING Malle 1980
 LINHOLM Terje 1992–1993
 LINKGREIM Reet 1980–1982,
 1987–1995
 LINNAS Eerik 1964–1967
 LINNAS Mare 1963–1967
 LINNTAMM Ralf-Raimo 1992
 LINROOS Eeri 1977–1979

LIPMAA Helger 1997–
 LIPPING Tarmo 1990–1993
 LIPPMAA Endel 1961–1980
LIPPUS Jüri 1987–
 LISSOBOI Gennadi 1985–1988
 LISTAK Madis 1988–1990
 LITTOVER Mati 1968–2002
 LIVENSON Ilja 2008–2009
 LIVŠITŠ Larissa 1970–1977
 LOBJAKAS Hillar 1963–1970
 LOGUSSOV Boris 1981–1991
 LOGVINENKO Svetlana 1987–1990
LOEMAA Roman 2001–
LOHUARU Tõnu 1976–1992, 2005–
 LOKK Mari 1988–1991
 LOMP Mall 1975
 LOMP Andres 1977–1991
 LOMP (Telgmaa) Marika 1979–1992
 LOMUNOV Viktor 1976–1993
 LOOGMA Krista 1975–1976
 LOOMETTS Raul 1974–1975
 LOORPÄRG Ago 1981–1991
 LOOSAAR Jaan 1981–1991
 LORENTS Peeter 1974–1992
 LORENTS (Tuisk) Tiina 1970–1971
 LOSSEVA Maria 1981–1985
 LOTMAN Mihail 1987–1990
 LOŽKIN Viktor 1976–1979
 LUBI Heiki 1960–1961
 LUBI Tanel-Lauri 1999–2001
 LUDRI Rein 1965–1967
 LUDVIG Juta 1981–1986
 LUDVIG Leelo 1982–1983
 LUIDE Jaak 1984
 LUIGA Peeter 1960–1980
 LUIK Mihkel 1982
 LUIK Piret 1984–1994
 LUIK Toivo 1976–1977
 LUIKMÄE Kalju 1977–1988
 LUKAŠ Natalija 1976–1978
 LUKAS Kersti 1985
LUKNER Argo 2008–
 LUMAN Tõnu 1978–1980
 LUMISTE Karlo 1984
 LUNTS Katrin 1986
 LUSIK Asta 1986–1988
 LUSKIND Juri 1986–1990
 LUTS Helja 1984–1987
 LUTS Lembit 1984–1992
 LUTVEI Kadri 1989–1990
 LUUS Valdi 1979–1983
 LUUSE Heli 1966–1970
LÕHMUS Aivar 2007–
 LÕHMUS Leili 1966–1969
 LÕHMUSSAAR Heldur 1960–1961
 LÕOKE Lia 1978–1980
 LÕOKE (Kivistik) Lia 1978–1980
LÕUGAS Rein 1976–
 LÄÄNE Ants 1973–1980
 LÄLL Eliise 1979
 LÖH Anders 2002–2005
 LÜLL Arved 1970–1971
 LÜÜDIG Villu 1989–1990
 MAADVERE Ernestine 1984
 MAAMÄGI Aasa 1971–1972
 MAASIK Avo 1987–1990
 MAASIK Ingrid 1987–1990
 MAASIK Maire 1970–1989
 MAASIK Rein 1977–2003
 MAASIK Tarmo 1982–1990
 MAASIK (Martõnova, Palias) Katrin
 1979–1991
 MAASING Daniel 1960–1962
 MAASING Gertrud 1979
MAASTIK Maie 2008–
 MAHAMALKINA Iraidra 1970–1972
 MAHLAPUU Silva 1975–1976
 MAHLAPUU (Volmer) Liivia
 1984–1992
 MAHONI Vello 1989–1992
 MAIBERG Enn 1979–1980
 MAIDL (Kell) Krista 1977–1979
 MAIDRE Marta 1967–1981
MAIGRE Riina 2005–
 MAILEND Irina 1985–1987
 MAILEND Mall 1974–2009

MAILEND Uno 1970–1997
 MAKSIMOVSKI Georgi-Rene
 1988–1989
 MALAŠENKO Valentina 1991
 MALLEUS Kalju 1987–2005
 MALM Kalju 1987–1992
 MALMER Viivi 1968–1969
 MALMSAAR Rainer 1965–1969
MANG Maia 1998–
 MANOIM Dalia 1982
 MARAN Lembit 1962–1963
 MARAN Rein 1960–1963
 MARANDI Mart 1984
 MARANIK Aarne 1966–1967
 MARANIK Olav 1979–1982,
 1990–1992
 MARDIM Hillar 1996–2000
 MARDISALU Sirje 1985–1990
 MAREMÄE Ello 1976–1980
 MARGE Koidu 1965–1993
 MARIPUU Anu 1977
 MARIPUU Katrin 1985–1989
 MARKELOVA Irina 1978–1994
 MARKUS Toivo 1984
 MARTENS Tarvi 1988–2000
 MARTIN Karin 1984–1985
 MARTINSON Urve 1969
 MARTINSON Allan 1987
 MARTMA (Agu) Renate 1987–1993
 MARTÕNENKO Oleg 1988–1990
 MARTÕNENKO Stanislav 1988–1992
 MARTÕNOVA Julia 1984–1986
 MARTS Jaan 1984
 MARTSEP Raul 1971–1991
 MARTSEPP Allan 1972–1973
 MARTSON Henn 1976–1991
 MARTSON Ljudmilla 1977–1992
 MARUSTE Rain 1990
 MASING Gunnar 1985
 MATSINA Raivo 1990–1992
 MATSKIN Mihhail 1978
 MATVEJEVA Valeeria 1976–1992
 MAUER Ingrid 1960–1983
 MAURER Ants 1966
 MAZEJEV Igor 1981–1985
 MEIDLA Ülar 1985
 MEINBERG Madis 1988–1989
MEISTER Einar 1977–
 MEISTER Kadri 1992–1997
MEISTER Lya 2002–
 MELL Jaan 1977–1993
 MELLER Elli 1984–1991
 MELNIKOV Imre 1968–1988
 MELNIKOVA Engelsin 1996–1997
 MENDUNEN Lembi 1980–1981
 MENKOV Jüri 1975–1993
 MEOS Helle 1979–1980
 MERE Vaike 1976–1992
 MERENDI Rein 1985
 MERERAND Helle 1986–1989
 MERESSOO Toomas 1972–1983
 MERI Kai-Riin 1986–1987
 MERILAHT Lea 1999–2004
 MERILO Raimo 1990–1992
 MERILOO Maaja 1978–1979
 MERIS (Hein) Helle 1986–1989
 MERISALU Anne 1986–1987
 MERISALU Rein 1981–1985
MERLO Olga 1994–
 MERLO Zinaida 1989–1991
 MERZINA Jevdokia 1992–1997
 MESIKEPP (Sepping, Värimär) Anu
 1969–1991
 METS Koidu 1977–1991
 METS Rein 1976–1982
 METSALU Aare 1979–1991
 METSAR Elsa 1966–1967
 METSAVEER Jaan 1967–1982
METSAHI Rainer 2006–
METTIG Elvi 1967–1968
 MIŠTŠENKO Andrei 1977–1991
 MIHHAILOVA Faina 1976–1978
 MIHKELSON Rein 1968–1990
 MIHKELSON Tiiu 2002–2007
 MIHKLA Meelis 1980–1993
 MIIKLA Toomas 1984–1993

MIILO Robert 1979–1980
 MIKELSAAR Peeli 1973–1980
 MIKHEIN Ülle 1966–1967
 MIKIVER Andres 1978–1979
 MIKIVER Leia 1978–1993
 MIKK Riina 1987
 MIKKER Ille 1994–2005
 MIKKOV Peeter 1984–1987
 MIKKOV Raivo 1979–1993
 MILEVSKI Venjamin 1998–2000
 MILLER Ants 1984–1990
 MILLER Jelena 1975–1978
 MILLERT Maire 1969–1970
 MIN Mart 1999–2001
 MININ Juri 1996–2000
 MINTS Grigori 1980–1996
 MIRING Toomas 1983–1991
 MISS Aivo 1977–1991
 MITIKOV Nikolai 1987
 MOISSEJEV Sergei 1987–1992
 MOOR Andrus 1982–1997
 MOORATS Helle 1977
MOORITS Erkki 2005–
 MOOSAR Ain 2000–2005
 MORIN Anatoli 1980–1995
MOROZENKO Aleksandr 2007–
 MOSIN Jevgeni 1971–1975
 MOSKALENKO Valeri 1988–1992
 MUDRAK Vladimir 1964–1982
 MUKK Aare 1991
 MULGI Karin 1968–1969
MULLARI Tanel 2000–
 MURAVJOVA Olga 1998–1999
 MUREL Arvi 1987–1990
 MURUMÄE Maret 1989–1990
 MUSESOV Sergei 1987
 MUSKAT Margus 1997, 2005–2007
 MÖTSKÜLA Peeter 1997–2000
 MÖTTE Inge 1991
 MÖTUS Leo 1964–1992
 MÖTUS Ingrid 1988–1991
 MÄEPERE (Pontus) Sirje 1977–1980
 MÄEUMBAED Kaja 1980–1992
 MÄGEDIN Kalle 1984
 MÄGI Elo 1998–2002
 MÄGI Mari 1967–1970
 MÄGI Märt 1967–1980
 MÄGIMETS Rein 1977–1978
 MÄLK Nora 1970–1980
 MÄLLO Helve 1978–1980
 MÄND Elvi 1970–1971
 MÄNG Ilmari 1984–1985
 MÄNGEL Urmas 1986–1990
MÄNNIK Jaak 2007–
 MÄNNIKUS Tiit 1977
 MÄNNIL Aino 1960–1992
 MÄNNIL Jaan 1985–1988
 MÄNNIL Mart 1969–1970, 1973–1983
 MÄNNISALU Mati 1976–1991
 MÄNNISTE Mare 1964–1967
MÄRDIN Mait 2009–
 MÄRTENS Kalev 1993–1995
 MÄRTENS Olev 1995–1999
 MÄRTIK Taimo 1961–1962
 MÄRTIN Kaarel 1979–1991
 MÄRTIN Kristiina 1990–1992
 MÖLL Aivar 1984–1992
 MÜLBACH Maimu 1960–1981
 MÜNZ Peeter 1966–1968
MÜRK Raul 2009–
 MÜÜRISEPP Kaili 2001–2003
 MÜÜRISEPP Marju 1977–1978
 NAAN Gustav jun. 1983–1990
 NAEL (Mallas) Tiiu 1976–1991
 NAHK Aare 1972–1973
NAKATA Keiko 2008–
 NAZAROV Andrei 1978–1986
 NAZAROV Leonid 1986
 NEEME Sven 2008–
 NEEME Tõnis 1966–1976
 NEEMLA Maimu 1979–1983
 NEITERMAN Boris 1984–1990
 NEKRAŠ Svetlana 1983–1984
NERUTŠEV Sergei 1996–
 NEZABUDKINA Valentina 2001–2005
 NEUMAN Toomas 1977–1980

NIGUL Ivar 1982–1986
 NIGUL Uno 1961–1990
 NIIDUMAA Enn 1977–1992
 NIINE Ülo 1980–1992
 NIINEP Maria 1986–1987
 NIINEPUU (Saal) Andrei 1961–1978
 NIIT Jaak 1990–1992
 NIITLA Astrid 1961–1963
 NIITSOO Margus 2008–
 NIKKOLO Kaido 1998–2001
 NIKOLAJEV Valeri 1966
 NIKOLAJEVA Jevgenia 1985–1986
 NIRK Tiit 1972–1974
 NOHRINA Ljubov 1964–1978
 NOOR Anne 1970–1982, 1994–1995
 NOORKÕIV Paul 1984
 NOORMAA Aare 1977
 NOORMANN Rein 1983
 NORMAK Mart 1993–1994
 NORMAK Raul 1976–1977
 NORVIK Margus 1977–1993
 NORVIK (Saarestik) Ülle 1978–1984
 NOVGORODTSEVA Rima 1974–1992
 NOVGORODTSEVA Irina 1973–1974
 NOVIKOV Rudolf 1978–1984
 NOVIKOV Rustam 2004–2005
 NUIJA Viljo 1967–1972
 NURGES Aime 1984
 NURGES Arno 1988–1992
 NURGES Ülo 1969–
 NURJA Hillar 1999–2005
 NURK Juhan 1963–1964
 NURK Kersti 1976–1978
 NURMELA Vello 1969–1978
 NURMELA Viuu 1972–1973
 NURMIK Piret 1979
 NUŽINA Ninel 1979
 NÕGISTO Imbi 2006–
 NÕGISTO Toomas 1994–1997
 NÕMM (Röömus) Elvi 1965–1992
 NÕMM Sven 1999–
 NÕMMEOTS Ilmar 1977–1981
 NÕU Mati 1984–1997
 NÄÄR Harri 1993–2004
 NYMAN Mati 1980–1990
 ODRATS Ivar 1961–1962, 1964–1998
 OHAKA Miralda 1980–1981
 OINUS Andres 1979–1994
 OIT Helen 1997, 1999–2000
 OIT Henn 1977–1991
 OIT Monika 1975–
 OJA Rea 1974–1978
 OJALA Malle 1980–1991
 OJAMAA Andres 2006–
 OJAMÄE Inge 1998–2003
 OJARAND Jaan 1978–1993
 OJASAAR Heli 1974–1976
 OJASALU Ardo 1989–1990
 OJASOO Tanel 2002–2003
 OJASOO Toomas 1989–1990
 OJAVEER Heli 1974–1976
 OLDERMANN Marko 2004–2006
 OLEV Meelis 2000–2003
 OLIVSON Inga 1985
 OLIVSON (Bahmatt) Abira 1961–1980
 OLMAN Valeria 1975–1977
 OLMAN Viktor 1969–1992
 OLMRE Liia 1980–1981
 OLT Anne 2003–
 OLUP Erich 1979–1982
 OMER Andres 2008
 OMER Ivo 2009–
 OMLER Tarmo 1977–1984
 ONG Gerta 1974–1985
 OPER Urve 1960–1966
 ORAS Vambola 1993–1995
 ORAV Ene 1978
 ORG Endel 1960–1961
 ORG Marelli 1978
 ORGUSAAR Märt 1961–1965
 ORINITŠ Vladimir 1973–1983
 ORN (Kiinof) Maret 1976–1992
 ORRO Karin 1972–1973
 ORUSTE Reet 1965–1966, 1989–1993
 OSA Raivo 1973–1980
 OSI Elvi 1982–1991

OSIPOVA Avgusta 1990–1993
 OSSIPOVA (Dmitrijeva) Marina
 1980–1987
 OSTRAT Jaak 1981–1984
 OTS Maldon 1980–1981
 OTSMAN (Ermus) Maie 1969–1987
 OTT Arvo 1976–1990
 OZOLS Karl 1988–1989
 PAAL Aksel 1960–1997
PAAL Samuel-Vincent 2009–
 PAALANDI Arvi 1977–1981
 PAALME Toomas 1974–1980
 PAAS Kaidi 1987–1988
 PAAS Virve 1984–1986
 PAASRAND Pirja 2008
 PABERIT Mart 1975–1980
 PABERIT (Fink) Nadežda 1974–1980
 PADAM Jüri 1968
 PAHAPILL Jaak 1984–1989
 PAHHOMOVA Ljudmilla 1988
 PAISTE Raivo 1981
 PAJU Juhan 1960–1963
 PAJUMÄE Ain 1981
 PAJUPUU Jaan 1982–1987
 PAJUR Rein 1982–1991
 PALDER Ende 1990–1992
 PALL Imre 1977–1978, 1982–1992
 PALL Martin 1970–1994
 PALL (Valtna) Ülle 1976–1992
 PALLUM (Pikpoom) Helgi 1960–1969
 PALM Jaanus 1998–2000
 PALUOJA Rein 1980–1994
 PALVADRE Vallo 1983–1984
 PANKRATOV Vladimir 1985–1992
 PAPANFUSS Christina 2008
 PARBO Ene 1974–1978
 PARDANE Ülle 1980–1991
 PARIK Tiina 1978–1981
 PARK Allan 1997–2000
 PARKJA Rein 1970–1972
 PARNELL Kevin 2008
 PARM Kenno 2009
 PARMAS Sirje 1972–1973
 PARMASTO Katrin 1977–1979
 PARRING Aivo 1965
 PARRING Anne-Mai 1966
 PARTANEN Margarita 1990–1991
 PASS Martha-Helene 1982
 PAST Jaan 1962–1980
 PAU Anne 1980–1981
 PAU Mati 1979–1981
 PAUKLIN Üllar 1978–1984
 PAUKLIN Urmas 1974–1975
 PAVELSON Andres 1984–1986
 PAVLENKO Helle 1981–1982
 PAVLOVA Niina 1982–1982
 PŠENNIKOVA Niina 1966–1968
 PEDAJAS Aul 1991–1997
 PEDAK Henn 1975–1992
 PEDAK Maie 1968–1994
PEDOSON Sigrid 2007–
 PEENEMA Erlend 1976–1980
 PEEP Ego 2000–2003
 PEET Alari 1979–1984
PEETERSOO Paul 2006–
PEETS Tanel 2005–
 PEHK Tõnis 1966–1980
 PEHKA (Kadakas) Riina 1969–1970
 PHEHLAK Osvald 1998–1999
 PEIPMAN Tõnu 1979–1984
 PEIPS Mart 1977–1980
 PEITEL Maire 2008–2010
 PELLÄ Merike 1978
PENJAM Jaan 1979–
 PENTIKÄINEN Gennadi 1970
 PEREHOŽEVA Ljone 1989
 PERKMANN Hannes 1985–1994
 PERKMANN Monika 1986–
 PERKSON Steve 2004–2006
 PERRI Aino 1965
 PETDER Robert 1987–1992
 PETERSEN Ilmar 1982–1983,
 1991–1994
 PETERSEN Ivar 1960–2003
 PETERSON Anne-Liis 1989–1990
 PETERSON Jüri 1984–1991

PETERSON Maret 1960–1966
PETERSON Pearu 1992–
 PETROVA Irina 1992
 PETROVA Larissa 1999–2002
PETTAI Martin 2006–
 PETTAI Paavo 1985
 PETUHHOV Igor 1979–1980
 PIHL Mare 1997–1999
 PIHLAK Aino 1961–1966
 PIHLAU Jaak 1962–1983
 PIIK Ann 1970–1971
 PIILE Ruth 1981–1985
 PIIRAK Ülle 1973
 PIIRFELD Elfriede 1978
 PIIRMETS Maidu 1967–1968,
 1980–1991
 PIITEA Urmas 1974
 PIKK Jüri 1969–1977
 PIKKA Peeter 1990–1993
PIKPOOM Tiit 1989–
 PIKSARV Priit 1979–1980
 PIKVER Rein 1978–1980
 PILLER Gustav 1976–1982
 PILVET Thea 1979–1980
 PIMENOV Vladislav 1978
 PIRKER Pille 1978–1983
PIRN Lembit 1974–1980, 2007–
PIRN Pille 2008–
 PITS Heljo 1985–1991
 PLADO Urmo 1988–1989
 PLAKS Toomas 1982–1992
 PLJUŠTŠ Irina 1981–1982
 PLOTNIKOVA Irma 1960–1966
 PLUMER Raivo 1984–1991
 PLUTUS Luule 1976–1977
 POBBUL Peep 1984
 POKS Arno 1999–2000
 POLL (Hoole) Helgi 1960–1966
 POLL Valdur 1960–1977
 POLDRE Annika 1980
 POLONSKAJA Irina 1977–1986
POOBUS Aino 1989–
 POOLAKESE Ago 2006–2007
 POOM Eva 1980–1991
 POOM Krista 1961–1962
 POOM Mati 1966–1967
 POOM Rein 1988–1993
 POROTIKOV Aleksei 1988–1992
 POVAROVA Tamara 1982–1993
 PRAKS Signe 1985–1988
 PRAUST Valdo 1993–1997
 PRELA Ljudmilla 1977–1978
 PRII Benita 1968–1969
 PRIISALU Jaan 1989–1991,
 1994–1995
 PRILUTSKI Juri 1981–1990
 PRISTAVKO Galina 1972–1976
 PROOSES Ilona 1964–1992
 PRÜGI Kaja 1980–1987
 PRUUDEN (Karu) Elvi 1960–2003
 PRUUDEN Juhan 1960–2003
 PRUUL Heli 1984–1985
PRUULMANN Jaan 2005–
PRUULMANN-VENGERFELDT Jaak
 2002–
 PUCK Karl-Klaus 1963–2003
PUGAL Deivid 2005–
 PUHANG Jüri 1961–1966
 PUISTAMAA Ülle 1984–1985
 PUKK Endel-Jaak 1984–1993
 PUKK Jüri 1960–1966
 PUKK Paul 1983–1990
 PUKK Reet 1960–1989
 PUKS (Luts) Anne 1965–1987
 PUKSA Ando 1961–1969
 PUKSPUU Andres 1986–1990
 PULLERITS Jaan 2005–2006
 PUNDI Valev 1980
 PUNGAR Peeter 1981–1987
 PUNGAR (Maalder) Eha 1968–1992
 PUNGAS Kalle 1988–1991
 PUNTSO Raima-Ellin 1989
 PUPART Kristina 1981–1984
 PURDE Urmas 1989–1992
 PURGA Ingrid 1993–1994
 PURRE Leonhard 1979–1991

PURRE Mart 1989–1992
 PURRE Tiiu 1977–1978
 PUSI Arvo 1981–1984
 PUSKAR Jüri 1961–1980
 PUTNIK Enn 1962
 PUTTING Riina 2007–2009
 PUTTING Valter 1970–1980
 PUUS Uno 1998–2009
PUUS Piret 2005–
 PUUSEPP Elli 1977–1991
 PUUSEPP Valdur 1985
 PÖDER Reio 2004–2006
 PÖDRA Hillar 1985
 PÖLD Alar 1994
 PÖLD Meelis 1984–1986
PÖLDEMAA Pärt 2009–
 PÖLDOJA Mall 1980–1982
 PÖLDROO Hugo 1977–1991
PÖLDSAAR Svetlana 2010–
 PÖLLU Liina 1984
 PÖLLU Pärja 1976–1978
 PÖLLU Tiia 1977–1978
 PÄÄREN Jaak 1987–1993
 PÄEV Tõnu 1978–1991
 PÄEV (Pommer) Haidi 1978–1991
 PÄHKLAMETS Helina 1969–1970
 PÄRISTE Arno 1977–2003
 PÄRN Tiiu 1962–1963
 PÄRNA Evald 1979–1990
 PÄRNPUU Raivo 1996–2000
 PÄRTIN Elsa 1978
 PÄRTMANN Johanna 1983–1985
 PÄSS Igor 1978
 PÖHL Tiia 1986–1993
 PÜÜA Margus 1986–1991
QUAK Ewald 2005–
 RAABE Alar 1977–1990
 RAAG Tõnu 1969–1970
 RAAL Rait 2005–2009
 RAASILD Riho 1993–1994
 RABA Raivo 1974–1980
 RABA (Lendla) Mari 1974–1980
 RADA Peep 1990–1992
 RAHENDI Maie 1962–1966
RAHKEMA Artur 2009–
 RAHUOJA Heino 1977–1984
 RAHUOJA Kaja 1984–1986
 RAID Rita-Ludmilla 1984–1993
 RAIDMA Merje 1979–1980
 RAIDMETS Berta 1989
 RAIDPERE Maimu 1998–2000
 RAIEND Kullo 2009
 RAIK Ernst 1962–1975
 RAITAR Valve 1966–1967
 RAJAMETS Elvine 1997–2000
 RAKVER Viktor 1983
RAMAY Hena 2006–
 RAMMO Kaja 1970–1985
 RAMMO Olaf 1976–1985
 RAND (Mironov) Ave 1986–1990
 RAND Hilja 1978–1992
 RAND Olev 1981–1984
 RANDMA Olavi 1977–1989
RANDMA Toomas 2001–
 RANDMÄE Igor 1977–1988
RANDRÜÜT Merle 2005–
 RANDVEE Ingmar 1960–2007
 RANG Maime 1976–1990
 RANNAK Inna 1989–1990
 RANNASTE Rein 1979–1980,
 1982–1983
 RANNAT Kalev 2005–2008
 RANNE Marge 1980
 RANNIKU Andres 1998–2008
 RAPPU Silvi 2000–2003
 RASVA Ene 1984
 RAUBA Koidula 1967–1968
 RAUBA Raimo 1983–1991
 RAUD Evi 1969–1976
 RAUD Helle 1978–1980
 RAUD Lilianne 1986–1988
 RAUD Raivo 1977–1988
 RAUDE Helju 1974–1980
 RAUDLAM Riivo 1979
 RAUDSAAR Eha 1992–1998
 RAUDSEPP Jaan 1979–1981

RAUDSEPP Lily 1984–1985
 RAUDSEPP Maidu 1984–1990
 RAUK Jaanus 1992–1993
 RAUS Gennadi 1968–1969
RAVASOO Arvi 1976–
 RAZUMOVA Olga 1969–1970
 REBANE Izolda 1977–1982
 REBANE Liis 2005–2006
 REBANE Raivo 1977–1985,
 1986–1990
REBANE Raul-Vello 1977–
 REBANE Rein 1969–1970
 REBANE Tiiu 1976–1982
 RECK Kristel 1990
REEDER Reeno 2002–
 REELEND Ingrid 1986–1991
 REGI Kai 1986–1989
 REHAK Branislav 2007–2008
 REIER Matti 1972–1973
 REIGO Mae 1960–1994
REIMO Tõnis 2009–
 REINHOLD Andres 1978–1980
 REINKUBJAS Teet 1991–1992
 REINMANN Jaan 1983–1992
 REINMETS Priit 1987–1988
 REISNER Ruth 1982–1984
 REITSAKAS Aleksander 1978–1992
 REITSAKAS Anna 1995–2002
 REITSAKAS Arnold 1961–1995
 REITSAKAS Jelena 1985–1991
 REITSAKAS Jüri 1985–1994
 REITSAKAS Natalia 1980–1999
 REKOR Margus 1981–1982
 REMMEL Ülle 1965–1968
REMMELGAS Enn-Olav 1994–
 RENNIK Heli 2005–2007
 RENUU Helmi 1985
 RENTER Ally 1985–1986
 REPKIN Aleksander 1973–1975
 RESSAR Raivo 1980
 REZNIKOVA (Mints) Anna 1984–1991
 RIDAL Toivo 1975, 1977–1981
 RIIKOJA Jaan 1979–1980
 RIISBERG Kalev 1969–1980
RIISMAA Tiit 1972–
 RIISMAN Tõnu 1983–1992
 RIKAS Ingrid 1978–1980
 RILLO Urmas 1977–1978
 RIMMEL Eduard 1987–1988
 RIMMEL Julija 1987–1988
 RINK Vello 1972–1977
 RIST Ene 1965–1969
 RITSO Jaan 1975
 ROHTLA Eve-Liis 1993
 ROHTLA Mart 1961–2007
 ROHTLA Tatjana 1985
 ROHTLA Tiia 1975
 ROMULUS Tiit 1984
 RONK Ants 1968
 ROOBA Elve 1966–1993
ROOS Anu 2006–
ROOS Meelis 1998–
 ROOSE Ants 1969–1974
 ROOSE Enn 1966–1970
 ROOSIAAS Anti 1984
 ROOSIAAS Erki 1983
 ROOSIMANNUS Annika 1983–1991
 ROOSIVÄLI Juhan 1982
 ROOSMAA Tiit 1977
 ROOSTE Imbi 1977–1991
 ROOSENFELD Üllar 2002–2006
 ROOTS Margus 2006–2007
 ROSENVALD Jüri 1987–1989
 ROSIN Ivar 1988–1993
 ROSS Tanel 1990–1991
 ROZENFELD Marianna 1987–1992
 ROŽKOVA Niina 1979–1988,
 1991–1992
 RUBAN Valentina 1966–1971
 RUBEL Kati 1987–1988
 RUDENKO Aleksander 1998–2001
 RUHNO Andres 1979–1980
 RUKŠENAS Rimvydas 1990–1993
RUMBERG Ants 1979–
 RUMBERG Merike 1980–1981
 RUMBERG Silvi 1980–1989

RUMJANTSEVA Maria 1989–1993
 RUMMA Kusta 1964
RUNNEL Klaus-Eduard 2007–
 RUUBEL Heino 1960–1972
 RUUBEL Vaike 1982
 RUUBEN Toomas 1991
 RUUS Annela 1992–1993
 RUUS Leho 1987–1992
 RUUSTAL Arvo 1983–1984
 RÕBKA Aron 1990
 RÕTŠKOVA Ljudmilla 1976–1978
 RÕUK Tiitu 1979–1981
 RÕŽKOVA Rufina 1983–1984
 RÕŽOV Boris 1989–1992
 RÄBOVÕITRA Mati 1979–1992
 RÄHN Andres 1966
 RÄISA Olev 1976–1991
 RÄMMER Annela 1990–1991
 RÄNK Gita 1978–1980
 RÄTSEP Aili 1969–1970
 RÄTSEP Leini 1962–1963
 RÄTSEP Rein 1985–1993
 RÄTSEP Veikko 1983–1986
RÄÄMET Andres 2010–
RÄÄMET Kai 1999–
 RÜMMEL Mart 1970–1979
 RÜNKLA (Valing) Ester 1976–1995
 RÜSTERN Elmar 1977–1996
 SAABAS Ando 2002–2009
 SAADLA Anu 1966–1978
 SAADLA Juta 1963–1976
SAAGO Mare 2003–
 SAAL Kaarel 2005
SAALISTE Maido 1979–
 SAALISTE Urve 1962–1971
 SAAR Heljo 1965–1966
 SAAR Aivar 1984–1993
 SAAR Aivo 1962–1973
 SAAR Alar 1988
SAAR Andri 2010–
 SAAR Arno 1978–1979
 SAAR Elar 1979–1979, 1981–1985
 SAAR Henn 1967–1988
 SAAR Ira 1970–1979
 SAAR Mart 1973–1979
 SAAR Pilvi-Eha 1984–1992
 SAAR Reet 1984–1991
 SAAR Rein-Ando 1987–1992
 SAAR Svetlana 1977–1979
 SAARD Niilo 1969–1988
 SAARE Anu 1985
 SAAREKE Sirje 1978
 SAAREMÄEL Toomas 1969–1991
 SAAREMÄGI Kalle 1982
 SAARESTIK Helle 1975–1976
 SAARSE Hillar 1977–1983
 SAATPALU Vello 1983–1990
 SAFONOVA (Landrat) Svetlana
 1978–1986
 SAKKIUS Gustav 1982–1984
 SAKS Kristi 1989
 SAKS Valdur 1970–1971
 SAKSAKULM Tiit 1965–1976
 SAKSING Ragmar 1997–2003
 SALO Tõnu 1981–1987
 SALUM Henn 1960–1992
 SALUM Vaige 1962–1980
 SALUMÄE Ants 1962–1980
SALUPERE Andrus 1994–
 SALUVEE Uno 1970–1971
 SALUVERE Tiit 1965–1980
 SALVET Kalev 1983–1984
 SALVET Leelo 1983–1992
 SAMARINA (Rožkova) Viktoria
 1986–1988, 1991–1993
 SAMMAL Kalle 1980–1982
 SAMMEL Lembit 1984–1991
 SAMOSON Ago 1978–1980
 SAMUEL Karl 1967–1969
SANKO Jelena 1998–.
 SARAPIK Anne 1980–1997
 SARAPUU Ilmar 1962–1963, 1967
 SARAPUU Urve 1962–1971
 SAREVET Sirje 1988–1992
 SARGREN Pär Olof 1999–2000
 SARV Andrus 1993–1996

SARV Enn 1968–1981
 SARV Laur 1976–1977
 SARV Siim 1995–1997
 SARV (Kaljusalu) Ellen-Heidi
 1971–1991
 SAU Katri 1988–1992
 SAUH Leonid 1986–1992
 SAUH Sergei 1987–1988
 SAUL Eduard 1981–1982
 SAULUS Reigo-Riivo 1991–1992
SAVASTJANOVA Evgenia 2006–
 SAVI Mart 1966–1967
 SAVI Urmas 1980
SCHRYER David 2008–
 SCHUTTING Peeter 1986–1992
 SEEBA Asko 2000–2005
SEEBA Mari 2005–
 SEERO Tõnu 1985–1987
 SEIER Gustav 1988–1990
 SELTIN Toomas 1977
 SEMJONOV Enno 1994–1999
SEMJONOVA Svetlana 2005–
 SEMJONOVA Tatjana 1969–1991
SEPA Andres 2005–
 SEPANDI Anne-Mai 1965–1966
 SEPMAN Margus 1986–1987
SEPP Margus 2007–
 SEPP Martin 1991–1993
SEPP Mervi 2003–
 SEPP Olev 1998–2000
 SEPP Raivo 1989–1992
 SEPPER Raul 1977–1981
 SEPPING Eve 1969–1971
SERTAKOV Ivan 2008–
 SHKARAVSKA Olha 2005–2006
 SHORIKOVA Tamara 2002–2007
 SIDORIK Galina 1987–2000
 SIDOROV Dmitri 1978–1982
 SIDOROV Vladimir 1975–1978
 SIDOROVA Marina 1986–1987
 SIHT Alar 1991–1992
 SIIBAK Sulev 1980–1995
 SIIBE Toivo 1984–1990
 SIIDA Tiit 1972–1994
 SIIGUR Ene 1974–1980
 SIIGUR Jüri 1974–1980
 SIIL Imre 1984–1997
 SIILATS Viktor 1978–1980
 SIIM Tiina 1980–1994
 SIIMON Arvo-Aleksander 1960–1992
 SIIMUT Tõnu 1961–1964
 SIKK Peeter 1972–1980
 SIKK Kalle 1976–1977
 SIKK (Tamsalu) Kristiina 1984–1994
 SILBERG Erika 1981–1982
 SILDAM Tõnis 1981–2005
 SILDE Eduard 1979
 SILDNIK Hannes 1984–1991
 SILLAT Tarvo 1997–1999
 Sillavee Enn 1997–1998
 SILM Tiit 1985–1992
 SILM (Soosalu) Pille 1988–1997
 SILMET Ants 1984–1987
 SILMET Ingrid 1987
 SIMMER Veikko 1986–1992
 SIMSEL Astrid 1980–1992
 SIMSEL Sõlvi 1988–1994
 SINIJÄRV Riivo 1973–1980
 SINISOO Ele 1979–1980
 SINISOO Mark 1960–1991
 SINIVÄLI Virve 1989–1994
 SINIVEE Vello 1964–1972
 SINK Maarja 1988–1994
 SINOTOVA Viktoria 1984–1995
 SIPRIA Endel 1984–1985
 SIREL Helmut 1962–1963
 SIRK Aavo 1976–1980
 SIRKEL Jaanika 1998–2000
 SISKA (Kartau) Helve 1978–1990
 SIZOVA Anna 2007–2009
 SITNIK Artur-Indrek 1990–1993
 SMIDT Ivi 1980
 SMIRNOV Alar-Ants 1983
 SMIRNOV Anatoli 1990–1992
SMOLIN Ivar 2002–
 SMOLJANSKI Leonid 1986–1991

SMORODINOVA Veera 1980–1983
SMUILOVIŠ Arved 1968–1969,
 2003–
 SOINI Liilia 1972–1974
 SOKOLOV Aleksei 1995–2003
 SOKOLOV Andrei 1986–1990
 SOKOLOV Konstantin 1980–1991,
 1998–2000
 SOKOLOVA Irina 1979–1980
SOKOLOVA Niina 2008–
 SOKOLOVSKAJA Jana 1991–1992
 SOKOLOVSKI Anton 1991–1992
 SOLBA Arne 1983
 SOLOMINA Marju 1976–1977
 SOLOVEIKO Nikolai 1972–1975
 SOMMER Hilja 1976–1995
 SONSMER Sulev 1960–1962
 SOOLO Andres 2006–2007
 SOOM Peeter 1984
 SOOME Ingrid-Ilve 1982
SOOMERE Tarmo 2005–
 SOOMRE Mats 1988
 SOON Ermo 1984
 SOONE Sander 1988–1992
 SOONETS Enn 1976–1992
 SOONVALD Eugen 1963–1964
 SOOSAAR Liivi 1980–1994
 SORGINA Hionija 1970–1973
 SOTNIKOVA Nailja 1987–1992
 SPEEK Mart 1978
 SPELMAN Alla 1986–1991
 SPIRKIN Dmitri 1983–1993
SPITSHAKOVA Margarita 2005–
 SPITZ Helvi 1986–1987
 STAUB Rein 1965–1968
 STEPANOVA Valentina 1989–1990
 STRIŽEVSKAJA Veronika 1985–1995
STULOV Anatoli 1971–
 SUIE Mare 1990–1993
 SUIT Erik 2009–2010
 SUITS Kristina 1991–1993
 SUITS Raul 1994–1995
 SÜLD Andres 1984
 SULE Raivo 1973–1989
 SULLING Andres 1997–2002
 SULTS Andrei 1982–1984,
 1986–1991, 1993–1997
 SULU Osvald 1979–1992
 SULU Peeter 1981–1984
 SULU Reet 1986–1987
 SULU Tõnis 1980
 SUMAROKOV Vladimir 1977–1983
 SUMBERG Raivo 1979–1993
 SUMBERG (Kotsar) Viive 1977–1992
 SUMRE Heiki 1960–1991
 SUMRE (Nurk) Viive 1960–2004
 SUTERMÄE Sven 1985–1986
 SUUR Leo 1974–1976
 SUURKIVI Edna 1982–1988
 SUURKUUSK Andres 1988–1991
 SUURMAA Eerik 1979–1980
 SUURSILD Leini 1980
 SUURVÄLI Andres 1979–1980
 SUVI Ülle 1986–1994
 SVINTSOV Mihhail 2003–2006
 SVIRIDOVSKAJA Irina 1984–1987
 ŠÖBER Jaak 1965
 ŠÖBER Jüri 1979–1980
 ŠÖBER Kalle 1966
 ŠÖMER Astra 1978–1985
 ŠÖMER Kaido 1980–1981
 ŠÖNAJALG Sander 2008–2009
 ŠÖSTER Toomas 1993
ŠÄKKI Maksim 1996–
 ŠÄRA Lembit 1984–1991
ŠÖÖT Rasmus 2007–
 ŠÜGIS Anatol 1961–1980
 ŠÜLD Kalle 1973–1982
 ŠAMOV Jüri 1990–1992
 ŠANIN Peeter 1989–1991
 ŠARAŠKIN Jüri 1976–1992
 ŠARAŠKIN Peeter 1985
 ŠARAŠKINA Anne 1986–1992
 ŠAROVA Alevtina 1976–1985
 ŠATALOV Vladimir 1987–1992
 ŠATALOVA Marina 1991

ŠATALOVA Svetlana 1989–1992
 ŠEHTMAN Boris 1976–1978
 ŠEMBARJOVA Ene 1983–1984
 ŠILENOK Oleg 1992–1996
 ŠILIKOVA Tatjana 1983
 ŠIROKOV Aleksander 1988–1989
 ŠMUNDAK Aleksander 1979–1991
 ŠNAIDER Vitali 1977–1980
 ŠTEISELBEIN Ella 1970–1972
 ŠTŠEDROVA Polina 1991–
 ŠUSTROV Eduard 1990
 ZAHHAROV Vjatšeslav 1986–1992
 ZAITSEVA Avieta 1966–1969
 ZAITSEVA-PÄRNASTE Inga 2008–
 ZALIT Urve 1990–1991
 ZALOŽIN Eduard 1985
 ZAMARAJEV Jüri 1979–1993
 ZAMARAJEVA Nadežda 1983–1985
 ZARANS Ivar 1986–1990
 ZARUBIN Juri 1977–1980
 ZAVARZIN Nikolai 1979
 ZAVJALOVA Antonina 1982–1983
 ZEEMANN Kalju 1961–1965
 ZHANG Bingsheng 2009–
 ZILOTOVA Tatjana 1984–1992
 ZIMIREV Mihhail 1970
 ZUBKOV Sergei 1994–2000
 ZUBOVITŠ Taissa 1982–1992
 ZUPSMANN Väino 1982–1992
 ZUPSMANN Vello 1971–1980
 ŽELEZNJAKOVA Svetlana 1978
 ŽIGALOVA Galina 1995–1997
 ŽIGIN Vladimir 1978–1981
 ŽURAKOVSKAJA Natalia 1977–1979
 TAAL (Rauba) Iris 1971–1993
 TAAL Tõnu 1972–1991
 TAE Arne 1982–1984
 TAGAM Viivi 1968–1969
 TAGO Toivo 1980
 TAGO Toomas 1977, 1980–1993
 TAIMLA Toomas 1999–2000
 TAIMLA Uno 1960
 TAJUR Priit 1983
 TAKIS Neeme 1980–1984
 TAKJAS Reet 1972
 TAKLAJA Aiki 1989–1992
 TALI Anne 1971–1973
 TALKOP Aldur 1961–1965
 TALKOP (Ebre) Eve 1964–1969
 TALLERMO (Mägi) Krista 1974–1981
 TALMAR Mait 1984–1985
 TALTS Tarmo 1986–1987
 TALVIS Enn 1980–1992
 TAMBERG Kaili 1991
 TAMBERG Tatjana 2009–
 TAMLAK Toomas 1985–1986,
 1988–1989
 TAMM Aile 2007–2008
 TAMM Arne 1980–1991
 TAMM Boris 1960–1976, 1991–2002
 TAMM Ebu 1970–1993
 TAMM Edith 1968–1971
 TAMM Esti 1980
 TAMM Hellis 2005–
 TAMM Indrek 1978, 1980–1992
 TAMM Kert 2006–
 TAMM Maret 1963–1992
 TAMM (Liim) Marje 1977–
 TAMM Pearu 1978
 TAMM (Ojaver) Kersti 1968–1993
 TAMMAI Kalle 1977
 TAMME (Põldmäe) Loona 1964–2003
 TAMME Mari 1985–1989
 TAMME Priit 2004–2007
 TAMME Reet 1989
 TAMMEMÄGI Jüri 1971
 TAMMEORG Harivald 1993–2000
 TAMMEPUU Ott 1987–1991
 TAMMET Eve-Reet 1966–1980
 TAMMET Heinar 1979–1993
 TAMMET Lea 1979
 TAMMET Liilia 1981–2003
 TAMMET Tanel 1987–1997
 TAMMETS Tiina 1966–1968
 TAMMEVESKI Mai 1981–1991
 TAMMIK Viivi 1983

TAMMING Toomas 1990–1991
 TAMMOJA Helvi 1983–1986
 TAMMSAAR Kalju 1978
 TANDRE Raili 1986–1993
 TANI Harry 1976–2007
 TANKSIMÄE Vambola 1979–1992
 TANNI Annela 1984–1985
 TARASSOVA Nadežda 1972–1981
 TARIKKO Niina 1993–1995
 TARMAK Mart 1977–1980
 TART Indrek 1969–1980
 TARVIS Arvo 1981–1983
 TASAK Aavo 1970–1989
 TASANE Asta 1990–1991
 TASUJA Kärt 1979
 TATS (Matt) Elve 1969–1973
 TATTER Peeter 1997–2001
 TAUTS Ants 1979–1984
 TAUTS Tiiu 1965–1974
 TAVAST Raul 1960–1994
 TAVAST (Viilukas) Anne 1962–2000
 TAVETER Kuldar 1986–1990
 TEDER Hannes 1977–1980
 TEDER Olev 1985
 TEDREKULL Kaia 1981–1995
 TEEÄÄR Raivo 1977–1980
 TEES (Niidukivi) Sirje 1979–1992
 TEHVER Anne-Mai 1971–1979
 TEINBERG Helga 1983
 TEKKO Jaanus 1983–1987,
 1992–1994
 TELLING Artur 1993–1995
 TELLING Margarita 1970–2006
 TENISBERG Juventin 1963–1976
 TENNO Robert 1980–1991
 TERASMÄGI Camille 1966–1967
 TERENTJEVA Anna 2008–
 TIIDELEPP Ene 1979–1982,
 1984–1997
 TIIDO Rein 1970–1971
 TIIGIMÄGI Tiit 1988–1990
 TIITS Tõnu 1965–1991
 TIITSMA Mare 1986–1987
 TIITUS Leida 1991–1992
 TIIVEL Irene 1978–1982
 TILININ Aleksei 1977–1991
 TILK Viivika 2005–
 TIMMERMAN (Tõnts) Reet
 1976–1984
 TIMMERMANN (Šults) Ilda
 1969–1976, 1991–2002
 TIMMERMANN Tiit 1965–1992
 TIMMERMANN Tõnu 1968–2000
 TIMOFEJEV Georg 1987–1988
 TIMOFEJEV Valentin 1991–1992
 TING Oksana 1986–1987
 TIPPEL Heino 1978
 TISSEN Zara 1967–1969
 TKALITS Olga 1992–1997
 TOBIAS Teet 1961–1986
 TOHVER Ants 1960–1965
 TOKK Urve 1962–1963
 TOLBAST Boris 1976–1986
 TOLSTOUHHOV Jevgeni 2006–
 TOMBERG Iveta 1988–2000
 TOMBERG Leonid 1981–1988,
 1990–1992
 TOMINGA Kannike 1969–1977
 TOMINGAS Anne 1987–1991
 TOMMINGAS Toomas 1985–1991
 TOMP Peeter 1963–1983
 TOMSON Rene 2005–
 TOOM Andres 2007–
 TOOM Arvo 1967–1968
 TOOM Meeli 1972–1973
 TOOME Indrek 1966
 TOOME Tõnis 1977, 1979
 TOOMET Madis 1999–2000
 TOOMISTE Hillar 1985–1986
 TOOMLA Ülle 1983
 TOOMPUU Helju 1963–1967
 TOOMSALU Arvo 1976–1979
 TOOMSALU Tõnu 1980–1982,
 1985–1988
 TOOMSALU Toomas 1987–1994
 TOOTS Meta 1973–1985

TOOTSI Time 1970–1982
 TOPPA (Ida) Marika 1978–1981
 TORIM Andrus 1978–1982
 TRAKS Kuno 1985–1988
 TRAMPÄRK Harri 1977–1980,
 1996–2000
TREIAL Dorris 1980–
 TREIKELDER Ivar 1985–1992
 TREIMA Toomas 1985
 TREIMAN Kalmer 1984–1987
 TROŠKOVA Raisa 1963–1975
 TROFIMOV Nikolai 1978–1981
 TROFIMOV Ülle 1981
 TRUMP Tõnu 1986–1991
 TRUSKA Enn 1981–1982
 TRUUTS Reet 1987–1994
 TRUUVER Eino 1979–1980
 TRUUVERK Tõnis 2008–2009
 TSUBIN Dmitri 2008–2009
 TSÖBINA Anna 1985
 TSÖBINA Antonina 1999–2001
 TŠAHHIROV Ilja 2009
 TŠEPIKOV Valeri 1995–1997
 TŠERNIKOV Viktor 1963–1965
 TŠERNÕŠOVA (Vader) Viktoria
 1972–1991
TŠERTO Anton 2008–
 TŠILININ Sergei 1976–1982
 TŠURIKOV Andrei 1986–1987
 TUGA Niina 1961–1963
 TUHERM Tiit 1972–1980
 TUI Epp 1977
 TUI (Olesk) Malle 1968–2003
TULIT Britt 2003–
TULIT Viljar 1993–
 TUNGAL Ivi 1977–1991
 TUPAILO Sergei 1990–1992,
 1994–1995, 2000–2009
 TURI Tamara 1996–1997
 TURRO Margit 20074–2009
 TUTT Anu 1978–1984
 TUUL Endel 1961–1963
 TUUL Toomas 1986–1990
 TUUL Vaiki 1995
 TUURAND Inda 1976–1973
TÕELEID Veiko 2004–
 TÕLL Harry 1969
TÕNSO Maris 1977–
 TÕNSPOEG Tõnu 1981–1992
 TÕNUMÄE Kalev 1997–1998
TÕUGU Enn 1976–1988, 1990–
 TÄHE Endel 1964–1966
 TÄHE Malle 1965–1968
 TÄHT Mihkel 1974–1978
 TÄNAV Peeter 1989–2005
 TÄNAVA Toomas 1983–1984
 TÄRN Peeter 1976–1990
 TÜKSAMMEL Tõnu 1969–1971
 TÜRRI Robert 1990–1992
 TÜRK Tarika 1970–1972
 TÜVI Arvi 1986–1987
 UDAM Mark 1963
 UDIKAS Helga 1986
 UFFERT Maie 1964–1978
 UGAM Taavi 1997–2005
 UIBO Armand 1968–1973
 UIBO Tatrin 1963–1996
 UIBO (Pii) Önnela 1969–1991
 ULLA Eedi 1964–2005
 ULM Sulev 1960–1978
 ULRICH Sirje 1991–1993
 UMMER Jüri 1980–1992
 UNT Elmar 1964–1966
 UNT Mall 1976–1980
 URB Ülo 1979–1980
 URBAITIS Kestutis 1988
 URVA Ille 1979
 URVAK Ants 1971–1978, 1983–1986
 URVAK (Atlas) Aime 1969–1978,
 1983–1988
USK Aivar 2000–
 USTAAL Aare 1961–1965
 USTAV Mart 1974–1976
UUDEBERG Kristi 2006–
 UUDELEPP Helgi 1964
 UUE Heino 1991–1999

UUEHENDRIK Anne 1964–1970
 UUETOA Ingrid 1995–2004
 UUK Virve 1988–2001
 UULMAA Rein 1984–1987
 UUS Tõnu 1985–1992
 UUSNA Elfride 1982–1983
UUSTALU (Kotkas) Kristi 1994–
UUSTALU Tarmo 1984–1985,
 1986–1991, 1999–
 UUSTALU Urmas 1966–1983
VAARMANN Otu 1961–1993, 1997–
 VAARMANN Tiiu 1970–1989
 VAATMANN Vahur-Antsi 1970,
 1972–1986
 VABAMETS Tõnu 1978–1989
 VABIŠTŠEVITŠ Nikolai 1977–1978
 VABIŠTŠEVITŠ (Mihhailova) Marina
 1977–1991
 VAHEMÄE Aarne 1981–1991
 VAHER Jaan 1990–1991
 VAHTER (Annus, Tenisberg) Milvi
 1965–2000
 VAHTRAMÄE Pauline 1960–1963
 VAIKJÄRV Anne 1981–1988
 VAIKJÄRV Kalju 1977–1988
 VAIKNURM Veiko 1986–1990
VAIKSAAR Vahur 2002–
 VAIM Sulev 1966
VAIN (Viin) Jüri 1979–
 VAIN Varje 1982–1983
 VAINOMAA Kaido 1979–1994
 VAINRUB Arnold 1977–1980
 VAINULA Malle 1961–1962
 VALANG Kalliki 1982
 VALDEK Urmas 1983–1997
 VALDEK (Aru) Margis 1981–1986
 VALDMANN Tiit 1975–1982
 VALDMEES Egon 1999–2001
 VALGE Arto 1989–1997
 VALGE Gunnar 1988–1992
 VALIKOV Anatoli 1972–1979
 VALLANDI Ilmar 1966–1967
 VALLASTE Heiki 1966–1980
 VALLIKIVI Margit 2008–2009
 VALT Rando 1995–1996
VALTER Kaidi 2008–
 VALVET Ivo 1968–1972
 VAN Peter 2006
 VANAASEME Elsa 1970–1984
 VANAMÖLDER Eduard 1977–1990
 VANATALU Kalju 1978–1980
 VANATOVA Veiko 1990–1992
 VANAVESKI Aune 1965–1967
 VANAVESKI Kuido 1971–1972
 VANIN Heino 1991
 VARB Manivald 1964
 VARBLANE Terje 1983–1985
 VARŠAVSKI Mihhail 1977–1978
 VARELDŽJAN Albert 1990–1992
 VAREND Malle 1970–1973
 VARES Olev 1986–1989
 VARI Niina 1976–1979
 VARI Urmas 1983
 VARIK Priit 1987–1988
 VARIKSOO Anne 1986
 VARIVODA Oleg 1977–1992
 VARJAS Ants 1977–1993
 VARJAS Toivo 1984
 VARLAMOV Viktor 1976–1992
 VARTS Riina 1985–1991
 VASJUTINA (Gurjanova) Inessa
 1981–1988
 VASLI Tiit 1986–1989
 VASSILJEV Joosep 1960–1963
 VASSILJEV Vladimir 1978–1992
 VASSILJEVA Tea 1989–1990
 VASSILJUK Natalia 1985
 VASSIN Konstantin 2007–2009
 VATSEL Jelena 1995–1997
VEEBER Pilvi 1991–
 VEELMANN Leida 1963–1964
 VEIDE Tart 1979
 VEIGEL Heli 1980
 VEIGEL Illa 1960–1991
 VEIGEL Mati 1969–1970
 VEKSLER Naum 1963–1996

VELDRE Paul 1984–1985
 VELLEMAE Saima 1980–1992
 VENDELIN Marko 1992–
 VENDLA Kaja 1984–1985
 VENE Varmo 1998–
 VENNO Heljo 1986–1990
 VERTE Nelli 1964–1965
 VESILIND Urmas 1995–2001
 VESKE Maie 1965–1987
 VESKE Anne 1972–1986
 VESKE Saale 1990–1992
 VESKI Kristi 2004
 VESTERBLOM Katrin 1987–1992
 VESTHOLM TVioleta 1968–1970
 VETIK Hillar 1987–1990
 VETTIK Aime 1985–1990
 VIHALEM Kai-Maarja 1966–1969
 VIHULA Aili 1969–1976
 VIIDALEPP Imme 1967–1969
 VIIDEBAUM Mikk 2010–
 VIKMANN Ella 1965–1989
 VIKMAE Bert 2009–
 VIIL Aime 1961–1966
 VIIL Katrin 1987–1988
 VIILUP Agu 1984–1992
 VIIPSI Tõnu 1972–1973
 VIIRES Mart 1979–1980
 VILBAUM Alfred 1989–1992
 VILIBERT Kalle 1988
 VILLEMSON Jan 1998–2004, 2005–
 VILLO Naima 1980–1992
 VILMAN Velle 1980–1992
 VILMS Marko 2004–2006
 VILO Jaak 1990–1991
 VILT Juhan 1962–1963
 VILU Raivo 1975–1980
 VINNAL Mart 1965–1980
 VINNAL Vello 1980
 VINOGRADOVA (Komkova) Ljudmilla
 1984–1991
 VINTER Toomas 1986–1988
 VIRKUS Terike 1961–1963,
 1968–1976
 VIRRO Eda 1981–1990
 VISLAPU Tõnu 1974
 VISNAP Raul 1972
 VISNAPUU Heikki 1985–1991
 VOHNJA Ülo 1999–2008
 VOIT Ernst 1962
 VOLBERG Mari 1980–1985
 VOLGIN Leonid 1984–1993
 VOLOŽ Benjamin 1980–1997
 VOOLAINE Andrus 1977–1992
 VOOREMAA Linda 1990–1993
 VORONKOVA Praskovja 1969
 VUNK (Urb) Ülle 1974–1982
 VÖHANDU Kaia 1983–1993
 VÖRK Peeter 1986, 1990
 VÖRODOVA Maia 1977–1978
 VÄÄN Toomas 1974–1990
 VÄÄRMANN Valentina 1980–1983
 VÄÄRTNÕU Eino 1972–1975
 VÄHEJAUS Tõnu 1994–1995
 VÄHHI Urmas 2004–
 VÄHK Sirje 1985–1991
 VÄINA Esta 1979–1993
 VÄLBE Kai 1977–1978
 VÄLI Riido 1989–1992
 VÄLI Tambet 2006–2007
 VÄRS Juta 1968–1974
 WÖRK Ants 1965–1997
 VÕSAR Julija 2000–2005
 VÄLIMÄE Toomas 1977–1980
 VÄLJAMÄE Vallo 2007–
 VÄLJASTE Härmo 1998–
 WYRWAS Malgorzata 2008
 ÕIGUS Arvi 1985–1986
 ÕIGUS (Väli) Taivi 1988–1995
 ÕKVA Liivi 1985–1990
 ÕUNAP (Hansen) Mai-Helle 1966–1973
 ÕUNAPUU Meeli 1966–1973
 ÕPIK Reet 1971–1989
 KAPARIN Vadim 2007-
 SAAGO Mare 2003-
 SOOMERE Tarmo 2005-
 ZAITSEVA-PÄRNASTE
 Inga 2008-
 VIIDEBAUM Mikk 2010-



INSTITUUDI DIREKTORID
LÄBI AEGADE

1960–1969
Nikolai Alumäe
12.09.1915–27.03.1992



1969–1976
Boris Tamm
23.06.1930–05.02.2002



1976–1989
Hillar Aben



1989–1997
Ülo Jaaksoo



1997–2009
Jaan Penjam



2009–
Andrus Salupere