

EESTI VABARIIGI TEADUSPREEMIAD

2006

TALLINN, 2006

Richard VILLEMS (vastutav toimetaja)
Riigi teaduspreemiate komisjoni esimees

Helle-Liis HELP, Siiri JAKOBSON, Galina VARLAMOVA

Raamatu kujundamisel kasutati laureaatide
teaduspreemiate kätteandmisel 24.02.2006 tehtud fotosid
ja diplomi fotot

SISUKORD

EESSÕNA	5
<i>Lembit Allikmets</i> teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest	6
<i>Mihkel Veiderma</i> teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest	14
<i>Ago Samoson</i> (kollektiivi juht) <i>Tiit Tuherm , Jaan Past , Andres Reinhold , Tiit Anupõld</i> teaduspreemia innovaatilise tooteni viinud väljapaistva teadus- ja arendustöö eest teemal “Ülikiire proovirootsiooni tehnika arendamine” ...	26
<i>Arvi Freiberg</i> (kollektiivi juht) <i>Margus Rätsep, Kõu Timpmann</i> teaduspreemia täppisteaduste alal uurimuste tsükli “Fotosünteesiliste valgusergastuste eksiton-polaron iseloom” eest	38
<i>Ülo Nüinemets</i> teaduspreemia keemia ja molekulaarbioloogia alal uurimuste tsükli “Lenduvate orgaaniliste ühendite emissiooni füsioloogia” eest TAIMSE PÄRITOLUGA LENDUVATE ORGAANILISTE ÜHENDITE EMISSIOONI FÜSIOLOOGIA	48
<i>Enn Mellikov</i> (kollektiivi juht) <i>Mare Altsaar, Sergei Bereznev, Andres Öpik</i> teaduspreemia tehnikateaduste alal teadustöö “Päikeseelementide uued materjalid ja konstruktsioonid” eest	58

Kalle Olli

teaduspreemia geo- ja bioteaduste alal uurimistöde tsükli
“Funktsionaalsed protsessid ja bioloogilised interaktsioonid
planktonikooslustes” eest
PELAAGILIS-BENTILINE SIDUSUS OOKEANIS 70

Ülle Jaakma (kollektiivi juht)

Triin Hallap, Jevgeni Kurõkin, Andres Valdmann

Teaduspreemia põllumajandusteaduste alal teadustööde tsükli
“Veiste sigimise füsioloogia ja patoloogia, rõhuasetusega viljakust
mõjutavatele teguritele ja reproduktsiooni biotehnoloogia meetodite
edasiarendamisele” eest
VEISTE VILJAKUSE PROBLEEMID VAJAVAD TEADLASTE
TÄHELEPANU 84

Talis Bachmann

teaduspreemia sotsiaalteaduste alal uurimuste tsükli “Kognitiivsete
protsesside eksperimentaalne ja teoreetiline uurimine” eest 94

Anu Mänd

teaduspreemia humanitaarteaduste alal monograafia “Linna pühadering.
Pidukultuur Läänemere idaranniku hansalinnades 1350–1550 (*Urban
Carnival: Festive Culture in the Hanseatic Cities of the Eastern Baltic,
1350–1550*.)” eest 108

EESSÕNA

Loomulikult on teadus üleilmse kultuuri komponent – me õpime koolis geometriat, mida tuntakse muinaskreeklase Eukleidese nime kaudu, me seostame heliotsentrilist maailmapilti poolaka Kopernikusega ja teame, et gravitatsiooni-seaduse avastas inglane Newton. Nagu me veel teame, rajas Karl Ernst von Baer paljuski selle, mida nüüd kutsutakse ontoloogiaks. Samas on loomulik, et iga kultuurirahvas tõstab nii- ehk teistsuguses vormis esile oma teadlaskonda. Teadlased, harvade eranditega, ei kuulu tänapäeva massimeedia tähelepanu alla – ei rahvusvaheliselt ega rahvuslikult. Vahest seda enam on õigustatud traditsioon, mille kohaselt Eesti riik jagab oma aastapäeval tunnustust esilekõnnivamatele oma teadlaskonnast.

Eesti riiklikud teaduspreemiad on mitmelaadsed. Ja see on, ma usun, väga otsustav. Meil märgitakse iga-aastaselt ära parim, mida viimase nelja aasta jooksul on loodud paljudes erinevates teadusvaldkondades. Ja ärge parem küsige – pigem tihti kui erandina on valikut tegeval komisjonil lahendada sugugi mitte lihtne ülesanne – valida esitatuist parim. Kui te loete läbi selle kogumiku tervikuna, tekib teil ka terviklik pilt viimase nelja aasta esilekõnnivamatest saavutustest kodumaa teaduse erinevates suundades.

Meie teaduspreemiate selleaastaseks eripäraks on äsja lisandunud preemia eriti silmapaistva saavutuse eest. Sel aastal lõime me pretsedendi – preemia sai Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi kollektiiv eesotsas dr Ago Samsoniga, kes tutvustab premeeritud töö sisu siinsamas raamatus.

Erilisel kohal teaduspreemiate hulgas on preemia, mida igapäevakeeles kutsutakse elutööpreemiaks ja ametlikult teaduspreemiaks pikaajalise ja tulemusliku teadustöö eest. Kartmata ülepakkumist julgen kindlalt väita, et elutööpreemia on kõrgemaid tunnustusi Eesti teadlasele, mida kodumaa saab pakkuda. Ja tundub, et elutööpreemia kui tähis on ühtlasi ka impersonaalne – niisuguse preemia olemasolu kaudu tunnustab riik teaduse unikaalset ja asendamatu kohta kultuuriruumis. Elutööpreemia laureaate valik on olnud alati raske, kuid lõppkokkuvõttes siiski oluliselt üksmeelne. Sel aastal langes valik professor Lembit Allikmetsale ning akadeemik Mihkel Veidermale. Me oleme väga rahul, et elutööpreemia pälvinute plejaadile lisandus kaks väärikat nime.

Eessõna lõpul tänan riigi teaduspreemiate komisjoni liikmeid nende asjaliku ja süvenenud panuse eest valikute tegemisel ja otsuste langetamisel.

Richard Villems
komisjoni esimees

Teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest



Lembit Allikmets

Sündinud 18.06.1936 Harjumaal Kernu vallas

1954 Vabariiklik Tallinna Meditsiiniline Keskkool
1960 Tartu Ülikool (TÜ), arstiteaduskond
1963 meditsiinikandidaat, NSVL Meditsiiniakadeemia Eksperimentaal-
se Meditsiini Instituut (Leningrad)
1963 TÜ meditsiinikesklaboratooriumi teadur, sektorijuhataja
1970 meditsiinidoktor
1971 TÜ farmakoloogia kateedri professor
1972–2001 TÜ farmakoloogia kateedri/instituudi juhataja
1975–1984 ja 1989–1994 TÜ arstiteaduskonna dekaan
2001 TÜ emeriitprofessor
1974–1993 Eesti Farmakoloogia Seltsi esimees
1975 Eesti NSV teaduspreemia
1976 Teenelise teadlase aunimetus
1994 Poola Lublini Meditsiiniakadeemia audoktor
1997 Läti Farmakoloogia Seltsi auliige
2001 Soome Farmakoloogia ja Toksikoloogia Seltsi auliige
2003 Punase Risti II klassi teenetemärk
2004 Tartu medal ja TÜ kliinikumi preemia

Avaldanud üle 350 publikatsiooni.

Olen sündinud Harjumaal Kernu vallas küllaltki suures ja tegusas esivanemate talus. Oli seal nii kohustusi kui vabadust looduses tegutseda. Nii 1941 kui 1944 sõja ülekäimist mäletan hästi, kuna talu maad piirnesid Tallinn-Pärnu maanteega. Koolitarkust sain nii Ruila 7-klassilises koolis, Tallinna Meditsiinilises Keskkoolis kui ka TÜ arstiteaduskonnas.

Arstiteaduskonnas õppides (1954–1960) oli küllaltki suur osa üliõpilastest huvitatud teaduslikust tööst. Kateedrite juures töötasid Üliõpilaste Teadusliku Ühingu (ÜTÜ) vastava eriala ringid, kus korraldati regulaarselt ettekandekoosolekuid. Vähemalt kord (vahel ka kaks korda) aastas toimus teaduskonna ÜTÜ konverents, lisaks Balti Vabariikide meditsiiniüliõpilaste konverentsid. ÜTÜ ringid olid ka oluliseks erialaseks täienduseks üliõpilastele tulevase eriala valikul. Sel ajal ei järgnenud ülikooli lõpetamisele internatuuri ega residentuuri. Mina läksin juba II kursuse sügisel koos kursusekaaslaste Märt Saarma, Enno Krossi ja Taie Aadlaga ÜTÜ psühhiaatria ringi.

Töötasin dotsent Jüri Saarma juhendamisel kuni VI kursuse lõpuni, tegin võistlustöid ja konverentside ettekandeid ning tööle suunati psühhiaatrina Jämejala Psühhoneuroloogia Haiglasse. Olin seal arstiks ainult 2 kuud, siis (oktoobris 1960) tehti teaduskonna juhtkonna poolt (professor Artur Linkberg, professor Robert Looga) mulle kohustuseks minna Leningradi farmakoloogia-alasesse sihtaspirantuuri. Nädalaga tuli teha sisseastumiseksamid ja oktoobri keskel olin juba Leningradis NSVL Meditsiiniakadeemia Eksperimentaalse Meditsiini Instituudi farmakoloogia osakonna aspirant. Sealne kollektiiv oli teaduslikult aktiivne, aspirantuuris oli inimesi mitmest vabariigist. Juhendajaks oli osakonna juhataja akadeemik Sergei Anitškov, kes oma vanuse kohta (sünd. 1892) oli küllaltki aktiivne, aspirantide suhtes tähelepanelik ja nõudlik. Osakonnas viljeldi mitmeid farmakoloogia suundi, kuid lähtudes minu eelnevast huvist psühhiaatria vastu, valisin teemaks kesknärvisüsteemi toimivate ainete uurimise. Instituudis toimus keemikute poolt pidev uute ainete süntees ning mina uurisin rea ühendite struktuuri ja toime seoseid eelkõige aju tüve funktsioonidesse [Allikmets, 1964]. Leningradis olid head erialased raamatukogud, sageli toimusid teadusseltside koosolekud, loengutega esinesid ka tuntud välismaa teadlased. Kandidaadiväitekirja kaitseksin ennetähtaegselt juba kolmanda aspirantuuriaasta kevadel. Aspirantuuri ajal oli võimalus tutvuda kõigi Leningradi meditsiiniinstituutide farmakoloogia kateedritega, samuti teadusinstituutide huvipakkuvate laboratooriumidega. Uurimistöö meetodikate tundmaõppimisel oli sellel suur tähtsus iseseisva töö alustamiseks Tartus.

1963. aasta suvel Tartusse tulles määrati mind arstiteaduskonna Meditsiini Kesklaboratooriumi nooremteaduriks. Hakkasin korraldama uut laboratooriumi Maarjamõisa närvikliiniku keldriruumides. Ka vivaarium oli juba arendamisel ja katseloomade muretsemisel suuri probleeme polnud. 1960ndad aastad oli uute psühhotroopsete ainete avastamise ja intensiivse uurimise kuldne ajastu [Saarma, Allikmets, 1969]. Katseseadmete, eriti elektrofüsioloogilise aparatuuri ja optika ostmiseks saime ülikoolilt piisavalt raha ja sel ajal oli N. Liidus toodetu küllaltki kvaliteetne.

Palju katseseadmeid 1960ndail ja hilisematel aastatel konstrueeriti ülikooli eksperimentaalses töökojas, kus töötasid väga kvalifitseeritud insenerid (Reeben, Jagosild jt) ning kuldsete kätega meistrid. Laboratooriumis alustasid tööd ka esimesed aspirandid ja üliõpilased (Laur Karu, Lembit Mehilane jt). Põhiline suundumus uuringutes oli uute antidepressantide, antipsühhootikumide ja krambivastaste ainete toime lokalisatsiooni selgitamine [Allikmets, Dietrich, 1965; Allikmets, 1966; Allikmets, Lapin, 1967]. Stereotaktilise aparatuuri abil oli võimalik väga täpselt implanteerida katseloomade aju elektroode, mikrokanüüle ainete manustamiseks, aga ka teatud ajuosasid elektrolüütiliselt välja lülitada. Palju töötasime eesaju vanemate piirkondade, nn limbilise süsteemi struktuuride (mandeltuim, hipokampus, septum, preoptiline- ja prefrontaalne piirkond, hüpotalamus jt) osatähtsuse selgitamisel antidepressantide ja antipsühhootikumide toimes [Allikmets jt, 1968, 1969; Allikmets, 1974].

Töötasime mitmel katselooma liigil – kassidel, küülikutel, rottidel, hiirtel. 1960ndate aastate keskel ja teisel poolel selgitas meie kollektiiv praktiliselt esimesena maailmas antidepressantide serotoninopositiivse toime ajus [Allikmets jt, 1969; Vahing, Allikmets, 1970]. Mikroinjektsioonikatsete ja serotoniinireseptorite tundlikkuse muutuste alusel mandeltuumas ja prefrontaalses kooses oletasime serotoniini olulist osa emotsionaalses käitumises. Oluline avastus oli mandeltuuma piirkonna serotoniinergilise süsteemi potentseerimine antidepressantide toimel, mida praegu peetakse depressiooni, afektiivse ja impulsiivse käitumise ravimisel oluliseks [Allikmets, Delgado, 1968; Allikmets jt, 1969]. Need tulemused muutsid oluliselt hüpoteese depressiooni patogeneesist ning stimuleerisid uute, valikulisemalt toimivate antidepressantide sünteesi ja uurimist.

1966/67 õppeaastal olin vahetusteadlasena USA-s Yale'i Ülikoolis, kus jätkasin tööd antidepressantide toime lokalisatsiooni uurimisel ahvidel [Allikmets, Delgado, 1968; Allikmets jt, 1968]. Sel perioodil tutvusin ka mitmete teiste USA ülikoolide psühhofarmakoloogia laboratooriumidega New Yorgis, Philadelphias, Chicagos, Bethesdas, Los Angeleses jne, mis võimaldas kogetut ka Tartusse naastes juurutada.

Uurimisrühmast kasvas välja 1968. a loodud psühhofarmakoloogia probleemlaboratoorium psühhiaatria kateedri juures. Meie teadustöö nii uuringute teostamisel kui ka ühisseminaride ja konverentside korraldamisel Tartus oli tihedalt seotud psühhiaatria (J. Saarma) ja biokeemia (L. Tähepõld, U. Tarve) kateedritega. 1970. a algul kaitsesin doktoriväitekirja. Aastatel 1971–72 kaitsesid kandidaadiväitekirju ka minu esimesed õpilased Lembit Mehilane, Vaino Vahing, Laur Karu, Anne Üprus-Schotter. Samal 1970. aastal asusin osalise koormusega tööle farmakoloogia kateedrisse ja 1971. aastast juba täiskohaga professorina. Selle tulemusel kaldus eksperimentaalne neuro-psühhofarmakoloogiaalane teadustöö üha enam farmakoloogia kateedrisse, kuid säilis tihe koostöö psühhiaatria kateedri, psühhofarmakoloogia problemlaboratooriumi ja meditsiini kesklaboratooriumiga. Farmakoloogia kateedris võtsime lisaks elektrofüsioloogilistele ja käitumisingutele kasutusele rea uuemaid biokeemilisi ja molekulaarbioloogilisi uurimismeetodeid: neuromediaatorite ringkäigu uurimise, retseptorite hulga ja afiinsuse muutuste määramise ajukoos mitmesuguste toimeainete nii akuutse kui ka kroonilise manustamise järgselt. Biokeemilise farmakoloogia meetodilise külje arendamisel tegid palju tööd Hilja Kurvits, Margareete-Helge Otter, Aleksander Žarkovski, Ants Nurk, Eero Vasar [Allikmets, 1982, 2005].

1975. aastal anti meie uurijate kollektiivile (J. Saarma, L. Allikmets, L. Karu, J. Liivamägi, L. Mehilane, M. Saarma, V. Vahing, H. Väre) Eesti NSV Riiklik preemia antidepressantide ja neuroleptikumide eksperimentaalse ja kliinilise farmakoloogia läbitöötamise eest.

Edasised uuringud olid seotud neuromediaatorite ja teiste bioregulaatorite (dopamiin, noradrenaliin, serotoniin, GABA, atsetüülkoliin, opiaadi- ja bensodiasepiiniireseptorite agonistid, antagonistid) ringkäigu ja retseptorite adaptiivsete muutuste uurimisega antipsühhootikumide, nootroopikumide, bensodiasepiinide ja opiaatide kestval kasutamisel [Allikmets, Žarkovski, 1978; Allikmets jt, 1979; Allikmets, Žarkovski, 1978; Žarkovski, Allikmets, 1986; Allikmets, Vasar, 1990 jt.]. Püüti selgitada ka ravimisõltuvuse bioloogilisi aluseid (Žarkovski, Nurk jt). Meie tööühma uuringud näitasid, et ravimisõltuvuse tekkimisel morfiini ja alkoholi suhtes suureneb L-tüüpi kaltsiumikanalite ekspressioon, kaltsiumi sisenemine rakku. Seega on kaltsiumikanalid ründepunktiks uutele võimalikele ravimisõltuvuse vastastele ravimitele.

1970ndatel ja 1980ndatel aastatel kujunes meie farmakoloogia kateeder NSV Liidus juhtivaks keskuseks gammaaminovõihappe derivaatide ja antipsühhootikumide toimemehhanismi uurimisel. Kuna mul tuli täita 1980–1988 NSV Liidu Meditsiiniakadeemia psühhofarmakoloogia probleemkomisjoni esimehe ülesandeid, tuli meil planeerida ja kureerida mitmeid üleliidulisi sihtprogramme sel alal. Tartus korraldati regulaarselt üleliidulise tähtsusega konverentsed ja sümposiume (1964, 1970, 1973, 1976, 1980, 1983, 1986, 1987). Väitekirju farmakoloogia erialal kaitsesid samal perioodil Lev Nurmand (1975), Aleksander Žarkovski (1977), Ants Nurk (1982), Tamara Žarkovskaja (1982), Eero Vasar (1983), Lembit Rägo (1983), Matti Maimets (1985), Olev Toomla (1985), Raul-Allan Liivet (1988), Andres Soosaar (1989), Kestutis Čereska (1989), Jaanus Harro (1990).

Viimased 40 aastat on Tartu farmakoloogidel olnud tihe koostöö Läti farmakoloogia laboratooriumidega (professorid Modris Melzobs, Agris Kimenis, Vija Kluša), Leningradi/St. Peterburi psühhofarmakoloogia keskustega (professorid Izjaslav Lapin, Edvin Zvartau), Moskvas asuva Meditsiiniakadeemia Farmakoloogia Instituudiga (professorid Artur Valdman, Kirill Rajevski jt.). Alates 1990. aastast tihenes oluliselt teaduskoostöö Soome, Saksamaa, Poola ja Rootsi ülikoolidega. Meie doktorandid said võimaluse välismaal teatud uuringutsüklite teostamiseks või täiendada end seal meetodiliselt. 1980ndate aastate lõpust juhendasid minu õpilased Aleksander Žarkovski, Eero Vasar ja Lembit Rägo juba ise edukalt aspirantide ja doktorantide tööd [Allikmets, 2005].

Üheks oluliseks uurimisvaldkonnaks 1990ndatel aastatel oli ärevust, hirmu ja agressiivsust põhjustavate ja leevendavate farmakonide uurimine. Arendati eksperimentaalseid käitumismudeleid, uuriti ainete neurokeemilisi efekte. Põhjalikumalt uuriti neuropeptiidide koletsüstokiniini ja neuropeptiid Y interaktsiooni teiste neuromediatsiooni süsteemidega, eelkõige võimalike uute anksiolüütikumide arendamise eesmärgil [Matto jt, 1997, Kask jt, 2001]. Oluliselt uusi andmeid saime agressiivse käitumise apomorfiini mudeli uurimisel [Allikmets jt, 1980; Allikmets, Vasar, 1982; Allikmets, 1996].

Veel kahel korral viibisin ma pikemalt USA ülikoolides. 1978/79 õppeaastal 7 kuud New Yorgi ja Wisconsin ülikoolides ja 1990. a Fulbright'i stipendiaadina 4 kuud Yale'i ülikoolis. See aitas arendada nii teaduslikku koostööd kui ka probleemipüstitusi Tartu Ülikooli arstiteaduskonnas.

Viimastel aastatel on farmakoloogia alal antud kolm riiklikku teaduspreemiat minu kunagistele õpilastele, praegustele juhtivatele professoritele närviteaduste ja farmakoloogia alal. Farmakoloogia Instituudi juhataja professor Aleksander Žarkovski koos kaastöötajatega sai 2000. aastal preemia tööde tsükli "Närvirakkude kahjustus ja ravimsoõltuvus, molekulaarsed mehhanismid ja farmakoloogiline preventatsioon" eest. Füsioloogia Instituudi juhataja professor Eero Vasar koos oma õpilastega sai riikliku preemia 2004. aastal uurimuse "Psühhofarmakoloogiline ja geenitehnoloogiline lähenemisviis negatiivsete emotsioonide neurobioloogiliste mehhanismide selgitamiseks" eest. 2005. aastal omistati teaduspreemia psühhofüsioloogiaprofessor Jaanus Harrole afektide neurobioloogilise regulatsiooni alaste tööde eest.

Nagu teada, kulub ülikooliõppejõu tööajast oluline osa üliõpilaste õpetamisele. Sel suunal olin ma järjekindlalt teadustööelementide kasutamise poolt loengutel ja muudes õppetöö vormides. Kateeder oli aktiivne õppevahendite koostamisel ja 30 aasta jooksul avaldasime 36 õppevahendit, mitmed neist kordustrükkidena. Koos kolleeg professor Leo Nurmandiga koostasime kaks farmakoloogiaõpikut (1982, 1996). 1971. aastast alustasime uudsena kliinilise farmakoloogia õpetamist nii üliõpilastele kui ka arstidele ja proviisoritele arstiteaduskonna täienduskeskuse kaudu. Koostasime ka kliinilise farmakoloogia programme NSVL Tervishoiuministeeriumile. Andsime välja käsiraamatuid "Kliiniline psühhofarmakoloogia" (1981), "Kliiniline farmakoloogia" (1988), "Farmakoterapia" (1991).

Eesti Farmakoloogia Seltsi asutasime 1972. aastal ja Eesti Bioloogilise Psühhiaatria Seltsi 1990. aastal.

Töötades arstiteaduskonna dekaanina (1975–1984 ja 1989–1994), viisin 1976. aastast sisse iga-aastase teaduskonna aastapäeva tähistamise [Allikmets, 2000]. Koos kolleegidega Meditsiini Kesklaboratooriumist rajasime teaduskonnas üld- ja molekulaarpatoloogia instituudi (1978), alates 1990. aastast panime aluse TÜ Kliinikumile. Suurimaks saavutuseks pean Biomeedikumi ehitamist, mille ettevalmistamisega tuli tegelda pea 20 aastat. Arstiteaduskonna instituutide õppe-teadustöö koondus pea 100 aasta jooksul hajali asunud hoonetest ühte hoonesse Maarjamõisa meditsiinikeskuses.

KIRJANDUS

Allikmets, L. (1964). Etefiili ja etüülnorantifeiini analeptiliste omaduste võrdlemine tuntud analeptikumidega tiopentaali ja morfiini mürgistuse korral. Farmakol. i Toksikol., 27, 3, 260-264. (vene k.)

- Allikmets, L. (1966). Mandeltuuma elektrilise stimulatsiooniga esile kutsutud käitumisreaktsioonid kassidel. *Zh. Vysh. Nervn. Dejat.*, 16, 1, 1082-1091. (vene k.)
- Allikmets, L. (1974). Cholinergic mechanisms in aggressive behavior. *Medical Biol.*, 52, 19-30.
- Allikmets, L. (1982). Farmakoloogia areng Tartu ülikoolis. *Nõuk. Eesti Ter- vishoid*, 6, 433-438.
- Allikmets, L. (1996). Agressiivse käitumise farmakoloogia ja farmakoterapia (ülevaade). *Eesti Arst*, 1, 32-40.
- Allikmets, L. (2000). 25 aastat arstiteaduskonna aastapäeva järjekindlat tähis- tamist. *Eesti Arst*, 3, 528-529.
- Allikmets, L. (2005). Tartu Ülikooli vana anatoomikum ja farmakoloogiata- duse areng. *Eesti Arst*, 84, 5, 608-616.
- Allikmets, L., Delgado, J. M. R. (1968). Injection of antidepressants in the amygdala of awake monkeys. *Arch. Internat. Pharmacodyn.*, 175, 1, 170-178.
- Allikmets, L., Delgado, J. M. R., Richards, S. A. (1968). Intramesencephalic injection of imipramine promazine and chlorprothixene in awake monkeys. *Int. J. Neuropharmacol.*, 7, 2, 185-193.
- Allikmets, L., Dietrich, M. (1965). Limbilise süsteemi kahjustuste toime rot- tide emotsionaalsetele reaktsioonidele ja tingrefleksidele. *Zh. vysh. Nervn. Dejat.*, 15, 1, 86-95. (vene k.)
- Allikmets, L., Lapin, I. (1967). Influence of the lesion of amygdaloid complex on behaviour and on effects of antidepressants in rats. *Int. J. Neurophar- macol.*, 6, 2, 99-108.
- Allikmets, L., Stanley, M., Gershon, S. (1979). The effect of lithium on chro- nic haloperidol enhanced apomorphine aggression in rats. *Life Sci.*, 25, 165- 170.
- Allikmets, L., Zharkovsky, A. (1978). Biochemical and behavioral studies on the interference between catecholaminergic and serotonergic central systems. *Annali dell'Institute Superiore di Senita*, 14, 63-70.
- Allikmets, L., Zharkovsky, A., Nurk, A. (1980). The action of chronic lithium treatment on aggressive behaviour in morphine dependent rats and in rats chronically treated with dopaminomimetics. *Aggressive Behavior*, 6, 263-264.
- Allikmets, L., Vahing, V., Lapin, I. (1969). Dissimilar influence of imipramine micro-injections of noradrenaline, acetylcholine and serotonin into the amyg- dala in the cat. *Psychopharmacol.*, 15, 3, 392-403.
- Allikmets, L., Vasar, E. (1982). Apomorphine aggressiveness: the role of dopa- minergic and opiate mechanisms in limbic structures. *Aggressive Behavior*, 8, 4, 826-828.

- Allikmets, L., Vasar, E. (1990). Adaptational changes in GABA-B, benzodiazepine and cholecystokinin receptors elicited by long-term haloperidol administration. *Sov. Med. Rev. Neuropharmacol.*, 1, 101-126.
- Kask, A., Vasar, E., Heidmets, L.-T., Allikmets, L., Wikberg, J. E. S. (2001). Neuropeptide YY5 receptor antagonist CGP71683A: The effect on food intake and anxiety-related behavior in the rat. *Eur. J. Pharmacol.*, 414, 215-224.
- Matto, V., Harro, J., Allikmets, L. (1997). The effect of drugs acting on CCK receptors and rat free exploration in the exploration box. *J. Physiol. Pharmacol.*, 48, 2, 239-251.
- Saarma, J., Allikmets, L. (1969). Psühhofarmakoloogiliste uuringute suunad ja tulemused Tartus. *TRÜ Toimetised*, 249, 231-238. (vene k.)
- Zarkovsky, A., Allikmets, L. (1986). Analysis of dopamine receptor supersensitivity after chronic neuroleptic treatment in rats. *Drug Dependence and Emotional Behavior. Neurophysiological and neurochemical approaches.* Plenum Press, N.Y., London, 289-302.
- Vahing, V., Allikmets, L. (1970). Behavioral and visceral reactions elicited by chemical stimulation of the hypothalamus and septum in cats. *Fiziol. Zhurnal SSSR*, 56, 1, 38-47. (vene k.)

Teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest



Mihkel Veiderma,

paremal peaminister Andrus Ansip preemia kätteandmisel

Sündinud 27.12.1929 Tallinnas

1942 Tallinna II Keskkool (Reaalkool)

1953 Tallinna Polütehniline Instituut insener-keemik-tehnoloogina

1961 dotsent üldise keemilise tehnoloogia ja anorgaaniliste ainete tehnoloogia alal

1965 tehnikakandidaat, Väetiste ja Insektofungitsiidide Teaduslik Instituut, Moskva

1972 tehnikadoktor, samas

1973	professor anorgaanilise keemia alal
1975	Eesti Teaduste Akadeemia liige
1984	Eesti NSV teeneline teadlane
1994	Eesti Keemia Seltsi auliige
1994	Soome Keemikute Seltsi kirjavahetaja liige
1995	Eesti Loodusuurijate Seltsi auliige
1999	Soome Tehnikateaduste Akadeemia välisliige
2003	Rahvusvahelise Biograafia Seltsi (Cambridge) nõukogu auliige
1998	Valgetähe III klassi teenetemärk
2005	Kaitseväge eriteenete rist

On või olnud: Rahvusvahelise fosforikeemia teadusnõukogu liige ja XI rahvusvahelise fosforikeemia konverentsi esimees, Rahvusvahelise Puhta ja Rakenduskeemia Liidu liige, USA-Eesti põlevkiviuringute programmi koordinaatsiooninõukogu liige, Soome-Eesti energeetikaalase koostöörühma kaasesimees, Vabariigi Presidendi akadeemilise nõukogu liige, Vabariigi Valitsuse säästva arengu komisjoni liige, Eesti Teadusnõukogu ja Eesti Teadusfondi nõukogu liige, Maailma Energianõukogu Eesti Rahvusliku Komitee asutajaliige, NSVL Teaduste Akadeemia kahe keemiaalase nõukogu liige, Eesti Teaduste Akadeemia fosforiidinõukogu ja energeetikanõukogu esimees, Eesti Teaduste Akadeemia Toimetiste Keemia toimetuskolleegiumi esimees, Õpetatud Eesti Seltsi, Eesti Kodu-uurimise Seltsi, Eesti Teadlaste Liidu ja Estonia Seltsi liige, riigiettevõtete Silmet, Kunda Tehased, Eesti Geoloogia juhatuse liige.

Saanud: riikliku teaduspreemia (1975, 1986), Tallinna Polütehnilise Instituudi medali (1979), K. E. von Baeri medali (1989), Eesti Teaduste Akadeemia medali (1989), P. Kogermani medali (1995), Iisraeli A. Einsteini riikliku medali (1995), Baltimaade teaduste akadeemiate medali (2001).

Ametikohad:

1953–1960 Maardu Keemiakombinaadis insener, peainsener; 1960. aastast Tallinna Tehnikaülikoolis üldise keemilise tehnoloogia ja anorgaaniliste ainete tehnoloogia, hiljem keemiatööstuse protsesside ja aparatuuride kateedri dotsent, anorgaanilise keemia, hiljem anorgaanilise ja analüütilise keemia kateedri/õppetooli juhataja, keemiateaduskonna dekaan, mineraalväetiste ja -sõötade problemlaboratooriumi teaduslik juhendaja, vanemteadur, emeritprofessor; 1988. aastast Eesti Teaduste Akadeemia asepresident, peasekretär, juhatuse liige; 1992–1994 Vabariigi Presidendi Kantselei direktor.

223 teadusartiklit, neist 93 rahvusvahelistes teadusajakirjades või rahvusvaheliste teaduskonverentside väljaannetes, 8 raamatu autor, koostaja või toimetaja, 12 autoritunnistust leiutisele.

Juhendanud 14 kaitstud kandidaadi- või doktoritööd, 61 diplomiprojekti või -tööd.

Kasvasin viienda lapsena perekonnas, kus vanemad olid teist või kolmandat põlve kooliõpetajad, juured Kullamaa või Hageri kihelkonnas. Minu esimesed viisteist eluaastat möödusid Vabaduse väljaku äärses Tallinna Linna Tütarlaste Kommerts- ja Kaubanduskooli majas, kus isa oli direktor. Ümberringi kees elu, mida huviga jälgisin, võimaluste piires osalesin, kõrvaloleva raamatukogu lasteosakond aga andis küllaga lugemust. Suviti Põllkülas elasime sisse loodusesse ja külaellu, hiljem tasapisi maatöödesse. 1937. aastal astusin J. Westholmi Gümnaasiumi 1. klassi, hiljem jätkasin kooliteed 8. Algkoolis ja Tallinna 2. Keskkoolis (Reaalkoolis). Sõja lõpuaastatel muutus kõik – pool pere lastest põgenes läände, isa arreteeriti, ema kolme lapsega jäi peavarjuta ja varata. Nüüd tuli pingutada, et elus läbi lüüa. See ei läinud takistusteta – koolilõpu kuldmedal vaidlustati, TPI mandaatkomisjon peatas sisseastumise, kui see aga siiski teoks sai, tõstatus väljaviskamine, aspirantuuri vastuvõttu ministeerium ei kinnitanud jne. Siiski sain selle aja kohta valdavalt hea hariduse – tänu veel eestiaegsetele õpetajatele Reaalkoolis ja nõudlikele TPI õppejõududele õppeplaanis raames, mis ühendas keemiateaduskonnas põhjalikku alusõpet insenerlike ja tehnoloogiliste distsipliinidega. Suunatuna tööle Maardu Keemiakombinaati jäi vaid üle saada sealses keerukas olukorras hästi hakkama. Tõusin ametiredelil peainseneriks, pealegi perioodil, kui järjepanu tuli käiku lasta keemiatsehhid ja ka kohe asuda neid rekonstrueerima. Sain hea insenerikooli, soov teaduspõllule pürgida aga püsis. See sai võimalikuks, kui 1960. aastal valiti mind kui tööstuse spetsialisti TPIs keemilise tehnoloogia dotsendi ametikohale. Mahuka õppetöö kõrval tuli kohe asuda kandidaaditööd koostama, koos keemikust abikaasa Silviaga ka kodu rajama.

* * *

Teadustöö pisiku sain üliõpilasena. Hilisel õhtul ja öötundidel lahutasin füüsikalise keemia laboratooriumis põlevkiviõli keemistemperatuuri järgi fraktsioonideks, need omakorda kolonnkromatograafia abil osadeks, milles broommarvu järgi määrasin küllastumata ühendite sisalduse. Enno Siirde andis tugeva aluse keemia sidumisele protsessi ja aparatuuri kujundamisega. Diplomitöö oli Eero Rannaku ettepanekul ulmelähedane – fosforiidi lagundamine kolonnparaadis, juhtides selle suspensioonist läbi lämmastikoksiidide ja õhu segu, jättes nii kõrvale traditsioonilise lämmastikhappe saamise vahestaadiumi. Sellega oli palju nuputamist, tulemus päris usutav. Üliõpilaste Teaduslikus Ühingus tuli mul juhtida ka teaduskonna allorganisatsiooni ja koos selle juhendaja Agu Aarnaga püüda töösse kaasa tõmmata rohkem üliõpilasi.

Maardus töötades hakkas mind vaevama fosforiidi meeletu raiskamine. Kae vandatud fosforiit allutati primitiivsele rikastamisele sõelumise teel, seejärel jahvatati kuulveskis fosforiidijahuks, mille toime maaviljeluses oli tühiselt väike. Lahendust nägin kahes suunas: fosforiidi sügavamas rikastamises ja saadava kontsentraadi kasutamises efektiivsete mineraalväetiste tootmiseks. Need määrasid minu uurimuste temaatika pikemaks ajaks. Kasutades ära põllumajanduse kemiseerimise kilbile tõstmist õnnestus õige pea TPIs luua vastav

problemlaboratoorium. See andis kindlustunde jätkupidevuses ja võimaluse töösse kaasa tõmmata äsjaseid üliõpilasi ja noori tehases, hiljem rajada ka laboratooriumile hoone ja see sisustada.

Rikastamise suunas prooviti mitut meetodit, lõpuks langes liisk 1939–1940 Maardus ehitatud ja peaaegu valminud flotatsioonivabriku käikulaskmisele. Selle elluviimine põrkus aga kokku nõukogude süsteemile omaste probleemide ja barjääridega. Esiteks – plaanimajandus vajab kvantiteeti tonnides, mitte kvaliteeti, teiseks – tuli osaliselt renoveerida spetsiifiline seadmestik, saada efektiivseid flotatsioonireagente. Kui katsetest selgus, et NSVLs toodetavad reagentid ei rahuldanud vajadusi, lõin kontaktid Rootsi firmadega [Veiderma, 1979]. Tulemusena, kuigi alles 1980ndate algusest, hakati importima häid reagente ja esmakordselt eesti fosforiidist tootma kvaliteetset fosforiidikontsentraati ning sellest omakorda topeltsuperfosfaati. Senikaua tuli uuringutes läbi ajada laboratooriumis rikastatud proovidega.

Ülaltoodud asjaoludest tingituna hakati Maardus 1958. aastal superfosfaati tooma mitte algse kava järgi fosforiidist, vaid Koola apatiidikontsentraadist. Koostöös tehasega töötasime välja ja rakendasime meetmeid tootmise täiustamiseks – apatiit asendati osaliselt kergemini laguneva fosforiidiga, mis lühendas keskkonda saastavat superfosfaadi küpsemisprotsessi (põhitäitja Jüri Truusa); superfosfaadi graanulite tugevust tõsteti põlevkivituha lisamisega (Anu Kuusk); superfosfaati rikastati mikroelementidega. Granuleeritud NPK-kompleksväetise saamine superfosfaadist, karbamiidist ja kaaliumkloriidist enam tootmisesse ei jõudnud [Aasmäe jt, 1993]. Superfosfaadi tootmise heitgaaside ja -vete puhastamise tahksaaduste utiliseerimiseks selgitati võimalus regenererida nendest fluori ja saada silikogeeli (Tiit Kaljuvee).

Uuringud TPIs toimusid kolmes suunas: looduslike fosfaatide koostis ja omadused, nende lagundamine hapetega ja termiline töötlemine mineraalväetiste ja -söötade saamise eesmärgil [Veiderma, 2003]. Uurimuste ajalises dünaamikas võib eristada kaht suundumust – ühest küljest vastavate materjalide, süsteemide ja protsesside alusuuringute süvendamine, teisalt rakendusuuringute arendamine kuni tööstuslike katseteni välja. Süvendanud teadmisi ja omandanud kogemusi protsesside uurimisel fosfaatide keemia ja tehnoloogia heterogeensetes süsteemides (tahkis-vedelik-gaas), laienes tööde temaatika ajapikku ka teistele süsteemidele, peamiselt keskkonnakaitse, põlevkivi ja energeetika valdkonnas. Head nõu sain oma kandidaadi- ja doktoritöö juhendajalt akadeemik Semjon Volfkovitšilt.

Kui koostöö NSVL mitme uurimiserühmaga algas uuringute algusfaasis, siis ühisuuringud välisteadlastega hakkasid arenema 1970ndate lõpust (Ungari, Soome, Bulgaaria, USA, Iisrael, Saksamaa, Prantsusmaa). Tulemuste avaldamine NSVL keskajakirjades ja konverentsidel läks kasvavalt üle nende esitamisele rahvusvahelistes teadusajakirjades ja -konverentsidel. Sain fosfaatide uurijate rahvusvahelise pere liikmeks. Sellega seotud tegevus tipnes XI rah-

vusvahelise fosforiühendite konverentsi korraldamisega 1989. aastal Tallinnas [Veiderma, Aaviksaar, 1990].

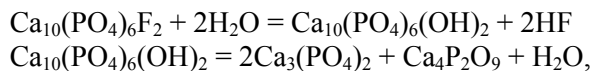
Uuringud looduslike fosfaatide koostise ja omaduste alal olid pikemat aega kesksel kohal, laienedes ja süvenedes proovide kollektsiooni täienemisega ja uute uurimismeetodite rakendamisega. Nad haarasid nii põhimineraali – apatiiti $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F},\text{OH})_2$ – kui ka lisandeid erinevates liikides ja variatsioonides. Toorme eripära tundmine oli nii selle töötlemise uurimise suunamise kui ka tulemuste erinevuse seletamise eeldus.

Uuringud algasid Eesti fosforiidi fosfaatse aine võrdlemisest teiste fosforiidide (setteliste apatiitide) omaga. Erinevalt varem levinud seisukohast fosfaadi ja karbonaatide esinemisest fosforiidis individuaalsete faasidena näitasime, et fosfaat kujutab endast reeglina B-karbonaatapatiiti, milles PO_4 -ioon, sõltuvalt fosforiidi tekke tingimustest ja hilisematest muutustest, on enam-vähem kindlas hulgas asendunud CO_3 -iooniga. Mida rohkem on CO_3 -iooni apatiidi struktuuri sisenenud, seda madalam on võre regulaarsus, seda kõrgem fosfaadi poorsus (eripind), lahustuvus keemilistes reagentides ning otsene omastatavus taimede poolt. Need näitajad koos võetuna moodustasid hea aluse looduslike fosfaatide uuele süstemaatikale. Eesti fosforiidil on suhe $\text{CO}_3:\text{PO}_4$ fosfaadis üks madalamaid fosforiidide hulgas (moolsuhtena *ca* 0,1) ja seetõttu nimetatud omadused avalduvad nõrgemini kui laialt levinud mugulfosforiidide puhul. Analüütiliste tööde käigus identifitseeriti ja määrati fosforiidis kvantitatiivselt lisandmineraalid sõltuvalt maardlast ja rikastusastmest, samuti mikrokomponentide, sh haruldaste muldmetallide sisaldus. Seoses termilisel töötlemisel leitud erinevustega koonduti hiljem Põhja-Euroopa (Soome, Rootsi, Loode-Venemaa) endogeensete apatiitide uurimisel F- ja OH- ionide ja nendevahelise vesiniksideme dünaamikale. Termilise analüüsi, gaasikromatograafia ja FTIR-spektroskoopia rakendamine koos programmeeritud andmetöötlusega võimaldas esile tuua apatiitide omadusi mõjutavad struktuursed karakteristikud, teha kindlaks struktuursed muutused apatiitide kuumutamisel – võre korrastumine, H_2O ja CO_2 eraldumine, CO_3 -iooni ümberpaiknemine võres [Вейдерма, 1975; Veiderma, Knubovets, 1980; Вейдерма, Кнубовеч, 1984; Kalyuvee jt, 1988; Veiderma jt, 1991, 1996, 1998; Tõnsuaadu jt, 2001].

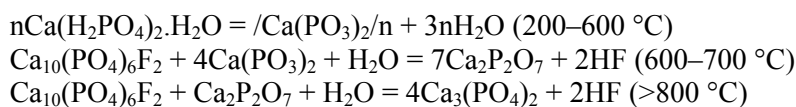
Superfosfaadi saamist Eesti fosforiidist oli Tallinna Tehnikaülikoolis varem uurinud Jaan Kopvillem. Ka tööstuslikud katsed viidi välismaa tehastes edukalt läbi. Seetõttu looduslike fosfaatide hapetega lagundamise uurimisel koonduti kontsentreeritud fosfor- ja liitväetiste ning nende tootmise vahesaaduse – fosforhappe – saamisele. Uurimused haarasid põhi- ja lisandmineraalide lagunemise kineetikat väävel- ja fosforhappega, faasianalüüsi, erinevaid tehnoloogilisi lahendusi, tahkfaasi (fosfokipsi) eraldamist suspensioonist, toorme koostise mõju selgitamist, katseid lähtefosfaadi mehaaniliseks aktiveerimiseks jne. Osutati erinevustele fosforhappe saamisel Eesti fosforiidist, määrati tingimused topeltsuperfosfaadi tootmise evitamiseks fosforiidist, kui seda lagundada Koola apatiidist saadud fosforhappega. Fosforiidi lämmastikhap-

pega lagundamise uurimisel selgitati protsessi komplitseerivad asjaolud – lämmastikoksiidide eraldumine ja intensiivne vahuteke reaktoris, mille vältimiseks püstitati piirangud toorme koostisele ja lisati reaktsioonisegule karbamiidi. Selgitati võimalus sel puhul saada nitrofoskat ja nitroammofoskat, eraldada fluori ja haruldasi muldmetalle. Uuriti ka eelneva kuumutamise või termokeemilise rikastamise mõju looduslike fosfaatide töötlemisele hapetega ning selgitati fosforiidierimid, mille puhul see on tulemuslik (kaltsiidi, doloomiidi, püriidi, orgaanilise aine sisalduse korral) või vastupidi – võib komplitseerida protsessi (mõned ränimineraalid). Need uurimused [Вейдерма, Аасамяэ, 1973; Ребане и др, 1980; Viisimaa jt, 1988] viidi süsteemselt läbi Ernst Aasamäe töörühmas (Jelena Kudrjavitseva jt).

Kõige mahukama ja tulemustelt uudsema osa looduslike fosfaatide töötlemisega seotud uurimustest moodustas nende termiline töötlemine fosforväetisteks ja -söötadeks [Veiderma, 2000c]. Jätkates 1920-ndatel Tartu Ülikoolis Jaak Kuuse poolt teostatud katseid alustasime Eesti fosforiidi hüdrotermilise töötlemisega, tegime võrdluskatseid Koola apatiidiga, hiljem koondusime uuele toormele – Kovdori ja Siilinjärvi (Soome) maardla apatiidile. Uuriti fosfaadi fluorärastuse kineetikat ja difusiooni osatähtsust selles, reaktsiooni tasakaalu ja kemismi loodusliku toorme ja puhaste ühendite kasutamisel, faasimuutusi ning sulamiskarakteristikuid, matemaatilisi seoseid, saaduste lahustuvust jm. Arvestades reaktsioonitemperatuuri (1300–1500 °C) ja toorme sulamistemperatuuri lähedust ning protsessi madalat intensiivsust tahkise stationaarses olekus tuli välja töötada uued lahendused protsessi stabiilseks ja intensiivseks läbiviimiseks. Need seisnesid toormele fosforhappe lisamises mõõdukas hulgas (8–10 % üldfosforist) ja keevkihi-tehnoloogia rakendamises [Вейдерма и др, 1975, 1977; Volkovich jt, 1978; Veiderma jt, 1988]. Kui apatiidi hüdrotermiline lagundamine tavakujul väljendub võrranditega:



siis uue meetodi puhul apatiidi lagundamises mängisid veeauru asemel põhirolli reaktsioonid kondenseeritud polü- ja tsüklofosfaatidega, mis tekkisid fosforhappe ja apatiidi reaktsioonisaaduse $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ kuumutamisel:



Toormes olevad lisandid põhjustasid täiendavaid konkureerivaid reaktsioone. See kutsus välja vajaduse mahukateks alusuuringuteks eesmärgiga uurida puhastes süsteemides vesinikfosfaatide dehüdratiseerimist, mono- ja polüfosfaatide ning apatiidi, fluoriidi, karbonaatide, silikaatide ja alumosilikaatide vahelisi termoreaktsioone [Pyldme jt, 1976; Veiderma jt, 1977, 1987, 1990]. Granuleeritud segu töötlemine keevkihis võimaldas reaktsioonitsoonis hoida

ühtlast temperatuuri, vähendada difusioonakivistust ja viia protsessi läbi kõrge intensiivsusega.

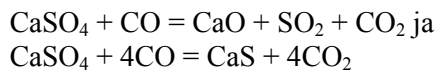
Laboratoorsete uurimuste ja arvutuslike tööde alusel anti välja lähteandmed pooltööstusliku tsehhi (0,5 t fosfaati tunnis) projekteerimiseks, mis ka Maardus valmis ehitati. Põhiseade kujutas endast kahe keevkihiga reaktorit, mille ülemises kihis toimus lähtesegu ettesoojendamine, alumises segu töötlemine üheaegse maagaasi põletamisega kihis. Pikaajalised katsetused kinnitasid uurimuste tulemusi ja andsid piisavalt saadust selle efektiivsuse hindamiseks põllumajanduses.

Esialgelt saadud termofosfaat vastas lahustuvuselt 0,4%-s soolhappes ja fluori jääksisalduselt (alla 0,2%) söödafosfaadile püstitatud nõudmistele, kuid polnud piisavalt mõjus väetisena. Otsides saaduse omaduste parandamiseks sobivaid looduslikke mineraale tegime kindlaks, et parimaid tulemusi saadakse, kui lähteapatiidile lisatakse nefeliini. Sel puhul on saaduse põhifaasideks $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ tahked lahused Ca_2SiO_4 ja teiste silikaatidega [Veiderma jt, 1993; Tõnsuaadu jt, 1993; Veiderma, Tõnsuaadu, 1998].

Laboratooriumis uuriti ka lisandirohkete fosforiitide rikastamist termilistel ja termokeemilistel meetoditel eesmärgiga saada sobivamat tooret nende töötlemiseks hapetega [Kaljuvee jt, 1995]. Osaleti esimese tööstusliku kolmekihilise keevkihireaktori tellimuse koostamisel ja selle evitamisel mugulfosforiitide rikastamiseks Lopatino tehases. Termiliste uurimuste ja katsetööde järjepidevaks põhitäitjaks oli Rein Kuusik, nendes osalesid Helgi Veskimäe, Tiit Kaljuvee, Juta ja Meeme Põldme, Kaia Tõnsuaadu, Viktor Skorobogatov.

Tööde käigus laienesid alusuuringud apatiitide sünteesi ja sünteetiliste apatiitide struktuuri ja omaduste alal [Tõnsuaadu jt, 1995, 1997, 1999, 2002; Koel jt, 1998; Veiderma jt, 2005]. Sünteesiti ja iseloomustati apatiite, milles Ca oli osaliselt asendunud Na ja Mg-ga, PO_4 -rühm CO_3 -ga, F ja OH suhe aga varieerus, tehti kindlaks kuumutamisel toimuvad muudatused nende koostises ja struktuuris. Seejärel uuriti raskmetallide (Cd, Mn, Cr, Zn jt) sidumist erinevate apatiitidega, mis võib leida rakendust heitvete ja saastunud pinnase puhastamisel ja aidata seletada muutusi bioloogilistes apatiitides. Uudsed on ka tulemused apatiidi ja SO_2 vaheliste reaktsioonide kohta kuumutamisel ning SO_4 -iooni inkorporeerumisest apatiidi struktuuri (Kaia Tõnsuaadu, Merike Peld). Uusi tulemusi saadi Gustav Tammanni assistendi Julius Kurroli poolt Tartus sünteesitud ja Kurroli soolaks nimetatud kõrgmolekulaarse naatrium- ja kaaliumpolüfosfaadi kohta [Griffith jt, 1993].

Uuringute käigus tugevnes suunitlus keemiatööstuse tahkheitmete, eriti fosfokipsi, utiliseerimiseks. Fosfokips tekib heitmena suurtes hulkades fosforhappe (topeltsuperfosfaadi ja liitväetiste saamise vahesaaduse) tootmisel looduslike fosfaatide lagundamisel väävelhappes. Lähtudes ideest regenerereida fosfokipsist väävelhapet ja kujundada tsükliline jäätmevaba protsess, alustasime sellekohast uuringut. Need sisaldasid konkureerivate reaktsioonide



tasakaalude ja kineetika ning reagentide difusiooni uurimist reaktsioonide eesmärgipäraseks suunamiseks, samuti toormest pärinevate lisandite mõju ja tahkjäägi kasutamise uurimist lubimaterjalina. Kuna ka siin nagu fosfaatide hüdrotermilise töötlemise puhul oli tegemist kõrgtemperatuurilise heterogeense tahkis-gaas-protsessiga, viidi rakendusuringud läbi keevkihireaktoris, algul laboratoorsel seadmel, seejärel samas Maardu katsetsehhis, kuid seekord reductseerivas keskkonnas. Kasutades kolmest erinevast toormest (Koola apatiit, Karatau ja Tuneesia fosforiit) toodetud fosfokipsi, näidati võimalust sellest SO₂ regenereerida, tehti kindlaks optimaalsed protsessi parameetrid ning tahkjäägi koostis ja omadused. Uuringud teises suunas – CaS või väavli saamiseks – piirdusid eksperimentidega laboratooriumis. Nende uuringute põhitähtjateks olid Rein Kuusik, Anu Kuusk ja Andres Trikkel [Kuusik, Veiderma, 1990].

Kõik teemade eelpool nimetatud põhitähtjad kaitsesid kandidaadi- või doktorkraadi. Uurimustest võtsid pikemaajaliselt osa Anne Rebane, Ludmilla Viisimaa, Marve Einard, Helle Ehala, Heinrich Vilbok, Villem Bender, Kalju Utsal.

Kõrvuti uurimustega fosfaatide keemia ja tehnoloogia alal tuli mul Teaduste Akadeemia fosforiidiprogrammi juhina korraldada kompleksseid uuringuid, koguda ja esitada teaduslik-tehnilist argumentatsiooni, vältimaks NSVL keskvoimude poolt kavandatud fosforiidimaardlate evitamist madalal tehnilisel tasemel ja keskkonda ähvardaval viisil. Koostöös paljude uurijatega õnnestus nende kavade elluviimist pidurdada 15 aasta jooksul kuni fosforiidisõjani välja [Veiderma, 2000a]. Keskkonnahariduse ja -teaduse alal laiemalt algatasin keskkonnatehnoloogia eriala avamise Tallinna Tehnikaülikoolis ja Ökoloogia Instituudi loomise.

1980ndate lõpust laienes minu tegevus põlevkivitööstuse ja energeetika valdkonda, sedapuhku rohkem analüütiku ja eksperdina, esinejana konverentsidel või ürituste korraldajana kui üksikküsimuste uurijana [Veiderma, 1996, 1997ab, 2000b, 2004; Käär jt, 1996; Tettinger, Veiderma, 1997]. Laboratooriumis (nüüdse nimega anorgaaniliste materjalide laboratoorium) hakati selle suunalisi probleeme, eriti seotuna keskkonnakaitsega, uurima Rein Kuusiku juhtimisel. 1989–1990 olin NSVL haardest vabaneva riigi esimese energiastrateegia koostamise töörühma juht, hiljem Akadeemia energeetikanõukogu esimees. Energeetikanõukogu vaidlustas nn NRG-lepingu sõlmimise, töötab läbi Eesti energeetika sõlmküsimusi ja püüab mõjutada vastavaid otsuseid, tulevikuvisionis aga peab Eestit silmas Läänmeremaade ühise energiasüsteemi osana.

Suheldes Teaduste Akadeemia liikmetega ning teadlastega erinevatest teadusasutustest ja maadest, osaledes paljudes aruteludes, mu tegevus- ja huvisfäär

laienesid ning süvenes probleemide terviklikum käsitus. Püüdsin anda ka omapoolse panuse Akadeemia tegevusesse.

Iseseisvuse taastamise järgselt, aastatel 1992–1994 olin Vabariigi Presidendi Kantselei direktor. Hinnangu minu tööle selles ametis andis Lennart Meri, kes kirjutas mulle "...Soovin juubelisünnipäevaks palju õnne ja jõudu tööle, ennekõike aga tänan ennastsalgava töö eest Eesti vaimsuse ja eriti traditsioonide tagasitoomisel Kadriorgu!" Ise pean oluliseks ka Vabariigi Presidendi akadeemilisele nõukogule alusepanekut [Veiderma, 2001].

KIRJANDUS

Aasamäe, E., Arumeel, E., Einard, M., Veiderma, M. (1993). Obtaining granular NPK fertilizers from single superphosphate, KCl and urea. *Fertilizer Research*, 35, 161-167.

Griffith, E., Ngo, T., Veiderma, M. (1993). Kurrol's salts. *Proc. Eston. Acad. Sci. Chem.*, 42, 113-123.

Kaljuvee, T., Kuusik, R., Veiderma, M. (1995). Enrichment of carbonate-phosphate ores by calcination and air separation. *Int. J. Miner. Process.*, 43, 113-121.

Kalyuvee, T., Veiderma, M., Tynsuaadu, K., Vilbok, H. (1988). Physico-chemical transformations during heating of phosphorites. *J. Therm. Anal.*, 33, 839-844.

Koel, M., Kudrjasova, M., Tõnsuaadu, K., Veiderma, M. (1998). Thermo-chromatography for evolved gas analysis of apatite materials. *J. Chromatogr. A*, 819, 75-83.

Kuusik, R., Veiderma, M. (1990). Thermal processing of phosphogypsum. *Proc. III Int. Symp. on Phosphogypsum*. Orlando, USA, 1, 267-279.

Käär, H., Veiderma, M., Zebergs, V., Vilemas, J. (1996). Prospects of natural gas in Baltics: efficiency of consumption and security of supply. *Proc. 19th IAEE Conf.*, Budapest, 485-493.

Pyldme, M., Buzagh-Gere, E., Pyldme, J., Veiderma, M. (1976). Thermal analysis of the interaction of phosphorite with condensed phosphates. *J. Therm. Anal.*, 10, 195-204.

Tettinger, P. J., Veiderma, M. (Hrsg). (1997). *Probleme und Strategien der Umstrukturierung von Industrieregion – Mit Blick auf Ida-Viru in Estland*. Ruhr- Universität Bochum, Stuttgart, Boorberg, 211 s.

Tõnsuaadu, K., Koel, M., Veiderma, M. (2001). Thermal analysis of Israel phosphorites with determination of the evolved gases. *J. Therm. Anal. Calor.*, 64, 1247-1255.

- Tõnsuaadu, K., Peld, M., Bender, V., Veiderma, M. (1999). Binding of SO₂ by synthetic substituted apatites. *J. Therm. Anal. Calor.*, 56, 35-42.
- Tõnsuaadu, K., Peld, M., Leskelä, T., Mannonen, R., Niinistö, L., Veiderma, M. (1995). A thermoanalytical study of synthetic carbonate-containing apatites. *Thermochim. Acta*, 256, 55-65.
- Tõnsuaadu, K., Peld, M., Quarton, M., Bender, V., Veiderma, M. (2002). Studies on SO₄²⁻ ion incorporation into apatite structure. *Phosph., Sulfur, Silicon*, 177, 1873-1876.
- Tõnsuaadu, K., Peld, M., Veiderma, M. (1997). Removal of Cd²⁺ and Mn²⁺ ions from aqueous solutions by synthetic cation-substituted calcium-carbonate-apatite. *Toxicol. Environ. Chem.*, 64, 145-154.
- Tõnsuaadu, K., Rimm, K., Veiderma, M. (1993). Composition and properties of thermophosphates from apatite and aluminosilicates. *Phosph., Sulfur, Silicon*, 84, 73-81.
- Veiderma, M. (ed.) (1979). Proceedings of the Soviet-Swedish Symposium on the Benefication of Phosphate Rock. *Acad. Sci. Estonian SSR*, Tallinn, 188 p.
- Veiderma, M. (1996). Common Baltic energy system – a precondition for sustainable development. *Energy Exploration and Exploitation*, 14, 127-132.
- Veiderma, M. (1997a). Development of the Baltic Sea region gas market. *Proc. and Ref. papers of the Int. Conf. European Energy Markets: Integration of Central European, Baltic and Balkan Countries in the European Energy Economy*. Vienna, 37-44.
- Veiderma, M. (1997b). Sustainable energy development in the Baltic Sea Region. *Proc. Seminar: Energy Policy Dialogue between the Baltic and Nordic States*. Oslo, 153-161.
- Veiderma, M. (2000a). Fosforiidiuurimine Eestis – kas pidu või ohust ajendatud tegevus? *Akadeemia*, 3, 626-633.
- Veiderma, M. (2000b). Industrial complex in Northeast Estonia: technical, economic and environmental aspects. *Turning a Problem into a Resource*, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht etc., 1-4. (NATO Sci.Ser. 1: Disarmament Technologies; 28).
- Veiderma, M. (2000c). Studies on thermochemistry and thermal processing of apatite. *Proc. Eston. Acad. Sci. Chem.*, 49, 1, 5-18.
- Veiderma, M. (koost). (2001). Eestile mõeldes. Vabariigi Presidendi Akadeemiline Nõukogu. Teaduste Akadeemia Kirjastus, Tallinn, 197 lk.
- Veiderma, M. (2003). Kokkuvõtte uurimustest /Synopsis of the research. Anorgaanilise keemia ja tehnoloogia uurimisrühm. *Inorganic Chemistry and Technology Research Group. Bibliograafia 1960-2002*. TTÜ, Tallinn, 7-20.

- Veiderma, M. (2004). Estonian oil shale – resources, research and usage. Proc. of DOE Technical Review Meeting “Oil Shale – Strategic Significance of America’s”. Virginia, USA, 1-18.
- Veiderma, M., Aaviksaar, A. (1990). Phosphorus chemistry in 1989, a review of the Tallinn conference. *Phosph., Sulfur, Silicon*, 49/50, 41-43.
- Veiderma, M., Kaljuvee, T., Knubovets, R., Põldme, M., Tõnsuaadu, K. (1990). Thermal transformations in systems based on natural apatites. *Phosph., Sulfur, Silicon*, 51/52, 125-128.
- Veiderma, M., Knubovets, R. (1980). Thermal transformations in phosphorites and their use for the beneficiation of phosphate rock. Proc. 2-nd Int. Congr. on Phosphorus Compounds. Boston, USA, 345-362.
- Veiderma, M., Knubovets, R. (1991). Kiruna apatite. *Scand. J. Metall.*, 20, 329-331.
- Veiderma, M., Knubovets, R., Tõnsuaadu, K. (1996). Fluorhydroxyapatites of Northern Europe and their thermal transformations. *Phosph., Sulfur, Potass.*, 109-110, 43-46.
- Veiderma, M., Knubovets, R., Tõnsuaadu, K. (1998). Structural properties of apatites from Finland studied by FTIR spectroscopy. *Bull. Geol. Soc. Finland*, 70, 1-2, 69-75.
- Veiderma, M., Põldme, M., Põldme, J. (1977). The reactions between condensed phosphates and natural phosphates or fluorite by heating. Proc. I Inter. Congr. on Phosphorus Compounds. Rabat, Maroc, 449-456.
- Veiderma, M., Põldme, M., Tõnsuaadu, K. (1988). Thermische Entfluorierung von Apatit. *Chemische Technik*, 40, 169-172.
- Veiderma, M., Põldme, M., Tõnsuaadu, K., Utsal, K. (1987). Mechanism of reactions in mixtures of calcium polyphosphate with apatite and accompanying minerals during heating. *J. Therm. Anal.*, 32, 1093-1103.
- Veiderma, M., Tõnsuaadu, K. (1998). Thermophosphate Fertilizers from Siilinjärvi Apatite. *Acta Polytechnica Scandinavica. Chemical Technology*, 239, 1-26.
- Veiderma, M., Tõnsuaadu, K., Knubovets, R., Einard, M., Põld, M. (1993). Thermophosphates on the basis of apatite and aluminosilicates. *Phosph., Sulfur, Silicon*, 76, 187-190.
- Veiderma, M., Tõnsuaadu, K., Knubovets, R., Põld, M. (2005). Impact of anionic substitutions on apatite structure and properties. *J. Organomet. Chem.*, 690, 2638-2643.
- Viisimaa, L., Veiderma, M., Aarnio, P., Niinistö, L. (1988). Distribution and recovery of rare earths from Estonian phosphorites during acidic decomposition. Int. Symp. Inorg. Anal. Chem., Lappeenranta, Finland, 115-117.

Volkovich, S., Veiderma, M. (1978). Progress in hydrothermal processing of phosphate rock. Proc. Techn./Econ. Conf. Fertilizer Technology, Orlando, USA, 49-62.

Ребане А. И., Биткова И. В., Вейдерма М. А., Юсупов Т. С. (1980). Влияние механической активации на реакционную способность природных фосфатов при получении двойного суперфосфата. Ж. прикл. химии, 3, 484-488.

Вейдерма М. А. (1975). Физико-химическая и технологическая характеристика природных фосфатов различных месторождений. Минер. Удобрения и их применение в сельском хозяйстве : Докл. III науч.-техн. конф., Варна, 26-28 мая 1975, 37-43.

Вейдерма М. А., Асамяэ Э. Э. (1973). Исследование поточного способа получения двойного суперфосфата с примечением различных видов сырья. Хим. пром-сть, 10, 756-759.

Вейдерма М. А., Винкман А. О., Вольфович С. И., Куусик Р. О., Скоробогатов В. А., Ягодина Т. Н. (1975). Обесфторивание маардуского фосфорита в псевдооживленном слое на заводской опытной установке. Хим. пром-сть, 3, 193-195.

Вейдерма М. А., Кнубовец Р. Г. (1984). Природные фосфаты и фосфатное сырьё. Изв. АН СССР. Неорганические материалы, 20, 6, 991-998.

Вейдерма М. А., Куусик Р. О., Ягодина Т. Н., Скоробогатов В. А. (1977). Гидротермическая переработка природных фосфатов в псевдооживленном слое. Проблемы химии и хим. технологии : некоторые новые направления хим. технологии и химизации сельского хозяйства. Наука, Москва, 184-192.

Teaduspreemia

innovaatilise tooteni viinud väljapaistva teadus- ja arendustöö eest teemal
“Ülikiire proovirootatsiooni tehnika arendamine”



Ago Samoson (kollektiivi juht, esimene vasakult)

Sündinud 9.07.1955 Siberis, Tulunis

1973 Võru Keskkool
1978 Tartu Ülikool, füüsika-keemiateaduskond
1978–1980 Küberneetika Instituudi nooremteadur
1980– Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut: teadur, vanemteadur,
aastatel 2002–2006 direktor
1984 füüsika-matemaatikakandidaat
1989 Research&Development 100, Chicago 1989
1997 teaduspreemia täppisteaduste alal
2001 Valgetähe III klassi teenetemärk

Stažeerimine: Kalifornia Ülikool (Berkeley), Bruker Analytic GmbH, Uppsala
Ülikool.

Avaldanud üle 80 teaduspublikatsiooni.

Tiit Tuherm (kolmas vasakult)

Sündinud 13.12.1948 Tallinnas
1967 Tallinna 44. Keskkool
1972 Tallinna Tehnikaülikool, tööstuselektroonika
1972–1980 Küberneetika Instituut: insener, vanem-insener, grupijuht
1980– Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut: grupijuht, teadur
Avaldanud üle 20 teaduspublikatsiooni.

Jaan Past (viies vasakult)

Sündinud 2.11.1939 Narvas
1958 Viljandi I Keskkool
1963 Tallinna Tehnikaülikool, automaatika ja telemehaanika
1989 tehnikakandidaat, Leningradi Tehnoloogiainstituut
1972 Eesti NSV preemia tööde eest tuumamagnetresonants-spektroskoopia alal (kollektiivi liige)
1962–1980 Küberneetika Instituut: insener, vaneminsener, nooremteadur, grupijuht
1980– Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut: grupijuht, vanemteadur
Avaldanud üle 50 teaduspublikatsiooni.

Andres Reinhold (neljas vasakult)

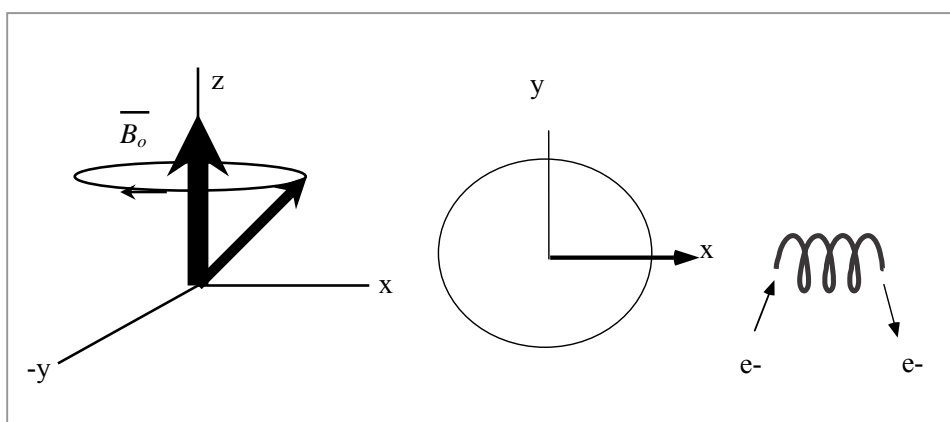
Sündinud 2.08.1955 Kiviõlis
1973 Kiviõli I Keskkool
1979 Tallinna Tehnikaülikool, peenmehaanika
1978–1980 Küberneetika Instituut, insener
1980– Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut: vaneminsener, grupijuht, teadur
Avaldanud 10 teaduspublikatsiooni.

Tiit Anupõld (teine vasakult)

Sündinud 24.04.1955 Tallinnas
1973 Tallinna Reaalkool
1978 Tartu Ülikool, füüsika-matemaatikateaduskond, biofüüsika
1978–1983 Eksperimentaalbioloogia Instituut, molekulaarbioloogia sektori insener
1983–1993 TTK “Desintegraator” arvutiosakond, konstruktor
1993– Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut: insener, teadur
Avaldanud 12 teaduspublikatsiooni.

Tuumamagnetresonants (TMR, ingl NMR) on laialt levinud ja universaalne analüütiline meetod ainete struktuuri ning dünaamika uurimiseks.

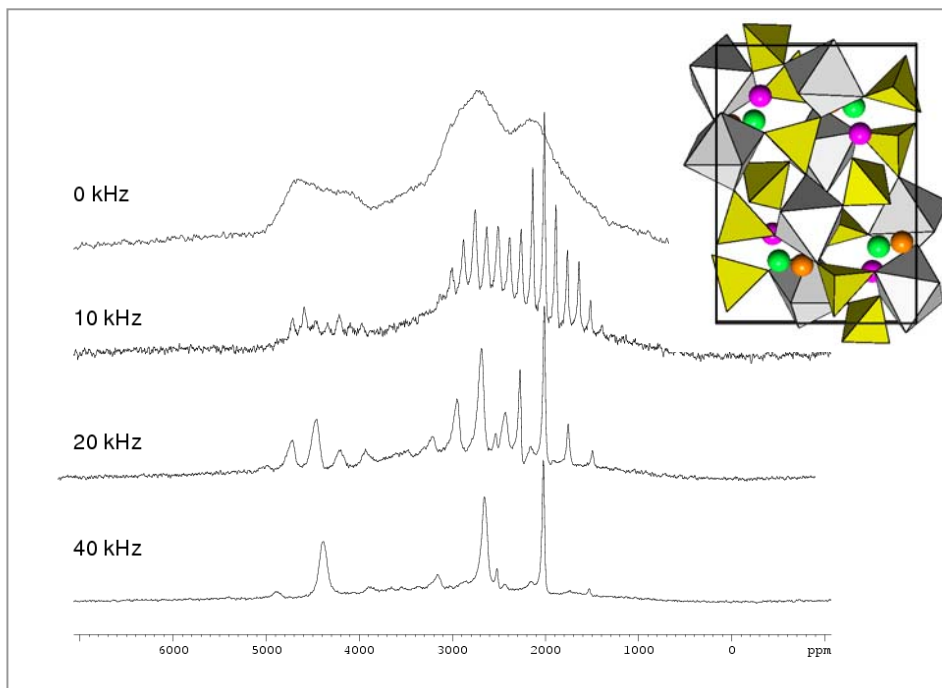
Klassikaliselt võib tuumamagnetresonantsi nähtust kirjeldada kui magnetväljas asuvate tuumapsinnide vaba pretsessiooni registreerimist (joonis 1). Selleks kasutatakse tugevasse püsिमagnetvälja (tänapäeval kuni 45T) paigutatavat mõõtepead, mis võtab vastu tuumaspinnide tekitatud magnetvälja võnked. Need võnked juhitakse arvutisse, kus Fourier teisenduse abil tehtav sagedusanalüüs annab ettekujutuse võngete spektraalsest koosseisust.



Joonis 1.

TMR signaali teke: ümber tugeva alalismagnetvälja pretsesseeriv aatomituuma magnetmoment indutseerib elektromotoorjõu mõõtepoolis.

Tahkistes saadakse see eristatavus uuritava aine kiire pöörlemisega nn maagilise nurga all magnetvälja suhtes. Pöörlemise eesmärgiks on magnetvälja kiire suunamine uuritava objekti suhtes piki kolme ristuvat ruumitelge. Sel juhul annavad kõik uuritava aine väikseimadki osakesed signaali, mille sagedus võib sõltuda ainult atomaarsete positsioonide PÕHIMÕTTELISEST erinevusest. Signaali sagedus ei sõltu enam selle osakese ruumilisest SUUNAST uuritavas koosluses (suur hulk juhuslikult orienteeritud võimalusi täidab peaaegu ühtlaselt kogu võimaliku spektraalpiirkonna) ja teiste tuumaspinnide mõjust. Näitena on esitatud kütuseelementides katoodina kasutatava $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ spekter (joonis 2), registreerituna staatilises olekus ja erinevate rotatsioonikiirustega. Sel juhul ilmneb, et fosfori aatomid esinevad struktuuris tegelikult kolmes erinevas positsioonis.



Joonis 2.

$\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ spekter objekti staatilises olekus ja kolmel erineval rotatsioonikiirusel, kus eristuvad põhimõtteliselt erinevad atomaarsed positsioonid.

Kriitiliseks parameetriks saadava lahutusvõime ja informatsiooni kvaliteedi osas on proovi pöörlemise kiirus. KBFI töörühm on kümneaastase arendustöö tulemusel loonud uue potentsiaali tahke keha tuumamagnetresonantsis. Rootorite lineaarmõõtude vähendamise, suurt tõmbetugevust taluva tehnilise keraamika kasutamise ja konstruktsiooni põhimõttelise täiustamise tulemusel on saavutatud rohkem kui viiekordne pöörlemiskiiruse kasv. Proovi hoidmiseks kasutatakse ülitugevast tehnilisest keraamikast paagutatud ja lihvitud rootoreid.

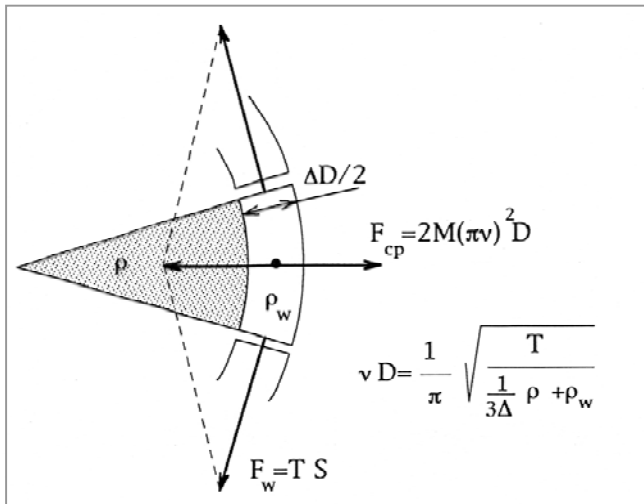
Joonisel 3 (fotol) on KBFI tsentrifugaalse sadestamise abil vormitud 1 millimeetrise läbimõõduga tsirkoonoksiidist rootor, mille sulgemiseks kasutatakse spetsiaalselt polümeerist korke. Ühe korgi aluspind moodustab Bernoulli laagri, mis hoiab rootorit aksiaalselt, teise korgi sisse on graveeritud taskud gaasijoalt saadava impulsi püüdmiseks.



Joonis 3.
1 millimeetrise läbimõõdu-
ga tsirkoonoksiidist rootor.

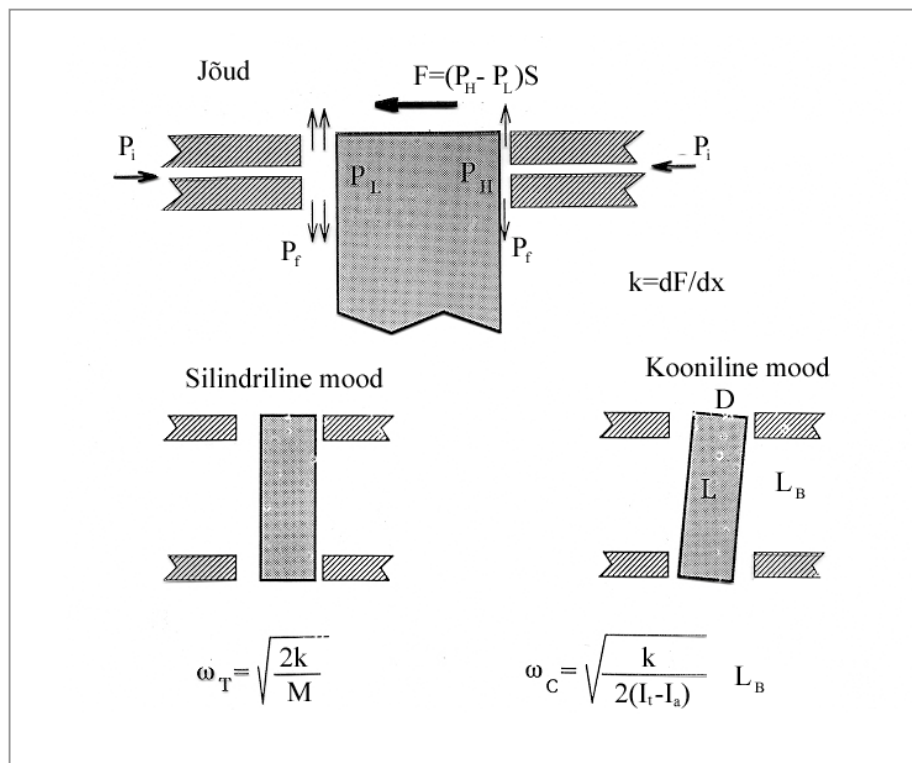
Rootori seinas läheduses muutub aine tänu kiirele pöörlemisele üle miljoni korda raskemaks kui maa gravitatsiooniväljas, mis avaldab rootori materjalile pinget rebenemise piirini.

Lihtsustatud valemi järgi on rootori piirkiiirus pöördvõrdeline diameetriga, sõltudes ka uuritava aine tihedusest, rootori materjali tõmbetugevusest ning rootori seinapaksusest. Praktiliselt on saavutatud $vD=90$ Hz m. Rotor positioneeritakse suuritel kiirustel gaaslaagrite abil, üldjuhul suruõhuga.



Joonis 4.
Rootori seinaelemendi-
le mõjuv jõudude dia-
gramm.

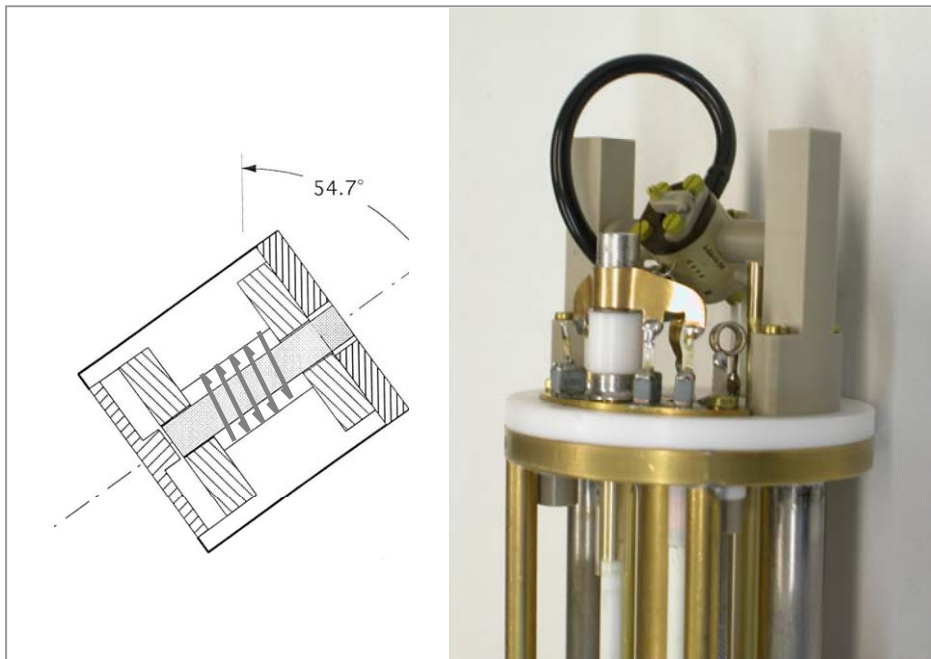
Gaaslaagerdusel on põhimõtteliselt kahekordne roll. Esiteks hoiab see madalana kiiret liikumist takistava hõõrdumise. Teiseks, rootor saab teatud piirides valida oma asendi, st inertsmomendi telg ja sümmeetriatelg ei pea tingimata ühtima. See asjaolu on väga oluline näiteks mehhaaniliste omaresonantside (kooniline ja translatoorne) ületamisel. Õhklaager hoiab rootorit paigal tänu isereguleeruvale rõhkude vahele. Kui suruõhu pealevool on sobival määral piiratud, toimib rootorile lühiajaliselt tsentreeriv jõud, nii nagu näidatud joonisel 5.



Joonis 5.

Rotorit hoidva hüdrostaatilise jõu tekkimise põhimõte. Telgsümmeetrilist asendit tagava jõu toimel võib rootor sattuda ka mitmesse mehhaanilisse resonantsi. Tüüpiliselt on mehhaaniliste resonantside sagedused mõne kiloherti piirkonnas, nende ületamist võimaldab näiteks jõukonstandi ehk laagirõhu alandamine.

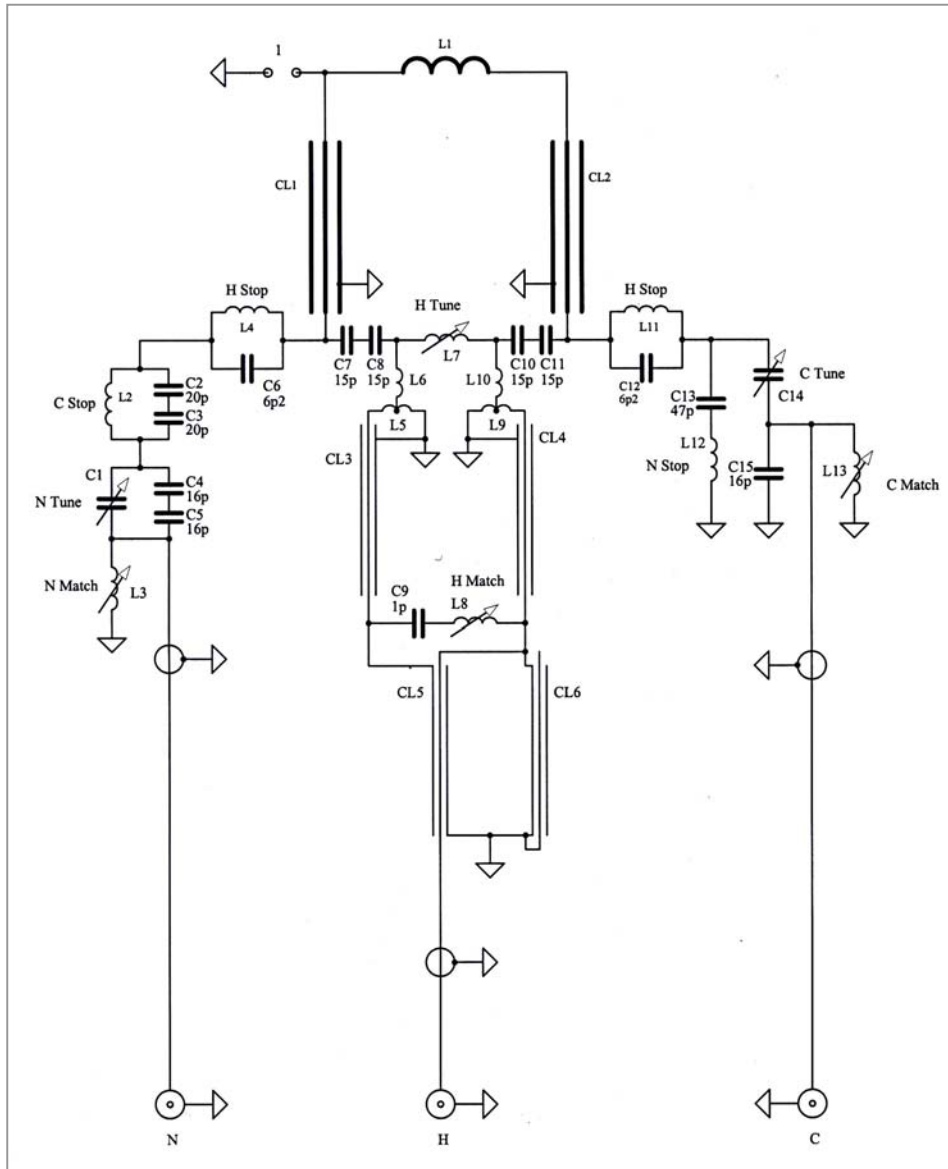
Rotatsioonimooduli põhimõtteline ehitus on kujutatud järgmisel joonisel 6b, kus on näha ka signaali registreeriv mõõtepool. Paremalt on esitatud mõõtepea prototüüp.



Joonis 6.
Rotatsioonimooduli põhimõtteline ehitus. a – läbilõige, b – mõõtepea.

Lisaks 1–2 mikromeetri täpsusega viimistletud mehhaanikale peavad tuumamagnetresonantsi andurid kindlustama ka mitmesuguste kõrgsageduslike magnetväljade rakendamise uuritavale objektile, selle objekti stabiilse temperatuuri ning üldjuhul väga nõrga signaali vastuvõtu. Joonisel 7 on esitatud mõõtepea elektrooniline skeem.

Tegemist on nn kolmikresonantsi anduriga mille puhul on võimalik uuritavale objektile üheaegselt rakendada kolme kõrgsagedusvälja. Objekt asub mõõtepoolis L1, milles tekitatakse sisendite N, H ja C kaudu lämmastiku, vesiniku ja süsiniku tuumade üleminekutele vastavate sagedustega resonantsed magnetväljad. Samad sisendid on ühtlasi ka TMR signaali väljundid, mille kaudu objekti signaal suunatakse pärast võimendamist ja faasitundlikku detekteerimist arvutisse.



Joonis 7.
Mõõtepea elektrooniline skeem.

Antud skeem võimaldab eri kanalite sageduse täppishäälestust ja sobitamist ülekandekaabliga, tagades suure efektiivsuse ja kanalite hea omavahelise isoleerituse. Konstruktsioon talub suhteliselt võimsaid (kuni 300 W) kõrgsagedusimpulsse, mis on vajalikud piisava tugevusega väljade tekitamiseks mõõtepoolis. Vesiniku kanal, mille sagedus antud mõõtepeas on 600 MHz, on kasutatud jaotatud parameetritega ahelaid, tagades ühtlasi mõõtepooli otstele mõjuva pinge balansseerimise. Balansseerimine aitab oluliselt vähendada mõõtepooli parasiitmahtuvustest põhjustatud kõrgsagedusvälja ebahomogeensust ja sellest tulenevaid probleeme. Kuna ülikiire pöörelemine nõuab rootori mõõtude ja seega ka uuritava aine koguse vähendamist, muutub mõõtepeade tundlikkus eriti kriitiliseks parameetrik. Kõrge tundlikkuse saavutamiseks kasutame väikeste kadudega materjale, kõrge hüveteguriga detaile ja skeemi optimeerimist simuleerimisprogrammide abil. Mõõtepea materjalide valikul tuleb arvestada ka polariseeriva magnetvälja kõrge homogeensuse säilitamise nõuet. Ka kergelt diamagneetilised plastmassdetailid võivad mõõteobjekti vahetus läheduses oluliselt suurendada spektrijoonte laiust.

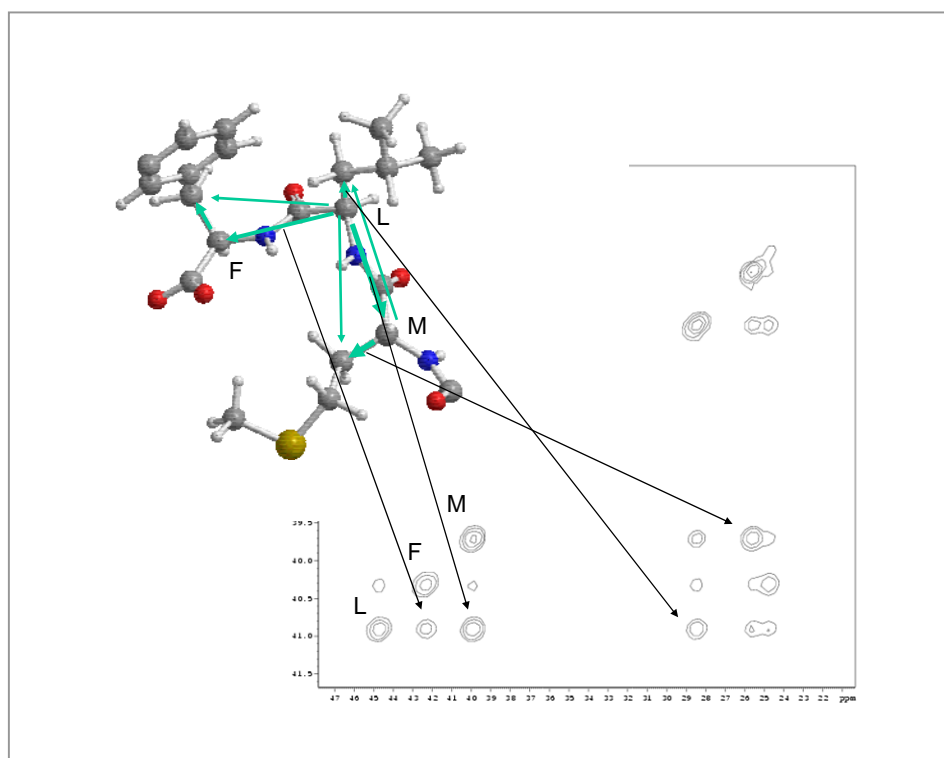
Seeriaviisiliselt toodetavatest anduritest on praegu kõige kiiremad firmade Bruker ja Chemagnetics/Varian poolt pakutavad andurid, mis võimaldavad roteerida kuni 35000 pööret sekundis. KBFIs on kolme viimase aasta jooksul töötatud kiirustel kuni 70000 pööret sekundis. Et probleem on väga aktuaalne, näitavad käesoleva artikli kirjutamise ajal ilmunud Ameerika konverentsietekande teesid firmalt Varian, kus kirjeldatakse samuti 70000 pöördelist andurit. Meil on saavutatud praeguseks testmooduliga üle 90000 pööret sekundis. Sellise kiiruse saavutamiseks on esialgu vajalik heeliumi gaasi kasutamine.

Tänu rotatsiooniga seotud eksperimentaalsete võimaluste avardumisele on tekkinud uued printsiibid TMR mõistmiseks ja arendamiseks. Esmakordselt tekkis võimalus ka rootori väga järsuks kiirendamiseks spinsüsteemi kodeeringu säilimise vältel, sellel põhinev rotatsioonikiiruse laotus võimaldab uurida näiteks aminohappe järjestust valkudes. Esitatud spektris (joonis 8) on näha tripeptiidi alfa- ja beetasüsinike korrelatsioonijooned, mis lubavad vastavaid aatomeid ja aminohappeid ruumiliselt seostada.

Rotatsiooni piirkiruse kasv on uue teoreetilise lähenemise aluseks, kus spinsüsteemi arengu arvutamise ajaliselt kiireimaks protsessiks võetakse mehhaaniline rotatsioon ja alles siis magnetväljade mõju. Oluliselt kasvavad TMR spektroskoopia võimalused eriti kõrgetes magnetväljades, kuna homogeenne joonelainenemine ei sõltu väljatugevusest, aga keemiliste nihete vahe (st aatomite eristatavus) on sellega proportsionaalne. Rotatsiooni piirväärtuse kasv on oluline nii väga tugevas vastasmõjus olevate suure tihedusega spinsüsteemide uurimisel kui ka vastupidi, väga nõrgalt seotud aatomite topoloogia mõõtmisel. Viimasel juhul on oluline

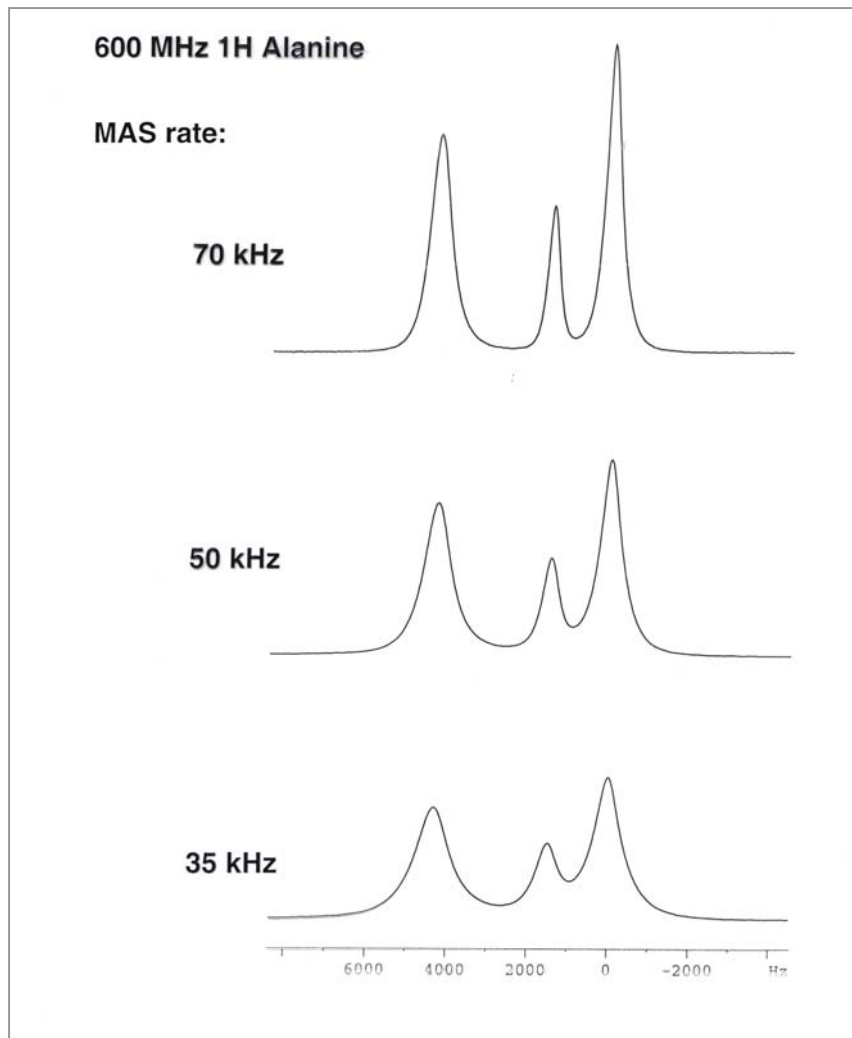
eelis nõutava raadiosagedusliku välja amplituudi vähenemisel, mis võimaldab kasutada küllaldase pikkusega impulsse ilma termilise ohuta objektile.

Suuremad rotatsioonikiirused parandavad spektrite kvaliteeti nii intensiivsuse kui lahutusvõime osas. Joonisel 9 on esitatudalaniini vesiniku aatomite spektri sõltuvus rotatsioonikiirusest.



Joonis 8.

Tripeptiidi alfa- ja beeta-süsinike korrelatsioonijooned, mis annavad informatsiooni vastavate aatomite ruumilisest paigutusest. Selektiivse kvantmehaanilise kodeeringu vahendajaks on struktuuris peptiidahela CO süsinik.



Joonis 9.
Alaniini vesiniku aatomite spektri sõltuvus rotatsioonikiirusest.

Omaette areneva kategooria moodustavad eksperimendid, kus spinsüsteemi evolutsioon ja sellest saadav informatsioon on määratud mingi kindla raadiosageduslike magnetväljade tugevuse (mõõdetuna tuumaspinni Rabi sagedusena) ja rotat-

sioonikiiruse suhtega. Seni on siin olnud just mehhaanilise rotatsiooni ebapiisav kiirus piiravaks teguriks. Vahemärkusena olgu siinkohal märgitud, et TMR eksperimendi arendamine on kujunenud omaette insenerteaduseks. Füüsiliseks põhjuseks on siin spektroskoopias ainulaadne võimalus kontrollida kvantsüsteemi üleminekut (ja ka tagasipöördumist!) erinevatesse energetilistesse olekutesse väga pika aja jooksul.

KBFI arendatud ja tehtud andurid on lubanud maailma juhtivatel uurimisrühmadel teha kvalitatiivselt uuel tasemel mõõtmisi. Ülikiire pöörlamise tehnoloogia avab võimaluse uurida näiteks nii paramagneetilisi ühendeid kui ka väga kallihinnalisi, piiratud kogustes saadavaid isotoopmärgistatud bioloogilisi polümeere. KBFI andurite abil on tehtud olulisi edusamme nii tseoliitide, valkude, kütuseelementide, patareide ja katalüsaatorite arendamisel kui ka bimeditsiinilistes uuringutes. Hiljuti jõudis ajakirja "Nature" veergudele uurimus prioonproteiinide alal, kus meie anduriga tehtud mõõtmiste kaasabil tuvastati infektsiooni tekitamisel kriitilised aminohapete järjestused ja asukohad proteiinis [Ritter jt, 2005].

Teedrajav tehnoloogia on KBFI-l võimaldanud aktiivselt osaleda maailma juhtivate teaduskeskuste (Ameerika ja Euroopa kõrge magnetvälja laboratooriumid, Rutherford Appleton, ETH Zürich, McMaster, UC Berkeley jt) töös ning selle kaudu olla kursis kaasaja oluliste teadusprobleemidega.

Kirjeldatud ülikiire proovirootatsiooni tehnika annab võimalused uueks teedrajavaks suunaks tahkisefüüsikas: kõrge lahutusega TMR mõõtmisteks eriti madalatel temperatuuridel (Ivo Heinmaa juhtimisel on tehtud ka esimesed edukad katsed) ja edasiseks arendustööks tehnilise keraamika ning aparaadiehituse alal Eestis. Käesolevale tööle on aidanud oluliselt kaasa Endel Lippmaa, Madis Alla ja Ants Salumäe 1970ndatel aastatel algatatu ning paljude kolleegide, eelkõige keemik Helgi Kooskora ja lukksepp Arvo Sihveri abi.

VIITED

Ritter, C., Maddelein, M.-L., Siemer, A. B., Lührs, T., Ernst, M., Meier, B. H., Saupe S. J., Riek, R. (2005). Correlation of structural elements and infectivity of the HET-s prion. *Nature*, 435|9 June 2005|doi:10.1038/nature03793.

*Teaduspreemiale täppisteaduste alal
uurimuste tsükli "Fotosünteesiliste valgusergastuste ekšiton-polaron
iseloom" eest*



Arvi Freiberg (kollektiivi juht, keskel)

Sündinud 28. juunil 1948 Kuremäel Ida-Virumaal

- 1966 Paide Keskkool
- 1971 Tallinna Polütehniline Instituut, pooljuhtmaterjalide tehnoloogia
- 1976 füüsika-matemaatikakandidaat (tahkisefüüsika), Eesti NSV TA Füüsika Instituut
- 1980 vanemteaduri kutse
- 1986 füüsika-matemaatikadoktor (tahkisefüüsika), Läti NSV TA Füüsika Instituut
- 1991 Madalmaade Teadusuuringute Organisatsiooni (NOW) stipendium
- 1993 Ameerika (US DOE) Erifondi auhind
- 1994 Rahvusvahelise Teadusfondi peaauhinna grant (International Science Foundation Main Award Grant)
- 1996 New Yorki Teaduste Akadeemia liige

Aastast 1971 Eesti NSV TA Füüsika Instituudis (praegu Tartu Ülikooli Füüsika Instituut): insener, nooremteadur, teadur, vanemteadur, teadusala asedirektor, sektorijuhataja ja direktor; praegu biofüüsika (kuni 2005. a spektrokrono-

graafia) labori juhataja. Aastatel 1995–2002 külalisteadur Arizona Osariigi Ülikoolis. Aastast 2003 Tartu Ülikooli korraline professor ja taimefüsioloogia õpetooli hoidja molekulaar- ja rakubioloogia instituudis.

Rahvusvahelise Fotosünteesikomitee Ida- ja Kesk-Euroopat esindav liige (1992–95); Tallinna Tehnikaülikooli Vilistlaskogu esimees (1993–94); Tartu Teaduspargi nõukogu esimees (1994–96); asutajaliikmena Euroopa esindaja Rahvusvahelises Fotosünteesi Uurimise Ühingu (1995–98); Tallinna Tehnikaülikooli Kuratooriumi esimees (1997–2000); Eesti Teadusfondi täppisteaduste komisjoni esimees (2003–2006).

Avaldanud umbes 170 teaduspublikatsiooni.

Margus Rätsep (esimene vasakult)

Sündinud 10. septembril 1959 Tartus

1977 Tartu 10. Keskkool

1982 Tartu Ülikool, füüsika

1991 PhD füüsikas, Tartu Ülikool

Alates 1982 Eesti NSV TA Füüsika Instituut (praegu Tartu Ülikooli füüsika instituut): insener, nooremteadur, teadur, vanemteadur.

Töötanud 1994–1995 külalisteadlasena Aimé Cottoni laboris Prantsusmaal ja 1996–1999 järel doktorina Iowa Osariigi Ülikoolis USAs.

Avaldanud üle 50 teaduspublikatsiooni.

Kõu Timpmann (kolmas vasakult)

Sündinud 28. mail 1952 Viljandis

1970 Põltsamaa Keskkool

1975 Tartu Ülikool, füüsika

1986 füüsika-matemaatikakandidaat (tahkisefüüsika), Eesti NSV TA Füüsika Instituut

Alates 1975. aastast Eesti NSV TA Füüsika Instituudis (1998. aastast Tartu Ülikooli füüsika instituut) nooremteadur, teadur, vanemteadur.

Külalisuurija Umea Ülikoolis (korduvalt) ja Lundi Ülikoolis (korduvalt), 1997–2000 järel doktor Arizona Osariigi Ülikoolis.

Avaldanud üle 80 teaduspublikatsiooni.

Koolilapski teab, et elu aluseks olev fotosüntees algab valguse neeldumisega klorofüllü molekulis. Mis sel hetkel aga täpselt juhtub, aimavad vähesed. Riigi teaduspreemiaga äramärgitud töödetsükli õnnestus meil näidata, et teatud juhtudel muundub valguskvant e footon kõigest sajakonna femtosekundi jooksul teiseks kvantosakeseks – eksiton-polaroniks. See on võimeline neeldunud valgusenergiat fotosünteesilises membraanis väga kiiresti vajalikku kohta edasi toimetama.

EELLUGU

Biosfäär eksisteerib vaid tänu fotosünteesi vahendusel Päikeselt saadavale energiale. Fotosünteesis neelatakse footon eelkõige klorofüllü molekuli poolt, mis paiknevad taimede ja fotosünteesiliste bakterite erilistes rakumembraaniga seotud valgukompleksides e antennides. Laias spektrivahemikus neelatud valgusenergia liigub kiiresti nn tsentriklorofüllüdele, põhjustades nende oksüdatsiooni. Oksüdatsioonil vabaneva elektroni ja sellega kaasneva prootoni e vesiniku tuuma ülekandereaktsioonides muundataksegi esialgne valgusenergia elusaine sünteesiks kõlblikuks keemiliseks energiaks.

Sellisel kokkuvõetuna ei paista fotosünteesi pärisalgus (asjaosalised räägivad sellega seoses primaar- või esmaprotsessidest) sugugi keeruline olevat. See mulje on paraku sügavalt ekslik. Fotosünteesi esmaprotsesside erakordselt kõrge – peaaegu 100% – kvantsaagise põhjusi on kaua ja pingsalt uuritud. Esimesi töid selles vallas, mis avaldati juba ligi 70 aastat tagasi, kuulub J. Franckile ja E. Tellerile [Franck, Teller, 1938]. Mitmekülgsest andekas Ungari päritolu füüsikateoreetik E. Teller on sama mees, kes sai hiljem tuntuks ameerika vesinikupommi ühe loojana. Üllataval kombel käsitletakse töös [Franck, Teller, 1938] fotosünteesiga seoses esmakordselt ka eksitone – valguse neeldumisel tekkivaid ja üle paljude naabermolekulide levivaid (delokaliseerunud) elektronergastusi. Eksiton oli küll juba mõned aastad varem (1931. a) vene füüsiku J. Frenkeli poolt teadusesse toodud, kuid silmas pidades vaid kõrgkorrastatud (kristallilisi) objekte. Taimede fotosüsteemi aga tolleaegsete teadmiste valguses vaevalt väga korrastatuks pidada sai. Arvatavasti just taustateadmiste puudulikkus ei võimaldanud kõnealusel ega ka paljudel järgnevatel töödel asja tuuma tabada. Näiteks fotosüsteemilist ühikut käsitleti esialgu vaid funktsionaalse üksusena, võrreldavalt “musta kastiga” elektrotehnikas. Tema keeruline molekulaarne struktuur ja erinevate osade omavahelised suhted selgusid tasapisi alles palju hiljem, vastavalt edusammudele molekulaarbioloogia ja struktuurse bioloogia vallas. Arengu käigus töötati välja ka antud töödetsükli seisukohalt oluline energeetilise leetri printsiip. Selle kohaselt kasvavad antennipigmentide üleminekuenergiad laias laastus võrdeliselt kaugusega leetri alumises otsas või neelus asuvatest tsentriklorofüllüdest. Nii moodustub fotosünteesilisel membraanil asuv vaba energia potentsiaalireljeef, mille kõrgemad osad moodustuvad erinevatest antennidest ning mille orgudes asuvad tsentrikomplekside neelud nagu laukad soos. Vaba energia gradient määrab

siis valguse poolt tekitatud elektronergastuse liikumise raja ja impulsi sellel pinnal. Mõistagi on see ettekujutus ülimalt lihtsustatud, kuid vahel on sellestki suur abi. Meilgi õnnestus selle mudeli täpsustamisesse oma panus anda [Freiberg jt, 1989; Timpmann jt, 1991; Pullerits, Freiberg, 1992]. Muuhulgas tõestasime, et näiliselt eraldiseisvad spektrijooned füsioloogilistel temperatuuridel mõõdetud fotosünteetilise ühiku spektrites on tegelikult mittehomogeenselt laienenud. Sellest tuleb aru saada niimoodi, et üksikult võttes on antennikomplekside spektrid küllaltki erinevad. Üheskoos, suures ansamblis, aga kavatavad nad ühtlaselt võrdlemisi laia spektrivahemiku, mis üldjuhul soodustab energia efektiivset tsentriklorofüllidele kanaliseerimist. Samuti määrasime fotoergastuste keskmise eluea bakterite fotosüsteemis ning näitasime, et see eluiga sõltub tsentriklorofüllide ergastusolekust [Borisov jt, 1985]. Täna võime tõdeda, et just need aastatetagused tulemused löid aluse Tartu fotosünteesi biofüüsika uurimise koolkonnale.

Antud töödetsükli seisukohalt kujunes pöördeliseks möödunud kümnendi keskpaik. Siis tuvastati fotosünteetiliste purpurbakterite perifeerse LH2 antennivalgu kristallstruktuur [McDermott jt, 1995]. Põguski pilk joonisele 1 viib mõttele, et Franckil-Telleril võis olla õigus – korrapärane ringikujuline bakteriklorofüllide struktuur võiks eksitone küll toetada. Kas ka tegelikult, see vajab muidugi alles selgitamist. Valkude kristallograafia lahutusvõime on tänapäeval piiratud umbes 0,2 nm. Optiline spektroskoopia tunneb aga vähemalt kolm suurusjärku väiksemaid ruumikoordinaatide muutusi. Lisaks esindab kristallstruktuur vaid mingit keskmist valgust ehitust. Iga üksiku antennikompleksi struktuur võib sellest piisavalt palju erineda.

Nende küsimuste lahendamiseks rakendati kogu kättesaadavat meetodilist arsenalit alates geenitehnoloogiast ja lõpetades teoreetilise füüsikaga. Tartu labori osales jõudumööda selles kohati palavikulises võidujooksus. Meie selle perioodi põhitulemus seisneb antennisisese energiarelaksatsiooni ja antennidevaheliste energiasiiirete ühemõttelises eristamises ajalis-spektraalse e spektrokronograafilise kriteeriumi järgi [Freiberg jt, 1998; Timpmann jt, 2000]. Ülikiire spektrokronograafia on teatavasti juba paarkümmend aastat tagasi Tartus väljaarendatud spektroskoopiasuund [Freiberg, Saari, 1983]. Võrreldes mõõtmistulemusi üksikute ja membraanis kõrvuti asetsevate antennide jaoks selgus, et antennisiseste protsesside karakterne aeg on 100 fs kuni 1 ps. Aeglasemad protsessid esinevad vaid membraanides ja on seega seotud energiasiiiretega erinevate komplekside vahel. Sarnaselt võib spektrite mittehomogeenses laienemises eristada kahte, sisemist ja välist, komponenti. Esimene on tingitud pigmendimolekulide siirdeenergiate variatsioonidest üksikus antennikompleksis, teine aga keskmise üleminekuenergia erinevustest antennide ansamblis [Freiberg jt, 1999].

Kuid naaseme eksitoni juurde. On siis neid fotosünteetilistes antennides või mitte? Sellele tähtsale küsimusele seni selge vastus puudus. Just esmaste fotoergastuste iseloomust sõltub, milline on tekkinud molekulaarsete elektron-

ergastuste edasine saatus, sh nende relaksatsiooni ja liikumise mehhanismid ning levi kiirus fotosünteetilises membraanis. Neid protsesse detailselt uurides võiks ja peaks olema võimalik saada teavet meid huvitava küsimuse kohta.

Raskused tulenevad sellest, et enamikku nimetatud protsessidest suunavad väga erinevad jõud, millede suurus ja suund on pahatihti kas tundmatud või vaid osaliselt teada. Võtame näiteks elektronide siirdeenergiat mõjutavad tegurid. Neid saab lihtsustatult jagada kaheks, eristades klorofüllimolekulide omavaheolist (resonantset) vastastikmõju mitteresonantsest mõjust, mis toimib klorofüllil ja teda ümbritseva valguga vahel ning on ülalmainitud mittehomoogeense laienemise põhjuseks. Kirjandust sirvides selgub, et erinevate autorite poolt esitatud resonantse interaktsioonienergia väärtus lahkes fotosünteetiliste bakterite puhul kuni neli korda. Taimede jaoks puudusid põhjendatud hinnangud sootuks. Sama ebamäärased olid ka mittehomoogeense laiuse hinnangud. Mida võtta, mida jätta? See ei ole triviaalne küsimine.

Toome veelkord näiteks mittehomoogeense laienemise. Laiemate spektrite energialevi soodustav mõju tundub iseenesestmõistetav. Sügavamal järelemõtlemisel tekivad aga õigustatud küsimused. Kuidas energia sellises spektraalselt ebaühtlases keskkonnas üldse levida saab, eriti madalatel temperatuuridel, kui molekulide puht-elektronsed ribad on väga kitsad? Teatavasti sõltub energialevi kiirus ja seega tema efektiivsus energeetilisest resonantsist (energiavõrdusest) energiat ära andva ja seda vastu võtva molekuli vahel. Suurele energiavahele vastab aeglane levi. Halvimal juhul võib levi hoopiski katkeda – toimub nn Andersoni lokaliseerimine. Loodus on oskuslikult rakendanud mitut moodust, vältimaks kahjulikku energia peatumist antennis enne tema sihtmärki, st reaktsioonitsentrisse jõudmist. Katsed kinnitavad suurepäraselt levi isegi vedela heeliumi keemistemperatuuridel umbes 4 K. Üheks oluliseks võtteks on elektronide ja neid siduvate tuumade vaheliste vastastikmõjude (nn elektron-foonon ja elektron-võnkeinteraktsioonid) ärakasutamine. Nende interaktsioonide tõttu ei ole klorofüllide siirdesagedused konstantsed, vaid muutuvad pidevalt ajas. Spektraalses mõõtmes vastab ajalisele modulatsioonile aga spektrite laienemine. Sellist aatomvõre dünaamikast tingitud spektrite laienemist nimetatakse homoogeenseks laienemiseks, eristamaks teda eelpoolkirjeldatud staatilisest mittehomoogeensest laienemisest.

Mittehomoogeensuse ületähtsustamine koos elektron-foononinteraktsiooni alatahtsustamisega löid olukorra, kus domineerisid kaks vastandlikku arusaama. Esimese järgi koosneb antenn üksikutest klorofüllilistest molekulidest, kus lokaliseeritud ergastatus Försteri mehhanismi abil molekulilt molekulile liikudes viimaks tsentriklorofüllile jõuab. Teise järgi on antenn tugevas interaktsioonis olevate molekulide kogum, kus ergastus on eksiton, mis levib koherentselt membraanis.

TÖÖDETSÜKLI OLULISEMAID TULEMUSI TELEGRAMMISTII LIS

Eelkõige Tartus tehtud katsed [Timpmann jt, 2003, 2004ab, 2005; Rätsep jt, 2005; Freiberg jt, 2003ab, 2004; Rätsep, Freiberg, 2003; Ihalainen jt, 2003], nende teoreetiline analüüs ja üldistamine [Timpmann jt, 2004b, 2005; Trikunas, Freiberg, 2005, 2006; Freiberg jt, 2003b] osutasid, et vähemalt uuritud bakteriaalsetes antennides (perifeerne LH2 ja tsentraalne LH1) asub tõde kusagil vahepeal. Nimelt ei hakka kogu antenn footoni saabudes korraga võnkuma, samuti ei haardu footon vaid ühes molekulis. Energeetiline korrastamatus piirab samaaegselt ergastuvate bakterklorofüllide arvu kümnekonna molekuliga, mis näiteks LH2 antenni puhul vastab umbes poolele kõikidest siseringi molekulidest. Elektron-foononinteraktsiooni tõttu aheneb tekkinud eksiton veelgi. Tegemist on mittelineaarse dünaamilise protsessiga, eksiton-polaroni moodustumisega, mis päädib eksitoni pitsumisega e autolokaliseerumisega kahe kuni kolme molekuli ulatusega potentsiaaliauku. Nagu näidati töös [Timpmann jt, 2001], kestab see protsess vaid 100–150 femtosekundit. Eksitoni autolokalisatsiooniga kaasneb korrapärase antennistruktuuri lokaalne deformatsioon (vt joonis 1). Määravaks selles uues arusaamises said katsed [Rätsep jt, 2005; Timpmann jt, 2003, 2004a; Freiberg jt, 2003ab, 2004; Ihalainen jt, 2003; Rätsep, Freiberg, 2003], mis tõestasid tugeva (kuni 8 korda seni arvatust suurema) elektron-foonon vastastikmõju olemasolu antennides.

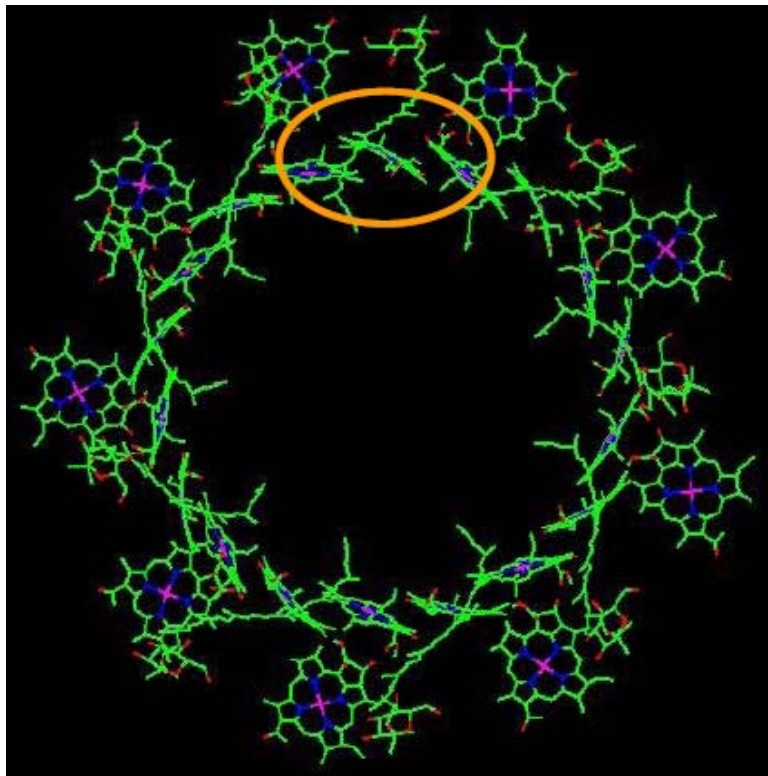
Nende, paradigmat muutvate, katseandmete taga oli juba paarkümmend aastat tagasi lisandimolekulide peal vormitud ja siis unustusehõlma vajunud diferentsiaalne selektiivfluorestsentsi meetod, mis sobitab augusälkamise meetodi kõrge spektraalse lahutuse kiirgusspektrite mõõtmist iseloomustava suure tundlikkusega. Antennispektritele sobitatuna annab see meetod väga häid tulemusi.

Antennieksitonide kiirgusspektrites eristuvad nii spektraalselt kui ka kineetiliselt kaks komponenti [Rätsep jt, 2005; Timpmann jt, 2004a; Freiberg jt, 2004]. See duaalsus on seletatav väikese ning suure raadiusega autolokaliseerunud eksitonide olemasoluga antenniringides [Freiberg jt, 2003b; Rätsep, Freiberg, 2003]. Ergastustingimustest sõltuvalt lokaliseeruvad nad antenniagregaadi erinevatel segmentidel. Tegemist võib olla üldise nähtusega, mis laieneb kõikidele korrastamata (kvaasi-)ühemõõtmeliste molekulaarsetele agregaatidele, ka praktika seisukohast üliolulistele polümeeridele. Antennides on see nähtavasti osa kiirgusspektrite laiendamise strateegiast.

Teoreetiliselt ennustati [Trikunas, Freiberg, 2005] ja katseliselt tõestati [Timpmann jt, 2003], et struktuurne korrastamatus soodustab eksitonide autolokalisatsiooni. Autolokalisatsiooniprotsessi iseloomustav kriitiline interaktsiooniparameeter võib mittehomoogeensuse kasvades ideaalse struktuuriga võrreldes mitmekordselt väheneda. Antennistruktuur deformeerub kõige hõlpsamini seal, kus asuvad kõige madalama siirdeenergiaga klorofüllid. Avastati ka antennistruktuuride iseärasustega seletuv spektraalse mittehomoogeensuse erinev

loomus erinevates antennides (struktuurne e mittediagonaalne korrastamatus LH1 antennis ja energeetiline e diagonaalne korrastamatus LH2 antennis) [Trikunas, Freiberg, 2006].

Spektraalse mittehomoogeensuse ja molekulaaragregaatide lõpliku suuruse arvestamisega üldistati varem tuntud Holsteini molekulaarkristallide teooriat, võimaldades tema rakendamist realistlike süsteemide kirjeldamiseks [Timpmann jt, 2005; Trikunas, Freiberg, 2005; Freiberg jt, 2003b]. See täiendatud mudel, mis oli aluseks kõikidele ülalkirjeldatud kvalitatiivsetele teoreetilistele järeldustele, lubab ühtlasi anda kvantitatiivseid hinnanguid, sh katseandmetega



Joonis 1.

Fotosünteesiliste purpurbakterite *Rhodospseudomonas acidophila* perifeerne LH2 antennikompleks. Membraanitasandi pealtvaates on näidatud vaid fotoaktiivsete bakteriklorofüllide paigutus. Pigmentimolekule kooshoidev valgüümbris on ülevaatlikkuse huvides eemaldatud. Kokku 27 bakteriklorofüllimolekuli moodustavad kaks kontsentrilist ringi. Just siseringis tihedalt küljkülje kõrval asuvad (ja seega tugevas resonantses vastastikmõjus olevad) 18 molekuli pakuvad meile antud käsitluses erilist huvi. Ovaal kujutab autolokaliseerunud eksitoni ja sellega seotud võreformatsiooni ligikaudset ulatust.

võrreldes määrata selliseid tähtsaid ja varem kättesaamatuid antennipolarone iseloomustavaid füüsikalisi parameetrid, nagu resonantne eksitoninteraktsiooni energia ja autolokaliseeritud eksitonide seoseenergia [Trikunas, Freiberg 2006; Timpmann jt, 2004b]. Katseandmetega võrreldes “möödeti” esmakordselt ka eksiton-polarontsooni laius fotosünteesilistes antennides, mis annab võimaluse juba aastakümneid diskuteeritud antennispektrite peen-timmimise molekulaarsete mehhanismide mõistmiseks [Timpmann jt, 2004b, 2005; Trikonas, Freiberg, 2006].

Antennieksitonide autolokalisatsioonile iseloomulikud spektrimuutused (spektri laienemine ja nihe pikemate lainepikkuste poole e punanihe) ning kiirgava seisundi ostsillaatori jõu kasv (nn ülikiirgus) soodustavad kõik valgushaarde efektiivsust. Tugevam ja laiem kiirgusspekter kindlustab parema kattumise naaberkomplekside neeldumisspektritega, kiirendades ergastuse liikumist membraanis, samal ajal kui tema punanihe annab energiale vile kindla suuna – otse energeetiliselt allamäge asuva tsentri poole.

Polaronilaadseid ergastusi leiti samuti taimede fotosüsteem ühe (PSI) pikalainelistes (nn punastes) antennides [Ihalainen jt, 2003], mis rõhutab saadud tulemuste üldisust, rakendatavust nii bakteriaalse kui taimse fotosünteesi valdkonnas. Kristallstruktuurist lähtudes on need punased antennivormid tõenäoliselt seotud klorofüllü kaksikmolekulide e dimeeridega, mis moodustavad ergastatud olekus eksimeere. PSI antennivormide punanihke põhjuseks tuleb seega lugeda neutraalsete antennieksitonide üleminekute segunemist lähedalasuvate polaarsete (nn laengu ülekande) seisunditega, mis seetõttu eriti tugevasti interakteeruvad pigmendimolekule ümbritseva võre võnkumistega.

JÄRELLUGU

Esitatud töödetsükliga, milles tõestati fotosünteesi efektiivsust soodustav valguskoguvate kromoproteiinide fotoergastuste eksiton-polaron iseloom, on pandud alus kontseptuaalselt uuele suunale fotosünteesi fotoprotsesside uurimises. Bioloogias tuntud polaronnähtuste hulka (elektron-polaronid DNA-s ja ATP hüdrolyüsil vabaneva energia kaugülekandega seostatud võnkepolaronid (tuntud ka kui Davõdovi solitonid)) on laiendatud eksiton-polaronidele, mis meie maailmapilti rikastades võib tulevikus leida ka tehniliku väljundi. Näiteks iseorganiseeruvate fotorakkude loomise läbi, mis kasutaksid päikeseenergiat vähemalt sama võimekalt kui looduslikud süsteemid. Tugevast elektron-fofoninteraktsioonist tingitud polaronnähtuste väli on iseenesest tavatult lai. Sarnaseid efekte võib kohata kõrgetemperatuursetes ülijuhtides, elektrit juhtivates polümeerides, nn kolossaalset magnetakistust omavates materjalides jne. Tuntud jaapani tahkisefüüsika teoreetik Y. Toyozawa on mõni aeg tagasi autolokalisatsiooninähtustega seostanud koguni elu teket Maal [Toyozaawa, 2000]. See-ga võib tõepoolest tegemist olla väga põhjaneva loodusnähtusega, mis kindlasti väärrib edasist uurimist. Fotosünteesiga seoses: ehkki me nüüd teame, et antenniergastused relakseeruvad eksiton-polaronideks, ei ole meil veel pola-

ronide vahendusel toimuva energialevi ja energiahaarde kvantitatiivset mudelit. Ilma sellise mudelita oleks aga ennatlik arvata, et oleme asjast üle.

Siinkirjeldatud töid on osaliselt finantseerinud Eesti Teadusfond (grantid nr 347, 2271 ja 5543).

PUBLIKATSIOONE

Borisov, A. Y., Freiberg, A., Godik, V. I., Rebane, K., Timpmann, K. (1985). Kinetics of picosecond bacteriochlorophyll luminescence in vivo as a function of the reaction center state. *Biochim. Biophys. Acta*, 807, 221-229.

Franck, J., Teller, E. (1938). Migration and photochemical action of excitation energy in crystals. *J. Chem. Phys.*, 6, 861.

Freiberg, A., Godik, V. I., Pullerits, T., Timpmann, K. (1989). Picosecond dynamics of directed excitation transfer in spectrally heterogeneous light-harvesting antenna of purple bacteria. *Biochim. Biophys. Acta*, 973, 93-104.

Freiberg, A., Rätsep, M., Timpmann, K., Trinkunas, G. (2004). Dual fluorescence of single LH2 antenna nanorings. *J. Luminescence*, 108, 107-110.

Freiberg, A., Rätsep, M., Timpmann, K., Trinkunas, G. (2003a). Self-trapped excitons in circular bacteriochlorophyll antenna complexes. *J. Luminescence*, 102-103, 363-368.

Freiberg, A., Rätsep, M., Timpmann, K., Trinkunas, G., Woodbury, W. N. (2003b). Self-trapped excitons in LH2 antenna complexes between 5 K and ambient temperature. *J. Phys. Chem. B*, 107, 11510-11519.

Freiberg, A., Saari, P. (1983). Picosecond spectrochronography. *IEEE J. Quant. Electr.*, QE 19, 622-630.

Freiberg, A., Timpmann, K., Lin, S., Woodbury, N. W. (1998). Exciton relaxation and transfer in the LH2 antenna network of photosynthetic bacteria. *J. Phys. Chem. B*, 102, 10974-10982.

Freiberg, A., Timpmann, K., Ruus, R., Woodbury, N. W. (1999). Disordered exciton analysis of linear and nonlinear absorption spectra of antenna bacteriochlorophyll aggregates: LH2-only mutant chromatophores of *Rhodobacter sphaeroides* at 8 K under spectrally selective excitation. *J. Phys. Chem. B*, 103, 10032-10041.

Ihalainen, J. A., Rätsep, M., Jensen, P. E., Scheller, H. V., Groce, R., Bassi, R., Korppi-Tommola, J. E. I., Freiberg, A. (2003). Red spectral forms of chlorophylls in green plant PSI-A site-selective and high-pressure spectroscopy study. *J. Phys. Chem. B*, 107, 9086-9093.

McDermott, G., Prince, S. M., Freer, A. A., Hawthornthwaite-Lawless, A. M., Papiz, M. Z., Cogdell, R. J., Isaacs, N. W. (1995). Crystal structure of an

integral membrane light-harvesting complex from photosynthetic bacteria. *Nature*, 374, 517-521.

Pullerits, T., Freiberg, A. (1992). Kinetic model of primary energy transfer and trapping in photosynthetic systems. *Biophys. J.*, 63, 879-896.

Rätsep, M., Freiberg, A. (2003). Resonant emission from the B870 exciton state and electron-phonon coupling in the LH2 antenna chromoprotein. *Chem. Phys. Lett.*, 377, 371-376.

Rätsep, M., Hunter, C. N., Olsen, J. D., Freiberg, A. (2005). Band structure and local dynamics of excitons in bacterial light-harvesting complexes revealed by spectrally selective spectroscopy. *Photosynth. Res.*, 86, 37-48.

Timpmann, K., Ellervee, A., Kuznetsov, A., Laisaar, A., Trinkunas, G., Freiberg, A. (2003). Self-trapped excitons in LH2 bacteriochlorophyll-protein complexes under high pressure. *J. Luminescence*, 102-103, 220-225.

Timpmann, K., Freiberg, A., Godik, V. I. (1991). Picosecond kinetics of light excitations in photosynthetic purple bacteria in the temperature range of 300-4 K. *Chem. Phys. Lett.*, 182, 617-622.

Timpmann, K., Katiliene, Z., Woodbury, N. W., Freiberg, A. (2001). Exciton self-trapping in one-dimensional photosynthetic antennas. *J. Phys. Chem. B*, 105, 12223-12225.

Timpmann, K., Rätsep, M., Hunter, C. N., Freiberg, A. (2004a). Emitting exciton polaron states in core LH1 and peripheral LH2 bacterial light-harvesting complexes. *J. Phys. Chem. B*, 108, 10581-10588.

Timpmann, K., Trinkunas, G., Olsen, J. D., Hunter, C. N., Freiberg, A. (2004b). Bandwidth of excitons in LH2 bacterial antenna chromoproteins. *Chem. Phys. Lett.*, 398, 384-388.

Timpmann, K., Trinkunas, G., Qian, P., Hunter, C. N., Freiberg, A. (2005). Excitons in core LH1 antenna complexes of photosynthetic bacteria: Evidence for strong exciton coupling and off-diagonal disorder. *Chem. Phys. Lett.*, 414, 359-363.

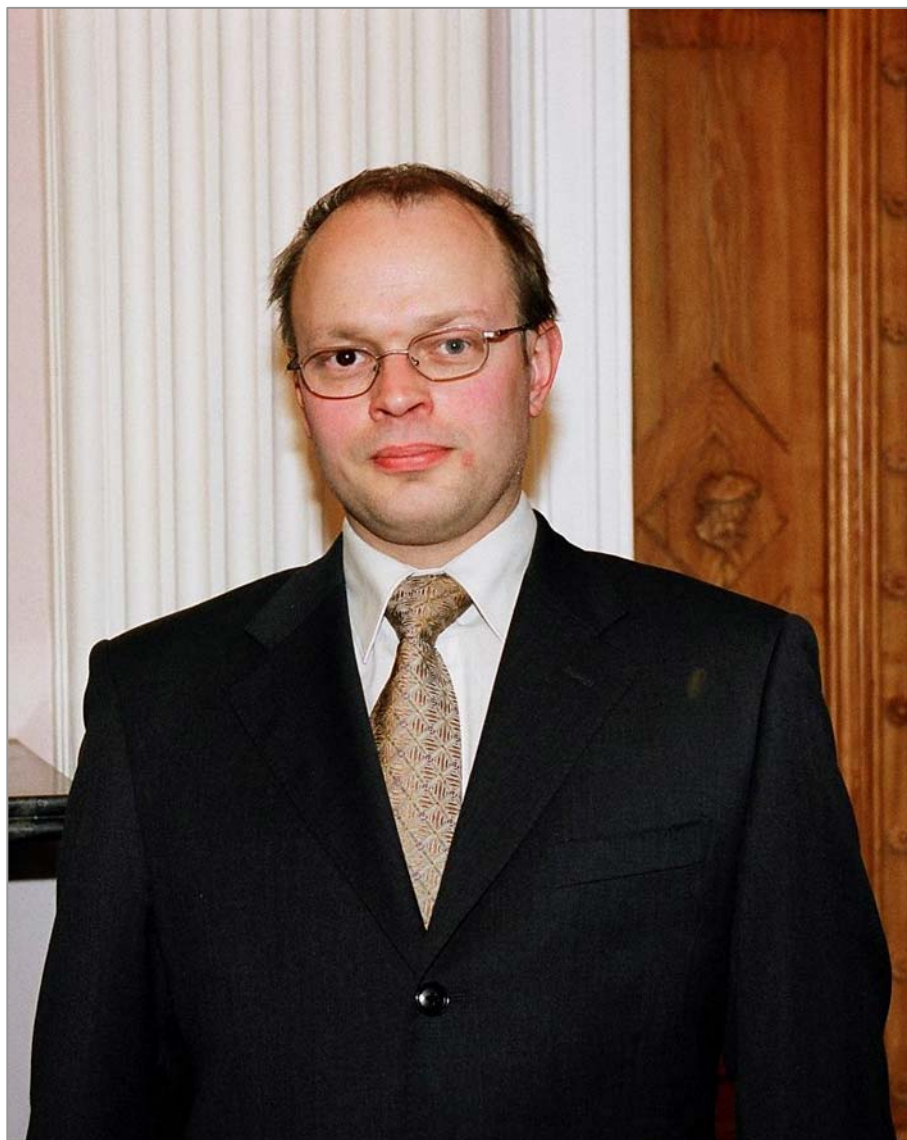
Timpmann, K., Woodbury, N. W., Freiberg, A. (2000). Unraveling exciton relaxation and transfer in LH2 photosynthetic antennas. *J. Phys. Chem. B*, 104, 9769-9771.

Toyozawa, Y. (2000). The origin of life with natural selection. *J. Phys. Soc. Japan*, 69, 1907.

Trinkunas, G., Freiberg, A. (2005). Abrupt exciton self-trapping in finite and disordered one-dimensional aggregates. *J. Luminescence*, 112, 420-423.

Trinkunas, G., Freiberg, A. (2006). A disordered polaron model for polarized fluorescence excitation spectra of LH1 and LH2 bacteriochlorophyll antenna aggregates. *J. Luminescence*, 119-120, 105-110.

*Teaduspreemia keemia ja molekulaarbioloogia alal
uurimuste tsükli "Lenduvate orgaaniliste ühendite emissiooni
füsioloogia" eest*



Ülo Niinemets

Sündinud 19.03.1970 Tartus

1988 Tartu 5. Keskkool

1992 Tartu Ülikool, bioloogia

1993 MSc, ökofüsioloogia, Tartu Ülikool

1996 PhD, ökofüsioloogia, Tartu Ülikool

1996 Euroopa Akadeemia Baltimaade auhind noorteadlastele (*Academia Europea Baltic Prize*)

2000 teaduspreemia bio-geoteaduste alal (koos Olevi Kulliga)

1992–2000 Eesti Teaduste Akadeemia Ökoloogia Instituut (alates 1995. a Tallinna Pedagoogikaülikooli Ökoloogia Instituut): nooremteadur, teadur, vanemteadur, osakonnajuhataja. 2000–2005 Tartu Ülikooli taimefüsioloogia dotsent, 2002–2003 taimefüsioloogia õppetooli hoidja.

Alates 2006 – uurija-professor, Eesti Maaülikool

Aastail 1993–2006 stažeerinud Ameerika Ühendriikides (Duke'i Ülikool, NC), Austraalias (Macquarie Ülikool, Sydney), Belgias (Antwerpeni Ülikool), Hispaanias (CSIC Madrid), Itaalias (Centro di Ecologia Alpina), Jaapanis (Sapporo ja Tohoku ülikoolid), Prantsusmaal (INRA, Clermont-Ferrand), Saksamaal (Bayreuthi Ülikool) ning Uus-Meremaal (Canterbury Ülikool)

Avaldanud üle 80 olulisema teaduspublikatsiooni.

TAIMSE PÄRITOLUGA LENDUVATE ORGAANILISTE ÜHENDITE EMISSIOONI FÜSIOLOOGIA

UURIMUSE TAUST

Paljud taimede elutegevuse käigus sünteesitud orgaanilistest ühenditest on lenduvad. Suur osa nendest lenduvatest (emiteeritavatest) ühenditest on tavalised metabolismi vaheproduktid, mille emissioon intensiivistub teatud perioodidel. Näiteks eraldub kasvavatest lehtedest arvestatavas koguses metanooli, mis vabaneb pektiini moodustumise käigus rakuseintes. Hapnikupuuduses juurtest seevastu eraldub etanool, mis tekib anaeroobsel suhkrute lagunemisel (käärimine). Lisaks emiteerivad teatud taimeliigid spetsiifilisi plastiidse päritoluga ühendeid isoprenoide, mis koosnevad viie süsinikuaatomilistest ehitusplokkidest – isopreenijääkidest. Lihtsaim ühend nendest on hemiterpeen isopreen (2-metüül-1,3-butadien), mis moodustab ligi poole kogu maakera taimsest emissioonist. Olulised on ka isopreeni alkohol 2-metüül-3-buteen-2-ool, mono- (10 C aatomit, C10) ja seskviterpeenid (C15). Keerulisemad mittelenduvad isoprenoidsed ühendid on steroidid (triterpeenid, C30) karotenoidid (tetraterpeenid, C40) ja polüterpeenid (Cn, looduslik polümeer kautšuk).

Lenduvate isoprenoidide funktsioon taimedes pole hetkel lõplikult selge, kuid arvatakse, et lenduvad isoprenoidid osalevad taimemembraanide kuumakahjustuste ärahoidmisel ning toimivad ka antioksidantidena [Copolovici jt, 2005; Peñuelas, Llusà, 2003; Velikova, Loreto, 2005]. Kuigi vähesed liigid on tugevateks isoprenoidide emiteerijateks, on nende liikide osakaal lokaalses flooras tihti suur. Eesti pärismaise floora liikidest on tugevateks emiteerijateks paju, haab, paplid, tamm, kuusk, mänd, samas kui vahtra või pärna emissioon on nullilähedane. Vahemere-äärsetes maades on tugevaks monterpeenide emiteerijaks igihaljas iileks-tamm (*Quercus ilex*), mis on üheks sealsete puistute põhiliseks domineerivaks komponendiks.

Kui veel hiljuti peeti taimse päritoluga lenduva orgaanika emissiooni uurimist vaid veidrikest teadlaste uudishimu rahuldamiseks, siis praegu on see temaatika tõusnud atmosfäärikeemia keskmesse. Lenduvate orgaaniliste ühendite emissioon on väga tihedalt seotud õhu kvaliteediga, kuna need ühendid on kondensatsioonituumadeks aerosoolide moodustumisel ja osalevad elusorganismide jaoks mürgise osooni moodustumises maapinnalähedases õhukihis (troposfääris). Lihtsustatult võib öelda, et troposfäärse (maapinnalähedase) osooni moodustumine on limiteeritud kas lämmastikoksiidide (NO_x) või lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsiooni poolt. Viimase aja uuringud näitavad, et taimse päritoluga lenduva orgaanika tootmine ületab antropogeense emissiooni enam kui 8-kordselt [Geron jt, 2000; Guenther jt, 2000].

Kuna lenduvate ühendite emissioon on sedavõrd tähtis, on olulised ka täpsed ja kvantitatiivsed hinnangud taimeestiku poolt emiteeritud lenduva orgaanika koguste kohta. Antud töödetsükli eesmärgiks oligi taimse emissiooni mehhanismide väljaselgitamine ning kvantitatiivsete mudelite loomine. Töös olid läbivateks küsimusteks (1) kuidas on spetsiifiliste orgaaniliste ühendite emissioon kontrollitud taimede füsioloogiliste parameetrite ning nende ühendite füüsikalise-keemiliste omaduste poolt ning (2) miks taimed emiteerivad teatud isoprenoide.

UURIMUSTÖÖ TULEMUSED

BIOKEEMILINE EMISSIOONIMODEL

Ulatuslike emissioonimõõtmiste abil koostati füsioloogiline isopreeni ja monterpeenide emissioonimudel, mis põhineb hiljuti avastatud 1-deoksüksüluloos-5-fosfaadi sünteesirajal ning võimaldab ennustada isoprenoidide sünteesi kiirusi erinevates keskkonnatingimustes [Niinemets, 2004; Niinemets jt, 1999, 2002ac]. Varem kasutati isoprenoidide emissioonikiiruse ennustamiseks empiirilisi mudeleid, mis ei võimalda usaldusväärselt hinnata emissioonikiiruse ebasoodsates tingimustes kasvavate taimede poolt (veestress, kuumastress). Kuna looduslikes kooslustes on taimed sisuliselt alati stressitingimustes, on stressireaktsioonide ennustamine ülioluline. Empiirilised algoritmid ei võimalda ka ennustada globaalselt muutuvate keskkonnatingimuste (kõrgenev õhutemperatuur ning atmosfääri CO_2 kontsentratsioon) mõju emissioonikiirustele.

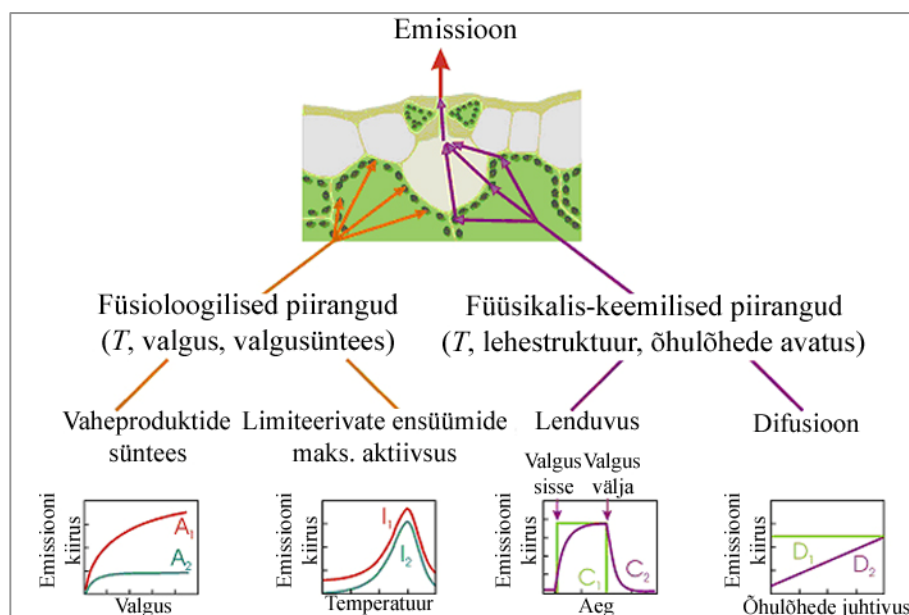
Loodud mehhanistliku, ensüümikineetikal baseeruva mudeli eeliseks ongi, et ta loob võimaluse stressireaktsioonide mõju olulisuse hindamiseks ning emissioonikiiruste ennustamiseks globaalselt muutuvast maailmas. Intensiivne töö stressiefektide mõõtmiseks ning mehhanistlikuks kirjeldamiseks on hetkel käimas ning esialgsed tulemused moodustasid ühe osa auhinnatud töödetsüklist [Beauchamp jt, 2005; Copolovici jt, 2005].

FÜSIKALIS-KEEMILISTE TEGURITE OLULISUS

Arvatakse, et biokeemiline isoprenoidide sünteesi regulatsioon toimub suhteliselt kiiresti. Biokeemilistele mudelitele aluseks olevad andmed aga näitasid, et taimelehed talletavad vähemal või suuremal määral lenduvaid ühendeid. Seega võib lenduvate ühendite emissioon toimuda taimelehtedesse talletatud koguse arvelt ka siis kui sünteesi ei toimu. Samuti puhverdavad talletatud ühendid kiireid fluktuatsioone nende ühendite sünteesikiiruses, nii et lõppkokkuvõttes reageerib lenduvate ühendite emissioon lehtedest aeglasemalt keskkonnafaktorite varieerumisele kui sünteesikiirus. Seetõttu on orgaaniliste ühendite emissioonil vaja arvestada ka füüsikalisi-keemilisi faktoreid (joonis 1).

Taimed emiteerivad rohkem kui 30000 erinevat keemilist ühendit ning igal ühendil on unikaalsed füüsikalisi-keemilised omadused. Lihtsustatult võib öelda, et iga ühendi lenduvus (vesi/õhk ja lipiid/õhk jaotuskoefitsiendid) määrab kui suurel hulgal taimelehed talletavad vastavat ühendit lehe lipiid- ning vedelfaasis. Lehe vedel- ning lipiidfaasis talletatud lenduva ühendi hulk omakorda määrab kui tugevasti mõjutavad füüsikalisi-keemilised tegurid ühendi emissioonikiirust. Mõistmaks kuidas ühendi füüsikalisi-keemilised parameetrid mõjutavad emissioonikiirust, koostati rida detailseid füüsikalisi-keemilisi mudeleid, mis võimaldavad põhimõtteliselt kõigi taimede poolt emiteeritavate ühendite jaoks hinnata füüsikalisi-keemiliste, struktuursete ja füsioloogiliste faktorite olulisust [Niinemets, Reichstein, 2002, 2003ab; Niinemets jt, 2002b]. Füüsikalisi-keemilised mudelid on praeguseks verifitseeritud eksperimentaalse tööga rea ühendite jaoks, nagu metanool, etanool, atsetaldehyüd [Niinemets, Reichstein, 2003ab] ning monoterpeenid [Niinemets, Reichstein, 2002; Niinemets jt, 2002b].

Füüsikalisi-keemiliste parameetrite arvestamine võimaldas seletada mitmeid taimebioloogias senini anomaalseks peetud nähtusi, millele otsiti vastust füsioloogiast, kuid mis tegelikult tulenesid emiteeritavate ühendite füüsikalisi-keemilistest omadustest. Näiteks olid andmed õhulõhede kontrollist erinevate ühendite emissioonil vastuolulised. Õhulõhed on väikesed poorid lehepinnal (5–50 µm), mille kaudu toimub molekulaarse difusiooni teel lehe gaasivahetus väliskeskkonnaga. Lehed on võimelised aktiivselt suurendama või vähendama õhulõhede avatust (nn õhulõhede juhtivus, G_s) vastusena keskkonnafaktorite muutustele, muutes sellega ka difusioonivoo kiirust ($F = G_s \Delta C$, kus ΔC on kontsentratsioonigradient lehe sisemuse ning välisõhu vahel).



Joonis 1.

Taime poolt toodetud orgaanilise ühendi (VOC) emissioon (lendumine taimest) võib olla limiteeritud füsioloogiliste või/ja füüsikalise-keemiliste faktorite poolt. Füsioloogilised tegurid määravad vaheproduktide koguhulga ning VOC sünteesi kiirust kontrollivate ensüümide maksimaalse aktiivsuse. Füüsikalise-keemilised tegurid määravad VOC lenduvuse (küllastatud osarõhk, kontsentratsioon lipiid- ja vedelfaasides) või difusiooni lehe gaasi-, vedel- ning lipiidfaasides ja/või difusiooni gaasifaasis leheatmosfääri piirpinnal. Joonisel on kujutatud nelja tüüpilist olukorda, kus erinevad faktorid limiteerivad VOC emissiooni. Vaheproduktide kontsentratsiooni kasv valguse kasvades seletab, miks VOC emissiooni kiirus kasvab valguse kasvades. VOC emissiooni temperatuurisõltuvus tuleneb eelkõige temperatuuri mõjust VOC sünteesis osalevate ensüümide maksimaalsele aktiivsusele. Mudelsituatsioonides on vaheprodukti hulk suurem juhul A₁ kui juhul A₂, ning koguensüümi aktiivsus on suurem juhul I₁ kui juhul I₂. Lenduvus mõjutab oluliselt hüdrofoobsete ühendite emissiooni, nagu mitte-oksügeneeritud monoterpeenid [Niinemets, Reichstein, 2002]. Gaasifaasi difusioon järele võib tugevasti limiteerida vesilahustuvate ühendite (alkoholid, aldehüüdid, karboksüülhapped) emissiooni [Niinemets, Reichstein, 2003ab; Niinemets jt, 2002b]. Ühendil C₁ on suur lenduvus ning seetõttu vastab tema emissioonikiirus koheselt muutustele sünteesikiiruses, mis toimuvad valguse sisse- ja väljalülitamisel. Seevastu vähemlenduva ühendi C₂ emissioonikiirus vastab muutustele sünteesikiiruses ajanihkega. Ühendil D₂ on sama vedelfaasi kontsentratsiooni korral suurem osarõhk gaasifaasis (suurem õhk-vedelfaasi jaotuskoefitsient) kui ühendil D₁. Õhulõhede (väikesed poorid lehe pinnal, mille kaudu toimub kogu lehe gaasivahetus väliskeskkonnaga) juhtivuse muutustele reageerib vaid ühend D₂, kuna selle ühendi gaasifaasi kontsentratsiooni muutuseks on vaja suurt (ning seetõttu aeganõudvat) muutust selle ühendi vedelfaasi kontsentratsioonis [vt Niinemets, Reichstein, 2003ab; Niinemets jt, 2002b]. Modifitseeritud Niinemets jt. (2004) järgi.

Veestressis taimed vähendavad õhulõhede juhtivust, kahandades sellega veekadu, kuid samas ka fotosünteesi kiirust, sest õhulõhede sulgumine takistab süsihappegaasi sissepääsu lehte. Eksperimentaalsete tulemuste kohaselt ei avalda õhulõhede sulgumine mingit mõju isopreeni ning enamuse monoterpeenide emissioonile, samas kui metanooli ning monterpeeni alkohol linalooli emissioon vähenes tugevasti õhulõhede sulgumisel stressitingimustes taimedel [vt Niinemets, Reichstein, 2003ab; Niinemets jt, 2002b].

Mis põhjustab selliseid erinevusi? Õhulõhede sulgudes hakkab kasvama lehe-sisene lenduva ühendi kontsentratsioon, st suureneb kontsentratsioonigradient lehe ja väliskeskkonna vahel – ΔC . Teatud ajavahemiku järel tasakaalustab ΔC tõus liikme G_S vähenemise, nii et emissioonikiirus F saavutab esialgse väärtuse. Põhimõtteliselt pole pikas ajaskaalas (stационаarses seisus) õhulõhede kontroll lenduva ühendi emissiooni üle võimalik. Küll on siin oluline kui kiiresti muutub kontsentratsioonigradient õhulõhede sulgudes. Dünaamiline mudel näitas, et leitud erinevused õhulõhede limitatsioonis tulenevad ühendite erinevast lenduvusest. Isopreeni ning mitteoksügeneeritud monoterpeenide õhk-vesi jaotuskoefitsient (Henry konstant, $H = 7780 \text{ Pa m}^3 \text{ mol}^{-1}$ isopreeni ning $2000\text{--}10000 \text{ Pa m}^3 \text{ mol}^{-1}$ monoterpeenide jaoks) on kolm-neli suurusjärku suuremad alkoholide Henry konstantidest ($H = 0,46 \text{ Pa m}^3 \text{ mol}^{-1}$ metanooli ning $2,1 \text{ Pa m}^3 \text{ mol}^{-1}$ linalooli jaoks). Seega isopreeni ja monoterpeenide kontsentratsioon gaasifaasis tõuseb väga kiiresti, kuna enamused sünteesitud ainetest jaotub gaasifaasi. Õhulõhede juhtivus muutub minutite jooksul, samas kui isopreeni ja monoterpeenide ΔC muutus toimub sekundite jooksul. Kiire gaasifaasi reaktsioon ongi põhjuseks, miks õhulõhede sulgumine ei avalda mõju nende ühendite emissioonile. Kuna enamused sünteesitud metanoolist ja linaloolist jaotub lehe vedelasse faasi, muutub ΔC tundidega ning õhulõhede sulgumine võib selle aja jooksul tugevasti limiteerida nende ühendite emissiooni [Niinemets, Reichstein, 2003ab; Niinemets jt, 2002b].

Alkoholide ning aldehüüdide emissioonil oli varem leitud ka nn “emissioonipurskeid” peale õhulõhede avanemist, kus lühikese aja jooksul täheldati väga suuri emissioonikiirusi [vt Niinemets, Reichstein, 2003ab; Niinemets jt, 2002b]. Meie dünaamiline mudel näitas, et alkoholide ja aldehüüdide emissioonipursked on otseselt seotud nende ühendite suure vesilahustuvusega (väike H). Kui õhulõhed on sulgunud, kogunevad sünteesitud alkoholid lehe veefaasi. Õhulõhede avanedes vabanevad vees lahustunud ühendid lehest lühikese ajavahemiku jooksul, justkui pulsina, mil emissioonikiirus ületab kordades nende sünteesikiirust [Niinemets, Reichstein, 2003ab; Niinemets jt, 2002b].

Toodud näited kinnitavad, et lenduvate ühendite füüsikalise-keemilised omadused mõjutavad mitte ainult kvantitatiivselt taimset emissiooni, vaid teatud juhtudel võivad toimuda kvalitatiivsed muutused ajalises emissioonimustris. Selle töö kokkuvõtteks ilmus ülevaateartikkel ajakirjas *Trends in Plant Science* [Niinemets jt, 2004], kus rõhutati, et lenduvus on orgaanilise ühendi emissiooni väga tugevasti mõjutav fundamentaalne omadus, ning et orgaaniliste

ühendite füüsikalise-keemilise konstandid ning lehtede struktuur mängivad emissiooni kiiruste määramisel tihti olulisemat rolli kui ensüümide keemiline aktiivsus.

FÜÜSIKALIS-KEEMILISTE KARAKTERISTIKUTE TEMPERAATUURISÕLTUVUSED

Lehtede temperatuur varieerub suuresti erinevates ajaskaalades. Temperatuurimuutused mõjutavad lenduvate ühendite sünteesikiirusi, aga ka kõiki nende ühendite füüsikalise-keemilisi parameetreid. Kuna paljude taime poolt emitteeritavate ühendite jaoks puudusid vesi-õhk (H) ja lipiid-õhk (oktanool/vesi, K_{OW}) jaotuskoeffitsiendid ja nende jaotuskoeffitsientide temperatuurisõltuvused, määrati H ja K_{OW} väärtused gaasikromatograafiliselt kümne enamlevinud monoterpeeni jaoks füsioloogilises temperatuurivahemikus 20-50 °C [Copolovici, Niinemets, 2005].

Temperatuuri mõju olulisust saab kõige lihtsamalt kirjeldada Q_{10} väärtuste kaudu. Q_{10} näitab kui mitu korda muutub karakteristiku väärtus, mis on mõõdetud temperatuuril T (X_T), temperatuuri tõstmisel 10 °C võrra ($Q_{10} = X_{T+10}/X_T$). Ensümaatiliste protsesside Q_{10} on üldjuhul suurusjärgus 2–3, samas kui füüsikaliste protsesside Q_{10} on tavaliselt madalam. Näiteks, $Q_{10} = ca$ 1,05–1,1 monoterpeenide gaasifaasi difusioonikoeffitsientide jaoks [Niinemets, Reichstein, 2003ab]. Q_{10} väärtused monoterpeenide H ja K_{OW} jaoks olid suurusjärgus 1,5–2,5 [Copolovici, Niinemets, 2005]. Seega temperatuur mõjutab jaotuskoeffitsiente peaaegu sama tugevasti kui biokeemilisi protsesse, veelgi rõhutades füüsikalise-keemiliste karakteristike olulisust lenduvate orgaaniliste ühendite emissiooni määramisel.

Varasemad tööd näitasid väga kõrgeid Q_{10} väärtusi, suurusjärgus 4–6, lehtede monoterpeenide emissiooni jaoks, samas kui monoterpeenide sünteesi (ensüümid, mis katalüüsivad monoterpeenide sünteesi) Q_{10} väärtused suurusjärgus 2–3 olid sarnased Q_{10} väärtustega teiste biokeemiliste reaktsioonide jaoks [Niinemets, 2004; Niinemets jt, 2002ac]. Q_{10} mõõtmised monoterpeenide füüsikalise-keemiliste karakteristike jaoks annavad seletuse sellele vastuolule monoterpeenide emissiooni ja sünteesi Q_{10} väärtuste vahel. Ilmneb, et monoterpeenide emissioonikiiruse ülikõrged Q_{10} väärtused on tingitud nii biokeemiliste kui füüsikalise-keemiliste karakteristike tugevast temperatuurisõltuvusest [Copolovici, Niinemets, 2005].

KOKKUVÕTTEKS

Lenduvate orgaaniliste ühendite alane töö kujutab Eesti jaoks uut ning olulist uurimissuunda. Taimse "saastuse" olulisusest on alles viimasel ajal hakatud aru saada. Taimne lenduva orgaanika tootmine ületab inimtekkelist emissiooni ligi suurusjärgu võrra ning seetõttu on taimsete emissioonide usaldusväärne mõõtmine ning ennustamine ülioluline atmosfääri keemilise aktiivsuse hindamisel.

Premeeritud töödetsükli põhijärelduseks on, et iga taimse päritoluga lenduva ühendi emissiooni kiirus on unikaalsel viisil kontrollitud füsioloogiliste ning füüsikalis-keemiliste tegurite poolt. Füsioloogiliste ja füüsikalis-keemiliste mehhanismide ühendamine on tähendanud kvalitatiivset muutust lenduvate ühendite emissiooni kontrollmehhanismide mõistmisel [Peñuelas, Llusia, 2004] ning võimaldab realistlikumalt ennustada erinevate omadustega ühendite emissioonikiirusi ning seletada mitmeid taimefüsioloogias anomaalseks peetud nähtusi. Saadud eksperimentaalsed tulemused ning teoreetilised mudelid leiavad kasutamist taimse emissiooni kiiruste arvutamisel suureskaalalistes atmosfäärikeemia mudelites.

KIRJANDUS

- Beauchamp, J., Wisthaler, A., Hansel, A., Kleist, E., Miebach, M., Niinemets, Ü., Schurr, U., Wildt, J. (2005). Ozone induced emissions of biogenic VOC from tobacco: relations between ozone uptake and emission of LOX products. *Plant, Cell and Environment*, 28, 1334-1343.
- Copolovici, L. O., Filella, I., Llusia, J., Niinemets, Ü., Peñuelas, J. (2005). The capacity for thermal protection of photosynthetic electron transport varies for different monoterpenes in *Quercus ilex*. *Plant Physiology*, 139, 485-496.
- Copolovici, L. O., Niinemets, Ü. (2005). Temperature dependencies of Henry's law constants and octanol/water partition coefficients for key plant volatile monoterpenoids. *Chemosphere*, 61, 1390-1400.
- Geron, C., Rasmussen, R., Arnts, R. R., Guenther, A. (2000). A review and synthesis of monoterpene speciation from forests in the United States. *Atmospheric Environment*, 34, 1761-1781.
- Guenther, A., Geron, C., Pierce, T., Lamb, B., Harley, P., Fall, R. (2000). Natural emissions of non-methane volatile organic compounds, carbon monoxide, and oxides of nitrogen from North America. *Atmospheric Environment*, 34, 2205-2230.
- Niinemets, Ü. (2004). Costs of production and physiology of emission of volatile leaf isoprenoids. Hemantaranjan, A. (ed). *Advances in Plant Physiology*, Vol. 7, Scientific Publishers, Jodhpur, 241-278.
- Niinemets, Ü., Hauff, K., Bertin, N., Tenhunen, J. D., Steinbrecher, R., Seufert, G. (2002a). Monoterpene emissions in relation to foliar photosynthetic and structural variables in Mediterranean evergreen *Quercus* species. *The New Phytologist*, 153, 243-256.
- Niinemets, Ü., Loreto, F., Reichstein, M. (2004). Physiological and physico-chemical controls on foliar volatile organic compound emissions. *Trends in Plant Science*, 9, 180-186.
- Niinemets, Ü., Reichstein, M. (2002). A model analysis of the effects of non-specific monoterpene storage in leaf tissues on emission kinetics and com-

position in Mediterranean sclerophyllous *Quercus* species. *Global Biogeochemical Cycles*, 16, 1110, DOI 10.1029/2002GB001927.

Niinemets, Ü., Reichstein, M. (2003a). Controls on the emission of plant volatiles through stomata: a sensitivity analysis. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 108, 4211, doi:10.1029/2002JD002626.

Niinemets, Ü., Reichstein, M. (2003b). Controls on the emission of plant volatiles through stomata: sensitivity or insensitivity of the emission rates to stomatal closure explained. *J. Geophysical Research - Atmospheres*, 108, 4208, doi:10.1029/2002JD002620.

Niinemets, Ü., Reichstein, M., Staudt, M., Seufert, G., Tenhunen, J. D. (2002b). Stomatal constraints may affect emission of oxygenated monoterpenoids from the foliage of *Pinus pinea*. *Plant Physiology*, 130, 1371-1385.

Niinemets, Ü., Seufert, G., Steinbrecher, R., Tenhunen, J. D. (2002c). A model coupling foliar monoterpene emissions to leaf photosynthetic characteristics in Mediterranean evergreen *Quercus* species. *The New Phytologist*, 153, 257-276.

Niinemets, Ü., Tenhunen, J. D., Harley, P. C., Steinbrecher, R. (1999). A model of isoprene emission based on energetic requirements for isoprene synthesis and leaf photosynthetic properties for *Liquidambar* and *Quercus*. *Plant, Cell and Environment*, 22, 1319-1336.

Peñuelas, J., Llusà, J. (2003). BVOCs: plant defense against climatic warming? *Trends in Plant Science*, 8, 105-109.

Peñuelas, J., Llusà, J. (2004). Plant VOC emissions: making use of the unavoidable. *Trends in Ecology & Evolution*, 19, 402-404.

Velikova, V., Loreto, F. (2005). On the relationship between isoprene emission and thermotolerance in *Phragmites australis* leaves exposed to high temperatures and during the recovery from a heat stress. *Plant, Cell and Environment*, 28, 318-327.

*Teaduspreemia tehnikateaduste alal
teadustöö "Päikeseelementide uued materjalid ja konstruktsioonid"
eest*



Enn Mellikov (kollektiivi juht, kolmas vasakult)

Sündinud 01.04.1945 Pärnus

1963 Pärnu IV Keskkool

1968 Tallinna Tehnikaülikool, keemiateaduskond

1985 Eesti NSV teaduspreemia pooljuhtmaterjalide väljatöötamise eest
(kollektiivi liige)

1988 tehnikadoktor anorgaanilise keemia alal

1998 teaduspreemia tehnikateaduste alal (kollektiivi juht)

2003 Eesti Teaduste Akadeemia akadeemik

Alates 1968. a Tallinna Tehnikaülikool: vaneminsener, vanemteadur, opto-
elektroonika laboratooriumi juhataja, pooljuhtmaterjalide tehnoloogia õppe-
tooli juhataja, korraline professor; aastast 2002 materjaliteaduse instituudi
direktor.

Avaldanud üle 180 teaduspublikatsiooni.

Mare Altosaar (teine vasakult)

Sündinud 19.05.1943 Rakveres

- 1961 Rakvere I Keskkool
- 1967 Tallinna Tehnikaülikool, keemiateaduskond
- 1983 keemiakandidaat
- 1985 Eesti NSV teaduspreemia pooljuhtmaterjalide väljatöötamise eest (kollektiivi liige)
- 1998 teaduspreemia tehnikateaduste alal (kollektiivi liige)

Alates 2005 – Tallinna Tehnikaülikooli materjaliteaduse instituudi juhtivteadur.

Avaldanud üle 80 teaduspublikatsiooni.

Sergei Bereznev (neljas vasakult)

Sündinud 28.03.1968 Tallinnas.

- 1987 Tallinna Polütehnikum
- 1993 Tallinna Tehnikaülikool, keemiateaduskond
- 2000 loodusteaduste magister, Tallinna Tehnikaülikool
- 2003 PhD, loodusteadused, Tallinna Tehnikaülikool

Aastatel 1993–1998 – Tallinna Tehnikaülikooli keemiainstituudi teadur. Alates 2000 – Tallinna Tehnikaülikooli alus- ja rakenduskeemia instituudi ja materjaliteaduse instituudi teadur, alates 2004 materjaliteaduse instituudi vanemteadur.

Avaldanud üle 40 teaduspublikatsiooni.

Andres Öpik (esimene vasakult)

Sündinud 4.05.1947 Tallinnas

- 1965 Tallinna Reaalkool
- 1970 Tallinna Tehnikaülikool, keemiateaduskond
- 1980 keemiakandidaat, Tartu Ülikool
- 1985 Eesti NSV teaduspreemia pooljuhtmaterjalide väljatöötamise eest (kollektiivi liige)

Aastatel 1970–1992 Tallinna Tehnikaülikoolis insener, assistent, vanemõpetaja ja dotsent. Alates 1992 samas füüsikalise keemia professor, keemia ja materjalitehnoloogia teaduskonna dekaan.

Aastatel 1983–1984 enesetäiendamine Helsingi Tehnikaülikoolis.

Avaldanud üle 130 teaduspublikatsiooni.

Meie tänapäeva tarbivas ja tootvas maailmas valitseb äärmiselt ebavõrdne olukord. Umbes 20 protsenti maailma elanikkonnast toodab enamiku maailmas tarbitavatest hüvedest, tarbides selleks ka enamiku energeetilisest ressursist. See põhjustab energiakandjate ja tootmisest tekkiva saaste suure kontsentratsiooni ja ebaühtlase jaotuse. Ülejäänud maailmal tuleb seetõttu elada nappide tarbimisvõimaluste ja piiratud energiaressursside tingimustes. Ka arenenud maad peavad mõtlema hakkama energeetiliste ressursside järjest säästlikumale kasutamisele. Nafta ja gaasi varud maailmas ei ole lõpmatud ja nad on kontsentreeritud maailma sellistesse paikadesse, mis ei taga nende jõudmist tarbijani alati mõistliku hinnaga. Suurtootmise kontsentratsioonist on tekkinud ülemaailmsed keskkonnakaitseprobleemid, nagu "kasvuhoone efekt" ja happvihmad. Umbes kolmandikul maailma inimekkonnast puudub ka jõukohane ligipääs traditsioonilistele energiakandjatele. Need on probleemid, millega täna ja tulevikus peab kogu maailm arvestama. Õnneks on aga tänaseks jõutud arenenud maailmas ka arusaamiseni, et üheks võimaluseks keskkonnasõbralikumaks ja kõigile kergesti kättesaadavaks energia saamiseks on päikeseenergeetika. Päikeseelemente võib üles panna nii suurtes linnades kui hajusasutusega piirkondades ühtemoodi edukalt – põhiküsimus on täna vaid nende hinnas.

Standardsete räni baasil valmistatud päikesepaneelide hind on täna *ca* 3 €/W_p. See hind, mis sisaldab endas nii materjali kui ka paneeli valmistamise ning eksploatatsioonikulud, on kõrge ja muudab toodetud elektrienergia paljude rakenduste jaoks liiga kalliks. Seda hinda tuleks alandada 2010. aastaks tasemeni 1–2 €/W_p ja jõuda 2030. aastaks välja hinnani 0,5 €/W_p.

Päikeseelementide eelisteks on loodud seadiste hea ühilduvus muude traditsiooniliste ja taastuvate energiaallikatega ning paindlikkus rakendusvõimaluste osas. Päikeseelementide mooduleid on võimalik ehitada võimsusega mõnest millivattist kuni multimegavattiliste konstruktsioonideni. Neid võib paigaldada väikestesse peopessa mahtuvatesse seadistesse, kuid nendega võib katta ka hoonete fassaade või katuseid.

Päikeseenergeetika globaalne potentsiaal on määratu, sest energia hulk, mis langeb maakera pinnale aasta jooksul, ületab käesoleval ajal ligikaudu 10 000 korda maakera kogu energiavajaduse. Tehniliselt on võimalik kasulikult muundada päikeseenergiat soojuseks või elektrienergiaks ligikaudu 440 000 TWh/aastas, mis on umbes neli korda enam kui maakera kogu energia tarbimine. See kõik annab alust teha positiivseid ennustusi päikeseenergeetika tulevikuväljavaadete kohta. Euroopa Liit näeb oma tulevikuvisionides päikeseenergeetikat tuleviku energeetika võtmetehnoloogiana ning päikeseplatade abil toodetud elektrienergia olulist osa üleminekul 21. sajandi säästlikumale energiavarustussüsteemile Euroopas. Aastal 2030 peab päikeseenergeetika andma *ca* 4% ja aastal 2050 *ca* 10% ülemaailmsest elektrienergia toodangust. See aga tähendab rohkem kui 1000-kordset tõusu võrreldes aastaga 2005.

Täna on päikesepaneelide materjalide turul ainuvalitseja ka räni. Kuid vaatamata räni ligi 95% turuosale on ka teistel pooljuhtmaterjalidel alati võimalus konkureerida, optimeerides hinda ja päikesepaneeli kasutegurit. Üheks võimaluseks on odavad keemilised tehnoloogiad juhul, kui suudetakse valmistada kõrge efektiivsuse ja stabiilsusega õhukesekilelisi materjale ja seadiseid.

Järgnevalt lühikese ülevaade tulemustest, mis on saadud Tallinna Tehnikaülikooli materjaliteaduse instituudi teadlaste poolt päikeseenergeetika materjalide füüsika, keemia ja tehnoloogia alases teadus- ning arendustöös ja mis olid aluseks 2006. aastal Eesti Vabariigi teaduspreemia saanud uuringute kompleksile.

HÜBRIIDSED PÄIKESEPATAREIDE STRUKTUURID

Üheks võimaluseks päikeseelementide hinna alandamiseks on elektrit juhtivate polümeerimaterjalide (EJP) kasutamine hübriidsetes fotovoltpäikesepatareide struktuurides puhverkihi materjalina keskkonda saastava CdS asemel. Selliste struktuuride suurimateks eelisteks on nende loomiseks kasutatavate tehnoloogiate lihtsus ja võimalus luua suurepinnalisi painduvaid päikesepatareiseid. Valmistati uused EJP/vask-indium-kalkogeen fotovoltstruktuurid EJP sadestamisel vask-indium-kalkogeenisele õhukesele kilele. Erinevate EJP-dena kasutati polüaniliini (PANI), polüpürooli (PPy) ja polü(3,4-etiüleendioksütiofeeni) (PEDOT). Eelnimetatud EJP iseloomustab nende lai elektriliste, elektrokeemiliste ja optiliste omaduste spekter koos materjalide elektriliste omaduste väga hea ajalise stabiilsusega. Sulfoonatidega legeritud elektrit juhtivad polümeerid on reeglina p-tüüpi elektrijuhtivusega, samal ajal kui vask-indium-kalkogeensete materjalide juhtivustüüpi (n-tüüp) on kerge kontrollida defektstruktuuri ja legerimisastmega. See teeb võimalikuks nende materjalide baasil fotovolt-muunduri valmistamiseks vajaliku p-n siirde loomise.

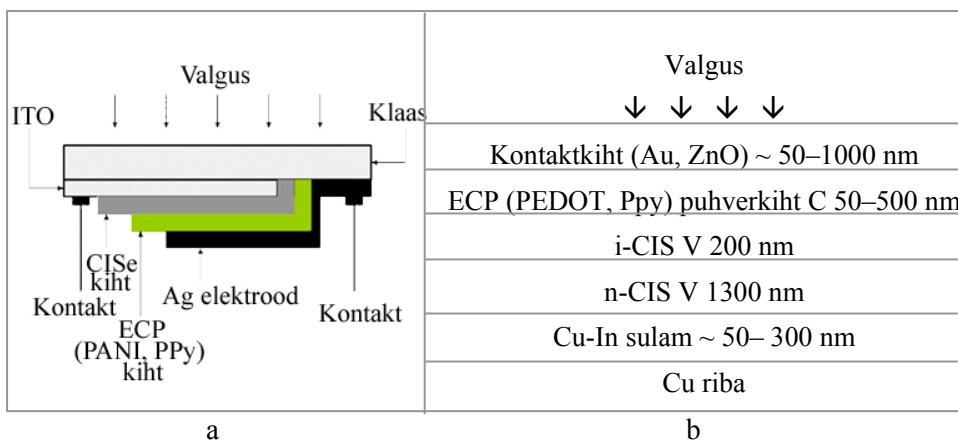
Kõik valmistatud ja uuritud hübriidsed päikeselementide struktuurid

klaas/ITO/CuInSe₂/PANI/Ag,
klaas/ITO/CuInSe₂/PPy/Ag,
Cu/CuInS₂/PPy/i-ZnO/n-ZnO,
Cu/CuInS₂/PEDOT-PSS/i-ZnO/n-ZnO,
Cu/CuInS₂/PEDOT-PSS/Grafiit-täpp ja
Cu/CuInS₂/PEDOT-PSS/Au

olid valmistatud mitmekihilistena [Bereznev jt, 2005b; Kois jt, 2005ab; Mellikov jt, 2005] (joonis 1a, 1b). Loetletud struktuurides on lisaks EJP materjalidele varieeritud absorberkihi materjali, kasutades kas CuInSe₂ või CuInS₂, samuti osades struktuurides vahelihina i-ZnO kilet ja erineva konfiguratsiooni ja paksusega kuld- ja grafiitkontakte. CuInSe₂ õhukesed absorberkiled valmistati klaas/ITO alusel elektrokeemilisel sadestamisel CuSO₄, In₂(SO₄)₃ ja SeO₂ sisaldavatest vesilahustest.

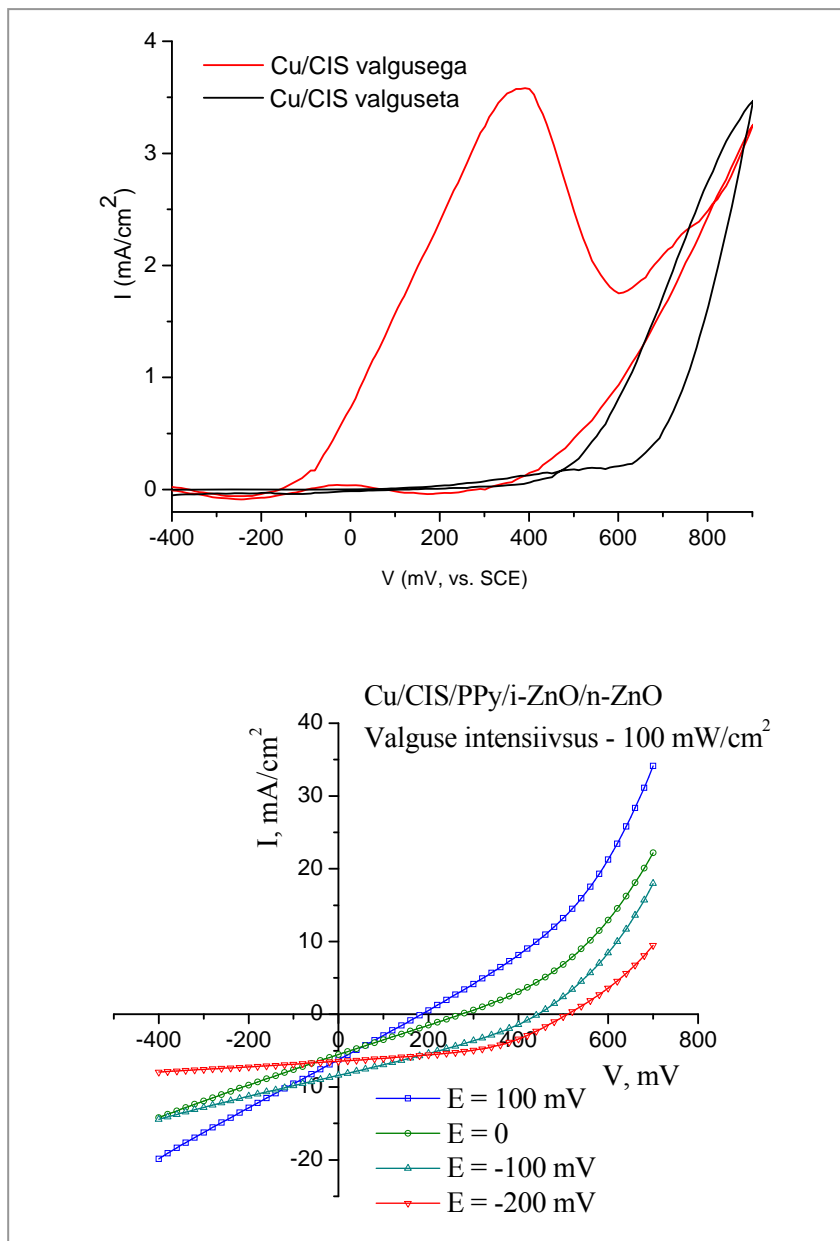
Loetletud struktuuride valmistamisel pöörati peamist tähelepanu EJP polümeerimaterjali omaduste modifitseerimisele ja sobitamisele absorberkihiga, sa-

muti kontaktmaterjali ja seadme optimaalsele disainile suunatud otsingutele. Leiti sobilikud elektrokeemilise sünteesi tingimused ja legerivad lisandid absorbekihiga hästinakkava EJP kile sadestamiseks. Efektiivne aluspinnaga nakkumine tagab ka parema kontrolli sünteesiprotsessi üle. Nii teaduslikult kui ka rakenduslikult huvitavaid tulemusi andis elektrokeemilise sünteesi läbiviimine valgustamisel. Katsetulemused näitasid, et päikeseelemendi tehnilised parameetrid paranesid tunduvalt, kui PPy puhverkihi sadestamise protsess toimus intensiivsel valgustamisel (joonis 2, a ja b). Läbiviidud teadus-uuringute tulemusel töötati välja uudne PPy selektiivse elektrokeemilise sadestamise protsess intensiivsel valgustamisel, mis võimaldab passiveerida võimalikke lühispiirkondi CuInSe₂ kile struktuuris [Bereznev jt, 2005b].



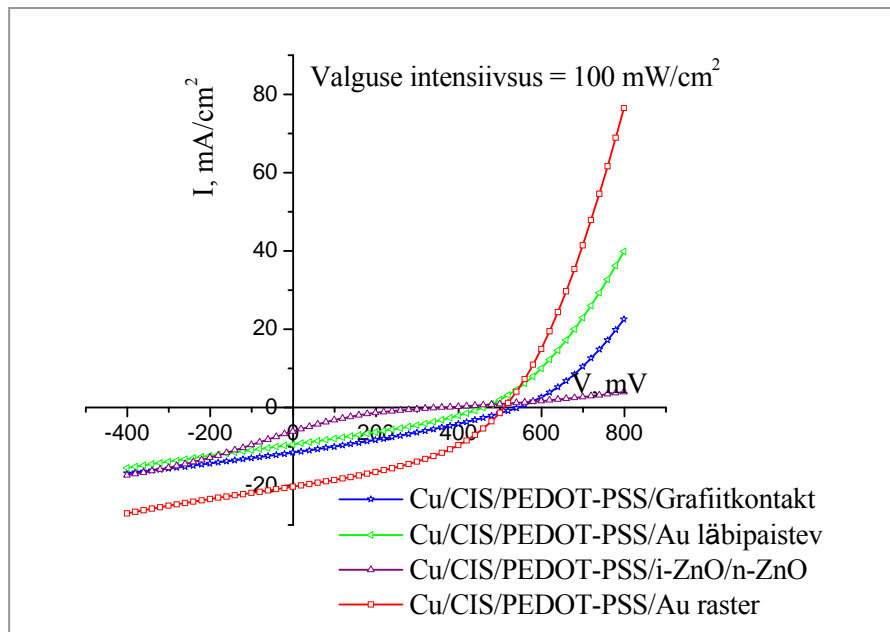
Joonis 1. Hübrüüridsed õhukesekilelised anorgaanilis-polümeersed fotovolt-päikeseapariteid struktuurid: a) klaas/ITO alusel ja b) õhukesel vasest alusel.

Esmakordselt uuriti võimalusi saada päikeseelemendi struktuure Cu/CuInS₂ alusel, kasutades puhverkihina orgaanilist PEDOT-PSS kilet [Bereznev jt, 2005a]. Leiti, et väga hea nakkuvuse PEDOT-PSS õhukeste kilede ja polükristallilise CuInS₂ kile vahel annab polümeerkile kandmine aluspinnale nn “valamise” meetodil. See meetod ei mõjuta ka struktuuri füüsikalisi parameetreid võrreldes näiteks elektrokeemilise polümeeri kile sadestamisega. Oluline roll on struktuuri kasuteguri ja täiteastme tõstmisel ülemise kontakti materjalil ja selle pealekandmise tehnoloogial. Leiti, et päikeseelemendi valmistamisel on eelistatav kasutada ülemise kontakti materjalina vaakumis termiliselt aurustatud kulda. Parima valmistatud struktuuri Cu/CuInS₂/PEDOT-PSS/Au(võrk) tehnilised parameetrid olid tühijooksu pinge (tööpinge) $V_{OC} = 510$ mV, lühisvool $I_{sc} = 20,2$ mA/cm² ja kasutegur $\eta = 4,1\%$ ergastava valguse intensiivsusel 100 mW/cm² [Mellikov jt, 2005] (joonis 3).



Joonis 2.

a) Pürrooli polümeerisatsiooni tsüklilise voltamperomeetria kõverad valgustamisel intensiivsusega $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ja ilma valgustamiseta b) volt-ampersõltuvused erineva polümeerisatsioonipotentsiaali väärtustel valmistatud Cu/CIS/PPy struktuuridele.



Joonis 3.

Volt-ampere-õltuvused erinevalt kujundatud voolukontaktiga hübriidsetele Cu/CIS/PEDOT-PSS struktuuridele.

MONOTERAKIHILISED PÄIKESEELEMENTID

Tüüpilistes anorgaanilistel ühendpooljuhtmaterjalidel põhinevates päikesepeatareides, mis kujutavad endast struktuuri: ZnO (kui ergastava kiirguse aken)/CdS (puhver-kiht)/A¹B³C⁶ tüüpi ühendi kiht (kiirguse absorber)/Mo (baaselektrood)/klaasalus, on saavutatud tänaseks energia muundamise efektiivsus 16–19%, kuid elemendi (toodetava energia) hind on liiga kõrge tänu kasutatavatele kallitele vaakumtehnoloogiatele. Meie oleme oma pingutused suunanud vaakummeetoditel põhineva õhukesekilelise päikeseelementide tehnoloogia asendamiseks odavate ja suure tootlikkusega pulbriliste tehnoloogiatega.

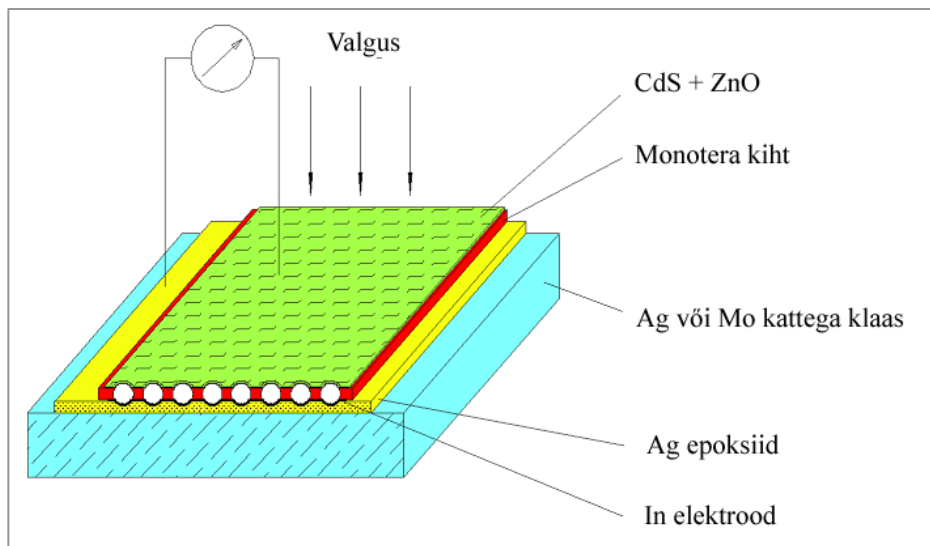
Kolmiksüsteemi Cu-Se-In faasidiagrammi analüüsi alusel tehtud järeldused andsid võimaluse CuSe-Se vedelfaasi kasutada nii CuInSe₂ kristallide sünteesiks kui ka samaaegseks monoterapulbri kasvatamiseks. Hiljem leidsid sulandajana kasutamist monoteralse materjali sünteesiks ja kasvatamiseks ka mitmed teised halogeniidsed soolad. Sünteesitud pulbri kristallid on ühtlase ümara kujuga ja siledade pindadega. Kasvatamise temperatuuri, kasvatusprotsessi kestuse ja sulandaja keemilise koostisega saab reguleerida kristallide suurust ja kuju [Altosaar jt, 2003, 2005ab; Kauk jt, 2005; Mellikov jt, 2005]. Ülaltoodu põhjal jõuti tehnoloogilise lahenduseni, mis on hetkel kaitstud patentidega kõigis Euroopa maades, USAs ja Jaapanis, kus sula CuSe-Se faasi kasutatakse nii CuInSe₂ sünteesiks kui ka samaaegseks monoterapulbri kasvatamiseks. Süntee-

situd monoterapulbri pooljuhtomaduste modifitseerimiseks on aga vaja teadlikult suunata monoterade defektkoostist ja keemilist koostist, mida tehti varieerides sulandaja keemilist loomust ja kasutades pulbrite termilist järelkäsitlust erinevates gaasikeskkondades. See kõik lõi aluse monoteramaterjalide suunatud sünteesiks, mis on kaitstud mitme patenditaotlusega enamikes juhtivates tööstusmaades.

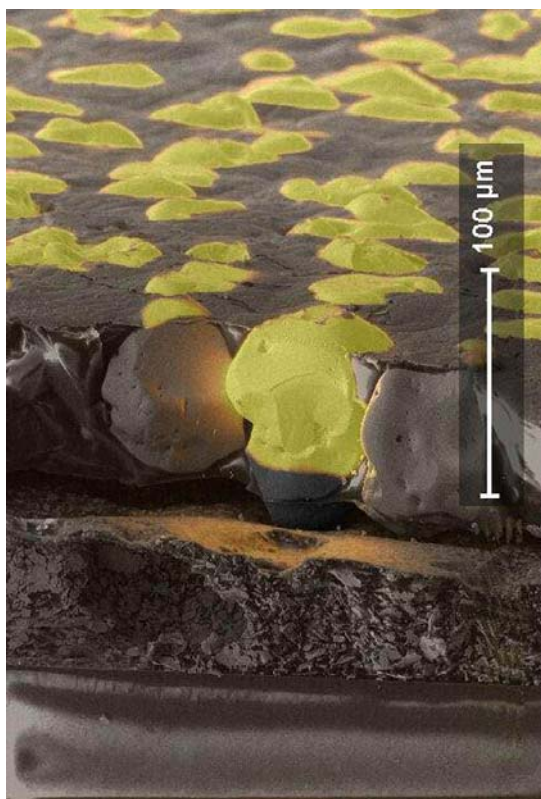
Loodud materjalid on leidnud edasist kasutamist originaalsete monoterakihiliste päikesepatareistruktuuride loomiseks. Vastav tehnoloogia on kaitstud samuti patendiga rohkem kui 20 riigis (joonised 4 ja 5).

Monoterakihiline päikeseelement kujutab endast pulbri osakeste ühe kristalli paksust kihti orgaanilises sideaines. Monoterakihi pealmisele kihile sadestati keemiliselt CdS kile. Päikeseelemendi struktuuri lõplikuks moodustamiseks valmistati katoodpihus-tamise teel ZnO vahekiht ja ja valgust läbilaskev ZnO:Al kontakt.

Käesolevaks ajaks on saavutatud monoterapäikesepatareide struktuuridele tühijooksu (tööpinge) pinget $V_{OC} = 500 \text{ mV}$ ja täiteaste kuni 60%. Kasutegur η ületab 10%, mis on küll vähem kui räni baasil saadud päikeseelementidel, aga arvestades tehnoloogia odavust on saadava energia hind väiksem kui seni kasutataval vakuumtehnoloogiatel maailmas toodetavate päikeselementide abil saadava energia maksumus. Kahtlemata sisaldab selline originaalne ja odav tehnoloogia ka arenguruumi ja võimalusi täiustamiseks. Probleemiks on näiteks CuInSe₂ kristallide pinna puhastamine kasutatavast vaigust ja kristallidevahelise kontakti parandamine. See võimaldab suurendada struktuuride täiteastet.



Joonis 4.
Monoterakihil kujundatud päikeseelemendi struktuur.



Joonis 5.
Nii näeb välja tegelikkuses
monoterakihilise päikeseele-
mendi struktuur.

Antud hetkel jätkub koostöö firmaga Scheuten Glasgroap loodavate päikesepatarei struktuuride veelgi paremate tehniliste näitajate saavutamiseks. Firma planeerib modifitseeritud väljatöötuste jõudmist tööstusliku realiseerimise staadiumi tuleva aasta lõpul. Aastaks 2012 planeerib Scheuten Glasgroap läbi rakenduste, mis põhinevad meie uurimisgrupi poolt loodud päikesepatareide unikaalsetel struktuuridel, jõuda maailma kolme suurima päikesepatareide mooduleid tootva firma hulka (<http://www.jointsolarpanel.nl/cellendag05.htm>).

Päikeseneergeetika materjalide alasest uurimistööst Eestis on osa võtnud terve rida Tallinna Tehnikaülikooli teadlasi nii minevikus kui ka antud momendil ja kõigil nendel on mingi osa selle uuringute kompleksi edus. Eelkõige on uurimisgrupp palju tänu võlgu Jüri Varvasele ja Peeter Kukele, kelle initsiatiivil loodi vastav uurimissuund TTÜs juba üle kolmekümne aasta tagasi.. Antud uuringutetsüklist võtsid aktiivselt osa veel vanemteadurid Tiit Varema, Jüri Krustok ja Jaan Raudoja ning teadurid Marit Kauk ja Olga Volobujeva, kes kahjuks aga ei mahtunud seekord toimunud teaduspreemia kandidaatide valiku hulka. Uurimisgrupi töö tulemused ei oleks olnud nii silma-paistvad ilma meie välispartnerite abita (prof Dieter Meissner, Welsi Ülikool, Austria; H.-W. Schock HMI, Saksamaa jt). Nimetamata on jäänud veel palju suurepäraseid ini-

mesi nii TTÜst, teistest Eesti teadusasutustest kui ka meie isiklikud lähedased, kellele tahaksime öelda tänusõnu meile osutatud abi ja toetuse eest, kuid kõigi nende loetle-mine viiks selle artikli mahu väga suureks.

KIRJANDUS

Adomavičius, R., Krotkus, A., Kois, J., Bereznev, S., Mellikov, E. (2005). Terahertz radiation from nonstoichiometric CuInSe₂ films excited by femtosecond laser pulses. *Applied Physics Letters*, 87, 191104, 1-3.

Altosaar, M., Danilson, M., Kauk, M., Krustok, J., Mellikov, E., Raudoja, J., Timmo, K., Varema, T. (2005a). Further developments in CIS monograin layer solar cells technology. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 87, 25-32.

Altosaar, M., Ernits, K., Krustok, J., Varema, T., Raudoja, J., Mellikov, E. (2005b). Comparison of CdS films deposited from chemical baths containing different doping impurities. *Thin Solid Films*, 480-481, 147-150.

Altosaar, M., Jagomagi, A., Kauk, M., Krunks, M., Krustok, J., Mellikov, E., Raudoja, J., Varema, T. (2003). Monograin layer solar cells. *Thin Solid Films*, 431, 466.

Bereznev, S., Konovalov, I., Kois, J., Mellikov, E., Öpik, A. (2003). CuInS₂/PEDOT photovoltaic structure. *Materials Research Society Symp. Proc. Organic and Polymeric Materials and Devices*, ISBN 1-55899-708-3, 771, 243-248.

Bereznev, S., Konovalov, I., Kois, J., Mellikov, E., Öpik, A. (2004). Polypyrrole electrodeposition on inorganic semiconductors CuInSe₂ and CuInS₂ for photovoltaic applications. *Macromolecular Symposia*, 212, 287.

Bereznev, S., Konovalov, I., Öpik, A., Kois, J. (2005a). Hybrid CuInS₂/polypyrrole and CuInS₂/poly(3,4-ethylenedioxythiophene) photovoltaic structures. *Synthetic Metals*, 152, 81-84.

Bereznev, S., Konovalov, I., Öpik, A., Kois, J., Mellikov, E. (2005b). Hybrid copper-indium disulphide/polypyrrole photovoltaic structures prepared by electrodeposition. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 87, 197-206.

Kauk, M., Altosaar, M., Raudoja, J., Timmo, K., Grossberg, M., Varema, T., Ernits, K. (2005). Tailoring the composition and properties of CuInSe₂ materials for solar cell application. *Proc. of SPIE. Optical Materials and Applications*, 5946, 224-229.

Kois, J., Bereznev, S., Mellikov, E., A. Öpik, A. (2003). Photovoltaic structures formed by thermal annealing of electrodeposited CuInSe₂ in H₂S. *Proc. Eston. Acad. Sci.*, 52, 2, 51-58.

Kois, J., Bereznev, S., Raudoja, J., Mellikov, E., Öpik, A. (2005a). Glass/ITO/In(O,S)/CuIn(S,Se)₂ solar cell with conductive polymer window layer. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 87, 657-665.

Kois, J., Bereznev, S., Raudoja, J., Mellikov, E., Opik, A. (2005b). Hybrid solar cells based on inorganic thin film structures and conjugated polymers. Proc. of SPIE. Optical Materials and Applications, 5946, 230-238.

Krustok, J., Jagomägi, A., Raudoja, J., Altosaar, M. (2003). Photoluminescence properties of stoichiometric CuInSe₂ crystals. Solar Energy Materials and Solar Cells, 79, 401-408.

Mellikov, E., Altosaar, M., Bereznev, S., Kauk, M., Kois, J., Krustok, J., Krunks, M., Varema, T. (2005). Materials and technologies for photovoltaic applications from Estonia, Proc. of SPIE. Optical Materials and Applications, 5946, 243-251.

Mellikov, E., Opik, A. (2002). Kõrgtehnoloogilised materjaliuuringud Tallinna Tehnikaülikoolis. Eesti TA, Teadusmõte Eestis, 73-76.

*Teaduspreemia geo- ja bioteaduste alal uurimistööde tsükli
“Funktsionaalsed protsessid ja bioloogilised interaktsioonid
planktonikooslustes” eest*



Kalle Olli

Sündinud 12.02.1967 Tallinnas

1985 Tallinna 21. Keskkool

1992 Tartu Ülikool, bioloogia

1993 MSc Tartu Ülikool, botaanika eriala

1997 PhD Tartu Ülikool, botaanika ja mükoloogia eriala

1998 külalisteatur, Norwegian College of Fishery Science, University
Tromsø, Norra

1998–2000 järeldoktor, Woods Hole Oceanographic Institution, USA

Alates 2002 Tartu Ülikool, vanemteatur.

Avaldatud 27 eelretsenseeritud teadusartiklit (sh kaasautorina).

PELAAGILIS-BENTILINE SIDUSUS OOKEANIS

Bioloogilise okeanograafia paljudest harudest hakkab silma kaks üksteist praktiliselt ignoreerivat, ent samas funktsionaalselt tihedalt seotud haru. Ühed teadlased uurivad planktonit, olles küllalt ignorantsed bentoses toimuvate protsesside suhtes. Traditsionaalsed bentose uurijad on aga kapseldunud oma maailma, huvitumata planktilistest protsessidest.

Kus on siis sidusus? Välja arvatud kitsas litoraaliveoõndis sõltub bentiline elustik pea täiel määral planktonist alla langenud orgaanilisest ainest, nii selle hulgast kui ka kvaliteedist. Planktiline elustik vajab aga põhjakihtides regenereerinud lahutunud mineraaltoitainete juurdevoolu. Kahte maailma ühendavaks lüliliks on orgaanilise aine SETTIMINE planktonist, läbi veesamba ookeani sügavikku ja lõpuks setetesse. Settimine eemaldab eufootilisest kihist¹ fütoplanktoni jaoks olulisi ressursse, sh lämmastikku ja fosforit. Planktilise toiduahela jaoks on seega tegu kahetsusväärse kaoga. Hästi struktureerunud planktonikooslus toimib viisil kus kaod on võimalikult väikesed. Päril ilma kadudeta ei toimi aga ka kõige täiuslikum süsteem.

¹ Veesamba pindmine valgustatud kiht, kus toimub primaarproduksioon.

OOKEANI SÜSINIKUPUMP

Pisut teadusliku moelainega kaasas käies haakub orgaanika settimine viimastel kümnenditel aktualiseerunud inimtekkelise CO₂ sisalduse suurenemisega Maa atmosfääris. Ookeani nähakse, või soovitakse näha, puhvrina, mis tasakaalustaks süsihappegaasi sisalduse tõusu atmosfääris. Kuivõrd lootused õigustatud on, ei ole veel teada. Kõikvõimalikud mõjud, vastasmõjud, koosmõjud ning positiivsed ja negatiivsed tagasisidemed ei ole veel selgeks mõeldud.

Puht mehhanistlikult on mõistetav, et orgaaniliste partiklite gravitatsiooniline settimine ookeani sügavamatesse osadesse eemaldab seotud süsinikuaatomid bioloogilisest ringest aastatuhandeteks. Orgaaniline aine moodustub peamiselt ookeani eufootilises kihis fütoplanktoni primaarproduktiooni tulemusena, mille käigus seotakse vees lahustunud süsihappegaas. Seda sidumist ja järgnevat settimist nimetatakse ookeani bioloogiliseks süsinikupumbaks – süsinik eemaldatakse atmosfäärist pikkadeks perioodideks ookeani sügavikku.

Kui efektiivne selline pump võiks olla? Ilmselt sõltub settiva orgaanika hulk primaarproduktioonist. Mida suurem on primaarproduktioon, seda rohkem on orgaanilist ainet, mis potentsiaalselt võiks settida. Selle loogikaga haakub empiiriline mudel, mis võimaldab ennustada settimist sõltuvalt primaarproduktioonist ja sügavusest ning on kirjeldatav astmefunktsioonina [Suess, 1980; Pace jt, 1987]. Kuigi globaalsete hinnangute andmiseks kasulik, võiks selle mudeli mitmel põhjusel ebatäpseks tunnistada. Esmalt on vaja selgust saada teoreetiliselt väga olulises kontseptsioonis – primaarproduktioon on jaotatav uueks ja regenereeritud produktiooniks.

UUS JA REGENEREERITUD PRODUKTSIOON

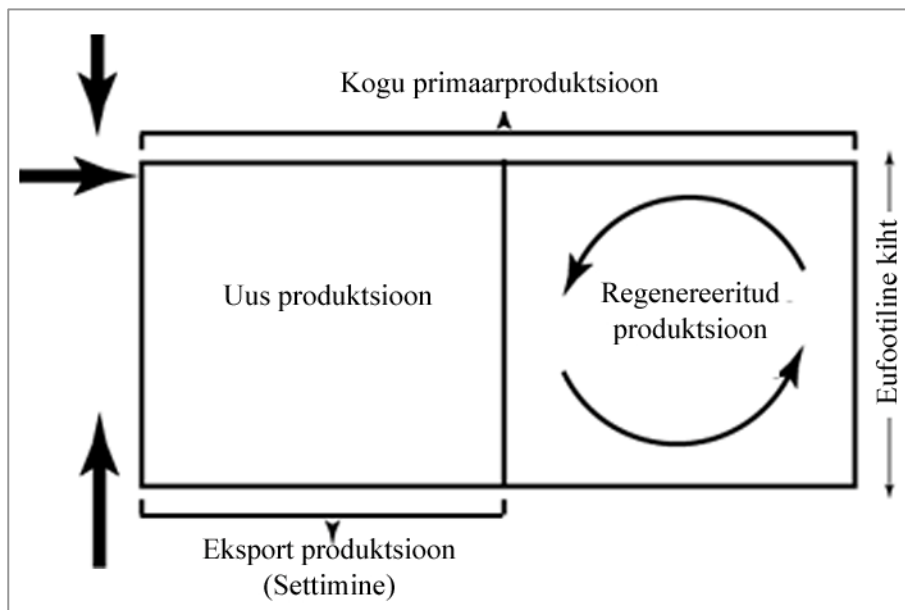
Definitsiooni järgi põhineb uus produktioon uutel mineraaltoitainetel, ehk siis toitainetel mis satuvad eufootilisse kihti 'kusagilt mujalt', nt sügavamatest kihtidest, varasemast talvisest varust, atmosfäärist. Sellele vastandub regenereeritud produktioon, mis põhineb eufootilises kihis produktiivsel perioodil orgaanilisest ainest remineraliseerunud toitainetel (joonis 1).

Ookeanis on peamine produktiooni piirav makroelement lämmastik. Uus produktioon põhineb nitraadil. Orgaanilise lämmastiku vahetul mineralisatsioonil vabaneb aga mitte nitraat, vaid ammoonium (või ka urea). Seetõttu on regenereeritud produktioon defineeritud kui ammooniumil (ja ureal) põhinev primaarproduktiooni osa. Praktikas on neid kahte raske eristada, kuid oluline on kontseptsioon.

Levinud käsitluse kohaselt määrab settimise potentsiaali uus produktioon, samas kui regenereeritud produktioon ringleb planktilises toiduvõrgustikus. Pelaagilis-bentilise sidususe katkedes lakkaks uute toitainete (nitraadi) juurdevool eufootilisse kihti, kogu produktioon oleks regenereeritud ja orgaanilise aine settimine lakkaks. Selline stsenaarium tegelikkuses ei realiseeru, küll aga varieerub uue produktiooni osakaal koguproduktioonist ehk *f*-suhe (teoreeti-

lised piirid 0 kuni 1). Kõrge f -suhe loob eelduse intensiivseks seadmiseks ja efektiivseks bioloogiliseks pumbaks. Madala f -suhte korral ringleb orgaaniline aine hästi struktureerunud planktilises koosluses väga väikeste kadudega; enamused sünteesitud orgaanilisest süsinikust respireeritakse taas süsihappegaasiks ja bioloogiline süsinikupump töötab tühikäigul.

Uus tootmine on väga oluline kontseptsioon bioloogilises okeanograafias. See määrab inimese poolt kasutatavate mereressursside hulga, aine ja energia voo bentosesse ning planktoni kõrgematesse toiduahela lülidesse (nt kalad), samuti atmosfäärse CO₂ sidumise efektiivsuse.



Joonis 1.

Uus ja regeneeritud tootmine põhinevad piirava toitainete (i) juurdevoolul väljastpoolt eufotilist kihti (adveksioon, turbulents segunemine sügavamat kihtidest, atmosfääri depositsioon, sissekanne jõgedest; joonisel kujutatud sirgete nooltega) ning (ii) eufotilises kihis regeneeritud ja taaskasutatud toitainetel (kaarnoored). Uus ja regeneeritud tootmine kokku moodustab kogu primaarproduksiooni. Eksporttootmine moodustab eufotilisest kihist välja vajuv orgaaniline aine.

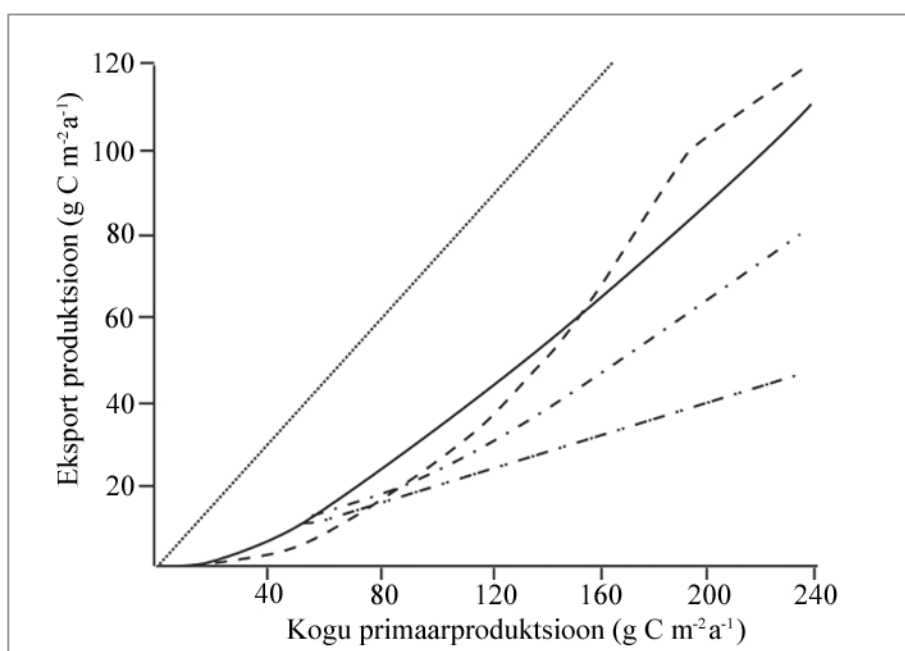
EKSPORTPRODUKTIOON

Eufotilise kihi alumise piiri määrab ära kompensatsioonipunkt, kus valguse vähenedes fütoplanktoni primaarproduksioon langeb allapoole respiratsioonikulusid. Seda osa primaarproduksioonist, mis settib välja eufotilisest kihist,

nimetatakse eksportproduksiooniks ja selle suhet kogu primaarproduksiooni e -suhteks.

e -suhe ei ole põhimõtteliselt konstantne suurus, vaid varieerub olenevalt planktonikoosluse struktuurist ja tervest reast teistest orgaanilise aine settimist mõjutavatest teguritest. e -suhte muutlikkus muudab settimist kogu primaarproduksiooni funktsioonina käsitlevad mudelid paratamatult ebatäpseteks.

Eksportproduksiooni on võimalik otseselt mõõta settelõksudega [Gardner, 2000], kuid globaalseteks hinnanguteks on see tülikas, ebaefektiivne ja kallis. Seetõttu on otsitud algoritme, mis kirjeldaksid eksportproduksiooni kogu primaarproduksiooni funktsioonina (joonis 2). Mida aeg edasi, seda enam on veendunud, et seos on mittelineaarne – kogu produktsiooni suurenedes suureneb eksport suhteliselt kiiremas tempos. Produktsioon suureneb näiteks seoses veekogu eutrofeerumisega. Eutrofeerumise teatud läviväärtuse ületudes suureneb eksportproduksioon hüppeliselt ja viib sette ning veekogu põhjakihtides hapniku kadumisele. Seega on eksportproduksioon oluline mõiste eutrofeerumise kontrolli ja keskkonnasäästliku administreerimise seisukohalt. Rannikualadel ja teistel eutrofeerumise suhtes tundlikes vetes on vajalik produktsioon hoida allpool läviväärtust, mille ületudes eksport suureneks hüppeliselt.



Joonis 2.

Kogu primaarproduksiooni ja eksportproduksiooni vahelise seose leidmiseks on tuletatud erinevad algoritmid. Eri autorite kõverad kirjeldavad ookeani eri piirkondi. Allikas: Wassmann (1990).

SETTEVOO VERTIKAALNE HÄÄBUMINE

Vertikaalne settevoog teatud sügavuses sõltub ühelt poolt settivate osakeste moodustumisest (otsesemalt või kaudsemalt primaarproduktiooni tulemus) ja juba settivate osakeste edasisest heterotroofsest lagundamisest (zooplankton toitub settivatest agregaatidest, bakteriaalne lagundamine). Eufotilises kihis pinnalt allapoole liikudes settevoog suureneb, saavutades maksimumi kihi alumises osas, kus primaarproduktioon lakkab. Seejärel jäävad ainult lagundamisprotsessid ja settevoog hakkab sügavuse suurenedes kiiresti kahanema. Kahanemine on oma olemuselt eksponentsiaalne – vahetult eufotilise kihi all on kahanemine kõige kiirem. See on piirkond, kus zooplanktoni hordid toituvad allalangevatest osakestest; ka bakteriaalne lagundamine on siin kõige intensiivsem, kuna settiv orgaaniline aine on veel kõige värskem ja parema kvaliteediga. Sügavuse suurenedes muutub settiv orgaaniline aine refraktoorsemaks (kiiremini lagundatavad komponendid on juba ära) ja edasine lagunemine aeglustub (joonis 3).

Eeltoodu on matemaatiliselt formaliseeritav valemiga:

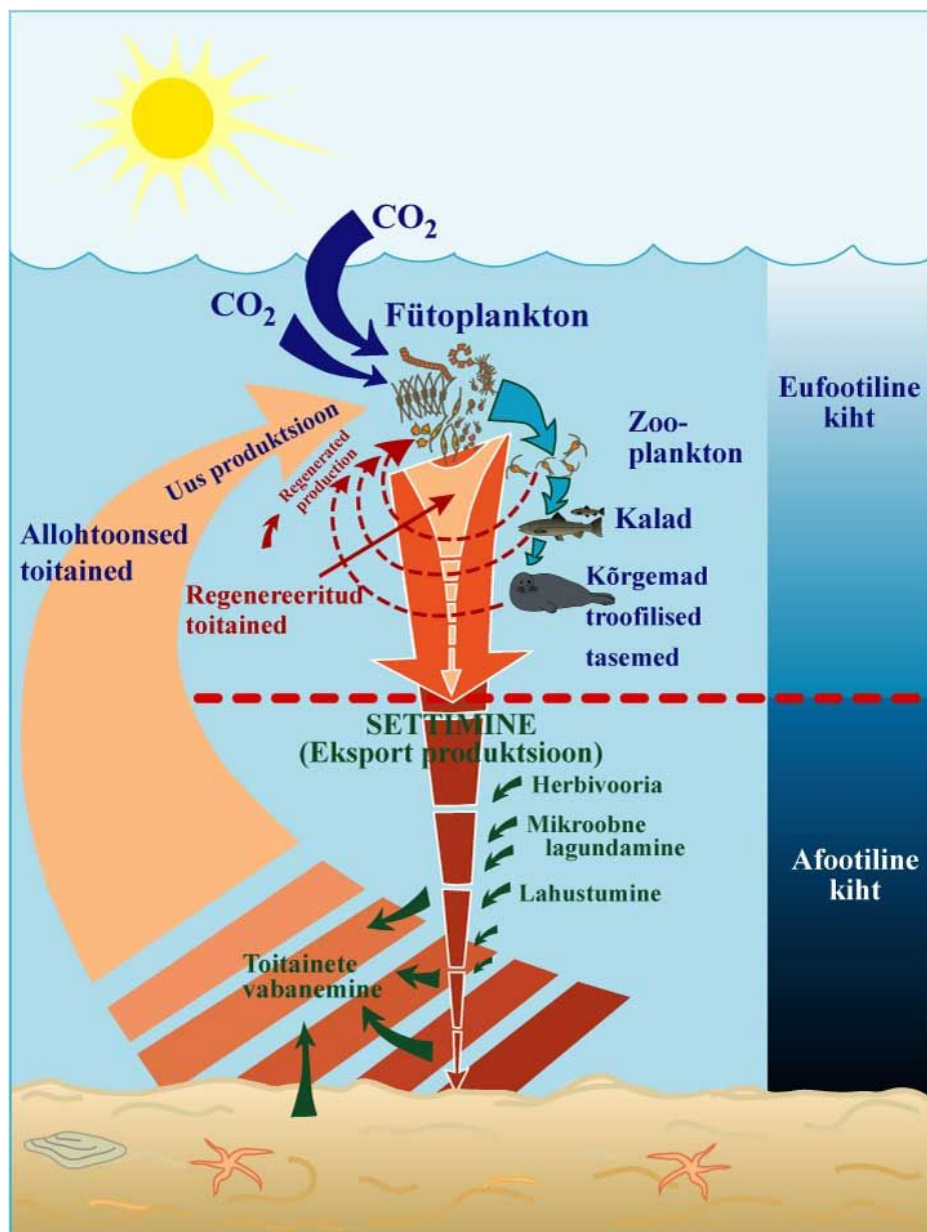
$$y = a \times (x - z)^b$$

kus y – settevoog sügavusel x , a – eksportproduktioon, z – n eufotilise kihi alumine piir (meetrites pinnalt), kus settimine on maksimaalne, ja b – eksponent, mis väljendab settevoo hääbumise intensiivsust [Olli jt, 2001]. Erinevalt varasematest mudelitest [Suess, 1980; Pace jt, 1987; Karl jt, 1988] ei ole siin y -asümptoot pinnakihis, kus vertikaalne voog teoreetiliselt puudub, vaid produktiivse kihi alumisel piiril (joonis 4).

Parameeter b sõltub planktilise koosluse struktuurist. Liigirikka heterotroofse koosluse korral väheneb settimine kiiresti ja b absoluutväärtus on suur. Heterotroofsete populatsioonide nõrk seis vähendab b väärtust ja settevoog väheneb vertikaalsihis vähe. Sama toimub ka karnivoorse planktoni toimel läbi troofilise kaskaadi – karnivoorid hävitavad herbivoore ja vähendavad sellega survet settivale orgaanilisele ainele (joonis 5).

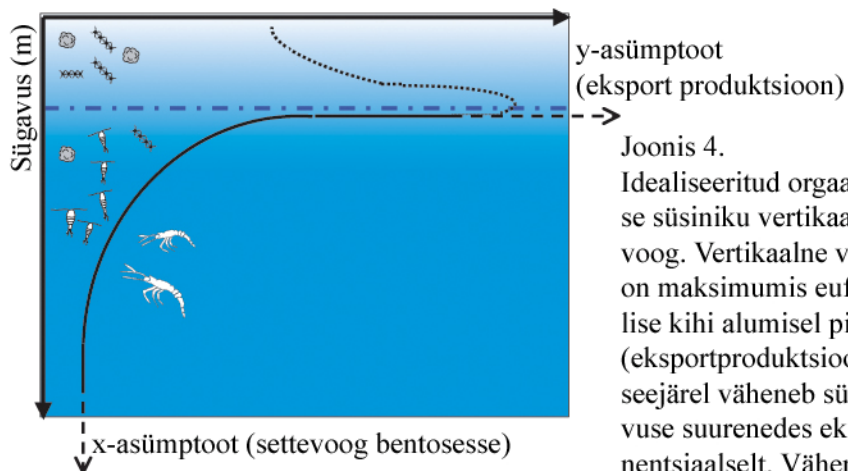
SETTIMISE AJALINE DÜNAAMIKA

Kliimavöötmetes, kus esinevad aastaajad, on settimise intensiivsus väga episoodiline, sõltudes tugevalt aastaegadest tingitud muutustest planktonikoos- luses. Pärast talvist, valguse puudusel valitsevat vaikelu järgneb tavaliselt primaarproduktiooni plahvatuslik tõus, mida tuntakse kui fütoplanktoni kevadõitsengut. See kestab umbes kuu kuni kaks ning selle vältel tarbitakse ära talvel vette kogunenud mineraaltoitained. Valitseb uus produktioon ja f -suhe on lähedane ühele. Eufotilisse kihti akumuleeruv kõrge fütoplanktoni bio- mass annab potentsiaali massiliseks orgaanilise aine settimiseks. Kevadõitseng lõpeb tüüpiliselt mineraaltoitainete ammendumisel eufotilises kihis ja sellele järgneb moodustunud kevadise fütoplanktoni biomassi kiire settimine ning planktonikooslus lülitub lühikese ajaga kevadiselt reziimilt suvisele.

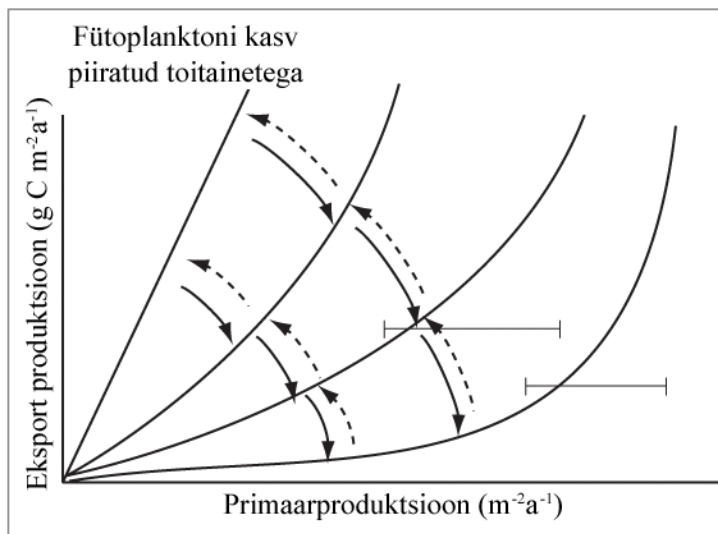


Joonis 3.

Primaarproduktsioon, orgaanilise aine settimine ja toitainete regeneratsioon meres. Skemaatiliselt on näidatud võtmeorganismid (fütoplankton, zooplankton, kõrgemad troofilised tasemed, bentose elustik) ning nende roll orgaanilise aine produktsioonis ja lagundamisel.



Joonis 4. Idealiseeritud orgaanilise süsiniku vertikaalne voog. Vertikaalne voog on maksimumis eufootilise kihi alumisel piiril (eksportproduksioon), seejärel väheneb sügavuse suurenedes eksponentsiaalselt. Vähene mine on kõige markantsem esimestel kümnetel meetritel allpool eufootilist kihti.



Joonis 5. Primaarproduksiooni ja eksportproduksiooni suhe sõltub herbivoorse surve tugevusest fütoplanktoni õitsengu perioodil (mustad nooled). Tugev herbivoorne surve alandab orgaanilise aine eksporti, kuid ületades teatud künnise (horizontaalsed jooned) kaotab planktiline kooslus tasakaalu ja eksport suureneb hüppeliselt. Karnivoorne surve (katkendjoonega nooled) vähendab herbivoorset survet. Kui fütoplanktoni dünaamika on täielikult mineraaltoitainete poolt määratud, läheneb ekspordi sõltuvus primaarproduksioonist lineaarsele.

Kevadõitsengu järgne orgaanilise aine settimine on oluliseks parasvöötme pe-laagilis-bentilise sidususe manifestatsiooniks – lühikese ajaga (paar nädalat) set-tib suurusjärgus pool kogu aasta normist. Bentose elustikule on see helde aeg – korraga tuleb kätte suur kogus kõrgkvaliteedilist toitu. Koguni nii helde, et võib tekkida oht põhjakihtide hapnikuvaru ammendumiseks koos sellest tulenevate traagiliste tagajärgedega aeroobsele elustikule.

Settiva orgaanilise aine kvaliteeti mõõdetakse biogeokeemilistest parameetritest lähtuvalt – enamasti orgaanilise süsiniku ja lämmastiku (ka fosfori) suhte järgi. Lähtekohaks on nn Redfieldi (molaar)suhe: $C_{106}:N_{16}:P_1$. See maagiline suhe vastab orgaanilise aine globaalsele keskmisele elementaarsele suhtele maailmaookeanis ning just selles suhtes omastab fütoplankton (taas globaalne keskmine!) keskkonnast neidsamu elemente. Kui settiv orgaanika on Redfieldi suhtes, siis on tegemist värskel ja 'kõrgkvaliteedilise' ainega, enamasti elusad ja terved fütoplanktoni rakud. Orgaanilise aine mikroobsel ümbertöötlemisel hakkab süsiniku osakaal suurenema. Nimelt mineraliseeritakse orgaaniline lämmastik (ja veelgi enam fosfor) kiiremini kui orgaaniline süsinik. Mida kauem on lagunemine ja ümbertöötlemine toimunud, seda suurem on süsiniku osakaal ja seda madalamaks loetakse aine toiteväärtust bentilisele elustikule, ehk siis kvaliteeti. Madala kvaliteediga settiv orgaaniline aine on iseloomulik suveperioodile – settevoog on tagasihoidlik ja see väheneb viletsate omadustega.

SETTIMINE JA OSAKESTE SUURUS

Orgaanilise aine settimise voogu mõõdetakse ühikutes $mg\ C\ m^{-2}\ (p^{-1})$ päevas, ning settimise keskmist kiirust, $m\ p^{-1}$. Keskmised suurused on küll kasulikud biogeokeemilistes arvutustes ja modelleerimisharjutustes, kuid on kidakeelsed iseloomustamiseks konkreetseid settivaid osakesi meres. Reaalsete osakeste settimiskiirused on väga erinevad. Ühes äärmuses on väga väikesed osakesed, näiteks praktiliselt settimatud bakterid (teoreetiline settimiskiirus *ca* $1\ mm\ p^{-1}$), teises äärmuses suurte zooplankterite karkassid ja suured (kuni cm) detriidi² agregaadid (suurusjärg *ca* $100\ m\ p^{-1}$). Kõigist vees leiduvatest partiklitest moodustavad vertikaalse voo põhiosa vaid vähesed, kiiresti settivad, reeglina suuremõõtmelised osakesed.

Settimist mõjutavatest teguritest on olulisim vajuva osakese suurus, mis vastavalt Stokes'i valemile mõjutab settimiskiirust ruutfunktsiooni kohaselt. Osakeste suurus ookeanis ei ole püsiv. Amorfsed detriidiagregaadid fragmenteeruvad ja teisel liituvad taasühinedes ookeanis toimuvate dünaamiliste protsesside tulemusel. Fütoplanktoni rakud lüüesuvad, kaotades oma suuruses, või koaguleeruvad suuremateks, kiiresti settivateks agregaatideks.

² Üldine nimetus surnud orgaanilise aine osakeste kohta veekogus.

KOAGULATSIOON

Fütoplanktoni koagulatsioon on üks olulisemaid protsesse, mis kiirendab biomassi vajumist veesambas [Jackson, 1990]. Üksik rakk, tüüpiliselt läbimõõdus 20–100 μm , on liiga väike, et iseseisvalt märkimisväärselt vajuda (mõni m p^{-1}). Kui fütoplanktoni kontsentratsioon vees suureneb, kasvab kahe raku juhusliku kokkupuute tõenäosus kiiresti. Kokku puutudes võivad rakud taas lahku minna või kokku jääda, mis on taas tõenäosuslik protsess, sõltudes muuhulgas rakkude füsioloogilisest seisundust, liigist, jm. Morbiidsed, toitainetevaeguses viibinud rakud on sageli 'kleepuvad' ja moodustavad varmalt agregate. Rakkude agregadi tekkides suureneb nende vajumiskiirus hüppeliselt. Vajudes kogub agregaat enda teele jäävad aeglasemalt settivad osakesed, agregaat suureneb funktsionaalselt ning vajumiskiirus kasvab ruutfunktsiooni lähedalt. Agregadi rikkalikus keskkonnas leiavad hea äraelamise bakterid, seejärel bakteritest toituvad algloomad. Agregaat kujutab endast rikkalike ressursside ja elustikuga oaasi kesk toitainetevasest veekeskkonda. Bakterid ja algloomad lõhustavad ja lagundavad agregaati, muutes selle taas väiksemaks ja seega aeglasemalt vajuvaks. Paljud eufootilises kihis hea kiirenduse saanud agregaatidest ei jõua kunagi ookeani põhja, vaid lagundatakse eelnevalt täielikult.

MINERAALBALLAST

Vajuvad vaid need partiklid, mille tihedus on ümbritsevast keskkonnast suurem. Vajumiskiirus sõltub osakeste ja keskkonna tiheduste erinevusest lineaarselt (Stokes'i valem). Enamasti on osakesed meres tihedamad kui vesi, kuid erinevus ei pruugi olla suur. Teatud vetikad omavad tihedat mineraalset ballasti – ränivetikatel on ränioksiidist rakukest, kokolitoforiididel on lubisoomused. Tihe mineraalne ballast, pealegi reeglina väga aeglaselt lahustuv, kiirendab oluliselt sellega seotud orgaanilise aine jõudmist ookeani põhja.

VÕTMELIIGID

Settimist mõjutab seega fütoplanktoni koosluse struktuur. Ränivetikate õitsengud on tuntud massilise settimise stimuleerijana. Seda mitmel põhjusel. Esiteks, ränivetikate suure eritihedusega (*ca* 2,1) ränioksiidist rakukest on vajalikuks ballastiks. Teiseks, ränivetikate õitsengud on küllalt massilised, mis võimaldab efektiivset koagulatsiooni ja kiiresti settivate agregaatide moodustumist, transportides terved rakud kiiresti suurtele sügavustele [Olli jt, 2002].

Teiseks äärmuseks on väikeste flagellaatide põhjustatud õitsengud, mis reeglina lagunevad juba eufootilises kihis, moodustades aeglaselt settiva füto-detriidi. Aeglaselt vajuvas detriidiagregaadis suudab mikroobne degradatsioon lahustada suure osa orgaanilisest ainest enne osakese arvestatavale sügavusele

jõudmist. Unikaalsel globaalsel positsioonil on kokolitofooriid *Emiliana huxleyi*³. Kokolitofooriidide olulisusest geoloogilises ajas annavad tunnistust kriidilademed, mis enamasti on tekkinud kokolitofooriidide lubikattelitest soomustest – kokoliitidest. Kaasajal on *E. huxleyi* maailmamere üks võtmeliike tänu oma imposantsetele, ka satelliitide vahendusel jälgitavatele õitsengutele. Kokoliitse jubja settides eemaldub süsinik pikkadeks perioodideks biogeensest ringest. Biogeense tekkega lubi on Maa kõige suurem süsiniku varamu (umbes $40000 \cdot 10^{12}$ t; võrdluseks – atmosfääris ainult $0.7 \cdot 10^{12}$ t.). Samas eritatakse kokoliitide moodustudes süsihappegaasi keskkonda, mitte ei eemaldata seda:



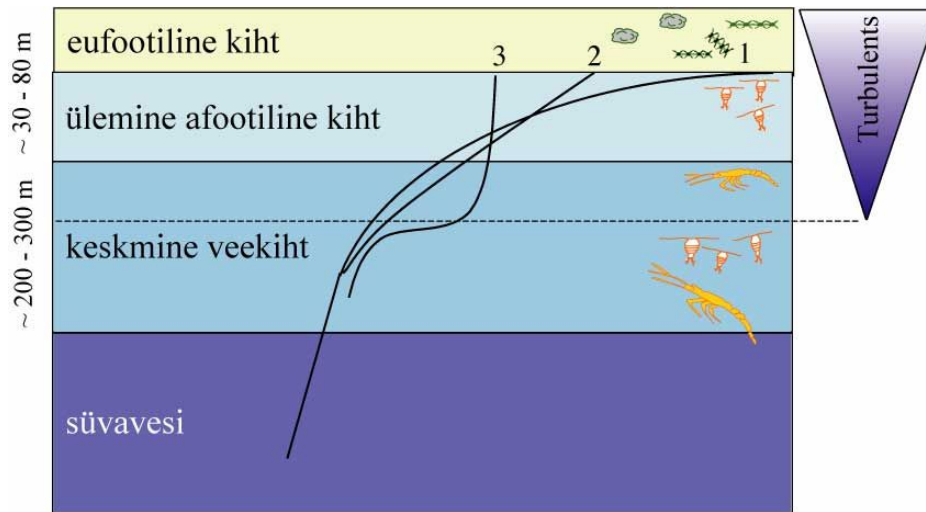
On avaldatud arvamust [Riebesell jt, 2000], et süsihappegaasi osarõhu tõusuga vees on kokoliitide moodustumine sattumas löögi alla ja *E. huxleyi* võib oma võtmerollist kaasaegses ookeanis taanduda.

Teine oluline perekond on *Phaeocystis*. See globaalse levikuga haptofüütide perekond moodustab massilisi õitsenguid külmades meredes, nii põhja- kui lõunapoolkeral. Keeruka elutsükliga õitsenguid põhjustav faas on limajas koloonia, milles väikesed rakud paiknevad hajusalt. Võib-olla just eripärane koloniaalne vorm, aga võib-olla ka mingil muul põhjusel ei ole *Phaeocystis* zooplankterite – ookeanide peamiste herbivooride – hulgas eriti populaarne toiduartikkel. Herbivoorse surve puudumine on üldiselt üks peamisi massiliste õitsengute eeltingimusi. Mis saab tohutust *Phaeocystis* biomassist? Limajad kolooniad on väga vaevalised settima ja suurem osa neist laguneb juba veesambas, saades substraadiks teistele vee mikroobidele [Wassmann, 1994]. *Phaeocystis* õitsengud praktiliselt tasalülitavad ookeani süsinikupumba.

TURBULENTS

Turbulents ja vee segunemine mõjutab orgaanilise aine settimist mitmeti. Turbulents võib juba settinud osakesed tagasi pinnakihti transportida, kuid samas viib pinnakihi värskelt moodustunud orgaanilised osakesed otseteed sügavamatesse kihtidesse (joonis 6). Analoogia võiks kujutleda teepuru teetassis, mis settib tassi põhja, kui teed ei segata, kerkib aga kiiresti üles, kui lusikaga tassis ringi keerutada. Turbulents ei ole tavaliselt kunagi kogu veesambas ühtlane, vaid reeglina tugevam pindmistes kihtides. Nii võibki juhtuda, et allapoole transportitud kiiremini vajuivad osakesed pääsevad turbulentsi haardest ja settivad edasi gravitatsiooniliselt. Juhtnööriks võiks siin olla Imbergeri sedastus [Spigel, Imberger, 1987], mis lihtsustatult kõlaks nii: kui turbulentne võnkumine ületab 15-kordselt osakese iseseisvat liikumisvõimet (vajumiskii- rust), siis on osakesed täielikult turbulentsi haardes ning nende endi kulgamine ei mõjuta üldse nende jaotust veesambas. Jääb aga turbulents nõrgemaks, on osakeste reaalne jaotus veesambas kompromiss turbulentse segunemise ja osakeste endi liikumise vahel.

³ <http://www.noc.soton.ac.uk/soes/staff/tt/>



Joonis 6.

Kontseptuaalne skeem orgaanilise aine settimise vähenemisest vertikaalsuunas läbi afootilise kihi. Näidatud on erinevad pinnakihi segunemise stsenaariumid: 1 – kihistunud veesammas, 2 ja 3 – tugevnev vertikaalne segunemine (nt tuule mõjul).

Turbulents soodustab vetikarakkude koagulatsiooni. Õitsengu kulgedes võib rakkude tihedus olla väga suur, kuid stagneerunud ja liikumatus veesambas ei puutu nad eriti sageli üksteisega kokku (seda tingib vee viskoossus). Lisades nüüd turbulentsi võib vallanduda ahelreaktsioonina massiline koagulatsioon ja suurte, kiiresti settivate agregaatide moodustumine.

Turbulentsil on veel teinegi kaudne, summaarselt settimist soodustav omadus. Turbulents lõhub veesamba kihistumist, võib paisata segi väljakujunenud planktonikoosluse struktuuri, kuid toob sügavamatest kihtidest pinnale uusi toitained. Need toitained vallandavad turbulentsi vaibudes uue produktsiooni puhangu, mis loob potentsiaali massilisele orgaanilise aine settimisele. Seega on turbulents produktsiooni ja settimise seisukohalt oluline nähtus. Kuid kindlasti mitte viisil – mida rohkem seda parem. Pidevas ringluses olevas veesambas jääb fütoplankton valguse puudusesse ja produktsioon langeb väga madalale. Summaarset produktsiooni maksimeerivad teatud ajavahemikel tormid, mis vahelduvad stabiilsusperioodidega, mil uus produktsioon saaks realiseeruda.

ZOOPLANKTONI ROLL

Zooplanktoni roll orgaanilise aine settimisel on küllalt eritahuline ja sõltub oluliselt sellest, milliste organismidega on tegemist. Herbivoorne zooplankton

toitub suures osas fütoplanktonist, millega kõige otsesemalt hävitab potentsiaalselt settida võivaid osakesi, mõjudes settimist vähendavalt. Teatud zooplanktoni liigid talvituvad täiskasvanud isenditena veesamba sügavamates osades (ca 400–800 m). Need loomad tõusevad kevadel, just fütoplanktoni kevadõitsengu ajaks eufootilisse pinnakihti ning toitudes rikkalikust vetikaproduktioonist valmistuvad paljunemiseks. Sellistes tingimustes jääb fütoplanktoni kevadõitsengu biomass küllalt madalaks, kuigi produktioon on väga kõrge. Kogu primaarproduktioon kanaliseerub herbivooriasse ja settiva aine põhiosa moodustavad zooplankterite väljaheidet. Sellise stsenaariumi korral on fütoplanktoni ja zooplanktoni produktioon väga tihedalt põimunud, zooplanktoni biomass ületab sageli fütoplanktoni biomassi ja kogu aine ning energia kulg soodustab parimal viisil kalaproduktiooni.

Olukord on teine madalates meredes, sh Läänemeres. Zooplankton ei talvitu siin mitte täiskasvanud isenditena, vaid talvituvad nende munad. Kevadel kooruvad munadest vastsed ja asuvad agaralt toituma. Paraku selleks ajaks, kui vastsed mitmete moonete käigus täiskasvanuks saavad ja nende herbivoorne potentsiaal maksimumi jõuab, on fütoplanktoni kevadõitseng lõppenud. Selle stsenaariumi puhul on fütoplanktoni ja zooplanktoni produktioonid ajalises nihkes. Suur osa fütoplanktoni biomassist settib tervete rakkudena põhja, eksportproduktioon on kõrge, suur osa energiast ja ainest liigub planktonitoidulistest kaladest mööda.

Harvadel juhtudel võib zooplankton soodustada orgaanilise aine settimist. Zooplankton kogub kokku üksikud väikesed fütoplanktoni rakud, mille iseseisev settimiskiirus on pea olematu, ning sageli pakib need tihedateks ja väga kiiresti (ca 100 m p⁻¹) settivateks väljaheite osakesteks. Selline protsess kiirendab taas settimist ja tugeva zooplanktoni populatsiooni olemasolul võib valdav osa settivast orgaanilisest ainesest moodustuda zooplanktoni väljaheidetest.

Hästi struktureerunud planktoni ökosüsteemis jõuab vaid väike osa zooplanktoni fekaalpartiklitest põhja. Teatud zooplankterid toituvad teiste toodetud fekaalpartiklitest (koprofaagid). Teised hekseldavad kiiresti vajuvaid suuri fekaalpartikleid (koproheksia), otseselt neist toitumata. Summaarselt kahandab selline tegevus eksportproduktiooni ning hoiab olulisi ressursse planktonikoosluses. Vaid vähesed fekaalosakesed läbivad selle nn koprofaagse veski puutumattult ja jõuavad merepõhja [Wexels Riser jt, 2001].

KOKKUVÕTTEKS

Pelaagilis-bentiline sidusus on mittelineaarne ning sõltub nii füüsikalistest kui bioloogilistest teguritest. Valdav osa settevoo bioloogilisest regulatsioonist toimub suhteliselt piiratud sügavusel otse eufootilise kihi all. See bioloogiline filter määrab kui palju orgaanilist süsinikku jõuab veekogu põhjale ning mattub setetesse.

VIITED

- Gardner, W. D. (2000). Sediment trap sampling in surface water. Hanson, R. B., Ducklow, H. W., Field, J. G. (eds). The changing ocean carbon cycle - midterm synthesis of the Joint Global Ocean Flux study. Cambridge University Press, Cambridge, 240-284.
- Jackson, G. A. (1990). A model of the formation of marine algal flocs by physical coagulation processes. *Deep-Sea Research*, 37, 1197-1211.
- Karl, D. M., Knauer, G. A., Martin, J. H. (1988). Downward flux of particulate organic matter in the ocean: a particle decomposition paradox. *Nature*, 332, 438-441.
- Olli, K., Wexels Riser, C., Wassmann, P., Ratkova, T., Arashkevich, E., Pasternak, A. (2001). Vertical flux of biogenic matter during a Lagrangian study off the NW Spanish continental margin. *Progress in Oceanography*, 51, 443-466.
- Olli, K., Wexels Riser, C., Wassmann, P., Ratkova, T., Arashkevich, E., Pasternak, A. (2002). Seasonal variation in vertical flux of biogenic matter in the marginal ice zone and the central Barents Sea. *Journal of Marine Systems*, 38, 189-204.
- Pace, M. L., Knauer, G. A., Karl, D. M., Martin, J. H. (1987). Primary production, new production and vertical flux in the eastern Pacific Ocean. *Nature*, 325, 803-804.
- Riebesell, U., Zondervan, I., Rost, B., Tortelli, P. D., Zeebe, R. E., Morel, M. M. (2000). Reduced calcification of marine phytoplankton in response to increased atmospheric CO₂. *Nature*, 407, 364-367.
- Spigel, R. H., Imberger, J. (1987). Mixing processes relevant to phytoplankton dynamics in lakes. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 21, 361-377.
- Suess, E. (1980). Particulate organic carbon flux in the oceans: surface productivity and oxygen utilization. *Nature*, 288, 260-263.
- Wassmann, P. (1990). Relationship between primary and export production in the boreal coastal zone of the North Atlantic. *Limnology and Oceanography*, 35, 464-471.
- Wassmann, P. (1994). Significance of sedimentation for the termination of *Phaeocystis* blooms. *Journal of Marine Systems*, 5, 81-100.
- Wexels Riser, C., Wassmann, P., Olli, K., Arashkevich, E. (2001). Production, retention and export of zooplankton faecal pellets on and off the Iberian shelf, north-west Spain. *Progress in Oceanography*, 51, 423-442.

*Teaduspreemia põllumajandusteaduste alal
teadustööde tsükli "Veiste sigimise füsioloogia ja patoloogia,
rõhuasetusega viljakust mõjutavatele teguritele ja reproduktsiooni
biotehnoloogia meetodite edasiarendamisele" eest*



Ülle Jaakma (kollektiivi juht, esimene vasakult)

Sündinud 1.10.1957 Verioral, Põlvamaal

1975 Orissaare Keskkool

1980 Tartu Ülikool (TÜ), bioloogia-geograafiateaduskond, bioloogia osakond

1991 põllumajanduskandidaat, Eesti Loomakasvatuse ja Veterinaaria Instituut (ELVI)

1993 teaduspreemia embrüosiirdamistehnoloogia väljatöötamise eest (kollektiivi liige)

Aastatel 1980–1985 TÜ taimefüsioloogia ja -biokeemia kateedri stažöör-uuriija, 1985–1994 ELVI: teadur, vanemteadur. Alates 1995. Eesti Põllumajandusülikool (nüüd Eesti Maaülikool): vanemteadur, dotsent, professor, osakon-najuhataja.

Avaldanud 61 teaduspublikatsiooni.

Triin Hallap (kolmas vasakult)

Sündinud 04.08.1974 Tartus

- 1992 Hugo Treffneri Gümnaasium
- 1999 EPMÜ loomaarstiteaduskond, veterinaaria
- 2005 PhD, veterinaaria, Rootsi Põllumajandusteaduste Ülikool

Alates 1999 Eesti Põllumajandusülikooli (nüüd Eesti Maaülikooli) sigimisbioloogia osakond: doktorant, peaspetsialist, teadur.

Avaldanud 10 teaduspublikatsiooni.

Jevgeni Kurõkin (teine vasakult)

Sündinud 01.04.1951 Tšetšeeni-Ingušši ANSV-s

- 1969 Naurskaja Keskkool
- 1974 Eesti Põllumajandusakadeemia, veterinaariateaduskond
- 1990 veterinaariakandidaat, Venemaa mittenakkavate haiguste uurimisinstituut, Voronež
- 1993 teaduspreemia embrüosiirdamistehnoloogia väljatöötamise eest (kollektiivi liige)

1974–1982 Halliste sovhoosi peavetarst, 1982–1994 Eesti Loomakasvatuse ja Veterinaaria Instituudi sigimisbioloogia osakond: vanemteadur. Alates 1995 Eesti Põllumajandusülikooli (nüüd Eesti Maaülikooli) sigimisbioloogia osakonna: vanemteadur.

Avaldanud üle 70 teaduspublikatsiooni.

Andres Valdmann (neljas vasakult)

Sündinud 05.12. 1961 Tartus.

- 1980 Tartu II Keskkool
- 1985 Eesti Põllumajandusakadeemia, veterinaariateaduskond
- 1997 veterinaarmeditsiini magister, Eesti Põllumajandusülikool
- 1999 loomaarstiteaduse doktor, Eesti Põllumajandusülikool
- 1996 XIII rahvusvahelise loomade sigimise kongressi noorteadlase auhind
- 2000 A/S Delavali teadustöö I preemia
- 2005 Akadeemilise Põllumajanduse Seltsi aastapreemia

1985–1994 Eesti Loomakasvatuse ja Veterinaaria Instituudi sigimisbioloogia osakond: nooremteadur, teadur. 1991– Tartu Ülikooli ÜMPI teadur (0, 5 koormusega). Alates 1995 Eesti Põllumajandusülikooli (nüüd Eesti Maaülikooli) sigimisbioloogia osakonna teadur, vanemteadur.

Avaldanud üle 40 teaduspublikatsiooni.

VEISTE VILJAKUSE PROBLEEMID VAJAVAD TEADLASTE TÄHELEPANU

Veisekasvatus oli tähtsaks tegevusalaks juba meie muistsetele esivanematele. Kuigi ürgse lehma piima jätkus põhiliselt ainult vasikale, saadi veistelt liha ja nahka riietusesemete ja jalatsite valmistamiseks ning sõnnikut põllurammu tõstmiseks.

Viimaste aastakümnete jooksul on lehmade piimaand järjest suurenenud. Tänapäeval on piim ning piimast valmistatud mitmekesised ja maitsvad tooted tähtsal kohal iga pere toidulaual. Keskmise Eesti lehm lüpsab praegu aastas kuus ja pool tonni piima ja mitmetes farmides on piimatoodang lehma kohta veel paar-kolm tonni kõrgemgi. Lehmade piimatoodang on suurenenud tänu loomade valikule areustöös, tõuloomade, sperma ja embrüote impordile, söötis- ja pidamistehnoloogia täiustamisele. Täiustades looduse loomingu pole inimene suutnud siiski säilitada tasakaalu oma majanduslike huvide ja loomade heaolu vahel. Lehmade terviseprobleemid, sealhulgas halvenenud sigimisvõime, on muutunud üleilmselt suureks probleemiks. Neid probleeme seostatakse eeskätt lehmade piimatoodangu kasvuga ja geneetilise valikuga piimatoodangu suurendamise suunas [Waldmann, 2004]. Lehmade tõulised iseärasused, erinevad kliimaatilised tingimused, söödad ja pidamistingimused teevad võimatuks universaalsete lahenduste leidmise ja ühesuguste aretusstrateegiatega ning praktiliste soovitude väljatöötamise maailma erinevate piirkondade jaoks. Lehmade sigimisvõime languse füsioloogiliste mehhanismide ja sigimishäirete riskifaktorite väljaselgitamine on eelduseks, et negatiivseid tendentse peatada.

Eesti Maaülikooli sigimisbioloogide uuringud ongi keskendunud ühelt poolt lehmade sigivuse uurimisele, pöörates erilist tähelepanu sigimishäirete põhjuste ja tekkemehhanismide selgitamisele, ning teiselt poolt pullide viljakuse uurimisele ja selle prognoosimiseks lahenduste leidmisele. Nende probleemide uurimisel kasutatakse ja arendatakse edasi ka sigimise biotehnoloogia meetodeid nagu näiteks emasloomade innatsükli sünkroniseerimine, embrüote väljaloputamine ja siirdamine, katseklaasiviljastus ning süvaseemendus.

Sigivuse parandamiseks on ühelt poolt vajalik selgitada põhjuslikke seoseid, mehhanisme ja tegureid, miks lehmadel sigimishäired tekivad ning teiselt poolt välja töötada ja rakendada tehnoloogiaid ja diagnostilisi võtteid, mille abil on võimalik varakult sigimishäiretega või sigimishäirete riskiga lehmad avastada. Lüpsilehmade vähenenud sigivuse olulisteks põhjusteks on kehavarude liigsuur kasutamine ja mitmed haigused poegimisjärgsel perioodil. Need tegurid avaldavad negatiivset mõju munasarjade talitlusele ja embrüo või loote eluvõimele. Lüpsilehmade munasarjade talitluse ja funktsioonihäirete tekke-mehhanismide uurimiseks töötasime välja originaalse immuunoensümaatilise

meetodi progesteroonisisalduse määramiseks lehma piimast [Waldmann, 1993, 1999]. Meetod on ainus maailmas, mis põhineb monoklonaalsel antikehal ja sekundaarse antikeha tehnikal. Meetodi uudsus võrreldes teiste piima progesteroonisisalduse määramise meetoditega on analüüsitulemuste sõltumatus piima rasvasisaldusest. See asjaolu ja progesterooni jaotumise kindlakstegemine piimanäärmes [Waldmann jt, 1999] võimaldasid standardiseerida piimaproovi võtmise, mis on vajalik usaldusväärsete tulemuste saamiseks.

Progesteroonitaseme määramine on üheks enamkasutatud uurimismeetodiks sigimatuse põhjuste väljaselgitamisel. Progesteroon on hormoon, mida toodab munasarjas pärast ovulatsiooni tekkinud kollakeha. Progesteroonitaseme hindamine võimaldab teha kindlaks ovulatsiooni toimumise aja, kollakeha formeerumise ja eluea, innatsükli korrapärasuse, tiinuse olemasolu või katkemise, munasarjade funktsioonihäirete esinemise ja tüübi. Meetod on rakendatav piimalehmade sigivuse parandamiseks ka loomakasvatuse praktikas, sest võimaldab kindlaks teha munasarjatalitluse taastumise poegimisjärgselt, määrata innatsükli faasi, vältida füsioloogiliselt valel ajal seemendusi, avastada varakult mittetiined lehmad, avastada ja diferentseerida munasarjatsüste ja hinnata ravi tulemusi. Tulevikus võiks väljatöötatud meetod leida praktilise rakenduse lüpsifarmis täisautomaatses progesteroonisisalduse määramise süsteemis.

Andres Valdmani meetod on kasutusele võetud ka Norra Loomaarstiteaduse Kõrgkoolis. Ühisuuringutes selgitati lehmade munasarjafunktsiooni seoseid söödaratsiooni energiatiheduse, kehakonditsiooni, energiabilansi, piimatoodangu ja piima koostisega. Huvitava tulemusena selgus, et norra tõugu lehmad on võrreldes holsteini tõugu lehmadega hästi kohastunud energiavaese ratsiooniga: vastupidiselt holsteini lehmadele vähenes neil energiavaese ratsiooni söötmisel piimatoodang, samas aga säilis normaalne munasarjade funktsioon. [Reksen jt, 2001, 2002a]. Selliste omadustega lehmätõug sobib hästi mahepõllumajanduse tingimustes, kus energiarikaste söötade hulk võib olla piiratud.

Meie poolt väljatöötatud piima progesteroonisisalduse määramismeetod oli peamiseks uurimismeetodiks kahe dissertatsiooni valmimisel Norra Loomaarstiteaduse Kõrgkoolis (Matiko, M. K. *Postpartum reproductive performance of Zebu cattle under a traditional pastoral management system. Thesis for the Degree of Master of Science*, 2004; Reksen, O. *Environment and reproductive performance in Norwegian dairy cows. Studies of reproduction management, artificial lightning, and nutrition. Thesis for the Doctor Medicinae Veterinariae*, 2001.)

Esmakordselt kasutasime piimalehmade munasarjafunktsiooni taastumise prognoosimiseks piima atsetooni ja laktoosisisalduse määramist, mis võimaldas munasarjade talitluse algust pärast poegimist suure täpsusega ennustada [Reksen jt, 2002b]. Lisaks selgus uuringutes, et eesti holsteini tõugu lehmadel on munasarjade aktiivsuse taastumine pärast poegimist ja innatsükli sünkroniseerimise efektiivsus seotud piima rasva- ja valgusisaldusega esimesel

laktatsioonikuul (Waldmann jt, avaldamiseks vastu võetud). Piimakomponentide ja munasarjafunktsioonide vaheliste seoste leidmine võib omada suurt praktilist väärtust, võimaldades rutiinselt määratavate piimakomponentide sisalduse abil prognoosida munasarjahäirete esinemissagedust ja tüüpe karja tasemel. Selline prognoosimine võimaldaks juba esimesel poegimisjärgsel kuul välja selgitada riskirühma kuuluvad loomad ja koostada neile individuaalne sigimisalane terviseprogramm. Sarnase programmi rakendamine aitaks loomapidajatel hoida kokku tootmiskulusid. Näiteks, riskirühma kuuluvaid loomi võiks hakata hiljem seemendama (normaalsete lehmadega samaaegsel seemendamisel nad ei tiinestu), neile saaks rakendada individuaalseid innatsükli sünkroniseerimise programme, samuti kasutada metaboolset stressi vähendavaid söödaratsioone.

Innatsükli sünkroniseerimine on üheks kaasaegsetest võtetest, mis võimaldab optimeerida seemendamise aega ja vähendada inna avastamiseks tehtud kulusid. Innatsükli sünkroniseerimise kõige levinum ja odavam võte on prostaglandiin $F_2\alpha$ (PGF) süstimine 11 kuni 14 päevase vahega. See pole lehma organismile võõras aine, vaid tekib emaka limaskestas ning kutsub esile kollakeha taandarengu mittetiine looma munasarjas. Kui mullikatel on inna sünkroniseerimine end igati õigustanud, siis lüpsilehmade tiinestumine innatsükli sünkroniseerimise järgselt on paraku madalam kui mullikatel. Seni on arvatud, et lehmade madalam tiinestumine võrreldes mullikatega on tingitud innatsükli pikkuse suuremast varieeruvusest. Meie uuringud näitasid aga, et innatsükli sünkroniseerimise vähenenud efektiivsus lüpsilehmadel on seotud mitmete munasarja talitluse häiretega ning piimatoodangu ja piima koostisega innatsükli sünkroniseerimise ajal. Arvame, et lüpsilehmade innatsükli sünkroniseerimise efektiivsuse vähenemise peamiseks põhjuseks, võrreldes mullikatega, on munasarjade talitluse häirete suurem esinemine lehmadel enne ja pärast prostaglandiini manustamist, mis omakorda on põhjustatud ainevahetuslikust stressist. Viimase tagajärjel ei taastu normaalne munasarjade talitus (pikeneb ajavahemik poegimisest esimese ovulatsioonini), samuti väheneb progesterooni ja teiste steroidhormoonide hulk organismis. Madala piima progesterooni sisaldusega lehmad ei reageeri normaalselt PGF manustamisele, mille tagajärjel innatsükliid ei sünkroniseeru ja lehmad ei tiinestu.

Emasloomade tiinestumine ja järglaste saamine oleneb kahtlemata palju ka isasloomast ehk siis pullisperma kvaliteedist ja seemendusmeetodite õigest valikust. Veiste kunstlikul seemendamisel kasutatakse tavaliselt ühes spermadoosis 20–40 miljonit sperm. Geneetiliselt väärtuslike pullide sperma efektiivsemaks kasutamiseks ja viljastuse parandamiseks oleme katsetanud süvaseemendust, s.o sperma paigutamist sügavale emakasse, ja seemendust 2 miljoni spermiga. Kui tavaliselt paigutatakse lehma või mullika seemendamisel sperma emakakehasse, siis süvaseemendusel viiakse see emakasarve tippu, munaraku viljastuspaigale lähemale. Meid huvitasid väikese spermadoosiga seemenduse efektiivsust määravad tegurid eriti sellepärast, et ette valmistada

suguselekteeritud sperma kasutuselevõttu Eestis. Suguselekteeritud sperma sisaldab kas X- või Y-kromosoomiga sperme, millega seemendades sünnivad vastavalt lehm- või pullvasikad. Kuna spermide sugupoole järgi sorteerimine on suhteliselt aeglane protsess, siis ei ole tavalise spermide arvuga seemendusdooside kasutamine praktikas otstarbekas. Uurisime süvaseemenduse efektiivsust 2 miljoni spermi korral spermadoosis nii mullikatel kui ka lehmadel. Selgus, et ühekordne süvaseemendus võimaldab sünkroniseeritud innaga mullikatel saada 20 korda väiksema spermide üldarvuga doosis vähemalt sama tiinestumise kui kahekordne tavaseemendus 40 miljoni spermiga. Samuti selgus, et pulli spermid on võimelised edukalt munarakuni jõudma isegi siis, kui nad on paigutatud ovulatsioonil vabaneva munaraku suhtes vastaspoolsesse emakasarve [Kurykin jt, 2003].

Uuringud lüpsilehmadel näitasid, et 2 miljonit spermi kindlustab ka nendel munarakkude viljastumise ja tiinestumise. Spontaanselt indlevatel lehmadel ei erine tiinestumine süvaseemenduse järel (47%) tavaseemendusest 40 miljoni spermiga (45%). Samas osutus sünkroniseeritud innaga lehmade tiinestumine madalaks nii sperma minidoosiga kui ka tavadoosiga seemendamisel (27 ja 37%, $P > 0,05$), sõltumata sperma paigutamise kohast [Kurykin jt, 2005]. Nii nagu juba eespool mainitud, olid lüpsilehmade madala tiinestumise peamiseks põhjuseks munasarjade talitluse häired innatsükli sünkroniseerimise ajal.

Kõrgetoodanguline lehm elab pärast sünnitust läbi üsnagi pika, isegi kuni neli kuud kestva negatiivse energiabilansi perioodi, kus energiakulu suure koguse piima tootmiseks on suurem kui energiasisaldus söödas, mida lehm ära süüa jõuab. Puuduv energia kaetakse lehma enda kehavarude, peamiselt rasvade, arvelt. Kahte eesmärki, palju piima anda ja kiiresti uuesti tiinestuda, korraga saavutada on raske, sest organismi jõuvarud pole piiratud. Mida suurem on energia puudujääk ja mida rohkem kasutatakse piima sünteesiks kehavarusid, seda halvemini munasarjade talitus ja seega ka lehmade sigimisvõime poegimisjärgselt taastub.

Tagasi tulles isasloomade viljakuse juurde peab märkima, et pullisperma viljastusvõime hindamine ja prognoosimine on aretajatele probleemiks, millele ei ole seni leitud lihtsaid vastuseid. Seni on seemendusjaamade praktikas sperma kvaliteedi üle otsustatud subjektiivsete meetodite (spermide morfoloogia ja liikuvuse määramine valgusmikroskoobis) abil. Aastakümnete jooksul teostatud valiku tulemusena on nende parameetrite suhtes tekkinud suhteliselt homogeneen pullide populatsioon. Sellele vaatamata on tegelikud seemendustulemused erinevate pullide korral väga erinevad.

Spermide omaduste uurimiseks kasutatavate meetodite hulk on viimastel aastatel kasvanud, eriti seoses voolutsütomeetria kasutuselevõtuga. Senise 100–200 raku hindamise asemel mikroskoobiga uurimisel võimaldab voolutsütomeetria hinnata rohkem kui 1000 rakku sekundis, mis parandab tunduvalt testimise objektiivsust. Inkubeerides sperme erinevate fluorokroomidega on

võimalik analüüsida erinevate raku osade funktsioneerimist. Ent enne kui ükski uudsetest meetoditest võiks asendada praegu kasutuselolevaid, on vajalik kindlaks teha nende seos pullide tegeliku viljakusega ehk siis seemendustulemustega.

Üheks oluliseks spermi eluvõimet peegeldavaks omaduseks on tema liikuvus, mis võimaldab jõudmise munajuhas oleva munarakuni. Liikumine on tagatud tänu energiarikka ühendi adenosiin trifosfaadi (ATP) sünteesile, mis toimub eeskätt mitokondrites. Mitokondrite aktiivsust on võimalik mõõta mitmete fluorokroomide abil. Meie uuringud koostöös Rootsi Põllumajandusteaduste Ülikooli teadlastega näitasid, et fluoretsentsvärv Mitotracker Deep Red 633 on hea spermide mitokondrite aktiivsuse marker. Kõrge mitokondrite aktiivsusega spermid on ka hea liikuvusega, mis omakorda on tugevas seoses emasloomade tiinestumisega [Hallap jt, 2005b].

Teiseks tähtsaks spermide kvaliteedinäitajaks on neis paikneva pärilikkusaine DNA terviklikkus. Isegi kui spermi kuju ja liikumisvõime on normaalsed, võib spermi DNA sisaldada mikroskoobi all nähtamatuid defekte (katkemisi), mis põhjustavad arenema hakanud loote varajast (embrüonaalset) surma. Nii näiteks on meeste viljakus oluliselt madalam juhul kui DNA defekte esineb rohkem kui 30% seemnerakkudest. DNA kahjustuste mõõtmiseks väljatöötatud meetodi järgi värvustub 2-ahelaline DNA fluorokroomiga konjugeerunult roheliselt ja 1-ahelaline punaselt. Meie katsete tulemused näitasid, et DNA katkemine ei ole, vastandina mehe spermale, seemendusjaama pullide sperma puhul probleemiks ega mõjuta oluliselt nende viljakust [Hallap jt, 2005a].

Spermi membraanil on samuti oluline roll raku eluvõime säilitamisel ning munarakuga seostumisel. Nimelt toimub spermides teel munarakuni mööda emasloomaga sugutrakti rida muutusi, mille koondnimetuseks on kapatsitatsioon. Üheks kõige esimeseks muutuseks on membraani koostises olevate fosfolipiidide destabiliseerumine [Nagy jt, 2004]. Selle mõõtmiseks osutus sobilikuks spermide kolmikvärving Merocyanine 540/Yo-Pro 1/Hoechst 33342 [Hallap jt, 2006]. Muutused membraanides võimaldavad spermi tungimise läbi munarakku ümbritseva follikulaarrakkude kihi, läbipaistva tsooni ja plasmamembraani ning spermi tuuma jõudmise munaraku tsütoplasmasse.

Peale uudsete ja suhteliselt keerukate voolutsütomeetriliste meetodite on paljudes sperma kvaliteeti uurivates laborites kasutusel spermide liikuvuse kompuuteranalüüs (computer assisted sperm motility analyser, CASA), mis lisaks liikuvate spermide protsendile võimaldab hinnata spermide liikumiskiirust trajektooriga, liikumisteedekonnaga ja sirglõigul, spermide kõrvalekalde amplituudi trajektooriga ja veel mitmeid teisi liikumisega seotud parameetreid. Seosed viljakuse ja mitmete liikumist iseloomustavate parameetrite vahel ilmselgust meie uuringutes selgelt erinevat tõugu (eesti holsteini ja rootsi punast tõugu) pullide puhul [Hallap jt, 2004b, 2005c; Padrik, Jaakma, 2004].

Kuna spermide omaduste uurimiseks kasutatavate meetodite hulk on viimastel aastatel kasvanud, on oluliseks muutunud analüüsitava spermide populatsiooni valik. Püstitatud hüpoteesi kohaselt saaks sperma kvaliteedist objektiivsema pildi, kui ei hinnata mitte kogu seemenduseks kasutatavat doosi või ejakulaati, vaid ainult seda väikest populatsiooni, kes on potentsiaalselt võimeline jõudma viljastuspaika emaslooma munajuhas. Imiteerimaks selektsiooniprotsessi, mis toimub emaslooma suguteedes, kasutasime spermide swim-up meetodit, mis põhineb spermide võimel ujuda nendega kontaktis oleva vedeliku pinnale. Kogusime pindmisesse kihti liikunud spermid pärast tunniajalist inkubeerimist. Selgus, et selekteeritud populatsioonis olevatel spermidel on oluliselt paremad omadused kui vahetult sulatusjärgselt hinnatud spermidel. Valitud spermide üldine liikuvus ja liikumise kiirust iseloomustavad parameetrid olid kõrgemad, membraanide seisund parem ja DNA katkemisi vähem kui selekteerimata spermidel vahetult pärast sulatamist või korduvat tsentrifuugimise teel pesemist. Swim-up võimaldas paremini esile tuua ka pullidevahelisi ja vanuselisi erinevusi, samuti korreleerusid selekteeritud spermide populatsiooni omaduste mõõtetulemused kõige paremini seemendustulemustega. Kuna meetod pole keerukas, on selle kasutamine tulevikus ka seemendusjaamades otstarbekas, juhul kui katsed suurema pullide populatsiooniga viivad analoogsete tulemusteni [Hallap jt, 2004a].

Viimase aspektina uurisime pulli vanuse mõju sperma kvaliteedile. See pakub huvi tänu noorpullide testimise iseärasustele. Nimelt seemendatakse iga potentsiaalse uue aretuspulli spermaga vähemalt 1000 emaslooma ning kogutakse andmed katseseemendustest sündinud tütarde välimiku ja piimakuse kohta. Arusaadavalt võtab andmete kogumine aega ning otsus iga noorpulli kasutuselevõtu kohta selgub alles 3–4 aasta pärast. Soovisime oma katsetes teada, kas pulli vananedes muutuvad ka tema sperma kvaliteedinäitajad, mis muudaks sellisel juhul 1a vanuselt tema sperma kohta kogutud andmed hiljem väärtusetuks. Tegime kindlaks, et pullide vanuse kasvades toimub sperma kvaliteedis rida muutusi, kuid õnneks mitte halvenemise suunas: täiskasvanud (3–7 a) pullide spermide morfoloogia ja liikuvus ning membraanide seisund olid paremad kui üheaastastel noorpullidel [Hallap jt, 2004b]. Seitsmeaastaste pullide spermas, võrreldes kolmeaastastega suurenes patoloogiliste spermide osakaal, kuid paranes membraanide seisund [Hallap jt, 2005c; Padrik, Jaakma, 2004]. Peale pullide vanuse mõjutas sperma kvaliteeti oluliselt sperma kogumise aasta-aeg – talvel kogutud sperma oli võrreldes suvel varutuga oluliselt parema kvaliteediga [Padrik, Jaakma, 2004]. Saadud teadmised võimaldavad välja töötada sperma viljakuse prognoosimise mudelid noor- ja täiskasvanud pullidele. See töö on praegu lõpule jõudmas.

Oleme kõrgetoodangulise lehma tervise ja sigimisvõime ning pullide viljakuse osas saanud viimastel aastatel olulisi andmeid, mis on võimaldanud seletust leida mitmete probleemidele ja nende tekkemehhanismidele. Teadmistehelas on veel palju lünki, millele vastust otsida. Nii on palju teha veise muna-

raku viljastumist ja embrüo arengut mõjutavate tegurite uurimisel, samuti on vähe andmeid immunoloogiliste faktorite osast veiste sigimisel. Lahendamist vajavad ka praktikuid huvitavad probleemid, eeskätt, kuidas karja sigimisvõimet hinnata, prognoosida ja isegi parandada. Seda tööd tehakse koos paljude kolleegidega nii koduülikoolist kui ka koostööpartneritega välismaalt, kelle toetus ja head ideed on loonud uurimistööks soodsa keskkonna. Täname kõiki teadustööde kaasautoreid ning abilisi katseandmete kogumisel ja töötlemisel. Täname Eesti Teadusfondi, Haridus- ja Teadusministeeriumi ning Põllumajandusministeeriumi uuringute rahastamise eest.

KIRJANDUS

Hallap, T., Håård, M., Jaakma, Ü., Larsson, B., Rodriguez-Martinez, H. (2004a). Does cleansing of frozen-thawed bull semen before assessment provide samples that relate better to potential fertility? *Theriogenology*, 62, 702-713.

Hallap, T., Håård, M., Jaakma, Ü., Larsson, B., Rodriguez-Martinez, H. (2004b). Variations in quality of frozen thawed semen from Swedish Red and White AI sires at one and four years of age. *Int. J. Andrology*, 27, 166-171.

Hallap, T., Jaakma, Ü., Rodriguez-Martinez, H. (2005c). Changes in semen quality in Estonian Holstein AI bulls at 3, 5 and 7 years of age. *Reproduction in Domestic Animals*, (accepted for publication).

Hallap, T., Nagy, Sz., Håård, M., Jaakma, Ü., Johannisson, A., Rodriguez-Martinez, H. (2005a). Sperm chromatin stability in frozen-thawed semen is maintained over age in AI bulls. *Theriogenology*, 63, 6, 1752-1753.

Hallap, T., Nagy, Sz., Håård, M., Jaakma, Ü., Johannisson, A., Rodriguez-Martinez, H. (2005b). Mitochondrial activity of frozen-thawed spermatozoa assessed by MitoTracker Deep Red 633. *Theriogenology*, 2005b, 63, 2311-2322.

Hallap, T., Nagy, Sz., Jaakma, Ü., Johannisson, A., Rodriguez-Martinez, H. (2006). Usefulness of a triple fluorochrome combination Merocyanine 540/Yo-Pro-1/Hoechst 33342 in assessing membrane stability of viable frozen-thawed spermatozoa from Estonian Holstein AI bulls. *Theriogenology*, 65, 6, 1122-1136.

Kurykin, J., Jaakma, Ü., Majas, L., Jalakas, M., Aidnik, M., Waldmann, A., Padrik, P. (2003). Fixed time deep intracornual insemination of heifers at synchronized estrus. *Theriogenology*, 7, 1261-1268.

Kurykin, J., Waldmann, A., Jaakma, Ü., Aidnik, M., Majas, L., Jalakas, M., Padrik, P. (2005). Low semen dose intracornual insemination of cows at fixed time after PGF2alfa treatment or at spontaneous estrus. *Anim. Reprod. Sci.*, (E-published ahead of print, available on-line <http://www.sciencedirect.com>)

- Nagy, S., Hallap, T., Johannisson, A., Rodriguez-Martinez, H. (2004). Changes in plasma membrane and acrosome integrity of frozen-thawed bovine spermatozoa during a 4 h incubation as measured by multicolor flow cytometry. *Anim. Reprod. Sci.*, 80, 3-4, 225-235.
- Padrik, P., Jaakma, Ü. (2004). Eesti holsteini tõugu sugupullide sügavkülmutatud/sulatatud spermide liikumiskarakteristikud ja nende seos emasloomade tiinestumisega. *Agraarteadus*, 4, 225-233.
- Reksen, O., Grohn, Y. T., Havrevoll, O. S., Bolstad, T., Waldmann, A., Ropstad, E. (2001). Influence of concentrate allocation and energy balance on postpartum ovarian activity in Norwegian cattle. *J. Dairy Sci.*, 84(5), 1060-1068.
- Reksen, O., Grohn, Y. T., Havrevoll, O., Bolstad, T., Waldmann, A., Ropstad, E. (2002a). Relationships among milk progesterone, concentrate allocation, energy balance, milk yield and conception rate in Norwegian cattle. *Anim. Reprod. Sci.*, 73(3-4), 169-184.
- Reksen, O., Havrevoll, O., Grohn, Y. T., Bolstad, T., Waldmann, A., Ropstad, E. (2002b). Relationships among body condition score, milk constituents, and postpartum luteal function in Norwegian dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 85(6), 1406-1415.
- Waldmann A. (1993). Enzyme immunoassay (EIA) for milk progesterone using a monoclonal antibody. *Anim. Reprod. Sci.*, 34, 19-30.
- Waldmann, A. (1999). Monoclonal antibodies to progesterone: characterization and selection for enzyme immunoassay (EIA) in bovine milk. *Hybridoma*, 18, 289-296.
- Waldmann, A. (2004). Effects of genetic selection for productivity on dairy cow fertility. *Animal Breeding in the Baltics*, Tartu, 281-286.
- Waldmann, A., Reksen, O., Landsverk, K., Kommisrud, E., Dahl, E., Refsdal, A., Ropstad, E. (2001). Progesterone concentrations in milk fat at first insemination – effects on non-return and repeat-breeding. *Anim. Reprod. Sci.*, 65(1-2), 33-41.
- Waldmann, A., Ropstad, E., Landsverk, K., Sørensen, K., Sølverød, L., Dahl, E. (1999). Level and distribution of progesterone in bovine milk in relation to the storage in the mammary gland. *Anim. Reprod. Sci.*, 56, 79-91.

*Teaduspreemia sotsiaalteaduste alal
uurimuste tsükli “Kognitiivsete protsesside eksperimentaalne ja
teoreetiline uurimine” eest*



Talis Bachmann

Sündinud 27.01.1951 Tartus

- 1967 Tartu Laste Muusikakool, viiuliklass
- 1969 Tartu 5. Keskkool (praegune Tamme Gümnaasium)
- 1974 Tartu Ülikool, psühholoogia
- 1979 psühholoogiakandidaat, Vene TA Psühholoogia Instituut
- 1989 psühholoogiateaduste doktor, Moskva Ülikool
- 2001 teaduspreemia sotsiaalteaduste alal

Alates 1974 Tartu Ülikool: teadur, assistent, õpetaja, vanemõpetaja, dotsent, professor.

Aastatel 1992–1995 Tallinna Pedagoogikaülikooli (TLÜ) rektor; 1996–1999 Portsmouthi ülikooli (UK) vanemõppejõud; 1999–2001 Õigusinstituudi professor. Alates 2002 Tartu Ülikooli õigusinstituudi professor.

Eesti Psühholoogide Liidu asutajaliige, *European Society for Cognitive Psychology* liige ja *Regional Officer for Estonia, Association for the Scientific Study of Consciousness* liige, *Association for Psychological Science (APS)* liige.

Avaldanud üle 150 teaduspublikatsiooni ja üle 60 populaarteadusliku või publitsistliku artikli.

SISSEJUHATUS

Alljärgnevalt noppeid viimastel aastatel valminud uurimistöödest koos asjakohaste viidetega. Neid töid ühendavateks tunnusoonteks on, et nad seostuvad teadusliku taju mikrogeneesi probleemiga, käsitlevad väga lühikese ajaskaala raames aset leidvaid psühholoogilisi protsesse ning et erinevate tutvustamisvõimaluste hulgast said põhjalikumaks kommenteerimiseks valitud teatud paradoksaalsust sisaldavad tööd.

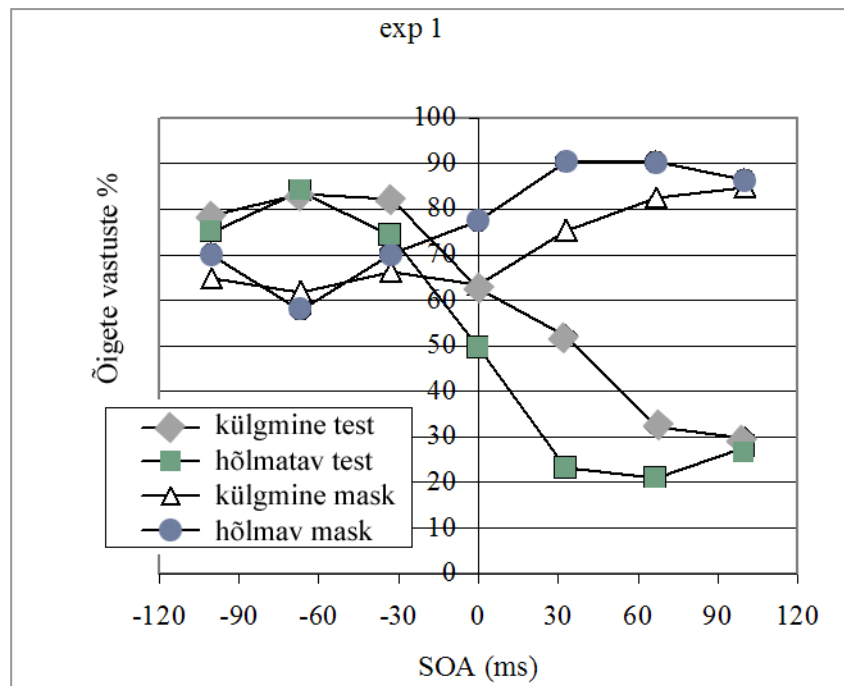
KAUA TEHTUD – KAUNIKENE?

Teaduslik taju nõuab aega küpsemiseks. See “küpsetusaeg” on sätestatud looduse “retseptiraamatus”, kus miljonite aastate pikkune kohanemine keskkonnaga ja olemisvõitlus (ja ehk ka superstruktuuride teleonoomia?) on teinud nii, et ajuprotsesside tööle tuginev tajupilt jõuab teadvusse järk-järgult umbes 0,1–0,3 sekundi jooksul [Bachmann, 2000]. Täiuslikuna tunduv, rikas ja keeruline tajumus nõuab mahukat neurobioloogilist infotöötlust, et seda rikkust ja maailma adekvaatselt esindada – võimaldavust teadvusele serverida – võimalik oleks. Selles protsessis aistingusüsteemid esindavad objektide ja sündmuste elementaartunnuseid, tajusüsteemid integreerivad elementidest tervikobjekte ning tähendustõlgendusi, tähelepanusüsteemid valivad välja hetkel olulisima

ning keskendavad sellele oma töötlusressursid, sisu suhtes mittespetsiifilised “teadvusgeneraatorid” aga toovad sisu representatsiooni teadvusse alles siis, kui mürarohke ja esialgu vastuoluline eeltöö teadvuse-eelselt on välja valinud ja stabiliseerinud sobivaima tajutõlgenduse [Crick, Koch, 2003, 2005; Edelman, Tononi, 2000; Tononi, 2004, 2005; Bachmann, 2006a,b]. Tegemist on pidevalt uueneva teadvuspildiga, kus ajas järgnevad objektikujutised kalduvad asendama ajas eelnenuid. Mida kiiremini järgmine “pilt” esitub, seda vähem aega on olnud eelneval “pildil” teadvuse jaoks küpseda. Seega saab mikrogeeneesi hästi uurida nii, et äratundmist või kirjeldamist vajava testobjekti järel esitatakse kiiresti temaga võistlev maskeeriv objekt ning vaadatakse, kuidas ja kuivõrd testobjekti teadvuslik kujund vaesestus võrreldes sellega, kui kontrolltingimustes testobjekti segamatult tajuda sai.

Maskeerimine on teadvustatud tunnetuse geneesi uurimise keskseid meetodeid nii fundamentaaluuringutes [vt nt Bachmann, 2005; Enns, Di Lollo, 2005] kui ka rakendusteadustes [nt Rodina jt, 2005]. Mida rohkem antakse ühele konkreetsele objektile aega olla segamatult eksponeeritud tajuvale inimesele, seda täpsemaks, igakülsemaks, mõistetavamaks selle objekti psüühiline kujund kujuneb. Doseerides sammhaaval aega testobjekti ja maskeeriva objekti vahel ning varieerides katseisikute ülesandeid ja/või seisundeid uurime teadvuse sisu ja vormi geneesi nende algushetkedel. Sellise meetodi kasutamisel näib kehtivat printsiip “mida kauem, seda parem”; seda mõistagi umbes esimese poole sekundi vältel pärast tajutava objekti ilmumist. Hiljem võib aset leida mälust kustumine või tähelepanu nõrgenemine.

On siiski eritingimusi, kus äsjatoodud reegel osutub küündimatuks. Näiteks on see nii metakontrasti puhul, kus lühiajaline (nt 10 millisekundit (ms)) testobjekt esitatakse enne ja maskeeriv objekt selle järel ning kus testobjekt ja maskeeriv objekt on ruumiliselt vahetud naabrid (ei kattu ruumis). Sellistel tingimustel tajume testi paremini ülilühikeste ajaintervallide puhul testi ja maski vahel (nt 10 ms), hoopis halvemini aga pisut pikemate ajaintervallide puhul (nt 60 ms). “Kaua tehtud – kaunikest” pole tegelikult üldse enam õige, sest kauem “tehtu” pole üldse enam “kaunikesti” teadvuses; teadvuse jaoks on see hoopis kole tühik, kus muidu nii hästi tajutav objekt (kui ta oleks üksinda esitatud) lausa kaob “musta auku” ilma teadvustatud jälge jätmata. (Või olles kahvatu vari sellest, mis ta oli varem). Teadvustatud taju geneesi mehhanisme saame täpsemini uurida, kui teeme selgeks, millised ruumilised mõjutegurid metakontrasti tugevust oluliselt mõjutavad. Üldiselt teatakse näiteks, et metakontrasti tüüpi maskeerimine on tugev siis, kui testobjekt on vahetult ümbritsetud maskeeriva objekti poolt, nii nagu täht B on ümbritsetud tähtede H H poolt trigrammis HBH. Hoopis nõrgem on mõju siis, kui test on ise välimine objekt, nagu näiteks trigrammis HHB. Ühes hiljutises töös [Bachmann jt, 2005a] uurisimegi testobjekti ja maski elementide suhtelise ruumilise paigutuse mõju testi tajumisele asendusmaskeerimise tingimustes. (Asendusmaskeerimine: järele tulev stiimul asendab teadvuses eelneva.)



Joonis 1.

Stiimultähtede õige äratundmise protsents sõltuvalt ajaintervallist (SOA) stiimulite esitamise alguste vahel ning sõltuvalt teststiimuli ruumilisest paigutusest mask-stiimuli tähtede suhtes. Negatiivsed SOA väärtused käivad tingimuste kohta, kus mask ilmub enne ja test pärast teda, positiivsed väärtused tähistavad vastupidist [Bachmann jt, 2005a]

Katseisikud pidid ära tundma mõlemad järjestikku esitatud stiimulobjektid – üksiku test-tähe ja paari omavahel identsetest maskeerivatest tähtedest. Kui eelneva testi ja temale järgneva maski ajaintervall oli väga lühiajaline – alla 50 ms, siis oli testi teadvustamine tõepoolest halvem juhul, kui test oli hõlmatud maskeerivate tähtede poolt ning parem siis, kui test oli ise äärmine objekt. Et metakontrasti seletatakse töötluse hierarhias madalamate, sensorset pidurdust sisaldavate protsesside mõjuga, on mõistlik uskuda, et mikrogeneesi algetappidel, kus kodeeritakse sensorseid elementaartunnuseid, toimib lateraalne pidurdus elementaartunnuste kodeerimise eest vastutavate neuronisüsteemide vahel ning tajupilt saab seetõttu halva kvaliteediga. Kui lateraalset pidurdust on vähem, on ka pilt parem. Ajaintervalli edasisel suurenemisel võiks ju nüüd oodata pildikvaliteedi paranemist, ent võta näpust. Kui maski ilmumist viivitada kuni umbes 60–100 ms-ni, langeb testi tajumine umbes 55%-lt alla 30%. Mis aga põhitähtis, selles ajadiapasoonis enam ei loe, kas testobjekt oli hõlmatud maskobjektide poolt või oli ise hõlmav objekt. Maskeerimine 100

ms aega võtva maski-viivise puhul oli võrdselt tugev mõlemal juhul. Tuleb järeldada erinevat tüüpi protsesse maskeerimise põhjustajana. Sensorse lokaalse pidurduse asemel toimib keskpikkadel intervallidel asendusmaskeerimise mehhanism, kus teadvuslik tähelepanu lülitub eelneva stiimuli töötlemise asemel järgneva töötlemisele ja kus peenel ruumilisel paigutusel pole enam suurt rolli. (Pangem tähele, et vaatamata sellele, et maskis oli 2 omavahel identset tähte ja testis ainult 1 täht, siis sellegipoolest oli ajas järgnevana ilmuv 1-tähelise stiimuli tajumine selgelt parem kui ajas eelneva 2-tähelise stiimuli tajumine. Teadvuse jaoks eelistatakse uut sisendit ja see juhtub sageli eelneva stiimuli hülgamise hinnaga. Seda isegi siis, kui eelnev on “kopsakam”.) Kaua tehtud on küll kaunike, aga liiga kaua tehtu võib ka “hapuks minna”. See ei pruugi olla “seedimisväärne”, kui serveeritakse uued värsked “road”.

Ometi ei tähenda järgituleva sisendstimulatsiooni prioriteet eelnenu ees seda, et asendusmaskeerimine toimib sõltumatult omavahel vahelduvate stiimulite sisust. Otse vastupidi: see, mil määral ja kuidas järgnev mask mõjutab eelneva testi tajumist ja kuidas eelnev mõjutab järgnevat sõltub oluliselt nende stiimulite struktuurist ja optilis-geomeetristest tunnustest. Seda ka tingimustes, kus need stiimulid ruumis kattuvad ja kus nende üldine kontrast ja heledus on muutumatud [Bachmann jt, 2004a, 2005b]. Kui ajaintervall on väike, on järgneva kujutise õige identifitseerimise (st selge tajumise) jaoks oluline, et eelneva kujutise jämedakoeline üldkonfiguratsioon oleks sarnane järgneva, eelnevast erineva identsusega objekti kujutise omaga (detailides võivad olla selged erinevused). Võib toimuda omalaadne “surrogaat-taju”, kus järgneva objekti taju mikrogeneesi esimene etapp jämedakoelise representatsiooni loomisel läbitakse eelneva objekti kujutise mikrogeneesi esimeste etappide arvelt. Kui aga konfiguratsioonid on täiesti erinevad (kuuludes eri tüüpi objektidele või kui üks on konfiguratsioonisarnane müra) või kui üks stiimulitest on müraväli, siis lühikestel ajaintervallidel on maskeerimine tugev. Pikkadel ajaintervallidel loeb ka ruumis kattuvate järjestikuste kujutiste puhul järgneva kujutise võime võistelda eelnevaga tähelepanuressursside pärast. Mõtestatud konfiguratsioon (nt nägu) asendab eelneva mõtestatud konfiguratsiooni paremini kui mittemõtestatud müra. Oluline fakt seisnes selles, et just konfiguratsioon ja geštalkvaliteet määrasid maskeerimise taseme ja seega siis teadvustamisprotsesside sisu; seda ei teinud lokaalsed sensoorsed tunnused või kujutiste kontrasti laotustiheduse spekter [vt ka Bachmann, Leigh-Pemberton, 2002]. See tulemus räägib vastu mõjukatele maskeerimisteooriatele, mille sisuks on kas lokaalne lateraalne pidurdus või transientsete sensorsete kanalite kiire pidurdav toime aeglase kestevvastusega kanalite tööle (nt Bruce Bridgmani, Greg Francise, Bruno Breitmeyeri jt käsitlused). Samuti oli saadud tulemustes vastuolu tagasiside-mehhanismil põhineva asendusmaskeerimise teooriaga, mille autorid on Vincent Di Lollo ja James Enns [nt Di Lollo jt, 2000; Enns, Di Lollo, 2005]. Meie mask-stiimulid, mis selle teooria järgi pidanuksid andma tugevama maskeerimise andsid nõrgema häiriva mõju ja vastupidi. See

ei tähenda, et teadvustatud taju geneesis peaks eirama tagasiside olulisust [vt Bachmann, 2004], küll aga tähendab see seda, et tuleks korrigeerida Di Lollo muidu üpris arukat teooriat.

KES EES, SEE MEES?

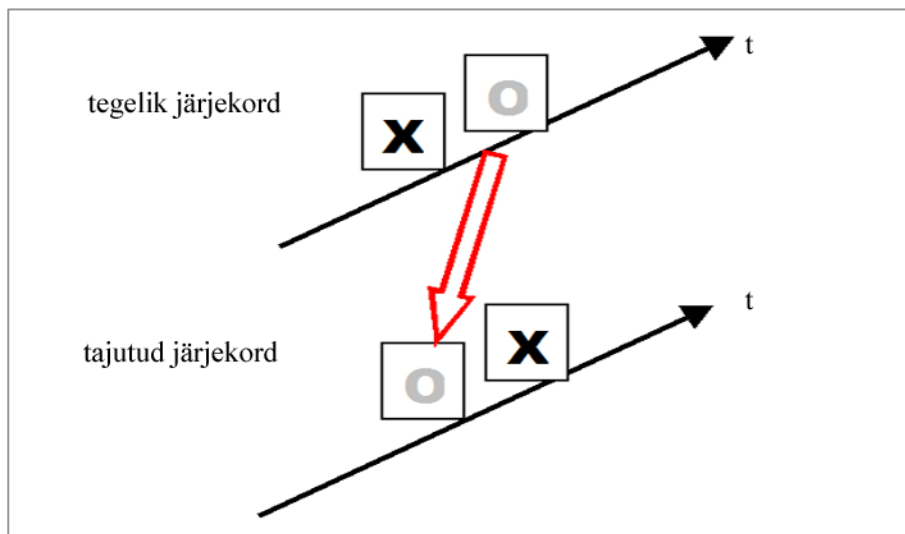
(See alapealkiri ei ole mingil juhul seksistlik ega seega ka poliitiliselt ebakorrektn. Koidula-aegseid väljendeid tohib Eestis ikka veel kasutada. Jutt tuleb hoopis apoliitiline ning käsitleb eksperimentaalseid tulemusi ühes spetsiifilises valdkonnas.)

Asjad, mis on mõistusevastased ühest aspektist vaadatuna, ei pruugi seda olla teisest aspektist vaadatuna. Võtame näiteks laused “esimene on teine” ja “teine on esimene”. Iseenesest võttes ja lausesisesi häirib mõistust kohe silma torkav *contradictio in adjecto*: mis on esimene, ei saa olla samal ajal teine ja vastupidi. Formaalloogiliselt on tegemist vastuolulise lausega. Kui aga rakendada sellist lauset kentsakale võidujooksule, kus sportijate spordidressidele kinnitatakse numbrid 1., 2., ... n. ja nad stardivadki üksteise järel sellele vastavas järjekorras ning võidu saab see, kes esimesena finišisse jõuab, siis võib väga hästi juhtuda, et “esimene on teine” (või vastupidi), ilma et keegi sellisest konstateeringust erilist numbrit teeks.

Kui inimene teadvustab järjestikuselt ilmutavaid objekte, siis “esimene on esimene” ja “teine on teine” on enamasti järjekorra teadvustamist adekvaatselt kirjeldavad väited. Kui aga objekte on palju ja/või nad ilmuvad üksteise järel väga kiiresti, siis ei pruugi teadvuses järjekord õigesti kajastuda. Tajukatsetest on näiteks teada, et kahe väga lühiajalise (kumbki nt 5 ms) ja omaette selgesti nähtava järjestikku esitatud objekti ajalise järjekorra õige hindamine on raske või võimatu, kui need objektid esitatakse väiksema kui 20-70 ms intervalliga. Kahe objekti puhul on sellisel juhul õigete vastuste tõenäosus 50% juures, st juhuslikult (huupi vastates ehk “pimesi”) võib saada keskmiselt 50% õigeid vastuseid. Ajaintervalli kasvades selliselt läveliselt väärtuselt suuremaks õigete vastuste arv läheneb sujuvalt 100%-le. Nii et “esimene on esimene ja teine on teine”, ehkki esialgu oli raske määratleda, “milline objekt oli esimene, milline teine”.

Mida võiks teha, et ajalise järjekorra eristamist tõhustada, kuid tingimusel, et ajaintervalli muuta ei tohi? Ilmselt midagi sellist, mis kiirendab esimesena esitatud objekti töötlemist (t)ajus ja/või aeglustab teisena esitatud objekti töötlemist. Selle tulemusena peaks nende omavaheline subjektiivne intervall suurenema (varem tuleb teadvusse suhteliselt veel varem, hiljem tuleb veel hiljem, seega peaks subjektiivne ajavahe kasvama). Kuidas tajutöötlust kiirendada? On teada, et intensiivsem või kontrastsem stiimulkujutus töödeldakse kiiremini kui vähemintensiivne või -kontrastne. Seega siis saab proovida esimese stiimulobjekti (O1) ja teisena esitatud stiimulobjekti (O2) omavahelist suhtelist kontrasti muuta selliselt, et O1 saaks töödeldud kiiremini ja O2

suhteliselt aeglasemalt O1-ga võrreldes. Seda saigi proovitud uurimuses, kus kontrolliti pertseptiivse retušeerimise teooriast tulenevaid mõningaid ennustusi [Bachmann jt, 2004b]. Mõistagi esitati objektid ruumis kohakuti, et võimaliku tekkiva näiva liikumise mulje põhjal suunatajule toetudes ajalist järjekorda kaudselt tuletada ei saaks. Katsetulemused näitasid paradoksaalsena tunduvat: O1 ja O2 ajalise järjekorra eristamine mitte üksnes ei halvene, vaid tekib illusoorne järjekorra pöördumine. Kui ajaintervall on paar tosinat ms või veel väiksem ja kui O1 (nt X kujutis) on selgelt kontrastsem võrreldes O2-ga (nt O kujutis), näib O2 ilmuvat enne O1-te.



Joonis 2.

Illustratsioon stiimulobjektide füüsilistest esitamistingimustest ning subjektiivselt tajumuljest: kui esimene objekt on kontrastsem, tekib illusioon objektide järjekorra pöördumisest [Bachmann jt, 2004b].

Tulemust võiks tahta seletada selle kaudu, et kontrastsem O1 töödeldakse küll kiiremini, kuid ka tema visuaalse sensoorse mälu jälg on kestvam, mis hägustab objektide esitusaegade eristamist ajas. Ent selle seletuse vastu on ammutuntud andmed Ralph Haberi jt töödest, mille järgi intensiivsemate kujutiste sensoorse mälu jälg on hoopis lühem kui vähemintensiivsetel. (Püsimälu ja töömälu puhul võib kehtida vastupidine seos.) Ei aita ka seletus, mille järgi tuhmim stiimulobjekt nõuab rohkem tähelepanu, tähelepanu keskendamine omakorda aga teatavasti kiirendab tajuprotsessi. Seega peaks just tuhmim stiimul teadvusse eelisrežiimil jõudma ja seega mõnel juhul, olles tegelikult O2, tundub ta olevat ajas O1 positsioonil. Ent katsekorraldus oli selline, et tähelepanu tuli koondada eelnevalt teadaoleva eesmärkoobjekti hindamisele sõltumata sellest, kas see oli erksam või tuhmim, mistõttu tähelepanuline seletus sellises seoses ei aita. Ühes samas ajakirjas varem avaldatud töös [Bachmann, 1988]

oli näidatud, et testobjekt (O2), mis ilmub temale eelneva, ruumis kattuva objekti O1 järel, näib kontrastsemana võrreldes tingimustega, kus O2 esitatakse üksinda, ilma eelneva praimiva objektita. Oluline oli see, et subjektiivse kontrasti suurendamine oli seda silmatorkavam, mida intensiivsem oli eelnev O1. Kui nii, siis ehk just kunstlik O2 subjektiivse kontrasti võimendus kontrastsemate O1-tede esitamise tõttu põhjustab O2 kiirema töötuse, mis viibki järjekorra paradoksini? Ent seegi seletus pole hea, sest proaktiivne kontrastivõimendus [Bachmann, 1988] leiab aset tunduvalt suuremate ajaintervallide korral O1 ja O2 vahel (nt 50–150 ms) kui seda on ajalised tingimused, mis viivad järjekorraparadoksi ilmnemisele. Esiialgu on parim seletus mitte sensoorne, vaid kõrgema taseme kognitiivseid protsesse kaasav (selle idee juures on oluline roll siinkirjutaja kolleegil Endel Põdral): kogemus ütleb inimesele, et tavaliselt mäletab ta erksamini sündmusi, mis olid hiljuti, võrreldes sündmustega, mis olid varem. Selline teadmine põhjustab tajukallutusi, kus pertseptiivsetes hinnangutes kaldutakse kontrastsemaid kujutisi, mille ajalise ilmumise tegelikku järjekorda mõne vähemkontrastse kujutise suhtes pole võimalik õigesti hinnata (sest ajaintervall kujutiste vahel on liiga lühike), tõlgendama kui hiljem esitatuid, ehkki sageli esitati nad tegelikult hoopis varem.

Selgus teadvuses vihjab värskusele ajas!? Vist siis tuleks asendada ka alapealkiri uuega, mis on pööratud parafrasas ühest teisest tuntud ütlusest: “Kes paremini naeratab, näikse naeratavat viimasena”. (Poliitilise korrektsusega polegi nüüd asi paha: Hollywood on vist domineeriv paradigma ja see toitubki pimestavatest naeratustest, seejuures ka küllaltki ammusest ja tegelikult ehk aegunudestki. Teadvuse tänapäev on tegelikult minevik. “Kes ees, see naine.”)

KAS HÄID LAMBAID MAHUB LAUTA PALJU?

Paraku on nii, et tajumise peenprotsesse on enamasti uuritud kunstlikes tingimustes, kus tühjal väljal esitatakse üksikuid stiimulärritajaid. Teadus nõuab täpsust, selgust ja ühemõttelisust ning selle kõige teenistuses on eksperimendid, kus uurijaid huvitavad tegurid võetaks vaatluse alla nii “puhtana” kui võimalik. Keemikutel pole enamasti suurt midagi teha lootusetult segiaetud ainete kompotiga, füüsikud eraldavad “puhtaks” kaduvväikesi elementaarosakesi ning psühholoogid ja kognitiivsed neuroteadlased püüavad välja eraldada stiimuleid ja vastusprotsesse nii puhtal kujul kui võimalik. See on tulemuste usaldusväarsuse ja mõistetavuse huvides. Ent mõnikord võib küsida, kas vaniveega pole lapski välja heidetud? Meie teema kontekstis tähendab see seda, et tuleks küsida, kas kunstlikes tingimustes, kus tühjal väljal ülitäpselt doseeritud esitusajaga ning üksikult esitatud ärritajate tajumist uurides saame teadmisi naturaalse, loomulikes tingimustes toimuva tunnetuse kohta? Ometi on “alt üles” liikumise strateegia mõeldav ja sageli toonud olulisi tulemusi. Varem või hiljem tuleb siiski võimaluste piires ja tegurite kontrollitavust ohverdada liikuda järjest keerulisemate objektide ja tingimuste suunas, mis üha lähenevad tegeliku elu naturaalsele tingimustele.

Taju ja teadvuse eksperimentaalsel uurimisel on üheks selliseks väikesammuks üksikute stiimulobjektide esitamisel liikuda jadas esitatud stiimuliteni. See on sutsu ökovaliidsem, sest loomulikes tingimustes on rohkem olukordi, kus sisendsignaalid tulvavad järjestikuse voona, mitte aga ei ilmu korraga üksinda tühjal väljal. Viimaste aastate uurimused, kus üksikult sähvatavate objektide tajumine on asendatud jadas ilmuvate objektide tajumisega või on neid omavahel võrreldud, näitavad tõepoolest, et üksikult sähvatava objekti ja jadas ilmuva objekti tunnetamine pole tihtipeale samasugune protsess [Nijhawan, 1994; Sheth jt, 2000; Bachmann, Pöder, 2001]. Esimene ja üldisem reegel: jadas esitatud testobjekt näib teadvustuvat kiiremini kui eraldi sähvatanud objekt. Kuidas seda seletada? Kas “seltsis segasem”? Üheks võimaluseks on see, et pertseptiivse retuseerimise mudeli järgi on teadvusliku tajumise aluseks kahe mehhanismi koostöö: (1) kiire, eelteadvuslik objekti tunnuste (“sisu”, kvaliteetide) töötlemine ajukoore sensorsetes keskustes, (2) aeglane modulatsioon, mis saadetakse mittespetsiifilistest talamuse neuronituumadest (nt intralaminaarsed tuumad, pulvinar, jmt) süsteemi (1) neuronitele. Selline modulatsioon tagab oma sihtmärgiks olevate ning omavahel sünkroonselt töötavate neuronite poolt esindatud tajuinformatsiooni teadvustamise. Süsteemi (2) aktiivsus ei kannu endas tajusisusid, küll on see aga tarvilik süsteemi (1) sisude teadvustamiseks. (Süsteem (1) töötab iseseisvalt ainult eelteadvuslikul tasemel.) Et süsteemi (2) närvirakud ei kätke tajusisusid kandvat informatsiooni, kuid et nende retseptiivväljad on süsteemi (1) närvirakkude retseptiivväljadest tunduvalt avaramad, on võimalik ja tõenäoline, et mingi objekt, mis erineb sisu poolest mingist teisest objektist (seega ka tema poolt esile kutsutud aktiivsus süsteemi (1) raames erineb selle teise objekti poolt esile kutsutud aktiivsusest) käivitab siiski süsteemi (2) protsessi. See mõjub aga ka selle teise objekti töötlusele – aktiivsuse moduleerimisele teadvustamise tarbeks.

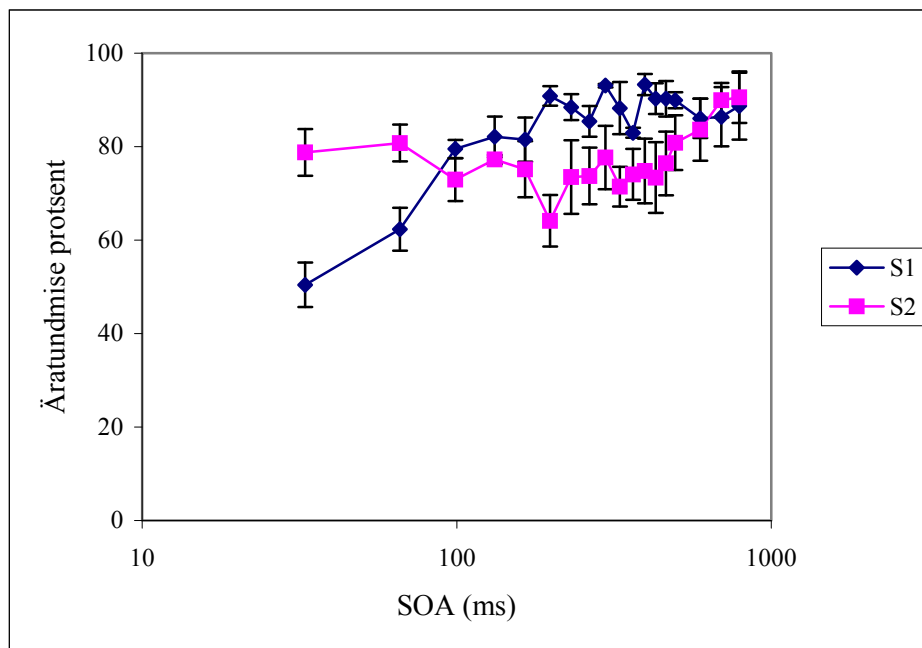
Sellise teooria valguses võib jadasisest tajukiirendust tõlgendada kui jada alguse objektide ja jadas üha eelnevate objektide poolt käivitatud protsessi (2), mille “kasutavad ära” jadas üha hiljem ilmuvate objektide esindused, mistõttu hilisemate objektide teadvustamine kiireneb võrreldes jadast väljas, eraldi esitatud objektide teadvustamisega [Bachmann, 1999; Bachmann jt, 2003]. Viimastel tuleb ära oodata teadvuseks tarviliku moduleerimisprotsessi viivisega rakendumine oma neuronaalsetele esindustele. See tähendab ka seda, et jada alguses esitatud objektide tajuviivis on suurem kui jada sees (hilisemates epohhides) esitatud objektide tajumise viivis. Tajukiirendus on suurim ja jadasisese objekti võimendus parim umbes 100–150 ms jada algusest [Bachmann, Oja, 2003].

Mis juhtub aga siis, kui identifitseerida tuleb ühe testobjekti asemel kaks objekti, mis mõlemad ilmuvad üksteise järel jada sees? Tüüpilised andmed vastastikuse maskeerimise ja asendusmaskeerimise katsetest ütlevad, et O2 domineerib teadvuses O1 üle, kui nendevaheline ajaintervall on 50–100 ms. Kas selline reegel kehtib ka siis, kui O1 ja O2 ilmuvad muudest objektidest jada

sees? Tuleb välja, et see sõltub jada epohhist, millises neid esitada [Bachmann, Sikka, 2005]. Kui jada algusest on möödunud 50–100 ms, leiab aset ebatavaline O1 suhteline võimendumine ja O2 võib saada tajutud halvemini. Jada hilisemates epohhides taastub tavaline pilt, kus O2 on paremini teadvustunud. Testobjektide jadaobjektidest eristamise võime halveneb siis, kui jadaobjektid esitatakse nii kiiresti üksteise järel, et nad moodustavad näivalt püsiva, staatilise foonistiimuli. Sellisel foonil on järjestikuseid testobjekte hoopis raskem eristada kui juhul, kus jadaobjektid vilguvad samasuguse omavahelise intervalliga nagu ilmuvad üksteise suhtes O1 ja O2. Mõneti ootamatu tulemus. Seletus eeldab raskusi test-objekti märgendite ajalises individueerimises eri objektidena juhul, kui fooniobjekt näib stabiilse muutumatu objektina mingis ruumi-lookuses.

Asi läheb veelgi keerulisemaks, kui märkame vastuolu vastastikuse maskeerimise katsete andmetes ühelt poolt (O2 tavaliselt domineerib O1 üle, asendades seda teadvuses) ning niinimetatud tähelepanu silmapilgutuse katsetes teiselt poolt (tavaliselt just O1 domineerib teadvuses ja O2 jääb märkamata). Kuna tähelepanu silmapilgutuse katsetes on tegemist O1 ja O2 esitamisega jadas ning sellises jadas, kus fooniobjektid pidevalt vahetuvad, samas kui vastastikuse maskeerimise katsetes on tegemist tühjal foonil esitatud O1 ja O2-ga, siis pole selge, kas selline vastuolu tuleneb jadasusest kui sellisest või vajadusest keerulisemaks töötluseks juhul, kui jada fooniobjektid kogu aeg vahelduvad. Või hoopis sellest, et tegemist on erinevate uurimustega, milles kasutatud katsetingimused pole omavahel võrreldavad. Seetõttu tegime esmakordselt katse, kus O1 ja O2 ajaintervalle varieeriti suures ulatuses, nad esitati jadas, kuid jadaobjektid olid invariantsed. Nende märgendid vilkusid vahelduvalt, kuid jada fooniobjektide identsus ei muutunud [Bachmann, Hommuk, 2005]. Tulemustest nähtub, et O1 ja O2 vahelise ajaintervalli kasvades esialgne O1 maskeerimine O2 poolt kasvab sujuvalt üle vastupidiseks protsessiks, kus O1 domineerib. Seejärel testobjektide tajumisheadus võrdsustub. Järjestikuste jada sees esitatud testobjektide tajumise suhteline efektiivsus sõltub nendevahelisest ajaintervallist; tähelepanu silmapilgutus O2 suhtes tuleneb jadasusest kui sellisest ning eeldab seda, et O1 on eelneval hetkel ära tuntud.

Kas häid lambaid mahub rohkesti ühte lauta? Sõltub sellest, mida pidada heaks, kui kiiresti nad lauta sisenevad ning kas mõne eest neist juba hoolitsetakse eriliselt (kui lugeja mind vabandab teadvustatud psüühika võrdlemise eest laudaga). Kaks musta lammast rea valgete hulgas mahuvad ära küll, kuid nende sisenemisel kiiresti teineteise järel tõrjutakse esimene must kohe kõrvale ja aupaiste langeb teisele. Kui teine must lammas aga liialt viivitab sisenemisega, siis temaga enam ei tegeleta, sest just esimene on jõudnud aujärjele. See mõistukõne oleks jabur selle osa alguses, ent pole enam seda nüüd, kui eelnevalt vaatlesime jadas esitatud testobjektide tajumise eripärasid. Antud juhul turgutas minu tekstijada eelnev osa selle järgneva osa mõistmist.



Joonis 3.

Omavahel identsetest objektidest koosneva jada sees esitatud kahe erineva testobjekti (S1 ja S2) äratundmise tase, sõltuvalt testobjektide esitamise alguste vahelisest ajaintervallist (SOA) ja testobjektide järjekorrast. (Ajaskaala on logaritmiline.) Kui ajaintervall on 50–100 ms, domineerib S2; kui aja-intervall on 200–500 ms, domineerib S1 ning S2 suhtes ilmneb tähelepanu “silmapilgutus”. Ühesekundilise intervalli puhul nähakse mõlemat teststiimulit hästi [Bachmann, Hommuk, 2005].

KOKKUVÕTTEKS

Objektide ja sündmuste meie teadvusse jõudmise saatus ja kiirus on küllaltki subtiilsed realiteedid, sõltuvad paljudest teguritest ja võivad mängida nii mõnegi paradoksaalse vembu. Õnneks on võimalik üllatavaid tajufenomene ja illusioone seletada mõistlikelt neurobioloogilistelt alustelt lähtudes. Enamgi veel, kui kasutada metateooriat, mille raames spetsiifilise pertseptiivse töötamise mehhanismid talitlevad käsikäes kvaalide sisu suhtes iseenesest mittespetsiifilise “teadvustamismehhanismiga”, taanduvad paljud üllatused tõdemusteks, et nii see vist peabki olema [Bachmann, 2006a,b]. Ent selleks on möödapääsmatu kasutada peent ja täpset psüühika kronometraaži ja stimulatsiooni millisekundidiapasoonis doseerimist sobivalt kavandatud eksperimentaalsete tajutõdesannete kontekstis.

KIRJANDUS

Bachmann, T. (1988). Time course of the subjective contrast enhancement for a second stimulus in successively paired above-threshold transient forms: perceptual retouch instead of forward masking. *Vision Research*, 28, 1255-1261.

Bachmann, T. (1999). Twelve spatiotemporal phenomena, and one explanation. Aschersleben, G., Bachmann, T., Müsseler, J. (eds). *Cognitive Contributions to the Perception of Spatial and Temporal Events*. Elsevier, Amsterdam, 173-206.

Bachmann, T. (2000). *Microgenetic Approach to the Conscious Mind*. John Benjamins, Amsterdam / Philadelphia.

Bachmann, T. (2004). Inaptitude of the signal detection theory, useful vexation from the microgenetic view, and inevitability of neurobiological signatures in understanding perceptual (un)awareness. *Consciousness and Cognition*, 13, 101-106.

Bachmann, T. (2005). Object substitution and its relation to other forms of visual masking: Reply to James Enns. *Vision Research*, 45, 381-385.

Bachmann, T. (2006a). Microgenesis of perception: conceptual, psychophysical, and neurobiological aspects. Ögmen, H, Breitmeyer, B. G. (eds). *The First Half Second: The Microgenesis and Temporal Dynamics of Unconscious and Conscious Visual Processes*. MIT Press, Cambridge, MA, 11-33.

Bachmann, T. (2006b). A single metatheoretical framework for a number of conscious-vision phenomena. Jing, Q., Rosenzweig, M.R., d'Ydewalle, G., Zhang, H., Chen, H.-C., Zhang, K. (eds). *Psychological Science Around the World. Volume 1: Neural, Cognitive and Developmental Issues*. Psychology Press / Taylor & Francis, Hove, 229-242.

Bachmann, T., Hommuk, K. (2005). How backward masking becomes attentional blink: Perception of successive in-stream targets. *Psychological Science*, 16, 740-742.

Bachmann, T., Leigh-Pemberton, L. (2002). Binocular rivalry as a function of spatial quantisation of the images of faces: precategory level controls it. *Trames*, 6, 283-296.

Bachmann, T., Luiga, I., Pöder, E. (2004a). Forward masking of faces by spatially quantized random and structured masks: On the roles of wholistic configuration, local features, and spatial-frequency spectra in perceptual identification. *Psychological Research*, 69, 11-21.

Bachmann, T., Luiga, I., Pöder, E. (2005a). Variations in backward masking with different masking stimuli: I. Local interaction versus attentional switch. *Perception*, 34, 131-137.

Bachmann, T., Luiga, I., Pöder, E. (2005b). Variations in backward masking with different masking stimuli: II. The effects of spatially quantised masks in

the light of local contour interaction, interchannel inhibition, perceptual retouch, and substitution theories. *Perception*, 34, 139-154.

Bachmann, T., Luiga, I., Pöder, E., Kalev, K. (2003). Perceptual acceleration of objects in stream: evidence from flash-lag displays. *Consciousness and Cognition*, 12, 279-297.

Bachmann, T., Oja, A. (2003). Flash-lag without change in feature space is alive and well at late intervals after stream onset. *Perception*, 32, Supplement, 126-127.

Bachmann, T., Pöder, E. (2001). Change in feature space is not necessary for the flash-lag effect. *Vision Research*, 41, 1103-1106.

Bachmann, T., Pöder, E., Luiga, I. (2004b). Illusory reversal of temporal order: the bias to report a dimmer stimulus as the first. *Vision Research*, 44, 241-246.

Bachmann, T., Sikka, P. (2005). Perception of successive targets presented in invariant-item streams. *Acta Psychologica*, 120, 19-34.

Crick, F., Koch, C. (2003). A framework for consciousness. *Nature Neuroscience*, 6, 119-126.

Crick, F., Koch, C. (2005). What is the function of the claustrum? *Philosophical Transactions of the Royal Society. B*, 360, 1271-1279.

DiLollo, V., Enns, J. T., Rensink, R. (2000). Competition for consciousness among visual events: The psychophysics of reentrant visual processes. *Journal of Experimental Psychology: General*, 129, 481-507.

Edelman, G. M., Tononi, G. (2000). *A Universe of Consciousness: How Matter Becomes Imagination*. Basic Books, New York.

Enns, J.T., Di Lollo, V. (2005). Reply to Talis Bachmann on object substitution. *Vision Research*, 45, 387-389.

Nijhawan, R. (1994). Motion extrapolation in catching. *Nature*, 370, 256-257.

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

Sheth, B. R., Nijhawan, R., Shimojo, S. (2000). Changing objects lead briefly flashed ones. *Nature Neuroscience*, 3, 489-495.

Tononi, G. (2004). Consciousness and the brain: theoretical aspects. Edelman, G., Smith, B. (eds). *Encyclopedia of Neuroscience*: ISBN: 0-444-51432-5. Elsevier.com.

Tononi, G. (2005). Consciousness, information integration, and the brain. Laureys, S. (ed). *Progress in Brain Research*. Vol. 150, Chapter 9. Elsevier, Amsterdam, 109-126.

*Teaduspreemia humanitaarteaduste alal
monograafia "Linna pühadering. Pidukultuur Läänemere idaranniku
hansalinnades 1350–1550 (Urban Carnival: Festive Culture in the
Hanseatic Cities of the Eastern Baltic, 1350–1550)" eest*



Anu Mänd

Sündinud 22.02.1968 Tallinnas

1986 Tallinna 43. Keskkool
1992 Tartu Ülikool, ajalugu (kunstiajalugu)
1996 magister (keskaja-uuringud), Kesk-Euroopa Ülikool, Budapest
2000 PhD (keskaja-uuringud), Kesk-Euroopa Ülikool, Budapest

Aastatel 1999–2003 Niguliste muuseumi teadur ja hõbedakogu kuraator. Alates 2003. aastast Tallinna Ülikooli Ajaloo Instituudi vanemteadur.

Avaldanud üle 30 teaduspublikatsiooni, sh neli monograafiat.

Pühad ja pidustused kuuluvad ühiskonna tähtsaimate kultuurinähtuste hulka. Nendega peetakse meeles ja tähistatakse vastava kogukonna või inimgrupi jaoks olulisi sündmusi või perioode, olgu nende tagapõhi religioosne, ajalooline, maaharimise ja karjakasvatusega seonduv vmt. Pühad ja pidustused vastanduvad olemuselt argipäevale. Pidustused võivad moodustada ühe osa püha (nt jõulude) kombestikust või olla täiesti omaette sündmuseks (nt keskaegne linnulaskmisvõistlus). Pidustuse teeb eriliseks nii tema sotsiaalkultuuriline tähendus kui ka välised märgid (nt külluslik toit ja jook, pidurõivad, teatud esemete kasutamine) ja peoga seonduvad tegevused (nt laulud ja tantsud). Pidustuste käigus aset leidvad rituaalid, näiteks pidusöök, kinnitavad ja tugevdavad inimestevahelist kokkukuuluvustunnet ja ühiseid väärtushinnanguid – seega grupiidentiteeti. Pidustused kannavad edasi sõnumeid, peegeldavad vastava ajastu ja inimgrupi eluviisi ning -standardit. Arusaadavalt ei erine ühiskonnad ja inimgrupid üksteisest mitte üksnes selle poolest, milliseid pühi nad tähistavad, vaid ka selle poolest, millisel määral üks püha või komme on osake nende kultuurist. Seega võivad pühad ja pidustused, nende kombestik ja neisse suhtumine anda meile väärtuslikku teavet ühiskonna iseloomu, tavade ja mentaliteedi kohta.

PIDUSTUSTE UURIMISEST LÄÄNE-EUROOPAS

Lääne ajalooteaduses on pidustuste ja nende aspektide uurimisel pikk traditsioon. Selle temaga on tegeldud nii sotsiaalajaloo, kirjandusajaloo, teatriajaloo, kunstiajaloo, sotsiaalanthropoloogia kui ka folkloristika raames ning on selge, et sedavõrd komplekssele fenomenile kui möödunud aegade peokultuur ja kombes ei saagi läheneda teisiti kui interdistsiplinaarselt. Keskaegsete ja vara-uusaegsete pidustuste uurimine on muutunud eriti populaarseks viimase paarikümne aasta jooksul, mida tõendab plahvatuslikult suurenenud selle teemalise kirjanduse hulk. Pidustustele on pühendatud mitu rahvusvaheliste konverentside tulemusena sündinud kogumikku. Neile lisandub arvukalt keskaja ja

vara-uusaja peokultuuri, draama ja kalendaarsete kommete alaseid käsitlusi, samuti üksikutele meelelahutuse liikidele, nagu tantsudele, pühendatud monograafiaid.

Ei ole mõtet (ega võimalikki) vaagida eraldi üksikute teoste voorusi ja puudusi, pigem tuleks osutada sellele, mis on pidustuste ja kommete uurimise metodoloogias aja jooksul muutunud: mis eristab värskeid uurimusi sajanditagustest kirjatöödest ja millised on tänapäevased rõhuasetused. 19. sajandi teisel ja 20. sajandi esimesel poolel andsid tooni kaks uurimissuunda: kirjandusajaloolased käsitlesid kirjanduslikele allikatele tuginedes keskaja õukonnapidustusi, kultuuriajaloolased aga, kogudes andmeid keskaja ilmaliku kultuuri ja igapäevaelu kohta, peatusid ka pühade ja pidustustega seotud kombetäitmistel. Meie seisukohalt pakuvad enim huvi kultuuriliselt lähedasi piirkondi käsitlevad kirjutised, eelkõige Alwin Schultzi monumentaalsed uurimused Saksamaa õukonna- ja argikultuuri kohta ning Frederik Troels-Lundi 14-köiteline teos igapäevaelu kohta Põhjamaades, põhirõhuga Taanil. Nende tööde tähtsus seisneb eelkõige kogutud andmete hulgas ja kommete kirjeldamises. Samal ajal jäadi kitsa piirkonna tavade juurde ega püütud neid võrrelda teistest Euroopa maadest pärit andmestikuga.

Folkloristid ja antropoloogid keskendusid valdavalt külakogukondade kommetele ja tavadele, tuginedes peamiselt folkloori andmetele ja tol ajal veel elujõulistele traditsioonidele. Viimase suuna tuntuimate esindajate hulka tuleb lugeda inglise antropoloogi James Frazerit, kes oma põhiteoses "Kuldne oks" pööras suurt tähelepanu uskumuste ja kommete tekkele ning algupärale, püüdes neid iga hinna eest seostada eelkristlike riitustega. Kuna selliseid väiteid ei olnud võimalik kirjalike allikate abil tõestada, võtsid Frazer ja tema mõttekaaslased aluseks oletuse, et külaühiskonnad püsivad aastasadu vaimset muutumatusena, järelikult jäävad samaks ka kombed. Euroopa kommete käsitlemisel osutati teatud sarnasustele mõne traditsioonilise ühiskonnaga (nt Aafrikas), mis oli säilitanud oma "primitiivse" iseloomu kauem kui moodsad industriaalühiskonnad. Eeldati, et sarnase käitumise aluseks on alati ja kõikjal sarnased motiivid. Kuigi enamik ajaloolasi ja antropolooge eelnimetatud meetoditest peagi taganes, jätkusid üksikute entusiastide katsed rõhutada kristlike pühade ja nendega seotud kommete paganlikku (peamiselt kreeka-rooma, keldi või germaani) päritolu isegi kuni 1970. aastateni.

Tänapäeval on jõutud arusaamisele, et kuigi kommete ajaloo seisukohast pakub nende tekke ja algupära küsimus endiselt huvi, on sellel kõrvaline tähtsus kommete otstarbe analüüsimisel hilisemates, sealhulgas keskaja ühiskondades. On selge, et kommete vorm ja sisu muutuvad aja jooksul ning seepärast tuleb neid uurida vastavas ajalises, regionaalses ja sotsiaalses kontekstis. Selline lähenemisviis ei välista sugugi eelkristlike uskumuste ja kombetäitmiste edasikestmist keskajal, kuid viimast tuleb uurida ja kinnitada Euroopa keskaegsete

allikate põhjal, tuginemata maailma teistest regioonidest ja hilisematest sajanditest pärit analoogidele.

Tänapäevane keskaegse peokultuuri uurimine ühendab endas peamiselt (kuigi mitte ainult) kolme teadussuuna metodoloogiat ja tulemusi. Nendeks on rahvakultuur, draama ajalugu ja linnakultuur.

Rahvakultuuri uurimine saavutas uue kvaliteedi alates 1970. aastate teisest poolest. Selle teema raames on palju tegeldud ka pidustuste ja peokommetega. Tänu keskaja ja vara-uusaja rahvakultuuri käsitlevatele teostele – autorite seas on tuntuimad näiteks Peter Burke, Natalie Zemon Davis, Robert Muchembled, Aron Gurevitš ja Robert Scribner – laienes uurimisala ühiskonna ülemkihtidel laiade rahvamassideni, kusjuures rõhutati ülem- ja alamkihtide vaheliste vastastikuste mõjutuste uurimise vajadust.

Palju on räägitud sellest, et hiliskeskajal ja vara-uusajal olid “eliitkultuuri” ja “rahvakultuuri” vahelised erinevused palju väiksemad kui hiljem. Peter Burke’i sõnade kohaselt iseloomustab ülemklasse sel perioodil bikultuursus (*biculturality*), sest ühest küljest saab rääkida rahvakultuurist, mis oli omane nii “eliidile” kui ka “rahvale”, teisest küljest sai aga eliit osa haritud vähemusele mõeldud eksklusiivsest kultuurist. Alles 17. sajandi lõpul ja 18. sajandil hakkas sotsiaalne eliit tasapisi sellest ühisest “rahvakultuurist” eemalduma ja end sellele teravalt vastandama. (19. sajandil “avastas” eliit rahvakultuuri taas ja nimetas selle uurimisainesena folklooriks.) Ei tasu siiski unustada, et hoolimata “eliidi” osalemisest keskaja “ühises kultuuris”, hoidsid nad juba siis “rahvast” distantsi ning püüdsid võimalikult rangelt kontrollida ja reguleerida avaliku elu kõiki aspekte, sealhulgas pidustusi, eriti kui püsis võimalus, et need kujutavad endast ohtu avalikule korrale ja väljakujunenud hierarhilisele süsteemile.

Teine uurimissuund, mille käigus on põhjalikumalt tegeldud keskaja peokultuuriga, kannab anglo-ameerika teadusmaailmas nimetust *draama ajalugu*. Mõistet *draama* ei seostata aga juba enam ammu kitsalt teatriga. Näiteks 1975. aastal alguse saanud rahvusvaheline projekt REED (*Records of Early English Drama*) on oma eesmärgi sõnastanud järgmiselt: koguda andmeid draama, ilmaliku muusika, meelelahutuse ja avalike tseremooniate kohta. Kui-gi keskaja Inglismaa “draama” uurimine on käesoleval hetkel ilmselt kõige tugevamal tasemel, on tendents siiski selles suunas, et koguda andmeid ja analüüsida värske pilguga kogu Euroopa keskaegset ja vara-uusaegset peokultuuri. Just kalendaarsete pidustuste ja kommete uurimisel on teatriajaloolased ja sotsiaalajaloolased leidnud ühise huvivaldkonna. Heaks näiteks selle kohta on 2001. aastal ilmunud monumentaalne teos “The Medieval European Stage, 500–1550”, mis pealkirjast hoolimata keskendub põhiliselt kalendaarsete kommete kohta käivate allikate edastamisele. Kahjuks hõlmab see teos peamiselt Lääne-Euroopa riike ning paljud “perifeersed” piirkonnad, sealhulgas

keskaegne Liivimaa (teatavasti hõlmas keskaegne Liivimaa enam-vähem tänapäeva Eesti ja Läti territooriume), seal kajastamist ei leia.

Keskaegsete pidustuste uurimisel on erilist tähelepanu pööranud linnade peokultuurile. Avalikud tseremooniad, mis olid seotud iga-aastaste kalendripühade või muudest faktoritest tingitud pidustustega (nt isanda saabumine, uute linnavõimude ametisse astumine, sõjalise võidu tähistamine, aga ka inimese eluringiga seotud tähtpäevad), lisasid linnale au ja kuulsust, defineerisid inimgruppide siseseid ja nendevahelisi sotsiaalseid suhteid ning täitsid mitmeid teisi religioosseid, poliitilisi, majanduslikke ja sotsiaalseid eesmärke. Kui varasemates kirjutistes väideti, et avalikud tseremooniad olid linnakogukonda üheks tervikuks liitvaks teguriks, siis värskemad uurimused on näidanud, et tegelikult oli asi vastupidine – tseremooniad rõhutasid sotsiaalseid hierarhiaid ja osalejate eksklusiivsust, väljendades seega teatud üksikisikute või gruppide ambitsioone. Linnade peokultuuri uurimisel on viimaste aastate jooksul suurt tähelepanu osutatud eelkõige sellistele teemadele nagu pidustuste erinevad funktsioonid linnaühiskonnas, pidustuste avaliku külje reguleerimine ja kontroll ülemkihtide poolt, tseremooniad kui grupiidentiteedi kindlustamise vahend, pidustused kui võimu manifestatsioon, pidustused ja vägivald, pidustused ja noorus, pidustused ja ruumikasutus, pidustused ja kujutav kunst jne. Need ja teised teemad pakuvad ammendamatu võimalusi interdistsiplinaarseks lähenemiseks keskaegsele peokultuurile.

Kõigi eelnimetatud uurimissuundade, eelkõige aga rahvakultuuri käsitlemise raames on korduvalt puudutatud ka pidustuste sotsiaalsete funktsioonide küsimust, seda eriti karnevali ja karnevalilaadsete pidustuste puhul. Üheks oluliseks inspiratsiooniallikaks kujunes sotsiaalajaloolastele selles küsimuses Mihhail Bahtini tööde – esmajoonel “François Rabelais’ looming ning keskaja ja renessansi rahvakultuur” – tõlkimine suurematesse Euroopa keeltesse. Põhimõtteliselt jagunevad arvamused kaheks. Enamik sotsiaalajaloolasi on 1950. aastatel antropoloogide poolt kasutusele võetud nn kaitseventiili-teooriale toetudes väitnud, et vastlate ja teiste sarnaste pidustuste käigus lubatud liialdused võimaldasid inimestel perioodiliselt pingeid maandada ehk n-ö “auru välja lasta”, mis omakorda aitas paremini taluda argielu piiranguid. Kuna pidustuste käigus pöörati kõrgendatud tähelepanu kogukonnas valitsevatele ebakõladele või taunitavale käitumisele ja selliseid juhtumeid lahendas või naeruvääristas rahvas enamasti kogukonnasiseselt, siis aitasid pidustused ja nende rituaalid ühtlasi kaasa valitseva süsteemi ja stabiilsuse tagamisele. Seega pooldab enamik sotsiaalajaloolasi arvamust, et lõppkokkuvõttes aitasid karnevalitaolised pidustused kaasa *status quo* säilitamisele ühiskonnas.

On aga ka teine rühm teadlasi, kes Bahtinile toetudes väidab, et selliste pidustuste käigus toimunud normidest üleastumine oli sotsiaalse protesti vahend, mis pidi “mahasurutud enamusel” aitama ühiskonda muuta. Igapäevaelu piiranguite ja sotsiaalsete hierarhiate peapeale pööramine võimaldasid

inimestel elada välja oma unistusi ja luua endale (kas või ajutiselt) illusioon "ideaalsest" maailmast. Kuna aga pidustuste ajal valitsev võrdsusprintsip ja seisusevahede ületamine juhtisid rahva tähelepanu ühiskonnas valitsevale ebaõiglusele, päädisid vastlööbustused mõnikord rahutuste või koguni rahvaülestõusuga.

Uusimad uurimused osutavad aga sellele, et mõlema suuna esindajate põhjendused on liiga ühekülgsed ja lihtsustatud. Selle asemel, et läheneda kometele ja nende funktsioonidele teatud eelarvamustega ja suruda nad juba ette kindlaksmääratud raamidesse, tuleks tõepärasema tulemuse saavutamiseks vaadelda iga juhtumit eraldi, lähtudes selle kontekstist, osalejatest ja tagajärgedest. Alles seejärel on võimalik arutleda selle üle, mis võis sellist käitumist põhjustada ja mida vaadeldav komme võis inimeste jaoks tähendada ning kuidas konkreetne juhtum sobituks laiemasse kultuurilisse konteksti. See metodoloogia väärrib kahtlemata järgimist, ehkki keskaja (peo)kommete mitmekülgsel analüüsimisel raskendab sageli allikate vähesus ja napisõnalisus.

Selles lühiülevaates oli võimalik osutada ainult peamistele suundumustele peokultuuri historiograafias. Järgnevalt vaadeldakse, mida on selles valdkonnas tehtud Eestis ja Lätis.

PIDUSTUSTE UURIMISEST EESTIS JA LÄTIS

Vastupidiselt Lääne-Euroopale, kus keskaegse peokultuuri uurimise traditsioon on olnud järjepidev ja tugev, on Eesti ja Läti ajaloolased sellele teemale võrdlemisi vähe tähelepanu pööranud. Selle põhjusi tuleb otsida eelkõige Baltimaade 20. sajandi kirjast poliitilisest ajaloost.

Baltisaksa ajaloo-uurijad, kes panid aluse professionaalsele ajalookirjandusele hilisema Eesti ja Läti territooriumil, tundsid keskaja vastu väga suurt huvi. Märkis ju keskaeg sakslaste saabumist Liivimaale ja nende võimu algust siinmail. Seega tähendas keskaja uurimine baltisakslaste jaoks tegelemist nende endi ajaloo ja kultuurilise identiteedi küsimustega. Kuigi põhiliselt keskenduti poliitilistele sündmustele ja õigustemadele, tehti palju ära ka linnade sotsiaalajaloo vallas. Viimase raames käsitleti ka gildide ja vennaskondade siseelu ja kombeid, seda sageli veel tegutsevate korporatsioonide (Suurgild, Mustpeade vennaskond) tellimisel. Esimesi ülevaateid keskaegsetest pidustustest võib seetõttu leida nii konkreetse linna ajalugu käsitlevates raamatutes kui ka konkreetse korporatsiooni ajaloole pühendatud teostes – Gotthard Tielemani Riia Mustpeade vennaskonna ajaloos (1831) ja Friedrich Amelungi Tallinna Mustpeade vennaskonna ajaloos (1885/1930). Korporatsioonisisestest kommetest ja peokultuurist on juttu ka Riia, Tallinna ja Tartu gildide põhikirjade (skraade) editsioonide eessõnades.

Esimene konkreetsele pidustusele pühendatud uurimus oli Eduard Pabsti teos maikrahvipeost (1864). Selles raamatus, kus lisaks vaadeldakse põgusalt ka

papagoilaskmist, käsitles Pabst mitte üksnes Riia ja Tallinna maikrahvipidude kohta käivaid allikaid, vaid ka võrdlusmaterjali Saksamaalt, Taanist ja Rootsi. Aja jooksul on päevavalgele tulnud uusi, Pabstile tundmatuid allikaid, ning nii mõnedki tema seisukohad vajavad korrigeerimist. Seetõttu on see teos tänapäeva uurijate jaoks paratamatult vananenud.

Eelnimetatud kirjatööde ühiseks jooneks võib pidada kirjeldavat käsitluslaadi ja analüütilise lähenemise puudumist. Kui Pabsti teos välja arvata, keskenduti üksnes kohalikele kommetele ega püütud Liivimaa linnade peokultuuri käsitleda võrdlevas kontekstis Euroopa teiste piirkondadega, isegi mitte Saksamaaga. Samas tuleb hinnata baltisakslaste kolossaalset tööd allikate publitseerimise alal, mis aitas oluliselt kaasa järgnevate põlvkondade uurimistöele.

Balti riikide esimesel iseseisvusajal 1918–1940 nägid Eesti ja Läti ajaloolased oma peaülesandena alusepanekut rahvuslikule ajalookirjandusele, mis keskendus maa põlisrahvastele ehk eestlastele ja lätlastele. Keskaegse linnakultuuri teemad, mis suures osas seostusid “saksa kultuuriga”, jäid tagaplaanile. Küll aga jätkasid saksa kaupmeeste, nende korporatsioonide ja peokultuuri uurimist baltisaksa ajaloolased ning just sel perioodil nägid päevavalgust kaks monograafiat, mis on jäänud tänase päevani selles valdkonnas kõige põhjalikumateks. Esiteks tuleb nimetada Herbert Splieti monograafiat Riia Mustpeade maja ajaloost (1934). Raamatu pealkiri on pisut eksitav, sest tegemist pole mitte niivõrd hoone ajaloo, kuivõrd Riia Mustpeade vennaskonna ajaloo süvakäsitlusega, kus on palju tähelepanu pööratud ka vennaskonna peotraditsioonidele. Splieti raamatu puhul tuleb esile tõsta seda, et autor on läbi töötanud suure hulga arhiivimaterjale ja allikapublikatsioone, mis võimaldas tal käibesse tuua palju uusi fakte vennaskonna ajaloo ja kommete kohta. Siiski jäi Spliet, sarnaselt eespool nimetatud baltisaksa uurijatega, truuks kirjeldavale esituslaadile ega proovinud astuda kaugemale lokaalajaloo raamidest.

Teine raamat, Friedrich Alexander Redlichi teos Liivimaa kaupmeeste kommetest ja tavadest, ilmus trükist 1935, ent tegemist oli aasta varem Göttingeni ülikooli juures kaitstud dissertatsiooniga. Redlich tugines kolme suurema linna – Riia, Tallinna ja Tartu materjalidele ning keskendus peamiselt Suur-gildide ja Mustpeade vennaskondade ajaloo ja tegevuse uurimisele. Pidustus-tele on pühendatud üksnes tema raamatu kolmas osa, kus Redlich käsitleb aasta suuremaid jootusid ning pöörab põhjalikumalt tähelepanu ka mõnele meelelahutuse liigile, näiteks tantsudele. Raamatu suurim puudus seisneb selles, et autor on tutvunud ainult Riia arhiivimaterjalidega, Tallinna ja Tartu puhul aga tuginenud vaid allikapublikatsioonidele või sekundaarkirjandusele. See asjaolu mõjutas kahtlemata tema väidete kvaliteeti ja lõppjäreluste usaldusväärsust. Teisest küljest tuleb aga Redlichi teeneks lugeda seda, et ta esitas oma teoses Liivimaa kommetele mõningaid huvitavaid paralleele mujalt Euroopast, eriti Põhja-Saksa linnadest.

Nagu öeldud, on need kaks raamatut, millest kumbki polnud pühendatud spetsiaalselt pidustustele, jäänud tänini parimateks käsitleteks keskaegse Liivimaa linnade peokultuuri kohta. Järgneval, nõukogude perioodil avaldati küll suuremate linnade ajaloo kohta koguteoseid, ent keskaegse kultuuri küsimustel on neis peatunud vaid põgusalt.

Keskaegse Liivimaa linnade uurimine jätkus ka väljaspool Eestit ja Lätit, eriti just siitmailt emigreerunud teadlaste poolt. Paraku on ka nende teostes põhirõhk linnade haldusküsimustel ning majandus- ja sotsiaalajalool, erandina võib nimetada vaid Paul Johanseni ja Heinz von zur Mühlteni monumentaal-teost "Sakslane ja mittedakslane keskaegses ja vara-uusaegses Tallinnas" (1973).

Oluline pööre suhtumises keskaja linnakultuuri küsimustesse toimus 1990. aastatel. Sellest ajast saadik on mitmed ajaloolased tegelenud teemadega, mis haakuvad ka peokommetega: näiteks on käsitletud keskaegse tallinlase püha-deringi (Tiina Kala), söömise ja joomise ajalugu (Inna Põltsam), ning muusikute mobiilsuse küsimust (Juhan Kreem). Kuigi enamasti on piirdunud keskaegse Tallinna uurimisega (mis on seletatav Tallinna Linnaarhiivi rikkalike kogudega), iseloomustab neid kirjutisi teemale lähenemine laiemast sotsiaalkultuurilisest vaatenurgast ning Lääne ajalookirjanduse saavutuste võrdlemisi hea tundmine. Taasiseseisvunud Lätis ei ole kahjuks selliste teemade vastu seni veel huvi tuntud.

Nagu eelnevast nähtub, piirdusid kõik senised linnakultuuri käsitlused, milles on puudutatud ka pidustuste valdkonda, kas ühe linna või korporatsiooni ajalooa. Kõigele lisaks sai juba esimese vabariigi ajal alguse tendents, mis süvenes nõukogude ajal ja on kahjuks jäänud valitsema tänapäevani, et eestlased tegelevad Eesti ja lätlased Läti keskaja ajalooa, tõmmates mõnikord kunstlikult piire seal, kus neid ühise ajaloo tõttu olema ei peaks. Vajadus kaasaegset uurimismetoodikat kasutava võrdleva uuringu järele oli ilmne.

Mina olen keskaegse Liivimaa linnade peokultuuriga tegelenud 1996. aastast alates, avaldades artikleid nii Eestis kui ka välismaa eelrefereeritavates ajakirjades. 2000. aastal kaitsesin sel teemal ingliskeelse doktoritöö Budapestis, Kesk-Euroopa Ülikoolis. 2004. aastal ilmus Tallinna Linnaarhiivi toimetiste sarjas monograafia "Pidustused keskaegse Liivimaa linnades 1350–1550" ning aasta hiljem Brepolsi kirjastuse väljaandena "Urban Carnival: Festive Culture in the Hanseatic Cities of the Eastern Baltic, 1350–1550". Raamatute sisu on olulisi erinevusi. Kui ingliskeelsele lugejaskonnale oli vaja tutvustada keskaegse Liivimaa ajalugu, siis eestikeelsest raamatust on need lõigud välja jäetud või esitatud lühendatult. Eesti lugejale on see-eest põhjalikumalt seletatud mõnede pühade ja kommete tekkelugu ning Euroopa tausta, sest katoliku kiriku kalender ja seega ka paljud keskaegsed pühad on suurele osale eestlastest vähe tuntud.

Raamatus analüüsisin peamiselt kaupmeeste korporatsioonide – rae, Suurgildi ja Mustpeade vennaskonna – pidustusi Riias, Tallinnas ja Tartus. Võrdluseks kasutasin ka käsitöögildide materjale ja kiriku hoiakuid peegeldavaid dokumente. Otsus keskenduda kaupmeeskonna pidustustele sündis eelkõige seetõttu, et just nimetatud korporatsioonide kohta on olemas piisavalt allikmaterjali, et teemat mitmekülgselt käsitleda. Teisest küljest ei tohi unustada ka seda, et rae määrused ning kaupmeeste gildide ja vennaskondade värvikas peokultuur mõjutasid tugevalt ka teiste sotsiaalsete kihtide pidustusi.

Suurem osa raamatust on pühendatud gildide ja vennaskondade iga-aastastele pidustustele, mille hulgas olid tähtsaimad neli: jõulujoodud, vastlajoodud ning linnulaskmisvõistluse ja maikrahvi valimisega seonduvad pidustused. Lisaks neile neljale tähistati gildide raames veel mõningaid kalendripühi, mille osatähtsus aastases peoringis oli aga eelnimetatuist väiksem – näiteks Kristuse ihu püha ja Püha Martini püha (mardipäev).

Mittekalendaarsetest pidustustest käsitlesin vaid ühte, ent see-eest Liivimaa kontekstis kõige suurejoonelisemat sündmust – nimelt Liivimaa ordumeistri pidulikku saabumist linna ja sellele järgnevaid bankette. Tegemist oli teatud mõttes kõiki linnaelanikke hõlmava pidustusega, kuigi ka siin mängisid linna poolt vaadates peaosa raad ja tähtsamate gildide esindajad. Teised mittekalendaarsed pidustused – näiteks inimese eluringiga seotud tähtpäevad (pulmad, varrud, matused), kõrgete kiriklike või ilmalike võimukandjate ametisse määramisega kaasnevad pidustused, sõjalise võidu tähistamine – jäid ruumipuudusel raamatust välja, kuid väärivad tulevikus kindlasti käsitlemist.

Uurimuse ajalised piirid ulatuvad 14. sajandi keskpaigast 16. sajandi keskpaigani. Algsuuna tingis rae pidustuste kohta käivate allikate puudumine varasemast ajast kui 14. sajandi keskpaik ning asjaolu, et Suurgildi ja Mustpeade vennaskonna vanimad dokumendid pärinevad vastavalt 14. sajandi teisest poolest ja 15. sajandi algusest. 16. sajandi keskpaigaga lõpetamist õigustab asjaolu, et reformatsioon, mille põhisündmused Liivimaa linnades toimusid aastail 1522–1526, põhjustas ühiskonnas sügavaid sotsiaalseid ja religioosseid muutusi, mis ei jätnud mõju avaldamata ka peokultuurile. Peagi järgnev Vene-Liivimaa sõda (1558–1583), mille puhkemine tähistas ühtlasi siinsete poliitiliste struktuuride kokkuvarisemist ja mida kokkuleppeliselt loetakse keskaja lõpuks Liivimaal, üksnes süvendas neid protsesse. Mõned katoliku ajast pärinevad pidustused surid välja, teised küll jätkusid (vähemalt mõnda aega), ent tegid läbi tuntavad muudatused sisus ja vormis.

Kui keskaegsete pidustuste uurimine on sageli piirdunud vaid kommete ja peolaua kirjeldamisega, siis mina analüüsisin neid võimalikult paljudest aspektidest. Kõigepealt andsin ülevaate kaupmeeste korporatsioonide pidustustest ja nende tähtsusastmest. Seda, kui oluline üks või teine pidustus korporatsiooni jaoks oli, saab järeldada näiteks peo kohta kasutatud terminite, pidustuse kes-

tuse ning kulutatud raha hulga järgi. Seejärel käsitlesin üksikuid pidustusi ja nende kombestikku ning analüüsisin pidustuste ettevalmistamise ja läbiviimise korda. Uurisin ka eri korporatsioonide vahelist koostöö- ja suhtluspraktikat, samuti seda, kuidas teatud tseremooniad olid gildide ja vennaskondade jaoks enesenäitamise vahendiks. Viimati nimetatuga seondus ka küsimus, kuidas pidustused peegeldasid ja kinnitasid linnas valitsevaid sotsiaalseid hierarhiaid. On tuntud tõsiasi, et keskaegses ühiskonnas kasutasid ülemkihid peotseremooniaid oma võimu manifesteerimiseks. Nii oli see ka hiliskeskaegsel Liivimaal, kusjuures asjaolu, et siin erinesid kõrg- ja alamkihid omavahel mitte üksnes seisuse, vaid ka keele ja rahvusliku kuuluvuse poolest, võis veelgi rõhutada nendevahelisi sotsiaalseid ja kultuurilisi erinevusi.

Üksikute pidustuste analüüsile järgnes pidustuste põhielementide käsitus. Es-malt vaatlesin jootude finantseerimist, analüüsisid kulude ja tulude struktuure. Seejärel peatusin pikemalt pidusöögil ja mitmesugustel meelelahutuse liikidel, nagu tantsud, mängud ja turniirid. Loomulikult ei saanud mööda minna ka tollaegsetest käitumisharjumistest ja nende rikkumisest jootude käigus. Oma-ette teemana uurisin pidustusi ja ruumikasutust, sealhulgas seda, mis võis põhjustada ühe või teise avaliku koha valikut teatud tseremooniade läbiviimiseks. Viimases peatükis andsin ülevaate reformatsioonijärgsetel aastakümnetel toimunud muutustest mentaliteedis ja ühiskondlikus elus, mis järk-järgult viisid keskaegse peokultuuri allakäigu ja hääbumiseni.

Liivimaa linnade peokultuuri käsitlesin oma raamatutes võrdlevas kontekstis hiliskeskaegse Euroopa peokultuuriga. Loodetavasti avardab Liivimaa kommete põhjalikum tundmaõppimine meie teadmisi mitte üksnes siinsete linnade ja meile kultuuriliselt lähedaste piirkondade (eelkõige Saksamaa ja Skandinaavia) ühiskonna ja mentaliteedi kohta, vaid aitab kaasa hiliskeskaja Euroopa linnakultuuri paremale mõistmisele tervikuna.

KIRJANDUS

- Altenburg, D., Jarnut, J., Steinhoff, H.-H. (Hrsg). (1991). *Feste und Feiern im Mittelalter: Paderborner Symposion des Mediävistenverbandes*. Sigmaringen.
- Amelung, F., Wrangell, G. (1930). *Geschichte der Revaler Schwarzenhäupter*. Reval.
- Arnade, P. (1996). *Realms of Ritual: Burgundian Ceremony and Civic Life in Late Medieval Ghent*. Ithaca.
- Bakhtin, M. (1968). *Rabelais and His World*. Cambridge.
- Burke, P. (1978). *Popular Culture in Early Modern Europe*. London.
- Clopper, L. M. (2001). *Drama, Play, and Game: English Festive Culture in the Medieval and Early Modern Period*. Chicago.
- Davis, N. Z. (1975). *Society and Culture in Early Modern France*. Stanford.

- Eisenbichler, K., Hüskens, W. (eds). (1999). *Carnival and the Carnavalesque: The Fool, the Reformer, the Wildman, and Others in Early Modern Theatre*. Amsterdam.
- Frazer, J. G. (1922). *The Golden Bough: A Study in Magic and Religion*. Abridged ed. in one volume. London. (Eesti keeles 2001).
- Gurevich, A. (1988). *Medieval Popular Culture: Problems of Belief and Perception*. Cambridge.
- Hanawalt, B. A., Reyerson, K. L. (eds). (1994). *City and Spectacle in Medieval Europe*. Minneapolis.
- Heers, J. (1986). *Vom Mummenschanz zum Machttheater: Europäische Festkultur im Mittelalter*. Frankfurt am Main.
- Hindley, A. (ed). (1999). *Drama and Community: People and Plays in Medieval Europe*. Turnhout. (Medieval Texts and Cultures of Northern Europe; 1).
- Humphrey, C. (2001). *The Politics of Carnival: Festive Misrule in Medieval England*. Manchester.
- Hutton, R. (1996). *The Stations of the Sun: A History of the Ritual Year in Britain*. Oxford.
- Jaritz, G. (1987). *Gemeinsamkeit und Widerspruch: Spätmittelalterliche Volkskultur aus der Sicht von Eliten*. Dinzelbacher, P., Mück, H.-D. (Hrsg). *Volkskultur des europäischen Spätmittelalters*. Stuttgart, 15–33.
- Johansen, P., von zur Mühlen, H. (1973). *Deutsch und Undeutsch im mittelalterlichen und frühneuzeitlichen Reval*. Köln, Wien. (Ostmitteleuropa in Vergangenheit und Gegenwart; 15).
- Kühnel, H. (1987). *Die städtische Fasnacht im 15. Jahrhundert: Das disziplinierte und öffentlich finanzierte Volksfest*. Dinzelbacher, P., Mück, H.-D. (Hrsg). *Volkskultur des europäischen Spätmittelalters*. Stuttgart, 109–127.
- Kühnel, H. (1991). *Spätmittelalterliche Festkultur im Dienste religiöser, politischer und sozialer Ziele*. Altenburg, D., Jarnut, J., Steinhoff, H.-H. (Hrsg). *Feste und Feiern im Mittelalter*. Sigmaringen, 71–85.
- Muchembled, R. (1985). *Popular Culture and Elite Culture in France, 1400–1750*. London.
- Mänd, A. (2004). *Pidustused keskaegse Liivimaa linnades 1350–1550*. Tallinn. (Tallinna Linnaarhiivi toimetised; 7).
- Mänd, A. (2005). *Urban Carnival: Festive Culture in the Hanseatic Cities of the Eastern Baltic, 1350–1550*. Turnhout. (Medieval Texts and Cultures of Northern Europe; 8).
- Pabst, E. (1864). *Der Maigraf und seine Feste*. Reval.
- Pettitt, T., Søndergaard, L. (eds). (1994). *Custom, Culture and Community in the Later Middle Ages*. Odense.

- Redlich, F. A. (1935). *Sitte und Brauch des livländischen Kaufmanns*. Riga.
- Schultz, A. (1892). *Deutsches Leben im XIV und XV Jahrhundert*. Grosse Ausgabe. Prag.
- Scribner, R. W. (1987). *Popular Culture and Popular Movements in Reformation Germany*. London.
- Spliet, H. (1934). *Geschichte des rigischen Neuen Hauses, des später sogenannten König Artus Hofes, des heutigen Schwarzhäupterhauses*. Riga.
- Tielemann, G. (1831). *Geschichte der Schwarzen-Häupter in Riga nebst einer Beschreibung des Artushofes und seiner Denkwürdigkeiten*. Riga.
- Troels-Lund, F. (1879–1901). *Dagligt liv i Norden i det sekstende aarhundrede*. Bd. 1–14. København.
- Twycross, M. (ed). (1996). *Festive Drama: Papers from the Sixth Triennial Colloquium of the International Society for the Study of Medieval Theatre, Lancaster, 13–19 July, 1989*. Cambridge.
- Tydemann, W. (ed). (2001). *The Medieval European Stage, 500–1550*. Cambridge.
- <http://www.chass.utoronto.ca/~reed/reed.html>