EESTI VABARIIGI TEADUSPREEMIAD

2009

TALLINN, 2009

Richard Villems (vastutav toimetaja)
Riigi teaduspreemiate komisjoni esimees

Helle-Liis Help, Siiri Jakobson, Ülle Rebo
Galina Varlamova

Raamatu kujundamisel kasutati laureaatide diplomi ja medali fotot
ning kätteandmisel 23.02.2009 tehtud fotosid

ISSN 1406-2321 © EESTI TEADUSTE AKADEEMIA

EESTI VABARIIK

SISUKORD

SAATESÕNA 6

Dimitri Kaljo
teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest
OBJEKTIIVSET JA SUBJEKTIIVSET MINU TEADUSTEELT 8

Kalju Kask
teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest 24

Hillar Aben (kollektiivi juht)
Leo Ainola, Johan Anton, Andrei Errapart
teaduspreemia innovaatilise tooteni viinud väljapaistva teadus- ja arendustöö "Integraalse fotoelastsusmeetodi teooria, mõõtmis-tehnoloogia ja aparatuuri väljatöötamine ja rakendamine jääkpingete mõõtmisel klaasitööstuses" eest 40

Aleksei Šerman
teaduspreemia täppisteaduste alal uurimuste tsükli " Magnetiline ühis-mõõdutus, pseudopilud ja faaside eraldumine vaskperovskiitides" eest . 58

Ülo Langel (kollektiivi juht)
Margus Pooga, Mats Hansen, Ursel Soomets, Kalle Kilk
teaduspreemia keemia ja molekulaarbioloogia alal uurimuste tsükli "Rakusisesed märklauad" eest 72

Malle Krunks
teaduspreemia tehnikateaduste alal uurimuste tsükli " Vedeliksadestuse tehnoloogiad konkurentsivõimelisele päikeseenergeetikale " eest 86

Pärt Peterson
teaduspreemia arstiteaduse alal publikatsioonide tsükli “Tsentraalse immuuntolerantsuse molekulaarsed mehhanismid” eest 100

Meelis Pärtel
teaduspreemia geo- ja bioteaduste alal tööde tsükli “Makroökoloogilised protsessid elusloodusе mitmekesisuse mõjutajana” eest 110

Erkki Truve (kollektiivi juht)
Merike Sõmera, Cecilia Sarmiento
teaduspreemia põllumajandusteaduste alal uurimuste tsükli “Taimeviiruste ja taimede kaitsemehhanismide uurimine” eest 128

Tiiu Paas
teaduspreemia sotsiaalteaduste alal uurimuse “Regionaalsete majandusprotsesside analüüs ja modelleerimine: Eesti majandusareng ELi ja Läänemere regiooni kontekstis” eest
REGIONAALSED TULUERISUSED JA MAJANDUSKASV.
KAS TULUDE KONVERGENTS VÕI DIVERGENTS? 138

Arvo Tering
teaduspreemia humanitaarteaduste alal monograafia “Eesti-, liivi- ja kuramaalased Euroopa ülikoolides 1561–1798” eest 152

Vabariigi teaduspreemiate komisjoni koosseis 169

SAATESÕNA

Teil on käes traditsiooniline kogumik, kus laureaadid tutvustavad end ise. Kuid traditsiooniks on ka lisada lühike saatesõna. See kohus lasub preemiatekomisjoni esimehel.

Meie komisjon ei ole proaktiivne – me vaid sõelume teadusasutuste või/ja akadeemikute poolt esitatud kandidaate ja edastame oma seisukoha Vabariigi Valitsusele. Teatavasti määrab Vabariigi Valitsus teaduspreemiaid kolmes kategoorias.

Neist arvukaimad on teaduspreemiad kaheksas eri teadusvaldkonnas. Selle kategooria eripäraks on kitsendus, mille kohaselt esildis saab põhineda vaid viimase nelja aasta jooksul saavutatule. Viimase all mõistetakse esmajoones trükiseid – ilmunud artikleid ja raamatuid. Seega libistatakse iga-aastaselt üle Eesti teaduse nelja aasta laiuse raami, sõeludes silmapaistvaimat. Alul teadusasutuste ja akadeemikute poolt, siis meie komisjoni (julgeks kinnitada − vägagi töistel) koosolekutel.

Eraldi kategooriana annab valitsus kaks preemiat pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest. Ja vaadatuna komisjoni töö seisukohast näeme me siis siin vahest kõige selgemini, et Eesti teadus on juba küllalt vana selleks, et olla rikas nende poolest, kelle paljude aastakümnete pikkusele tööle teadlasena ja pea alati ka õpetajana tugineb oluline osa täna tehtavast. Mis samas üldsegi ei tähenda, et mitmedki elutööpreemiaga pärjatud ei oleks endiselt erialaselt erksad ja loovad. Sel aastal langes valik olulise üksmeelega geoloogile, akadeemik Dimitri Kaljole ja sordiaretajale, bioloogiadoktor Kalju Kasele. D. Kaljo juhtiv roll Eestile nii olulise teaduse nagu geoloogia arengus on olnud kauaaegne ja viljakas. Kuidas aga mõne sõnaga iseloomustada K. Kase saavutusi? Vahest kõige lihtsamini nii: see on mees, kelle aretatud on enam kui pooled Eesti aedades kasvavad õunapuud.

Mitte igal aastal ei ole meie komisjonil olnud võimalust teha valitsusele ettepanekut anda välja preemia eriti silmapaistva saavutuse eest teaduses ja/või tehnoloogilises innovatsioonis. Seda põhjusel, et "latt on asetatud kõrgele" ja inflatsioon ei ole ka komisjoni kõige heatahtlikuma suhtumise puhul mõeldav – statuuti on kirjutatud sisse nõue paluda kõrgetasemelist lisaarvamust (isegi arvamusi) rahvusvahelises ulatuses. Seda meeldivam oli käesolev aasta. Ja ühtlasi õpetlik. Akadeemik Hillar Aben, kelle juhitud kollektiivile Vabariigi Valitsus selle preemia määras, avaldas oma esimese teemasse puutuva rahvusvahelise monograafia aastakümnete eest. Teoreetilisest, esmajoones matemaatilisest tööst sai klaasi jääkpingeid mõõtev seade, mille viis rahvusvahelises

tööstuses vajaliku “tarbijasõbralikkuseni” omakorda koostöö juba päris noore põlvkonna inseneride-infotehnoloogidega.

Eesti teadus- ja arendustegevus jätkub, põlvkonnad kasvavad üksteisest läbi, vahelduvad. On raske leida meie kodumaises teadussaavutusi tutvustavas kirjasõnas paremaid, samaaegselt olevikku ja pikemaid perioode kokkuvõtvaid trükiseid, kui seda on (st selleks on kujunenud) seeria “Eesti Vabariigi Teadus-preemiad”.

Head lugemist.

Richard Villems
Riigi teaduspreemiate komisjoni esimees 2009

Teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest

Dimitri Kaljo

Sündinud 12.10.1928 Haapsalus

1948	Gustav Adolfi Gümnaasium
1953	Tartu Ülikool, geoloogia
1956	geoloogia-mineraloogiakandidaat, Tartu Ülikool
1977	geoloogia-mineraloogiadoktor, NSVL TA Geoloogia Instituut, Moskva
1983	Eesti Teaduste Akadeemia liige
1986	professori kutse paleontoloogia ja stratigraafia alal

Alates 1957 TA (alates 1997 TTÜ) Geoloogia Instituudi vanemteadur, teadussekretär, sektorijuhataja, teadusdirektor, direktor (1969−1989), osakonnajuhataja, vanemteadur

1990–2004	TA Bioloogia, Geoloogia ja Keemia Osakonna juhataja, juhataja kt, TA juhatuse liige, TA välissuhete koordinaator
1987	Londoni Geoloogia Seltsi auliige
1989–1996	Rahvusvahelise Paleontoloogia Liidu asepresident
1984–1992	Rahvusvahelise Stratigraafia Komisjoni Siluri alamkomisjoni esimees (liige 1975–2003)
1990	Eesti maavarade komisjoni esimees
1992	Eesti Geoloogia Rahvuskomitee esimees
2004–2008	Riikliku programmi "Humanitaar- ja loodusteaduslikud kogud" juhtkomitee esimees
1972	ENSV teaduspreemia tööde eest Eesti Siluri geoloogia alal (kollektiivi juht)
2001	Eesti teaduspreemia geo- ja bioteaduste alal (kollektiivi juht)
2002	Valgetähe IV klassi teenetemärk

Avaldanud üle 200 teadustöö.

OBJEKTIIVSET JA SUBJEKIIVSET MINU TEADUSTEELT

Pisut enam kui 50 aasta jooksul on minu tegevuseks olnud peamiselt teadustöö, kuid mitte ainult ja ajuti isegi mitte valdavalt, vaid ka palju muud. Õnneks siiski enamasti teadusega seonduv või sellest tulenev. Seetõttu jaotan järgneva ülevaate vastavateks lõikudeks, kuid alustuseks pisut sellest, kust ma tulen ja miks just teadlane.

Kasvasin praeguste arusaamade kohaselt suures peres, kus oli neli last, kolm poissi ja õde, kusjuures Margareeta ja vanem vend Leopold olid isa esimesest abielust ja minust 5–7 aastat vanemad. See asjaolu ei põhjustanud meie elus mingeid pingeid. Arstist ema ja ametnikust isa suutsid kindlustada perekonna rahuldava äraelamise ning laste koolitamise – suurte muutuste ajaks oli vanematel lastel keskharidus käeulatuses, kaks nooremat said hiljem jätkata ka ülikoolis, mina Tartus geoloogiat ja noorem Mihhail Tehnikaülikoolis mäendust.

Kuigi mõnedki asjaolud meie pere elu-olus ei ole mulle tänini päris selged, olen veendunud, et oma õppimise võimaluse eest olen peamist tänu võlgu oma emale, kes Tallinna nakkushaigla arstina suutis perekonna välja tuua 1944 aasta kahest paljaks põlemisest 9. märtsil Tallinnas ja 7. oktoobril Saaremaal.

Pärast algkooli läksin 1942 vanema venna eeskujul õppima Gustav Adolfi Gümnaasiumi ning sealses loodusteaduslikus õpilasringis (GALR) huvitusin geoloogiast. Seda võiks nimetada, kui olla pisut pateetiline, esimeseks sammuks minu teadlaseks kujunemise teel. Neid sammusid aitasid edaspidi suunata vanemad koolivennad Valdar Jaanusson (hilisem Eesti TA välisliige) ja Ralf Männil (geoloogiadoktor, TA Geoloogia Instituudis), aga ka lihtsalt kogenum klassivend Arvo Rõõmusoks (praegu TÜ emeriitprofessor) jt. Tegevus GALRis oli huvitav, katsetused "teadust teha" innustavad ja nii oli mul enne keskkooli lõppu selge, et soovin ülikooli geoloogiat õppima minna. Viimastel keskkoolis oldud aastatel kujunes Riikliku Loodusmuuseumi juurde Tallinna koolinoorte loodussõprade ringi moodi seltskond, mille ametlikku staatust ei mäletagi enam, kuid seal olid koos mitmed hilisemad tuntud loodusteadlased, nagu varalahkunud zooloog Harri Ling, akadeemik Erast Parmasto ja äsja samuti elutöö preemiaga pärjatud sordiaretaja Kalju Kask. See praegune kokkusattumine temaga oli sedavõrd rõõmustav, et pani mõtlema sümbolitele.

Ülikooliõpingute aeg (5+3 aastat aspirantuuri), mis jagunes stalinistliku ja läheneva sulaaja perioodi vahel, oli komplitseeritud ja väärt eraldi meenutusi, kuid käesoleva teema jaoks on oluline rõhutada, et õpingud väga koduses ja teaduslembeses TÜ geoloogia osakonnas olid ülimalt meeldivad ja innustavad. Osakonnas oli mitmeid meeldejäävaid õppejõudusid, nagu minu kandidaaditöö juhendaja dotsent Evald Möls jt, kuid peamist rolli mängis professor Karl Orviku, akadeemik ja hilisem TA Geoloogia Instituudi direktor. Ta oli karm mees, kuid samal ajal äärmiselt hooliv ja oskuslik osakonnas soodsa tööõhkkonna loomisel. Ta innustas üliõpilasi omaalgatuslikule tegevusele ning see aitas meil üle olla sellele ajajärgule omasest poliitilisest ja majanduslikust surutisest. Ülikooli lõputöö kirjutasin Eesti Ordoviitsiumi tetrakorallidest. Samateemalise (eesti keeles kirjutatud!) kandidaadiväitekirja kaitsesin kolm aastat hiljem oktoobris 1956, kuid diplomi sain Moskva VAKist alles 1957. a mais. Sellega oli õpingute aeg nii-ütelda ametlikult lõppenud, kuigi juba sügissemestri algusest olin kateedris tööl, lugedes doktorantuuri läinud A. Rõõmusoksa asemel paari erialalt mulle lähedasemat kursust ning Evald Mustjõe asemel maavarade õpetust, mis oli omaette pähkliks. Õnneks kutsus akadeemik Orviku mind peagi TA Geoloogia Instituuti, esialgu küll teadussekretäriks, kuid ometi sai veebruar 1957 minu eluloos eeskätt teadusele pühendatud perioodi alguseks. See ajajärk on nüüd kestnud kindlasti juba üle viiekümne aasta, kui palju just, sõltub sellest, kas aspirant tegi teadustööd või oli see õppetöö osa. See dilemma on ka tänapäeval olemas, kui öeldakse "doktoriõpe", aga käibefraasiks on, et "suur osa uutest teadustulemustest on PhD tudengite saavutatud".

TEADUSTÖÖ PEAMISTEST SUUNDADEST

PALEONTOLOOGIA

Minu uurimistöö sisu ja meetodid teisenesid järk-järgult. Tartu Ülikoolis, arutades professoriga tulevase diplomitöö temaatikat peeti muidugi silmas üliõpilase huvisid (kui neid oli), kuid samas ka vajadust mõnda sööti jäänud teemat uurimise alla võtta ja enamasti ikka pikema perspektiiviga. Nii oli ka minuga kui alustasin Ordoviitsiumi ja hiljem Siluri tetrakorallide paleontoloogilist uurimist, sest seda paleosoilist loomarühma oli Eestis viimati tõsiselt uurinud 1873/74 ilmunud monograafiat koostades Tartu Ülikooli maailmakuulus poolakast õppejõud Wladislaw Dybowski. Kui noor uurija saavutab teatud taseme, alles siis muutub uuringute suunamisel üha olulisemaks geoteaduse üldiste arengutendentside arvestamine ja uudsete meetodite rakendamine. Minu kandidaadidissertatsioon oli traditsiooniline paleontoloogiline monograafia, mille eesmärgiks oli kirjeldada Eesti Ordoviitsiumi ja Siluri lademete paljanditest leitud iidsete tetrakorallide (= rugooside) kivistisi, selgitada selle loomarühma arengulugu ja stratigraafilist levikut. Viimase kaudu sain pakkuda ka võimalikke kasutusi praktilise geoloogia jaoks, nagu on kaardistamine või maavarade otsingud.

Väitekirjas ja selle materjali alusel avaldatud artiklites kirjeldasin rea uusi liike ja perekondi, millest siin mainiksin ainsana *Primitophyllum primum*'it Haljala lademest. Nagu nimigi ütleb on tegemist väga primitiivse ehitusega koralliga (sõrmkübara-mõõtu koonusjas karikas, milles harvad ogajad vaheseinte alged), mille esialgsel uurimisel ma adusin küll tema varast positsiooni *Rugosa* sugupuus, kuid sel ajal oli teada ka vanemaid rugooside leide Põhja Ameerika Keskordoviitsiumist. Hiljem on selgunud, et niisugused teated on olnud kas väärad või kahtlased ja nii on meie *Primitophyllum* osutunud oluliseks vormiks tetrakorallide evolutsiooni selgitamisel. Selle taksoni püstitasin Moskvas ilmunud kogumikus [Кальо, 1956], teine kaitsmiseks vajalik artikkel ilmus umbes samal ajal TA GI Uurimuste I köites (vahemärkusena olude kohta: 1956 on ligi kümme aastat töötanud instituudi töötulemuste esimese köite jaoks väga hilja, kuid põhjus polnud võimetuses, vaid geoloogiat kammitsenud salastamise maanias). Need ja järgmised minu teadusartiklid ilmusid vene keeles, kuid ka sellistena jõudis nende sisu mingil moel huvitatud kolleegideni. Ühte sellist teed demonstreeris mulle aastaid hiljem rootslane B. E. Neuman, näidates minu vanade artiklite tõlkeid. Esimene artikkel inglise keeles ilmus 1965. a, kui avaldasime koos Einar Klaamanniga (minu esimene aspirant) meilt tellitud uurimuse Põhja-Iirimaa korallide kohta [Kaljo, Klaamann, 1965]. See töö osutus raskemaks kui oskasime karta. Olime Eestis harjunud suurepäraselt säilinud kivististega, kus oli võimalik õhikute seeriate abil uurida skeleti üksikasju, ontogeneesi (isendiarengut) ja selle seoseid fülogeneesiga (suguvõsalooga). Iirimaalt saabunud materjaliks oli kivimist keemiliselt välja lahustatud ülihaprad ränistunud skeletid, mida uurides tundsime ennast Dybowski-eelse ajastu paleontoloogidena, kes said teha vaid väliseid vaatlusi ja

paremal juhul tõlgendada karika põhjas nähtavaid septe. Hakkama siiski saime ja suutsime paigutada kirjeldatud rugooside ja tabulaatide koosluse tema loogilisele kohale biostratigraafilises ajaskaalas, mis meie terminites vastab umbes Pirgu ea algusele.

Koralliuuringute järgmises faasis huvitusin paleobiogeograafiast, algul võrdlus Norraga, siis kogu NSVL Ordoviitsiumi ja Siluri rugooside leviku käsitlus, mille esitasin 1. Fossiilsete korallide uurimis-alasel sümpoosiumil Novosibirskis [1963; Кальо, 1965] ja siis kirjutasime kolleegide E. Klaamanni ja Heldur Nestoriga Tallinna sümpoosioni jaoks [1967; Кальо и др, 1970] globaalse paleobiogeograafilise ülevaate kõigi selle vanusega korallide ja stromatopooride kohta. Märgin siin nii esitamise aastad kui ka vastavate trükiste ilmumise aastad, sest see oli aeg, mil algas A. Wegeneri mandrite triivi teooria renessanss ja laamtektoonika areng, mis muutsid paleobiogeograafilise andmestiku väga väärtuslikuks mandrite triivi põhjendamisel. Seepärast ei olnud ka üllatuseks, et Elsevier andis välja paleobiogeograafilise atlase ja meilt telliti sinna ülevaade korallide kohta [Kaljo, Klaamann, 1973]. Üllatav oli ainult, et pidime levikut näitama tänapäevasel mandrite paiknemise kaardil, millele joonistasime kõvera ekvaatori ja näitasime kontuuriga tänaste mandrite kuulumist Gondwanasse jt. Analüüsinud korallifaunade taksonoomilist koosseisu perekondade tasemel maailma erinevate piirkondade meredes, tõstsime me esile erinevusi ja sarnasusi, näitasime kosmopoliitsetsete, vähem levinud ja endeemiliste taksonite rolli faunas ning kokkuvõttes esitasime biogeograafilise rajoneeringu olulisemate ajajärkude kaupa. Meie skeemid reprodutseeriti mõne aasta pärast käsiraamatu Treatise on Invertebrate Paleontology korallide köites [Hill, 1981]. Hiljem pöördusin veel kord tagasi mobilismi ja paleobiogeograafia juurde Üleliidulise Paleontoloogia Seltsi spetsiaalsel aastakoosolekul 1975. a Leningradis, kus demonstreerisin mandrite paiknemise, organismide leviku (zoogeograafiliste provintside) ja kliimavööndite seoste loogikat lähtudes mandrite triivi paradigmast [Кальо, 1981].

STRATIGRAAFIA

Olles TA Geoloogia Instituudi sektorijuhataja (1959–1965) formeerisin mõne aastaga uurimisgrupi, mille ülesandeks sai seni suhteliselt halvasti tundma õpitud Eesti ja teisel etapil Baltimaade Siluri kompleksne uurimine. Tulemuseks oli rida monograafiaid (E. Jürgensoni Llandovery litoloogia, E. Klaamanni tabulaadid, H. Nestori stromtopoorid, M. Rubeli brahhiopoodid ja L. Sarve ostrakoodid) ning eredaks teetähiseks kujunes kokkuvõttev raamat "Eesti Silur" [Кальо, ред., 1970], mis koos muude publikatsioonidega leidis hindamist ENSV teaduspreemiaga. Sellest uurimisteemast kasvas välja minu teine uurimistegevuse valdkond, mis oli valdav paarkümmend aastat ja südamelähedane praegugi. Seda on nimetatud minu teadustöö erinevate stratigraafiate perioodiks, mil palju tähelepanu pöörati biostratigraafiale (graptoliitide-alased tööd), öko- ja sündmustratigraafiale, aga samuti basseini arengu fatsiaalsetele

seaduspärasustele, mis kõik olid suunatud kõrgtäpsusega stratigraafia metoodilise arsenali uuendamisele ja tõhustamisele.

Mida siis ikkagi niisugune stratigraafiate rägastik tähendab ja kas sel terminoloogial on ka reaalne sisu ja mõte. Viimane kindlasti, kas või ainult selleks, et teadust rahastavad fondid ja nõukogud saaksid kergemini aru, et tegemist ei ole mingi "klassikalise" (loe rahastamist mitte vääriva), vaid "uudse" uurimissuunaga. Ja see võte töötas(b) kogu maailmas, idas ja läänes, praegusest Eestist rääkimata. Stratigraafia kui õpetuse maakoore kihtide ruumilistest ja vanuselistest suhetest üheks aluseks on väga lihtne Steno printsiip – normaalse lasumuse korral on alumine kiht vanem kui ülemine ning klassikaks ajalistele erinevustele tuginev kronostratigraafia, kivimilisi tunnuseid kasutav litostratigraafia ning kivististe abil läbilõikeid liigestav ja rööbistav biostratigraafia. Ülalpool mainitud uutest, kuigi neid on palju rohkem, jõudis ökostratigraafia hoogsasse käibesse 1973. aastal, kui Rahvusvaheline Geoloogilise Korrelatsiooni Programm (IGCP) kinnitas samanimelise projekti professor A. J. Boucot (USA) juhtimisel. NSV Liidus juhtis töögruppi akadeemik B. S. Sokolov (Moskva; 95, kuid tegus) ja minul oli au olla tema asetäitja.

Aastatel 1960−1961 puuris TA Geoloogia Instituudi puurmeeskond Ohesaares Saaremaal sügava puuraugu, mis läbis kogu Siluri.
Fotol vasakult: insener Juhan Muru (puurimistööde juht), geoloog Endel Rähni, autor ja puurija Ülo Erin.

Ökostratigraafia idee tugines tõdemusele, et iga organism vajas eluks teatud tingimusi (geoloogias on selleks käibel termin faatsies), seega erinevus fossiilide koosluses ei pruugi olla ajaline erinevus, vaid ökoloogiast tingitud. Ja siit edasi rida muid keerukusi. Viimased ei leidnudki väga selgeid lahendusi, vähemalt paljudel juhtudel, ning termini kasutus on hakanud kahanema. Minu panus ökostratigraafiasse seisneb terves reas kirjutistes. Siin märgin neist ainult ühte Gotlandil peetud ettekande publitseeringut [Kaljo, 1982] ja oma doktoritööd "Baltimaade Siluri stratigraafia (ökostratigraafilise analüüsi katse)", mille kaitsmisel detsembris 1977 NSVL TA Geoloogia Instituudis oli päris palju tegemist paari skeptikust professoriga. Kuigi kraadi saamine tunnistas minu vaadete kasuks, olen siiski tagantjärele nõus, et ökostratigraafiline analüüs, kus kivististe levikut hinnati ümbriskivimi fatsiaalsete erinevuste foonil, on väga töömahukas. Täna aitavad lihtsamini edasi süsiniku isotoobid, aga sellest alamal.

Sündmusstratigraafia kui IGCP projekt oli eelmise jätk ning on olemuselt veelgi lähemal klassikalisele stratigraafiale. Ideeks on välja eraldada geoloogilises ajaloos teatud sündmused (näiteks tektoonikast tingitud kihtide põikne lasumus, vulkaanilise tuha vahekihid, kivimite koostise muutustena nähtavad ookeani veetaseme järsud tõusud või langused, jäätumise tunnused jne), mis võiksid geoloogiliste korrelatsioonide ja dateerimiste puhul olla geoloogilise aja reeperiteks. Tegelikult ju 19. sajandi geoloogia kuldaja klassikud põhimõtteliselt nii ka töötasid, kui kujundati tänini töötav geoloogiline ajaskaala, vaid terminoloogia oli erinev. 1984. a alanud IGCP projekt oli pealkirjastatud "Globaalsed bioloogilised sündmused Maa ajaloos" ja kontsentreerus biosele, kuid väljasuremiste, õitsengute jm põhjustena figureerisid ülalloetletud geoloogilised sündmused, kaasa arvatud kosmilise tagapõhjaga asjaolud. Viimased tegi üldtuntuks Alvarez jt [1980] kirjutis, mille järgi hiiglasliku boliidi langemine Yucatani poolsaarele Kriidi ja Triiase ajastu piiril põhjustas bioloogilise katastroofi, sh sauruste väljasuremise. Raup ja Sepkoski [1984] järeldasid suure massi taksonite ilmumiste-kadumiste analüüsist, et biomitmekesisuse muutumises eksisteerivad 26 Ma (miljoni aasta) pikkused tsüklid, mis päädivad massiliste väljasuremistega. Viidatakse ka seosele Milankovitchi tsüklitega.

Seda rahvusvahelist projekti juhtis professor O. H. Walliser (Göttingen) ja siinmail jätkus tegevus endiste juhtide eestvedamisel, vaid selle erinevusega, et minu ülesandeks sai ka Siluri kohta rahvusvahelise grupi kokkuvõtte koostamine. Seda ma ka tegin, kulutades üsna palju energiat ja närve 12-liikmelise seltskonna üksmeeles hoidmisele. Kahjuks nii mõnigi mees ei soovinud arvestada teisi ja nii pidin ka ühe mehe kaastööst loobuma ja teisele seletama, et see on Rahvusvahelise geoloogialiidu publikatsioon, milles tuleb kasutada rahvusvahelist terminoloogiat. Lõpuks tuli siiski välja päris asjalik ja eritahuline Siluri biosündmuste kokkuvõte [Kaljo jt, 1995], mis kummutas varem käibel olnud arvamuse, et Siluri ajastu oli kõrge veeseisu ja ühetaoliste kosmopoliit-

sete biokooslustega nii-ütelda vaikne periood, mil õieti midagi ei juhtunud. Uurimus tuvastas terve rea biosündmusi (15), neist kolm kõrget järku globaalset väljasuremist, mis elimineerisid suure hulga liike, perekondi jt taksoneid Wenlocki alguses ja lõpus ning Ludlow lõpus. Täheldati ka kolme suuremat mitmekesisuse kiire kasvu perioodi, neist esimene ja kolmas järgnesid pärast väikest pausi Ordoviitsiumi ja Wenlocki lõpu suurtele väljasuremistele. Need n-ü taastumised polnud siiski täielikud ja Siluri ajastu viimane kolmandik tähistas teatud allakäiku, kuid mitte kadu, sest Devon ja Karbon näitasid uute rühmade õitsengut.

Tollase ülevaate kirjutamise ajaks olid Siluri isotoopuuringud esindatud vaid ühe väga esialgse tööga, kuid see oli ikkagi huvitav ning mul õnnestus need autorid kaastööle kutsuda. Järgnevad isotoopuuringud, milles ma ka ise osalesin, näitasid piisavat korrelatsiooni bio- ja isotoopsündmuste vahel ning tõestasid Siluri ajastu keskkonna dünaamilisust. Eitamata kosmiliste faktorite rolli, sealhulgas ka boliidide jt taevakehade langemise mõju elu arengule Maal, näitas läbiviidud uuring päris head korrelatsiooni biomitmekesisuse ja tavaliste maiste faktorite (veetaseme kõikumine, jäätumine, kliima jne) muutuste vahel. Selles kontekstis tuleb esiplaanile pikaajaliste kosmiliste ja maiste geoloogiliste protsesside tsüklilisuse koosmõju, mitte sedavõrd juhuslike impaktide roll.

Eesti TA Geoloogia Instituut osales biosündmuste projektis mitmel moel, sh ülalmainitud kokkuvõttes biomitmekesisuse analüüsimisel Tiiu Märss (kalad, lõuatud), Viiu Nestor (kitiinikud) ning Peep Männik ja Viive Viira (konodandid). Peale selle tehti suur töö H. Nestori juhtimisel Ordoviitsiumi lõpul aset leidnud massilise väljasuremise anatoomia selgitamisel Eesti materjali alusel. Selleks selgitati viie lademele vastava ajalõigu kaupa biomitmekesisuse dünaamikat, muutuste määra ja tasemeid 8 faunarühmas [Нестор и др, 1991], mis koos litoloogiliste ja muude geoloogiliste andmetega [Kaljo jt, 1988, Кальо и др, 1991] annavad üsna ammendava iseloomustuse Gondwana superkontinendil toimunud suure Hirnantia jäätumise kajastustele Ordoviitsiumi lõpu-Siluri alguse keskkonna ja eriti orgaanilise maailma arengus ka meie palju madalamatel laiustel.

Globaalsete biosündmuste projekt muutus kiiresti tähelepanuväärseks kahel põhjusel: esiteks nähti selles väljasuremiste rõhutamise tõttu 19. sajandi alguses G. Cuvier jt toel valitsenud katastrofismi uuestisündi, ja teiseks, seose tõttu tänapäevaga, kus igapäevane liikide kadumine on saavutanud varasemate massiliste väljasuremiste ulatuse. Looduse saastamisega tuleb loomulikult võidelda, kuid sellest üksi on vähe. CO_2 emissiooni ümber toimuvast kemplusest võib näha, et inimkond ei ole eriti aldis õppima varasemate aegade kogemustest.

Peale eespool käsitletud spetsiifiliste stratigraafiate, mille eesmärgiks on meetodi arendus ja uute efektiivsemate võimaluste esiletoomine, on olemas ka nn praktiline stratigraafia, mis on rakendusgeoloogi igapäevaste uuringute

teenistuses. See on tavaliselt kombinatsioon krono-, lito- ja biostratigraafiast, mis on väljendatud teatud piirkonna kohta koostatud stratigraafilise skeemina. Suuremate alade puhul, nagu Eesti, Baltimaad, kontinent jne, on seal ka globaalse standardskeemi tulp ning sellega korreleeritud eriilmeliste alamregioonide ja naaberalade skeemid. Kuivõrd paljude, eriti regionaalsete geoloogiliste uuringute ja geoloogiliste kaartide sisu sõltub suurel määral stratigraafia adekvaatsusest, siis on stratigraafiline skeem tõsine asi, mille koostamist on alati saatnud ägedad debatid, kuid vastav komisjon püüab leida parimat lahendust. Eesti stratigraafia komisjon (ESK) loodi 1969. a Balti komisjoni osana, mis alates 1990. a on iseseisev organ ja töötab Eesti Geoloogia Seltsi juures ning meie peamiste geoloogiaasutuste volitusel. Mina juhtisin ESKi tööd 1981–2005 ja sellesse perioodi jääb 2 skeemide uuendamist − esimene 1984 (skeemid ja seletuskiri avaldati 1987) ja 1996. a eelmiste uuendus, mida kasutati monograafia "Geology and mineral resources of Estonia" [Raukas, Teedumäe, 1997] koostamisel ja on mõne väiksema muudatusega käibel ka praegu, kuigi uus revideering-moderniseering oleks juba vajalik.

ISOTOOPUURINGUD

Eespool juba viitasin isotoopide kasutamisele geoloogia probleemide lahendamisel. Olen sellesse ainevalda süvenenud alates 1990ndate algupoolest. Esimene avalik esinemine oli 1994 ja esimene toekam publikatsioon sellel teemal kolm aastat hiljem [Kaljo jt, 1997]. Praeguseks on neid juba üle tosina, mis lubab ka mõningase kokkuvõtte teha. Täpsustan kohe alguses, et olen tegelenud nende küsimustega pidevas koostöös suurte kogemustega analüütiku Tõnu Martmaga, kes meie temaatika raames kaitses ka oma doktoritöö 2006. a (kaasjuhendaja professor Rein Vaikmäe). Kuid koostööd on tehtud paljude TTÜ, TÜ ja Eesti Geoloogiakeskuse geoloogidega, aga samuti rea välismaiste kolleegidega, eesotsas P. J. Brenchley ja J. D. Marshalliga (Liverpool). Detailsemalt on kõik nimed näha kirjanduse loetelus.

Süsiniku ringkäik on ülioluline looduslik protsess, mis mõjutab paljusid seotud nähtusi. Algul vaba CO_2 seotakse organismide poolt mitmesugusteks C_{org} ühenditeks, mis hiljem elutegevuse käigus uuesti lagunevad ja vabanev CO_2 alustab uut ringi. See nn väike ring on üsna lühiajaline. Samas võib osa C_{org} mattuda setteisse, moodustada koos muu süsinikuga karbonaate ning nii säilides jääda ka miljoniteks aastateks käibest välja, kuid mitte lõplikult. Kivimite murenemisel, fossiilkütuste põletamisel jne see süsinik vabaneb dioksiidina ning läheb uuele C ringkäigu tuurile. Selle väga üldise skeemi resultaati mõjutavad erinevad ookeanides toimivad looduslikud tegurid (klimaatilised, okeanoloogilised, keemilised, biootilised jne), mistõttu merevees oleva süsiniku isotoopkoostis võib teatud protsessides olla piisavalt stabiilne, kuid erinevail tingimusil teiseneda lühemaks või pikemaks ajaks. Kuivõrd merepõhja kuhjuv sete ja veeelanike skelett on tavaliselt keemiliselt tasakaalus merevee koostisega, siis settekivimite karbonaadid ja organismide kodades olev kaltsiit on usaldatavad materjalid isotoopkoostise massispektromeetriliseks uurimiseks. Süsinikul on

kaks stabiilset isotoopi – kerge (^{12}C) ja raske (^{13}C), kusjuures esimest on ~99%, teist ~1%. See suhe on looduses laias laastus püsiv, kuid seda enam on kõnekad väikesedki suhte anomaaliad. Nendega opereerimiseks arvutatakse vastava valemi abil tunnusarv $\delta^{13}C$, mis üldiselt öeldes tähendab uuritava proovi $^{13}C/^{12}C$ suhte hinnangut rahvusvahelise standardi suhtes. Orgaanikarikastes kivimites on $\delta^{13}C$ keskmiselt −25‰, karbonaatsetes kivimites 0‰ lähedal.

Piirdudes ülaltoodud selgitusega meetodi kohta vaatleme järgnevalt ka mõnda meie isotoopuuringute tulemust. Arvestades meetodi võimalusi ja muidugi ka minu seniste projektide huvisid, oli esiplaanil bio- ja kemostratigraafia koostöö läbilõigete liigestamisel ja dateerimisel, aga samuti erifatsiaalsete kivimite rööbistamisel (mis on geoloogia komplitseeritumaid probleeme) ning nende tekketingimuste selgitamisel $\delta^{13}C$ trendi kaasabil. Selleks oli esmalt vaja koostada võimalikult täielik ja usaldusväärne nn standardtrend, mida saaks kasutada etalonina, Enamus reaalseid läbilõikeid, näiteks puursüdamikud, on lünklikud, mitte puurimistöö praagi tõttu, mida ka juhtub, vaid lünkade tõttu setteprotsessis, või tingituna hilisemast kulutusest. Seepärast seadsime nõudeks, et iga anomaalia peab olema identifitseeritud vähemalt kahes läbilõikes. Ordoviitsiumi isotoopuuringud [Kaljo jt, 2004, 2007] andsidki kokkuvõttes usaldusväärse tüüpkõvera, kuid ilma Alam-Ordoviitsiumita, osalt tingitud liivakividest, milles kaltsiiti liiga vähe. Seevastu rohkesti töötati Ordoviitsiumi lõpus Hirnantia jääaja ja massilise väljasuremise uurimisel, eriti koostöös Liverpooli kolleegidega. Üldistavalt võib nentida, et Ordoviitsiumi varasemas pooles umbes 20 mln aasta vältel oli süsiniku trendi varieeruvus väga tagasihoidlik, tuvastatud on vaid üks alla keskmise hälve (1,9‰, vanus 463 Ma). Alates Kesk-Caradoci tipust (1,9‰, 454 Ma) algab intensiivsete muutuste aeg kestusega 11 mln a, mil $\delta^{13}C$ hälvete intensiivsus pidevalt kasvab. Selles vahemikus on tuvastatud 6 hälvet keskmiselt iga 2 mln a järel ning lõpuks võimsaim Porkuni (Hirnantia) lademes (6,7‰, 445 Ma). Ülalmärgitud suure grupi Eesti ja Briti uurijate ühisartikkel [Brenchley jt, 2003] sai oluliseks teetähiseks, sidudes ühtseks motiveeritud tervikuks Hirnantia globaalse sündmuse erinevad aspektid – kliima jahenemise ja uue soojenemise, mandrijää kuhjumise ja sulamise, ookeani veetaseme languse ja uue tõusu ning nendega seotud organismide kaks suurt väljasuremise juhtumit, üks perioodi alguses ja teine veetaseme tõusu ja kliima soojenemise alguses. Kõigi nende ja muudegi tegurite (näiteks mere regressioonile kaasnev kivimite murenemise ja erosiooni kasv) koosmõju põhjustas ka väga iseloomuliku ja suure $\delta^{13}C$ hälbe, mille tõlgendamine ja dateerimine annab vajaliku aluse protsesside mõistmiseks. Sedavõrd komplitseeritud sündmuste-protsesside kompleks vajab väga korrektset ajalise järgnevuse tuvastamist, mille täiendavale uurimisele oli pühendatud meie hiljutine artikkel [Kaljo jt, 2008], mis oli mõeldud paari väärtõlgenduse korrigeerimiseks ja ka selle kordamiseks, et Hilis-Ordoviitsiumi organismide intensiivne väljasuremine algas varem kui Hirnantia jääaeg, st nende sündmuste algtõuget tuleb otsida palju varasemast ajast.

Siluri kemostratigraafiline tüüpkõver [Kaljo jt, 1997, 1998; Kaljo, Martma, 2000] on üldjoontes sarnane Ordoviitsiumi trendile – algul 17 mln a kohta ainult kaks keskmise suurusega $\delta^{13}C$ hälvet, seejärel 8-9 mln a sees kaks suurt ja viimasena üks väga suur hälve, mis on dateeritud Ludlow lõppu (vanus 420 Ma) ja Leedus Vidukle läbilõikes ulatub tipu väärtus 8,2‰ [Martma jt, 2005].

Kokku võttes isotoopgeoloogia lõiku ja üldse oma teaduslikke püüdlusi, pean tunnistama, et mind väga üllatas tehtud tähelepanek kahe järjestikulise ajastu $\delta^{13}C$ trendide tsüklilisuse suur sarnasus – pikk vaikne algus ja viimane kolmandik ajast järjest enam muutlik, mõlema tsükli lõpus suurim hälve. Lisaks on noorema tsükli hälbed 1-2‰ suuremad kui varasemal. Olemasolevad mudelid selgitavad rohkem või vähem usutavalt, kuidas hälbed tekivad, keegi pole selgitanud, miks on hälvete teke, õigem oleks ütelda, miks keskkonna areng on just selliselt tsükliline, kus muutuste intensiivsus kasvab nii tsükli piires kui nende järgnevuses. Ütelda, et looduse areng ongi tsükliline, tähendab mitte midagi ütelda, kuid ma tahan nende küsimuste üle veel mõnda aega mõtelda.

Alguses ma konstateerisin, et minu elu teaduses ei olnud ainult teadus. Seepärast mõned lõigud minu erinevatest ettevõtmistest, kus objektiivsele teabele on lisatud mõned subjektiivsed hinnangud.

TEADUS-ORGANISATSIOONILISE TÖÖ

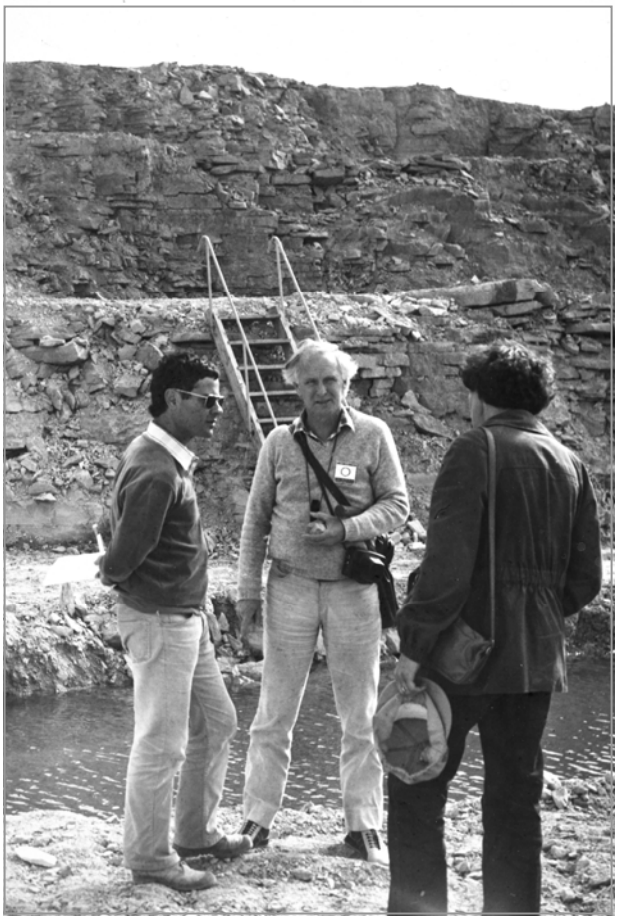
Peamiseks tegevusväljaks oli mul Eesti Teaduste Akadeemia, sh 21 aastat TA Geoloogia Instituudi direktorina ja 14 aastat TA juhatuses. Muidugi mitte ainult direktori jõupingutuste viljana, kuid julgen siiski nentida, et instituudi positsioon ja maine nii Baltimaades kui terves NSV Liidus ja Põhja Euroopas oli päris hea. Selle peamiseks tõukejõuks olid instituudi noor initsiatiivikas kollektiiv ning hea töö-õhkkond. Teiseks suureks väljakutseks oli mulle teadustöö praktilise väljundi tagamine. Olles ise teadushuvidelt veendunud alusuuringute mees, mõistsin ma siiski väga hästi alus- ja rakendusuuringute seostamise vajadust. Selleks arendati instituudis hüdro- ja meregeoloogiat ning loodi maavarade geoloogia sektor ülesandega kaasa aidata maavarade ratsionaalsele ja keskkonnaohutule kasutamisele. Siis lõppesid ära NSVL rahad ja rootslaste evalveering tunnistas GI (loe minu) poliitika valeks. Siiski olen täni-ni endisel seisukohal – teaduse praktilise väljundi tõhustamist on vaja toetada organisatsiooniliste meetmetega ka akadeemilises asutuses.

Aastatel 1990–2004 olin ma peamiselt pühendunud Eesti Teaduste Akadeemiale Bioloogia, Geoloogia ja Keemia Osakonna juhataja ning TA juhatuse liikmena, kelle ülesandeks oli ka välissuhtluse koordineerimine, eriti akadeemilise välisvahetuse juhtimine. TAs tehtust pean olulisimaks peasekretär Udo Margna juhtimisel toimunud TA uue põhikirja koostamist. Selge, et iga dokument on oma aja nägu, kuid kõnealune suutis muutusi teha väärika tasakaalukusega. BGKO algatustest, milles ka minul oli oma roll, pean olulisemaks nn kogude programmi ettepanekut, mis 2004. a rakendus ellu riikliku programmi-

na ning mille kaudu rahastati HTM haldusalas olevate humanitaar- ja loodusteaduslike kogude säilitamist ja arendamist kuni 2008. aastani, alates käesolevast aastast eelarveliselt. Paljude kogude areng on olnud nende aastate jooksul silmapaistev.

MUU ORGANISATOORNE JA NÕUSTAV TEGEVUS

Olulist tähtsust maavarade säästliku kasutamise korraldamisel ning vastava tööstuse mõistliku arendamise tagamisel omab Eesti Maavarade Komisjon, mille juhtimisele olen palju aega ja vaeva pühendanud alates komisjoni loomisest 1990. a. See ei ole akadeemiline tegevus, kuid haakub eespool käsitletud maavarade ja praktilise väljundi arutlusega. Viimastel aastatel on see töölõik kujunenud eriti komplitseerituks ja vastutusrikkaks, sest maavarade kasutamine, mis üha laieneb, leiab rahva hulgas piirkonniti suurt vastuseisu. Olen sellest kirjutanud ka paar korda TA aastaraamatus, kuid populismi ja ebakompetentsuse vohamine on suur eitav jõud.



Rahvusvahelise geoloogiakongressi 22. sessioon toimus 1984 a augustis Moskvas, kaks ekskursiooni Eestis. Olin aluspõhjaekskursiooni üks juhtidest, pildil koos Iisreali ja Venemaa esindajaga Anelema karjääris.

Minu panuse sisust Eesti ja Balti stratigraafilise teenistuse korraldamisel oli eespool juttu, võin vaid konstateerida, et töö vastavate komisjonide liikme ja esimehena ligi 40 aasta jooksul pakkus nii vaeva kui rahuldust tehtust. Selle lausega haakub ka minu mitmekesine rahvusvaheline koostöö, mis suures osas oli seotud stratigraafia-alaste erinevate komisjonidega ning on piisavalt kajastatud eluloolistes andmetes preambulas ja ka teadusele pühendatud peatükis.

Kokkuvõtteks tahan esile tuua, et mul on olnud õnne kõigi nende aastate ja erinevate tegemiste juures tegutseda nii kodu- kui välismaal koos paljude heatahtlike ja abivalmis inimestega, siinses loos sain ainult mõnda nimetada, kuid nende rolli hinnates olen täiesti veendunud, et ilma nende, sh minu abikaasa, toetuseta ma poleks suutnud teha seda, mida ma suutsin ja mida nüüd preemiaga väärtustati. Ma teen sellest loost järelduse – inimesed meie ümber on suures enamuses toredad! Ma ei arva, et see on suur uudis.

VIIDATUD ALLIKAD:

Alvarez, L., Alvarez, W., Asaro, F., Michel, H. (1980). Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. Science, 208, 1095-1108.

Brenchley, P. J., Carden, G. A., Hints, L., Kaljo, D., Marshall, J. D., Martma, T., Meidla, T., Nõlvak, J. (2003). High resolution isotope stratigraphy of Late Ordovician sequences: constraints on the timing of bio-events and environmental changes associated with mass extinction and glaciation. Geol. Soc. Am. Bulletin, 115, 89-104.

Hill, D. (1981). Rugosa and Tabulata. Teichert, C. (ed). Treat. Invert. Paleontol., F, suppl. 1, 2, F379- F762.

Kaljo, D. (1982). Ecostratigraphy – some aspects from East Baltic practice. Kaljo, D., Klaamann, E. (eds). Ecostratigraphy of the East Baltic Silurian. Valgus, Tallinn, 9-16.

Kaljo, D., Boucot, A. I., Corfield, R. M., Herisse, Le A., Koren, T. N., Kriz, J., Männik, P., Märss, T., Nestor, V., Shaver, R. H., Siveter, D. J., Viira, V. (1995). Silurian bio-events. Walliser, O. H. (ed). Global Events and Event Stratigraphy in the Phanerozoic. Springer, 173-224.

Kaljo, D., Hints, L., Martma, T., Nõlvak, J., Oraspõld, A. (2004). Late Ordovician carbon isotope trend in Estonia, its significance in stratigraphy and environmental analysis. Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol., 210, 165-185.

Kaljo, D., Hints, L., Männik, P., Nõlvak, J. (2008). Succession of Hirnantian events based on data from Baltica: brachiopods, chitinozoans, conodonts and carbon isotopes. Estonian Journal of Earth Sciences, 57, 197-218.

Kaljo, D., Kiipli, T., Martma, T. (1997). Carbon isotope event markers through the Wenlock-Pridoli sequence in Ohesaare (Estonia) and Priekule (Latvia). Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol., 132, 211-224.

Kaljo, D., Kiipli, T., Martma, T. (1998). Correlation of carbon isotope events and environmental cyclicity in the East Baltic Silurian. Landing, E., Johnson, M. E. (eds). Silurian cycles – linkages of dynamic stratigraphy with atmospheric, oceanic and tectonic changes. New York, 297-312. (New York State Museum Bulletin; 491).

Kaljo, D., Klaamann, E. (1965). The fauna of the Portrane limestone. 3, The corals. Bull. British Mus. (Nat. Hist.), Geol. 10, 413-434.

Kaljo, D., Klaamann, E. (1973). Ordovician and Silurian corals. Hallam, A. (ed). Atlas of Palaeobiogeography. Elsevier, Amsterdam, 37-45.

Kaljo, D., Martma, T. (2000). Carbon isotopic composition of Llandovery rocks (East Baltic Silurian) with enviromental interpretetion. Proc. Estonian Acad. Sci. Geol., 49, 267-283.

Kaljo, D., Martma, T., Saadre, T. (2007). Post-Hunnebergian Ordovician carbon isotope trend in Baltoscandia, its environmental implications and some similarities with that of Nevada. Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol., 245, 138-155.

Kaljo, D., Nestor, H., Põlma, L. (1988). East Baltic Region. Global Analysis of the Ordovician/Silurian Boundary. London, 85-91. (Bulletin of the British Museum. Natural History. Geol.; 43).

Martma, T., Brazauskas, A., Kaljo, D., Kaminskas, D., Musteikis, P. (2005). The Wenlock – Ludlow carbon isotope trend in the Vidukle core, Lithuania, and its relations with oceanic events. Geol. Quart., 49, 223-234.

Raukas, A., Teedumäe, A., toim. (1997). Geology and mineral resources of Estonia. Estonian Academy Publishers, Tallinn, 436 pp.

Raup, D. M., Sepkoski, J. J. (1984). Periodicity of Extinctions in the geologic Past. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 81, 801-805.

Кальо Д. Л. (1981). Биогеография и климатическая зональность силура. Палеонтология, палеобиогеграфия и мобилизм. Труды XXI сессии Всесоюзного палеонтологического общества. Магадан, 64-71.

Кальо Д. Л. (1965). Общие черты и некоторые палеозоогеографические особенности ругоз ордовика и силура СССР. Соколов Б. С., Ивановский А. Б. (ред). Ругозы палеозоя СССР. Наука, Москва, 16-24.

Кальо Д. Л. (1956). Роды *Primitophyllum* gen. nov. и *Leolasma* gen. nov. Материалы по палеонтологии. Новые семейства и роды. Госгеолтехиздат, Москва, 35-37.

Кальо Д. Л., ред. (1970). Силур Эстонии. Валгус, Таллин, 343 с.

Кальо Д. Л., Клааманн Е. Р., Нестор Х. Э. (1970). Палеобиогеографический обзор ордовикских и силурийских кораллв и строматопородей.

Кальо, Д. Л. (ред.). Закономерности растпространения палеозойских кораллов СССР. Наука, Москва, 6-15.

Кальо Д. Л., Нестор Х. Э., Пылма Л. Я., Эйнасто Р. Э. (1991). Позднеордовикское оледенение и его отражение в осадконакоплении Палеобалтийского бассейна. Кальо Д. Л., Модзалевская Т. Н., Богданова Т. Н. (ред). Важнейшие биотические события в истории Земли. Труды XXXII сесии Всесоюзного палеонтологического общества. Таллин, 68-78.

Нестор Х. Э., Клааманн Е. Р., Мейдла Т. Р., Мянник П. П., Мянниль Р. П., Нестор В. В., Нылвак Я. Р., Рубель М. П., Сарв Л. И., Хинтс Л. М. (1991). Динамика фауны в Балтийском бассейне на границе ордовика и силура. Кальо Д. Л., Модзалевская Т. Н., Богданова Т. Н. (ред). Важнейшие биотические события в истории Земли. Труды XXXII сесии Всесоюзного палеонтологического общества. Таллин, 79-86.

Teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest

Kalju Kask

Sündinud 13.12.1929 Tallinnas

1949	Tallinna Nõmme Gümnaasium
1955	Eesti Maaülikool, aiandusagronoomia
1965	bioloogiakandidaat, Eesti Teaduste Akadeemia
1974	põllumajandusteaduste doktor, Läti Põllumajanduse Akadeemia

1956−1970 Eesti Teaduste Akadeemia Tallinna Bioloogia Eksperimentaalbaasi ja Eksperimentaalbioloogia Instituudi nooremteadur, alates 1968 vanemteadur

Alates 1970 Pollis (Lõuna-Viljandimaal) asuva aianduse uurimisasutuse, mis on kuulunud Eesti Maaviljeluse ja Maaparanduse TUI koosseisu puuviljanduse osakonnana, alates 1995 Eesti Maaülikooli allasutus ja 2005. aastast EMÜ põllumajandus- ja keskkonnainstituudi Polli aiandusuuringute keskus, vanemteadur, peateadur, alates 1997 vanemteadur

1979	Ameerika Pomoloogia Seltsi (*American Pomological Society*) liige
1988	Eesti NSV teeneline teadlane
1989	Akadeemilise Põllumajanduse Seltsi liige (2005. aastast auliige)
2004	Eesti Maaülikooli teenetemedal
2006	Valgetähe IV klassi teenetemärk

Avaldanud 80 teadusartiklit, ligi tuhat populaarteaduslikku ja tootmisele nõuandvat artiklit (koos entsüklopeediate ja leksikonidega); 9 raamatu autor või kaasautor. Aretanud 26 õuna-, pirni- ja maguskirsisorti.

Olen tegutsenud mitmes rahvusvahelises ja Eesti nõukogus ja komisjonis, sealhulgas Eesti Teaduste Akadeemia Looduskaitse Komisjonis, Tartu Ülikooli botaanika- ja ökoloogia-alaste doktoriväitekirjade kaitsmise nõukogus (12 aastat), Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja majandusteaduste doktoriväitekirjade kaitsmise nõukogus (9 aastat), ÜRO Toidu- ja Põllumajandusorganisatsiooni Roomas asuva Põllumajandustaimede Geenivaramute Instituudi viljapuude Euroopa töörühmas (6 aastat). Olen juhendanud magistri- ja doktoritöid ning korduvalt oponeerinud Eestis, Lätis, Venemaal ja Valgevenes. Olen 15 aastat töötanud Soome, Rootsi, Taani, Norra ja Islandi ühises puuviljanduse töörühmas, milles olid hõlmatud ka Läti ja Leedu teadlased.

Minu isa pärines Torma kihelkonnast ja ema Harjumaa Kose kihelkonnast taluperest. Kõik lapsed tallu jääda ei saanud ja minu vanemad siirdusid Tallinna. Isa sai elektriku elukutse Esimese maailmasõja ajal Kroonlinnas mereväkke mobiliseerituna ja laevaelektrikute koolis õppides. Keskeas jäi ta pimedaks silmapõhjas kollase tähni hävimise tõttu, seepärast teenis ta vanemas eas elatist pimedate töökojas. Ema töötas Tallinna telefonikeskjaamas. Tema pöördumine adventismiusku viis vanemate lahkuminekuni. Kui J. Stalin hakkas eriti lahkusulisi likvideerima, siis 1951. aastal arreteeriti ema ja minust 2½ aastat noorem vend ning tribunal määras neile 25 aastat vangilaagrit, pluss 5 aastat asumist ja veel 5 aastat kodanikuõiguste äravõtmist. Juba 1946. a oli vangilaagrisse saadetud ema vend metsavendade toitmise ja varjamise pärast. 1941. a veebruaris arreteeriti isa vend, kelle mõistis vangilaagrisse Eesti NSV Ülemkohus. Lelle saatuse kohta mingeid teateid ei antud, mistõttu ta tunnistati hiljem kohtu otsusega surnuks. Ema, vend ja onu vabastati 1956.

On loomulik, et nõukogude esimese okupatsiooni kogemuste tõttu põgenes mu teise lelle pere 1944. a augustis Läände. Minu isa oli kavatsenud sama, kuid jäi hiljaks. Saksa okupatsiooni ajal elasime me emaga maal. Algkooli lõpetamise järel oli ema otsus, et maailma lõpp on lähedal ja koolis pole mõtet käia. Nii tekkis minu ja venna õppimises vahe. Hiljem kutsus isa meid õppimist jätkama. Meil oli mõlemal selleks ka tugev soov. Edaspidi õppisin ma hoolega, nii et kõikides klassides sain kiituskirja, keskkooli lõpetasin kuldmedaliga ja ülikooli *cum laude*. Tallinna X keskkoolis oli loodusloõpetajaks Ludmilla Õispuu, erakordselt innukas ja organiseerimisvõimeline inimene, kuuldavasti kindral Johan Laidoneri vennatütar. Looduslooring oli koolis kõige arvukam. L. Õispuu korraldas mitmepäevaseid ekskursioone küll põlevkivikaevandustesse, Kundasse ja Toolse ümbrusesse, Puhtu bioloogiajaama, ka Polli puuviljanduse katseasutusse. Koolis olid tooniandvad õpilased Hans Trass, Erast Parmasto (kummastki said botaanika akadeemikud), Harri Ling (sai zooloogiaprofessoriks), Ants Raik (klimatoloog), Ado Köstner (sai keemiaprofessoriks) ja paljud teised. Selles koolis käis hilisem Eesti Vabariigi president Lennart Meri, tulevased akadeemikud Endel Lippmaa ja Loit Reintam, helilooja Eino Tamberg, kui ainult osa õpinguaegade suurkujudest nimetada. Minu enda huvi suundus varakult botaanikasse. Väga tähtis oli taimeteadmiste laiendamine Loodusmuuseumis, kus botaanikaosakonnas töötas Eesti ajast kuulus botaanik ja looduskaitse arendaja Gustav Vilbaste. Nõnda juhtus, et kui võimekad loodusuurijad-õpilased ülikooli läksid (Arvo Rõõmusoks ja Dimitri Kaljo geoloogiat õppima, Kalju Põldvere ja tema noorem vend, samuti eespool nimetatud 10. keskkooli poisid, bioloogiat õppima), siis sain mina ülesandeks juhtida Tallinna koolide looduslooringi. Meie tegevuse keskuseks oli Loodusmuuseum Lai 29. Direktor A. Mank tegi õpilastega õppekäike peamiselt linnuvaatlusteks, geoloogiahuviliste pesapaik oli muuseumi alumisel korrusel ja botaanikutel kolmandal korrusel.

Minu edasiõppimiseks oli ka teisi plaane, kuid valisin lõpuks rakendusliku botaanika – aianduse eriala, mis ülikoolis oli eelmisel aastal esimest korda avatud. Hiljem olen sageli mõelnud: hea, et ma ei valinud arhitektuuri, ehitusteadust või ajalugu, sest mitme raske haiguse (juba ülikooliajast peale kopsutuberkuloos) tõttu suutsin ma ainult värske õhu käes töötades nii kaua töövõimelisena püsida. Eesti Põllumajanduse Akadeemia lõpetamise järel määrati mind Kostivere sovhoosi osakonnajuhatajaks, kus peamine oli sea- ja veisekasvatus ning põllukultuurid. Õnneks sain juba 1956. aastal aianduse alal tööd Teaduste Akadeemia Tallinna Bioloogia Eksperimentaalbaasis. See väikene uurimisrühm koosnes peamiselt iluaiandusteadlastest, kes pidid valmistama ette Tallinna Botaanikaaia rajamist. Minu ülesandeks sai dendroloogiliste kogude loomine. Botaanikaaia rajamiseni jõuti alles 1. detsembril 1961. Kuid rööpselt toimus ka Eksperimentaalbioloogia Instituudi loomine, mis sai teoks palju varem, 1. aprillil 1957.

Sortide aretamise ülesande sain ma kohe 1956. aastal. Teaduste Akadeemia president Johan Eichfeld oli just tellinud Leningradi katsejaamast maguskirsipuu kõige põhjapoolsemast kasvukohast seemne ja selle maha külvanud. Mina pidin taimed kasvatama ja hiljem seemikute seast parimad välja valima. Juba olid vilja hakanud kandma amuuri viinapuu seemnest kasvatatud taimed. Nende seas olid mitmed talvekindlad ja täiesti kõlblikud Eestis kultiveerimiseks. Voronežist tellitud aprikoosipuud kandsid samuti vilja. Minu hooldada anti ka harrastusaretaja Otto Krameri aretusaed, kus kasvasid õuna- ja pirnipuud. O. Kramer oli aastast-aastasse suurendatavast kulakumaksust pääsemiseks andnud oma krundi Teaduste Akadeemiale katseaia rajamiseks. Seal kasvas väärtuslikke puid, millest on praegu saanud mõned head Eestis ja Valgevenes kasvatatavad õuna- ja pirnisordid. Suhhumi katsejaamast Eestisse suunatud sidruniaretaja Nikolai Murri (esialgu töötas Põllumajandusministeeriumis, hiljem Polli uurimisasutuses) oli Musta mere äärest kaasa võtnud kaks kasvuhoonetäit tsitrusi, mille hooldamine anti minu ülesandeks. Peale selle pidin korraldama Eksperimentaalbioloogia Instituudi uue Harku asukoha kogu territooriumi majandamist ja korrashoidu. Seal oli metsa, 10-hektarine park, natuke põldu. Tuli kasvatada sööt loomafüsioloogia sektori katseloomadele, harida puukooli, rajada kaks viljapuude katseaeda. Talvekuudel püüdsin täita ka nooremteaduri ülesandeid: ainult selle ametikoha järgi mulle palka maksti, eelöeldud tegemised tulid teha tasuta. 1961. a lõpul suunati mind taimefüsioloogia aspirantuuri. Leningradis asuvast NSV Liidu TA V. Komarovi nimelisest Botaanika Instituudist sain juhendaja. Kuigi ma ametlikult olin Tallinna Botaanikaaia esimene aspirant, jäin ma 1965. aastast tööle Eksperimentaalbioloogia Instituuti. Mul oli siis kolm last ja instituut andis Harkusse uude majja korteri (botaanikaaial seda võimalust ei olnud). Geneetika sektoris sain ma valida teema mutatsioonaretuse alalt. Tugevatoimeliste keemiliste mutageenide kasutamist uurisin maguskirsipuul, viltjal kirsipuul ja õunapuul. Seega võtsin oma uurimisobjektideks täielikult viljapuud.

Juba varasematest aastatest olid mul katses paljud uued või vähetuntud viljapuud ja -põõsad: must aroonia, ebaküdoonia, kuldsõstar, liivkirsipuu, stepikirsipuu, astelpaju, alõtša, aprikoosipuu, virsikupuu, kreeka pähklipuu, sarapuu, aktiniidia, hiina sidrunväändik, mooruspuu, söödav kuslapuu, toompihlakas, pihlakasordid, kurdlehine roos jt. Mitme kultuuriga rajasin katsed sovhoosides, metsamajandites ja kolhoosides. Uute kultuuride laialdase katsetamise kokkuvõte võimaldas mul kirjutada doktoriväitekiri ja 1974. aastal kaitsta see Läti Põllumajanduse Akadeemia nõukogus. Eelmine puuviljandusalane doktoriväitekiri oli kaitstud A. Siimoni poolt Tartu Ülikoolis 1939. a.

Polli uurimisasutuse juhataja Aleksander Siimon oli 1968. a raskesti haigestunud. Kui mulle 1970. a tehti ettepanek jätkata tema õuna- ja pirnipuude alast uurimistööd, siis nõustusin ma pärast mõningast järelekaalumist. Eksperimentaalbioloogia Instituudist võtsin ma kaasa oma õuna-, maguskirsi- ja viltja kirsipuu seemikud. Alustasin tööd vanemteadurina ning sordiuurimis- ja aretusrühma juhina. Eestis pole kunagi olnud viljapuude sordiaretaja ametikohta. Teaduritena töötajate energia ja aeg kulub mujal aretatud sortide uurimiseks Eestis kasvatamise eesmärgil, neile sobiva kasvatamistehnoloogia väljatöötamiseks ja pookealuste katsetamiseks. Selle töö kõrvalt on mõned teadurid saanud võimaluse ka aretustööks. Minul õnnestus mõnevõrra rohkem aega sordiaretusele pühendada, kuid tähtsaks tõusis ka viljapuude geenivaramute uurimine.

Selgitasin välja, et Eesti ajaloo jooksul on meie maal aretatud kokku 182 puuvilja- ja marjasorti. Vanimad (18. sajandist) on õunasordid ʻTallinna pirnõunʼ ja ʻSuislappʼ. Vanuselt järgmise 11 sordi aretajaid pole suudetud välja selgitada. Palju sorte on aretanud mitmesuguste kutsealade inimesed: õpetajad, talunikud, meremehed, aednikud oma koduaias tööst vaba aja harrastusena. Kutseline aretus algas 1945. aastal Pollis.

Tabel 1

Eestis kuni 2008. a lõpuni aretatud puuvilja- ja marjasortide arv

Puuviljasordid		Marjasordid	
õunapuu	66	maasikas	6
pirnipuu	12	punane sõstar	2
ploomipuu	30	valge sõstar	3
hapukirsipuu	5	must sõstar	12
maguskirsipuu	17	karusmari	7
		vaarikas	6
õunapuu pookealused	10	jõhvikas	6
KOKKU	130 + 10		42

Puuvilja- marjasordid ning õunapuu vegetatiivalused kokku 182

Põllumajandus- (sealhulgas aia-) taimede geenivaramute loomine ja sortide säilitamine muutus riigi kohustuseks kui Eesti liitus rahvusvahelise bioloogili-

se mitmekesisuse konventsiooniga (Eesti Vabariigi president allkirjastas selle 1994. a). Minu töö selles valdkonnas leidis tunnustuse. 1996. a osalesin ÜRO Toidu- ja Põllumajandusorganisatsioonis (FAO) Leipzigis põllumajandustaimede geenivaramute säilitamise ja kaitse ülemaailmse tegevusplaani väljatöötamises. Hiljem osalesin ma 6 aastat FAO Roomas asuva Rahvusvahelise Põllumajandustaimede Geenivaramute Instituudi viljapuude Euroopa töörühmas, tutvusin paljude riikide vastavasisulise tegevusega ja rakendatud abinõudega. Järjekindel koostöö Põhjamaade geenipangaga kestis 16 aastat, veelgi kauasemad sidemed kujunesid välja Läti ja Leedu puuviljandusteadlastega. Minu saavutused leidsid tähelepanu ka USAs ja Kanadas. 2000. aastal kutsuti mind esinema USAsse Oregoni osariiki. Iga nelja aasta järel toimuvatel rahvusvahelistel aianduskongressidel esinesin ma ettekannetega: Itaalias (Firenzes) 1990 ja Jaapanis (Kyotos) 1994.

Minu raamat Eesti puuvilja- ja marjasortidest ilmus 1984. a. Praegu on valminud uue täiendatud raamatu käsikiri "Puuviljandus Eestis. Sordid ja aretajad", mis ilmub 2009. a.

Aretustöö on väga aeganõudev tegevus. Kakskümmend kuni kakskümmend viis aastat on parim, mida aretaja võib loota ühe puuviljasordi loomiseks. Pirnisordi saamine võtab enamasti rohkem aega. Mul on kulunud ühe sordi jaoks ka 35 aastat või isegi rohkem. Pikem aeg kulub siis, kui lootustandvaid sordikandidaate on arvukamalt, ametliku vormistamise ajal lükkad mõne kõrvale, otsustades teda katsetada veel mõne aasta. Mõnikord ei vasta aretaja maitse suure hulga tarbijate maitsele. Olen mõnegi sordikandidaadi välja praakinud, arvates et ta ei ole küllalt hea. Siis on tuttavad veennud mind, et olen valesti otsustanud. Nii olen ma mõnegi väljapraagitu uuesti katsesse võtnud ja sordiks registreerinud.

Eestis oleme kasutanud peamise meetodina valitud vanemsortide ristamist (hübridiseerimist). Harva oleme ristanud erinevatesse liikidesse kuuluvaid taimi, tehes nn kaughübridiseerimist. Oleme kasutanud ka mutatsioonide kunstlikku esilekutsumist gammakiirguse või keemiliste mutageenide toimel, kuid see ei ole viinud väga silmapaistvate tulemusteni. Kõikides maailma puuviljanduslikes aretusasutustes on häid sorte saadud vabalt tolmelnud seemnetest kasvatatud taimedest, nii on see ka meil. Eesti kutseliste puuviljasortide aretajate võimalused on olnud väga kasinad. Esiteks on aretus muu katsetegevuse kõrvaltöö. Teiseks on rahastamine olnud napp, mistõttu pole saadud luua abistavaid töörühmi, näiteks taimehaiguste laboratooriumi oluliste haiguste- ja kahjurikindlate sortide aretamiseks. On puudunud isegi kasvuhooned, mis on olemas igas tänapäevases aretusasutuses. Alles kõige viimastel aastatel on noore põlvkonna aretajad Pollis rajanud põllumajandusministeeriumi projektirahadega väikesed kasvuhooned aretustöö tõhustamiseks ja kiirendamiseks.

Sordiaretus on töömahukas: maailma aretusasutuste ja ka meie kogemused on näidanud, et ühe õunasordi saamiseks tuleb kasvatada 3000–5000 seemikut.

Seejuures läheb nende viljakandmise alguseni umbes kümme aastat. Tuhanded puud nõuavad palju ruumi aias, iga-aastast hooldustööd ja lõpmata hulga vaatlusi, hindamisi, ka keemilise koostise määramist. Alles viljakandmise ajal tehakse tähtsaimad vaatlused, mis võimaldavad otsustada aretise saatuse. Ametlikku sorditaotluste registrisse kantud uus sort saab lõpliku sorditunnistuse pärast mitmeaastast rahvusvahelist katsetamist mõnes välisriigis, kus tehakse kindlaks, kas ta erineb kõigist teistest maailmas tuntud sortidest ja kas tema tunnused on püsivad.

Aretustöö kulu ja aega saab vähendada, kui varakult välja praakida kehvad taimed. Olen korduvalt teinud väga ranget praakimist, juurides juba esimetel aastatel välja kuni üheksa kümnendikku taimedest. Seda on võimalik teha mõne selge tunnuse põhjal, näiteks siis, kui lehed on nakatunud kärntõppe. Aretusasutustes, kus on abistavad töörühmad olemas, külvatakse seemned kasvuhoonesse ja pritsitakse noori taimi kärntõveeoste suspensiooniga nakkuse esilekutsumiseks. Haigusõrnad taimed hävivad. See on suur abi aretajale, mida Polli aiandusuuringute keskuses siiani pole olnud.

Asjaolu, miks ma olen suutnud luua palju puuviljasorte, oleneb pikast aretusajast, mis ühtekokku on kestnud 53 aastat. Esimese sordi saamiseni läks 20 aastat. Kuni seitsmekümnenda eluaastani olid mul ainult mõned ametliku sorditunnistuseni jõudnud sordid. Peamine "lõikusaeg" on jäänud seitsmekümnenda ja kaheksakümnenda eluaasta vahele, mil registreeriti kõige rohkem sorte. Ma olen näinud ka oma loomingu mitmekülgset tunnustamist: 2008. a seisuga oli üheksa minu aretatud sorti võetud Eesti soovitussortide ametlikku nimestikku; sealhulgas on neli õuna-, üks pirni- ja neli maguskirsisorti. Läti vastavas nimestikus on kuus minu aretatud sorti: 2 õuna-, 1 pirni- ja 3 maguskirsisorti. Soome puuviljakasvatajad on minu loodud sortidest suuresti huvitatud; seal on katsetamisel üle kümne sordi. Ka Holland, Itaalia, Vene ja Valgevene on hakanud katsetama Pollis aretatud sorte.

Järgnevalt on esitatud minu poolt aretatud sortide lühike iseloomustus. Juhul, kui aretajaid ei ole märgitud, kuulub autorlus 100-protsendiliselt käesoleva artikli autorile. Registreerimiskatsete täpsem koht on Läti Riiklik Puuviljandusinstituut Dobele linnas.

ÕUNASORDID

'ELS' pärineb 1980. aastal tehtud ristamisest 'Cortland' x 'Tellissaare'. Sort on 2007. aastast ametlikus registreerimiskatses Lätis. Üsna suur ümmargune õun on punase kattevärvusega, magusamaitseline ja septembrikuise tarbimisajaga.

'KAARI' pärineb 1967. a vabalt tolmelnud 'Antonovka' seemnest. Sort on 2003. aastast ametlikus registreerimiskatses Lätis. Keskmise suurusega ümmargune õun on punase kattevärviga, magushapu maitsega, sügisese või heades hoiutingimustes talvise tarbimisajaga.

'KAIMO' pärineb 1982. aastal tehtud ristamisest 'Cortland' x L8 (viimane on aretaja poolt varem valitud eliitseemik). Sordikaitsetunnistus on välja antud

2007. a. Keskmise suurusega ümmargune õun on punase kattevärviga, magusamaitseline ja sügisese tarbimisajaga.

'KALLIKA' pärineb 1982. aastal tehtud ristamisest, kus lähtevanemateks olid aretaja poolt varem valitud suureviljalised eliitseemikud L8 ja L25. Sort on 2008. aastast ametlikus registreerimiskatses Lätis. Üsna suur laikoonilise kujuga, rohekaskollane ja erkpunase kattevärvi laiguga õun on magusamaitseline, heades hoiutingimustes talvise tarbimisajaga.

'KARAMBA' pärineb 1969. aastal tehtud ristamisest 'Talvenauding' x 'Cortland'. Sordikaitsetunnistus on välja antud 2007. a (eelkaitse kehtis 2001. a alates, mil ta kanti uute sortide taotluste registrisse). Lätis toimusid sordiuurimise katsed juba varem, millele tuginedes võeti 'Karamba' sealsesse soovitussortimenti alates 2002. aastast. Sort on jätkuvalt populaarne ja teda istutatakse Läti koduaedadesse tuhandete puudena. Keskmise suurusega ümmargune õun on punase kattevärviga, magusamaitseline ja sügisese tarbimisajaga.

'KASTAR' pärineb vabalt tolmelnud (Läti sordi) 'Stars' seemnest. Sort on 2008. aastast ametlikus registreerimiskatses Lätis. Keskmise suurusega ümarovaalse kujuga õun on punase kattevärviga, hapukasmagusa maitsega taliõun.

'KATRE' pärineb 1982. aastal tehtud ristamisest 'Tiina' x L8 (vt 'Kaimo'). Sordikaitsetunnistus on välja antud 2007. a (eelkaitse kehtis 2001. a alates, mil sort kanti taotluste registrisse). 2005. aastal võeti 'Katre' Eesti soovitussortimenti perspektiivsordina. Aasta-aastalt istutatakse tema puid meie aedadesse üha rohkem. Õun on keskmise suurusega, kuid võib kasvada ka suureks, ümmargune, punane kattevärv esineb laialdaselt. Õun on talvise tarbimisajaga.

'KIKITRIINU' pärineb 1978. a tehtud ristamisest 'Tiina' x 'Talipirnõun'. Sordikaitsetunnistus on välja antud 2009. a. Keskmise suurusega laimunajas õun on roosakaspruuni kattevärviga, magusamaitseline sügis-taliõun.

'KRISTA' pärineb 1978. a vabalt tolmelnud, aretaja varem valitud L25 seemnest. Sordikaitsetunnistus on välja antud 2007. a (eelkaitse kehtis 2001. a alates, mil sort kanti taotluste registrisse). Varasematel aastatel tehtud katsetele tuginedes võeti 'Krista' 2004. a perspektiivsordina Eesti soovitussortimenti. Ta on praegu üks kõige populaarsemaid uusi sorte, mida istutatakse Eesti aedadesse. Eriti hinnatakse tema väga varajast viljakandealgust, ilusat õunakuju, kaunist värvi, tugevat viljaliha ja head maitset. Keskmise suurusega ümmargune, punase kattevärviga õun on magushapu ja säilib talve keskpaigani.

'KUKU' pärineb 1986. a. tehtud ristamisest 'Cortland' x '№ 23'. Isapoolne lähtevanem on kärntõvekindel mariõunapuu tüüpi seemik. Lätis 2004. a alates uurimises olnud sordina (sel ajal veel eelkaitse all) osutus ta mahla maitsehinde poolest väga silmapaistvaks. Sordikaitsetunnistus anti välja 2009. Väikeseviljalise (u 20 g) sordina võeti ta juba 2005. a Eesti viljapuude soovitussortimenti salatiõunana. 'Kuku' on sügisese valmimisajaga. Ta on ka väga kaunis punaseviljaline iluõunapuu.

'LIIVIKA'

'KATRE'

'ELS'

'LEMBITU' (autorid on Aleksander Siimon 85% ja Kalju Kask 15%) pärineb 1946. aastal esimese aretaja poolt tehtud ristamisest 'Liivi kuldrenett' x 'Wealthy'. Sordi aretamine jõudis lõpule 1975. a. Keskmine või mõnikord suur laikooniline või munajas õun on rohekaskollane, päikesepoolsel küljel nõrga triibulise punaga, magushapu. Maitsehindamisel nii Eestis kui Lätis on 'Lembitu' mitmel aastal pandud esikohale. Tarbimisajalt on ta varajane sügisõun.

'LIIVIKA' pärineb 1983. a tehtud ristamisest, kus lähtevanemateks olid aretaja poolt varem valitud suureviljalised eliitseemikud L8 ja L25. Samast ristamiskombinatsioonist, kuid tehtud aasta varem, pärineb ka sort 'Kallika'. 'Liivikale' anti sordikaitsetunnistus 2009. a. Keskmise suurusega munajas või kooniline õun on rohekasvalge, väikese erksa kattepuna laiguga, magushapu. Maitsehinde alusel peetakse 'Liivikat' eriti heaks õunaks. Tarbimisajalt on ta Eestis sügisene või talve esimese poole õun.

'RITIKA' pärineb 1986. a tehtud ristamisest 'Cortland' x '№ 23' (vt 'Kuku'). Sordikaitsetunnistus anti välja 2009. Väikeseviljalise (u 20 g) sordina on ta aretatud salatiõunaks ja kaunistuseks lihatoitude juurde. Ta on ka iluõunapuu.

'RUTI' pärineb – samuti nagu 'Kuku' ja 'Ritika' – 1986. a tehtud ristamisest 'Cortland' x '№ 23'. Sordikaitsetunnistus anti välja 2009. Väikeseviljalise sordina on ta aretatud salatiõunaks ja kaunistuseks lihatoitude juurde. Ta on ka iluõunapuu.

'TIINA' (autorid on A. Siimon 85% ja K. Kask 15%) pärineb 1947. a esimese aretaja poolt tehtud ristamisest 'Streifling Herbst' x 'Liivi kuldrenett'. Sordiks vormistati ta 1976. a. Üle keskmise suurusega munajas õun on põhivärvilt rohekaskollane, millel on laialivalguvate triipudena vaarikavärvi puna. Ta on magusamaitseline. Kaunikujulise ja värvika õuna ning saagirohkuse tõttu on ta võetud viljapuude soovitussortimenti Eestis (alates 1982) ja Lätis (1998). Mõlemas riigis on ta seni tähtsaim magusamaitseline õunasort.

PIRNISORDID

'KADI' pärineb 1978. a Kõrgõzstanist Prževalski linnast (u 2 km merepinnast) vabalt tolmelnud sordi 'Fondante des Bois' seemnest. 'Kadi' on 2004. aastast ametlikus registreerimiskatses Lätis. Keskmise suurusega pirnjas vili on punase kattevärviga, sulava mahlase viljaga, magusamaitseline. küpseb varajaste pirnide (augusti viimane dekaad, september) hulgas. Säilivusaeg on lühike. Parimas küpsuses pirne on arvukate hindajate poolt (nt Lätis 2007) pandud maitselt esikohale.

'PEPI' (autorid on Kalju Kask 60% ja Aleksander Siimon 40%) päritolu on teadmata, kuna puud on katseaeda istutamisel segi aetud. Oletatavasti on üks vanemaid 'Precoće de Trevoux': 1952 või 1953. Sordikaitsetunnistus anti välja 1998. a. Pikka aega kestnud katsetamistele tuginedes võeti 'Pepi' Eesti soovitussortimenti juba 1990. a (2005. aastast ka toesemoodustajana). Läti soovitussortimenti kuulub 'Pepi' 1998. aastast. Ta on üks kõige enam kasvatatav pirni-

'KADI'

'PEPI'

'TONTU'

sort, mille põhjuseks on partenokarpne viljakandmine (pirnid moodustuvad ka viljastamata õitest; seetõttu ei vaja lähedusse teist, õietolmuandjat sorti), varajane viljakandeea saabumine, rohke saak, hea maitse ja pirnide säilivus külmhoidlas mõni kuu. Kui kõrgusse sirutuv latv järjekindlalt maha lõigata, saab kujundada väikesekasvulise kompaktse puu.

'POLLI PUNANE' pärineb 1973. aastal tehtud ristamisest 'Tervishoiunõunik' x 'Saaremaa punane'. Sort on 2004. aastast ametlikus registreerimiskatses Lätis. Keskmise suurusega pirnikujuline vili on enamasti üleni punane, viljaliha on roosakas, südamik punane. Magusa kõrval on tunda ka veidi haput maitset. Üsna talve- ja võrdlemisi haiguskindel.

MAGUSKIRSISORDID

'JOHAN' (autorid on võrdselt Johan Eichfeld ja Kalju Kask) pärineb vabalt tolmelnud 'Leningradskaja tšornaja' seemnest. Sordi aretamine jõudis lõpule 1970. aastail. Esialgu kasvatati teda 'Priima' nime all. Selle nimega võeti ta 2002. a ka Läti soovitussortimenti. Hiljem selgus, et 'Prima' nimi on USAs juba hõivatud ja 2004. a registrisse kandmisel anti talle praegune nimi. Kirss on üle keskmise suur, ümmargune, tume- või mustjaspunane, magus, mahl on punane. Luuseeme on viljalihast kergesti eraldatav. Kõige varajasema valmimisaja tõttu teda Lätis kasvatataksegi. Kagu-Eestis on mõnel aastal küpsenud juuni alguses.

'KARMEL' pärineb 1965. a vabalt tolmelnud sordi 'Norri' seemnest. 2004. aastal võeti 'Karmel' uute sortide taotluste registrisse ja 2005. a Eesti viljapuude soovitussortimenti. Kirss on keskmise suurusega, ovaalne, mustjaspunane või must, magus, mahl on tumepunane. Luuseeme on viljalihast kergesti eraldatav. Valmimisajalt kuulub varajaste hulka (enamasti juuni lõpupoole). Registreerimiskatse Lätis veel kestab.

'KASPAR' pärineb 1981. a vabalt tolmelnud sordi 'Norri' seemnest. 2004. aastast on 'Kaspar' rahvusvahelises registreerimiskatses Lätis. Kirss on keskmise suurusega, südajas, mustjaspunane, magus, mahl on tumepunane. Luuseeme on viljalihast kergesti eraldatav. Keskmise valmimisajaga (küpseb juuli teisel nädalal).

'MEELIKA' (autorid on võrdselt Kalju Kask ja Johan Eichfeld) pärineb 1955. a vabalt tolmelnud 'Leningradskaja tšornaja' seemnest. Sordi aretamine jõudis lõpule 1970. aastail. Silmapaistva talvekindluse, saagirohkuse ja hea maitse tõttu võeti 'Meelika' 1994. a Eesti ja 1998. a ka Läti soovitussortimenti. Kirss on väikesevõitu, ovaalne, mustjas, viljaliha ja mahl on tumepunane. Luuseeme on viljalihast kergesti eraldatav. Kirsid valmivad harilikult juuli teisel nädalal, soojal varajasel kevadel aga juba juuni lõpupäevil.

'MUPI' pärineb 1976. aastal vabalt tolmelnud Kati (aretaja varem loodud suureviljalise aretise) seemnest. Kati on saadud sordi 'Norri' seemne keemilise mutageeniga töötlemisest. Silmapaistvalt heade omaduste tõttu võeti 'Mupi' 2005. a perspektiivsordina Eesti soovitussortimenti. Kirss on üsna suur, sü-

dajas, tume- kuni mustjaspunane, hapukasmagus. Mahl on tumepunane, luuseeme on viljalihast kergesti eraldatav. Kirsid saavad küpseks juuli keskpaiku.

'NORRI' (autorid on võrdselt Kalju Kask ja Johan Eichfeld) pärineb 1955. a vabalt tolmelnud 'Leningradskaja tšornaja' seemnest. Sordi aretamine jõudis lõpule 1970. aastail. Saagirohke, suhteliselt nõrga kasvuga ja allakooldunud okstega 'Norri' võeti viljapuude soovitussortimenti Eestis 1995. ja Lätis 2002. a. Kirss on keskmise suurusega, ümmargune, tumepunane, hapukasmagus. Mahl on tumepunane, luuseeme on viljalihast kergesti eraldatav. Kirsid küpsevad juulis.

'PIRET' pärineb 1976. a vabalt tolmelnud sordi 'Norri' seemnest. 2004. aastast on 'Piret' rahvusvahelises registreerimiskatses Lätis. Kirss on keskmise suurusega, südajas, tumepunane, hapukasmagusa maitsega. Mahl on tumepunane, luuseeme on viljalihast kergesti eraldatav. Kirsid küpsevad harilikult juuli teisel nädalal.

'TONTU' pärineb 1978. a vabalt tolmelnud sordi 'Norri' seemnest. 'Tontu' on rahvusvahelises registreerimiskatses Lätis. Kirss on suur, südajas, tumepunane või must, hapukasmagusa maitsega. Mahl on tumepunane, luuseeme on viljalihast kergesti eraldatav. Kirsid valmivad juuli algul.

LÕPETUSEKS.

Kokku olen aretanud 26 puuviljasorti. Neist 15 on õunasordid (sealhulgas 3 väikeseviljalist salatiõunasorti), 3 pirnisordid ja 8 maguskirsisordid. Mul on ka neid aretisi, millega töö kestab. Praeguste andmete alusel on lootust saada veel mõni õunasort, üks pirnisort ja üks maguskirsisort. Oma töös ei oleks ma käsitletud tulemusteni jõudnud, kui mul poleks olnud väga häid abilisi. Eriti tähtsad on olnud aednik Heino Sibul (Eksperimentaalbioloogia Instituudis), laborandid Pille Läänemets, Alide Mets ja Anne Luur (Pollis). Eriline tänu abikaasa Virvele. Lapsed ja lapselapsed jäädvustasin puuviljasortidele pandud nimedes: Krista (vanem tütar), Meeli (noorem tütar), Kikitriinu (Triinu on tütretütre nimi), Aule (tütretütre nimi, kavandatud uuele õunasordile).

VALIK KIRJANDUST

Kask, K. (1958). Hariliku käokulla [*Helichrysum arenarium* (L.) D.C.] levik Eesti NSV-s. ENSV TA Toimetised. Bioloogia, 7, 312-318.

Kask, K. (1959). Aprikooside aklimatiseerimise katsetest Eesti NSV-s. ENSV TA Toimetised. Bioloogia, 8, 78-83.

Kask, K. (1960). Amuuri viinapuu (*Vitis amurensis* Rupr.) ja tema hübriidide aklimatiseerimise katsete tulemusi. Eksperimentaalbioloogia Instituudi uurimused I. Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn, 122-132.

Каск, К. (1964). Последействие обработки семян переменными температурами на биохимические процессы в сеянцах древесных растений. ENSV TA Toimetised. Bioloogia, 13, 251-266.

Kask, K. (1967). Polüfenoolsete ühendite sisaldus mõnedes viljapuuliikides ja selle seosest talvekindlusega. ENSV TA Toimetised. Bioloogia, 16, 24-31.

Kask, K. (1967). Early fruit maturity of fruit tree seedlings as an afteraction of treating the seeds with alternate temperatures. ENSV TA Toimetised. Bioloogia, 16, 363-369.

Каск, К. (1971). Перспективы обогащения плодоводства Эстонии новыми культурами. ENSV TA Toimetised. Bioloogia, 20, 141-149.

Kask, K. (1975). Maguskirsipuu ja õunapuu seemnete töötlemine N-nitrosoalküülkarbamiididega ja selle mõju seemikutele. Puuviljandus. Tallinn, 143-157. (Teaduslike Tööde Kogumik (Eesti Maaviljeluse ja Maaparanduse TUI); 34).

Каск, К. (1977). Рост и развитие сеянцев яблони выращенных из семян, обработанных химическими мутагенами. Индуцированный мутагенез в селекции садовых растений. Изд.- во Московского университета, 86-89.

Каск, К. (1978).Новые культуры в плодоводстве северо-западной зоны. Изд.- во Колос, Ленинградское отд., Ленинград, 144 с.

Kask, K., Piir, R. (1980). Uusi puuvilja- ja marjakultuure. Valgus, Tallinn, 168 lk.

Kask, K. (1984). Eesti puuvilja- ja marjasordid. Valgus, Tallinn, 224 lk.

Kask, K. (1985). Apple cultivars introduced by the Polli Experimental Station. Puuviljandus. Tallinn, 86-101. (Teaduslike Tööde Kogumik (Eesti Maaviljeluse ja Maaparanduse TUI); 50).

Kask, K., Jänes, H. (1985). Response of plum cultivars to controlled shoot refrigeration. Scientia Horticulturae, 27, 4, 251-256.

Kask, K. (1987). 'Yellow Transparent' apple. Fruit Varieties Journal (USA), 41, 2, 82-83.

Kask, K. (1989). The tomentosa cherry, *Prunus tomentosa* Thunb. Fruit Varieties Journal (USA), 43, 2, 50-51.

Kask, K. (1992). Koduaia puuvilja- ja marjasordid. Valgus, Tallinn, 161 lk.

Kask, K. (1993). Pirnipuu sordiaretusest Eestis ja siin kasvatamiseks soovitatud sordid. Agraarteadus, 4, 31-44.

Kask, K. (1997). Fruit and small fruit cultivars bred at the Polli Horticultural Institute. Modern orchards: achievements and tendencies. Babtai (Lithuania), 174-178.

Kask, K., Jänes, H. (1998). Cherry breeding in Estonia. Acta Horticulturae, 468, 1, 167-171.

Kask, K. (1998). European filbert in Estonia. Northern Nut Growers Association 89th Annual Report, 155-156.

Kask, K. (1998). The tomentosa cherry in Estonia. Forestry studies, 30, 76-81.

Kask, K. (1999). Cultivar diversity and germplasm maintenance of tree fruit and small fruit crops of Estonian origin. Botanica Lithuanica, Suppl. 2, 135-138.

Kask, K. (1999). Ploomikasvatus Eestis pärast Teist maailmasõda. Agraarteadus, 10, 46-59.

Kask, K. (1999). Saaremaa sarapuupähklite kvaliteedi uurimine. Agraarteadus, 10, 205-214.

Kask, K. (2001). Nut quality of wild European hazelnut in Estonia and attempts at hazelnut breeding. Acta Horticulturae, 556, 37-40.

Kask, K. (2004). An inventory of apple and pear cultivars of Estonian origin. Report of a Working Group on *Malus/Pyrus* IPGRI. FAO, Rome, 22-25.

Hanni, L., Kask, K., Kelt, K. (2005). Edible honeysuckle: evaluation of cultivars and selections at the Polli Horticultural Research Centre. Proc. Int. Sci. Conf. : Environmentally Friendly Fruit Growing. Tartu University Press, Tartu, 124-128.

Kask, K., Jänes, H., Libek, A. (2005). Sordiaretuse tulemused Polli aiandusuuringute keskuses. Sordiaretus ja seemnekasvatus: teaduslikud tööd. Jõgeva Sordiaretuse Instituut, Jõgeva, 31-36.

Kask, K., Kivistik, J. (2005). Puuviljad ja marjad Eestis. Ilo, Tallinn, 272 lk.

Kivistik, J., Kask, K. (2005). Puuviljandus. II, Pomoloogia. Ilo, Tallinn, 262 lk.

Jänes, H., Kask, K., Libek, A.-V., Tiirmaa, K., Univer, T. (2006). Eesti puuvilja- ja marjasordid = Estonian Fruit and Berry Cultivars. Põllumajandusministeerium, Tallinn, 122 lk.

Kask, K., Jänes, H. (2006). An inventory of plum and cherry cultivars of Estonian origin. Report of a Working Group on *Prunus*. Biodiversity International, Rome, 45-48.

Kask, K. (2007). Maailma puuviljad. Ilo, Tallinn, 184 lk.

Kask, K., Kikas, A., Jänes, H., Libek, A.-V. (2007). Polli aiandusuuringute keskuses aretatud sordid Eesti ja Läti soovitussortimentides 2007. Agronoomia 2007. EMVI-EMÜ-Jõgeva SAI, Saku, 101-104.

Teaduspreemia innovaatilise tooteni viinud väljapaistva teadus- ja arendustöö "Integraalse fotoelastsusmeetodi teooria, mõõtmistehnoloogia ja aparatuuri väljatöötamine ja rakendamine jääkpingete mõõtmisel klaasitööstuses" eest

Hillar Aben (kollektiivi juht, esimene paremalt)

Sündinud 3.12.1929 Tartus
1948 Hugo Treffneri Gümnaasium
1953 Tallinna Tehnikaülikool, ehitus
1966 tehnikadoktor, mehaanika, Eesti Teaduste Akadeemia

Alates 1960 Eesti Teaduste Akadeemia (praegu TTÜ) Küberneetika Instituudi sektorijuhataja, teadusala asedirektor, direktor, laboratooriumi juhataja

1977 Eesti Teaduste Akadeemia liige
1982 Soome Tehnikateaduste Akadeemia liige
1990 Euroopa Eksperimentaalmehaanika Alalise Komitee liige
1991 Euroopa Teaduste ja Kunstide Akadeemia liige
1994 Eesti Vabariigi teaduspreemia
2001 Valgetähe III klassi teenetemärk

Avaldanud kaks monograafiat ja üle 200 teadusartikli.

Leo Ainola (teine paremalt)

Sündinud 18.07.1929 Viljandis
1948 Viljandi Maagümnaasium
1953 Tallinna Tehnikaülikool, ehitus
1968 füüsika-matemaatikadoktor, Eesti Teaduste Akadeemia

1956−1961 Tallinna Tehnikaülikooli matemaatika kateedri assistent, vanemõpetaja, dotsent; 1961−1971 Eesti Teaduste Akadeemia Küberneetika Instituudi vanemteadur; 1971−1997 TTÜ matemaatika kateedri juhataja, professor; alates 1997 TTÜ Küberneetika Instituudi vanemteadur

1971 Eesti riiklik teaduspreemia

Avaldanud üle 120 teadusartikli.

Andrei Errapart (kolmas paremalt)

Sündinud 14.03.1978 Rakveres
1996 Nõo Reaalgümnaasium
2002 Tallinna Tehnikaülikool, tehniline füüsika
2007 MSc, tehniline füüsika, Tallinna Tehnikaülikool

Alates 2000 TTÜ Küberneetika Instituudi insener, teadur

Avaldanud üle 20 teadusartikli.

Johan Anton (neljas paremalt)

Sündinud 2.03.1973

1988 Tallinna Tehnikagümnaasium
1991 Tallinna Tehnikaülikool, tehniline füüsika
2008 loodusteaduste doktor, Tallinna Tehnikaülikool

Alates 1993 TTÜ Küberneetika Instituudi insener, teadur, vanemteadur

Avaldanud üle 50 teadusartikli.

SISSEJUHATUS

Fotoelastsusmeetod on eksperimentaalmehaanika meetod pingete ja deformatsioonide mõõtmiseks läbipaistvates, klaasist või plastmassist, katsekehades. Meetod põhineb fotoelastsusefektil – asjaolul, et mehaaniliste pingete mõjul muutuvad läbipaistvad isotroopsed materjalid optiliselt kaksikmurdvateks, nagu kristallid. Fotoelastsusefekti klaasis avastas Tallinnas sündinud füüsik Thomas Johann Seebeck 1813. aastal, uurides erineva kujuga ja erineva kiirusega

allajahutatud klaasesemeid polariseeritud valguses [Seebeck, 1813, 1814]. Paar aastat hiljem avastas inglise füüsik David Brewster, et mesilasevahast ja kampolist valmistatud materjali tükk muutus pinge rakendamisel kaksikmurdvaks [Brewster, 1815]. Seebecki avastuse vastukajasid ning tema ja Brewsteri vahelist rivaliteeti on käsitletud artiklites [Aben, 2007, 2008]. Klaasi lõõmutusastme määramisel leidis fotoelastsusmeetod rakendamist juba 19. sajandil, esialgu lihtsalt klaastoodete vaatlemisel polariskoopides ja vaadeldavate interferentsvärvide kogemuslikul seostamisel klaasi tugevusega. Pingeväljade määramiseks mitmesuguste konstruktsioonide plastmassist mudelites hakati fotoelastsusmeetodit ulatuslikult kasutama 20. sajandi keskel. Praeguseks on insenerlik fotoelastsusmeetod teatud määral taandunud teiste eksperimentaalmehaanika meetodite (moiré, holograafia, siller) ning numbriliste meetodite ja arvutustehnika kasutamise ees. Samal ajal klaasi pingete hindamisel on fotoelastsusmeetod konkurentsitu.

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

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

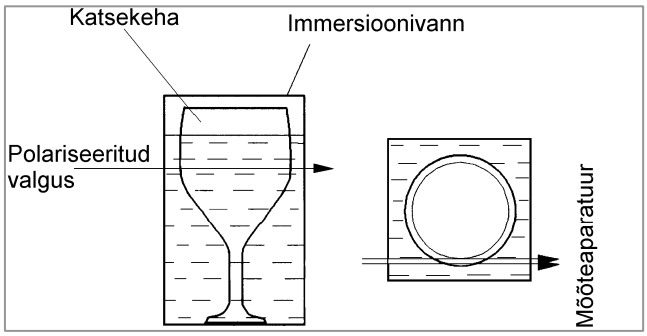
Plaatide mittelineaarse deformeerumise puhul, nagu üldse mittelineaarsete ülesannete lahendamisel, külmutusmeetodit kasutada ei saa. Seepärast püstitasime ambitsioonika ülesande – määrata ruumiline pingeolek uurimisobjektis seda katki tegemata. Tõepoolest, valgustades pingete mõjul kaksikmurdvaks muutunud ruumilist keha polariseeritud valgusega, muudab see keha valguse

polarisatsiooni. Seda muutust saab polariskoobis mõõta. Nii saame teatud integraalset informatsiooni keha pingeoleku kohta. Probleem on selles, millistel tingimustel on saadud eksperimentaalne informatsioon piisav keha pingevälja määramiseks.

Selline mittepurustav pingete määramise meetod on vajalik ka klaasitööstuses. Klaastoodete valmistamisel jahutatakse vedelat klaasimassi, mis klaasistub temperatuuril 600−700 ^{o}C. Klaasistunud toote jahtumine toatemperatuurini toimub ebaühtlases temperatuuriväljas. Toote seesmises osas asuva klaasi jahtumistingimused on halvemad ning toote seesmise osa kokkutõmbumist jahtumisel takistavad madalamat temperatuuri omavad välised osad. Seetõttu esinevad toatemperatuurini jahutatud klaastootes praktiliselt alati jääkpinged, mis toote seesmises osas on tõmbepinged ja pinna lähedastes osades survepinged. Kuna pindmised survepinged tõstavad klaasi tugevust, siis püütakse tänapäeval klaasi kiire jahutamisega (karastamisega) pindmisi pingeid teadlikult suurendada. Selle protsessi juhtimiseks on aga vajalik täpselt teada erinevate jahutusrežiimide mõju jääkpingetele. Mittepurustav fotoelastsusmeetod on siin parimaks lahenduseks.

INTEGRAALNE FOTOELASTSUSMEETOD

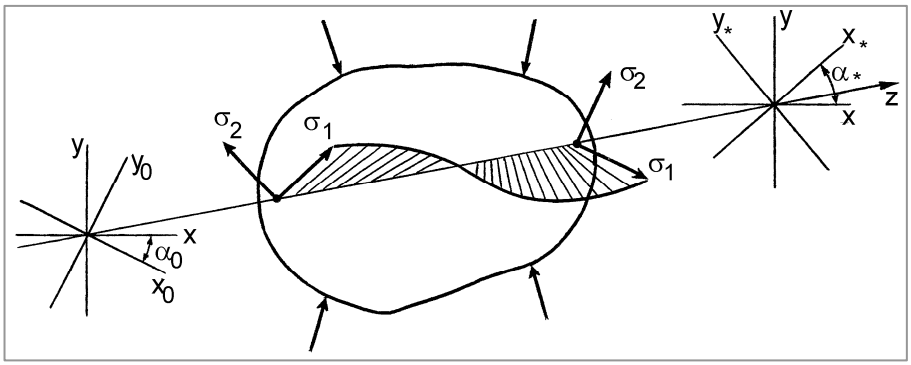
Integraalses fotoelastsuses asetatakse uuritav katsekeha immersioonivanni, et vältida valguse murdumist, ning valgustatakse läbi polariseeritud valgusega (joonis 1). Suurel hulgal valguskiirtel mõõdetakse polarisatsiooni muutus, mis on tingitud fotoelastsusefektist. Paljudel juhtudel võimaldab selliselt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



Joonis 1. Integraalses fotoelastsuses valgustatakse immersioonivanni asetatud katsekeha läbi polariseeritud valgusega ning mõõdetakse valguse polarisatsiooni muutus paljudel valguskiirtel.

Esimeseks teoreetiliseks probleemiks oli välja selgitada, mis toimub polariseeritud valgusega pingete mõjul kaksikmurdvaks muutunud mittehomogeenses keskkonnas. Teatavasti saab tasapinnalise pingeoleku puhul fotoelastsusmeetodil määrata nn isokliini parameetri, st peapingete suuna. Mida saab aga määrata siis, kui see peapingete suund valguskiirel pöördub? Meie uuringute algusperioodil sellele küsimusele teaduslikult põhjendatud vastust ei olnud. Levinud

oli oletus, et kui valguse polarisatsioonitasand on paralleelne peapinge suunaga valguse sisenemispunktis, siis pöördub polarisatsioonitasand katsekehas koos peapingete suunaga (joonis 2).



Joonis 2.
Peapingete suundade pöördumise lihtsustatud käsitluse puhul pöördub valguse sisenemispunktis peapingega σ_1 paralleelne polarisatsioonitasand koos peapingega. Probleemi teaduslikult adekvaatne käsitlus näitab, et tegelikult eksisteerivad langeva valguse eelistatud polarisatsiooni suunad x_0, y_0, mille puhul ka objektist väljuv valgus on lineaarselt polariseeritud (suundades x_* või y_*). Reeglina ei lange need, nn karakteristlikud suunad kokku peapingete suundadega ei valguse sisenemis- ega ka väljumispunktis.

Lähtudes Maxwelli võrranditest tuletasime koos kolleeg E. Saksaga võrrandid, mis adekvaatselt kirjeldasid valguse polarisatsiooni muutusi mittehomogeenses kaksikmurdvas keskkonnas peapingete suundade meelevaldse pöördumise juhul [Aben, Saks, 1960]. Kuivõrd optiline kaksikmurdvus fotoelastsusefekti tõttu on reeglina nõrk, siis õnnestus need võrrandid viia suhteliselt lihtsasse kujusse, mis tegi võimalikuks võrrandite lahendi kvalitatiivse analüüsi. Näitasime, et vaadeldaval juhul kirjeldab valguse polarisatsiooni teisendust 2x2 unitaarne unimodulaarne maatriks. Selle maatriksi omadustest tulenes, et peavad eksisteerima kaks omavahel risti olevat langeva valguse polarisatsiooni suunda, mille puhul ka objektist väljuv valgus on lineaarselt polariseeritud. Neid suundi hakkasime nimetama vastavalt primaarseteks ja sekundaarseteks karakteristlikeks suundadeks (joonis 2) [Aben, Saks, 1960; Aben, 1966, 1979].

Tegelikult olime karakteristlikud suunad eksperimentaalselt juba üles leidnud. Selleks kasutasime polariskoopi, mille polarisaator ja analüsaator olid autonoomselt pööratavad. Stabiilsuse kaotanud plaadi läbivalgustamisel õnnestus meil alati leida selline polarisaatori asend, mille puhul analüsaator teatud asendis summutas täielikult objektist väljuva valguse. Samal ajal oli ilmne, et hüpotees peapingete ja polarisatsioonitasandi koos pöördumisest ei pea paika.

Tegelikult toimus mõnikord näiline polarisatsioonitasandi pöördumine peapingete pöördumise suhtes koguni vastassuunas. Seega olime karakteristlike suundade eksisteerimise eksperimentaalselt tuvastanud ning unitaarsete unimodulaarsete maatriksite teooria andis võimaluse nende eksisteerimist ka matemaatiliselt tõestada.

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

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

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

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

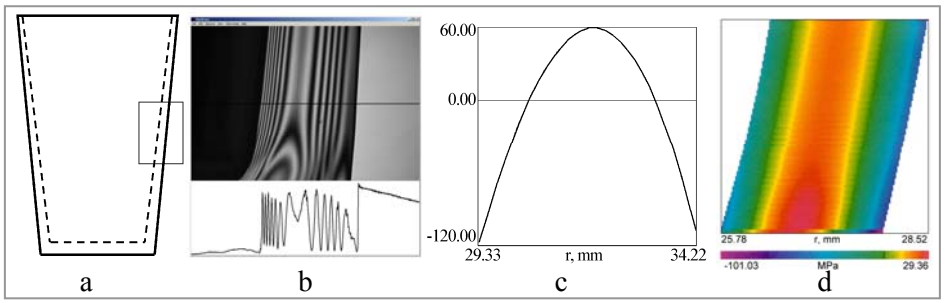
AUTOMAATPOLARISKOOP

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

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

Üks levinumaid AP-07 kasutusalasid on jääkpingete määramine karastatud joogiklaasides integraalse fotoelastsusmeetodi abil, kus suurte jääkpingete

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



Joonis 3.
Joogiklaasi geomeetria (a), füüsikaline ja digitiseeritud interferentsribade pilt (b), pingejaotus lälbi klaasi paksuse ühes lõikes (c) ja pingeväli uuritud piirkonnas (d).

Joonis 4.
Automaatpolariskoop AP-07. Immersiooni-vannis on mõõdetav pudel.

Juhul kui klaasi pinged on madalad ja interferentsribade arv on väike, võimaldab polariskoop teostada karakteristliku suuna ja optilise faasinihke mõõtmist faasisammude meetodil. Selle realiseerimiseks sisaldab polariskoobi optiline blokk karusselli kuue optilise elemendiga, mis on veerandlaineplaatide ja polaroidide erinevad kombinatsioonid. Karusselli pööramisega samm-mootori abil saab neid elemente ühekaupa asetada valgusallika ette objektile langeva valguse polarisatsiooni modifitseerimiseks, mida ongi vaja faasisammude meetodi realiseerimiseks. Polariskoobis on kasutusel originaalne faasisammude meetodi versioon, mis määrab üheselt ka esimese peapinge suuna [Aben jt, 1999].

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

HÜBRIIDMEHAANIKA

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

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

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

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

Summareegli üldistamisel lähtusime termoelastsuse võrranditest telgsümmeetrilise pingeoleku juhul. Kui teljesuunaline pingegradient puudub, saab nendest võrranditest temperatuuri elimineerida ning tuletada klassikalise summareegli.

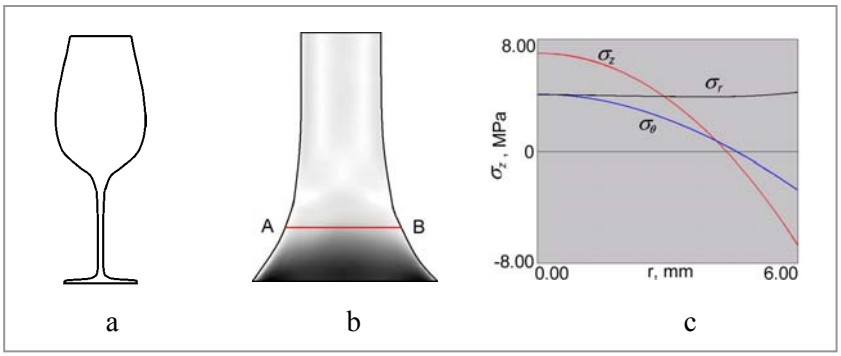
Selgus, et termoelastsuse võrranditest saab temperatuuri elimineerida ka siis, kui teljesuunaline pingegradient on nullist erinev. Sel juhul avaldub üldistatud summareegel kujus [Ainola, Aben, 2000, 2004c, 2008]

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

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

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

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



Joonis 5.
Veiniklaasi geomeetria (a), interferentspilt klaasi jala alumises osas (b) ja pingekomponentide jaotus lõikes AB (c).

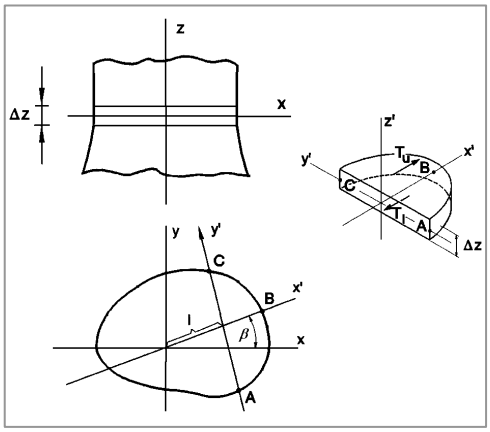
FOTOELASTSUSTOMOGRAAFIA

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

võib olla näiteks röntgenkiirte neeldumiskoefitsient, akustiline murdumisnäitaja jne. Integraalses fotoelastsuses püüame me määrata pingevälja. Pinge on aga tensor, mis igas välja punktis on määratud 6 skalaariga. Seega on integraalne fotoelastsus sisuliselt tensorvälja tomograafia, mis võrreldes skalaarvälja tomograafiaga, mille teooria on hästi läbi töötatud, on oluliselt keerukam.

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

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



Joonis 6.
Fotoelastsustomograafia üldine skeem.

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

$$V_1 = \Delta \cos 2\varphi = C \int \sigma_{z'} - \sigma_{x'})\mathrm{d}y', \qquad (3)$$

$$V_2 = \Delta \sin 2\varphi = 2C \int \tau_{x'z'} \mathrm{d}y'. \qquad (4)$$

Valemist (3) saame elimineerida $\sigma_{x'}$, kasutades segmendi ABC tasakaalutingimust

$$\Delta z \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{C}} \sigma_{x'} \mathrm{d}y' = T_{\mathrm{u}} - T_{\mathrm{l}}, \tag{5}$$

kus T_{u} and T_{l} avalduvad seostega

$$T_{\mathrm{u}} = \frac{1}{2C} \int_{l}^{\mathrm{B}} V_2' \mathrm{d}x', \qquad T_{\mathrm{l}} = \frac{1}{2C} \int_{l}^{\mathrm{B}} V_2 \mathrm{d}x' \tag{6}$$

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

Tasakaalutingimus (5) võtab nüüd kuju

$$\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{C}} \sigma_{x'} \mathrm{d}y' = \frac{1}{2C\Delta z} \left(\int_{l}^{\mathrm{B}} V_2' \mathrm{d}x' - \int_{l}^{\mathrm{B}} V_2 \mathrm{d}x' \right). \tag{7}$$

Asetades seose (7) valemisse (3), saame

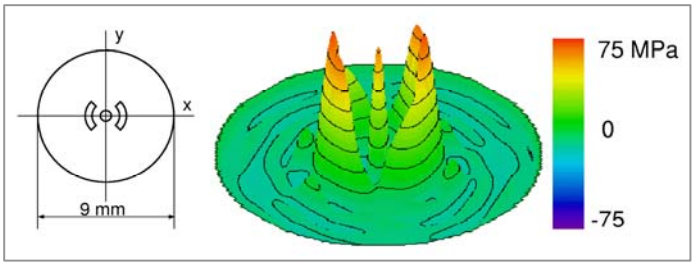
$$\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{C}} \sigma_{z'} \mathrm{d}y' = \frac{V_1}{C} + \frac{1}{2C\Delta z} \left(\int_{l}^{\mathrm{B}} V_2' \mathrm{d}x' - \int_{l}^{\mathrm{B}} V_2 \mathrm{d}x' \right). \tag{8}$$

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

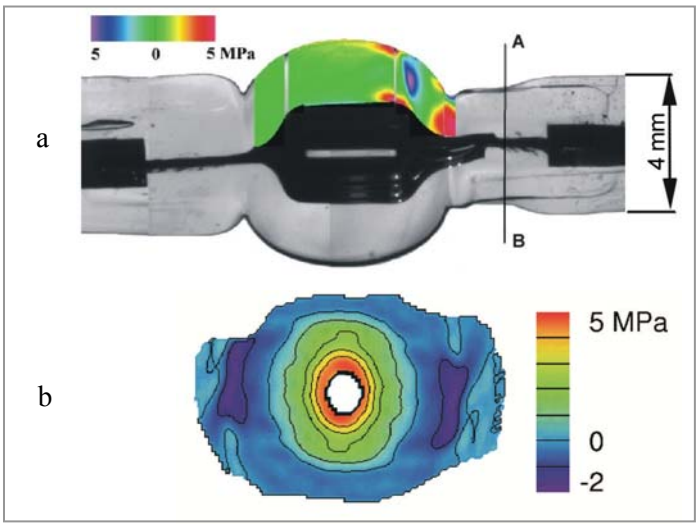
Fotoelastsustomograafia mõõtmiste automatiseerimiseks polariskoobis AP on konstrueeritud pöördeseade (joonis 7). Polariskoobis AP tagab seade fotoelastsusmõõtmised faasisammude meetodil objekti algasendi juures, pöörab seejärel objekti ümber vertikaaltelje etteantud nurga võrra, teostab jälle fotoelastsusmõõtmised,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

Joonis 7.
Pöördeseadme foto koos katsekehaga immersioonivannis.

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



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



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

RAKENDUSTEST

Meie esimene rakendustöö oli seotud Tallinna klaasitehasega „Tarbeklaas“ 1960ndatel aastatel. Tehas valmistas sel ajal suuremat partiid elektrilampide kahekihilisi armatuure. Nende armatuuride seesmine kiht oli valguse hajutamiseks valmistatud piimklaasist ning väline kiht läbipaistvast klaasist. Klaaside erineva keemilise koostise tõttu on sellisel juhul klaaside joonpaisumistegurid erinevad, mis võib viia armatuuride purunemiseni. Kihiliste klaastoodete joonpaisumistegurite sobitamine on üks klaasi tehnoloogi raskemaid probleeme. Meid kutsuti tehasesse probleemiga tutvuma, kus avanes üsna tööstitu pilt – tootmisliinilt tulid välja ainult killud.

Kahekihiliste armatuuride jääkpingete kontrollimiseks on klaasitööstuses kasutusel nn rõngaproov – armatuurist lõigatakse välja rõngas, mis lõigatakse ühes

kohas läbi. Kui lõikekoha otsad tõmbuvad teineteisest eemale, siis on välise klaasi joonpaisumistegur suurem kui seesmisel. Vastasel juhul on suurem seesmise klaasi joonpaisumistegur. Vilunud tehnoloog suudab hinnata klaaside sobivust rõngas tekkiva prao või jõu suuruse järgi, mis on vajalik rõnga vabade otste eemaldamiseks teineteisest. Muidugi on see meetod vaid kvalitatiivne.

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

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

Koos C. Guillemet'ga tõdesime, et kuigi on olemas meetodid jääkpingete mõõtmiseks nii lehtklaasis kui ka telgsümmeetrilistes klaastoodetes, ei tunne ega kasuta neid meetodeid klaasitööstus. Otsustasime nende meetodite tutvustamiseks korraldada suvekooli Rahvusvahelises Mehaanikauuringute Keskuses Udines, Itaalias. Ühenädalane suvekool leidiski aset 1992 aastal ja mängis ilmselt olulist rolli fotoelastsuse kaasaegsete meetodite propageerimisel klaasitehnoloogide seas. Samuti otsustasime koos C. Guillemet'ga kirjutada klaasi fotoelastsuse kohta raamatu, mis avaldati 1993 aastal Springeri kirjastuse poolt [Aben, Guillemet, 1993].

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

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

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

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

Firma Philips tellis meilt esimese automaatpolariskoobi 1998. aastal. Kineskoobi kaelatoru pingete kõrval oli tehasel probleeme ka pingetega kõrgsurveelektrilampides ja teistes klaastoodetes. Tänaseks on firma meilt tellinud kaks automaatpolariskoopi ning mitmed firma insenerid on osa võtnud meie klaasi pingete suvekoolidest.

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

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

Kuivõrd polariskoopide üsna ulatuslik valmistamine ja müük ei mahu hästi ühe ülikooli uurimisinstituudi tegevuse raamidesse, siis lõime 2003 aastal osaühingu GlasStress klaasi pingete mõõtmise aparatuuri valmistamiseks ja turustamiseks. Praegu valmistab see osaühing aparatuuri ka karastatud lehtklaasi (arhitektuurilise klaasi) ja autoklaaside jääkpingete kontrollimiseks.

LÕPETUSEKS

Teaduse saavutuste juurutamisel praktikasse on põhimõtteliseks küsimuseks, kui lähedale rakendusele peab minema teadlane. Küllalt levinud on seisukoht, et teadlase kohus on publitseerida ja seega teha üldsusele teatavaks oma uued tulemused. See, kes leiab, et need tulemused on praktikas rakendatavad, võib siis neid tulemusi praktika suunas arendada. Elu näitab, et see skeem ei taha töötada. Reeglina teab teadlane ise kõige paremini, kuidas saadud tulemust saaks praktikas rakendada. Selleks on aga vaja teha täiendavat tööd, mis teadlasele sageli ei meeldi – koostada rakendusalgoritme, arvutusprogramme, konstrueerida aparatuuri, jne. Praktikud ei ole reeglina võimelised lugema teaduslikest artiklitest välja seda, mida nad just oma spetsiifilise probleemi lahendamiseks vajavad. Teiseks, ärgem tehkem illusioone – praktikutel ei ole aega lugeda teaduskirjandust vähegi laiemalt kui nende kitsas eriala. Klaasi tehnoloogid on reeglina keemikud, kelle teadmised pingetest ja optikast on üsna pinnapealsed. Kui olime C. Guillemet'ga avaldanud raamatu klaasi fotoelastsusest [Aben, Guillemet, 1993], ootasime, et nüüd hakkavad klaasifirmad meie poole pöörduma ja tellima ühele või teisele probleemile lahendusi. Ei midagi sellist. Huvi meie mõõtmismeetodi vastu tekkis alles siis, kui me koolitustel lisaks loengutele demonstreerisime reaalselt töötavat aparatuuri, näidates kui lihtne on seda käsitseda ja saada tehnoloogile vajalikku informatsiooni.

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

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

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

KIRJANDUS

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

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

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

Aben, H. (1986a). Characteristic directions in optics of twisted birefringent media. J. Opt. Soc. Am., A3, 1414-1421.

Aben, H. (1986b). Integrated photoelasticity as tensor field tomography. Proc. Int. Symp. Photoelasticity (Tokyo, 1986). Springer-Verlag, Tokyo, 243-350.

Aben, H. (2007). On the role of T. J. Seebeck in the discovery of the photoelastic effect in glass. Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., 13, 283-294.

Aben, H. (2008). Ühest Thomas Johann Seebecki laineid löönud avastusest optikas. Akadeemia, 20, 2240-2254.

Aben, H., Ainola, L. (1998). Interference blots and fringe dislocations in optics of twisted birefringent media. J. Opt. Soc. Am. A, 15, 2404-2411.

Aben, H., Ainola, L. (2000). Isochromatic fringes in photoelasticity. J. Opt. Soc. Am. A. 17, 750-755.

Aben, H., Ainola, L., Anton, J. (1999). Half-fringe phase-stepping with separation of the principal stress directions. Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., 5, 198-211.

Aben, H., Anton, J., Errapart, A. (2002). Residual stress measurement in axisymmetric glass articles. Glass Technol., 43C, 278-282.

Aben, H., Anton, J., Errapart, A. (2003). Automatic measurement of residual stress in glass articles of complicated shape. Verre, 9, 44-49.

Aben, H., Anton, J., Errapart, A. (2008). Modern photoelasticity for residual stress measurement in glass. Strain, 44, 40-48.

Aben, H., Errapart, A., Ainola, L., Anton, J. (2005). Photoelastic tomography for residual stress measurement in glass. Opt. Eng., 44, 93601, 1-8.

Aben, H., Guillemet, C. (1993). Photoelasticity of Glass. Springer, Berlin.

Aben, H., Josepson, J. (1997). Strange interference blots in the interferometry of inhomogeneous birefringent objects. Appl. Opt., 36, 7172-7179.

Aben, H., Josepson, J., Kell, K.-J. (1989). The case of weak birefringence in integrated photoelasticity. Opt. Lasers Eng., 11, 145-157.

Aben, H., Saks, E. (1960). Optical phenomena by investigating shells. Polarization-optical method for stress analysis. Leningrad University, 208-221.

Ainola, L., Aben, H. (1999). Duality in optical tehory of twisted birefringent media. J. Opt. Soc. Am. A, 16, 2545-2549.

Ainola, L., Aben, H. (2000). Hybrid mechanics for axisymmetric thermoelasticity problems. J. Thermal Stresses, 23, 685-697.

Ainola, L., Aben, H. (2004a). On the optical theory of photoelastic tomography. J. Opt. Soc. Am. A, 21, 1093-1101.

Ainola, L., Aben, H. (2004b). Theory of magnetophotoelasticity with multiple reflections. J. Opt. A: Pure Appl. Opt., 6, 51-56.

Ainola, L., Aben, H. (2004c). A new relationship for the experimental-analytical solution of the axisymmetric thermoelasticity problem. ZAMM, 84, 211-215.

Ainola, L., Aben, H. (2005). Principal formulas of integrated photoelasticity in terms of characteristic parameteres. J. Opt. Soc. Am. A, 22, 1181-1186.

Ainola, L., Aben, H. (2008). Approximate solution of the inverse problem of axisymmetric thermoelasticity for residual stress measurement in glass. J. Thermal Stresses, 31, 165-175.

Anton, J. (2002). Automatic fringe analysis in tempered axisymmetric glass. Proc. BSSM Int. Conf. Advances in Experimental Mechanics. Stratford-upon-Avon, 17-20.

Anton, J., Errapart, A., Aben, H. (2004). Measurement of tempering stresses in axisymmetric glass articles. Int. J. Forming Processes, 7, 543-554.

Bartenev, G. M. (1970). The structure and mechanical properties of inorganic glasses. Wolters-Nordhoff Publ., Groningen.

Brewster, D. (1815). On the effects of simple pressure in producing that species of crystallization which forms two oppositely polarized images, and exhibits the complementary colours by polarized light. Phil. Trans. Roy. Soc. London, 105, 60-64.

Errapart, A. (2008). On the technology of photoelastic tomography. Exp. Techniques, 32, 31-35.

Poincaré, H. (1892). Théorie mathématique de la lumière. Carré et Naud, Paris.

Seebeck, T. J. (1813). Einige neue Versuche und Beobachtungen über Spiegelung und Brechung des Lichtes. J. für Chem. Phys., 7, 259-298.

Seebeck, T. J. (1814). Von den entoptischen Farbenfiguren und den Bedingungen ihrer Bildung in Gläsern. J. für Chem Phys., 12, 1-16.

Sharafutdinov, V. A. (1994). Integral Geometry of Tensor Fields. VSP, Utrecht.

Teaduspreemia täppisteaduste alal uurimuste tsükli "Magnetiline ühismõõdutus, pseudopilud ja faaside eraldumine vaskperovskiitides" eest

Aleksei Šerman

Sündinud 17.02.1950 Kiievis

1967	Kiievi 145. Keskkool
1972	Tartu Ülikool, teoreetiline füüsika
1979	füüsika-matemaatikakandidaat, Tartu Ülikool
1989	füüsika-matemaatikadoktor, Tartu Ülikool
1972–1974	Võru Gaasianalüsaatorite Tehase insener

Alates 1974 Eesti Teaduste Akadeemia (praegu TÜ) Füüsika Instituudi assistent, teadur, vanemteadur, tahkiseteooria labori juhataja

Avaldanud üle 120 teadusartikli.

Tugevate elektronkorrelatsioonidega kristallid on tänapäeval üheks kristallide füüsika tsentraalsetest uurimisobjektidest. Huvi nende vastu on äratanud esmajoones selliste ühendite tehnoloogiliste rakenduste paljutõotavad perspektiivid. Sellesse kristallide klassi kuuluvad vaskperovskiidid oma iseloomulike ülijuhtivusele ülemineku rekordtemperatuuridega, mis on juba kasutusel energiaülekande ülijuhtliinidel. Samuti kuuluvad siia raskefermionilised ja madalamõõtmelised orgaanilised elektrijuhid, millel on laialdased võimalused laengukandjate liikuvuse reguleerimiseks heterostruktuurides. Üldiselt on tugevate elektronkorrelatsioonidega süsteemid pälvinud uurijate tähelepanu terve rea ebatavaliste omaduste tõttu, mida ei leidu nõrkade korrelatsioonidega kristallides. Nende omaduste hulka kuuluvad kristallide magnetilised ja transpordiomadused, sealhulgas ka kõrgtemperatuurne ülijuhtivus.

Tugevalt korreleeruvate süsteemide teoreetiline kirjeldamine on aga seotud oluliste raskustega, sest selle ala põhimudelid kuuluvad tahkiseteooria keerulisemate hulka ja nende uurimiseks on vaja välja töötada uusi lähenemisviise. Siin käsitletavate tööde tsüklis on arendatud ja kasutatud kaht niisugust meetodit: ortogonaaloperaatorite meetod [Sherman, Schreiber, 2002], mis on Mori meetodi [Mori, 1965] variant, ja tugeva seose diagrammtehnika [Sherman, 2006a]. Käsitlen lühidalt mõlemat meetodit.

Erinevalt tavalisest häiritusteooria situatsioonist, kus hamiltoniaani väikese liidetava rollis esineb potentsiaalne energia, on tugevate elektronkorrelatsiooni-

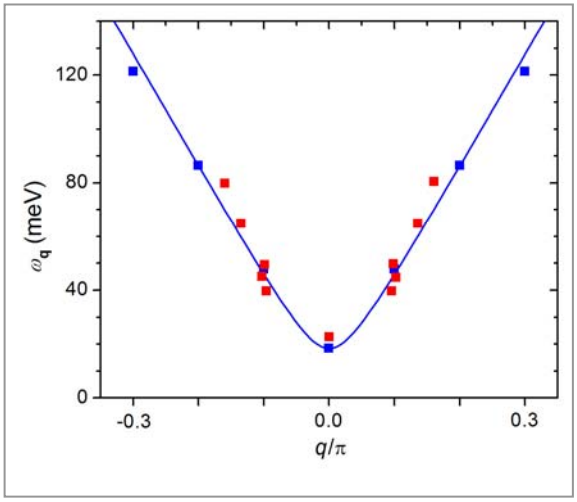
dega süsteemis niisuguse väikese suurusena elektronide kineetiline energia ja järelikult toimub häiritusteooria reaksarendus selle energia astmete järgi. Selle rea elemendid sisaldavad mitte lihtsaid Green'i funktsioone, nagu tavalises reaksarenduses, vaid elektronoperaatorite kumulante (poolinvariante). Nii nagu tavalises diagrammtehnikas, lubab kumulantarenduse baasil ehitatud diagrammtehnika osalist summeerimist. See annab võimaluse esitada rea kompaktselt võrrandi kujul, mis on sarnane Larkini võrrandiga ferromagnetismi teoorias [Izyumov, Skryabin, 1988]. See ongi tugeva seose diagrammtehnika. Nagu ülalkirjeldatust järeldub, on see lähenemisviis sobiv tugevate elektronkorrelatsioonide puhul. Ortogonaaloperaatorite meetodil on laiem kasutusala. See meetod on tegelikult rakendusmatemaatikas laialt kasutatud Lanczos'i algoritmi üldistus. Erinevalt Lanczos'i algoritmist [Cullum, Willoughby, 1985], kus ortogonaliseerimise protseduur teostatakse olekuvektoritega, ortogonaaloperaatorite meetodis rakendatakse seda protseduuri operaatorite ruumis. Hoolimata sellest erinevusest näevad kolmeliikmelised rekurrentsed võrrandid, mis kirjeldavad neid ortogonaliseerimise protseduure, välja täiesti identsetena [Sherman, 1987]. Nende rekurrentsvõrrandite koefitsiendid, mis määratakse ortogonaliseerimise protseduuride käigus, on samaaegselt Jakobi ahelmurdude koefitsientideks ja need ahelmurrud kujutavad endast vastavaid Green'i funktsioone – nulltemperatuurilist Lanczos'i algoritmi puhul ja lõplike temperatuuride omi ortogonaaloperaatorite meetodi puhul. Ortogonaliseerimise protseduuri eelis häiritusteooria ridadega võrreldes on selles, et, nagu teada Padé aproksimantide teooriast, ahelmurru koonduvuse raadius on harilikult märksa suurem kui vastava astmerea koonduvuse raadius. Samuti mängib väga olulist rolli siin too fakt, et ortogonaliseerimise protseduurides omavad kõige kiirema koonduvuse omaenergiad süsteemi spektriservade juures, mis tavaliselt pakuvadki kõige suuremat huvi. Seega harilikult on piisav teostada vaid mõned ortogonalisatsiooni protseduuri sammud, et saada küllalt täielikku kujutlust süsteemide spektri kõige tähtsamate iseärasuste kohta.

Ülaltoodud teoreetilise uurimise meetodid võimaldavad vajalikul määral võtta käsitletavates süsteemides arvesse tugevaid elektronkorrelatsioone. Nagu allpool demonstreeritakse, võimaldab see ühtses käsitluses seletada terve rea eksperimentaalseid fakte tugevate elektronkorrelatsioonidega kristallide magnetiliste ja spektraalsete omaduste kohta. Mudelsüsteemidena kasutati arvutustes t-J mudelit, ühe- ja mitmetsoonilisi Hubbardi mudeleid, mis kirjeldavad laengukandjate ja magnetmomentide liikumist CuO_2 tasandites vaskperovskiitides.

Nende kristallide magnetomadusi iseloomustab terava maksimumi – resonantspiigi – olemasolu magnetilises vastuvõtlikkuses. See asub antiferromagnetilise korrastuse lainevektoril. Piigi sagedus kasvab dopeerimisega ja optimaalsel dopeerimisel – laengukandjate kontsentratsioonil $x \approx 0{,}15$ – saavutab maksimumsuuruse 50 meV. Ülal- ja allpool seda sagedust lõheneb piik neljaks maksimumiks, mille asupaigad Brillouin'i tsoonil aina enam eemalduvad anti-

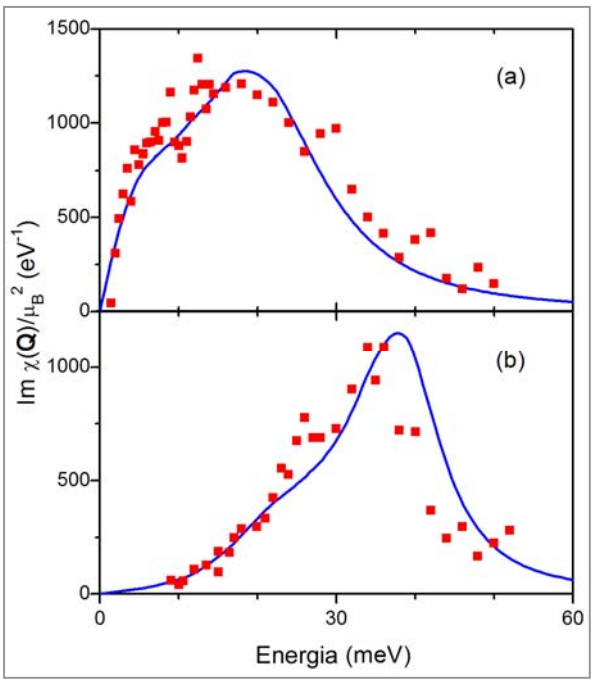
ferromagnetilise korrastuse lainevektorist. Seega meenutab maksimumide dispersioon magnetilises vastuvõtlikkuses liivakella, kus kitsaskoha rolli mängib resonantspiik. Maksimumide tekkimist vastuvõtlikkuses lainevektoritel, mis erinevad antiferromagnetilise korrastuse lainevektorist, nimetatakse magnetiliseks ühismõõdutuseks.

Seletuse sellele ebatavalisele käitumisele saab magnetiliste ergastuste spektri analüüsist tugevate elektronkorrelatsioonidega süsteemis. Nagu teada, tänu Andersoni supervahetuse mehhanismile [White, 1983], on see süsteem antiferromagnetiliselt korrastatud. Antiferromagnetilise kaugkorrastuse puhul magnetilisel ergastusel lainevektoriga, mis on võrdne antiferromagnetilise korrastuse lainevektoriga, on energiaväärtus null. Siiski, nagu näitab eksperiment, vabade laengukandjate ilmumisel asendub antiferromagnetiline kaugkorrastus lähikorrastusega. Sealjuures, nagu näha jooniselt 1, nimetatud lainevektoriga magnetilise ergastuse sagedus on lõplik. Saab näidata [Sherman, Schreiber, 2003a], et avaneva magnetilise pilu suurus on otseselt seotud antiferromagnetilise lähikorrastuse korrelatsioonipikkusega.



Joonis 1.
Magnetiliste ergastuste dispersioon, mida arvutati laengukandjate kontsentratsiooni $x \approx 0{,}06$ jaoks [Sherman, Schreiber, 2003a] (sinised ruudukesed ja joon) ja maksimumide dispersioon magnetilises vastuvõtlikkuses kristallis $YBa_2Cu_3O_{6,5}$ ($x \approx 0{,}07$) [Bourges, 1998] (punased ruudukesed). Lainevektor q=0 vastab siin antiferromagnetilise korrastuse lainevektorile.

Võrdlus joonisel 1 toodud eksperimendiga näitab head kooskõla teooria ja neutronhajumise eksperimendi vahel. Sellest võrdlusest järgneb, et resonantspiik on magnetilise pilu läheduses olevate ergastuste ilmutus ja tema lõhustamine, kui sagedus ületab pilu sageduse, kajastab magnetiliste ergastuste dispersiooni. Seega esitab teooria õigesti mitte ainult pilu evolutsiooni temperatuuri ja dopeerimisega, vaid ka resonantspiigi kuju muutmist nende parameetrite varieerimisel. Teoreetilise magnetilise vastuvõtlikkuse võrdlemine eksperimendiga, mis demonstreerib seda fakti, on toodud joonisel 2.

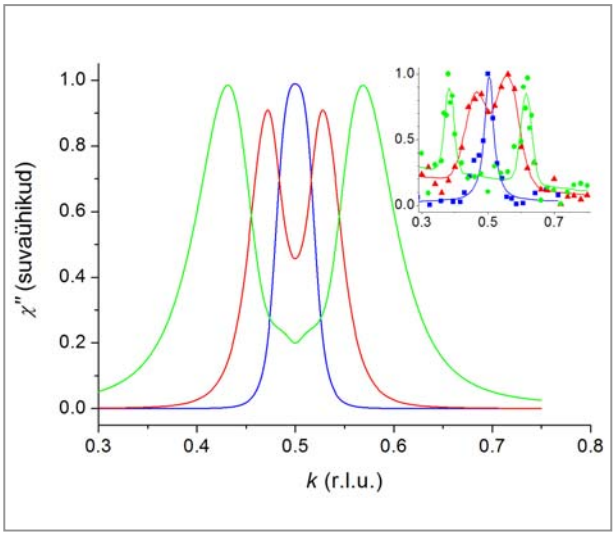


Joonis 2.
Magnetilise vastuvõtlikkuse imaginaarne osa antiferromagnetilise korrastuse lainevektoril ülijuhtivuse seisus. Pidevad sinised jooned demonstreerivad arvutuste tulemusi kontsentratsioonide $x \approx 0{,}06$ (a) ja $x \approx 0{,}12$ (b) jaoks [Sherman, Schreiber, 2003a], punased ruudukesed on eksperimentaalandmed kristallides $YBa_2Cu_3O_{6.5}$, $x \approx 0{,}07$ (a) ja $YBa_2Cu_3O_{6,83}$, $x \approx 0{,}14$ (b) [Bourges, 1998].

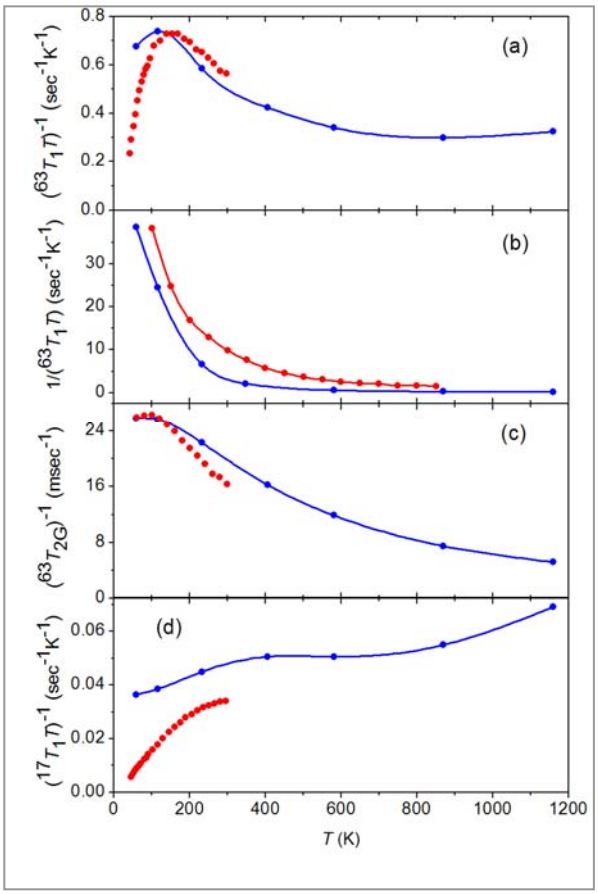
Niisiis, magnetiliste ergastuste teooria tugevate korrelatsioonidega süsteemides pakub lihtsa interpretatsiooni resonantspiigile ja magnetilisele ühismõõdutusele sageduste jaoks, mis ületavad piigi sagedust. Seesama teooria seletab ka ühismõõdutuse mehhanismi sagedustel alla piigi sagedust [Sherman, Schreiber, 2004, 2007ab]. Madalatel sagedustel määratakse magnetilise vastuvõtlikkuse impulss-sõltuvus magnetiliste ergastuste sumbumisega. Viimasel on terav miinimum antiferromagnetilise korrastuse lainevektori juures, kuna protsessi efektiivsus, milles magnetergastus laguneb elektron-aukude paarideks, on sellel alal anomaalselt väike. Tulemusena lõhestub madalatel sagedustel ühismõõduline piik vastuvõtlikkuse impulss-sõltuvuses neljaks ühismõõdutuks maksimumiks. See lõhestumine on näha joonisel 3, kus demonstreeritakse magnetilise vastuvõtlikkuse käitumist madalatel sagedustel ja erinevatel laengukandjate kontsentratsioonidel. Joonisel on näha ainult kahte neljast maksimumist. Lõhestumise suurus kasvab laengukandjate kontsentratsiooni kasvuga ja küllastub kontsentratsioonil $x \approx 0{,}12$. Nagu näha joonise 3 sisejoonisest, vastab see käitumine täielikult eksperimentaalselt vaadeldud käitumisele.

Peale neutronhajumise iseärasuste peegeldub magnetergastuste spektraalpilu käitumine ka teistes ebatavalistes magnetomadustes tugevalt korreleeruvatel süsteemidel. Joonisel 4 on toodud spinn-võre relaksatsiooni ja spinnkaja sumbumise kiiruste temperatuurseid sõltuvusi vase ja hapniku sõlmedel, mis saadi meie arvutustes [Sherman, Schreiber, 2003b] ja eksperimentaalselt kristallides

Joonis 3.
Magnetilise vastuvõtlikkuse imaginaarse osa sõltuvus lainevektorist sageduse 2 meV jaoks. Sinine, punane ja roheline joon vastab laengukandjate kontsentratsioonidele $x \approx 0{,}015$, 0,06 ja 0,12, vastavalt [Sherman, Schreiber, 2007]. Sisejoonisel on eksperimentaalandmed kristallis $La_{2-x}Sr_xCuO_4$, mis on saadud samadel kontsentratsioonidel ja kujutatud samade värvidega [Yamada jt, 1998].

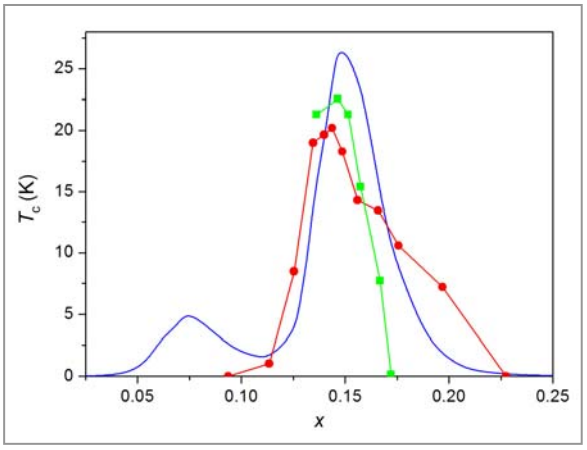


Joonis 4.
Spinn-võre relaksatsiooni ja spinn-kaja sumbumise kiiruste temperatuurilised sõltuvused vase (a–c) ja hapniku (d) sõlmedel. Punased ringikesed on eksperimentaalandmed kristallides $YBa_2Cu_3O_{6,63}$ ($x \approx 0.1$, a ,c, d) [Takigawa jt, 1991; Takigawa, 1994] ja $La_{1,96}Sr_{0,04}CuO_4$ (b) [Imai jt, 1993]. Sinised ringikesed ja jooned on meie arvutustulemused vastavate laengukandjate kontsentratsioonide jaoks.



$YBa_2Cu_3O_y$ ja $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ [Takigawa jt, 1991; Imai jt, 1993; Takigawa, 1994]. Magnetiline vastuvõtlikkus nende parameetrite jaoks arvutati samade meetoditega, mida kasutati eeltoodud neutronhajumise puhul. Tähelepanu väärib hea teooria ja eksperimendi kooskõla parameetrite jaoks, mis määratakse erinevate aladega magnetergastuste spektris. Pöörame tähelepanu spinn-võre relaksatsiooni kiiruse mittemonotoonsele sõltuvusele vase sõlmel, mis tänu vase formfaktorile määratakse vastuvõtlikkusega antiferromagnetilise korrastuse lainevektori ümbruses. Madalatel temperatuuridel madalasageduslik vastuvõtlikkus sellel alal alul kasvab temperatuuri kasvades vastuvõtlikkuse maksimumi laienemise tõttu ja seejärel väheneb pilu kasvu tõttu. See mittemonotoonsus peegeldub osutatud kiiruse temperatuurisõltuvuses.

Saadud andmeid magnetilise vastuvõtlikkuse kohta kasutati ka ülijuhtivusele ülemineku temperatuuri arvutuse jaoks n-tüüpi vaskperovskiitides [Korshunov jt, 2004]. Oletati, et laengukandjate paardumine teostatakse spinnfluktuatsioonidega. Arvutusi teostati mitmetsoonilise Hubbardi mudeli raames, mille parameetrid defineeriti võrdlusest käsitletud kristallide fotoemissioonspektritega. Arvutuste tulemused ja eksperimentaalandmed [Luke jt, 1990; Peng jt, 1997] on toodud joonisel 5. Eksperimentaalsete ja teoreetiliste tulemuste hea kooskõla osutab sellele, et spinnfluktuatsioonid mängivad olulist rolli ülijuhtivusele üleminekul vaskperovskiitides.

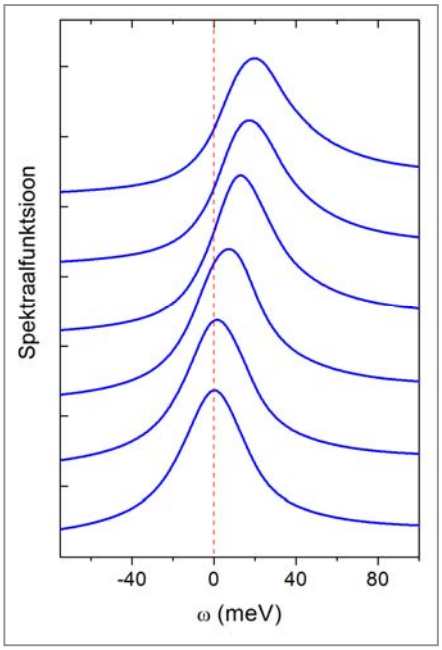


Joonis 5. Ülijuhtivusele ülemineku temeratuuri sõltuvus dopeerimisest n-tüüpi vaskperovskiitides. Sinine joon on arvutuse tulemus [Korshunov jt, 2004], punased ringikesed ja joon ning rohelised ruudukesed ja joon on eksperimentaalandmed kristallides $Pr_{2-x}Ce_xCO_4$ ja $Nd_{2-x}Ce_xCO_4$, vastavalt [Luke jt, 1990; Peng jt, 1997].

Tugevate korrelatsioonidega süsteemide spektraalsetel omadustel on samuti rida iseärasusi, mis eristavad neid tavalistest metallidest. Üheks nende kõige eredamaks iseärasuseks on pseudopilu, mida vaadeldakse vaskperovskiitide fotoemissioonispektrites normaalses seisundis [Damascelli jt, 2003]. Kui tavalisel metallil fotoemissioonispektri esiserv ületab Fermi nivoo, kus lainevektor läheneb Fermi pinnale, siis vaskperovskiitidel Fermi pinna osa lainevektorite $(\pm\pi,0)$, $(0,\pm\pi)$ läheduses justkui kaob: fotoemissioonispektri esiserv eemaldub Fermi nivoolt, kui lainevektor läheneb nendele aladele (siin ja allpool kasu-

tatakse kahemõõtmelisi tähistusi lainevektorite jaoks, sest vaadeldakse laengukandjaid, mis on lokaliseeritud vaskperovskiitide CuO_2 tasandites). Kuna spektraaltihedus Fermi nivool jääb sealjuures lõplikuks, on see nähtus saanud spektraalse pseudopilu nimetuse. Rõhutame, et jutt on kristalli normaalseisundist. Ülijuhtivusele üleminekul avatakse ülijuhtivuspilu spektraalse pseudopilu sees. Sealjuures osutub, et mõlemad pilud on sama d-tüüpi sümmeetriaga. Seda fakti interpreteeriti nagu osutamist pilude sarnasele iseloomule – oletati, et pseudopilu tekib ülijuhtivate fluktuatsioonide tagajärjel, mis, erinevalt ülijuhtivast faasist, ei oma kaugkorrastust. Selle kõrval vaadeldakse ka mehhanismi, mis seob pseudopilu tekkimise laengukandjate ja magnetiliste ergastuste vastastikmõjuga. Praegusajal ilmselt on saavutatud konsensus, et nimelt see mehhanism on vastutav fotoemissiooni pseudopilu eest.

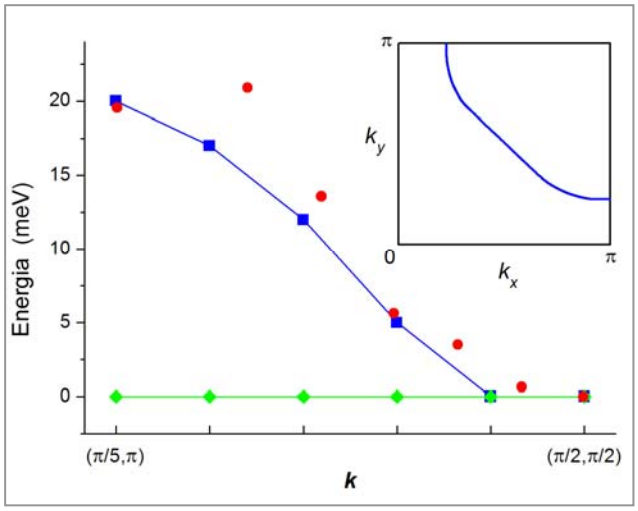
Meie arvutuste järgi [Sherman, Schreiber, 1997, 1999; Sherman, 2006b] toimub see järgmiselt: tugevate korrelatsioonidega süsteemi dopeerimisega tekivad uued laengukandjate seisundid, mis moodustavad kitsa tsooni Fermi nivoo lähedal – niinimetatud spinn-polaronilise tsooni. Mõõdukatel laengukandjate kontsentratsioonidel eksisteerib see koos märksa laiemate Hubbardi tsoonidega, mille spektraalintensiivsus on tunduvalt väiksem. Seega just spinn-polaronilise tsooni dispersioon määrab fotoemissioonispektri esiserva käitumise. Sellel dispersioonil on rida ebatavalisi iseärasusi. Lainevektorite ($\pm\pi/2$, $\pm\pi/2$) läheduses on see tsoon surutud vastu Fermi nivood ja aukude pildil kõverdub ülespoole energiaskaalal, mille juures lainevektor nihkub lainevektorite ($\pm\pi$,0), (0,$\pm\pi$) suunas. Koos tsooniga nihkub ülespoole ka fotoemissioonispektri esiserv. Seda situatsiooni selgitab joonis 6.



Joonis 6.
Laengukandjate spektraalfunktsioon Fermi pinna lähedaste lainevektorite (0,2 π, π), (0,2π, 0,9π), (0,2π, 0,8π), (0,3π, 0,7π), (0,4π, 0,6π) ja (0,5π, 0,5π) jaoks (ülevalt allapoole) temperatuuril T=116K ja laengukandjate kontsentratsioonil $x \approx 0{,}12$ [Sherman, Schreiber, 1999]. Fermi nivoole vastab sagedus ω=0 (punane kriipsjoon).

Rõhutame, et madalaintensiivne Hubbardi tsoon siiski ületab Fermi nivood lainevektorite ($\pm\pi$,0), (0,$\pm\pi$) läheduses, mida saab vaadelda parema lahutuse-ga kui joonisel 6 [Sherman, Schreiber, 1999, 2001]. Kuid eksperimentaalselt saavutatava lahutusega situatsioon näeb välja niimoodi, et Fermi pind sellel alal justkui kaob. Pseudopilu, mis tekib arendatud teoorias, on d-tüüpi sümmeetriaga, nagu eksperimendis.

Arvutuses saadud [Sherman, Schreiber, 2001] fotoemissiooni esiserva asupaika võrreldakse eksperimendiga [Ding jt, 1996] joonisel 7. Nii eksperimentaalsed kui ka teoreetilised andmed sellel joonisel kuuluvad normaalseisundile. Hea kooskõla nende tulemuste vahel osutab sellele, et magnetergastusega interaktsiooni mehhanism mängib otsustavat rolli pseudopilu moodustumisel. Joonis 7 demonstreerib veel üht efekti, mis on kooskõlas ka eksperimendi andmetega: pseudopilu väheneb laengukandjate kontsentratsiooni kasvades ja kaob optimaalse kontsentratsiooni lähedal (vt andmeid kontsentratsiooni $x \approx$ 0,17 jaoks joonisel 7). Sealjuures tekib väga huvitav efekt: Fermi pinnal, mis vaadeldaval kahemõõtmelisel juhul peab olema ühemõõtmeline, moodustuvad kahemõõtmelised fragmendid [Sherman, Schreiber, 1997].

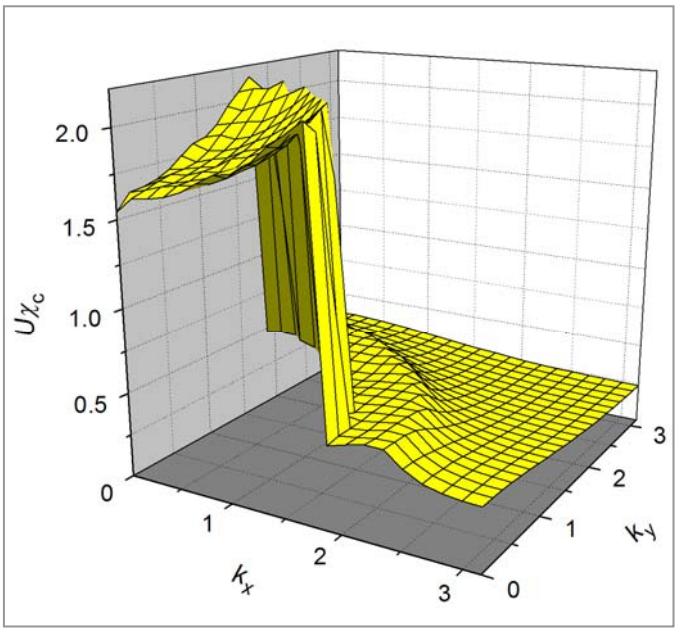


Joonis 7. Fotoemissioonispektri esiserva asupaik piki Fermi pinda, mis on kujutatud sisejoonisel. Arvutuste tulemused on näidatud sinise ($x \approx$ 0,12) ja rohelise ($x \approx$ 0,17) joonte ja sümbolitega. Eksperimentaalndmed kristallis Bi2212 kontsentratsioonil $x \approx$ 0,12 on näidatud punaste ringikestega.

Mõned tugevate elektronkorrelatsioonidega kristallid ilmutavad faaside kihistumist: vaskperovskiitide puhul jagunevad CuO_2 tasandid vahelduvateks kvaasiühemõõtmelisteks aladeks kas laengu või magnetmomendi kõrgendatud tihedustega [Tranquada jt, 1996]. Neid alasid nimetatakse vöötideks. Rõhutame, et hoopiski mitte kõik vaskperovskiidid ei ilmuta faaside kihistumist – vöödid on vaadeldavad ainult kristallides madalatemperatuurilise tetragonaalse faasiga. Seda faasi iseloomustab CuO_2 tasandite deformatsioon, mis on orienteeritud

piki kristallograafilisi telgi, ja hapniku ioonide paigutumine allapoole ja ülespoole tasanditest. See fakt viib mõttele, et kristallvõre võnkumised mängivad tähtsat rolli vöötide moodustumises.

Et seda mõista, on vaja arvutada tugevate korrelatsioonidega süsteemi laenguvastuvõtlikkust. Kui staatiline vastuvõtlikkus läheneb lõpmatusele teatud lainevektori ja temperatuuri väärtustel, siis osutab see kõrgema taseme korrastusega faasi tekkimisele, nagu see toimub magnetvastuvõtlikkusega antiferromagnetilise kaugkorrastuse kujunemisel antud süsteemis. Sel viisil on statsionaarsete vöötide (laengutiheduse laine) moodustamise indikaatoriks staatilise laenguvastuvõtlikkuse divergents. Vastuvõtlikkuse arvutused teostati Hubbardi ühetsoonilise mudeli jaoks [Sherman, Schreiber, 2008]. See mudel võtab arvesse ainult tugevad elektronkorrelatsioonid ja jätab arvestamata laengukandjate vastastikmõju kristallvõre võnkumistega. Vastuvõtlikkus osutus lõplikuks laias laengukandjate kontsentratsioonide vahemikus, mis vastab kontsentratsioonidele reaalsetes kristallides. See tulemus kõrvaldab puhtelektronilise mehhanismi statsionaarsete vöötide formeerimiseks. Kuid vastuvõtlikkuse sõltuvuses lainevektorist on olemas teravad maksimumid, mis osutavad selgepiirilistele laengufluktuatsioonidele. Nende fluktuatsioonide lainepikkus väheneb dopeerimise kasvades. Erilist huvi pakub juht, kui laengukandjate kontsentratsioon läheneb väärtusele $x = 0{,}12$. Staatiline vastuvõtlikkus sellel juhul on näidatud joonisel 8.



Joonis 8.
Staatiline laenguvastuvõtlikkus Brillouin'i tsooni esimeses kvadrandis laengukandjate kontsentratsioonil $x \approx 0{,}12$.

Vastuvõtlikkuse maksimumil on harja kuju, mis ümbritseb Brillouin'i tsooni keset. Dopeerimisega hari eemaldub tsooni keskmest. Kontsentratsioonil $x \approx 0{,}12$ osutub hari täpselt tsooni keskme ja tsooni piiri keskpaigal. See vastab laengutiheduse fluktuatsioonidele lainepikkusega, mis on võrdne nelja kristallvõre konstandiga. Laengutiheduse fluktuatsioonid toimivad efektiivselt vastastikku polaarvõnkumistega, kuhu kuuluvad ka madalatemperatuurse tetragonaalfaasi moonutused. Märgime, et staatiline laenguvastuvõtlikkus just kirjeldabki seda vastastikmõju ja vastuvõtlikkuse maksimum määrab võnkumiste lainepikkuse, millega elektrontiheduse fluktuatsioonid toimivad vastastikku kõige tugevamalt. See vastastikmõju viib miinimumide tekkimisele adiabaatilisel pinnal, milles asuvat süsteemi iseloomustatakse kristallvõre staatiliste moonutustega, mis vastavad madalatemperatuurilisele tetragonaalsele faasile, ja staatilise laengutiheduse lainega – vöötidega. Juht $x \approx 0{,}12$ paistab silma sellega, et moonutused ja vöödid on ühismõõdulised kristallvõre konstandiga, mis tagab nende suurema stabiilsuse. Sedaviisi stabiliseerivad selle arvutuse järgi vöödid ja madalatemperatuurilise tetragonaalse faasi moonutused teineteist. Arvutus võimaldas seletada nii vöötide ja selle faasi kooseksisteerimist kui ka vöötide vaadeldud perioodilisust – nelja kristallvõre konstanti.

Niisiis, ühtse lähenemisviisi raames õnnestus interpreteerida rea küllalt erilaadseid ja ebatavalisi omadusi tugevate elektronkorrelatsioonidega kristallides. Arendatud arvutusmeetodid lubasid vajalikul määral võtta arvese neid korrelatsioone. Hea kooskõla saadud teoreetiliste ja eksperimentaalsete tulemuste vahel osutab nende korrelatsioonide tsentraalsele rollile arutletud nähtustes.

Antud töö on tehtud Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi tahkiseteooria laboris. Avaldan tänu labori kaastöötajatele V. Fedoseevile, M. Haasile, V. Hižnjakovile, H. Kaasikule, P. Konsinile, N. Kristoffelile, I. Rebasele, P. Rubinile, O. Sillale, L. Sildosele, A. Šelkanile ja I. Tehverile toetuse ja mitmeaastase koostöö eest. Olen tänulik oma välismaalastest kolleegidele ja sõpradele M. Schreiberile (Saksamaa), S. Ovtšinnikovile ja M. Koršunovile (Venemaa) viljaka koostöö eest. Ülalkirjeldatud tööd teostati Eesti Teadusfondi (grandid nr 5548 ja 6918), Saksa Füüsika Seltsi ja Chemnitzi Tehnikaülikooli (Saksamaa) finantstoetusel.

KIRJANDUS

Baker, G. A., Jr., Graves-Morris, P. (1996). Padé Approximants. Cambridge U.P.

Bourges, P. (1998). From magnons to the resonance peak: Spin dynamics in high-temperature superconducting cuprates by the inelastic neutron scattering. Bok, J., Deutscher, G., Pavuna, D., Wolf, S. A. (eds). The Gap Symmetry and Fluctuations in High Temperature Superconductors. Plenum Press, New York, 349-371.

Cullum, J., Willoughby, R. A. (1985). Lanczos Algorithms for Large Symmetric Eigenvalue Computations. Birkhäuser, Boston.

Damascelli, A., Hussain, Z., Shen, Z.-X. (2003). Angle-resolved photoemission studies of the cuprate superconductors. Rev. Mod. Phys., 75, 473-541.

Ding, H., Yokoya, T., Campuzano, J. C., Takahashi, T., Randeria, M., Norman, M. R., Mochiku, T., Kadowaki, K., Giapintzakis, J. (1996). Spectroscopic evidence for a pseudogap in the normal state of underdoped high-T_c superconductors. Nature, 382, 51-54.

Imai, T., Slichter, C. P., Yoshimura, K., Kosuge, K. (1993). Low frequency spin dynamics in undoped and Sr-doped La_2CuO_4. Phys. Rev. Lett., 70, 1002-1005.

Izyumov, Yu. A., Skryabin, Yu. N. (1988). Statistical Mechanics of Magnetically Ordered Systems. Consultants Bureau, New York.

Korshunov, M. M., Ovchinnikov, S. G., Sherman, A. V. (2004). Effective Hamiltonian and properties of the normal and superconducting phases of n-type cuprates. JETP Lett., 80, 39-43.

Luke, G. M., Le, L. P., Sternlieb, B. J., Uemura, Y. J., Brewer, J. H., Kadono, R., Kiefl, R. F., Kreitzman, S. R., Riseman, T. M., Stronach, C. E., Davis, M. R., Tokura, Y., Hidaka, Y., Murakami, T., Gopalakrishnan, J., Sleight, A. W., Subramanian, M. A., Early, E. A., Markert, J. T., Maple, M. B., Seaman, C. L. (1990). Magnetic order and electronic phase diagrams of electron-doped copper oxide materials. Phys. Rev. B, 42, 7981-7988.

Mori, H. (1965). A continued-fraction representation of the time-correlation functions. Prog. Theor. Phys., 34, 399-416.

Peng, J. L., Maiser, E., Venkatesan, T., Greene, R. L., Czjzek, G. (1997). Concentration range for superconductivity in high-quality $Pr_{2-x}Ce_xCuO_{4-y}$ thin films. Phys. Rev. B, 55, R6145-R6148.

Sherman, A. (1987). A modified Lanczos algorithm and the continued-fraction representation of correlation functions. An example: a correlation function of the electron-phonon system. J. Phys. A: Math. Gen., 20, 569-576.

Sherman, A. (2006a). One-loop approximation for the Hubbard model. Phys. Rev. B, 73, 155105.

Sherman, A. (2006b). Quasiparticle states of the Hubbard model near the Fermi level. Phys. Rev. B, 74, 035104.

Sherman, A., Schreiber, M. (1997). The normal-state pseudogap in the spectrum of strongly correlated fermions. Phys. Rev. B, 55, R712-R715.

Sherman, A., Schreiber, M. (1999). Pseudogaps and magnetic properties of the two-dimensional t-J model. Narlikar, A. V. (ed). Pseudogap in High Tem-

perature Superconductors. Nova Science Publishers, New York, 163-188. (Studies of High Temperature Superconductors; 27).

Sherman, A., Schreiber, M. (2001) Spectral and magnetic properties of the t-J model in the underdoped region. Phys. Met. Metallogr., 92, Suppl. 1, S187-S191.

Sherman, A., Schreiber, M. (2002). The rotationally invariant approximation for the two-dimensional t-J model. Phys. Rev. B, 65, 134520.

Sherman, A., Schreiber, M. (2003a). Resonance peak in underdoped cuprates. Phys. Rev. B, 68, 094519.

Sherman, A., Schreiber, M. (2003b). Two-dimensional t-J model at moderate doping. Eur. Phys. J. B, 32, 203-214.

Sherman, A., Schreiber, M. (2004). Low-frequency incommensurate magnetic response in strongly correlated systems. Phys. Rev. B, 69, 100505(R).

Sherman, A., Schreiber, M. (2007a). Spin dynamics in strongly correlated electron systems. Int. J. Modern Phys. B, 21, 669-690.

Sherman, A., Schreiber, M. (2007b). Magnetic susceptibility of the two-dimensional Hubbard model using a power series for the hopping constant. Phys. Rev. B, 76, 245112.

Sherman, A., Schreiber, M. (2008). Fluctuating charge density waves in the Hubbard model. Phys. Rev. B, 77, 155117.

Takigawa, M. (1994). ^{63}Cu nuclear transverse relaxation rate and spin correlations in $YBa_2Cu_3O_{6.63}$. Phys. Rev. B, 49, 4158-4162.

Takigawa, M., Reyes, A. P., Hammel, P. C., Thompson, J. D., Heffner, R. H., Fisk, Z., Ott, K. C. (1991). Cu and O NMR studies of the magnetic properties of $YBa_2Cu_3O_{6.63}$ (T_c=62 K). Phys. Rev. B, 43, 247-257.

Tranquada, J. M., Axe, J. D., Ichikawa, N., Nakamura, Y., Uchida, S., Nachumi, B. (1996). Neutron-scattering study of stripe-phase order of holes and spins in $La_{1.48}Nd_{0.4}Sr_{0.12}CuO_4$. Phys. Rev. B, 54, 7489-7499.

White, R. M. (1983). Quantum Theory of Magnetism. Springer-Verlag, Berlin.

Yamada, K., Lee, C. H., Kurahashi, K., Wada, J., Wakimoto, S., Ueki, S., Kimura, H., Endoh, Y., Hosoya, S., Shirane, G., Birgeneau, R. J., Greven, M., Kastner, M. A., Kim, Y. J. (1998). Doping dependence of the spatially modulated dynamical spin correlations and the superconducting-transition temperature in $La_{2-x}Sr_xCuO_4$. Phys. Rev. B, 57, 6165-6172.

Teaduspreemia keemia ja molekulaarbioloogia alal uurimuste tsükli "Rakusisesed märklauad" eest

Ülo Langel (kollektiivi juht, esimene vasakult)

Sündinud 2.03.1951 Tartus

1969 Tartu Karlova Gümnaasium
1974 Tartu Ülikool, bioorgaaniline keemia
1980 keemiakandidaat, bioorgaaniline keemia, Tartu Ülikool
1993 PhD, bioloogia, Tartu Ülikool

1974−1989 Tartu Ülikooli nooremteadur, arstiteaduskonna dotsent;
1987−1991 Stockholmi Ülikooli biokeemia instituudi külalisteadur; alates 1992 Stockholmi Ülikooli neurokeemia ja neurotoksikoloogia instituudi lektor, dotsent, professor, juhataja asetäitja, neurokeemia instituudi juhataja;
2000−2001 Harold L. Dorris Neuroloogia Uurimiskeskuse (La Jolla, USA) neurofarmakoloogia teaduskonna dotsent; alates 2007 Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudi erakorraline professor

1997−1999 projektijuht, Bofors, Rootsi
2001−2003 CePeP AB, juhatuse esimees, Stockholm
2003−2004 Orexo AB, juhatuse liige, Uppsala
2005 − CePeP III AB, juhatuse esimees, Stockholm

1997−2007 Tartu Ülikooli, 2001 Scripps Uurimisinstituudi (La Jolla, USA), 2002 Ljubljana Ülikooli külalisprofessor

2001 Valgetähe IV klassi teenetemärk

Avaldanud 3 monograafiat ja üle 270 artikli eelretsenseeritavates teadusväljaannetes.

Margus Pooga (teine vasakult)

Sündinud 7.07.1957 Viljandis

1975 Tartu Tamme Gümnaasium
1980 Tartu Ülikool, orgaaniline keemia
1998 PhD, biokeemia, Tartu Ülikool

1980−1988 Eesti Teaduste Akadeemia Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi insener, nooremteadur; 1988−2005 Eesti Biokeskuse teadur, vanemteadur; alates 2005 Tartu Ülikooli vanemteadur, arengubioloogia õppetooli juhataja, keemilise bioloogia professor

1992−2002 Stockholmi Ülikooli neurokeemia instituudi külalisteadur (perioodi)

Avaldanud üle 60 artikli eelretsenseeritavates teadusväljaannetes

Mats Hansen (kolmas vasakult)

Sündinud 3.02.1975 Kuressaares

1993 Kuressaare Gümnaasium
2000 Tartu Ülikool, keemia
2008 PhD, neurokeemia, Stockholmi Ülikool

2000–2003 Eesti Maaülikooli veterinaarmeditsiini ja loomakasvatuse instituudi keemik; alates 2007 Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudi keemik, teadur

Avaldanud 11 artiklit eelretsenseeritavates teadusväljaannetes.

Ursel Soomets (neljas vasakult)

Sündinud 18.07.1962 Viljandis

1980 C. R. Jakobsoni nim Gümnaasium
1985 Tartu Ülikool, bioorgaaniline keemia
1994 MSc, orgaaniline keemia, Tartu Ülikool
2000 PhD, neurokeemia, Stockholmi Ülikool

Alates 1985 Tartu Ülikooli stažöör-uurija, insener, vanemassistent (vanemõpetaja), dotsent-vanemteadur

1996–2002 Stockholmi Ülikooli (perioodi), 2000 Scripps Uurimisinstituudi (La Jolla, USA) külalisteadur, alates 2008 Londoni King's Kolledži külalislektor

Avaldanud 51 artiklit eelretsenseeritavates teadusväljaannetes.

Kalle Kilk (viies vasakult)

Sündinud 21.03.1978 Tartus

1996	Hugo Treffneri Gümnaasium
2000	Tartu Ülikool, bioorgaaniline keemia
2002	MSc, biokeemia, Tartu Ülikool
2004	PhD, neurokeemia, Stockholmi Ülikool

Alates 2005 Tartu Ülikooli arstiteaduskonna teadur, vanemteadur; 2007−2008 Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudi vanemteadur

2001 Scripps Uurimisinstituudi (La Jolla, USA) külalisdoktorant

Avaldanud 19 teadusartiklit eelretsenseeritavates ajakirjades.

SISSEJUHATUS

Pikka aega on farmaatsiatööstus uute ravimikandidaatide valikul lähtunud 1997. aastal Christopher Lipinsky poolt defineeritud reeglitest, mis määratlevad eduka suu kaudu manustatava ravimina suhteliselt väikesed molekulid, mis lisaks heale lahustuvusele vees lahustuvad ka rasvades ja on seetõttu võimelised inimorganismis edukalt levima ning suhteliselt ühtlaselt jaotuma. Nimetatud reeglite aluseks oli sel ajal laialt kasutatavate ravimite omaduste üldistus ja kahtlemata on sellistel ainetel olulisi eeliseid – enamik neist säilib suhteliselt kaua ja on stabiilne ka inimorganismis ning suures koguses keemiliselt sünteesitav.

Samas on selliste ravimite avastamine olnud töömahukas ja toimunud katseeksituse meetodil, sest aine struktuuri/keemiliste omaduste alusel ei ole võimalik prognoosida selle mõju organismis. Lisaks ei mõjuta sellised ravimid mitte ainult ühe, st sihtmärkmolekuli või regulatsiooniraja aktiivsust, vaid tüüpiliselt seonduvad ka muude biomolekulidega organismis, mis viivad soovimatute kõrvalnähtudeni ja halvemal juhul avaldub see mürgisusena, eriti suurte ainekoguste või nende kombineerimise korral. Täiendavalt komplitseerib olukorda selliste ravimite levimine üle kogu organismi, samas kui tavaliselt oleks vaja mõju saavutada ainult teatud kehapiirkonnas või organis. Esimese põlvkonna ravimite põhipuuduseks võibki pidada suunatuse puudumist organismis ja tagasihoidlikku spetsiifilisust.

Uue põlvkonna ravimite loomisel disainitakse kandidaatained arvutuskeemia abil maksimaalselt hästi seostuma märklauaks võetud bioaktiivse molekuliga, kas selle aktiivust kustutades või suurendades. Valdava osa ravimite märklaudadeks on valgud, eelkõige rakumembraanis olevad retseptorid või rakusiseseid protsesse reguleerivad kinaasid, millele on suunatud enam kui 90% prae-

gu väljatöötluses olevatest kandidaatidest. Kuigi geenide vaigistamist nende ülemäärase aktiivsuse või muutunud funktsiooni korral peetakse oma selektiivsuse tõttu väga perspektiivseks, on see valdkond ravimiarenduses seni vähe rakendamist leidnud. Üheks põhiliseks takistuseks on asjaolu, et vastavad märklauad – DNA, ja RNA – asuvad raku sees ja nendelt informatsiooni edasikandumist spetsiifiliselt blokeerivad ained on suhteliselt suure molekulmassiga ja veeslahustuvad ning ei ole võimelised rakke ümbritsevat membraani läbima.

Kõiki meie rakke ümbritsev kaitsev membraan eraldab rakkude sisemust väliskeskkonnast ja kindlustab õige keskkonna säilimise raku sees ning takistab kahjulike ja mittevajalike ainete või osakeste sattumist rakkudesse. Lisaks kaitsvale funktsioonile vahendab plasmamembraan informatsiooni rakuvälise ja -sisese keskkonna vahel, kasutades selleks membraanivalke, mis organiseerivad ka vajalike ainete toimetamist rakkudesse ning mittevajalike väljutamist. Suure molekulmassiga ja hüdrofiilsete ainete, nagu peptiidide, valkude ja nukleiinhapete jaoks on plasmamembraan läbimatu barjäär. Samas on sellised ained väga perspektiivsed kui võimalikud ravimikandidaadid, kuna neid kasutades on võimalik suunata rakulisi protsesse soovitud moel, näiteks rakendades siRNA, antisensi ja ekspressiooni strateegiaid nukleiinhappeid kasutades või inhibitoorsete ja aktiveerivate peptiidide/valkude, antikehade jms meetodeid valke rakkudesse sisestades. Sellised molekulid ei kuhju, sest organism on võimeline neid mõne aja jooksul lagundama ja taaskasutama toksilisi efekte välistades. Et hõlbustada membraani läbimatute ühendite transporti rakku, on kaasaegses biotehnoloogias ja biomeditsiinis võetud kasutusele mitmeid keemilisi ja füüsikalisi meetodeid, millest tuntumatest võiks mainida elektroporatsiooni, viirusvektorite ja katioonsete lipiidide/liposoomide kasutamist ja mikroinjektsiooni. Antud meetodid võimaldavad suurte hüdrofiilsete molekulide transporti rakkudesse, kuid nende rakendamisel organismi tasemel on paraku olulisi piiranguid, mis on eelkõige seotud rakkude elutegevuse pärssimise, madala efektiivsuse või kõrvaltoimetega. Rakkudesse sisenevate, ehk penetreeruvate peptiidide (RSP) avastamine enam kui 20 aastat tagasi lõi eelduse uue mitteinvasiivse rakkudesse transpordi tehnika tekkeks ja viimastel aastatel on tõestatud, et peptiidid võimaldavad ka suunatud transporti organismi tasemel.

RAKKUDESSE SISENEVAD PEPTIIDID

Võimet kultuuris kasvavatesse rakkudesse siseneda ilma sealjuures aktiivsust kaotamata kirjeldati esmaselt valkude korral: HIV-1 Tat valk sisenes ümbritsevasse söötmesse lisamise järel rakkudesse, põhjustades reportergeeni ekspressiooni [Frankel jt, 1988; Green, Loewenstein, 1988]. Analoogne omadus tungida rakkudesse ja mõjutada nende elutegevust leiti ka Antennapedia nimelisel transkriptsioonifaktoril, mis indutseeris kultuuris kasvavatel neuronitel neuriitide väljakasvu [Allinquant jt, 1995]. Järgnevate uuringutega näidati, et rakkudesse sisenemise eest vastutab vaid väike piirkond neist valkudest ja

neile vastavad fragmendid – peptiidid toimivad kui rakkudesse impordi signaalid. Edaspidi leiti sellise omadusega peptiide lisaks transkriptsioonifaktoritele erineva funktsiooniga valkudest – retseptoritest, tuumavalkudest, kasvufaktoritest, neuropeptiididest, viiruste fusogeensetest valkudest jne.

Nagu eeldati, transporditi selliste nn rakkudesse sisenevate peptiidide külge liidetud väikesed molekulid efektiivselt rakkude sisemusse, kus need säilitasid nii oma terviklikkuse kui ka aktiivsuse. Hiljem näidati, et RSPd suudavad sisestada rakkudesse ka suuri molekule – valke, plasmiidset DNAd ning väga suuri osakesi – viiruspartikleid, liposoome, paramagnetilisi osakesi jms. Tänaseks on kultuuris kasvavatesse imetajarakkudesse transporditud praktiliselt kõike, mida saab kasutada elusrakus toimuvate protsesside suunamiseks või nende jälgimiseks [Langel, 2002, 2007].

Viimastel aastatel on plahvatuslikult kasvanud ka avaldatud uurimuste arv, milles näidatakse RSP vahendatud transpordi efektiivsust mitte ainult kultuuris kasvavatesse rakkudesse vaid ka *in vivo* katseloomades. Parimaid tulemusi on loommudelites seni saadud peptiididega transporditud oligonukleotiididega, kasutades siRNA kasvajate mahasurumisel, mRNA splaisingu muutmist düstrofiini valgu ekspressiooni taastamisel Duchenne'i lihasdüstroofia mudelis ja antisensi mehhanisme. Osa antud strateegiatest on jõudnud ka esimeste kliiniliste katseteni (nt Duchenne'i lihasdüstroofia) [Yin jt, 2008].

UUED RSPd JA NENDE ENNUSTAMINE

Rakkudesse sisenevate peptiidide uurimine keskendus algselt kolmele põhisuunale:

1) uute RSPde avastamine/disainimine, loomaks efektiivsemaid ja võimalikult marginaalsete kõrvaltoimetega rakutransportereid
2) mehhanismide selgitamine, mida RSPd kasutavad rakkudesse pugemiseks ning muude molekulide sinna transportimiseks
3) RSPde rakendamine rakkude elutegevuse mõjutamiseks soovitud suunas, pärssides või võimendades neis toimuvaid protsesse, sisestades selleks rakkudesse vastavaid molekule.

Meie töörühm alustas RSPde uurimist selle valdkonna tekke algusaastatest ja on panustanud kõigi nende suundade arengusse: disaininud erinevaid RSPsid (transportaanid, pVEC, YTA jt) ja kirjeldanud nende omadusi erinevates mudelsüsteemides, alates membraanipreparaatidest kuni funktsionaalsete katseteni *in vivo* [Holm jt, 2006]. "Meie" esimese RSP perekonna transportaanide eellane saadi herilasemürgis sisalduvale mastoparaanile neuropeptiid galaniini fragmendi liitmisel, disainides ligande selle peptiidi retseptoritele. Üllatuslikult ei olnud loomkatsete tulemused selle kimäärse (mitut eri funktsiooni kandva) peptiidi korral hästi seletatavad retseptorite poolt vahendatava toimega. Kontrollimisel selgus, et antud peptiid on võimeline liikuma rakkudesse ning sinna transportima ka muid molekule, pälvides sellega nime transportaan.

Samavõrra edukateks rakku transportivateks molekulideks osutusid ka mõned selle peptiidi lühemad versioonid, mis ka kõrgetel kontsentratsioonidel ei pärssinud rakkude elutegevust [Langel, 2002].

pVEC peptiid on jupike hiire veresoonte kadheriini valgust ja toimetab imetajarakkudesse erinevat tüüpi lastmolekule. Lisaks imetajarakkudele saab pVECi kasutades transportida võõrmolekule ka pärmi- ja taimerakkudesse [Holm jt, 2005]. Struktuur-aktiivsus uuringud näitasid, et pVECi rakkudesse liikumiseks on olulisem tema hüdrofoobne piirkond ja mitte niivõrd positiivselt laetud osa, nagu enamikel teistel RSPdel. pVECi teiseks eriomaduseks on väga vähene toksiline toime rakkudele, mis praktiliselt puudub ka väga kõrgetel kontsentratsioonidel, muutes selle RSP sobivaks *in vivo* rakendustes ja ravimikandidaadina [Elmquist jt, 2006].

Rakku sisenevaid peptiide ja nende konjugaate on tänaseks tehtud sadu. Sellest hoolimata ei ole täpselt selge, millised peptiidi omadused defineerivad sellise erilise võime. Hüpoteesina on esitatud amfipaatsuse, positiivsete laengute, eriti aminohappe arginiini sisalduse ning veel mitmete teiste parameetrite olulisust. Paraku on struktuur-aktiivsus uuringutest saadud vastuoluliste järeldusteni viivaid tulemusi eri ja vahel isegi sama peptiidiga, mistõttu on uute RSPde väljatöötamisel siiani väga oluline osa katse-eksituse meetodil. Alates käesoleva aastatuhande esimestest aastatest on meie grupp üritanud leida meetodeid RSPde ennustamiseks, võttes aluseks aminohapete jääkide füüsikalistest ja keemilistest omadustest (laeng, jaotuskoefitsiendid erinevate lahustite vahel jne) arvutatud peptiidi summaarsed parameetrid, aga ka aminohapete jaotusmustri seni kirjeldatud RSPdes. Hoolimata meie arvutusmudelite täiustumisest, mis põhinevad aminohappejääke väga laialdaselt iseloomustavate andmete maatriksitest tuletatud nn z-deskriptoritel, ja enam kui 90% ennustustäpsusest, ei ole see kaugeltki piisav ning vajadus veel täiuslikumate algoritmide järele on ilmne. Põhiliseks takistuseks täpsema arvutusliku mudeli loomisele võib pidada puudulikku arusaama selle kohta, milliseid mehhanisme RSPd kasutavad rakkudesse sisenemiseks ning sinna lastmolekulide transportimiseks. Olukorda komplitseerib asjaolu, et kasutatav mehhanism võib sõltuda nii peptiidi iseloomust, tema kontsentratsioonist kui ka rakkudesse viidava molekuli/kompleksi suurusest ja omadustest. Teisisõnu, peptiidide rakku sisenemise fenomen võib olla niivõrd kompleksne, et täpseks ennustamiseks tuleb määratleda väga suur hulk eeltingimusi või, sõltuvalt konkreetsest transporter-last kombinatsioonist, on vaja kasutada erinevaid algoritme [Langel, 2007; Hansen jt, 2008].

PEPTIIDIDE RAKKUDESSE SISENEMISE MEHHANISMID

Üldiselt omastavad rakud nii suuri molekule nagu peptiidid hästireguleeritud mehhanismide komplekti kasutades, mida nimetatakse endotsütoosiks. Selleks koondatakse raku pinnale seostunud materjal välismembraanil lohku, mis hiljem vesiikulina, st membraaniga ümbritsetuna, raku sisemusse tõmmatakse. Kuna nii transporditakse rakkudesse vajalikke toiteaineid, peatatakse välisest

keskkonnast saadavaid signaale ja kahjutustatakse mikroorganisme, siis lagundatakse sel viisil rakkudesse sattunud materjal vesiikulite küpsemise protsessis kiiresti ja efektiivselt.

Seetõttu oli Tat ja Antennapedia valkude liikumine rakkudesse aktiivsust säilitades erandlik ja selleaegsete rakubioloogia-alaste arusaamadega sügavas vastuolus. Eristamaks sellise võimega valkude ja vastava aktiivsusega peptiidide rakku sisenemist endotsütoosi kasutatavatest, võeti kasutusele penetreeruvate (rakku tungivate) või transdutseerivate (rakku sisestavate) peptiidide mõiste. Sellised peptiidid saavad vabalt rakkude sisemusse (tsütoplasmasse) jõuda põhimõtteliselt kahel viisil – kas otse läbi rakke ümbritseva membraani või siis kõigepealt lastes end vesiikulite sees rakkudesse toimetada ja seejärel läbi nende membraani liikuda. RSPde mehhanisme on selle valdkonna 20 aastase ajaloo jooksul seletatud kas ühe või teise mudeliga või nende kombinatsioonina ja ka selle protsessi uurimise meetodid ning lähenemised on läbi teinud põhjaliku arengu [Langel, 2007].

Kasutades algselt klassikalise tsütokeemia meetodeid, st fikseeritud rakke ja kaudse immuunofluorestsentsi tehnikat, leiti, et RSPd sisenevad füsioloogilistel tingimustel efektiivselt rakkudesse, jaotuvad neis suhteliselt ühtlaselt ja mõnevõrra kontsentreeruvad tuuma. Analoogne tulemus saadi ka siis, kui RSPdele anti võimalus rakkudesse liikuda tingimustes, mil endotsütoos on blokeeritud, näiteks madalal temperatuuril või vastavate inhibiitorite juuresolekul. Sellest omakorda järeldati, et RSPd liiguvad rakkudesse otse läbi rakumembraani ning suudavad transportida ka mitmesuguseid muid molekule või komplekse.

Esimestele edukatele katsetele mõjutada rakkudes toimivaid protsesse soovitud suunas järgnesid ka arvukad ebaõnnestumised, kus RSP ei suutnud suurt lastmolekuli rakkudesse transportida, või rakkudes ei olnud sisestatud molekul aktiivne. Kasutades kvantitatiivseid meetodeid ja uurides RSP-de tungimist elusrakkudesse selgus, et nii peptiidide eneste ja iseäranis nendega vahendatud transpordil on endotsütootilistel protsessidel väga oluline osa [Richard jt, 2003; Säälik jt, 2004]. Näidati ka, et sisestatud molekulid paiknevad rakkudes valdavalt erinevates vesikulaarsetes struktuurides, millest vabanemine on üldiselt aeglane ja väheefektiivne. Samas mõned RSPd (näiteks transportaanid) on edukamad vesiikulitest väljumisel ja nendega transporditud molekulide toime rakkudes ületab teiste peptiididega saavutatavat oluliselt. Kuigi mõnda aega usuti, et RSPd vaid kasutavad raku endotsütootilisi protsesse, on nüüdseks selge, et nad ka intensiivistavad neid. Mitmed uurimisrühmad on pidanud RSPde rakkudesse liikumisel oluliseks vaid ühte endotsütoosi alaliiki ja üllatavalt on postuleeritud sama peptiidi ja lastmolekuli korral isegi erinevat mehhanismi. Meie kollektiiv seevastu on olnud seisukohal, et suhteliselt väheselektiivsete rakupinna mõjutajatena indutseerivad RSPd üheaegselt mitmete vesikulaarsete transpordiradade sisselülitamist ning kasutavad neid paralleelselt ja ka liikumisel otse läbi rakke ümbritseva membraani on oma kindel roll (vähemalt

transportaani perekonda kuuluvate peptiidide korral) [Padari jt, 2005; Langel, 2007].

Vaatamata prevaleerivale "ainult endotsütoos" mudelile on mitmed uurimisgrupid kogu aeg püsinud seisukohal, et RSPd ise või koos väikeste lastmolekulidega kasutavad rakkudesse sisenemiseks ka mehhanismi, mis viib otse rakkude tsütoplasmasse ilma vesikulaarseid protsesse esile kutsumata. Osa RSPde korral on sellise mehhanismi toimimine usaldusväärselt ka tõestatud, tõsi küll seni vaid spetsiifilistel tingimustel, näiteks kõrgel peptiidi kontsentratsioonil, madalal temperatuuril jne. Kas sellisel protsessil on märkimisväärne roll ka peptiidide mõõduka kontsentratsiooni korral füsioloogilistel tingimustel või *in vivo*, on veel ebaselge [Deshayes jt, 2008].

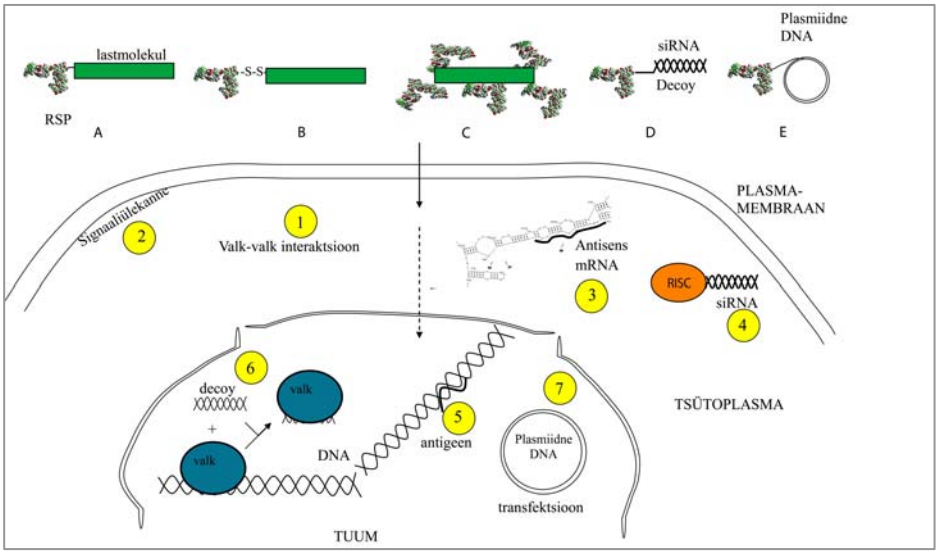
Praeguseks on RSPde mehhanismidest rääkides jõutud üldise konsensuseni, et suurte molekulide rakku viimisel kasutavad need endotsütoosi ning väikeste molekulide korral või peptiidide eneste jaoks on võimalikud ka mittevesikulaarsed protsessid. Paraku ei ole seni suudetud detailiseerida/defineerida ei üht ega teist mehhanismi.

RAKUSISED MÄRKLAUAD JA RAKKUDES MÕJUTATAVAD PROTSESSID

Kui arvestada, et RSPd on võimelised rakku sisenemise järel liikuma selle enamikesse piirkondadesse/organellidesse, eriti kui neid vastava suunava signaaliga varustada (nagu tuuma suunav, mitokondritesse suunav vms), siis võiks väita, et sihtmärgistada saab praktiliselt kõikides raku osades toimuvaid protsesse. Põhiküsimuseks on pigem kuivõrd spetsiifiliselt ja minimaalsete kõrvaltoimetega suudetakse valitud protsessi mõjutada ning kas RSPdega saab toimeainet viia vajalikku piirkonda efektiivselt toimivas kontsentratsioonis. Sobivat tüüpi biomolekule või nende derivaate RSPdega transportides on rakkudes imiteeritud valk-valk interaktsioone; geenide ekspressiooni pärsitud, võimendatud või käivitatud; signaaliülekannet sisse või välja lülitatud jne (vt joonis 1).

VALKUDE IMITEERIMINE JA SIGNAALIRADADE AKTIVEERIMINE

Valkudevahelised interaktsioonid on aluseks raku normaalsele funktsioneerimisele ja väliskeskkonna muutustega kohanemisele. Kahe valgu interaktsioon hõlmab reeglina nendest vaid suhteliselt väikesi piirkondi, st peptiidseid järjestusi, mis omavahel spetsiifiliselt seonduvad. Kasutades peptiidi, mis imiteerib mõnda looduslikku valku, on võimalik seeläbi kontrollida ja mõjutada rakusiseseid signaale ning lihtsaimaks võimaluseks on liita vastav järjestus rakkudesse transpordiks RSP külge, mida on ka laialdaselt kasutatud. Intrigeerivamaks on võimalus disainida imiteeritava valgu järjestuse põhjal uus RSP, kasutades selleks ennustusalgoritmi. Näiteks oleme rakendanud angiotensiini ja glukagooni sarnase peptiidi retseptorite sünteetilisi fragmente, mille mõju rakkudele on analoogne retseptorite aktiveerimisele. Samas ei ole võimalik nende peptiidide efekti neutraliseerida retseptori blokeerimisega, sest need toimivad rakusiseselt ja retseptorist sõltumatult, kuid ikkagi spetsiifiliselt [Langel, 2007].



Joonis 1.
Võimalused rakku siseneva peptiidi seostamiseks lastmolekuliga ja rakusisesed märklauad. Aktiivne molekul, näiteks peptiid, valk, PNA, oligonukleotiid vms. seotakse rakkudesse sisestamiseks transporteriga kas stabiilse (A) või keskkonnatundliku keemilise sidemega (B) või moodustatakse neist kompleks (C). Oligonukleotiidide korral kasutatakse ka spetsiifilist seondamist komplementaarse üheahelalise alaga (D) ning plasmiidil kaheahelalise piirkonnaga (E). Enim on RSP-dega rakku viidud molekule kasutatud valk-valk interaktsioonide (1) ja signaaliülekande (2) mõjutamiseks, märklaudvalgu sünteesi blokeerimiseks antisensi (3) või siRNA (4) mehhanismi abil tsütoplasmas. Tuumas on takistatud märklaudvalgu avaldumist antigeen- (5) või "decoy" (6) tehnikat kasutades ning indutseeritud võõrgeeni ekspressiooni plasmiidilt (7).

OLIGONUKLEOTIIDIDE TRANSPORT JA GEENIDE VAIGISTAMINE ANTISENSMEETODIL

Antisensmehhanismiks nimetatakse valgu sünteesi/translatsiooni blokeerimist, seostades vastavat valku kodeeriva mRNAga järjestuse-spetsiifiliselt paarduv oligonukleotiid. Sellist regulatsiooni kasutavad paljud organismid ise, samuti on see hea võimalus nii uurimistöös kui rakenduslikult, võimaldades selektiivselt soovitud valk ajutiselt "välja lülitada", ilma teisi kahjustamata. Nagu varem mainitud on sünteetiliste oligonukleotiidide eneste rakkudesse sisenemine erakordselt madala efektiivsusega ning ilma nende transpordi hõlbustamiseta antisensefekti saavutada ei ole võimalik. Meie kasutasime erinevaid RSPsid (transportaani ja penetratiini) sünteetilise oligonukleotiidi PNA viimiseks kultuuris kasvavatesse rakkudesse ja ka *in vivo*. Mõlemas süsteemis surus PNA spetsiifiliselt maha sihtmärgiks võetud esimest tüüpi galaniini retseptori (GalR1)

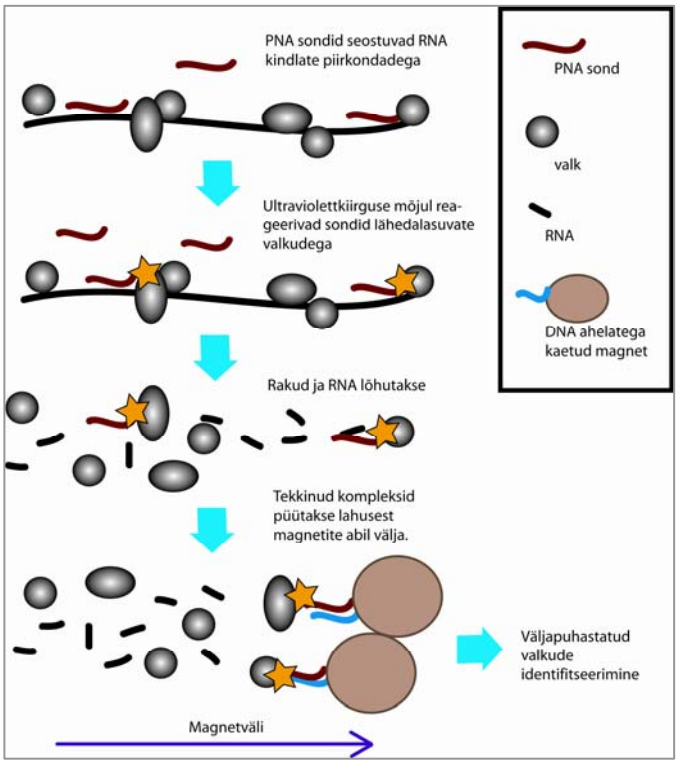
sünteesi ja hiires väljendus see ka füsioloogilise vastusena – painutajalihase refleksi vähenemisena. Analoogse lähenemisega kaardistasime regulatoorsed piirkonnad GalR1 mRNA molekulis [Pooga jt, 2001; Kilk jt, 2004].

DNA TRANSPORT

Nagu eelnevalt öeldud, sisestavad RSPd rakkudesse ka väga suuri molekule/struktuure. Et rakus avalduks võõrgeen või inaktiveeritud oma, tuleb vastav süsteem, mis on tüüpiliselt ekspressiooni võimaldav plasmiidne DNA, rakkudesse sisestada. RSPde kasutamisel moodustatakse DNA ja peptiidi kompleks, nii et see rahuldaks üheaegselt kahte vastuolulist tingimust − oleks piisavalt stabiilne transpordiks ning samas sihtkohas kergesti lahtipakitav ja ei takistaks geenil avalduda. Me töötasime välja erinevad meetodid: seondades RSP DNAle PNA linkeri abil, kasutades polüetüleenimiin-linkerit ning peptiidi ja DNA otsest komplekseerimist. Viimasel ajal on põhirõhk olnud otsesel komplekseerimisel, mis on kõige lihtsam ja töökindlam ning teatud RSPde korral andnud ka suurepäraseid tulemusi [Kilk jt, 2005].

MRNAGA SEOSTUVATE VALKUDE TUVASTAMINE

Koostöös Pennsylvania Ülikooli teadlastega töötasime välja ainulaadse PAIR protokolli kindlate RNA järjestustega seostuvate valkude identifitseerimiseks (vt joonis 2).



Joonis 2.
PAIR meetodi põhimõte.

Selleks sünteesitakse vastavad PNA oligomeerid ning seotakse need RSPdega analoogselt antisensi eksperimentideks kasutatavatega. Rakukultuuri tööde-ldakse konjugaatidega vaid lühiajaliselt, et anda PNAle aega rakku sisenemiseks ja sihtmärgiga seondumiseks. Seejärel aktiveeritakse PNA küljes olev valgustundlik rühm, mis ultraviolettkiirguse toimel moodustab vaba radikaali. Tekkiv radikaal reageerib lähedalasuvate molekulidega, kaasa arvatud valkudega ja suurima tõenäosusega nendega, mis vastava RNA piirkonnaga seotud. Rakkudest eraldatud PNA-valk-kompleksid lahutatakse klassikaliste proteoomika meetoditega ja valgud identifitseeritakse mass-spektromeetriliselt. Sihtides erinevaid regioone ühel ja samal RNA-l saab eristada valke, mis seostuvad RNAga järjestuse spetsiifiliselt või mitte. Näiteks tuumavalk nukleoliin seostus meie katsetes kõigi uuritud RNA regioonidega, st mittespetsiifiliselt, samas kui enamik tuvastatud valke inerakteerus spetsiifiliste piirkondadega. PAIR protokoll eeldab vaid lühiajalist elusrakkude töötlust, mistõttu saab seda rakendada erinevate mõjutuste (rakkude loomulik kasvukeskkond, stressi või kasvufaktorite juuresolek jne) uurimiseks valk-RNA interaktsioonide tasandil. Tuleb rõhutada, et võimalus uurida ebapüsivaid rakusiseseid interaktsioone ja nende sõltuvust välistest faktoritest on PAIR meetodi põhiline eelis teiste valk-nukleotiid interaktsioonide uurimise protokollidega võrreldes, sest tihti kasutatavad meetodid, nagu immuunosadestamine ja afiinsuskromatograafia, on kohaldatavad vaid väga stabiilsetele kompleksidele [Peritz jt, 2006; Zeng jt, 2006; Zielinski jt, 2006].

OKSÜDATIIVSE STRESSI MAANDAMINE PEPTIIDIDEGA

Inimorganismi elutegevuse käigus tekib pidevalt hapniku ja lämmastiku reaktiivseid osakesi ja teatud hulkades on nad vajalikud selliste füsioloogiliste funktsioonide täitmiseks nagu mikroorganismide vastane kaitse ja kehavõõraste ainete kahjutustamine. Kui organismi kaitsemehhanismid ei suuda enam kontrollida reaktiivsete osakeste taset, tekib oksüdatiivne stress, reaktiivsed osakesed hakkavad ründama organismi biomolekule ja võivad käivitada patoloogilisi mehhanisme. Tähtsaim rakusisene veeslahustuv antioksüdant on glutatioon, mille kontsentratsiooni langus on oluliseks riskifaktoriks oksüdatiivsest stressist tingitud haiguste (näiteks kardiovaskulaarsed ja neurodegeneratiivsed haigused, teatud tüüpi vähkkasvajad, insult jt) väljakujunemisel. Otsides lahendusi glutatiooni süsteemi langenud funktsionaalsuse kompenseerimiseks, disainisime ja sünteesisime uued glutatiooni analoogid − tetrapeptiidide UPF seeria. Esmalt sünteesiti analoog, milles glutatiooni N-otsa oli lisatud metoksütürosiin, ja saadi 60 korda kõrgema hüdroksüülradikaali elimineerimisvõimega peptiid (UPF1) kui glutatioon [Põder jt, 2004]. Edasisel suunatud disainil oleme jõudnud UPF1 toimet 600 korda ületava analoogini. UPF peptiidid ei ole toksilised rakkudele kultuuris ega närvikoele ka väga kõrgetel kontsentratsioonidel, ka ei mõjuta nad rakkude plasmamembraani terviklikkust [Vaher jt, 2006; Ehrlich jt, 2007]. Kuna UPF peptiidid on efektiivsed raku-

väliselt kasutatuna, vajab nende täpne toimemehhanism selgitamist, sest lähtudes nende keemilistest koostisest ei saa nad käituda RSPdena.

KOKKUVÕTE

Viimastel aastatel on plahvatuslikult kasvanud avaldatud uurimuste arv, milles näidatakse RSPdega vahendatud transpordi efektiivsust mitte ainult kultuuris kasvavatesse rakkudesse vaid ka *in vivo* katseloomades. Täiustunud teadmised RSPde mehhanismidest on võimaldanud disainida ja sünteesida uusi rakkudesse sisenevaid aineid, mis kindlustavad lastmolekulide aktiivsuse efektiivse avaldumise rakkudes ning lubavad seal toimuvaid protsesside suunata.

Lisaks erinevate molekulide rakkudesse sisestamisele võimaldavad peptiidid ka suunatud transporti. Kombineerides erinevaid metoodikaid on avastatud perekond peptiide, mis veeni kaudu katseloomadele manustamise järgselt koonduvad selektiivselt soovitud piirkonda organismis – näiteks kasvajatesse, kasvaja poolt indutseeritud veresoontesse, kindlasse koesse/organisse jne. Spetsiifiliselt adresseeruvad peptiidid seonduvad küll oma märklaudrakkudele, aga ei ole ise võimelised rakkudesse sisenema, küll aga võiks nad seda teha kombineerituna RSPdega. Vastavaid kahetoimelisi liitpeptiide võib pidada väga perspektiivseks ravimite täpseks suunamiseks organismi tasemel, võimaldades selektiivselt transportida toimeainet patoloogilistesse/kahjustatud kudedesse/struktuuridesse kehas ning vältides tihti probleemiks olevat süsteemset toksilisust. Suure tõenäosusega omandavad selektiivsed RSPd organismis ravimite suunamisel olulise koha antikehade, aptameeride ja teiste spetsiifiliste adresseerijate kõrval.

Lisaks suurele rakenduspotentsiaalile ravimitööstuse jaoks aitavad RSPd lahendada ka mitmeid rakubioloogia-alaseid küsimusi, eelkõige rakutranspordi valdkonnas ning on avanud erinevate endotsütoosi mehhanismide tagamaid. Kuna tundub, et mitmed RSPd suudavad rakke ümbritsevat membraani läbida ka endotsütoosi esile kutsumata, võiks nad anda olulise panuse valkude ja membraani interaktsioonide ning vastasmõjude uurimisse.

KIRJANDUS

Allinquant, B., Hantraye, P., Mailleux, P., Moya, K., Bouillot, C., Prochiantz, A. (1995). Downregulation of amyloid precursor protein inhibits neurite outgrowth in vitro. J. Cell Biol., 128, 919-927.

Deshayes, S., Morris, M., Heitz, F., Divita, G. (2008). Delivery of proteins and nucleic acids using a non-covalent peptide-based strategy. Adv. Drug. Deliv. Rev., 60, 537-547.

Ehrlich, K., Viirlaid, S., Mahlapuu, R., Saar, K., Kullisaar, T., Zilmer, M., Langel, Ü., Soomets, U. (2007). Design, synthesis and properties of novel powerful antioxidants, glutathione analogues. Free Radic. Res., 41, 779-787.

Elmquist, A., Hansen, M., Langel, Ü. (2006). Structure-activity relationship study of the cell-penetrating peptide pVEC. Biochim. Biophys. Acta, 1758, 721-729.

Frankel, A. D., Bredt, D. S., Pabo, C. O. (1988). Tat protein from human immunodeficiency virus forms a metal-linked dimer. Science, 240, 70-73.

Green, M., Loewenstein, P. M. (1988). Autonomous functional domains of chemically synthesized human immunodeficiency virus tat trans-activator protein. Cell, 55, 1179-1188.

Hansen, M., Kilk, K., Langel, Ü. (2008). Predicting cell-penetrating peptides. Adv. Drug. Deliv. Rev., 60, 572-579.

Holm, T., Johansson, H., Lundberg, P., Pooga, M., Lindgren, M., Langel, Ü. (2006). Studying the uptake of cell-penetrating peptides. Nat. Protoc., 1, 1001-1005.

Holm, T., Netzereab, S., Hansen, M., Langel, Ü., Hällbrink, M. (2005). Uptake of cell-penetrating peptides in yeasts. FEBS Lett., 579, 5217-5222.

Kilk, K., El-Andaloussi, S., Järver, P., Meikas, A., Valkna, A., Bartfai, T., Kogerman, P., Metsis, M., Langel, Ü. (2005). Evaluation of transportan 10 in PEI mediated plasmid delivery assay. J. Control. Release, 103, 511-523.

Kilk, K., Elmquist, A., Saar, K., Pooga, M., Land, T., Bartfai, T., Soomets, U., Langel, Ü. (2004). Targeting of antisense PNA oligomers to human galanin receptor type 1 mRNA. Neuropeptides, 38, 316-324.

Langel, Ü. (2002). Cell-Penetrating Peptides, Processes and Applications. Boca Raton, London, New York, Washington, CRC Press.

Langel, Ü. (2007). Handbook of Cell-Penetrating Peptides. Boca Raton, London, New York, Washington, CRC Press.

Padari, K., Säälik, P., Hansen, M., Koppel, K., Raid, R., Langel, Ü., Pooga, M. (2005). Cell transduction pathways of transportans. Bioconjug, Chem., 16, 1399-1410.

Peritz, T., Zeng, F., Kannanayakal, T. J., Kilk, K., Eiriksdottir, E., Langel, Ü., Eberwine, J. (2006). Immunoprecipitation of mRNA-protein complexes. Nat. Protoc., 1, 577-580.

Põder, P., Zilmer, M., Starkopf, J., Kals, J., Talonpoika, A., Pulges, A., Langel, Ü., Kullisaar, T., Viirlaid, S., Mahlapuu, R., Zarkovski, A., Arend, A., Soomets, U. (2004). An antioxidant tetrapeptide UPF1 in rats has a neuroprotective effect in transient global brain ischemia. Neurosci. Lett., 370, 45-50.

Pooga, M., Land, T., Bartfai, T., Langel, Ü. (2001). PNA oligomers as tools for specific modulation of gene expression. Biomol. Eng., 17, 183-192.

Richard, J. P., Melikov, K., Vives, E., Ramos, C., Verbeure, B., Gait, M. J., Chernomordik, L. V., Lebleu, B. (2003). Cell-penetrating peptides. A reevaluation of the mechanism of cellular uptake. J. Biol. Chem., 278, 585-590.

Säälik, P., Elmquist, A., Hansen, M., Padari, K., Saar, K., Viht, K., Langel, Ü., Pooga, M. (2004). Protein cargo delivery properties of cell-penetrating peptides. A comparative study. Bioconjug. Chem., 15, 1246-1253.

Zeng, F., Peritz, T., Kannanayakal, T. J., Kilk, K., Eiriksdottir, E., Langel, Ü., Eberwine, J. (2006). A protocol for PAIR: PNA-assisted identification of RNA binding proteins in living cells. Nat. Protoc., 1, 920-927.

Zielinski, J., Kilk, K., Peritz, T., Kannanayakal, T., Miyashiro, K. Y., Eiriksdottir, E., Jochems, J., Langel, Ü., Eberwine, J. (2006). In vivo identification of ribonucleoprotein-RNA interactions. Proc. Natl. Acad. Sci. U S A, 103, 1557-1562.

Vaher, M., Viirlaid, S., Ehrlich, K., Mahlapuu, R., Jarvet, J., Soomets, U., Kaljurand, M. (2006). Characterization of the antioxidative activity of novel non-toxic neuropeptides by using capillary electrophoresis. Electrophoresis, 27, 2582-2589.

Yin, H., Moulton, H. M., Seow, Y., Boyd, C., Boutilier, J., Iverson, P., Wood, M. J. (2008). Cell-penetrating peptide-conjugated antisense oligonucleotides restore systemic muscle and cardiac dystrophin expression and function. Hum. Mol. Genet., 17, 3909-3918.

Teaduspreemia tehnikateaduste alal uurimuste tsükli "Vedeliksadestuse tehnoloogiad konkurentsivõimelisele päikeseenergeetikale" eest

Malle Krunks

Sündinud 23.05.1949 Nissi vallas Harjumaal

1967 Tallinna Reaalkool
1972 Tallinna Tehnikaülikool, elektroonika erimaterjalide tehnoloogia
1985 keemiakandidaat, Uurali Polütehniline Instituut

Alates 1972 Tallinna Tehnikaülikooli insener, vaneminsener, nooremteadur, vanemteadur, materjaliteaduse instituudi juhtivteadur
2006–2008 Eesti Teaduste Akadeemia uurija-professor

1993 Hannoveri Päikeseenergeetika instituudi; 1995, 1996, 1997 Helsingi Tehnikaülikooli; 2002, 2003, 2004 Kieli Tehnikaülikooli külalisteadur

1985 Eesti NSV teaduspreemia pooljuhtmaterjalide väljatöötamise eest autorite kollektiivi liikmena
1988 Eesti riiklik preemia tehnikateaduste alal autorite kollektiivi liikmena

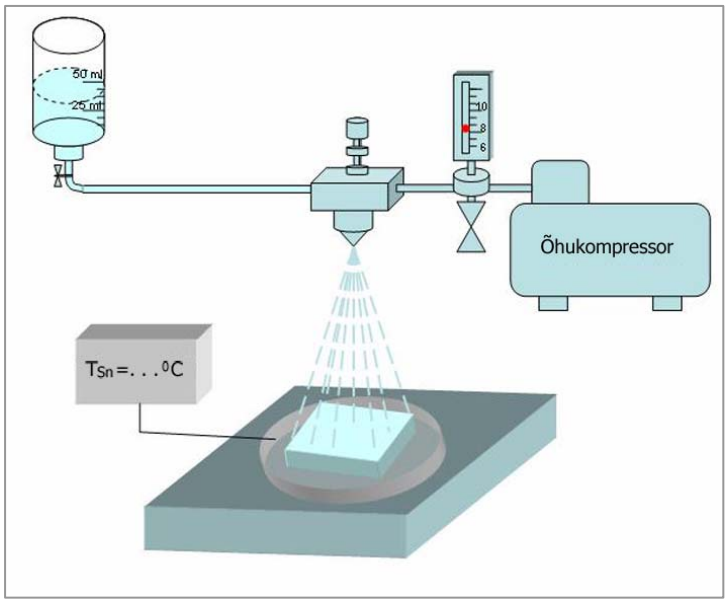
Avaldanud üle 100 teadusartikli.

UURIMISTÖÖDE TAUST

Fossiilkütuste ammendumine ja järjest kuhjuvad keskkonnaprobleemid on seadnud elulise vajaduse leida alternatiivseid võimalusi elektrienergia tootmiseks fossiilkütuste põletamise asemel. Alternatiivsete elektrienergia tootmise viiside seas on suured lootused pandud päikeseenergeetikale kuna energia hulk, mis jõuab aasta jooksul Päikeselt Maa pinnale ületab ligikaudu 10000 korda kogu planeedi energiavajaduse käesoleval ajal. Pooljuhtpäikeseenergeetika on üks kiiremini arenev keskkonnasõbralik energeetikaharu ning järgnevatel aastakümnetel oodatakse temalt olulist panust energiaprobleemide lahendamisse. Ollakse seisukohal, et aastal 2050 peaks päikesepatareide abil toodetav elektrienergia moodustama ligi 30% maailma elektritoodangust 2005. aasta 0,01% asemel [Kazmerski, 2006].

Peamiseks päikeseenergeetika kasutuselevõtmist takistavaks asjaoluks praegusel ajal on päikesepatareide abil toodetud elektrienergia kõrge hind. Päikesepaneelide abil toodetud elektrienergia hind peab muutuma konkurentsivõimeliseks teiste energia tootmise viisidega aastaks 2030 [A Vision..., 2005]. Selle saavutamiseks tuleb eelkõige leida teed päikesepaneelide hinna alandamiseks, sest praegu moodustavad kõige suurema osa (*ca* 55%) päikesepatareide abil toodetud elektri hinnast patareimoodulid ise. Päikesepatarei moodulite hinna alandamise peamisteks võimalusteks peetakse õhukesekileliste ja uue konstruktsioonilise lahendusega patareide arendust kasutades nende valmistamiseks odavamaid materjale ja odavaid (keemilisi) tehnoloogiaid.

TTÜ materjaliteaduse instituudi õhukeste kilede uurimisgrupis kasutatakse kilede ja nanostruktuursete materjalide valmistamiseks keemilisi vedeliksadestuse tehnoloogiaid, nagu pihustuspürolüüs (keemiline pihustamine), keemiline sadestamine lahuses ja sool-geel meetod. Need meetodid on sobivad nii suurepinnaliste kilede kui nanomaterjalide valmistamiseks, nad on lihtsad aparatuurse lahenduse poolest, seega odavad. Samuti on need tehnoloogiad kergesti automatiseeritavad ja üle viidavad tööstusesse.



Joonis 1. Pihustuspürolüüsi (keemilise pihustamise) aparatuuri skeem.

Uurimistöö antud teemal võib tinglikult jaotada kolmeks alateemaks: protsesside keemia uurimine, kilede ja nanostruktuuride valmistamine ja iseloomustamine, ning nende materjalide baasil päikesepatarei struktuuride valmistamine. Allpool ülevaade minu ja meie uurimisgrupi poolt TTÜ materjaliteaduse instituudis aastatel 2005−2008 läbiviidud uurimistööst ja olulisematest teadustulemustest, mis olid aluseks 2009. aasta Eesti Vabariigi teaduspreemia määramisel tehnikateaduste valdkonnas. Kokkuvõte sisaldab ka põgusaid tagasivaateid varasematel aastatel tehtud uurimustele, mis on olnud aluseks viimaste aastate töödele.

SADESTUSPROTSESSIDE KEEMIA-ALASED UURINGUD

Keemiliste tehnoloogiate rakendamisel õhukeste kilede valmistamiseks on olulise tähtsusega materjalide moodustumise keemilise tagapõhja väljaselgitamine. Kui meie uurimisgruppi võrrelda teiste samas valdkonnas tegutsevate

gruppidega maailmas, siis eristume just selle poolest, et alustame keemia-alastest uuringutest ja kasutame sealt saadud tulemusi kilede sadestusprotsessi tehnoloogiliste parameetrite valikuks ning materjalide omaduste suunamiseks.

Varasematel aastatel (1997−2004) töötasime välja metoodika binaarsete metallisulfiidide (CdS, CuxS, ZnS) pihustuspürolüüsi protsessi modelleerimiseks [Krunks jt, 1997, 1998, 1999, 2003; Madarasz jt, 2004]. Pihustuspürolüüs on kilede kasvatamise meetod, kus sobivate lähteainete lahus pulveriseeritakse ülipeenikeste piiskadena eelkuumutatud alusplaadile. Kuumal alusel toimub lahuse komponentide või lahuses moodustunud uue lähteaine termiline lagunemine, mille tulemusena moodustub termiliselt stabiilsem aine ning toimub tahkise kile kasvamine. Erinevalt aatomkihtsadestusest peavad keemilise pihustuse (ka sool-geel) meetodi puhul lähteained olema mittelenduvad, termiline lagunemise reaktsioon peab resulteeruma soovitud aine moodustumisega, kusjuures kaasnevad laguproduktid on soovitavalt gaasilised.

Metallisulfiidide sadestamiseks keemilise pihustamise meetodil kasutatakse metalli allikana peamiselt metallide kloriide või bromiide, väävli allikana tiokarbamiidi. Lähteainete vesilahuses moodustuvad kompleksühendid, mida võib esitada üldkujul $Me(tu)_nX_m \bullet yH_2O$ (Me=Cd, Zn, Cu; tu=$SC(NH_2)_2$, X=Cl, Br; n = 1, 2, 3; m = 1, 2; y = 0, 1/2, 1) [Krunks jt, 1997; Bombicz jt, 2004, 2007]. Kilede sadestamise seisukohalt on nad vaheühendid, mille termiline lagunemine kuumal alusplaadil viib vastava metalli sulfiidi tekkimiseni. Protsessi kemismi seisukohalt on nad aga mudelühendid, mida saab kasutada protsessi kirjeldamiseks.

Kilede kasvatamisel on oluline tunda vaheühendite koostist ja struktuuri, neid mõjutavaid tegureid (lähteainete molaarsuhe, kontsentratsioon) ning vaheühendite termilise lagunemise reaktsioone. Vaheühendite uurimiseks eraldatakse nad lahustest ning identifitseeritakse elementkoostise, infrapunase (IP) ja Raman spektrite järgi. Cd, Zn ja Cu tiokarbamiidsete ühendite struktuuri ja kristallograafilised parameetrid määrasime sünteesitud monokristallide röntgenograafiliste uuringute abil [Krunks jt, 1997; Bombicz jt, 2004, 2006].

Termilise lagunemise reaktsioonide väljaselgitamiseks viiakse läbi kompleksne termiline analüüs, kus samaaegselt termogravimeetriliste muutuste ja kaasnevate termiliste efektide registreerimisega (TG/DTG/DTA analüüs) erinevates keskkondades määratakse ka eralduvad gaasid kas IP- või mass-spektroskoopiliste meetoditega (EGA-FTIR, EGA-MS). Erinevatel lagunemise etappidel toimuvad keemilised reaktsioonid tuletatakse termilise analüüsi andmetest võttes arvesse erinevate lagunemisetappide tahkete produktide koostised [Krunks jt, 1997, 1998, 1999, 2003, 2008c].

Metallisulfiidide moodustumise uurimiseks kasutatud metoodikat rakendasime titaandioksiidi (TiO_2) kilede prekursorainete koostise ja termilise käitumise uurimiseks. Titaani lähteainena kasutasime titaanisopropoksiidi (TTIP), alkoksiidi stabiliseerimiseks atsetüülatsetooni (acacH) ja solvendina erinevaid al-

kohole (etanool, 2-metoksüetanool, isopropanool). Alkoksiidi stabiliseerimine on vajalik hüdrolüüsi tagasisurumiseks. See on eriti oluline kilede kasvatamisel pihustusmeetodil, et vältida kontrollimatut hüdrolüüsi, ka pihustuspea ummistumist. Erinevatel lähteainete molaarsuhetel (TTIP:acacH) moodustunud kuivatatud geelid on kompleksühendid, milles atsetüülatsetonaat on bidentaatselt seotud Ti-aatomiga, kusjuures kuivatatud geeli kristallilisus suureneb proportsionaalselt atsetüülatsetonaadi hulgaga kompleksis [Krunks jt, 2005a; Oja Acik jt, 2009b].

Ti-atsetüülatsetonaat komplekside termilisel lagunemisel õhus võib eristada viit lagunemise etappi, kusjuures jääkainetest puhta TiO_2 saamiseks tuleb kuumutada vähemalt 500°C-ni [Krunks jt, 2005a; Oja Acik jt, 2007]. Vaatamata sellele, et termilise lagunemise reaktsioonid on sarnased, soodustab atsetüülatsetonaadi väiksem hulk geelis vastavate lagureaktsioonide toimumist 20−30 kraadi madalamatel temperatuuridel ning rutiili faasi suuremat osakaalu 700°C-ni kuumutatud produktis [Oja Acik jt, 2007, 2009b].

Protsessi keemia-alased uuringud näitasid, et lõppprodukti TiO_2 saagis ja faasikoostis, lagunemisetappide temperatuurid ning eraldunud gaaside kogused olenevad geeli koostisest, mida saab reguleerida titaani alkoksiidi ja atsetüülatsetooni molaarsuhtega soolis. See on väärtuslik teave TiO_2 kilede valmistamise tehnoloogiliste parameetrite valikul, sh kilede faasikoostise (anataas vs rutiil) juhtimiseks sooli koostise ning sadestus- ja/või lõõmutustemperatuuride kaudu.

Sadestusprotsesside keemia valdkonnas teeme koostööd termoanalüütika alal maailma juhtivate teadusgruppidega Helsingi Tehnikaülikoolist (professor L. Niinistö) ja Budapesti Tehnikaülikoolist (professor G. Pokol, Dr. J. Madarasz), vaheühendite struktuuriuuringute alal Ungari Teaduste Akadeemiaga (Dr. P. Bombicz).

ÕHUKESED KILED JA NANOSTRUKTUURSED KIHID VEDELIKSADESTUSE TEHNOLOOGIATEGA

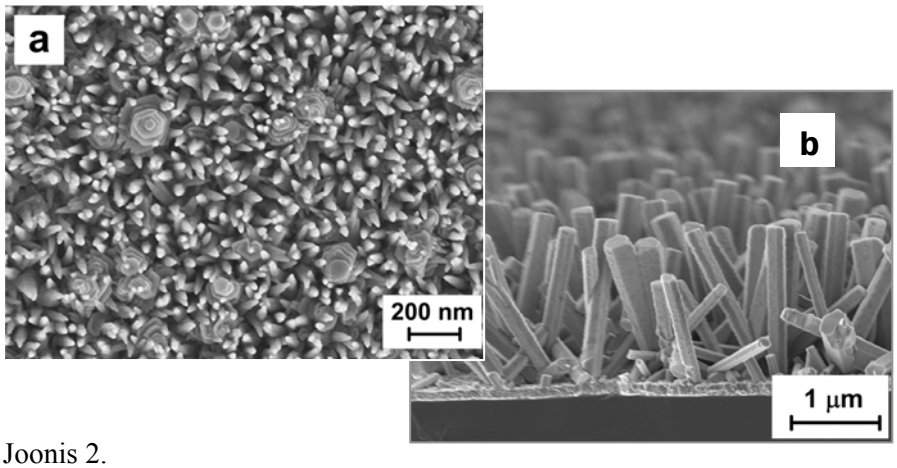
Viimase nelja aasta jooksul oleme tegelenud peamiselt ZnO ja TiO_2 − päikesepatarei aknakihtide, ZnS, In_2S_3, $In(OH)_xS_y$ − puhverkihtide ning $CuInS_2$ − absorberkihi kasvatamisega erinevatel vedeliksadestuse meetoditel ning sadestatud kilede ja kihtide füüsikaliste omaduste uurimisega. Allpool ülevaade keemiliselt sadestatud kilede omadustest ning tehnoloogiate optimeerimisest.

TiO_2 kilede, mis on valmistatud sool-geel meetodil, kasutades pindvurritamise või pihustamise tehnikaid, struktuuri ja elektrilisi omadusi saab juhtida sooli koostise ning järelkuumutamise temperatuuride kaudu [Es-Souni jt, 2004; Oja jt, 2006], millele viitasid ka termoanalüütilise uuringu tulemused. Kui kilede valmistamiseks kasutada pihustusmeetodit, siis mõjutab kilede omadusi lisaks veel sadestamise temperatuur. TiO_2 lähtesooli (TTIP:acacH=1:2, erinevad sol-

vendid) pihustamisega 300−450°C-ni eelkuumutatud alusplaadile (klaas, kvarts, Si) saadi röntgenamorfsed kiled, mis sisaldasid vähesel määral väljapõlemata süsinikku. Lühiajaline järelkuumutus 500°C juures aitas väljutada jääkproduktid ning olenemata sadestustemperatuurist moodustusid nanokristalsed anataasi struktuuriga kiled. Erinevate sadestustemperatuuride mõju ilmnes 700°C juures lõõmutatud kiledes. Kui kilede kasvatamise temperatuur oli kõrgem kui 400°C, siis lõõmutamine 700°C juures andis anataasi ja rutiili faaside segust koosneva kile. Madalamatel temperatuuridel (T < 400°C) kasvatatud kilede kuumutamisel 700°C juures rutiili faasi ei tekkinud [Oja jt, 2006]. Sool-geel pihustustehnikaga valmistatud TiO_2 kilede paksust saab juhtida pihustustsüklite arvuga, dielektrilised konstandid on vahemikus 36−46 anataasi ja 53−70 rutiili faaside puhul, kusjuures TiO_2-anataas kiled on suhteliselt siledad – *ca* 100 nm paksusega kilede RMS ~1 nm [Oja jt, 2006]. TiO_2 nanopoorseid kihte on võimalik valmistada 'pooritekitajate' lisamisega sooli. Meie kasutasime polüetüleenglükooli (PEG). Määrasime optimaalsed PEG kogused soolides ja sadestus- ning lõõmutustemperatuurid erinevate sadestustehnikate (pindvurritamine ja pihustuspürolüüs) puhul TiO_2 nanopoorsete kihtide saamiseks pooride suurusega 5–40 nm [Sabataityte jt, 2006]. Sool-geel sadestatud TiO_2 kihte kasutatakse laialdaselt TiO_2 nanostruktuuridel põhinevates päikesepatareides. Meie kasutasime sool-geel meetodil valmistatud kilesid optilise akna materjalina õhukesekilelise päikesepatarei struktuurides [Mere jt, 2004; Krunks, 2007] ning keemilise kaitsekihina ZnO nanovarrastel põhinevates patareides [Oja Acik jt, 2009a]. Sool-geel pihustatud TiO_2 kiled on samuti sobiv 'peremees-materjal' Sm^{3+}-ioonidele iseloomulikku luminesentskiirgust emiteerivate materjalide valmistamiseks [Reedo jt, 2008], millel on perspektiivsed kasutusalad keskkonnatehnikas, gaasiandurites, jne.

ZnO õhukeste kilede kui läbipaistvate ja elektrit juhtivate elektroodide valmistamine pihustuspürolüüsi meetodil on varasematest aastatest tuntud tehnoloogia [Krunks, Mellikov, 1995], mida praegusel ajal kasutatakse üsna laialdaselt ka päikesepatareide valmistamisel. Viimase nelja-aastase perioodi jooksul töötasime välja uue tehnoloogia ZnO nanovarrastest ja nanonõeltest koosnevate kihtide sadestamiseks tehnoloogiliselt lihtsal pihustuspürolüüsi meetodil, kasutades lähteainetena $ZnCl_2$ või $Zn(CH_3COO)_2$ vesilahuseid. ZnO nanonõeltest ja nanovarrastest koosnevate kihtide skaneeriva elektronmikroskoobi (SEM) fotod on esitatud joonisel 2.

Pihustusmeetodil valmistatud ZnO nanovardad on kõrge puhtusastmega nanomõõtmelised (läbimõõt 40−200 nm, pikkus 100 nm kuni paar mikronit) monokristallid, mille fotoluminestsentsspektris domineerib intensiivne UV-kiirguse riba. ZnO nanovarraste mõõtmeid saab kontrollitult juhtida kasvutemperatuuri, lähtelahuse koostise ja kontsentratsiooni, ning idutsentrite tiheduse kaudu. ZnO nanovarraste ja -nõelte füüsikaliste omaduste uurimise tulemused, sh kristallide võimalikud kasvumehhanismid on publitseeritud artiklites [Krunks jt, 2006a; Dedova jt, 2007abc, 2008]. ZnO nanovarraste pihustuspürolüüsi teh-



Joonis 2.
Skaneeriva elektronmikroskoobi mikrofotod pihustuspürolüüsi meetodil valmistatud ZnO nanonõeltest (a) ja ZnO nanovarrastest (b).

noloogia üksikasjade kaitseks on esitatud patenditaotlused kõigis Euroopa riikides ja veel mitmes antud valdkonnas juhtivas riigis [Krunks jt, 2006a].

ZnO nanovarrastest koosnevate kihtide pihustuspürolüüsi tehnoloogia eelisteks on meetodi lihtsus, kiirus ja odavus, samuti saadud kristallide kõrge puhtusaste. Pihustusmeetodil kasvatatud ZnO nanokristallidest koosnevatel kihtidel on palju võimalikke kasutusalasid, nagu märguvad/mittemärguvad katted, antireflektoorsed katted, gaasiandurid, optoelektroonika seadised, jne. Meie uurimisgrupi põhiline huvi oli ja on seotud nanostruktuursete päikesepatareide valmistamisega nende baasil [Krunks jt, 2008ab; Mere jt, 2008; Oja Acik jt, 2009a].

Päikesepatarei puhverkihtidest uurisime keemiliselt sadestatud $In(OH)_xS_y$ [Dedova jt, 2007d] ning pihustatud In_2S_3 [Krunks jt, 2008b; Mere jt, 2008] ja ZnS kilede [Dedova jt, 2005ab] omadusi, sh kilede koostise, morfoloogia ja optiliste omaduste sõltuvust lähtelahuse koostisest ning sadestusprotsessi parameetritest. Määrasime tehnoloogilised tingimused kontrollitud struktuursete ja optiliste omadustega kilede valmistamiseks.

$CuInS_2$ absorberkihi sadestamisel pihustuspürolüüsi meetodil ning kile omaduste tundmise ja suunamise alal on meie uurimisgrupil juba aastatepikkune kogemus ja *know-how* [Krunks jt, 2000; Mere jt, 2003; Kijatkina, 2004]. Meie kogemused metallisulfiidkilede pihustussadestuse alal on olnud aluseks nii mitteformaalsele kui rahvusvaheliste projektide raames tehtavale koostööle. Viimase 4 aasta jooksul oleme arendanud edasi kilede valmistamise tehnoloogiat, mis põhineb informatsioonil Raman spektroskoopia ja röntgenkiire fotoelektronspektroskoopia (XPS) meetodite rakendamisest kilede uurimiseks [Oja jt, 2005; Katerski jt, 2008]. Oleme optimeerinud tehnoloogilisi sadestustingimusi ja rakendanud täiendavaid keemilisi ja termilisi töötlusi [Oja jt, 2005;

Krunks jt, 2006c; Katerski jt, 2008] päikesepatareide jaoks sobivate morfoloogiliste, struktuursete, optiliste ja elektriliste omadustega $CuInS_2$ absorberkihtide valmistamiseks.

ÕHUKESEKILELISED JA NANOSTRUKTUURSED PÄIKESEPATAREID VEDELIKSADESTUSE MEETODITEL

Pihustuspürolüüsi meetodil valmistatud ZnO kilesid ning sool-geel sadestatud TiO_2 kihte kasutatakse erineva struktuuriga päikesepatareide koostisosadena − elektrit juhtiva aknakihina, barjäärikihina või 'idutsentrite' kihina ZnO nanovarraste kasvatamiseks. Absorberkihid, mille omadused on päikesepatarei efektiivsuse seisukohalt kõige määravamad, valmistatakse enamikel juhtudel vaakuumpõhiste meetoditega, mis üldjuhul garanteerivad ka materjali kõrge puhtuse.

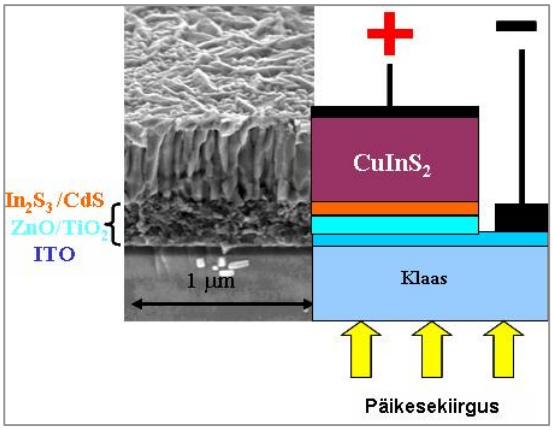
Meie seadsime eesmärgiks valmistada päikesepatarei struktuurid TiO_2/puhver/ $CuInS_2$ ja ZnO/puhver/$CuInS_2$ ainult odavate vedeliksadestuse meetoditega, kusjuures absorberkihina kasutasime pihustuspürolüüsi meetodil valmistatud $CuInS_2$. Õhukesekilelise patarei valmistasime nn 'pööratud' konfiguratsioonis (*superstrate configuration*), kus patarei valmistamist alustatakse juhtivale klaasalusele sadestatud optilise akna kihist, vastupidiselt tavapärasele lähenemisele, kus päikesepatarei valmistamist alustatakse absorberkihist. Kihtide sadestusjärjestuse määravad ära patarei konstruktsioon, kuid koosteelementide valikul tuleb arvestada ka antud kihi sadestuse või lõõmutuse temperatuuridega. Kui patarei valmistada vaid pihustusmeetodil, siis komponentide sadestustemperatuurid alanevad järjekorras aknakiht (ZnO, TiO_2) → puhverkiht (CdS, In_2S_3) → $CuInS_2$.Seadise valmistamine viiakse läbi ühes etapis, vahetades vaid pihustuslahuseid ja alandades temperatuuri iga järgneva kihi sadestamiseks. Õhukesekilelise päikesepatarei skeem koos SEM mikrofotoga on esitatud joonisel 3. Õhukesekileliste planaarsete struktuuride puhul, kus absorberkihi paksus on paarsada nanomeetrit, saavutasime maksimaalseks kasuteguriks 2,9% [Krunks, 2006d; Krunks jt, 2007]. Nagu näitab päikesepatarei füüsikaliste omaduste uurimine [Mere jt, 2004; Mere, 2006], limiteerib selliste struktuuride efektiivsust peamiselt elektronomaduste poolest mitteperfektne ja küllalt 'paks' absorbermaterjal.

Selleks, et valmistada efektiivseid päikesepatarei struktuure lihtsate ning odavate keemiliste meetoditega, tuleb muuta päikesepatarei disaini. Üheks selliseks võimaluseks on kasutada üliõhukese kihina absorberit, millel on kõrge valguse neeldumisvõime, kuid mis on puhtuse ja elektronomaduste poolest mitteperfektne. Sellises struktuuris separeeritakse fotogenereeritud laengukandjad p-n siirde sisemise elektrivälja mõjul, ilma et nad peaks läbima 'paksu' absorberkihti. Üliõhukese anorgaanilise absorberkihiga (*extremely thin absorber layer, ETA*) päikesepatarei konstruktsiooni idee aluseks on orgaanilise värvainega päikesepatarei (*dye senzitized solar cell*, DSSC), mis töötati välja 1991. aastal [O'Regan, Grätzel, 1991] ja kus praeguseks ajaks on saavutatud

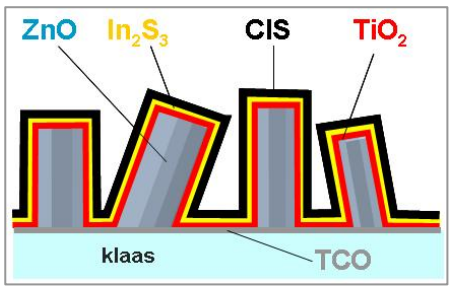
efektiivsused > 10%. DSSC struktuuris kasutatakse TiO_2 nanokristalle, mille pinnale kantakse monomolekulaarse *dye* kui absorberi kiht, kusjuures elektriliseks kontaktiks kasutatakse elektrolüüdi lahust. Sellise patarei nõrgimad kohad on *dye* (degradeerub) ja elektrolüüt (ebamugav kontakt), lisaks elektronide takistatud transport TiO_2 nanokristallide vahel.

Klassikalise DSSC puudusi saab vältida, kui valmistada patarei ZnO nanovarrastele ning kasutada anorgaanilist absorberit [Lévy-Clément jt, 2005]. Elektrokeemiliselt sadestatud ZnO nanovarrastel põhinev CdSe absorberiga patarei efektiivsuseks on saadud 2%. Meie uurimisgrupp on seda ideed edasi arendanud ja välja töötanud päikesepatarei uue konstruktsioonilise lahenduse, mis põhineb pihustusmeetodil valmistatud ZnO nanovarrastel [Krunks jt, 2008ab]. Kuigi kasutasime absorberkihina pihustuspürolüüsi meetodil valmistatud $CuInS_2$ õhukest kihti, ei ole kitsendusi absorberi materjalile ega tema valmistamise meetodile [Krunks jt, 2008a]. ZnO nanovarrastel põhineva päikesepatarei skeem on toodud joonisel 4. SEM mikrofoto patareist, mille kõik koosteelemendid on valmistatud keemilise pihustamise meetodil, on esitatud joonisel 5.

ZnO nanovarraste keemilise stabiilsuse tagamiseks järgmiste kihtide (puhverkiht, absorberkiht) valmistamisel happelistest (või aluselistest) lahustest tuleb nad katta keemiliselt stabiilse, kuid ergastavat valgust läbilaskva materjaliga.

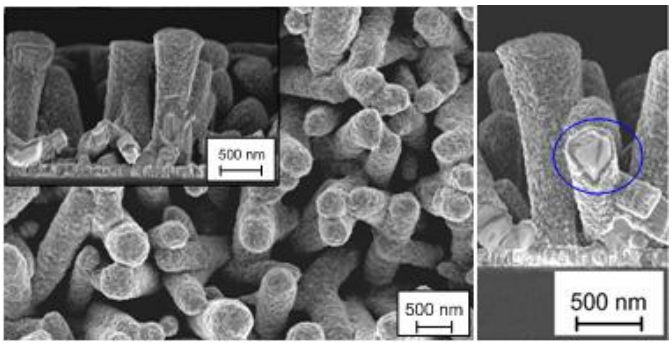


Joonis 3.
Õhukesekilelise päikesepatarei skeem (paremal) ja patarei ristlõike skaneeriva elektronmikroskoobi mikrofoto (vasakul).

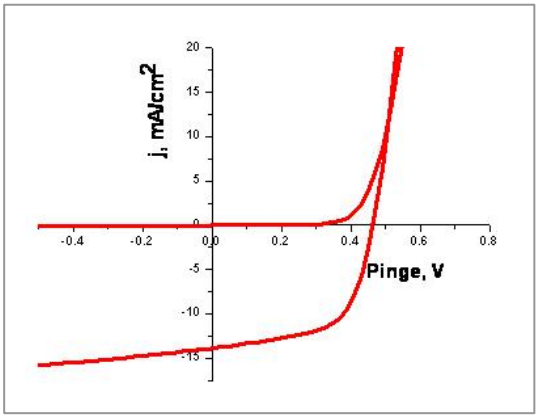


Joonis 4.
ZnO nanovarrastel põhineva päikesepatarei struktuuri skeem.

Kasutasime selleks TiO_2 üliõhukest kihti (1−4 nm), mille valmistasime sool-geel sukeldamise [Krunks jt, 2008b], aatomkihtsadestuse või sool-geel pihustamise meetoditel [Oja Acik jt, 2009a]. TiO_2-barjäärikihi paksus struktuuris on kriitiline parameeter, sest teatud paksusel hakkab ta takistama elektronide transporti, vähendades seeläbi patarei efektiivsust [Oja Acik jt, 2009a] Alternatiivseks võimaluseks on In_2S_3 puhverkihi valmistamine kahekihilisena [Mere jt, 2008]. Päikesepatarei väljundkarakteristikute (I-V sõltuvused), kvantsaagise spektraalsõltuvuste ning SEM ja EBIC (*electron beam induced current*) mõõtmistega tõestasime, et ZnO nanovarrastel põhinev üliõhukese absorberkihiga (kuni 30 nm) struktuur annab suurema valguse elektriks muundamise efektiivsuse tänu suuremale fotovoolu tihedusele tingituna suuremast p-n siirde pindalast [Krunks jt, 2008b]. ZnO nanovarrastel põhineva $CuInS_2$ üliõhukese absorberkihiga päikesepatarei, mille kõik koosteelemendid on valmistatud pihustuspürolüüsi meetodil, efektiivsuseks oleme 2008. a uurimistöö tulemusena saavutanud 4,0%, (tühijooksupinge 470 mV, lühisvool 14,5 mA/cm^2, täiteaste 60%) (joonis 6).



Joonis 5.
Skaneeriva elektronmikroskoobi mikrofoto pihustuspürolüüsi meetodil valmistatud ZnO nanovarrastel baseeruva päikesepatarei struktuurist enne kontaktmaterjali (CuSCN või PEDOT:PSS) pealekandmist. Parempoolsel fotol on näidatud, kuidas pihustusmeetodil valmistatud kihid (TiO_2+In_2S_3+$CuInS_2$) katavad ZnO nanovarda.



Joonis 6.
ZnO nanovarrastel põhineva päikesepatarei volt-amper karakteristikud pimedas ja valgustamisel (100 mW/cm^2). Struktuuri valguse elektriks muundamise efektiivsus on 4%.

Meile teadaolevate andmete järgi on see kõrgeim, mis on praeguseks ajaks saavutatud ZnO nanovarrastel põhinevates patareides. Kahtlemata on siin palju arenguruumi nii praegu kasutatud tehnoloogiate optimeerimise, konstruktsiooni täiendamise kui ka uute ainete ja tehnoloogiate kasutamise näol. Senine areng toidab motivatsiooni uurimistöö jätkamiseks.

Uurimistööde tsükli teemal on aastatel 2005−2008 ilmunud 25 teaduspublikatsiooni, tehnoloogiliste väljatöötluste kaitseks on esitatud kolm patenditaotluste perekonda 12 patenditaotlusega ning kaitstud 3 filosoofiadoktori kraadi.

Lõpetuseks tahan ma tänada kolleege Tallinna Tehnikaülikooli materjaliteaduse instituudis, materjaliuuringute keskuses ja anorgaaniliste materjalide laboris, Tartu Ülikoolis, Helsingi ja Budapesti Tehnikaülikoolis ja mujal välismaal, kes osalesid selles uurimistööde tsüklis. Mu siiras tänu kuulub uurimistöös aktiivselt osalenud teaduritele − Arvo Merele, Ilona Oja Acikule, Tatjana Dedovale ja Atanas Katerskile, kelle panus teaduspreemia vääriliseks hinnatud teadustöös on märkimisväärne.

KIRJANDUSVIITED:

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

Bombicz, P., Madarasz, J., Krunks, M., Niinistö, L., Pokol, G. (2007). Multiple secondary interaction arrangement in the nonlinear optical dichlorobis-(thiourea)zinc. J. Coord. Chem., 60, 457-464.

Dedova, T., Krunks, M., Volobujeva, O., Oja, I. (2005a). ZnS thin films deposited by spray pyrolysis technique. Phys. Stat. Sol. c, 2, 1161-1166.

Dedova, T., Mere, A., Krunks, M., Kijatkina, O., Oja, I., Volobujeva, O. (2005b). Structural and optical characterization of sprayed ZnS thin films. Proc. of SPIE : Advanced Optical Materials, 5946, 34-40.

Dedova, T., Krunks, M., Grossberg, M., Volobujeva, O., Oja Acik, I. (2007a). A novel deposition method to grow ZnO nanorods: spray pyrolysis. Superlatt. Microstruct., 42, 444-450.

Dedova, T., Volobujeva, O., Klauson, J., Mere, A., Krunks, M. (2007b). ZnO nanostructures via spray deposition of solutions containing zinc chloride and thiocarbamide. Nanoscale Res. Lett., 2, 391-396.

Dedova, T., Krunks, M., Mere, A., Klauson, J., Volobujeva, O. (2007c). Preparation of shape and size-controlled zinc oxide nanostructures by chemical spray pyrolysis technique. Christen, J., Jagadish, C., Look, D. C., Yao, T., Bertram, F. (eds). Zinc Oxide and Related Materials, Warrendale, PA, 0957-K10-26. (Mater. Res. Soc. Symp. Proc.; 957).

Dedova, T., Wienke, J., Moris, G., Krunks, M. (2007d). Characterization of the chemical bath deposited $In(OH)_xS_y$ films: effect of the growth conditions. Thin Solid Films, 515, 6064-6067.

Dedova, T., Klauson, J., Badre, C., Pauporté, Th., Mere, A., Volobujeva, O., Nisumaa, R., Krunks, M. (2008). Zinc oxide nanostructured layers by chemical spray of zinc acetate solutions. Phys. Stat. Sol. a, 205, 2355-2359.

Es-Souni, M., Oja, I., Krunks, M. (2004). Chemical solution deposition of thin TiO_2-anatase films for dielectric applications. J. Mater. Sci.-Mater. Electr., 15, 341-344.

Katerski, A., Mere, A., Kazlauskiene, V., Miskinis, J., Saar, A., Matisen, L., Kikas, A., Krunks, M. (2008). Surface analysis of spray deposited copper indium disulfide films. Thin Solid Films, 516, 7110-7115.

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

Kijatkina, O. (2004). Deposition of Copper Indium Disulphide Films by Chemical Spray Pyrolysis. PhD Thesis on Natural and Exact Sciences. TTU Press, Tallinn.

Krunks, M., Mellikov, E. (1995). Zinc oxide thin films by the spray pyrolysis method. Thin Solid Films, 270, 33-36.

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

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

Krunks, M., Leskelä, T., Mutikainen, I., Niinistö, L. (1999). A thermoanalytical study of copper(I) thiocarbamide compounds. J. Therm. Anal. Calor., 56, 479-484.

Krunks, M., Mikli, V., Bijakina, O., Rebane, H., Mere, A., Varema, T., Mellikov, E. (2000). Composition and structure of $CuInS_2$ films prepared by spray pyrolysis. Thin Solid Films, 361, 61-64.

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

Krunks, M., Oja, I., Tõnsuaadu, K., Es-Souni, M., Gruselle, M., Niinistö, L. (2005a). Thermoanalytical study of acetylacetonate modified titaniumtetraisopropoxide as a precursor for TiO_2 films, J. Therm. Anal. Calor., 80, 683-688.

Krunks, M., Kijatkina, O., Mere, A., Varema, T., Oja, I., Mikli, V. (2005b). Sprayed $CuInS_2$ films grown under Cu-rich conditions as absorbers for solar cells. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 87, 207-217.

Krunks, M., Dedova, T., Oja, I. (2006a). Method of preparing zinc oxide nanorods on a substrate by chemical spray pyrolysis. Rahvusvaheline patenditaotlus WO2006108425, 19.10.2006.

Krunks, M., Dedova, T., Oja Açik, I. (2006b). Spray pyrolysis deposition of Zinc Oxide nanostructured layers. Thin Solid Films, 515, 1157-1160.

Krunks, M., Mere, A., Katerski, A., Mikli, V., Krustok, J. (2006c). Characterization of sprayed $CuInS_2$ films annealed in hydrogen sulphide atmosphere. Thin Solid Films, 511-512, 434-438.

Krunks, M. (2006d). Eesti materjaliuurijate tegevus õhukesekileliste päikesepatareide arendamisel. Keskonnatehnika, 5/06, 6-11.

Krunks, M. (2007). Õhukesekilelised päikesepatareid pihustuspürolüüsi meetodil. Teadusmõte Eestis (IV). Tehnikateadused. Eesti Teaduste Akadeemia, 41-48.

Krunks, M., Katerski, A., Dedova, T., Mere, A., Oja Acik, I. (2008a). Photovoltaic Cell based on ZnO nanorods Rahvusvaheline patenditaotlus PCT/EE2008/000019, 09.07.2008.

Krunks, M., Katerski, A., Dedova, T., Oja Acik, I., Mere, A. (2008b). Nanostructured solar cell based on spray pyrolysis deposited ZnO nanorod array. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 92, 1016-1019.

Krunks, M., Mere, A., Katerski, A. (2008c). Copper indium disulfide films by chemical spray pyrolysis for photovoltaics. Proc. Intern. Conf. Solar Cells, IC SOLACE, 16-19.

Lévy-Clément, C., Tena-Zaera, R., Ryan, M. A., Katty, A., Hodes, G. (2005). CdSe-Sensitized p-CuSCN/nanowire n-ZnO heterojunctions. Adv. Mater., 17, 1512-1515.

Madarasz, J., Krunks, M., Niinistö, L., Pokol, G. (2004). Evolved gas analysis of dichlorobis(thiourea)zinc(II) by coupled TG-FTIR and TG/DTA-MS techniques. J. Therm. Anal. Calor., 72, 679-686.

Mellikov, E., Altosaar, M., Krunks, M., Krustok, J., Varema, T., Volobujeva, O., Grossberg, M., Kaupmees, L., Dedova, T., Timmo, K., Ernits, K., Kois, J., Oja Acik, I., Danilson, M., Bereznev, S. (2008). Research in solar cell technologies at Tallinn University of Technology. Thin Solid Films, 516, 7125-7134.

Mere, A., Kijatkina, O., Rebane, H., Krustok, J., Krunks, M. (2003). Electrical properties of sprayed $CuInS_2$ films for solar cells. J. Phys. Chem. Solids, 64, 2025-2029.

Mere, A., Katerski, A., Kijatkina, O., Krunks, M. (2004). Solar cell structures by non-vacuum techniques based on sprayed $CuInS_2$ absorber layers. Proc. 19th Eur. Photovolt. Sol. En. Conf., Paris, 2004, 1973-1976.

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

Mere, A., Katerski, A., Dedova, T., Oja Acik, I., Krunks, M. (2008). Extremely thin absorber layer nanostructured solar cell by chemical spray pyrolysis. Proc. 23rd Eur. Photovolt. Sol. En. Conf., Valencia, Spain, 2008, 2147-2150.

Oja, I., Nanu, M., Katerski, A., Krunks, M., Mere, A., Raudoja, J., Goossens, A. (2005). Crystal quality studies of $CuInS_2$ films prepared by spray pyrolysis. Thin Solid Films, 480-481, 82-86.

Oja, I., Mere, A., Krunks, M., Nisumaa, R., Solterbeck, C.-H., Es-Souni, M. (2006). Structural and electrical characterization of TiO_2 films grown by spray pyrolysis. Thin Solid Films, 515, 674-677.

Oja Açik, I., Madarász, J., Krunks, M., Tõnsuaadu, K., Denke, J., Pokol, G., Niinistö, L. (2007). Thermoanalytical studies of titanium(IV) acetylacetonate xerogels with emphasis on evolved gas analysis. J. Therm. Anal. Calor., 88, 557-563.

Oja Acik, I., Katerski, A., Mere, A., Aarik, J., Aidla, A., Dedova, T., Krunks, M. (2009a). Nanostructured solar cell by spray pyrolysis: Effect of titania barrier layer on the cell performance. Thin Solid Films, 517, 2443-2447.

Oja Açik, I., Madarász, J., Krunks, M., Tõnsuaadu, K., Pokol, G., Niinistö, L. (2009b). Titanium(IV) acetylacetonate xerogels for processing titania films: thermal analysis. J. Therm. Anal. Calor., in press.

O'Regan, B., Grätzel, M. (1991). A. low-cost, high efficiency solar-cell based on dye-sensitized colloidal TiO2 films. Nature, 353, 737-740.

Reedo, V., Oja Acik, I., Matisen, L., Kanarjov, P., Vorobjov, A., Kiisk, V., Krunks, M., Sildos, I. (2008). Luminescent materials based on thin metal oxide films doped with rare earth ions. Phys. Sol. State, 50, 1727-1730.

Sabataitytė, J., Oja, I., Lenzmann, F., Volobujeva, O., Krunks, M. (2006). Characterization of nanoporous TiO_2 films prepared by sol-gel method. Compt. Rend. Chimie, 9, 708-712.

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

Teaduspreemia arstiteaduse alal publikatsioonide tsükli "Tsentraalse immuuntolerantsuse molekulaarsed mehhanismid" eest

Pärt Peterson

Sündinud 18.04.1966 Tartus

1984 Miina Härma Gümnaasium
1991 Tartu Ülikool, geenitehnoloogia
1992 MSc, bioloogia, Tartu Ülikool
1996 PhD, immunoloogia, Tampere Ülikool

1992–2000 Tampere Ülikooli biotehnoloogia instituudi teadur, meditsiinitehnoloogia instituudi vanemteadur, dotsent; 2000–2003 Soome Akadeemia teadur; alates 2003 Tartu Ülikooli arstiteaduskonna üld- ja molekulaarpatoloogia instituudi molekulaarpatoloogia uurimisgrupi erakorraline professor

Tampere Ülikooli meditsiinitehnoloogia instituudi nõukogu liige, Tampere FIT Biotechi kvaliteedikontrolli osakonna konsultant

Soome Immunoloogia Seltsi ja Eesti Ornitoloogia Seltsi liige

Avaldanud üle 80 teadusartikli.

Eelmise sajandi viiekümnendate aastate alguses leidsid eluteaduste ajaloos aset olulised sündmused. Teadusajaloo keskseks pöördemomendiks oli kahtlemata DNA struktuuri avastamine, mis on olnud kogu moodsa molekulaarbioloogia ja genoomiuuringute aluseks. Aga umbes samal ajaperioodil, kui Watson ja Crick tegelesid kaksikheeliksi struktuuri selgitamisega, toimusid olulised muutused ka immunoloogia paradigmades. Nimelt esitas Austraalia teadlane Frank Macfarlane Burnet kontseptsiooni, mille kohaselt immuunsüsteem suudab vahet teha oma ja võõraste antigeenide vahel. Burnet arvas, et embrüonaalsel ja vahetul sünnijärgsel perioodil omandab iga organismi immuunsüsteem tolerantsuse omaenda kudede vastu, mis säilib elu lõpuni. Sel perioodil saavad organismi koed nn "puutumatuse" staatuse, samas kui immuunsüsteem säilitab oma võime reageerida võõrastele antigeenidele. Esitades uue hüpoteesi, ei tõestanud Burnet seda eksperimentaalselt, vaid seda tegi mõned aastad hiljem töörühm, mida juhatas teine tolleaegne kuulus immunoloog Briti saartelt, Peter Medawar. Kasutades immuunrakkude sünnijärgselt siirdamist ühelt hiireliinilt teisele näitas Medawari töörühm, et kimäärsed hiired omandasid eluaegse tolerantsuse mõlema hiireliini nahatransplantaatide vastu. Selle uudse, immuuntolerantsuse kontseptsiooni tõestamise eest said Frank Macfarlane Burnet ja Peter Medawar 1960. aastal Nobeli preemia meditsiini ja füsioloogia alal. Bur-

net ja Medawari töö tähtsus seisneb selles, et ta nad pakkusid uue teooria, mis seletas immuunrakkude klonaalset selektsiooni ja seda, miks organismi immuunsüsteem ei pöördu iseenese vastu. Kuidas tolerantsus tagatakse molekulaarsel tasandil, tol ajal mõistagi veel ei teatud.

T rakkude primaarseks ülesandeks on tunda ära ja reageerida võõraste, näiteks viraalsete ja bakteriaalsete antigeenidega, milleks on peamiselt peptiidide osad valkudest. Samas on iga imetaja olemise aluseks tolerantsus oma enda organismi suhtes. Immuuntolerantsus on olukord, kus immuunsüsteem ei reageeri antigeeni olemasolule organismis. Tolerantsust tagavad mehhanismid on üldjuhul väga efektiivsed, sellest hoolimata leidub umbes 70–80 erinevat patoloogilist seisundit, kus immuunsüsteem reageerib organismi enda osadega. Sellist olukorda nimetatakse autoimmuunseks reaktsiooniks.

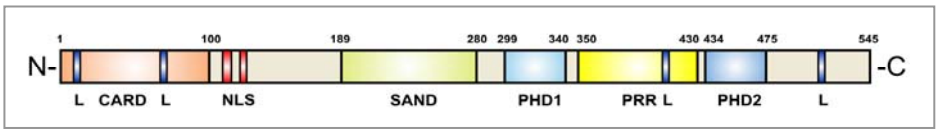
Autoimmuunsete haiguste korral tekivad kudedes põletikulised reaktsioonid, mis viivad koekahjustusteni. Nii geneetilised kui ka keskkonnafaktorid mõjutavad autoimmuunse reaktsiooni teket ja iga üksiku indiviidi riski haigestuda. Autoimmuunsete haiguste täpset etioloogiat sageli ei teata. Sellest tulenevalt on ka lähenemised ravi andmisel pigem haiguste tagajärgede leevendamine kui tegelemine põhjustega.

Viimaste aastate uurimused on näidanud, et autoimmuunse reaktsiooni tekke seisukohalt on oluline roll tüümuses (ehk harknäärmes) toimuval T rakkude diferentseerumisel [Kyewski, Klein, 2006]. Iga üksiku indiviidi tüümuses toimub suurusjärgus 10^7 erineva T-rakulise klooni küpsemine. Seejuures põhineb T raku küpsemine vaid T rakus toimuva T raku retseptori genoomse lookuse osade rekombinatsioonil. Perioodil, kui T rakud tüümuses diferentseeruvad, nimetatakse neid tümotsüütideks. Tüümuses toimuva diferentseerimise käigus liiguvad T rakud tüümuse koore osast säsisse ja läbivad kaks selektsiooni protsessi. Kuna T raku retseptori genoomne reorganiseerumine on stohhastiline protsess, siis toodetakse arenevates T rakkudes kõikvõimalike kombinatsioonidega retseptoreid, mis potentsiaalselt tunnevad ära patogeenseid mikroobe, viiruseid ja baktereid, kui ka kõigi muude valgujärjestuste, muuhulgas omaenda valkude vastu. Vältimaks immuunreaktsiooni omaenda kudedega, peavad T rakud läbima teise, nn negatiivse selektsiooni, kus T rakud, mis tunnevad ära omaenda antigeene, hävivad. Negatiivse selektsiooni puudulikkus viibki autoimmuunse reaktsiooni tekkele.

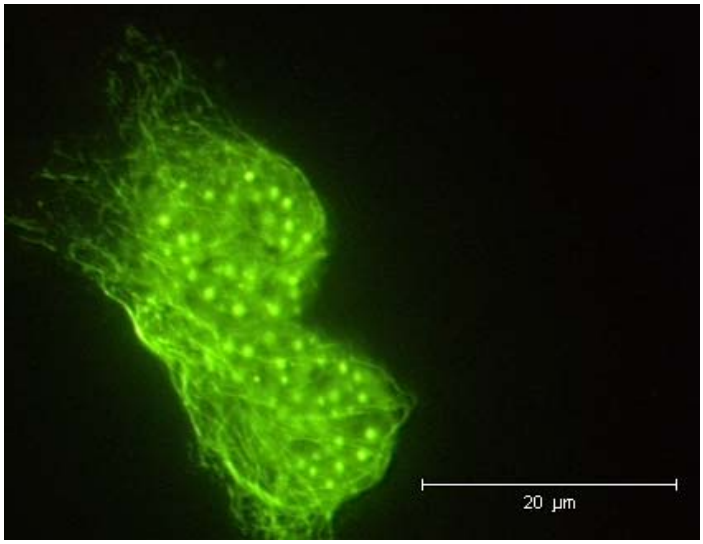
Oluline roll negatiivse selektsiooni protsessis on tüümuse säsis lokaliseeruvatel dendriitrakkudel ja tüümuse epiteeli rakkudel. Mõlemad on antigeene efektiivselt töötlevad rakud ja "esitavad" tümotsüütidele antigeene oma rakumembraanil olevate MHC molekulide abil. Eriline osa on siinjuures tüümuse epiteelirakkudel, kuna nad on võimelised aktiveerima genoomis mitmeid genoomiklastreid, kus asetsevad koespetsiifilised antigeenid. Arvatakse, et selline tüümuse epiteelirakkudele omane avatud geeniekspressioon võimaldab

efektiivset koespetsiifilist antigeenide esitamist arenevatele tümotsüütidele ja vältida seeläbi autoimmuunse reaktsiooni teket.

Kuidas täpselt avatud geeni ekspressioon tüümuse epiteelis käivitub, pole teada, aga üheks oluliseks faktoriks on *Autoimmune Regulator* (AIRE) [Mathis, Benoist, 2009], mille geeni avaldumise ja funktsiooniga on meie uurimisrühm viimastel aastatel tegelenud (joonis 1). AIRE ekspresseerub peaaegu ainult tüümuse epiteelirakkudes ja vähest ekspressiooni on siiani tuvastatud organismi teistes rakkudes, nagu dendriitrakkudes. AIRE valk on oma funktsioonilt transkriptsiooniline regulaator, see tähendab, et ta osaleb teiste geenide regulatsioonis. Rakusiseselt lokaliseerub AIRE valk rakutuuma (joonis 2).



Joonis 1.
Skeem AIRE valgu domeenidest. Näidatud on CARD domeen, mis vastutab dimeriseerimise eest; SAND domeen, mis võiks seonduda DNA-ga; kaks PHD tüüpi tsinksõrme, millest esimene (PHD1) seondub histoon H3-ga ning proliinirikas regioon PRR, mille funktsioon on seni teadmata. Lisaks on AIRE-l neli LXXLL valgumotiivi (L), mis seonduvad teiste transkriptsiooni faktoritega. Pildi autor: Tõnis Org.



Joonis 2.
Rakkude sees moodustab AIRE valk tuumas punktilaadseid “tuumakehakesi”. Pildi autor: Ingrid Liiv.

AIRE valgul on mitu transkriptsioonifaktoritele omast domeeni, mis teistes sarnastes valkudes sageli osalevad valk-valgu interaktsioonides. AIRE valk seondub teiste tuumavalkudega ja üheks selliseks oluliseks AIRE valgupartneriks on teine transkriptsiooniline aktivaator, mille nimeks on CBP. Lisaks üldisele transkriptsioonilise aktivatsiooni võimele on CBP-l kirjeldatud ka histoonide atsetüleerimise funktsioon. Atsetüleerides histoone ja sellega neutraliseerides nukleosoomide ning genoomse DNA tihedalt pakitud kompleksi, suudab CBP avada kromatiini transkriptsiooniliste protsesside jaoks. See annab alust arvata, et AIRE transkriptsiooniline funktsioon on tihedalt seotud seondumisega kromatiini ja kromatiiniga seotud valgukompleksidega.

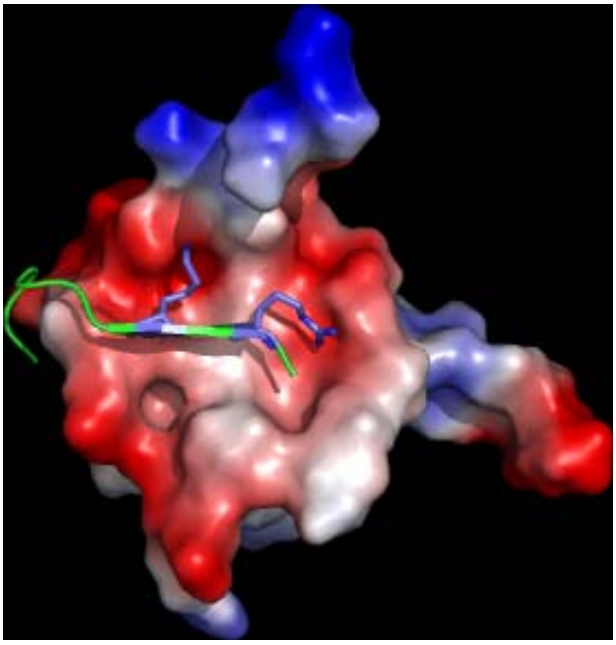
AIRE geeni mutatsioonid põhjustavad oodatult autoimmuunseid haigusi. Inimestel põhjustab AIRE geeni defekt haigust nimega Autoimmuune Polüendokrinopaatia Sündroom tüüp 1 (APS1, ka tuntakse nime all APECED: *Autoimmune polyendocrinopathy candidiasis ectodermal dystrophy*). See on retsessiivselt päranduv geneetiline haigus, kus haigetele tekivad lapseeast alates mitmed autoimmuunsed haigused, mis hõlmavad eelkõige endokriinseid kudesid. Neist kudedest tavalisemad on paratüreoid nääre, neerupealse koor, pankrease insuliini tootvad saared, ja türeoidnääre. Sarnaselt inimesele tekitab Aire puudumine mitmeid autoimmuunseid haigusi ka hiires [Hubert jt, 2009]. Eelkõige on nimetatud kudede kahjustuse põhjuseks nendes kudedes koespetsiifiliselt ekspresseeruvad antigeenid, mida immuunreaktsioon peab võõrasteks. Oleme oma töös ka näidanud AIRE otsest mõju koespetsiifilistele geenidele tüümuse rakkudes [Kont jt, 2008].

Üheks kesksemaks AIRE valgu domeeniks on kaks niinimetatud PHD (plant homeodomain) tüüpi tsinksõrme. Tsinksõrmedeks kutsutakse valgudomeene, mille konformatsiooni kooshoidmiseks on vaja tsingi aatomeid ja mis oma esialgselt struktuurilt meenutavad väljaulatuvaid "sõrmesid". Hiljem on neid leitud mitmeid erinevaid tüüpe ja sageli on teatud tüüpi tsinksõrmedel sarnane funktsioon, näiteks seonduda DNA või kromatiiniga. PHD tüüpi tsinksõrmede ülesandeks on seonduda kromatiiniga seoses olevate histoonidega. Mõned aastad tagasi näidati, et PHD tsinksõrmed valkudes BPTF ja ING2 on võimelised ära tundma ja seonduma histoon H3 N-terminaalsele peptiidiosale [Li jt, 2006; Pena jt, 2006]. Selline PHD seondumine oli otseselt sõltuv sellest, milline postranslatsiooniline modifikatsioon esines histoon H3 lüsiin 4 (H3K4) positsioonis. Histoonide posttranslatiivseid modifikatsioone on mitmeid, näiteks võib teatud aminohappeid histoon H3 N terminaalses osas nii fosforüleerida, atsetüleerida või metüleerida. Histooni märgiste kombinatsiooni nimetatakse sageli "histooni koodiks", millel on mitmeid seoseid genoomsete alade avatuse või aktivatsiooni staatusega. Üheks kesksemaks modifikatsiooniks on just H3K4 metülatsioon, mis võib esineda mitte-metüleeritud, mono-, di- või trimetüleeritud kujul. Mitmed varasemad uurimused on veenvalt näidanud, et kõrgelt ekspresseeritavatel geenidel esineb promootori alas H3K4 trimetü-

latsiooni (H3K4me3) tõus, samas kui näiteks histoon H3 lüsiin 27 trimetülatsioon (H3K27me3) märge on enamasti seotud vaigistatud staatusega.

Kuna seondumine histoonidega võis selgelt olla üheks mehhanismiks, kuidas AIRE-sõltuv avatud geeniekspressioon tagatakse, siis püstitasime hüpoteesi, et AIRE võib seonduda histoon H3-ga. Tõepoolest, esitatud hüpotees leidiski kinnitust ning mitmete biokeemiliste ja biofüüsikaliste meetodite (koostöös Giovanna Musco, Milaano, Itaalia) kasutuse järel näitasime hiljuti, et AIRE esimene PHD tsinksõrm seondub histoon H3 N-terminaalse peptiidiga, kui lüsiin 4 positsioon ei ole metüleeritud [Org jt, 2008]. Erinevalt aktiivsete geenide promootoris olevast H3K4me3 märgisest esineb selline modifikatsioon, kus histoon H3 neljas aminohappe positsioon ei ole metüleeritud (H3K4me0) neil geenidel, mida aktiivselt ei transkribeerita. Samas ilmselt ei ole sellised geenid ka aktiivselt suppresseeritud.

Oleme koostöös Dr Muscoga teinud süstemaatilise analüüsi selgitamaks, millised histoon H3 N-terminaalsed aminohapped ja nende võimalikud posttranslatiivsed modifikatsioonid on AIRE-PHD1 seondumise seisukohalt olulised (joonis 3). Strukturaalse analüüsi (NMR seondumine, fluorestsentsi spektroskoopia, kalorimeetria) ning biokeemiliste meetodite (otsesed valgu interaktsioonid) tulemused näitavad, et peaaegu kõik selle regiooni võimalikud posttranslatiivsed modifikatsioonid (H3R2me1, H3R2me2, H3T3phos, H3K9Ac) takistavad AIRE-PHD seondumist [Chignola jt, 2009].



Joonis 3.
AIRE PHD tsinksõrme domeeni struktuur kompleksis histoon H3 N terminaalse otsaga.
Pildi autor: Dr Giovanna Musco, (San Raffaelle Teadusinstituut, Milaano).

Saadud tulemused osutavad võimalusele, et AIRE üks funktsioone on aktiveerida selliseid promootoreid, millel esineb vähe H3K4me3 märgist või puudub H3K4 metülatsioon üldse. Selle tööhüpoteesi kohaselt AIRE "valib" aktiveeritavad geenid lähtudes nende promootoris olevast histooni koodist. See tähendab, et AIRE poolt aktiveeritava geeni promootoris peaks olema eelistatult H3K4me0 märgis. Sellise "histooni koodiga" promootorid esinevad sageli koespetsiifilistel geenidel nendes rakkudes, kus nad tavaliselt ei ekspresseeru. Peamised selle koostöö tulemused on esitatud ka ülevaateartiklis, mis on avaldatud ajakirjas Epigenetics [Musco, Peterson, 2008].

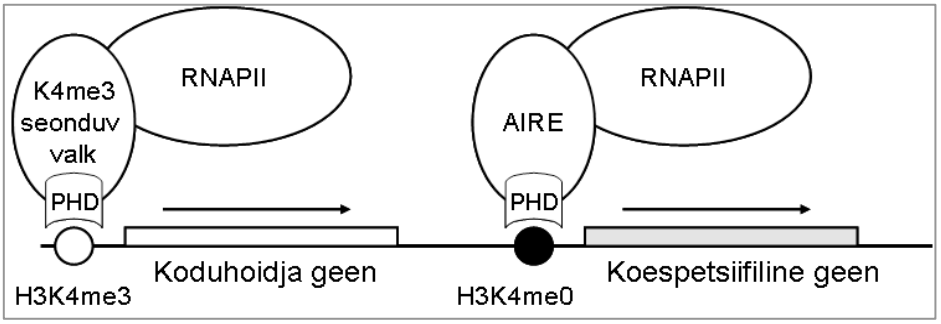
Teise eesmärgina oleme kirjeldanud ka teist AIRE valgus olevat domeeni. Nimelt leidsime koostöös Dr Tina Richiga (Glasgow Ülikool), et N-terminaalses osas olev regioon on väga lähedane mõnedes teistes valkudes kirjeldatud CARD domeeniga [Ferguson jt, 2008a]. CARD domeen esineb sageli valkudes, mis on seotud rakkude programmeeritud surmaga (apoptoosiga) või immuunreaktsioonis osaleva signaali vahendamises. Samas on seda domeeni seni üpris vähe kirjeldatud tuumas asetsevatel valkudel. Sellise koostöö kaudu näitasime, et CARD domeenis olevad mutatsioonid, mis põhjustavad APS1 haigust, põhjustavad AIRE transkriptsioonilise aktiivsuse langust. Selline transkriptsioonilise aktiivsuse langus on tõenäoliselt tingitud sellest, et CARD domeen on vajalik AIRE homodimeeride ehk iseendaga seondumise jaoks [Ferguson jt, 2008b]. Teame ka, et transkriptsiooniliseks aktiivsuseks on oluline ka AIRE posttranslatiivne fosfolüreemine [Liiv jt, 2008].

Kolmanda peamise suunana oleme uurinud immuunreaktsioone APS1 haigetel. Nagu eespool mainitud, on APS1 haigetel AIRE geeni defekt ja sellest tulenevalt on välja kujunenud immuuntolerantsuse puudulikkus. Tagajärjeks on immuunreaktsioonid mitmete omaenda valkude vastu. Üheks omapärasemaks tulemuseks on nendel patsientidel tekkiv immuunreaktsioon interferoonide vastu. Interferoonid on väiksed valgud, mida sünteesitakse ja sekreteeritakse mitmesuguste patogeenide, eriti viraalsete infektsioonide korral. Ka on nad olulised immuunreaktsioonides vähkkasvajate vastases reaktsioonis. Interferoonide sünteesi tagajärjel toimub teiste rakkude kaitsevõime suurenemine ja immunoloogilise reaktsiooni tõus. Eriti oluline on nende funktsioon RNA viiruste vastase kaitse kujunemises.

Koostöös professor Nick Willcoxi (Oxfordi Ülikool) ja Dr. Tony Meageriga (*NIBSC*, Briti Rahvuslik Bioloogiliste Standardite ja Kontrollide Instituut) leidsime, et APS1 haigetel on erakordselt kõrgetes tiitrites autoantikehad tüüp 1 interferoonide vastu [Meager jt, 2006]. Tegemist on erakordse leiuga, sest immuunsüsteemi regulatsioonis osalevate signaalmolekulide vastu esinevate autoantikehade kohta teatakse väga vähe. Uurides nende autoantikehade mõju APS1 haigete vererakkudele leidsime, et autoantikehad inhibeerisid märgatavalt interferoonide toime mõju vere leukotsüütides [Kisand jt, 2008]. Selline interferoonide mõju inhibitsioon autoantikehade poolt andis alust oletada, et

interferoonide vastased antikehad võivad oluliselt mõjutada autoimmuunset protsessi [Meager jt, 2008].

Kuidas AIRE võiks mõjutada avatud geeni ekspressiooni tüümuses, elavas organismis? Oleme oma sellekohase kontseptsiooni esitanud artiklis, mis on ilmunud *Nature Reviews Immunology* ajakirjas [Peterson jt, 2008]. Seal esitatud idee lihtsustatud kokkuvõtte kohaselt on AIRE transkriptsiooni aktivaator, mis spetsiifiliselt ekspresseerudes tüümuse epiteeli rakkudes suudab toetada selliste organismi enda geenide aktivatsiooni, mis tavaliselt väljaspool oma spetsiifilist kudet või rakutüüpi ei ekspresseeru, seega eelistatult koespetsiifilise ekspressioonimustriga geene (joonis 4). Sellise transkriptsiooni toimimise eelduseks on AIRE seondumine kromatiiniga läbi PHD tsinksõrmede ja ka CARD domeeni, mis aitab AIRE-l moodustada dimeerseid komplekse.



Joonis 4.
Skeem AIRE funktsioonist tüümuse epiteelirakkudes. Enamiku geenide avaldumine on seotud posttranslatiivse modifikatsiooniga, kus histoon H3 lüsiin 4 esineb trimetüleeritud kujul. Sellise modifikatsiooniga seonduvad transkriptsioonilised aktivaatorid, mis omavad PHD tsinksõrme domeeni (K4me3 "reader") ja alustavad geeni transkriptsiooni RNA polümeraas II (RNAPII) abil. AIRE seevastu tunneb tüümuse epiteelirakkudes ära teise epigeneetilise märgise, kus histoon H3 lüsiin 4 on metüleerimata (H3K4me0). Selline märgis esineb peamiselt koespetsiifiliste geenide promootoris. AIRE koostöö teise transkriptsioonilise aktivaatoriga tagab nende geenide aktivatsiooni.

Kuna AIRE avaldub ainult tüümuse epiteelis, siis sellest tuleneb ka nende tüümuse rakkude eriline võime ekspresseerida omaenda antigeene kodeerivaid valke. Selline ekspressioon on vajalik autoantigeenide esitamiseks arenevatele T-rakkudele ning seejärel toimuva autoreaktiivsete T rakkude elimineerimiseks. Juhul kui AIRE geen on muteeritud, nagu see on näiteks APS1 haigetel, siis oma organismi valkudega reageerivaid patogeenseid T rakke tüümuses ei elimineerita ja tekivad autoimmuunsed reaktsioonid, mille üheks näiteks on

autoantikehad interferoonide vastu. Seega on molekulaarsed mehhanismid ning epigeneetiliste modifikatsioonide äratundmine üheks oluliseks faktoriks autoreaktiivsete T rakkude negatiivses selektsioonis. Võib öelda, et meie poolt saadud tulemused on osa uuringutest, mis kinnitavad Burneti ja Medawari klonaalse selektsiooni teooriat molekulaarsel tasandil.

Kõigis eelpool nimetatud suundades on lisaks sellele, et nad keskenduvad ühele läbivale teemale, olulised veel kolm täiendavat aspekti. Esiteks rahvusvaheline koostöö. Tõenäoliselt oleks ilma efektiivsete koostööpartneriteta raske olnud konkurentsis püsida. Selline partnerlus, kus ühised eesmärgid ja kompetents põimuvad, on tänases teaduses väga tähtis. Teiseks oluliseks läbivaks jooneks on meie töörühma sisene sünergia, mis tekib sellest, et sama rühma inimesed valdavad erinevaid meetodeid ja lähenemisi, aga uurivad ühte suuremat valdkonda. Kolmandaks on oluline interdistsiplinaarne lähenemine teadusteemale. Püüame oma rühma teadustöös kombineerida immunoloogiat molekulaarbioloogia, epigeneetika ja struktuuribioloogiaga. Interdistsiplinaarsus annab eelise vaadata asju uue vaatenurga alt. Autor tänab kõiki oma töörühma liikmeid, kusjuures eriti oluline on eelpool kirjeldatud teadussaavutustes olnud Ana Rebase, Kai Kisandi, Martti Laane, Tõnis Orgi, Ingrid Liivi ja Vivian Konti panus.

KIRJANDUS

Chignola, F., Gaetani, M., Rebane, A., Org, T., Mollica, L., Zucchelli, C., Spitaleri, A., Mannella, V., Peterson, P., Musco, G. (2009). The solution structure of the first PHD finger of autoimmune regulator in complex with non-modified histone H3 tail reveals the antagonistic role of H3R2 methylation. Nucl. Acids Res., in print.

Ferguson, B. J., Alexander, C., Rossi, S. W., Liiv, I., Rebane, A., Worth, C. L., Wong, J., Laan, M., Peterson, P., Jenkinson, E. J., *et al.* (2008a). AIRE's CARD revealed, a new structure for central tolerance provokes transcriptional plasticity. J. Biol. Chem., 283, 1723-1731.

Ferguson, B. J., Cooke, A., Peterson, P., Rich, T. (2008b). Death in the AIRE. Trends Immunol., 29, 306-312.

Hubert, F. X., Kinkel, S. A., Crewther, P. E., Cannon, P. Z., Webster, K. E., Link, M., Uibo, R., O'Bryan, M. K., Meager, A., Forehan, S. P., *et al.* (2009). Aire-deficient C57BL/6 mice mimicking the common human 13-base pair deletion mutation present with only a mild autoimmune phenotype. J. Immunol., 182, 3902-3918.

Kisand, K., Link, M., Wolff, A. S., Meager, A., Tserel, L., Org, T., Murumagi, A., Uibo, R., Willcox, N., Trebusak Podkrajsek, K., *et al.* (2008). Interferon autoantibodies associated with AIRE deficiency decrease the expression of IFN-stimulated genes. Blood, 112, 2657-2666.

Kont, V., Laan, M., Kisand, K., Merits, A., Scott, H. S., Peterson, P. (2008). Modulation of Aire regulates the expression of tissue-restricted antigens. Mol. Immunol., 45, 25-33.

Kyewski, B., Klein, L. (2006). A central role for central tolerance. Ann. Rev. Immunol., 24, 571-606.

Li, H., Ilin, S., Wang, W., Duncan, E. M., Wysocka, J., Allis, C. D., Patel, D. J. (2006). Molecular basis for site-specific read-out of histone H3K4me3 by the BPTF PHD finger of NURF. Nature, 442, 91-95.

Liiv, I., Rebane, A., Org, T., Saare, M., Maslovskaja, J., Kisand, K., Juronen, E., Valmu, L., Bottomley, M. J., Kalkkinen, N., Peterson, P. (2008). DNA-PK contributes to the phosphorylation of AIRE: importance in transcriptional activity. Biochim. Biophys. Acta, 1783, 74-83.

Mathis, D., Benoist, C. (2009). Aire. Ann. Rev. Immunol., 27, 287-312.

Meager, A., Peterson, P., Willcox, N. (2008). Hypothetical review: thymic aberrations and type-I interferons; attempts to deduce autoimmunizing mechanisms from unexpected clues in monogenic and paraneoplastic syndromes. Clin. Exp. Immunol., 154, 141-151.

Meager, A., Visvalingam, K., Peterson, P., Moll, K., Murumagi, A., Krohn, K., Eskelin, P., Perheentupa, J., Husebye, E., Kadota, Y., Willcox, N. (2006). Anti-interferon autoantibodies in autoimmune polyendocrinopathy syndrome type 1. PLoS Medicine, 3, e289.

Musco, G., Peterson, P. (2008). PHD finger of autoimmune regulator: an epigenetic link between the histone modifications and tissue-specific antigen expression in thymus. Epigenetics, 3, 310-314.

Org, T., Chignola, F., Hetenyi, C., Gaetani, M., Rebane, A., Liiv, I., Maran, U., Mollica, L., Bottomley, M. J., Musco, G., Peterson, P. (2008). The autoimmune regulator PHD finger binds to non-methylated histone H3K4 to activate gene expression. EMBO Reports, 9, 370-376.

Pena, P. V., Davrazou, F., Shi, X., Walter, K. L., Verkhusha, V. V., Gozani, O., Zhao, R., Kutateladze, T. G. (2006). Molecular mechanism of histone H3K4me3 recognition by plant homeodomain of ING2. Nature, 442, 100-103.

Peterson, P., Org, T., Rebane, A. (2008). Transcriptional regulation by AIRE: molecular mechanisms of central tolerance. Nat. Rev. Immunol., 8, 948-957.

Teadusepreemia geo- ja bioteaduste alal tööde tsükli "Makroökoloogilised protsessid elusloodusе mitmekesisuse mõjutajana" eest

Meelis Pärtel

Sündinud 03.11.1969 Tallinnas

1988	Viimsi Keskkool
1992	Tartu Ülikool, bioloogia
1994	filosoofialitsentsiaat, Uppsala Ülikool
1997	filosoofiadoktor, Tartu Ülikool

1998 Tartu Ülikooli vanemteadur; 1999−2001 Regina Ülikooli (Kanada) järeldoktorant; alates 2002 Tartu Ülikooli botaanika professor

Avaldanud 38 *ISI Web of Science* teadusartiklit.

SISSEJUHATUS

Elusloodus mitmekesisus, võõrsõnaga BIOLOOGILINE DIVERSITEET (*biodiversiteet*) ja omakeelse terminina mõne aasta eest välja pakutud ELURIKKUS on ökoloogilise koosluse üks olulisi tunnuseid [Rosenzweig, 1995]. Ökoloogiline kooslus on enam-vähem homogeenses keskkonnas koos elavate populatsioonide kogum ühe troofilise taseme piires või sees (nt seened, taimed, loomad). Nii saab rääkida õistaimede kooslustest, mükoriisaseente kooslustest, putukakooslustest jne.

Elusloodus mitmekesisus on väga mitmetahuline nähtus. Klassikaliselt tähendab see eelkõige TAKSONOOMILIST MITMEKESISUST: taksonite hulka koosluses. Enamasti käsitletakse taksonoomilist põhiühikut – liiki (liigiline mitmekesisus e liigirikkus), aga võib vaadelda ka liigist kõrgemaid taksoneid (näiteks perekondade või sugukondade mitmekesisus) või liigist väiksemaid taksoneid (näiteks alamliikide või varieteetide mitmekesisus). Samas ei ole isendid ei ühes populatsioonis ega kaugeltki ühes liigis geneetiliselt identsed. Seetõttu on oluline vaadelda ka GENEETILIST MITMEKESISUST eri liikide sees. Liikide kokkulugemisel ei saa aga erinevaid liike käsitleda samaväärsetena. Kõik liigid erinevad mõnevõrra üksteisest ja seetõttu on neil ka erinev mõju koosluses toimuvatele protsessidele (nt ainevoogudele, produktsioonile aga ka ökosüsteemi kasutamisvõimalustele inimese poolt). Liikide erinevusi saab arvesse võtta ja leida koosluse FUNKTSIONAALSE MITMEKESISUSE – kui palju erinevaid liikide omadusi koosluses leidub. Mõneti analoogne on uus lähenemine, kus leitakse koosluse FÜLOGENEETILINE MITMEKESISUS: kui palju fülogeneetilise

puu klaadidest on koosluses olemas [Gerhold jt, 2008]. See näitab kui palju evolutsioonilist ajalugu ühte kooslusesse on "mahtunud". Kuna omavahel lähemalt suguluses olevad liigid on sarnasemad, siis nad ilmselt käituvad ka sarnasemalt. Seega võib eeldada, et suur fülogeneetiline mitmekesisus (liigid on pigem erinevatest klaadidest kui mõnest üksikust) näitab ka suurt funktsionaalset mitmekesisust. Näiliselt võib olla lihtsam mõõta liikide tunnuseid kui leida tema koht elupuus. Samas, tunnuseid võib defineerida sadu ja väga raske on leida, missugused neist on koosluse talitluse jaoks olulised. Tänapäeval hakkab järjest rohkem selguma eri rühmade fülogenees ja on leitud, et fülogeneetiline mitmekesisus võib mõnigi kord koosluse toimimist pareminigi ennustada kui tavapärasemad funktsionaalse mitmekesisuse indeksid.

Siiski on üks oluline piirang elusloodusе mitmekesisuse arvestamisel – oluline on piiritleda taksonid, mis kuuluvad teatud kooslusesse, st on selle koosluse liigifondist [Zobel, 1997]. Kui me leiame rabas kasvamas niidutaimi, siis on kindlasti liigirikkus kõrgem, aga see ei ole see liigirikkus, mis rabale iseloomulik on. Pigem on oht, et rabakooslus on ohustatud aluselise saaste poolt ja mõni rabale iseloomulik liik võib olla juba hävinenud. Niisamuti võib Sosnovski karuputke ilmumine mõnesse kooslusesse suurendada ajutiselt selle mitmekesisust (üks väga erinev liik on juures!), aga pikas perspektiivis tähendab see kooslusele kadu. Seega on oluline kasutada liigifondi kontseptsiooni ning "filtreerida" taksonid fondi kuuluvateks ja teisteks, antud koosluse jaoks võõrasteks.

Mitmekesine kooslus on reeglina vastupidavam välistele mõjutustele (häirimised, keskkonna muutus, võõrliikide ja kahjurite sissetung) ja nad taastavad oma talitluse kiiremini ja täielikumalt pärast häiringu lõppemist. Seega on koosluse mitmekesisus ka otseselt inimese poolt "kasutatav" hüve – me kõik soovime, et loodus meie ümber oleks stabiilne, metsad ei hukkuks kahjurite rüüstest, järved saaksid kiiresti tagasi oma senise olukorra pärast reostusõnnetust. Lisaks on elusloodusе mitmekesisusel ka suur eetiline tähtsus – kõigil organismidel peaks olema õigus oma looduslikus koosluses elada. Mitmekesine loodus tähendab ka "palju" loodust ja seega on mitmekesisus üks looduse kaitsmise kriteeriumitest. Geneetiline varieeruvus on eriti oluline muutuvas keskkonnas, kus üks või teine genotüüp võib osutuda sobilikumaks uutes tingimustes, näiteks pärast kliima soojenemist. Geneetiline varieeruvus on ka "materjaliks" evolutsioonile.

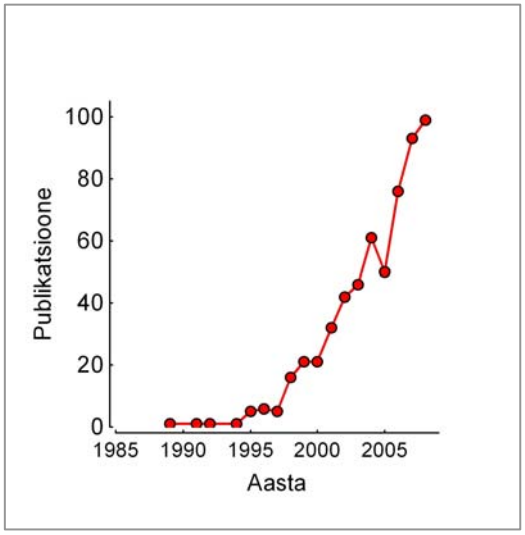
Lähtudes ülaltoodust on elusrikkuse mitmekesisuse varieerumise seaduspärade leidmine suure teoreetilise ja praktilise tähtsusega. Ühelt poolt on väga huvipakkuv, kuidas erinevad taksonid koos eksisteerivad, miks on mõnes koosluses vähe ja teises palju liike või klaade. Teiselt poolt on oluline teada, kuidas mitmekesisust saab hoida ja kaitsta. Ökoloogiateaduses on mitmekesisus olnud uurimise fookuses alates 1970ndatest aastatest ja välja on pakutud sadu teooriaid, miks mitmekesisus varieerub ruumis ja ajas. Kindlasti ei ole olemas ühte ja ainust teooriat, aga siiski peaks olema teatav prioriteetsus – osa protsesse on

määravamad kui teised. Laias laastus saab mitmekesisuse seletused jagada kaheks – ühed, mis jälgivad kooslusesiseseid protsesse ja teised, mis vaatlevad protsesse suuremas aja- ning ruumiskaalas. Kooslusesised protsessid on eelkõige liikide füsioloogilised piirangud ja biootilised interaktsioonid. Viimastest on olnud populaarne mõõta konkurentsi liikide vahel, aga viimasel ajal on käsitletud ka liikide omavahelist soodustamist. Suureskaalalised protsessid hõlmavad evolutsioonilisi ja biogeograafilisi nähtusi, nagu liigiteke, väljasuremine ja levimine. Kuna viimatinimetatud protsessid ei ole mitte ainult suurte biogeograafiliste piirkondade mitmekesisuse määratlejad, vaid mõjutavad ka igat üksikut ökoloogilist kooslust läbi liigifondi (sellele kooslusele sobivate liikide hulk mingis regioonis), siis on neid nimetatud makroökoloogilisteks. Eesliide makro vihjab suurele aja- ning ruumiskaalale.

Makroökoloogia on suhteliselt noor teadusharu, mis uurib üldlevinud püsivaid ökoloogilisi seaduspärasid statistiliselt, analüüsides koosluste ja liikide tunnuseid (kaasa arvatud fülogenees ja levik). Makroökoloogia nimetust kasutati esimest korda teadusartiklis 1989. aastal [Brown, Maurer, 1989], aga uue teadusharu sünniks võib pidada 1995. aastal ilmunud James H. Browni raamatut *Macroecology* [Brown, 1995]. Varasemalt oli makroökoloogia üsna liigikeskne, aga tänapäeval rakendatakse makroökoloogia printsiipe järjest rohkem ka koosluste uurimisel. Näiteks saab koondada suure hulga üksikuuringuid koosluste ökoloogia kohta ühtseks meta-uuringuks [Pärtel, 2006]. Makroökoloogia ei tekkinud tühjale kohale − ühelt poolt on tema juured biogeograafias, teisalt süsteemiteoorias. Juba aastakümneid tagasi avaldas molekulaarbioloog ja süsteemiteoreetik Joël de Rosnay raamatu Makroskoop (*Le Macroscope*), kus ta teleskoobi ja mikroskoobi analoogina kirjeldas hüpoteetilist seadet "makroskoopi" [Rosnay, 1975]. Kui teleskoobiga jälgitakse objekte, mis on inimsilmale liiga kaugel ja mikroskoobiga neid, mis liiga pisikesed, siis "makroskoop" suudaks selgeks teha objektid, mis on liiga keerulised, näiteks ökoloogilised kooslused või inimühiskond. Sisuliselt on "makroskoop" filosoofia ja metoodika kogum, mille järgi saab keerulisest süsteemist leida seaduspärasid. Kui ökoloogiateaduses sai eelmise sajandi teisel poolel üldlevinud uurimismeetodiks eksperiment, kus sai leida põhjuslikke seosed, siis makroökoloogias ei saa reeglina eksperimente teha. See oleks võimatu (evolutsioon võtab aega miljoneid aastaid) või ebaeetiline (vaid katseks suurte alade mõjutamine). Siiski on meie planeedi loodus piisavalt varieeruv, et saab kasutada nn looduslikke eksperimente, näiteks jälgida koosluste muutust pärast viimast jääaega 10000 aasta jooksul või uurida kooslusi saartel, mis on erineva suuruse ja erineva kliimaga. Seeläbi saab ka makroökoloogias teha järeldusi, mis võivad olla sama tähtsad kui eksperimentaalsetel vaatlustel põhinevad.

Niisamuti on eksperimendid võimatud astronoomias või ebaeetilised ühiskonnateaduses, mis ei tähenda, et need teadused oleksid vähem usaldusväärsed kui eksperimentaalne füüsika või psühholoogia katsed. Tihtipeale on makroökoloogia aga palju suurema üldistusvõimega, kuna ta hõlmab suuremat elus-

looduse varieerumist kui eksperiment, mis tahestahtmata on oma ruumilis-ajaliste piirangutega. Mõni aeg tagasi diskuteeriti, kas makroökoloogia ja biogeograafia on sünonüümid või mitte [Blackburn, Gaston, 2002]. Ilmsesti on neil kahel distsipliinil palju sarnaseid jooni (nt protsessid, mida käsitletakse) aga ka erinevusi (makroökoloogia kasutab suureskaalalisi protsesse lokaalsete nähtuste seletamisel, biogeograafia on fokuseeritud suureskaalalistele nähtustele). Sellel debatil pole aga suuremat tähtsust, kuna tänapäeval on eri teadusharude integratsioon palju olulisem kui oma "piirkondade" defineerimine. Isegi nimekas ajakiri *Global Ecology and Biogeography* on ennast defineerinud kui *A journal of Macroecology*. Mõnikord on vaadeldud, kuidas üks või teine ökoloogiline termin on teaduses kasutust leidnud läbi indekseeritud artiklite, mis seda kasutavad oma pealkirjas või sisukokkuvõttes. Makroökoloogia võidukäiku *ISI Web of Science* andmebaasis aastatel 1989–2008 näitab joonis 1.



Joonis 1.
Termini "makroökoloogia" sagedus teaduspublikatsioonides *ISI Web of Science* andmebaasis kuni aastani 2008. Termin võeti kasutusele 1989 ja alustas oma võidukäiku pärast samanimelise raamatu ilmumist 1995.

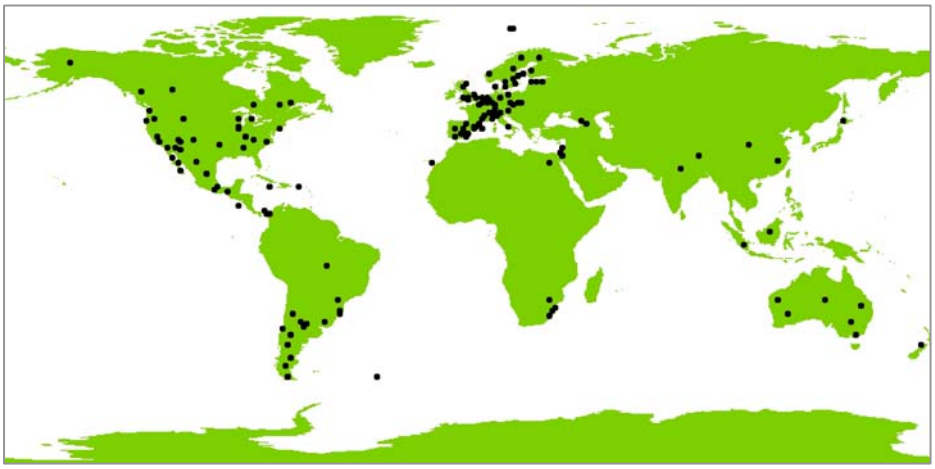
Teaduspreemia saanud tööde tsükkel elusloodusе mitmekesisuse seletamisest makroökoloogiliste protsesside kaudu jagunes kolme suuremasse rühma. Esiteks olen uurinud elusloodusе mitmekesisuse varieerumise seaduspärasid globaalses skaalas, teiseks olen uurinud maastiku tasemel toimuvaid protsesse Eesti pärandkoosluste mitmekesisuse seletamisel ja kolmandaks pakkunud välja mõned põhimõtted, kuidas makroökoloogilise lähenemisega saaks tõhustada Eesti looduskaitse planeerimist. Hea meel on sellest, et iga nimetatud uurimissuuna teemal on viimastel aastatel kaitsnud doktorikraadi mõni minu õpilastest.

Uurimistööde tegemisel olen tänulik kõikidele kaasautoritele Eestist ja välismaalt, kindlasti väärivad nimetamist kolleeg Martin Zobel ja minu endised doktorandid või järeldoktorid ning praegused kolleegid Aveliina Helm, Lauri Laanisto, Ülle Reier ning Pille Gerhold. Järgnevalt vaatlen eraldi nimetatud kolme uurimissuunda.

MAKROÖKOLOOGIA
GLOBAALSES SKAALAS ELURIKKUSE SELETAJANA

Kuni viimaste aastakümneteni kehtinud paradigma järgi seostati ökoloogiliste koosluste mitmekesisuse varieerumist kooslusesiseste protsessidega, eelkõige konkurentsiga. Mõneti oli see arusaadav, kuna enamus uuringuid tehti sarnase evolutsioonilise taustaga ökosüsteemides, taimekoosluste mitmekesisuse uuringud enamasti Põhja-Ameerika ja Euroopa rohumaadel. Joonisel 2 on näha kaart, kuhu olen paigutanud uurimisalad viimasel kümnel aastal ilmunud taimekoosluse mitmekesisuse tööde kohta, mis on ilmunud ajakirjas *Journal of Vegetation Science*. Meie planeet ei ole uuritud kaugeltki ühtlaselt. Kuigi troopika on palju suurema elusloodusе mitmekesisusega kui parasvööde, on seal uuringuid napilt. Kuna uurimistööd on väga tugevalt kaldu parasvöötme suunas, on loogiline, et nimelt seal on arendatud ka mitmekesisuse teooriaid. Kui mõni töö (näiteks troopikast) leidis valdavale teadmisele erineva seose, siis nimetati seda pigem erandiks ja mõnigi kord süüdistati alusetult halvas metoodikas. Parasvöötme valdavad ökoloogilised seaduspärad jõudsid aga õpikutesse ja ülevaateartiklitesse. Samas jäeti aga kahe silma vahel, et ka elusloodusе mitmekesisuse seaduspäradel võiks olla oma evolutsiooniline ajalugu ja biogeograafia. Kui eri evolutsioonilise ajalooga piirkondades käitub mitmekesisus erinevalt, siis võib näiteks parasvöötmest pärit teooriat kasutades troopika elurikkuse kaitsmisel kasu asemel lausa kahju tekitada.

Üheks koosluse ökoloogia käsitletuimaks küsimuseks on mitmekesisuse ja elupaiga produktiivsuse seos [Hutchinson, 1959]. Selge on see, et kui produktiivsust ei ole, ei saa olla ka mitmekesisust. Järelikult peab elusloodusе mitmeke-

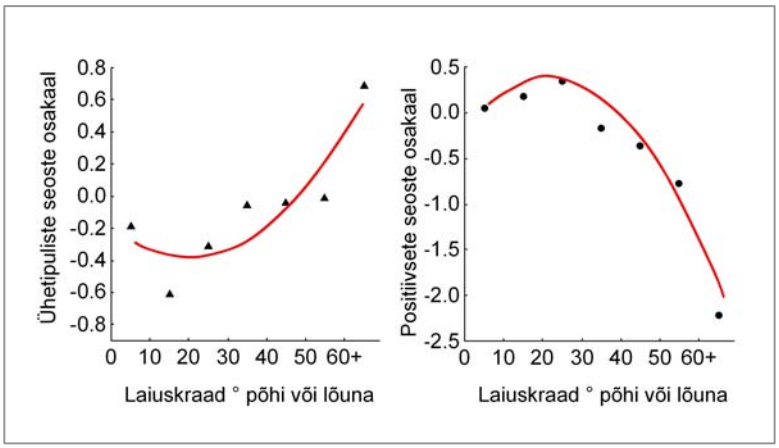


Joonis 2.
Taimkatte mitmekesisuse uurimiskohad maailmas (viimasel kümnel aastal avaldatud tööd ajakirjas *Journal of Vegetation Science*). Elusloodusе mitmekesisuse uuritus on globaalselt väga ebaühtlane.

sisus kasvama, kui produktiivsus kasvab. Mitmed tööd nii Euroopast kui ka Põhja-Ameerikast näitasid, et vastupidiselt ootustele ei kasva mitmekesisus pidevalt piki elupaiga produktiivust, vaid omab maksimumi keskmiste produktiivsuste juures. Miks kõrge produktiivsuse juures mitmekesisus langeb? Siiani on valdav nimetatud seose esmakirjeldaja Briti taimeökoloogi J. Philip Grime seletus [1979], et kõrge produktiivsuse juures on suurem konkurents ja tugevamad liigid tõrjuvad nõrgemad välja. Mitmed tööd niidukoosluse väetamisel näitasid tõesti, et liigirikkus langeb, kooslusesse tulevad sisse mõned lämmastikulembesed suurekasvulised liigid ja teistele enam ressurssi (eelkõige valgust ja ruumi) ei jagu. Kui koondati aga hulk vastavaid üksikuuringuid, siis leiti, et tõesti on ühetipulised seosed taimede hulgas valdavad, aga tihti on leitud ka positiivseid seosed ja mõnikord on jäänud seos mitmekesisuse ja produktiivsuse vahel leidmata [Mittelbach jt, 2001]. Järeldati, et väga kindla reegliga siiski tegemist pole.

Juba aastate eest pakuti konkurentsi teooriale välja alternatiiviks liigifondi teooria [Taylor jt, 1990]. Mitmekesisus võib olla suure produktiivsuse juures väike lihtsalt sellepärast, et vastavaid sobivaid liike kõrge produktsiooniga elupaikadesse on vähe – st liigifond neile kooslustele on väike. See omakorda on seletatav produktiivsete elupaikade vähesusega evolutsioonilise ajaloo jooksul parasvöötme floora tekketsentrites [Hodgson, 1987]. Parasvöötmes on jääajad viimastel miljonitel aastatel korduvalt katkestanud produktiivsuse arengu, produktiivsus on olnud piiratud ka suhteliselt madala temperatuuri ja talveperioodi tõttu. Tänapäevased produktiivsed elupaigad (eriti rohumaad) on aga suuresti inimtekkelised. Enne põllumajanduse arengut olid produktiivsemad elupaigad parasvöötmes metsad. Tänapäeval on pigem kasinalt väheproduktiivseid rohumaid. Seega, kui produktiivseid elupaiku oli vähe, ei olnud evolutsioonil ka võimalust nende jaoks liike "toota". Kui aga ka produktiivsetel kooslustel oleks suur liigifond? Oma uuringus seda tahtsingi esmakordselt maailmas seletada. Parasvöötme kontrastiks võtsin troopika. Paleoökoloogid on uurinud primaarse produktsiooni globaalset jaotust viimase 300 miljoni aasta jooksul [Beerling, 1999]. Alati on troopikas olnud suhteliselt palju produktiivseid koosluseid. Järelikult on troopikas evolutsioonil olnud "võimalus toota" selle elupaiga jaoks liike. Me kogusime kokku 163 üksikuuringut üle maailma ja eriti proovisin leida uurimistöid troopikast [Pärtel jt, 2007c] (joonis 3). Iga uuringu klassifitseerisin tulemuse järgi: ühetipuline, positiivne või puuduv seos. Kui jälgida erinevat tüüpi seoste osatähtsust piki laiuskraadi, leiame selge pildi: ühetipulised seosed on valdavad parasvöötmes (suurematel laiuskraadidel) ja positiivsed seosed troopikas (väikestel laiuskraadidel) (joonis 4). Seega, taimede mitmekesisus ja elupaiga produktiivsuse seos on suuresti kirjeldatud evolutsioonilise ajalooga antud piirkonnas. Mõni aeg hiljem leidis Ameerika teadlaste rühm ka eksperimentaalsete tööde võrdlemisel, et niidukoosluste väetamisel oli liigirikkuse langus suurem just külmematel (suurema laiuskraadiga) aladel, võrreldes soojemate aladega [Clark jt, 2007].

Joonis 3.
Erinevad taimede mitmekesisuse-elupaiga produktiivsuse seosed globaalses metauuringus [Pärtel jt, 2007c].



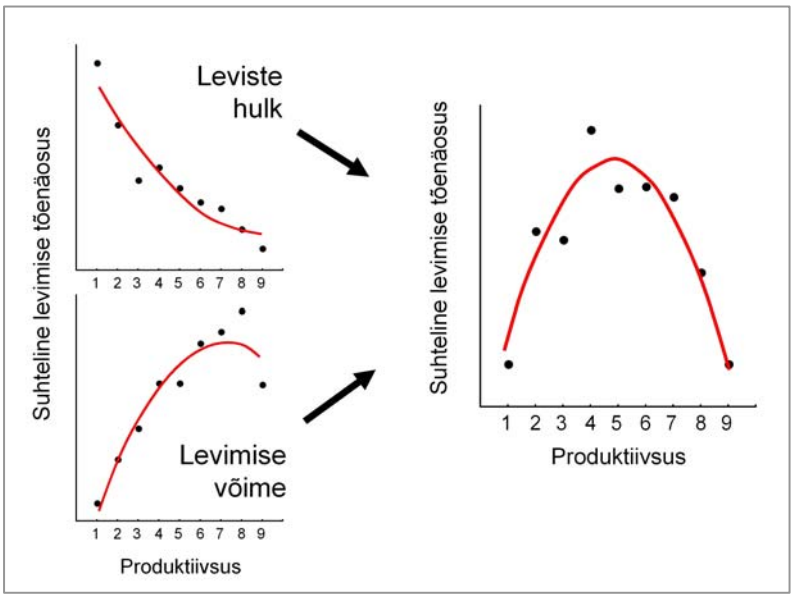
Joonis 4.
Erinevate taimede mitmekesisuse-elupaiga produktiivsuse seosed piki laiuskraadi (osatähtsus log-suhte alusel võrreldes töödega, kus seost ei leitud). Positiivsed seosed on valdavad troopikas, ühetipulised suurematel laiuskraadidel [Pärtel jt, 2007c].

Lisaks parasvöötme-troopika erinevusele uurisime ka kuidas mitmekesisuse-produktiivsuse seos võib erineda rohumaadel ja metsades parasvöötme sees. Juba aastaid varem oli tähele pandud, et kui vaadelda vaid puittaimede mitmekesisust, siis ka parasvöötmes ei leitud mitte tavapärast ühetipulist, vaid positiivset mitmekesisuse-produktiivsuse seost [Grubb, 1987]. Algne seletus oli

see, et puittaimed ei ole nii sageli klonaalsed, see tähendab, nad enamasti ei anna vegetatiivselt järglasi. Vastandina on enamus rohttaimi klonaalseid. Klonaalsus aga võib tähendada konkurentsieelist. Meie aga tõime mängu taimede evolutsioonilise puu geograafia [Laanisto jt, 2008]. Kogu taimede mitmekesisus on pärit troopikast. Ometi on osa fülogeneetilistest liinidest jõudnud varem parasvöötmesse kui teised. Varasematel ümberasujatel on olnud rohkem võimalusi kohaneda uute tingimustega, kuna evolutsioonile on iseloomulik inertsus – liikide tunnused (ka elupaigaeelistused) ei saa reeglina muutuda korraga liiga palju. Taimede fülopuu analüüsid on näidanud, et parasvöötme puittaimed pärinevad evolutsioonilistest liinidest, mis on suhteliselt hiljuti troopikast välja jõudnud. Meie analüüs näitas, et kui koosluses domineerivad liigid, mis on oma „juurtega" veel troopikas, siis käituvad nad ka parasvöötmes "troopiliselt". Seega ei ole oluline üksnes ühe piirkonna ajalugu, vaid ka see, millist liikide rühma vaadeldakse – liikidel on "evolutsiooniline mälu" ja nad käituvad erinevalt, nagu neid on evolutsioonilise ajaloo jooksul "programmeeritud".

Lisaks evolutsioonilisele ajaloole on oluliseks makroökoloogiliseks protsessiks ka levimine. Igas ökoloogilises koosluses võivad toimuda juhuslikud lokaalsed väljasuremised. Kui kõik muud protsessid (liigifond, biootilised interaktsioonid) on konstantsed piki mingit keskkonnagradienti (nt produktiivsus), siis on liigirikkus kõrgem neis keskkondades, kus liigid kõige paremini levivad. Võime kujutleda hüpoteetilist regiooni, näiteks saart, kus on kogu võimalik produktsioonigradient ja iga produktsiooni taseme kohta on võrdne arv liike (st liigifondid ei erine piki produktiivsuse gradienti). Eeldame ka, et liikidel ei ole konkurentsieeliseid. Kui eri produktsiooniga koosluste jaoks on liikide levimisvõime erinev, võib see üksi põhjustada mitmekesisuse-produktiivsuse seoseid. Sellist lähenemist ei olnud keegi varem välja pakkunud. Meie uurisime Euroopa floorat, kus iga taimeliigi kohta on suuresti teada tema elupaiga produktsiooni eelistus [Pärtel, Zobel, 2007]. Levimise edukust määrab kaks tunnust. Esiteks seemnete hulk, mida üks taim suudab toota, ja teiseks ühe seemne levimisvõime. Me kogusime erinevatest andmekogudest andmeid mõlema tunnuse kohta. Leidsime, et väheproduktiivsete elupaikade liikidel on palju seemneid, aga enamasti on need seemned väikesed ja neil puuduvad levimist soodustavad tunnused (lendkarvad, haakekonksud, viljakas seemnekest). Samal ajal kõrge produktsiooniga liikidel on vastavad levimist soodustavad tunnused sagedased, aga seemneid on suhteliselt vähe. Seega on mõlemas produktsioonigradiendi otsas üks levimise tõenäosust määrav tegur limiteeriv. Kui arvestada summaarset levimise tõenäosust, siis on just keskmise produktsiooniga elupaikade liikidel eelis teiste liikide eest: need liigid suudavad paremini levida (joonis 5). Seega järeldasime, et ka levimisvõime üksi võib parasvöötmes põhjustada unimodaalse elusloodusе mitmekesisuse-produktiivsuse seose.

Oma uurimistööde põhjal pakkusime hiljuti välja summaarse raamistiku, kuidas empiirilist mitmekesisuse ja keskkonnagradiendi vahelist seost uurida [Zobel, Pärtel, 2008]. Kui praegu alustatakse enamasti biootiliste interaktsioonide uurimisest, siis meie arvates oleks õige alustada just suureskaalalistest protsessidest. Nii peaks ka uurimine jälgima järjekorda, kuidas liigid kooslusesse saavad. Esmalt peavad nad evolutsioonis tekkima, seejärel kohale levima ja siis, kui nad on kohal, on neil alles võimalus üksteist nii takistada kui soodustada. Meie käsitlust võib võtta kui „makroskoopi" – üldpõhimõtet, mille järgi ökoloogilist seost uurida. See koosneb kolmest küsimusest. Esiteks, kas ökoloogiline seos on sama eri evolutsioonilise taustaga regioonides ja eri evolutsioonilise ajalooga liikidel. Kui see ei ole sama, on seose taga suure tõenäosusega evolutsioonilised eripärad. Järgnevalt peaksime küsima, kas liikide levimisvõimed on piki gradienti samad. Kui ei, siis tuleb levimisvõime ka arvesse võtta. Seejärel võime küsida, kas konkurents või soodustamine muutub piki keskkonnagradienti. Niimoodi ökoloogilisele seaduspärale lähenedes saame selgema ülevaate seose põhjustest, kui vaid ühte (kergemini uuritavat) küsimust küsides.



Joonis 5.
Taimede levimise tõenäosus eri produktsiooniga elupaikades Euroopas. Seemnete (leviste) hulk limiteerib levimise tõenäosust kõrge produktiivsusega elupaikades ja ühe seemne levimisvõime madala produktiivsusega elupaikades. Summaarne levimise tõenäosus on ühetipulise seosega piki produktiivsus-gradienti [Pärtel, Zobel, 2007].

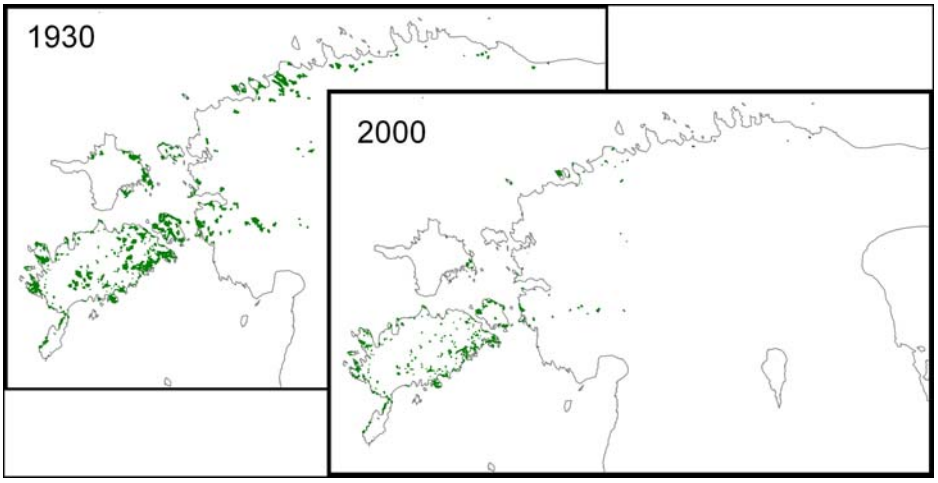
MAKROÖKOLOOGIA REGIONAALSES SKAALAS POOL-LOODUSLIKE ÖKOSÜSTEEMIDE MITMEKESISUSE KIRJELDAJANA

Eelnevalt kirjeldatud "makroskoopi" saab kasutada ka väiksemas skaalas, näiteks Eesti sees ühe koosluse tüübi sees oleva mitmekesisuse varieerumise uurimisel. Meie uurimisobjektiks on olnud loopealsed ehk alvarid [Pärtel jt, 1999]. Need on õhukesemullalised paepealsed pool-looduslikud niidud e pärandkooslused – taimekooslused, mis on tekkinud ja püsinud aastatuhandete vältel mõõduka inimmõju (koduloomade karjatamine ja puude-põõsaste raiumine) tagajärjel. Suur osa meie pärismaisest floorast on seotud pärandkooslustega. Seetõttu on neil oluline looduskaitseline väärtus, mis on seotud ka meie ajalooga. Pool-looduslikud ökosüsteemid on viimase poole sajandi jooksul kaotanud enamuse oma pindalast [Helm jt, 2006]. Kuna traditsiooniline karjatamine väikestel niidulappidel ei ole tänapäeval majanduslikult tasuv, on enamus neist niitudest jäänud majandamisest välja. See tähendab aga puittaimede (kadakad, männid) pealetungi ja niidukoosluse hävimist. Õnneks on looduskaitsesüsteemis liikumas toetused, mis on ette nähtud nende koosluste sobiva majandamise jaoks.

Pool-looduslikud taimekooslused on meie kõige liigirikkamad taimekooslused. Laelatu puisniidult Lääne-Eestist on leitud ühelt ruutmeetrilt 76 liiki soontaimi, Kahtla loopealselt Saaremaalt on loendatud sama suurelt pinnal 49 liiki [Pärtel jt, 2007b]. Euroopas teisi nii liigirikkaid koosluseid ei ole teada. Samas liigirikkus siiski varieerub eri alade vahel. Kui teaks, mis seda põhjustab, saaks seda suurt liigirikkust veelgi paremini kaitsta. Suur liigirikkus ja selle varieerumine lubab neid kooslusi kasutada ka kui mudelit elusloodusе mitmekesisuse uurimisel üldisemalt.

Kuna kõik Eesti loopealsed asuvad ühesugustes keskkonnatingimustes ja ühes piirkonnas, siis eeldame, et regionaalse liigifondi suurus on igal alal sama. Enamus loopealseid on killustunud väikesteks niidufragmentideks muude koosluste vahel. Kuna loopealsete taimestik on väga erilaadne, siis saab neid koosluse fragmente käsitleda kui saarekesi "meres" kus loopealsete liigid kasvada ei saa. Saarte biogeograafia teooria järgi peaks rohkem liike olema suurtel saartel, mis on hästi sidustatud teiste sarnaste aladega. Suurem koosluse pind-ala tähendab suuremaid populatsioone, kus lokaalne väljasuremine on vähem tõenäoline. Suurem sidusus teiste kooslustega (leitakse indeksiga, mis arvestab naaberkoosluste kaugust ja nende pindala) aga annab suuremale hulgale liikidele võimaluse kohale levida. See on oluline nii koosluse kujunemisel kui ka hiljem, kui levimine võimaldab juhuslikult kooslusest kadunud liikide populatsioone taastada. Meie üllatuseks aga ei olnud praegusel liigirikkusel mingit seost pindala ega sidususega. Mitmekesisuse varieerumist ei seletanud ka ei keskkond ega praegune majandamisviis (karjatatud või karjatamata). Meie õnneks alustati 1930ndatel Eestis suuremõõtkavalist taimkatte kaardistamist. Seetõttu me teame, kus asusid

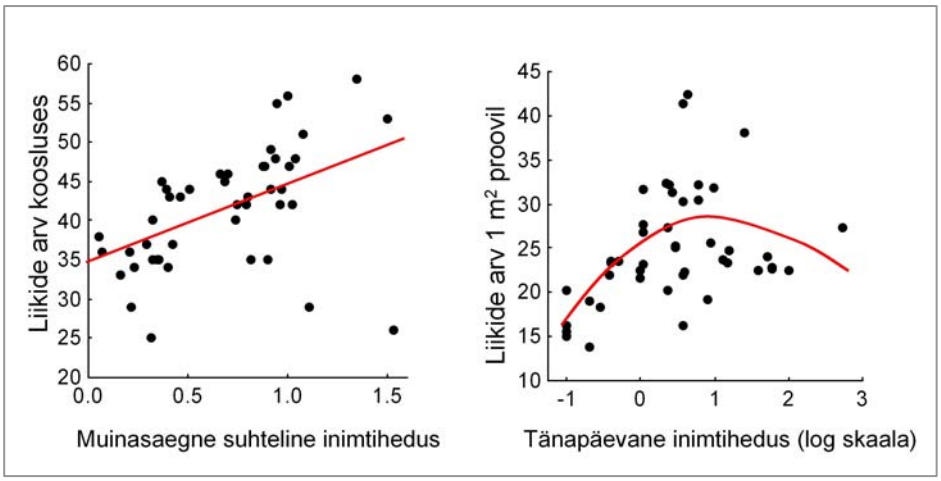
loopealsed eelmise sajandi esimesel poolel. Ilmselt oli enamus neist olnud loopealsed (joonis 6) samades piirides aastasadu. Kui me kasutasime ajaloolist pindala ja sidusust 70 aastat tagasi, siis see seostus väga oluliselt tänapäevase liigilise mitmekesisusega [Helm jt, 2006]. Järelikult liigirikkus on olnud seoses nii ala pindala kui sidususega, aga maastiku muutustele ei ole enamus liike jõudnud veel reageerida. Kui olukord halveneb, siis paljud liigid suudavad veel pikka aega püsida (nn jäänukpopulatsioonid). See aeg võib ulatuda mitme aastakümneni, enne kui jõuab kätte uus tasakaaluolek, vastavalt uuele pindalale ja sidususele. Nähtust, kus koosluses on rohkem liike, kui seal peaks olema pärast olukorra halvenemist, nimetatakse väljasuremise võlaks. Teades mitmekesisuse seost koosluse parameetriga stabiilses olekus, on võimalik välja arvutada oodatav liikide arv pärast häiringut. Meie leidsime, et kui uus stabiilsus saabub (ja kui rohkem loopealseid ei hävi), siis ikkagi peaks kaduma igalt alalt *ca* 40% liikidest. Seega, kui ka olemasolevaid kooslusi eeskujulikult hoida, on teatav liikide kadu paratamatu. Samas on väljasuremise võlg ka võimalus – kui kooslusi taastada (nii pindalas kui ka sidusust koosluse võrgustikuna), siis võime väljasuremise võla maksmisest pääseda. Seega on väga oluline väljasuremise võlga arvestada looduskaitse planeerimisel.



Joonis 6.
Loopealse levik Eestis 1930ndatel [Laasimer,1965] ja kaasajal (Eesti Pärandkoosluste Kaitse Ühingu andmetel). Loopealsete pindala ja omavaheline sidusus on kiiresti vähenenud.

Meie pärandkooslustel on tuhandeid aastaid vana ajalugu. Kas tänapäevane liigirikkus ei võiks olla seotud varasema koosluse ajalooga kui 70 aastat? Vanimad detailsed kaardid ulatuvad Eestis 300 aasta taha, aga kooslusteе "mälu" võib olla palju pikem. Seda uurisime, kasutades arheoloogilisi andmeid mui-

nasaegse asustuse kohta [Pärtel jt, 2007a]. Eestis teatakse hästi rauaaegseid asulakohti ja linnamägesid tuhat aastat tagasi. Kuna loopealsed on pärandkooslused, siis võiks eeldada, et nad said tekkida ja püsida vaid piirkondades, kus inimesed elasid. Inimene on aktiivselt kaasa aidanud ka liikide levimisele. Linnamägedel peeti rahuajal turgusid, ohu korral aga veeti sinna kokku nii kariloomi kui ka heina. Kaubanduses muu Euroopaga kasutati heina pakkematerjalina õrnemate esemete puhul. Loomade ja heintega on tahes-tahtmata kaasa tulnud ka seemneid. Nii võib eeldada, et muinasaegsed inimesed võisid elusloodusе mitmekesisusele aluse panna. Kas see erinevus on ka tänapäeval näha? Lähtudes muinasaegsetest asulakohtadest ja linnamägedest leidsime suhtelise inimeste tiheduse tuhat aastat tagasi. See kirjeldas suure osa tänapäevasest liigirikkusest: kus muinasaja lõpul elas palju inimesi, seal on ka praegu suurem liikide hulk (joonis 7). Seega on meie erakordsele pärandkoosluste liigirikkusele pannud aluse meie esiisad kümnete inimpõlvede tagant. Võrdluseks uurisime ka tänapäevase inimtiheduse mõju. Muinasaegne ja tänapäevane inimtihedus ei ole oluliselt seotud – inimesed on elama asunud muudesse paikadesse. Leidsime, et kõige optimaalsem praegusele mitmekesisusele on keskmine inimtihedus. Kindlasti ei mõju inimeste hulk ruutkilomeetril otse vaid see on hea summaarne mõõt erinevate inimtegevuste jaoks. Liiga väikese inimtiheduse puhul ei ole piisavalt loomapidamist, et karjamaid vaja oleks, liiga suure inimtiheduse puhul on tänapäeval tegemist kas urbaniseerunud asulatega või intensiivse põllumajandusega. Mõõdukas inimtihedus aga vastab just traditsioonilisele talude süsteemile.



Joonis 7.
Loopealsete liigirikkus on lineaarselt seotud muinasaegse suhtelise inimtihedusega ning ühetipuliselt kaasaegse inimtihedusega. Palju liike on seal, kus muinasajal inimesed peamiselt elasid. Liigirikkust vähendab nii liiga väike kui liiga suur kaasaegne inimtihedus [Pärtel jt, 2007a].

Inimese mõju hindamisel peame seega meeles pidama, et see ei ole alati elusloodusе mitmekesisusele negatiivne, suur osa mitmekesisusest on tekkinud muistsete inimeste kaasabil ja püsib täna-päevase sobiva inimtegevuse toel.

MAKROÖKOLOOGIA ELURIKKUSE KAITSE KAVANDAMISEL

Kui eelnevad teemad on ka otsapidi looduskaitsega seotud, siis mõned meie uurimistööd on otseselt looduskaitse planeerimisest. Oleme kasutanud Eesti looduskaitse süsteemi: ohustatud liike ja kaitsealasid. Seetõttu on meie uuringud otseselt kasutatavad Eesti looduse kaitse tõhustamisel (näiteks on neid arvestatud uue Punase Raamatu koostamisel) teisalt aga on Eesti väga hea mudelobjekt, mida saab kasutada looduskaitse bioloogias üle maailma. Nii on meie põhimõtteid rakendatud mitmel mandril.

Üheks uurimissuunaks on meil olnud Eesti ohustatud taimeliikide rühmitamine vastavalt vajalikele kaitsemeetmetele [Pärtel jt, 2005]. Rühmitamine on oluline, kuna kaitset vajavate liikide hulk on jõudnud piirini, kus ei ole enam võimalik igale üksikule taksonile teha kaitsekorralduskava. Seetõttu oleks otstarbekam tegeleda liikide rühmadega, mis vajavad sarnaseid kaitsemeetmeid. Looduskaitse bioloogias on kasutatud klassikalist harulduse rühmitamise skeemi, mille on välja pakkunud Deborah Rabinowitz [1981]. Ta kasutas kolme binaarset kriteeriumit: levila on väike või suur, populatsioonid on alati väikesed või mõnikord ka suured, elupaik on väga spetsiifiline või lai. Iga nimetatud kolmest kriteeriumist (levila, populatsioon, elupaik) võib näidata haruldust või mitte. Neid kolme kriteeriumit saab omavahel kombineerida kaheksal viisil, kus seitsmel juhul on vähemalt üks kriteerium haruldane. Tänapäeval on aga enamasti harulduse põhjuseks ebasobiv inimtegevus. Viimast ei ole Rabinowitzi süsteemis otseselt arvestatud. Seetõttu pakkusime välja sünteetilise haruldaste liikide rühmitamise kaheksa kriteeriumi järgi. Neli kriteeriumit on looduslikud harulduse põhjused, neli inimmõjulised. Looduslikud kattuvad suuresti Rabinowitzi süsteemiga, vaid leviku oleme jaganud kaheks – kas levila on globaalselt väike või suur ning kas levik Eestis on piiratud või mitte. Need kaks skaalat ei pruugi olla vastavuses. Kui mõni liik on maailmas küll laialt levinud, kuid kui ta on Eestis vaid vähestes leiukohtades, tuleks teda ikkagi haruldaseks pidada. Vastupidiselt, kui mõni liik on Eestis paljudes kohtades, aga ta globaalne levila on väike (nt ainult Põhja-Euroopa), siis on meil vastutus selle liigi hoidmise eest. Inimtekkelised haruldused oleme jaganud peamiste ohutegurite kaupa: liigid, mis vajavad pärandkoosluste majandamist (vt ka eespool), liigid, mis vajavad mõõdukaid häiringuid metsades, vanapärase põllumajandusega seotud umbrohud ning liigid, mida ohustab korjamine loodusest (ilusad õied või ravimtaimed). Võtsime vaatluse alla 301 taksonit, mis olid kas riikliku kaitse all, punases raamatus või nimetatud Euroopa looduskaitsedirektiivides. Ekspertrühm seostas iga taksoni erinevate kriteeriumitega. Ülevaade meie harulduse kriteeriumitest koos seletuste ja näidetega on toodud tabelis 1.

Tabel 1

Eesti ohustatud taimeliikide rühmitamine looduslike ja inimmõjulise harulduste järgi [Pärtel jt, 2005]

Rühm	% liikidest	Kirjeldus	Näited
Looduslik haruldus			
Piiratud globaalse levikuga liigid	38 %	Liigid, mis on levinud vaid Euroopas (Euroopa endeemid)	karulauk, punane tolmpea, värvi-paskhein
Piiratud lokaalse levikuga liigid	28 %	Eestis vähem kui 5% 100 km^2 vaatlusruutudes	haruline võtmehein, nõmmluga, lamav ristik
Väikeste populatsioonide-ga liigid	21%	Kuni 300 täiskasvanud isendit ühes populatsioonis	harilik äiakas, täpiline sõrmkäpp, harilik jugapuu
Haruldase elupaiga liigid	7 %	Liigid, mis on spetsialiseerunud väga haruldasele elupaigale	müür-raunjalg, taani merisalat, alpi võipätakas
Inimmõjuline haruldus			
Niiduliigid	32%	Liigid vajavad pärandkoosluste majandamist	niidu-kuremõõk, alpi nurmikas, ahtalehine ängelhein
Häiringuliigid	10%	Liigid, mis paljunemiseks vajavad mõõdukaid metsahäringuid	nõmmnelk, karvane lipphernes, palu-karukell
Vanad umbrohud	10%	Liigid, mis ei talu tänapäevast intensiivset põllumajandust	rukkiluste, kare jürililL, linavõrm
Korjamisohus liigid	31%	Liike, mis võivad olla ohustatud korjamise läbi	kaunis kuldking, siberi võhumõõk, karukold

Erinevad harulduse kriteeriumid on erineva sagedusega. Teistest sagedasemad on piiratud levik (eriti globaalses skaalas), seotus niitude majandamisega ja korjamise oht. Neile järgnevad väikeste populatsioonidega liigid, mõõdukaid metsahäiringuid ja vanamoodsat põllumajandust vajavad taksonid ning viimaks väga haruldase elupaiga eelistajad. Faktoranalüüs näitas, et meie kriteeriumid ei ole üldiselt üksteisega kattuvad, pigem katavad nad erinevaid harulduse aspekte. Kindlasti on meie inimmõju rühmitamine spetsiifiline just Põhja-Euroopale, aga ka mujal maailmas võib kasutada meie printsiipi, leides omale sobilik analoogne rühmitamine.

Praegune looduskaitse on fokuseeritud enamasti looduslikule haruldusele. Nii on meil kaitse all paljud liigid, mis on oma leviala piiril (nt atlantilise klii-

maperioodi reliktid). Loomulikult tuleb selliste liikide leiukohti hoida, kuid liikide kaitse osas ei ole palju võimalusi nende olukorda parandada (seda võib küll teha kliima soojenemine!). Meie töörühm pakkus välja idee, et looduskaitse peaks suurema tähelepanu suunama sinna, kus saab otseselt ohustatud liikide olukorda parandada: inimmõjulise harulduse juurde. Paljud looduslikult haruldased liigid on ohustatud ka inimmõju tõttu. Seega peaks esmalt võtma väga tõsiselt niitude majandamist (vt. ka eespool) ning elurikkusega kooskõlas olevat metsamajandamist. Viimane tähendab mõõdukate häiringute teadlikku lubamist teatud olukordades (tuulemurrud, häilud, karjatamine, jalgrajad, kontrollitud põletamine). Vanamoodsaid põllumajandusvõtteid võiks kasutada talumuuseumide juures. Korjamisohu vältimiseks tuleks rakendada rahvaharidslikke meetmeid. Loodusliku harulduse korral tuleb kõne alla *ex situ* kaitse botaanikaaedades, geenipankade loomine ja populatsioonide manipulatsioonid (ettekasvatamine jne).

Oleme ka näidanud, et meie looduskaitsealad katavad palju rohkem inimmõju tõttu haruldasi kui looduslikult haruldasi liike [Vellak jt, 2009]. Looduslikult haruldased liigid vajavad kaks korda rohkem kaitsealasid, et olla sama hästi kaitstud. See aga ei ole alati nii olnud. Kasutades Eesti sajandipikkust looduskaitsealade kujunemislugu oleme näidanud, et erinevad harulduse rühmad on eri aegadel olnud rohkem või vähem kaitstud. Algselt olid suurema tähelepanu all haruldase elupaiga liigid, vanad põlluumbrohud on aga alles viimasel ajal looduskaitse süsteemi hõlmatud. Nii näitab ajalugu, kuidas teadmine looduse kaitsmisest on arenenud ja me saame ajaloost õppida, et vältida vigu tulevikus.

KOKKUVÕTTEKS

Makroökoloogia on uus arenev teadussuund, mis lõimib ökoloogia, evolutsiooniteaduse, biogeograafia ja paljud muud teadusharud. Meie töörühma tulemused on näidanud, et eri teadusharusid ühendades on võimalik leida väga huvitavaid uusi tulemusi. Olgu see näiteks ökoloogiliste seaduspärade geograafia, mis vihjab evolutsioonilistele põhjustele; liikide levimise piirangud, mida on mõjutanud nii levimist abistavad tunnused, maastikupilt kui ka inimtegevus, või teaduslikud alused looduskaitse optimeerimiseks. Üheks läbivaks märksõnaks on ajalugu – evolutsiooniline ajalugu eri piirkondades, maastiku- ja inimtegevuse ajalugu või looduskaitse ajalugu. Teiseks oluliseks märksõnaks on suur ruumiskaala. Uurides elurikkuse seost nende erinevate "ajalugudega" suuremas geograafilises ulatuses võime teada saada praeguse mitmekesisuse varieerumise põhjuseid, prognoosida ohte tulevikuks ja pakkuda välja sobivaid looduse kaitsmise ja majandamise viise.

KIRJANDUS:

Beerling, D. J. (1999). Quantitative estimates of changes in marine and terrestrial primary productivity over the past 300 million years. Proc. Royal Soc. London B - Biol. Sci., 266, 1821-1827.

Blackburn, T. M., Gaston, K. J. (2002). Macroecology is distinct from biogeography. Nature, 418, 723.

Brown, J. H. (1995). Macroecology. Univ. of Chicago Press, Chicago.

Brown, J. H., Maurer, B. A. (1989). Macroecology: The division of food and space among species on continents. Science, 243, 1145-1150.

Clark, C. M., Cleland, E. E., Collins, S. L., Fargione, J. E., Gough, L., Gross, K. L., Pennings, S. C., Suding, K. N., Grace, J. B. (2007). Environmental and plant community determinants of species loss following nitrogen enrichment. Ecol. Lett., 10, 596-607.

Gerhold, P., Pärtel, M., Liira, J., Zobel, K., Prinzing A. (2008). Phylogenetic structure of local communities predicts the size of the regional species pool. J. Ecol. 96, 709-712.

Grime, J. P. (1979). Plant Strategies and Vegetation Processes. John Wiley, Chichester.

Grubb, P. J. (1987). Global trends in species-richness in terrestrial vegetation: a view from the northern hemisphere. Gee, J. H. R. (ed). Organization of Communities. Past and Present. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 99-118.

Helm, A., Hanski, I., Pärtel, M. (2006). Slow response of plant species richness to habitat loss and fragmentation. Ecol. Lett., 9, 72-77.

Hodgson, J. G. (1987). Why do so few plant species exploit productive habitats? An investigation into cytology, plant strategies and abundance within a local flora. Funct. Ecol., 1, 243-250.

Hutchinson, G. E. (1959). Homage to Santa Rosalia or why are there so many kinds of animals? Am. Naturalist, 93, 145-159.

Laanisto, L., Urbas, P., Pärtel M. (2008). Why does the unimodal species richness-productivity relationship not apply to woody species: a lack of clonality or a legacy of tropical evolutionary history? Global Ecol. Biogeogr., 17, 320-326.

Laasimer, L. (1965). Eesti NSV taimkate. Valgus, Tallinn.

Mittelbach, G. G., Steiner, C. F., Scheiner, S. M., Gross, K. L., Reynolds, H. L., Waide, R. B., Willig, M. R., Dodson, S. I., Gough, L. (2001). What is the observed relationship between species richness and productivity? Ecology, 82, 2381-2396.

Pärtel, M. (2006). Data availability for macroecology: how to get more out of regular ecological papers. Acta Oecol., 30, 97-99.

Pärtel, M., Helm, A., Reitalu, T., Liira, J., Zobel M. (2007a). Grassland diversity related to the Late Iron Age human population density. J. Ecol., 95, 574-582.

Pärtel, M., Helm, A., Roosaluste, E., Zobel M. (2007b). Bioloogiline mitmekesisus Eesti pool-looduslikes ökosüsteemides. Punning, J.-M. (toim). Keskkonnauuringute nüüdisprobleeme. Ökoloogia Instituut, Tallinna Ülikool, Tallinn, 223-240.

Pärtel, M., Kalamees, R., Reier, Ü., Tuvi, E.-L., Roosaluste, E., Vellak, A., Zobel, M. (2005). Grouping and prioritization of vascular plant species for conservation: combining natural rarity and management need. Biol. Conserv., 123, 271-278.

Pärtel, M., Kalamees, R., Zobel, M., Rosén, E. (1999). Alvar grasslands in Estonia: variation in species composition and community structure. J. Veget. Sci., 10, 561-570.

Pärtel, M., Laanisto, L., Zobel, M. (2007c). Contrasting plant productivity-diversity relationships across latitude: the role of evolutionary history. Ecology, 88, 1091-1097.

Pärtel, M., Zobel, M. (2007). Dispersal limitation may result in the unimodal productivity-diversity relationship: a new explanation for a general pattern. J. Ecol., 95, 90-94.

Rabinowitz, D. (1981). Seven forms of rarity. Synge, H. (ed). The Biological Aspects of Rare Plant Conservation. John Wiley & Sons, New York, 205-217.
Rosenzweig, M. L. (1995). Species Diversity in Space and Time. Cambridge University Press, Cambridge.

Rosnay, J. (1975). Le Macroscope. Vers une vision globale. Seuil, Paris.

Taylor, D. R., Aarssen, L. W., Loehle, C. (1990). On the relationship between r/K selection and environmental carrying capacity: a new habitat templet for plant life history strategies. Oikos, 58, 239-250.

Vellak, A., Tuvi, E.-L., Reier, Ü., Kalamees, R., Roosaluste, E., Zobel, M., Pärtel M. (2009). Past and present effectiveness of protected areas for conservation of naturally and anthropogenically rare plant species. Conserv. Biol. (in press).

Zobel, M. (1997). The relative role of species pools in determining plant species richness: an alternative explanation of species coexistence? Trends Ecol. Evol., 12, 266-269.

Zobel, M., Pärtel, M. (2008). What determines the relationship between plant diversity and habitat productivity? Global Ecol.Biogeogr., 17, 679-684.

Teaduspreemia põllumajandusteaduste alal uurimuste tsükli "Taimeviiruste ja taimede kaitsemehhanismide uurimine" eest

Erkki Truve (kollektiivi juht, keskel)

Sündinud 23.02.1965

1983 Tallinna 21. Kool
1988 Tartu Ülikool, geneetika
1996 PhD, molekulaarbioloogia, Tartu Ülikool

1988–2006 Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi vaneminsener, aspirant, nooremteadur, teadur, vanemteadur; 1996–1997 Tallinna Ülikooli dotsent; alates 1997 Tallinna Tehnikaülikooli professor, geenitehnoloogia instituudi direktor, geenitehnoloogia professor; alates 2008 AS Vähiuuringute Tehnoloogia Arenduskeskuse vanemteadur

Stažeerinud Helsingi Ülikoolis, Norra Taimekaitseinstituudis Åsis, Molekulaarbioloogia ja Biotehnoloogia Instituudis Heraklionis.

Euroopa Taimeteaduse Organisatsiooni (EPSO) nõukogu liige, Eesti geenitehnoloogia komisjoni esimees.

1996 Academia Europae Baltimaade noorteadlase auhind
2008 Tallinna Tehnikaülikooli matemaatika-loodusteaduskonna parim õppejõud

Avaldanud 30 eelretsenseeritud teadusartiklit, 8 raamatupeatükki; 2 patenti.

Merike Sõmera (esimene vasakul)

Sündinud 15.10.1974

1993 Lasnamäe Üldgümnaasium
1997 Tartu Ülikool, biomeditsiin ja biotehnoloogia
1999 MSc, geenitehnoloogia, Tallinna Tehnikaülikool

1997–2004 Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi insener, teadur; alates 2004 Tallinna Tehnikaülikooli assistent, teadur

Stažeerinud Helsingi Ülikoolis ja Turu Ülikoolis.

Avaldanud 5 eelretsenseeritud teadusartiklit ja 1 raamatupeatüki.

Cecilia Sarmiento (esimene paremal)

Sündinud 23.09.1969

1988 Alexander von Humboldti Saksa Kolledž, Lima
1996 MSc (litsentsiaat), bioloogia, La Molina Rahvuslik Põllumajandusülikool, Lima
2008 PhD, geenitehnoloogia, Tallinna Tehnikaülikool

1996–1997 Tallinna Erakõrgkooli "Veritas" inglise keele õpetaja; 1997–2005 Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi vaneminsener, teadur; 2004–2007 Tallinna Tehnikaülikooli insener, teadur; alates 2008 AS Vähiuuringute Tehnoloogia Arenduskeskuse projektijuht

Stažeerinud Põllumajandusliku Biotehnoloogia Keskuses Gödöllös, Turu Ülikoolis, Baseli Ülikoolis.

Avaldanud 5 eelretsenseeritud teaduspublikatsiooni, 2 raamatupeatükki; 1 patent.

Rääkimaks taimeviiruste molekulaarsest uurimisest Eestis, tuleb alustada hoopis Baseli Friedrich Miescheri Instituudist 1982. aastal, kus Erkki Truve tulevane juhendaja Mart Saarma tollal stažeeris. M. Saarma põhiline uurimisobjekt Baselis oli imetajarakkudes toimiv viirusvastane 2-5A rada, aga selle kõrval jõudis ta omandada ka oskuse teha monoklonaalseid antikehi. Tollal oli tegu uudse metoodikaga enamuse maailma laborite jaoks (Nobeli meditsiinipreemia tehnoloogia väljatöötamise eest anti G. Köhlerile ja C. Milsteinile kaks aastat hiljem). Tollases NSV Liidus olla ühena vähestest selle metoodika ülisuuri või-

malusi mõistnud Moskva Riikliku Ülikooli taimeviroloogia professor Joseph Atabekov. Tema veenmisel hakkasid M. Saarma tollases Tallinna laboris Lilian Järvekülg, Riivo Sinijärv, Jüri Sõber jt tegema monoklonaalseid antikehi erinevate kartuliviiruste vastu [Sinijärv jt, 1988; Sõber jt, 1988; Järvekülg jt, 1989; Saarma jt, 1989]. M. Saarmal kui juba tollal neurobioloogil oli tekkinud ootamatu kõrvalhuvi taimeviiruste vastu, mis kestab siiani. Järgnes küsimus, et kui me oskame juba erinevaid taimeviiruseid immunoloogiliselt detekteerida, siis kas me suudaks nende vastu kuidagi ka molekulaarsel tasandil võidelda? Siinkohal tuleb uuesti nimetada interferoon-sõltuvat 2-5A rada, millega M. Saarma oli ennast Baselis kurssi viinud. Sama biokeemilist mehhanismi uuriti, eelkõige Merike Kelve rühmas, hiljem edasi ka Tallinnas. Ja siit kerkis ka järgmine tööhüpotees – kas imetajate 2-5A raja ensüümide geene transgeensetes taimedes ekspresseerides ei oleks võimalik saada (kultuur)taimi, mis oleksid universaalselt resistentsed erinevatele RNA viirustele? Selle tööhüpoteesi kontrollimiseks oli esmalt aga vaja õppida ära see, kuidas üleüldse transgeenseid taimi on võimalik teha.

Nii siirduski doktorant Erkki Truve 1989. aastal Helsingi Ülikooli, kus ta Teemu Teeri rühmas omandas esmased teadmised taimede geenitehnoloogiast. (P.S. Ega see polnudki tollal väga üldlevinud metodoloogia. Marc van Montagu Gentist oli esimese transgeensete taimede konstrueerimise artikli avaldanud 1983. Teemu oli aga juhtumisi just siis Gentis järeldoktor.) Selle tulemusel kasvasid juba 1990. aastal Tallinnas esimesed Eesti transgeensed taimed, mis ekspresseerisid roti viirusvastast 2-5A süntetaasi. Nende esmased testimised erinevate taimeviiruste infektsioonide suhtes olid niivõrd paljulubavad, et asjast huvitus Soome agrokeemia firma Kemira. Kiiresti transformeeriti sama geeniga ka kartulitaimi. Kemira tollane entusiastlik biotehnoloogia rühm eesotsas Pauli Seppäneniga näitas, et ka saadud transgeensed kartulid olid resistentsed mitmetele taimeviirustele. Kuna tulemused tõotasid edu, siis viidi 1992. aastal Soomes läbi roti 2-5A süntetaasi ekspresseerivate kartulitaimede põllukatsed, mis olid esimesteks kogu Skandinaavias ja Baltikumis. Nende tulemusena näitasime, et loodud viirusresistents toimib ka põllutingimustes. Tulemused avaldati *Nature Biotechnology*'s [Truve jt, 1993] ning kõik ennustas väljatöötatud metoodikale ka edaspidist kommertsedu. Paraku hakkasid just sel ajal Euroopas võimenduma argumenteerimata hirmud seoses taimede geenitehnoloogiaga. Eks see heidutas ka Kemirat. Igatahes otsustasid nad biotehnoloogiaga tegelemise lõpetada ja 2-5A süsteemil põhineva tehnoloogia kommertsialiseerimine jäigi olemata. Meie tulemusi kordasid pisut hiljem nii R. Silvermani rühm Clevelandist [Mitra jt, 1996] kui ka I. Ishida rühm Yokohamast [Ogawa jt, 1996], aga põllule pole sellised loomageene kandvad viirusresistentsed taimed siiani jõudnud.

Juhus viis meid samal ajal tegelema aga ka ühe teise taimeviroloogilise probleemiga. Norra rohumaadel on oluliseks heintaimeks kerahein (*Dactylis glomerata*). 1990ndate alguses esinesid eriti Põhja-Norra heinamaadel keraheina

viirushaiguse epideemiad, mis olid oluliseks põllumajanduslikuks probleemiks. Koostöös tollal juba Helsingis töötava M. Saarma doktorandi Kristiina Mäkineni ning Norra Taimekaitseinstituudi teaduri Vigfrid Næssiga hakkasime otsima esmalt vastust küsimusele, mis viirusega on üleüldse tegu. Selgus, et haiguse põhjustajaks oli perekonda *Sobemovirus* kuuluv keraheina laiguviirus (*Cocksfoot mottle virus*, CfMV). Kuna tegemist oli viirusega, mille genoomist ei teatud tollal midagi ning üleüldse olid sobemoviirused molekulaarselt väga pinnapealselt iseloomustatud, sekveneerisime me esmalt CfMV genoomi [Mäkinen jt, 1995b]. Esimeses lähenduses pakkus saadud nukleotiidne järjestus meile huvi eelkõige ühest aspektist – viiruse polüproteiini ekspressiooniks ei kasutatud mitte katkematut pikka avatud lugemisraami, vaid täispikk polüproteiin saadi -1 programmeeritud raaminihke signaali kasutades.

Seda õnnestus meil ka eksperimentaalselt tõestada [Mäkinen jt, 1995a]. Asi oli huvitav vähemalt kahest aspektist lähtudes. Esiteks, kuigi ribosomaalse raaminihke kasutamine ei ole viiruste hulgas midagi enneolematut (sedasama mehhanismi kasutavad näiteks ka HIV, SARS, põllumajanduslikult väga olulised luteoviirused jne), siis sobemoviirustel ei olnud sellist nähtust enne kirjeldatud. Teiseks, need molekulaarsed mehhanismid, mis ikkagi sunnivad ribosoome aeg-ajalt nihkuma mRNA-l ühes või teises suunas, olid tollal suuresti kirjeldamata. Praegusel hetkel võib öelda, et raaminihke üldise regulatsiooni uurimisse me suurt panust anda ei suutnud, küll aga on teised viimastel aastatel selles osas teinud suuri edusamme [Namy jt, 2006]. Samas, konkreetselt CfMV raaminihke jaoks vajalike signaalide kirjeldamisel oleme me teinud päris palju. Näiteks oleme me nüüdseks lõplikult tõestanud, et erinevalt enamusest viirustest ei vaja CfMV RNA raaminihke toimumiseks mitte ebasõlme kujulist sekundaarstruktuuri, vaid piisab ka märksa lihtsamast tüvi-aasast. Huvitav on ka see, et mitmed tüvi-aasa tehtavad mutatsioonid mõjutasid küllaltki minimaalselt *in vitro* raaminihke efektiivsust. Samal ajal olid needsamad mutatsioonid *in vivo* viirusele letaalsed [Tamm jt, submitted]. Kõige olulisem on aga vast see, et lõppude lõpuks oleme me nüüdseks demonstreerinud, et kõik sobemoviirused siiski kasutavad -1 ribosomaalset raaminihet ja vastupidised arvamused olid tingitud lihtsalt erinevate gruppide poolt sobemoviiruseid iseloomustades tehtud sekveneerimisvigadest [Meier, Truve, 2007]. Seega on sobemoviirused erinevalt varem arvatust siiski ühesuguse genoomi organisatsiooniga viiruste perekond, mille polüproteiini osa on lähedane poleroviirustele ning kattevalgu geen nekroviirustele [Meier jt, 2008]. Kuidas sellise "hübriidse" struktuuriga rühm on tekkinud, on tegelikult ebaselge. Loogiliselt on välja pakutud võimalust, et sobemoviiruste evolutsioonis on olulist rolli mänginud RNA rekombinatsioonid [Martin jt, 1990]. Samas ei ole meil eksperimentaalselt õnnestunud kahe viirusega samaaegselt topeltnakatatud taimedest detekteerida mitte ühtegi CfMV ja raiheina laiguviiruse vahelist rekombinanti [Meier, Truve, 2006].

CfMV genoomi struktuuri kindlakstegemine demonstreeris meile muuhulgas aga seda, kui halvasti sobemoviiruste valkude küpsemine ja nende funktsioonid tegelikkuses ikkagi teada on. Seetõttu otsustasime me selle viirusrühma puhul tegeleda ka muuga kui üksnes translatsiooni mehhanismide uurimisega. Nii oleme me näiteks analüüsinud CfMV polüproteiini protsessinguskeemi, kindlaks teinud polüproteiinist väljalõigatava VPg täpse järjestuse, posttranslatsiooniliselt modifitseeritavad VPg aminohappejäägid ning ka selle aminohappejäägi, mille külge kinnitatakse viraalne genoomne RNA [Olspert jt, submitted]. Uurime ka kattevalgu N-terminaalset osa, mis on äärmiselt aluseliste omadustega ning mis meie katsete põhjal mängib olulist rolli nii kattevalgu rakusiseses lokalisatsioonis kui ka viiruse süsteemses levimises nakatatud taimes. Lisaks oleme teinud veidi tööd ka teiste sobemoviirustega. Koostöös L. Liljase rühmaga Uppsalast ning A. Zeltinsi rühmaga Riiast osalesime näiteks raiheina viiruse partikli kolmemõõtmelise struktuuri kirjeldamisel [Plevka jt, 2007]. Tulevikus muutub loodetavasti tähelepanuväärseks sellel aastal alanud koostöö Eugénie Hebrardi ja Denis Fargette'iga Montpellierist. Ka nemad uurivad sobemoviiruseid, täpsemalt riisi kollalaiksuse viirust (*Rice yellow mottle virus*, RYMV). Kui CfMV majanduslik tähtsus on üpris marginaalne, siis RYMV põhjustab kõige olulisemat riisihaigust Aafrikas, mistõttu viiruse majanduslik ja sotsiaalne tähendus on äärmiselt suur [Traoré jt, 2009; Pinel-Galzi jt, 2007]. Muuhulgas on Eugenie ja Denis näidanud, et RYMV VPg käitub resistentsetes riisiliinides kui viiruse avirulentusvalk [Hébrard jt, 2008]. Just VPg interaktsioone translatsiooni initsiatsioonifaktoritega kavatsemegi me koos edaspidi põhjalikumalt analüüsida. Loodetavasti tõuseb sellest ka otsest tulu farmeritele, antud juhul küll Aafrikas!

Lisaks polüproteiinile ja kattevalgule kodeerivad kõik sobemoviirused ka valku P1, mille funktsioonid olid hiljaaegu veel täiesti tundmatud. Kuna sobemoviiruste P1 valgud erinevad vähemalt primaarstruktuuri osas kõikidest muudest senituntud valkudest ja väga suurel määral ka omavahel, siis ennustada nende bioloogilist funktsiooni oli sisuliselt võimatu. Teised ja ka meie oleme aga viimastel aastatel näidanud, et P1 valkude näol on tegemist RNA vaigistamise supressoritega [Voinnet jt, 1999; Siré jt, 2008; Sarmiento jt, 2007]. See valdkond on sobemoviiruste iseloomustamise kõrval teine oluline teema, millesse me viimastel aastatel üha rohkem proovime süveneda. Tegu on äärmiselt põneva asjaga, mis üldist õpikutarkust molekulaargeneetika mehhanismidest on muutnud vist enam kui miski muu pärast splaisingu avastamist 1970ndatel aastatel. Nimelt teame me nüüd, et lisaks mRNAle, tRNAle, rRNAle ja mõnedele varemtuntud väikestele tuuma RNAdele sünteesivad eukarüootsed rakud veel tuhandeid väikseid mittekodeerivaid RNAsid, mille funktsiooniks on maha suruda neile komplementaarsete mRNAde (või viraalsete RNAde) ekspressiooni. Tegu on asjaga, millest 15 aastat ei teatud veel midagi ning mille eest esimene Nobeli preemia anti 2006. aastal A. Firele ja C. Mellole. Huvitaval kombel on selle praeguseks muuhulgas tohutut meditsiinilist potentsiaali eviva

avastuse lätete juures olnud taimeteadlased. Nimelt märkasid juba 1990. aastal R. Jorgenseni rühm Oaklandis ja A. R. Stuitje ning J. N. M. Moli rühm Amsterdamis üllatavat fenomeni – taimeõitele iseloomulikku värvi andvate antotsüaanide biosünteesi geene üleekspresseerides kaotasid õied tihtipeale ootamatult üleüldse värvi, muutudes valgeteks [Napoli jt, 1990; van der Krol jt, 1993]. Seda esmapilgul ebaloogilist tulemust püüti teoreetiliselt seletada mingi RNA-spetsiifilise mehhanismiga – liiga palju RNAd võiks esile kutsuda sellesama RNA järjestusspetsiifilise blokeerimise või lagundamise. Mõni aasta hiljem demonstreeris W. Dougherty, et samasugune RNA-sõltuv mehhanism eksisteerib ka transgeensetes taimedes, mis ekspresseerivad mingit taimeviiruse järjestust ja seeläbi muutuvad resistentseks sellelesamale viirusele [Lindbo jt, 1993]. Seega, 1990ndate keskpaigaks olid olemas esimesed kirjeldused sellisest RNAst sõltuvast mehhanismist, kuid puudusid vähimadki ettekujutused selle toimimise molekulaarsetest asjaoludest. Murrang saabus 1999. aastal, kui David Baulcombe'i rühm Norwichist avastas tubakast nn väikesed interfereeruvad RNAd – siRNAd [Hamilton, Baulcombe, 1999]. Need olidki nendeks molekulideks, mille genereerimine rakus võimaldas käivitada RNA järjestusele spetsiifilist (st siRNA-le komplementaarse) sihtmärkRNA degradatsiooni.

Meil oli juhus just sellel ajal koos D. Baulcombe'i rühmaga osaleda ühes Raamprogrammi projektis, mis oli pühendatud sobemoviirustele. Aga omavahelistel kohtumistel rääkisime me palju ka RNA vaigistamisest kui millestki ülimalt põnevast ja uudsest. Nii "nakatusime" ka meie sellesse pisikusse. Tuleb tunnistada, et esimesed aastad RNA vaigistamise uurimise alal ei olnud meile kaugeltki lihtsad. Me ei vallanud vajalikke meetodeid, ka eesmärgipüstitus oli alguses liialt ebaselge. Vaikselt hakkas aga välja kujunema, et meie põhitähelepanu kontsentreerub RNA vaigistamise supressorite iseloomustamisele. Nagu eespool öeldud näitasime, et CfMV P1 valk on RNA vaigistamise supressor.

Võib-olla olulisemgi tulemus oli, et me identifitseerisime uue endogeense, taime oma genoomi poolt kodeeritava supressori – *Arabidopsis*'e RNaas L-i inhibiitori (RLI) [Sarmiento jt, 2006]. Esiteks on endogeenseid supressoreid üleüldse siiani vähe identifitseeritud (kuigi RNA vaigistamine on niivõrd oluline endogeensete geenide avaldumise reguleerimise mehhanism, et see vajab kindlasti ka hästitoimivaid negatiivseid kontrollimehhanisme). Teiseks, huvitaval kombel oleme nüüd mõneti tagasi seal, kus me 1990-ndate alguses alustasime. Nimelt on RNaas L see ribonukleaas, mida aktiveerivad 2-5A oligod. Ja väidetavalt käitub RNaas L-i inhibiitor imetajates kui selle ribonukleaasi inhibiitor [Bisbal jt, 1995]. Mida teeb RLI kõikides teistes eukarüootides ja isegi arhedes, kus RNaas L-i ei ole, on ebaselge. Ometigi viitab see võimalusele, et imetajates võivad antiviraalne 2-5A rada ning muuhulgas ka viirusi inhibeerivat toimet omav RNA vaigistamine olla omavahel seotud päris tihedalt. (See viib omamkorda mõtted ka selle peale, et 1990ndate alguses, enne Dougherty ja Baulcombe'i katseid, olime me tegelikult õige lähedal sellele, et jõuda järr-

jestusspetsiifilise RNA degradatsiooni ehk siis RNA vaigistamise mehhanismini. Jääb üle üksnes tõdeda, et tollel hetkel ei olnud meil ilmselt piisavalt fantaasiat ja mõttelendu, et selle peale tulla...).

Nii P1 kui ka RLI toimemehhanismide selgitamine seisab alles ees. Samas oleme me laiendanud oma huvisfääri supressorite osas ka reale teistele viraalsetele supressoritele, nagu tombusviiruste P19, potyviiruste HcPro, geminiviiruste AC2, poteksviiruste P25, kukumoviiruste 2b. Koostöös Kirsi Lehto rühmaga Turust oleme konstrueerinud transgeensed tubaka ning *Nicotiana benthamiana* taimed, mis ekspresseerivad erinevaid supressoreid. Siiani oleme jõudnud kirjeldada taoliste taimede üldist fenotüüpi, samuti seda, kuidas sellistes taimedes levivad tobamo- ja nepoviirused [Siddiqui jt, 2008ab]. Nende taimede abil loodame me muuhulgas täpsemalt kirjeldada supressorite toimemehhanisme. Täiendavalt peaks sellist infot aitama koguda ka supressoreid ekspresseerivate imetajarakkude ning transgeensete *C. elegans*'i liinide analüüsimine. Mõlemad on praeguseks hetkeks laboris juba ka olemas (*C. elegans*'i liinid on sealjuures konstrueeritud koostöös Agata Smialowskaga Stokholmist).

Tulevikus jõuame loodetavasti ringiga tagasi ka Eesti-kesksema materjali uurimise juurde. Õnnelikul kombel oleme ühes õppetoolis koos Kadri Järve rühmaga, kellel on suur kollektsioon erinevaid nisu liine, mida nad on põhjalikult analüüsinud resistentsuse osas nisu jahukaste infektsioonile [Jakobson jt, 2006]. Kavatseme seda unikaalset kollektsiooni kasutada analüüsimaks samade liinide vastuvõtlikkust CfMV-le. Seejärel saame hakata uurima, kas jahukaste resistentsuse eest vastutavad lookused on kokkulangevad viirusresistentsi lookustega või mitte.

Loodetavasti jätkub meile kõige nimetatu jaoks mõistust, jaksu, raha ja häid kolleege.

KIRJANDUS

Bisbal, C., Martinand, C., Silhol, M., Lebleu, B., Salehzada, T. (1995). Cloning and characterization of a RNAse L inhibitor. A new component of the interferon-regulated 2-5A pathway. J. Biol. Chem., 270, 13308-13317.

Hamilton, A. J., Baulcombe, D. C. (1999). A species of small antisense RNA in posttranscriptional gene silencing in plants. Science, 286, 950-952.

Hébrard, E., Pinel-Galzi, A., Fargette, D. (2008). Virulence domain of the RYMV genome-linked viral protein VPg towards rice rymv1-2-mediated resistance. Arch. Virol., 153, 1161-1164.

Jakobson, I., Peusha, H., Timofejeva, L., Järve, K. (2006). Adult plant and seedling resistance to powdery mildew in a *Triticum aestivum* x *Triticum militinae* hybrid line. Theor Appl. Genet., 112, 760-769.

Järvekülg, L., Sõber, J., Sinijärv, R., Toots, I., Saarma, M. (1989). Time-resolved fluoroimmunoassay of potato virus M with monoclonal antibodies. Ann. Appl. Biol., 114, 279-291.

van der Krol, A. R., Mur, L. A., Beld, M., Mol, J. N., Stuitje, A. R. (1990). Flavonoid genes in petunia: addition of a limited number of gene copies may lead to a suppression of gene expression. Plant Cell, 2, 291-299.

Lindbo, J. A., Silva-Rosales, L., Proebsting, W. M., Dougherty, W. G. (1993). Induction of a highly specific antiviral state in transgenic plants: implications for regulation of gene expression and virus resistance. Plant Cell, 5, 1749-1759.

Martin, R. R., Keese, P. K., Young, M. J., Waterhouse, P. M., Gerlach, W. L. (1990). Evolution and molecular biology of luteoviruses. Annu. Rev. Phytopathol., 28., 341-363.

Meier, M., Olspert, A., Sarmiento, C., Truve, E. (2008). Sobemoviruses. Mahy, B., Van Regenmortel, M. (eds). Encyclopedia of Virology. 3rd Ed. Elsevier, Oxford, 644-652.

Meier, M., Truve, E. (2006). An attempt to identify recombinants between two sobemoviruses in doubly infected oat plants. Environ. Biosafety Res., 5, 47-56.

Meier, M., Truve, E. (2007). Sobemoviruses possess a common CfMV-like genomic organization. Arch. Virol., 152, 635-640.

Mitra, A., Higgins, D. W., Langenberg, W. G., Nie, H., Sengupta, D. N., Silverman, R. H. (1996). A mammalian 2-5A system functions as an antiviral pathway in transgenic plants. Proc. Natl. Acad. Sci. U S A, 93, 6780-6785.

Mäkinen, K., Næss, V., Tamm, T., Truve, E., Aaspõllu, A., Saarma, M. (1995a). The putative replicase of the cocksfoot mottle sobemovirus is translated as a part of the polyprotein by -1 ribosomal frameshift. Virology, 207, 566-571.

Mäkinen, K., Tamm, T., Næss, V., Truve, E., Puurand, Ü., Munthe, T., Saarma, M. (1995b). Characterization of cocksfoot mottle sobemovirus genomic RNA and sequence comparison with related viruses. J. Gen. Virol., 76, 2817-2825.

Namy, O., Moran, S. J., Stuart, D. I., Gilbert, R. J., Brierley, I. (2006). A mechanical explanation of RNA pseudoknot function in programmed ribosomal frameshifting. Nature, 441, 244-247.

Napoli, C., Lemieux, C., Jorgensen, R. (1990). Introduction of a chimeric chalcone synthase gene into petunia results in reversible co-suppression of homologous genes *in trans*. Plant Cell, 2, 279-289.

Ogawa, T., Hori, T., Ishida, I. (1996). Virus-induced cell death in plants expressing the mammalian 2',5' oligoadenylate system. Nat. Biotechnol., 14., 1566-1569.

Olspert, A., Peil, L., Truve, E. Characterization of post-translational modifications and protein-RNA linkage of cocksfoot mottle sobemovirus VPg. Submitted.

Pinel-Galzi, A., Rakotomalala, M., Sangu, E., Sorho, F., Kanyeka, Z., Traoré, O., Sérémé, D., Poulicard, N., Rabenantoandro, Y., Séré, Y., Konaté, G., Ghesquière, A., Hébrard, E., Fargette, D. (2007). Theme and variations in the evolutionary pathways to virulence of an RNA plant virus species. PLoS Pathog., 3, e180.

Plevka, P., Tars, K., Zeltins, A., Balke, I., Truve, E., Liljas, L. (2007). The three-dimensional structure of ryegrass mottle virus at 2.9 Å resolution. Virology, 369, 364-374.

Saarma, M., Järvekülg, L., Hemmilä, I., Siitari, H., Sinijärv, R. (1989). Simultaneous quantification of two plant viruses by double-label time-resolved immunofluorometric assay. J. Virol. Methods., 23, 47-54.

Sarmiento, C., Gomez, E., Meier, M., Kavanagh, T. A., Truve, E. (2007). *Cocksfoot mottle virus* P1 suppresses RNA silencing in *Nicotiana benthamiana* and *Nicotiana tabacum*. Virus. Res., 123, 95-99.

Sarmiento, C., Nigul, L., Kazantseva, J., Buschmann, M., Truve, E. (2006). AtRLI2 is an endogenous suppressor of RNA silencing. Plant Mol. Biol., 61, 153-163.

Siddiqui, S. A., Sarmiento, C., Kiisma, M., Koivumäki, S., Lemmetty, A., Truve, E., Lehto, K. (2008a). Effects of viral silencing suppressors on tobacco ringspot virus infection in two *Nicotiana* species. J. Gen. Virol., 89, 1502-1508.

Siddiqui, S. A., Sarmiento, C., Truve, E., Lehto, H., Lehto, K. (2008b). Phenotypes and functional effects caused by various viral RNA silencing suppressors in transgenic *Nicotiana benthamiana* and *N. tabacum*. Mol. Plant Microbe Interact., 21, 178-187.

Sinijärv, R., Järvekülg, L., Andreeva, E., Saarma, M. (1988). Detection of potato virus X by one incubation time-resolved fluoroimmunoassay and ELISA. J. Gen. Virol., 69, 991-998.

Siré, C., Bangratz-Reyser, M., Fargette, D., Brugidou, C. (2008). Genetic diversity and silencing suppression effects of Rice yellow mottle virus and the P1 protein. Virol. J., 5, 55.

Sõber, J., Järvekulg, L., Toots, I., Radavsky, J., Villems, R., Saarma, M. (1988). Antigenic characterization of potato virus x with monoclonal antibodies. J. Gen. Virol., 69, 1799-1807.

Tamm, T., Suurväli, J., Lucchesi, J., Olspert, A., Truve, E. Stem-loop structure of Cocksfoot mottle virus RNA is indispensable for programmed -1 ribosomal frameshifting. Submitted.

Traoré, O., Pinel-Galzi, A., Sorho, F., Sarra, S., Rakotomalala, M., Sangu, E., Kanyeka, Z., Séré, Y., Konaté, G., Fargette, D. (2009). A reassessment of the epidemiology of *Rice yellow mottle virus* following recent advances in field and molecular studies. Virus. Res., 141, 258-267.

Truve, E., Aaspõllu, A., Honkanen, J., Puska, R., Mehto, M., Hassi, A., Teeri, T. H., Kelve, M., Seppänen, P., Saarma, M. (1993). Transgenic potato plants expressing mammalian 2'-5' oligoadenylate synthetase are protected from potato virus X infection under field conditions. Biotechnology, 11, 1048-1052.

Voinnet, O., Pinto, Y. M., Baulcombe, D. C. (1999). Suppression of gene silencing: a general strategy used by diverse DNA and RNA viruses of plants. Proc. Natl. Acad. Sci. U S A, 96, 14147-14152.

-Teaduspreemia sotsiaalteaduste alal uurimuse "Regionaalsete majandusprotsesside analüüs ja modelleerimine: Eesti majandusareng ELi ja Läänemere regiooni kontekstis" eest

Tiiu Paas

Sündinud 14.09.1949 Tomski oblastis Venemaal

1967 Räpina Ühisgümnaasium
1972 Tartu Ülikool, majandusküberneetika
1978 majandusteaduste kandidaat, Teaduste Akadeemia Majanduse Instituut

Alates 1979 Tartu Ülikooli majandusteaduskonna dotsent, korraline professor, teadusprodekaan, rahvamajanduse instituudi juhataja, professor

Avaldanud 132 teadusartiklit.

REGIONAALSED TULUERISUSED JA MAJANDUSKASV. KAS TULUDE KONVERGENTS VÕI DIVERGENTS?

Regionaalne majandusareng tugineb eelkõige tugevale inimkapitalile − haritud, kogenud, motiveeritud ja tervetele töötajatele. Kui regionaalne areng ning siit tulenevalt ka elanike tulud on väga erinevad, siis paljudes piirkondades puuduvad võimalused inimkapitali säilitamiseks ja tänapäeva nõuetele vastavaks arendamiseks. Osa inimesi ei saa oma võimetele vastavat haridust ning selle tagajärjel ka sobivat rakendust tööturul, nende kohanemisvõime ühiskonnas toimuvate kiirete muutustega jääb nõrgaks. Vananeva rahvastikuga majanduskeskkond ei pruugi sellises olukorras kujuneda enam jätkusuutlikuks. Seega on taas teravamalt päevakorral igihaljad küsimused, mis käsitlevad majanduskasvu ja tulude ebavõrdsuse vahelise seose põhjuslikkust ja dünaamikat. Artiklis on üritatud mõnedele neist küsimustest vastuseid otsida, tuginedes teoreetilistele käsitlustele ja varasemate empiiriliste uuringute tulemustele, aga ka autori enda poolt Euroopa Liidu riikide ja regioonide andmetel läbiviidud uuringule.

TULUDE EBAVÕRDSUS JA MAJANDUSKASV: TEOREETILISED KÄSITLUSED JA EMPIIRILISED UURINGUD

Tulude ebavõrdsus ja majanduskasv on majandusteadlastele olnud aastakümneid huvipakkuvateks ja diskuteeritavateks uurimisvaldkondadeks. Erinevate uurimistööde käigus on analüüsitud tulude ebavõrdsuse taset ja dünaamikat, testitud kasvuteooriate empiirilist paikapidavust, prognoositud majandusarengut, välja pakutud poliitikasoovitusi. Akadeemilise diskussiooni majanduskasvu ja tulude ebavõrdsuse vahelise seose kohta avas 1955. aastal ajakirjas *American Economic Review* ilmunud Simon Kuznetsi artikkel *Economic Growth and Income Inequality* [Kuznets, 1955]. Kuznetsi hüpoteesina tuntud seisukoha kohaselt kasvab tulude ebavõrdsus majanduse industrialiseerimise algetapis ning väheneb, kui majanduse struktuur on kaasajastunud ning struktuuri-

muutused stabiliseerunud. Kuznetsi hüpoteesi on majanduses toimuvate struktuursete muutuste kontekstis korduvalt testitud eri riikide ja regioonide andmetel ning hüpoteesi on ka ümber lükatud. Empiiriliste uurimuste tulemused varieeruvad olenevalt kasutatud andmetest (aegread, ristandmed, paneelandmed), ajaperioodist (majanduslanguste või -kasvu perioodid; struktuursete ümberkorralduste või stabiilse arengu perioodid) ja kasutatavatest analüüsimeetoditest [Myrdal, 1957; Berry, 1988; Alesina, Rodrik, 1994; Kanbur, 2000; Barro, 2000; Banerjee, Duflo, 2003; Dominicis jt, 2008; Anagnostou jt, 2008].

Ka majanduskasvu ja tulude ebavõrdsuse vahelist seost analüüsivad teoreetilised käsitlused annavad seose suunale ja selle põhjuslikkusele erinevaid selgitusi (tabel 1). Seisukohtade põhjendamisel lähtutakse ebavõrdsuse võimalikust mõjust säästmisele ja investeerimisele ning inimeste tööturukäitumisele, valitsuste vajadustest sekkuda tulude ümberjaotamisse ning ka ajahorisondist võimalike tagajärgede avaldumisel.

Tabel 1

Majanduskasvu ja tulude ebavõrdsuse vahelise seose teoreetilised käsitlused

Teoreetiline käsitlus	Seose suund	Põhjendus
Marksistlik vaatenurk	Samasuunaline seos: kiire kasvuga majandustes on tulude ebavõrdsus suurem.	Indiviidide säästmise ja investeerimise piirkalduvus suureneb seoses sissetulekute kasvuga. Sissetulekute ümberjaotamine vähendab agregeeritud säästmismäära, investeeringuid ja seega ka kasvu. Tulude ebavõrdsuse korral võib töötajate motivatsioon rohkem töötada olla suurem [Mirrlees, 1971].
Poliit-ökonoomia	Vastassuunaline seos: kui valitsus on sunnitud oluliselt sekkuma tulude ümberjaotamisse, siis ebavõrdsuse suurenedes majanduskasv aeglustub.	Tulude suure ebavõrdsuse korral on valitsus sunnitud rohkem tegelema tulude ümberjaotamist toetavate meetmetega ning seeläbi võivad väheneda investeeringud ning tootlikkus [Bertola, 1993; Persson, Tabellini, 1994].
Sotsiaalpoliitiline käsitlus	Vastassuunaline seos: suure tulude ebavõrdsuse korral majanduskasv pikaajalises perspektiivis aeglustub.	Tulude suure ebavõrdsuse korral osa inimesi lahkub legaalselt tööturult; kasvab varimajandus ja kuritegevus, ägenevad revolutsioonilised liikumised ja streigid [Alesina, Perotti, 1996; Zak, Knack, 2001].
Kapitaliturgude ebatäiuslikkust arvestav käsitlus	Vastassuunaline seos: suure tulude ebavõrdsuse korral majanduskasv pikaajalises perspektiivis aeglustub.	Suure ebavõrdsuse korral ei suudeta piisavalt investeerida inimkapitali (haridus, tervis). Kapitalituru ebatäiuslikkus võib tuleneda ka informatsiooni asümmeetriast ning institutsionaalsest piiratusest [Galor, Zeira, 1993; Galor, Zang, 1997; de la Croix, Doepke, 2003].

Seega vaatamata enam kui 50 aastat kestnud akadeemilistele diskussioonidele ja erinevatele teoreetiliste käsitlustele ning empiirilistele uuringutele, ei ole majandusteadlaste ega ka laiemalt sotsiaalteadlaste seas välja kujunenud ühtset seisukohta selle seose suuna, olulisuse ning põhjuslikkuse kohta. See on ka mõistetav, sest tehnoloogia areneb ning sotsiaalmajanduslik keskkond muutub kiiresti ning nende arengutega kaasnevad ka olulised struktuursed muutused majanduses ja inimeste käitumises. Lisaks kaasnevad kiirete struktuursete muutustega olulised arengud ka tööturgudel. Inimeste kohanemisvõime tööturgudel toimuvaga on hariduse, vanuse, tervise ning teiste isikutunnuste tõttu erinev ning see võib põhjustada ka erinevusi inimeste tuludes. Muutustega kohanemise protsessi kiirus varieerub ka tulenevalt riikide ja piirkondade eripärast, majandusarengu tasemest ja kiirusest jne. Seega seos tulude ebavõrdsuse ja majanduskasvu vahel ei ole stabiilne ning see võib majanduse erinevatel arenguetappidel avalduda erinevalt. On ajaperioode, kus majandused arenevad kiiresti ning tootmine kontsentreerub kiiresti piirkondadesse, kus see on efektiivsem, ning sellega võib kaasneda ka tulude ebavõrdsuse kasv. Kuid majandusareng on tsükliline protsess ning majanduskasvu jahtumise ajal tekivad uued väljakutsed ja vajadused muutustega kohanemiseks, nende muutuste toetamiseks ning sellega võib kaasneda ka tulujaotuse muutumine.

Majanduskasvu ja tulude ebavõrdsuse vahelise seose teoreetilised käsitlused ja empiiriliste uuringute tulemused on erinevalt peegeldunud ka vastuse otsimisel küsimustele, kas majanduskasv ja tulujaotus on vastuolulised protsessid ning milline peaks olema valitsuse roll tulujaotuse kujundamisel. Eelmise sajandi 50ndatel aastatel nähti industrialiseerimises ja sellega kaasnevas majanduskasvus peamist võimalust vaesuse vähendamiseks. Sellest tulenevalt domineeris sel perioodil seisukoht, et valitsuste roll tulude ümberjaotamisel ei peaks olema kuigi oluline. Kuid juba 1950ndate aastate lõpus ilmnesid tõsised vastuolud majanduskasvu ja tulude jaotumise vahel ning üha enam hakati tunnetama vajadust valitsuste aktiivsema sekkumise järele tulujaotusesse. 1970ndate aastate algusest kuni 1990ndate keskpaigani domineeris valdavalt seisukoht, et majanduskasv ning tulujaotus ei ole küll vastuolulised protsessid, kuid nende sobiv kooskõla on saavutatav oskusliku majanduspoliitika abil. Käesoleval ajal, kui riikide konkurentsivõime võtmeteguriks on üha enam kujunemas inimkapital ning teadmistele ja innovatsioonile tuginev majandusareng, on taas päevakorda tõusnud majanduskasvu ja tulujaotuse vastuolulisuse probleemid ning nende lahendamise vajadus.

Valitsuste poolse sekkumise vajadus tulujaotuse kujundamisse suureneb mitte ainult seetõttu, et on vaja leevendada kasvavat vaesust, vaid valitsustel tuleb läbi erinevate institutsioonide suunata tulujaotust ka selleks, et toetada teadmistepõhist arengut ja uusi investeeringuid inimkapitali. Teadmistepõhist arengut toetava inimkapitali kujundamine on pikaajaline protsess ning kui sellesse piisavalt ei investeerita, siis hakkab riik oma konkurentsivõimet kiiresti kaotama. Konkurentsivõime taastamine muutub nõrga inimkapitali olukorras üha

keerukamaks, tekib n-ö nõiaring: nõrk konkurentsivõime tähendab madalaid sissetulekuid; madalate sissetulekute puhul ei ole võimalik piisavalt investeerida inimeste haridusse ja tervisesse.

REGIONAALSED TULUERISUSED JA NENDE DÜNAAMIKA: KONVERGENTS VÕI DIVERGENTS?

Tulude ebavõrdsuse hindamine sisaldab endas alati teatud subjektiivsust, milles on olulisel kohal ka hindaja arusaam õiglusest. Ebavõrdsuse hindamine eeldab võrdlemist ja seda võimaldavaid mõõdikuid; ükski objekt ega subjekt ei saa kõigest muust eraldi vaadatuna olla ebavõrdne. Elanike tuluerisuste hindamine toimub läbi statistiliste näitajate, mis iseloomustavad kindla metoodika alusel mõõdetud tulusid ning nende varieerumist keskmisest. Elanike tuluerisusi analüüsitakse ka erinevatel agregeerimisetasanditel: isiku (mikrotasand), regiooni (mesotasand) ning riikide (makrotasand) tasandil. Regionaalsete tuluerisuste analüüsimisel on enamkasutatavaks näitajaks sisemajanduse koguprodukt (SKP) inimese kohta; kasutatakse ka keskmise palga ning erinevate valikuuringute alusel leitud majapidamiste sissetulekute näitajaid. Kuid kuna nii keskmise palga kui sissetulekute näitajate leidmise metoodikad oma detailides riigiti ja regiooniti oluliselt varieeruvad, siis on rahvusvahelises kontekstis kujunenud regionaalsete tuluerisuste analüüsimisel peamiseks lähendmõõdikuks ikkagi SKP inimese kohta.

Varasemate uuringute tulemustest nähtub, et regionaalsed tuluerisused on sageli olnud majandustsükli tundlikud [vt ka Myrdal, 1957; Berry, 1988; Anagnostou jt, 2008]. Majanduskasvu perioodidel on regionaalsed tuluerisused reeglina suurenenud, andes tunnistust kiiremast majanduskasvust kõrgemate tuludega regioonides, tavaliselt tugevalt linnastunud piirkondades, kuhu on koondunud tehnoloogia ja inimkapital. Majanduslanguse perioodidel regionaalsed tuluerisused tavaliselt vähenevad, seda nii nõudluse vähenemisega kaasneva tootlikkuse languse kui ka vaesust leevendavate sotsiaalpoliitiliste meetmete laialdasema rakendamise vajaduse tõttu.

Regionaalsete tuluerisuste dünaamika analüüs koondub mõistete konvergents ja divergents ümber, kus konvergents tähendab erisuste vähenemist ning divergents omakorda erisuste suurenemist. Euroopa Liidu laienemise ja eurole ülemineku protsesside kontekstis on lisaks regionaalsete tuluerisuste vähendamisele ehk reaalsele konvergentsile eesmärgiks ka monetaarne konvergents (näiteks Maastrichti kriteeriumid eurotsooni laienemiseks), tööturu ja sotsiaalprotsesside käsitlevate nõuete ja näitajate ühtlustumine ehk sotsiaalne konvergents ning erinevate regulatsioonide ja seadusandluse ühtlustumine ehk institutsionaalne konvergents.

Reaalse tulukonvergentsi hindamisel kasutatakse tavaliselt σ-konvergentsi ja β-konvergentsi näitajaid. Kui riikide ja regioonide keskmiste tulude varieeruvust iseloomustav variatsioonikordaja väheneb, leiab kinnitust σ-konvergentsi

hüpotees. β-konvergentsi hüpoteesi paikapidavus tähendab, et vaesed majandused kasvavad kiiremini:

$$\ln(\frac{y_{i0+T}}{y_{i0}}) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(y_{i0}) + \varepsilon_i \qquad (1),$$

kus y_{i0} on tulude algne tase ning y_{iT} perioodi lõpptase. Kui parameetri α_1 hinnang on negatiivne ja statistiliselt oluline, siis peab paika β-konvergentsi hüpotees. Parameetri α_1 hinnangu põhjal saab leida konvergentsikiiruse näitaja β: $\beta = -\ln(1 - \alpha_1)/T$, , kus T ajaperioodi pikkus. Konvergentsiprotsesside iseloomustamiseks kasutatakse ka nn pool-elu (*half-life*) näitajat (τ): $\tau = \ln(2)/\beta$. Selle näitaja kaudu hinnatakse aastaid, mis on vajalikud, et esialgsed erinevused tuludes väheneksid poole võrra.

β-konvergentsi olemasolu on vajalik, kui mitte piisav tingimus σ-konvergentsiks. Regionaalse tulukonvergentsi analüüsimisel tähendab β-konvergentsi hüpoteesi paikapidavus seda, et regioonid konvergeeruvad sama tasakaaluseisundi suunas. Tegemist on absoluutse konvergentsiga; arvesse on võetud vaid tulude algtase, mitte teiste võimalike tegurite mõju majanduskasvule. Absoluutse β-konvergentsi hüpoteesi paikapidavus on kooskõlas neoklassikalise kasvuteooriaga [Solow, 1956], mille kohaselt on majanduses tegemist kahaneva piirkasulikkusega (väljendab nn konvergentsi optimismi).

Uuemad kasvuteooriad [vt endogeense kasvu teooria; Romer, 1986] seavad absoluutse β-konvergentsi hüpoteesi paikapidavuse kahtluse alla, kuna inimkapitali ning teadmistepõhise majandusarengu tähtsuse kasvades ei ole enam tegemist kahaneva piirkasulikkusega ning seetõttu riikide ja regioonide majanduste areng ei pruugi konvergeeruda sama tasakaaluseisundi suunas. Tegemist on tingimusliku konvergentsiga, kus konvergentsi protsesse mõjutavad erinevad tegurid (näiteks demograafiline olukord, inimkapital, valitsuse poliitika, institutsioonide areng jne):

$$\ln(\frac{y_{i0+T}}{y_{i0}}) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(y_{i0}) + \sum_{j=1}^{N} \alpha_{2j} c_{ji} + \varepsilon_i \qquad (2),$$

kus c_{ji} on majanduskasvu mõjutav tegur j-nda riigi i-ndas regioonis; y_{i0} on tulude algne tase i-ndas regioonis ning y_{iT} perioodi lõpptase.

Tingimusliku konvergentsi hüpoteesi testimise vajadust toetab ka uus majandusgeograafia [Krugman, 1991], mille kohaselt kasvav piirkasulikkus, mittetäiuslik konkurents ning sellega kaasnev aglomeratsioon võivad kaasa tuua nii regionaalsete tuluerisuste suurenemise kui vähenemise.

Meie empiiriline analüüs on läbi viidud Euroopa Liidu 25 liikmesriigi (EL-25) 861 NUTS-3 tasandi regiooni SKP andmetel [vt Paas, Schlitte, 2008]. (NUTS – *Nomenclature of Statistical Territorial Units*, EUROSTAT. Euroopa Liidus on üle 1200 NUTS-3 tasandi regiooni. Eestis ja Lätis on selliseid regioone 5 ning

Leedus on 10. NUTS-3 tasandi regiooni elanike arv on reeglina vahemikus 150 000–800 000.)

Tulemustest nähtub, et analüüsitaval perioodil (1995−2003), mis kajastab Euroopa Liidu idalaienemisele eelnenud protsesse Euroopas, leidis kinnitust absoluutse tulukonvergentsi hüpotees. Selle kohaselt oli konvergentsikiirus EL-25 riikides tervikuna 2%, sealjuures vanades liikmesriikides (EL-15) 1,8% ning kandidaatriikides (nüüdsetes uutes liikmesriikides, EL-10; edaspidi kasutamegi terminit uued liikmesriigid) 1,4% (lisa, tabel 2).

Tingimusliku konvergentsi hüpoteesi testimisel saime olemasolevast andmepiirangust lähtudes arvestada majanduskasvu mõjutava tegurina vaid riikide fiktiivseid muutujaid. Siinjuures lähtusime eeldusest, et fiktiivsete muutujate kaudu on võimalik iseloomustada riikide institutsionaalse raamistiku ja sotsiaalmajandusliku keskkonna olulisemaid erisusi. Tingimusliku β-konvergentsi hüpotees leidis kinnitust, kuid arvulised näitajad ja järeldused konvergentsikiiruse kohta erinesid oluliselt absoluutse β-konvergentsi testimise tulemustest (lisa, tabel 2). Eristus kaks nn konvergentsiklubi: uued (EL-10) ja vanad (EL-15) liikmesriigid. Kui vanades liikmesriikides ilmnes nõrk regionaalne tulukonvergents (konvergentsikiirus 0,9% aastas), siis uutes liikmesriikides toimus tuludivergents. Uutes liikmesriikides, kus analüüsitaval perioodil toimus kiirem majanduskasv kui vanades liikmesriikides, regionaalsed tuluerisused suurenesid. Seega regionaalsete tuluerisuste dekomponeerimisel Euroopa Liidu riikides eristuvad kaks trendi: konvergents riikide vahel ning divergents riikide sees.

Sama metoodikat kasutades oleme analüüsinud regionaalset tulukonvergentsi ka Eesti maakondade ja valdade tasandil [Paas, Lill, 2008]. Maakondade tasandil β-konvergentsi hüpoteesi paikapidavus kinnitust ei leidnud, mistõttu võib öelda, et tegemist oli divergentsiga: analüüsiperioodil (2000−2004) suurenes regionaalsete tulude (mõõdetuna SKPga inimese kohta) maakondade vaheline varieeruvus. Samas kinnitasid Eesti Maksu- ja Tolliameti andmetele põhineva analüüsi tulemused tuluerisuste vähenemist valdade tasandil. Sellist näilist vastuolu võib selgitada sellega, et Eesti kui väikese riigi elanikud ning nende tulud on suhteliselt mobiilsed; perede elukoht ning tulude teenimise koht on sageli erinevad. Loomulikult tuleb tulemuste tõlgendamisse suhtuda ettevaatlikult ja seda vähemalt kahel põhjusel. Esiteks, analüüsitav periood on konvergentsiprotsesside süvaanalüüsiks liialt lühike ning teiseks, tuleb arvestada ka sellega, et regionaalarengut kajastav andmebaas on Eestis seni veel suhteliselt puudulik.

Läbiviidud analüüsi üheks kõrvaltulemuseks on ka järeldus, et olemasolevad andmed ei võimalda sotsiaalmajandusliku arengu põhjalikku diagnoosimist Eestis. Vajadus täiendavate kvaliteetsete andmebaaside järele on ilmne, kui soovitakse prognoosida regionaalset majandusarengut ning välja pakkuda põhjalikule sotsiaalmajanduslikule analüüsile põhinevaid poliitikasoovitusi.

Regionaalne areng sõltub suurel määral ka sellest, kes on vaadeldava riigi naabrid ning milline on nende arengutase ja majanduskasv. Võib arvata, et Eesti majandusarengut ning eriti Tallinna ja Harjumaa arengut on oluliselt mõjutanud naabrus Soomega. Leedu majandusarengus on oma roll Poola naabrusel, Slovakkia arengus Austria naabrusel jne. Naabruse mõju on tugevam ning ka paremini tajutav regioonide tasandil. Tegemist on naabritelt tulevate ülekandeefektidega, mis võivad olla nii positiivsed kui negatiivsed. Erialakirjanduses on neid ülekandefekte nimetatud ka ruumilisteks efektideks [*spatial effects*; vt Anselin, 1988; Anselin jt, 2004; Arbia, 2006].

Naabruse mõju testimise vajadus konvergentsivõrrandite hindamisel tuleneb mitte ainult sisulistest kaalutlustest, vaid ka statistilistest kriteeriumidest. Kui naabrusest tulenevaid ruumilisi efekte ei testita ega võeta arvesse, siis on oht, et tavalisel vähimruutude meetodil (OLS) saadud hinnangud võivad tulla nihkega, kuna konvergentsivõrrandi vealiige ei vasta talle esitatavatele statistilistele nõuetele. Kui analüüsija seda ohtu ei teadvusta, võivad tekkida tõsised vead hüpoteeside testimisel ja uurimistulemuste sisulisel tõlgendamisel ning neile tuginevalt võidakse välja pakkuda mittesobivaid poliitikasoovitusi.

Regionaalse konvergentsi analüüsimisel EL-25 regioonide andmetel oleme lisaks tavalisel vähimruutude meetodil hinnatavatele võrranditele (võrrandid 1 ja 2) kasutanud mudelite spetsifitseerimisel ning hindamisel ka ruumiökonomeetriat. Oleme hinnanud nii ruumilise lükke (*SLM – Spatial Lag Models*) kui ruumilise vea mudeleid (*SEM – Spatial Error Models*). Neist esimese puhul võetakse naabrite mõju arvesse ruumilise autokorrelatsioonikordaja kaudu ehk tegemist on nn ruumilise lükke arvestamisega. Teisel juhul tuleb naabruse mõju arvesse läbi vealiikme ε_i ning sel juhul on tegemist ruumilise heterogeensuse arvestamisega. Mõlema mudeli korral on oluline roll sobiva kaalumaatriksi kasutamisel. Kaalumaatriksite määratlemiseks on erinevaid võimalusi. Näiteks saab kasutada regioonide külgnevusele tuginevat kaalumaatriksit. See on binaarmaatriks, kus 1 tähistab külgnevust ja 0 külgnevuse puudumist. Enam põhjendatud on kaalumaatriksi paikapanek sisulise info põhjal, näiteks kauguse, sõiduaja või siis kultuurilisi erinevusi kajastavate mõõdikute alusel. Oma töös kasutasime kaalumaatriksi kokkupanekul EL-25 NUTS-3 regioonide keskuste vahelisi kaugusi, mida on mõõdetud veoautode keskmise sõiduajaga regioonide vahelise vahemaa läbimiseks. Ruumilise lükke ja ruumilise vea mudelite hindamisel kasutasime suurima tõepära meetodit. Lisa tabelis 3 on toodud mudelite üldkujud ning hindamistulemused.

Analüüsi tulemustest nähtub, et EL-25 riikide regionaalse tuluerisuse selgitamisel on oluline roll ruumiliste efektide arvestamisel. Parameetrite hinnangud ning seega ka nende põhjal leitavad konvergentsikiirused on erinevad, kui võrdleme tavalisel vähimruutude meetodil leitud (lisa, tabel 2) ning ruumiökonomeetria mudelite ja meetodite kasutamisele tuginevaid (lisa, tabel 3) hinnan-

guid. Üldine sisuline järeldus peab siiski mõlemal juhul paika: analüüsitaval perioodil ilmes regionaalne tulukonvergents EL-25 riikides tervikuna, kuid see avaldus uutes ja vanades liikmesriikides erinevalt. Tulemustest nähtub, et regionaalsed ülekandeefektid on tugevamad riikide sees regioonide vahel ning nõrgemad piiriüleste regioonide korral. Seega piiriülene majanduskoostöö on EL liikmesriikides veel suhteliselt nõrk. Siit ka järeldus, et regionaalpoliitiliste meetmetega on oluline toetada mitte ainult regionaalsete tuluerisuste vähenemist riigi sees, vaid toetusi tuleb suunata ka piiriülese koostöö elavdamiseks. Piiriülesest koostööst tulenevad ülekandeefektid toetavad lõpptulemusena nii regiooni kui ka riigi kui terviku arengut. Teadmised, innovatsioonid ja inimesed liiguvad üle riikide ja regioonide piiride ning just tänu erinevatele teadmistele ja kogemustele, mis naabritelt tulevad, on õppimisprotsess ning selle ülekandumine majandusse sageli efektiivsem võrreldes sellega, kui õppimine toimuks vaid kohalike kogemuste ja teadmiste põhiselt.

KOKKUVÕTE

Arvestades regionaalsete tuluerisuste majandustsükli tundlikkust ning nende pro-tsüklilist iseloomu, võib loota, et praeguse majandussurutise üheks väljundiks on regionaalsete tuluerisuste mõningane vähenemine. See võib toimuda nii üldise tootlikkuse languse kaudu, mis on kiirem just kõrgelt arenenud riikides ja regioonides, kui ka vaesuse leevendamiseks ning sotsiaalsete rahutuste ärahoidmiseks vajaminevate majandus- ja sotsiaalpoliitiliste meetmete tõttu.
Headel aegadel ei pruugi tootmise ja loodava lisandväärtuse kontsentratsioon kõrgema efektiivsusega piirkondadesse ning sellega kaasnev regionaalne tulu-divergents olla riigi kui terviku majandusarengut takistav tegur, kui on loodud head tingimused regionaalsete ülekandeefektide levimiseks ja vastuvõtmiseks. Pikas perspektiivis võivad suured regionaalsed tuluerisused kujuneda majanduskasvu piduriks.

Meie poolt EL-25 riikide NUTS-3 tasandi regioonide SKP andmetel läbiviidud empiirilise analüüsi tulemused saab kokku võtta järgmiselt:

1. Oluline tulukonvergents toimus analüüsiperioodil vaid EL-25 riikide vahel. Riikide siseselt eristus kaks konvergentsiklubi:
   - vanad liikmesriigid, kus oli nõrk regionaalne tulukonvergents ning
   - uued liikmesriigid, kus toimus divergents; regionaalsed tuluerisused riikide sees suurenesid.
2. Regionaalsed tuluerisused suurenesid kiirema majanduskasvu situatsioonis; aeglasema majanduskasvu olukorras regionaalsed tuluerisused olid kas stabiilsed või vähenesid aeglaselt.
3. EL-25 riikide ja NUTS-3 tasandi regioonide majandusarengus on olulisel kohal naabruse mõju; esinevad ruumilised ülekandeefektid. Ülekandeefektid on tugevamad riikide sees regioonide vahel; piiriülesed regionaalsed ülekandefektid on oluliselt nõrgemad.

Seega piiriülene regionaalne majanduskoostöö oli Euroopa Liidus analüüsiperioodil veel suhteliselt nõrk. Senisest aktiivsem panustamine piiriülesesse koostöösse toetab regionaalsete tuluerisuste vähenemist ning positiivsete ülekandeefektide levikut nii piiriäärsetele tööturgudele kui ka riikide majandustele tervikuna. Regionaalse ebavõrdsuse vähendamise ning regionaalsete erisuste innovatiivne ärakasutamine on toeks jätkusuutlikule ja konkurentsivõimelisele arengule ning neid võimalusi tuleb toetada nii majanduspoliitiliste meetmetega kui ka regionaalarengut käsitlevate uuringutega.

LISA

Tabel 2

Absoluutse ja tingimusliku konvergentsi võrrandite hinnangud Euroopa Liidu NUTS-3 tasandi regioonide SKP *per capita* andmetel (1995−2003)

Tavalisel vähimruutude meetodil (*OLS*) saadud hinnangud						
	EL-25	EL-15	EL-10	EL-25	EL-15	EL-10
Riikide fiktiivsed muutujad	EI (-)			JAH (+)		
Regioonide arv	861	739	122	861	739	122
Vabaliige	1,583** (17,04)	1,473** (8,84)	1,258** (3,98)	0,553** (4,34)	0,876** (6,09)	-0,646 (-1,60)
α_1	-0,130** (-13,36)	-0,119** (-6,88)	-0,092* (-2,52)	-0,020 (-1,14)	-0,058** (-3,89)	0,112** (2,58)
$R^2_{adj.}$	0,20	0,09	0,06	0,48	0,37	0,36
AIC	-1371,4	-1230,1	-151,1	-1721,3	-1483,3	-190,2
Konvergentsi kiirus	2,0**	1,8**	1,4*	0,3	0,9**	-1,5**
Pool-elu aastad (*Half-life*)	35	38	50	240	81	-
Jarque-Bera statistik	389,54**	429,96**	9,50**	496,48**	540,82**	3,96
Moran's I	21,68**	21,79**	6,12**	9,32**	14,15**	4,34**
LM_{Error}	451,90**	454,81**	30,25**	51,16**	149,60**	7,21**
Robust LM_{Error}	40,45**	10,46**	6,64**	9,90**	18,06**	0,08
LM_{Lag}	440,45**	473,91**	25,95**	41,26**	131,61**	9,03**
Robust LM_{Lag}	29,01**	29,56**	2,33	0,01	0,07	1,91
(**) olulisuse nivoo 0,01; (*) olulisuse nivoo 0,05.						

Allikas: Paas, Schlitte [2008]; hinnangud leitud Eurostat andmetel.
Selgitus:

- Konvergentsikiirus β on leitud võrrandist $\beta = -\ln(1 - \alpha_1)/T$, kus T ajaperioodi pikkus.
- Aastate arv (τ), mis on vajalik, et esialgsed erinevused tuludes väheneksid poole võrra, on kasutusel terminiga "pool-elu" (*Half-life*): $\tau = \ln(2)/\beta$.

Tabel 3

Absoluutse ja tingimusliku konvergentsi võrrandite hinnangud Euroopa Liidu NUTS-3 tasandi regioonide SKP *per capita* andmetel (1995−2003; kasutatud ruumiökonomeetrilist lähenemist)

Ruumilise lükke mudel (*SLM – Spatial Lag Model*)						
	EL-25	EL-15	EL-10	EL-25	EL-15	EL-10
Riikide fiktiivsed muutujad	EI (-)			JAH (+)		
Regioonide arv	861	739	122	861	739	122
Vabaliige	0,485** (5,72)	0,509** (4,31)	0,346 (1,35)	0,343** (2,82)	0,548** (4,24)	-0,541** (-1,60)
α_1	-0,043** (-5,23)	-0,046** (-3,87)	-0,019 (-0,69)	-0,014 (-1,14)	-0,042** (-3,23)	0,101** (2,89)
ρ, autokorrelatsioonikordaja	0,780** (21,28)	0,782** (20,15)	0,604** (6,05)	0,410** (6,52)	0,535** (8,78)	0,508** (4,02)
AIC	-1640,1	-1473,2	-174,9	-1755,0	-1558,2	-197,8
Konvergentsi kiirus	0,6**	0,7**	0,3	0,2	0,6**	-1,4**
Pool-elu (*Half-life*)	110	103	253	344	113	-
LM-test	0,00	2,08	8,99**	7,68**	0,29	1,10
(**) olulisuse nivoo 0,01; (*) olulisuse nivoo 0,05.						

Allikas: Paas, Schlitte [2008]; hinnangud leitud Eurostat andmetel.

Ruumilise lükke mudel (*SLM*):

$$\ln(\frac{y_{i0+T}}{y_{i0}}) = \alpha_0 + \rho\left[W \cdot \ln(\frac{y_{0+T}}{y_0})\right]_i + \alpha_1 \ln(y_{i0}) + \sum_{j=1}^{N} \alpha_{2j} c_{ji} + \varepsilon_i,$$

kus ρ – ruumiline autokorrelatsioonikordaja, W – kaalumaatriks, $c_{ij} = 1$ kui regioon i kuulub riiki j, muul juhul $c_{ij} = 0$.

Ruumilise vea mudel (*SEM – Spatial Error Model*)						
	EL-25	EL-15	EL-10	EL-25	EL-15	EL-10
Riikide fiktiivsed muutujad	EI (-)			JAH (+)		
Regioonide arv	861	739	122	861	739	122
Vabaliige	0,781** (6,30)	0,752** (4,87)	0,268 (0,97)	0,518** (4,01)	0,766** (5,30)	-0,311 (-0,98)
α_1	-0,041** (-3,62)	-0,045** (-2,77)	0,013 (0,42)	-0,017 (-1,30)	-0,048** (-3,22)	0,076* (2,35)
λ	0,840** (26,01)	0,809** (21,21)	0,830** (12,37)	0,495** (7,75)	0,592** (9,79)	0,540** (4,17)
AIC	-1636,1	-1467,4	-185,5	-1764,8	-1568,7	-199,0
Konvergentsi kiirus	0,6**	0,7**	-0,2	0,2	0,7**	-1,0*
Pool-elu (*Half-life*)	116	105	-	283	99	-
LM-test	0,03	1,48	0,89	0,02	5,33*	2,74
(**) olulisuse nivoo 0.01; (*) olulisuse nivoo 0.05.						

Allikas: Paas, Schlitte [2008]; hinnangud leitud Eurostat andmetel.
Ruumilise vea mudel (SEM):

$$\ln(\frac{y_{i0+T}}{y_{i0}}) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(y_{i0}) + \sum_{j=1}^{N} \alpha_{2j} c_{ji} + \varepsilon_i ,$$

kus $\varepsilon_i = \lambda[W \cdot \varepsilon]_i + u_i$, λ – ruumiline autokorrelatsioonikordaja, W – kaalumaatriks, $[W \cdot \varepsilon]_i$ – vealiige kaalutud kaalumaatriksiga, $c_{ij} = 1$ kui regioon i kuulub riiki j, muul juhul $c_{ij} = 0$, ε_i ja and u_i – vealiikmed.

KIRJANDUS

Alesina, A., Rodrik, D. (1994). Distributive politics and economic growth. Quart. J. Econ., 109, 2, 465-490.

Alesina, A., Perotti, R. (1996). Income distribution, political instability, and investment. Eur. Econ. Rev., 81, 5, 1170-1189.

Anagnostou, A., Artelaris, P., Petrakos, G., Psycharis, Y. (2008). Growth and convergence-divergence trends in the European Union. Scienze Regionali. Italian Journal of Regional Science, 7, 2, 9-28.

Anselin, L. (1988). Spatial Econometrics: Methods and Models. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Anselin, L., Florax, R., Rey, S., eds. (2004). Advances in Spatial Econometrics. Methodology, Tools and Applications. Springer-Verlag, Berlin.

Arbia, G. (2006). Spatial Econometrics. Spatial Foundations and Applications to Regional Convergence. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Banerjee, A., Duflo, E. (2003). Inequality and growth: What can the DATA say? J. Econ. Growth, 8, 267-299.

Barro, R. (2000). Inequality and growth in a panel of countries. J. Econ. Growth, 5, 5-32.

Berry, B. (1988). Migration reversals in perspective: The long-wave evidence. Int. Reg. Sci. Rev., 11, 3, 245-251.

Bertola, G. (1993). Factor shares and savings in endogenous growth. Am. Econ. Rev., 83, 5, 1184-1198.

De la Croix, D., Doepke, M. (2003). Inequality and growth: Why differential fertility matters. Am. Econ. Rev., 3, 4, 1091-1113.

Dominicis, L. D., Florax, R. J., de Groot, H. L. (2008). A meta-analysis on the relationship between income inequality and economic growth. Scottish J. Pol. Econ., 55, 5, 654-682.

Galor, O., Zang, H. (1997). Fertility, income distribution, and economic growth: Theory and cross-country evidence. Japan World Econ., 9, 2, 197-229.

Galor, O., Zeira, J. (1993). From physical to human capital accumulation: Inequality and the process of development. Rev. Econ. Studies, 71, 1001-1026.

Kanbur, R. (2000). Income distribution and development. Atkinson, A. B, Bourguignon, F. (eds). Handbook of Income Distribution. Vol. 1. Amsterdam, North-Holland, 796-814.

Krugman, P. (1991). Increasing returns and economic geography. J. Pol. Econ., 99, 3, 15-38.

Kuznets, S. (1955). Economic growth and income inequality. Am. Econ. Rev., 45, 1, 1-28.

Mirrlees, J. A. (1971). An exploration in the theory of optimum taxation. Rev. Econ. Studies, 38, 175-208.

Myrdal, G. (1957). Economic Theory and Underdeveloped Regions. Duckworth, London.

Paas, T., Schlitte, F. (2008). Regional income inequality and convergence process in the EU-25. Scienze Regionali. Italian Journal of Regional Science, 7, 2, 29-49.

Paas, T., Lill, L. (2008). Regional income disparities and convergence: the performance of Estonia in comparison with the EU. Discussions on Estonian Economic Policy, Issue 16. Berliner Wissenschafts-Verlag, Berlin-Tallinn, 82-97.

Persson, T., Tabellini, G. (1994). Is inequality harmful for growth? Am. Econ. Rev., 84, 3, 1091-1113.

Romer, P. (1986). Increasing returns and long run growth. J. Pol. Econ., 94, 5, 1002-1037.

Solow, R. (1956). A contribution to the theory of economic growth. Quart. J. Econ., 70, 5, 64-94.

Zak, P. J., Knack, S. (2001). Trust and growth. Econ. J., 111, 295-321.

**Teaduspreemia humanitaarteaduste alal monograafia*
"Eesti-, liivi- ja kuramaalased Euroopa ülikoolides 1561–1798" eest

Arvo Tering

Sündinud 6.04.1949 Suure-Jaanis

1967 Suure-Jaani Gümnaasium
1973 Tartu Ülikool, ajalugu
1986 ajalookandidaat, Tartu Ülikool

Alates 1972 Tartu Ülikooli Raamatukogu käsikirjade ja haruldaste raamatute osakonna kaastööline, vanemteadur

Baltische Historische Kommission e.V. (Göttingen) korrespondentliige
1995 Dr Arthur Puksovi Fondi auhind
1995, 1997 Friedrich Puksoo auhind
2008 Eesti Ajalookirjanduse Aastapreemia

2001 Valgetähe IV klassi teenetemärk

Avaldanud poolsada teaduspublikatsiooni Tartu rootsiaegse ülikooli, varauusaegsete akadeemiliste kontaktide ja teadusideede retseptsiooni ajaloo alalt.

Milline on ülikoolide panus eri maade haritlaskonna koolitamisse ja teadusideede retseptsiooni, on paljutahuline interdistsiplinaarne uurimisprobleem. Ülikoolide mõju võib uurida nii ülikoolikeskselt kui kindla piirkonna vaatenurgast.

Tavapäraselt püütakse välja selgitada ühe konkreetse ülikooli mõjuvälja ulatust. Selleks vaadeldakse ülikooli kasvandike osakaalu eri piirkondade haritlasameteis. Selliste uurimuste järgi tekib ühiskondlik tellimus tavaliselt ülikoolide juubelite puhul. Teine lähenemisviis on piirkonnakeskne. Sel puhul jälgitakse kõigi võimalike ülikoolide osatähtsust teatud kindla piirkonna haritlaskonna koolitamisel. Uurimuse läbiviimise peatingimuseks on ala kõikide haritlasametite kohta biograafiliste teatmeteoste olemasolu. Varauusaegses aegruumis oleksid hästi uuritavad sellised piirkonnad, kus puudus omaenda domineeriv ülikool, nagu Sileesia kuni Breslau ülikooli asutamiseni 18. sajandi algul, Sleswig kuni Kieli ülikooli asutamiseni 1665. a, Kuninglik Preisimaa kuni esimese Poola jagamiseni 1772 või Transilvaania. Sellesse ritta kuuluvad ühtse kultuuriruumilise tervikuna ka Eesti- ja Liivimaa provintsid ning Kuramaa hertsogiriik. Milline oli Euroopa ülikoolide roll selle piirkonna haritlaste koolitamises ning uute teadusideede vahendajana 17. ja 18. sajandil, on uurimisprobleemiks käsilolevas ulatuslikumas töös. Uurimismeetodina kasutatakse prosopograafilis-statistilist meetodit, mis võimaldab jälgida ülikoolide mõju dünaamikat ning võrrelda teiste piirkondade haritlaskonna kohta käivate statistiliste andmetega. Uurimisprojekti õnnestumise korral võiks see toimida pilootprojektina teiste alade haritlaskonna uurimisel.

2008. a ilmunud monograafia "Eesti-, liivi- ja kuramaalased Euroopa ülikoolides 1561–1798" kujutab endast eelnimetatud uurimuse allteema käsitlust. Monograafias on püütud leida vastuseid reale baltimaalaste akadeemilisi õpinguid puudutavatele küsimustele:

- Kuidas mõjutas ülikoolidessemineku dünaamikat eelharidust pakkuvate õppeasutuste olemasolu või puudumine?
- Missugune oli eri sotsiaalsete gruppide suhestus ülikooliharidusse?
- Millised olid ülikooliõpingute majanduslikud kulud ja võimalused?
- Millised olid ülikoolidesse reisimise olud?
- Milline oli ülikoolieelistuste dünaamika?
- Kuidas paistsid baltimaalased välja õpingutes ja osalemises seltskonnaelus?
- Millised olid baltimaalaste võimalused kohapealsel tööjõuturul võrreldes sisserännanutega ning milline oli nende läbilöögivõime võõrsil?

Käsitlus haakub teiste samasuunaliste uurimustega, mille eesmärgiks on koguda üheks tervikandmestikuks kokku kõikide teatud kindlast piirkonnast pärit kindlal ajaperioodil õppinud üliõpilased. See võimaldab selgitada välja vastava piirkonna sotsiaalsete gruppide motiveeritust ja majanduslikke võimalusi oma poegade akadeemiliseks koolitamiseks, ülikoolide eelistusi ning ülikoolis õppinute läbilöömist tööturul. Sellise uurimisprobleemi väljund on kahesugune: neis piirkondades, kus oma ülikooli mõju oli tagasihoidlik või ülikool puudus sootuks, näitab selline lähenemine eri ülikoolide mõjujõujoonte intensiivsust selles piirkonnas (näiteks Baltimaades või Transilvaanias); kuid sellise regiooni suhtes, kus tegutses oma domineeriva mõjuga ülikool, tuleb uurimises esiplaanile põhiülikoolis õppimise jätkuks *peregrinatio academica* kui kultuurilooline fenomen (Taani, Rootsi). Teatud kindlast piirkonnast pärit üliõpilaste uurimise vundamendiks on ideaalis kõikides ülikoolides õppinute biograafiline matrikkel, mille prosopograafiline läbitöötamine annaks häid uurimistulemusi.

Mõistagi ei too see ülimalt aegavõttev suund uurijaile kiiret edu, kuna usaldusväärseid uurimistulemusi saab avaldada alles siis, kui üliõpilaste kohta andmestiku kogumine on sellisesse lõppjärku jõudnud, kus täiendavate üksikandmete juurdeleidmine pärast matriklile punktipanemist ei seaks kahtluse alla statistiliste tulemuste usaldusväärsust. Esimesel pilgul poleks midagi lihtsamat kui kõikidest olemasolevatest matrikliraamatutest teatud piirkonnast pärit üliõpilaste andmed välja noppida ja need andmebaasi juurde liita. Tegelikult seisab aga uurijal aegavõttev allikakriitiline filigraantöö alles ees. Eriti tuleb rinda pista samanimeliste üliõpilaste probleemiga. Mida teha, kui paari aasta jooksul on näiteks neli eri ülikoolide matriklitesse kantud ühest ja samast linnast pärit üliõpilast laialt esineva nimega "Johannes Müller"? Seejuures pole märgitud isegi nende ainesuunda. Appi tulevad kirikuraamatute sünniregistrid, sõpradealbumite sissekanded, reisipäevikud, ülikoolide kohtutoimikud või nende üliõpilaste trükis avaldatud oratsioonid ja disputatsioonid jne.

Nende lisanduvate allikate abil õnnestuski sedastada, et kolmel juhul on tegemist ühe ja sama üliõpilasega ning neljas osutus nimekaimuks. Et sama võib juhtuda ka sugugi mitte kõige tavalisemate nimedega üliõpilaste puhul, on võtta Liivimaalt pärinev näide: 1734. a kanti Jena ülikooli matriklisse Helme pastori poeg Heinrich Johann Frost, kellest sai hiljem Rõngu pastor. Liivimaa vaimulike leksikonis seisab, et ta immatrikuleerus 1736. a ka Halle ülikooli. Tõepoolest, 1736. a immatrikuleerus Halle ülikooli Tallinnast pärit samanimeline tudeng. Kuid 1737. a seisab Halle St. Georgi koguduse surmameetrikas teade üliõpilase Heinrich Johan Frosti surma kohta. Seega oli tegemist kahe samanimelisega, antud juhul ilmselt onupoegadega.

Nii mõnigi kord esineb üliõpilane matriklis ilma päritolupiirkonna andmeteta või on antud hoopis eksiteele viiv sünnikoht, mitte see ala, kus möödus üliõpilase lapsepõlv. Näiteks on nii mõnigi liivimaalane end kirja andnud kui "Lubecensis" või "Russus". Esimese vanemad olid sõjapaos Lüübekis 1657. a paiku, teise vanemad olid aga Põhjasõja ajal küüditatud Vologdasse. Hiljem naasesid mõlemad pered Liivimaale tagasi. Mõnikord võis matrikli editeerija päritolukoha valesti välja lugeda. Sellekohase näitena esineb Leideni ülikooli matriklis 1700. a Peter Koskull kui "Semigratia gallus", seega oleks tegemist justkui prantslasega. Kuid originaalmatriklis on ta aga kui "Semigallus", seega on ta üheselt mõistetavalt pärit Läti Zemgalest. Osa üliõpilaste nimed on matriklitesse jäänud hoopis sisse kandmata, kuigi kõigi ülikoolide statuutides on sätestatud, et ülikoolilinna saabunud noormees peab end üldreeglina nädala jooksul akadeemilise kaitse alla andma, st end matriklisse kirja panema.

Matriklites puuduvad nimed kerkivad esile aga teistes allikates − kas sõpradealbumis, kohtutoimikus või respondendina disputeerimisel. Selliste ja veelgi keerukamate juhtumite lahtiharutamise vaev saadab uurijat kogu matrikli koostamise vältel. Õnneks on kasutada paljude genealoogide, biograaafide ja ajaloolaste uurimistulemused, samuti rikkalik arhiivimaterjal nii matriklikangelaste kodumaa kui ülikoolilinnade mäluasutustes.

Praeguseks on ilmunud mitmetest Euroopa piirkondadest pärit üliõpilaste matriklid ning nendele tuginevad uurimused (vt kirjanduse nimestik). Alguse tegi Thomas Otto Achelis, kelle Schleswigist pärit üliõpilaste matrikkel on eeskuju andev. Et isegi see, rohkem kui pool sajandit kestnud uurimistöö tulemusel pärast autori surma ilmunud teatmeteos [Achelis, 1966] viimast täiust ei saavutanud, näitab Vello Helki koostatud täienduste ja täpsustuste lisaköide [Achelis, 1991]. Kahjuks ei jõudnud Achelis matriklile tuginevaid arvukaid artikleid tervikuurimuseks koondada. Ilmunud on Ida- ja Lääne-Preisimaalt pärit üliõpilaste nimestik kuni 1815 [Kenkel, 1981]. Kuna mitmete suurte ülikoolide seni trükis avaldamata matriklid on selles kasutamata, ei sisalda see ühtset üliõpilaste biograafiaartiklitest koosnevat matriklit vaid üksnes ülikoolide matriklite väljavõtteid. Neile nimestikele toetub Marian Pawlaki monograafia nn Kuninglikult Preisimaalt pärit üliõpilaste õpingute kohta kuni 1772. a Poola jagamiseni [Pawlak, 1988]. Huvipakkuv on Hollandi ajaloolaste

uurimus Põhja-Brabandist pärit üliõpilaste õpingute kohta kuni 1750. a [Bots jt, 1979]. Nii kuninglikul Preisimaal kui Põhja-Brabandis oli nii katoliiklik kui ka protestantlik elanikkond. Seetõttu on nende uurimuste autoritel olnud põhjust võrrelda eri sotsiaalsetesse gruppidesse kuuluvate üliõpilaste valikuid protestantlike ja katoliiklike ülikoolide vahel.

Heaks prosopograafiliseks vundamendiks edasisele uurimisele on ungari uurijate koostatud Transilvaania üliõpilaste matrikkel kuni 1700. aastani [Szabó, Tonk, 1992]. Ungarlastel on töös väga suurejooneline ungarimaalaste ülikooliõpinguid kogu Euroopa ülikoolides käsitlev uurimisprogramm. Seni on kõige terviklikumalt uuritud Põhjamaadest pärit üliõpilaste õppereise. Sellele andis programmilise aluse 1981. a Jyväskylas toimunud Põhjamaade ajaloolaste konverents, kus ühe sektsiooni ettekanded käsitlesid ühtse skeemi alusel Rootsi, Soome, Taani-Norra ning Islandi üliõpilaste õpinguid välisülikoolides kuni 1660 [Ur Nordis kulturhistoria, 1981]. Sellest kasvasid välja monograafiad: Vello Helkilt Taani-Norra üliõpilaste õppereiside kohta kuni 1813. aastani [Helk, 1987, 1991], Lars Niléhnilt Rootsi üliõpilaste õppereiside kohta kuni 1700 [Niléhn, 1983] ning Jussi Nuortevalt Soome üliõpilaste välisõpingutest kuni Turu ülikooli asutamiseni 1640. a [Nuorteva, 1997]. Lisaks on ilmunud monograafiaid kindlatest piirkondadest teatud maade ülikoolides õppinud üliõpilaste kohta. Väga sisukas on Claudia Zonta doktoritöö sileeslastest itaalia ülikoolides kuni 1740 [Zonta, 2000]. Ilmunud on Andrei Andrejevi uurimus venemaalaste õpingutest saksa (sealhulgas Leideni) ülikoolides 18. sajandi algusest kuni 19. sajandi keskpaigani [Andrejev, 2005].

Nende matriklite ja uurimuste seltskonda on astunud ka 1561−1800 ülikoolidesse õppima asunud eesti-, liivi- ja kuramaalaste biograafiline matrikkel [Tering, ilmumisel] ja sellele rajanev monograafia [Tering, 2008]. Matrikkel − biograafiline leksikon on koostamise lõppjärgus.

Monograafia võib uurimismetoodika kasutamise seisukohast jagada kahte suurde uurimisblokki. Esimene, ülikooliõpingute dünaamikat, üliõpilaste sotsiaalset päritolu, õpinguid ülikoolieelset haridust andvais õppeasutustes, eri ülikoolide eelistusi ning üliõpilaste edasist karjääri käsitlevad peatükid on tänu statistilisele meetodile võrreldavad teiste samalaadsete uurimustega. Selle osa aluseks olevateks põhiallikateks on kõik saksa, Madalmaade ning Põhjamaade, osaliselt itaalia ja prantsuse ülikoolide matrikliraamatud, üliõpilaste väitekirjad ja harjutusdisputatsioonid, ülikoolide kohtutoimikud, Baltimaade ja ülikoolilinnade kirikuraamatud, Baltimaade ja nn uute saksa liidumaade mäluasutustes leiduvad sõpradealbumid ning ulatuslik biograafiline ja genealoogiline kirjandus.

Teine teemadeblokk hõlmab reisiolusid, õpingute argipäeva, harrastustegevust ja seltsielu, samuti õpingute finantseerimist ja õpinguteaegseid kulutusi. Baltimaalaste üliõpilaselu puudutavad seigad käivad suurel määral ka kõigi nende kaasüliõpilaste kohta. Kuni puuduvad teemat laiemalt käsitlevad taustuurin-

gud, on üsna võimatu eristada, mis oli üliõpilaselus vaid baltlastele ainuomane ja mis üldine. Üliõpilaste õpingute argipäeva ning vabaajaharrastuste uurimisel on ülimalt väärtuslikeks allikateks osutunud ülikoolide kohtutoimikud. On lausa õnnelik kokkusattumus et tudengite argipäeva uurimisel on kõige rikkalikumateks allikateks osutunud just Jena ja Göttingeni ülikoolide arhiivides leiduvad kohtutoimikud. Oli ju nende mõlema ülikooli panus Baltimaade haritlaste koolitamisse 18. sajandi viimasel veerandil ülisuur. Eriti huvipakkuvad on võlgade toimikud. Neis leiduvad esmapilgul tühistena näivad üksikfaktikesed muutuvad tervikmosaiikpilti asetatuna üliõpilasolustikust kõneldes üsnagi jutukaks. Olulisteks allikateks, mis lasevad heita pilku tudengirõivastuse ja õpinguteks vajalike isiklike asjade maailma, on õpingute ajal surnud üliõpilaste vara inventuurinimestikud. Mis kõige tähtsam, need annavad teavet, kui palju ja millise sisuga raamatuid üliõpilane endale õpingute ajal ostis. Tundub uskumatuna, et saksa uurijad pole seda ülivväärtuslikku allikategruppi kasutanud.

Ainulaadseks allikaks 18. sajandi teise poole üliõpilaste lugemishuvide kohta osutus Göttingeni ülikooli raamatukogu laenutusžurnaal, mis on vaid väheste uurijate tähelepanu pälvinud. Häid andmeid üliõpilaste elu-olu kohta eriti 16. sajandil ja 17. sajandi esimesel poolel sisaldavad Rostocki ülikooli arhivaalid. Königsbergi ülikooli ennesõjaaegsest arhiivist on säilinud 60% ja see on uurijatele kättesaadav Olsztyni vojevoodkonna arhiivis. Reisiolude kohta on ammendamatuks allikaks reisipäevikud ja memuaarid. Stipendiumisaajad on üldreeglina ära tähendatud linnade raeprotokollides.

Kuigi *Alltagsgeschichte* on viimastel aastakümnenditel saanud moekaks uurimissuunaks, näib et saksa keeleruumi varauusaegse üliõpilaselu uurimisel on Baltimailt pärit materjal üliõpilaste igapäevaelu kohta esimeseks selletaoliseks katseks. Õpingute kulutuste uurimise alal on pioneerirollis Freiburgi uurija Heinrich Bosse, kelle uurimused kuramaa literaatide majandusseisu ja Halle ülikooli üliõpilaste etalonkulutuste kohta on uurimismetoodika osas eeskuju andvad (vt ka tabel 1).

Monograafia lähtepunktiks oleva 16. sajandi teine pool oli Baltimaade haritlaskonna kujunemise seisukohast ülimalt ebasoodne aeg. Keskaegne riikkondlik süsteem oli kokku varisenud, uus polnud veel toimima hakanud, maa oli Liivi sõja ja hiljem Rootsi-Poola unioonisõja tallermaaks. Kuna Saksamaal toimus just tollal usuline selginemine ning haritlastest oli puudus, polnud loota nende liikumist itta, eriti kui Euroopasse jõudsid kuuldused vene vägede metsikustest Liivimaal. Riia linn suutis tänu majanduslikule jõukusele ning kindlalt reformatsiooni omaksvõtmisele Poola võimude ja jesuiitide kõige aktiivsemate rekatoliseerimispüüdluste kiuste saata oma pojad luterlikesse ülikoolidesse, eriti Rostocki ning seejärel pikemale õppereisile.

17. sajandi hoogsa haridussõbraliku vaimse õhustiku eest oleme tänu võlgu suurriigiks pürgiva Rootsi haritud ja haridust soosivale juhtkonnale, kes toetas

Tabel 1

Eesti- ja Liivimaalt ning Kuramaalt pärit üliõpilaste immatrikulatsioonide dünaamika kümmeaastakute kaupa (esimene arv lahtris on toodud Eesti- ja Liivimaa kohta ja teine Kuramaa kohta)

Aastad	Usuteaduskond	Arsteiteaduskond	Õigusteaduskond	Aadlikud	Teadmata valik	Kokku	Ühtekokku
1561–70	11 -	- -	5 -	10 9	38 5	64 14	78
1571–80	16 3	1 -	9 -	5 2	33 1	64 6	70
1581–90	13 3	1 -	6 1	8 12	36 8	64 24	88
1591–00	19 7	2 -	13 -	8 16	48 11	90 34	124
1601–10	23 6	2 -	17 2	7 11	30 14	79 33	112
1611–20	19 9	2 -	13 4	5 11	24 26	63 50	113
1621–30	24 9	3 -	25 2	3 11	16 15	71 37	108
1631–40	28 11	2 -	29 12	48 7	44 17	151 47	198
1641–50	59 23	4 1	38 10	38 21	119 36	258 91	349
1651–60	37 24	4 2	37 7	21 35	95 28	194 96	290
1661–70	22 21	2 1	19 7	13 14	29 17	85 60	145
1671–80	41 35	3 1	26 8	21 22	30 25	121 91	212
1681–90	88 30	7 1	46 10	29 40	30 31	200 112	312
1691–00	75 55	5 3	48 10	35 31	77 32	240 131	371
1701–10	77 39	11 3	44 19	21 39	53 41	206 141	347
1711–20	26 21	4 1	25 7	25 21	7 19	87 69	156
1721–30	28 28	4 2	33 12	16 36	11 13	92 91	183
1731–40	70 43	10 3	55 22	48 57	39 17	222 142	364
1741–50	75 33	20 7	56 21	73 58	21 31	245 150	395
1751–60	36 36	20 7	55 23	32 58	22 25	165 149	314
1761–70	67 44	15 10	47 21	62 67	20 26	211 168	379
1771–80	62 35	17 13	54 23	46 43	14 12	193 126	319
1781–90	85 60	36 14	60 19	60 31	19 20	260 144	404
1791–00	48 39	47 20	26 21	54 33	23 9	198 122	320
Kokku	1049 614	222 89	786 261	687 685	877 479	3623 2128	5751

seda ka provintsides. Niihästi uute haridusasutuste kui haritud juriste nõudvate kohtuasutuste loomine andis kaugeleulatuva põhja haridust soosivale õhustikule, mis suutis jalule tõusta ka sõja- ja katkuolukorrast tingitud tagasilöökidest.

Ülikooliloengutest aru saada suutis üliõpilane vaid siis, kui ta oli ülikoolieelse hariduse astmed läbinud. Baltimaadel sai see võimalikuks 1631. a gümnaasiumide rajamisega Riiga ja Tallinnasse. Esmase hariduse andnud triviaalkooli või gümnaasiumi algastme läbimise järel läbiti gümnaasiumi kaks kõrgemat klassi ning priima lõpetamine *cum valedictione* andis soovituse ülikooli reisimiseks. 1630. aastate keskpaigast kasvas eriti Tallinnast ja selle tagamaalt pärit ülikoolidesse sõitvate noormeeste arv. Varem tuli kohaliku linnakooli lõpetamise järel jätkata mõne naaberpiirkonna gümnaasiumis. Kuramaa noormeestel tuli seda teha kuni 1770. aastate teise pooleni, mil Kuramaa sai esimest korda akadeemilise õppeasutuse – *Academia Petrina*. Seni õppisid kuramaalased Danzigi, Thorni, Stettini, Königsbergi või Riia gümnaasiumi tasemel õppeasutustes. Seda tegid ka eesti- ja liivimaalased, kui siinsed keskõppeasutused sõjategevuse ajal ja järel uksed sulgesid. Teiseks võimaluseks oli teismelisena ülikooli minna ning seal hulk aastaid filosoofiateaduskonna ainete õppimisele raisata, enne kui leivaala stuudiumiga algust sai teha. Selline õppimisviis oli mõistagi kulukas. 17. sajandi esimeseks pooleks oli Saksa keeleruumis kujunenud gümnaasiumide võrk, mis lühendas tulevaste juristide ja vaimulike õppeaega ülikoolis kolmele, arstidele aga neljale aastale.

Maal elavatel aadlike ning osalt ka vaimulike ja mõisavalitsejate poegadel oli üldreeglina koduõpetus. Mida pikem oli kohaliku päritoluga ülikoolilõpetajatest pastorikohanõudlejate pink ning mida enam valgus Saksa keelealalt sealsete haritlaste ületootmise aegadel koduõpetajaid Ida- Euroopasse, sealhulgas Baltimaile, seda suurem oli tublide koduõpetajate valik. Koduõpetaja haritusest ja isikuomadustest olenes suuresti aadlinoormeeste huvi tärkamine akadeemiliste teadmiste vastu. Ülikoolieelsed õppeasutused tagasid haridustee jätkamise vaid maksujõulisematele õpilastele.

Vaesematest kihtidest andekatel noormeestel olid teoreetilised võimalused akadeemilise hariduseni jõuda segastel aegadel, mil oli loota asjaolude õnnelikke kokkusattumisi − metseenlus, võimalus mingis erakorralises situatsioonis eelharidust saada. Kindla haridustee rutiinse toimimise oludes oli aga eranditele vähe kohta. Õpingute tee triviaalkoolist gümnaasiumi viimaste klasside kaudu ülikooli kujundas välja üliõpilaste sotsiaalse päritolukeskkonna vaimulike, jõuka linnakodanikkonna ja haritlaste näol. Toimis sissejuurdunud valikusüsteem: õppeasutuse alamate klasside andekamad lõpetajad kutsuti ülikooliks ette valmistavatesse klassidesse, kusjuures õpingukulud olid vaesematele õpilastele üle jõu käivad. Linnad maksid stipendiumi vaid gümnaasiumi lõpetanuile ja sedagi valikuliselt, isa sotsiaalset positsiooni silmas pidades. Vaesemate noormeeste võimalusi ahendas üha enam olude muutumine ka ülikoolilinnades: kui keskaegsetes *bursades* oli võimalik saada tasuta peavarju, siis

linnakodanike juures korterit üürides oli see mõeldamatu, samuti vähenes kiiresti avalike tasuta loengute arv ja samavõrd suurenes maksuliste eraloengute osakaal. Saksa ülikoolides olid küll tasuta ühislauad ning stipendiaatide kohad, kuid baltisakslastele kui võõrastele avanes see võimalus vaid erandjuhul. 18. sajandil kujundasid mitmed tooniandvad õppejõud avalikku arvamust, et madalama sotsiaalse päritoluga noormeestel pole ülikooli asja.

Eri sotsiaalsetel gruppidel olid ülikooliõpinguteks erinevad motiivid. Enim motiveeritud oli vaimulike grupp ja sellega kokku kuuluvad kooliõpetajad. Vaimulikest isad lootsid poegadest saada endale ametijärglasi. Et vaimuliku surma tõttu ei peaks lesk pärast armuaasta lõppemist pastoraadist lahkuma, oli kolm võimalust: kas uus pastor abiellus oma eelkäija lese või tütrega või üks poegadest jätkas isa tööd. Tihti polnudki aga ülikoolidesse saadetud poegadel huvi õpetatavate alade vastu ning nad siirdusid hoopis sõjaväeteenistusse.

Aadlikke motiveeris tihti perekondlik traditsioon ning sotsiaalne nõudmine haritud aadlisoost juristide järgi. Nõnda oli see Kuramaal, kus aadli ja hertsogi vastasseisu puhul olid juriidilised teadmised relvaks oma eesõiguste kaitsmisel, samuti võis Kura aadlik tõusta läbi hariduse poola võimueliiti, kus ladina keel oli ametikeeleks. Rootsi ja vene ajal Liivimaal ja Eestimaal oli aadlikel üliolu-line hoopis sõjaväekarjäär. Kuid osa aadlikest kes tervislikel põhjustel ei saanud ohvitseriteenistust läbi teha, pühendusid teadusele. Osa aadlikest, eriti parunid ja krahvid, kes püüdlesid kõrgeima tsiviilteenistuse tippu jõudmisele, võtsid õigusteaduse ja poliitikaõppimist väga tõsiselt.

Kaupmeestest oli huvi oma poegade ülikoolidesse saatmiseks eelkõige raega seotud perekondadel, et sillutada pojale tee raeliikmeks tõusmiseks, läbi juriidilise hariduse algul sekretäriametisse, seejärel raehärraks ja lõpuks bürgermeistriks. Teine osa kaupmehi lootis et juriidilise hariduse läbi võiks poeg juristiametisse saada ja sealt aadliseisusesse tõusta. Samuti võis kuni 14 aastase kooliõpilase erilist andekust märkav koolirektor soovitada tal gümnaasiumiõpinguid jätkata. Üldreeglina võeti poeg koolist ära kaupmeheametit õppima .

Käsitööliste pojad siirdusid harva ülikoolidesse. Erandiks on kirurgid ja apteekrid, kes saatsid oma pojad arstiteadust õppima. Oli olukordi, mil ema abiellus pärast isa surma mõne teise käsitööala esindajaga, kes hindas akadeemilist haridust sotsiaalse positsiooni parandamise vahendina.

Põhimõtteliselt oli ka eesti- ja lätisoost noormeestel võimalik kooliharidus astmed läbi teha ja ülikooli jõuda. Tegelikkuses oli selleks ainuke lätisoost üliõpilane, puusepa poeg Johann Reuter (Janis Jatnieks), kes õppis Tartu ülikoolis. 18. sajandi teisel poolel olid Riia mastipuupraakerid poegade ülikooli saatmiseks väga motiveeritud.

Talupoegadel puudus põhimõtteliselt võimalus poegade õppima saatmiseks. Eestlastest ja lätlastest noormeeste eemalejäämist soodustas luteri usu rahvuskeelse kiriku põhimõte, mis vastas sakslastest härrasrahva püüetele mitte

lubada eestlasi ja lätlasi saksakeelse hariduse juurde. Rootsi emamaal oli see küllalt tavaline ning võis anda julgust Tartu ülikooli jõudmiseks. Talupoisid aga ei jõudnud vajaliku eelhariduseni. Alles 1680. aastatel talurahva kooliõpetajate seminari kasvandikel, kellest said köstrid ja kooliõpetajad, oli reaalne võimalus oma pojad koolitada kuni ülikoolini välja. Seda soosisid ka pietistliku sisemise vagaduse ja karitatiivsuse pinnal tekkinud pietistlikud õppeasutused Halles ja ka Baltimail: toomkool Tallinnas ning Albu kool Järvamaal. Mitmed eestisoost köstrite ning ka mõisavalitsejate pojad leidsid tee Halle ladinakooli ja ülikooli. Otto Wilhelm Masing ja Ignatius said keskhariduse mujal Saksamaal. Mitmed püüdsid ülikoolieelset haridust omandada Halle Latinas, kui selleks kõige soodsamas õppeasutuses, kuid ilmselt ainelisest kitsikusest tingituna jäid nad rasketele haigustele, eriti tiisikusele alla. Läti alal jõudsid ülikoolidesse nii mõnegi Kuramaa hertsogite maavalduste lätisoost mõisavalitsejate pojad. Lätis kujunes läti soost rahvusliku kodanluse algeose, mastipuupraakerite hulgas haridussõbralik õhkkond, mis motiveeris neid oma poegade akadeemilistesse õpingutesse investeerima. 18. sajandil oli eesti- ja lätisoost üliõpilaste arv küll väike, kuid pole võimatu, et tulevased uurijad võivad vanemate andmeteta nimede tagant leida nii mõnegi juurde. 18. sajandi lõpus ilmneb ka ülikoolide roll seisuslike ja etniliste vaheseinte lõhkujana, mille näiteks on Jenas õppivate päritolult vastaspooluste, lätlasest mastipuupraakeri poja Grindeli ning aadlisoost Wrangelli sügav sõprus. Tõsi küll, mõlemad olid oma päritolukeskkonna suhtes marginaalsed tegelased.

Baltimaad olid 17. sajandil saksa keeleala kaugemaid piirkondi üldse. Kui saksa riikide üliõpilaste koduülikool asus reeglina mitte kaugemal kui paari päevase voorimeheteekonna kaugusel, siis baltisakslastele tähendas see juba noorest peale harjumist igasuguste reisioludega. Kuigi Tartus ja Pärnus oli oma ülikool, ei võtnud baltisakslased seda rootsimeelset ja -keelset õppeasutust päris omaks. 18. sajandil, kui Eesti- ja Liivimaa muutusid Vene impeeriumi läänepoolseimateks kubermangudeks, siis oli märksa kaugemalt − Peterburist Lääne-Euroopasse sõitjaid. Seoses Peterburist algava postimaanteega kujunes sõit siis tunduvalt kiiremaks kui seni voorimehega sõites. Meritsi kulus reisile Tallinnast Travemünde sadamasse nädal, kuid tormi korral võis tormivarjus ootamine kesta mitu nädalat. Travemündest-Lüübeckist võis maitsi voorimehe- või postitõllaga sõites kuluda veel nädalapäevad või enamgi. Maismaateed mööda kulus üle Riia, Königsbergi ja Danzigi ülikoolilinna Berliini sõites umbes kuu. Ööbiti võõrastemajades ning linnades peatudes tutvuti vaatamisväärsuste ja isiksustega. Ohud võisid reisijaid tabada merel tormi näol, maanteel aga röövkallaletungide näol. Sõidukulutused olid nii maad- kui merdmööda sõites enam-vähem samas suurusjärgus.

Ülikoolide arv varasel uusajal kasvas pidevalt, seda eriti usulise lõhenemise tõttu. Iga maahärra püüdles oma ülikooli ja suuremates kuurvürstiriikides oli mitu ülikooli. Oli ju vaja oma riigi seadusi tundvaid õigusetundjaid ning kirikuteenistusse kohalikke olusid tundvaid vaimulikke. Tublide haritlaste saamise

instrumendiks olid stipendiumid. Nõnda oli ka baltisakslastel valida 17.–18. sajandil ligi poolesaja ülikooli vahel. Kuid reaalselt eelistati saata pojad kindlatesse ülikoolidesse. 16. sajandi teisel poolel ja 17. sajandi esimesel veerandil oli Eesti- ja Liivimaa noormeeste kõige olulisemaks õpingute kohaks Rostocki ülikool, millel oli hansaaegadest jätkuvalt omaenda ülikooli reputatsioon. Kuramaa jaoks oli kõige tähtsam Königsbergi ülikool, kuid Kolmekümneaastase sõja ajal, mil Kesk-Saksamaa oli sõjakeerises, kasvas seal väljastpoolt Preisimaad tulnud õppijate, sealhulgas eesti- ja liivimaalaste arv oluliselt. Kuramaa jaoks oli Königsbergi ülikool otsekui *Landesuniversität* kuni 18. sajandi teise pooleni. Tartu ülikool oli küll suurima kohalike üliõpilaste immatrikulatsioonide arvuga ülikool, kuid reaalselt õppis valdavalt rootsi üliõpilaskonnaga ülikoolis vähe kohalikke sakslasi. Paljud aadlikud ning Riia raeperekondadest pärit noormehed eelistasid Madalmaade ülikoole Leidenis ja Franekeris. 17. sajandi teisel poolel kosunud Kesk-Saksa ülikoolid Jenas, Leipzigis ja eriti Wittenbergis olid eelistatud ka Baltimaadest pärit üliõpilaste hulgas. Rostocki ülikooli atraktiivsus jäi endiseks, kuid talle hakkas tugevat konkurentsi pakkuma 1665. a rajatud Kieli ülikool. Uus 1694. a rajatud Preisi ülikool Halles kujunes kohe atraktiivseks kõikides valdkondades. Sedavõrd kui kasvas pietismi mõju, siirdusid Hallesse usuteadust õppima Liivimaa superintendent Fischeriga seotud ning Riia kuningliku lütseumi kasvandikud. 1690. a taasavatud Tartu Ülikool meelitas liivimaalasi seal kaheaastase õppimise kohustusega, et riigiteenistusse saada. Pärast katku ning Eesti- ja Liivimaa minekut vene võimu alla 1710 vähenes baltlaste arv ülikoolides järsult. Alles 1730. aastatest, kui katku surnud haritlaste asemele asunud uute sisserännanud ametimeeste pojad olid saanud ülikooliealiseks, kasvas taas Baltimailt pärit üliõpilaste arv. Eestimaalt pärit üliõpilaste hulgas oli atraktiivseimaks Halle ning liivimaalaste hulgas Jena ülikool. Nende suur külgetõmbejõud püsis kuni Seitsmeaastase sõjani. Selle sõja ajal oli väga suur baltlaste arv Königsbergi ülikoolis. Sealtpeale toimus ümbergrupeerumine.

Kahe ja poole aastasaja pikkusest perioodist eraldub murranguliselt ja jõuliselt 18. sajandi viimasel veerandil valgustusajastu kõigi selle võimalustega. Balti aadlikel oli tänu Vene viinamüügist saadavate sissetulekute järsule kasvule võimalus õppida parimates ülikoolides. Põhjalikult olid uuenenud ülikoolieelse hariduse võimalused, olgu selleks Tallinnas reorganiseeritud toomkool või Academia Petrina Miitavis. 1760. aastatest kasvas jõudsalt Göttingeni ning Leipzigi ülikoolide külgetõmbejõud, eriti aadlike silmis. Need ülikoolid andsid haritud liikmeid Balti-maade sotsiaalse püramiidi tipule.

Just Göttingenis õppinud aadlikest kujunes eesti ja läti talurahva pärisorjusest vabastamist taotleva liikumise liberaalne tiib. Jena ülikool, mis oli Seitsmeaastase sõja ajast kriisiseisundis, tõusis otsekui fööniks tulest 1770. aastate teisel poolel, kui seda hakkas kureerima J. W. Goethe ning professoriteks hakati kutsuma silmapaistvaid õpetlasi. Jena ülikool kujunes Saksa vaimueliidi ideid genereerivaks tugipunktiks. Just siis saatis Baltimaade keskkiht oma poegi Jenas-

se õppima niisama suurel hulgal kui rootsiaegses Tartu ülikoolis õppis üldse üliõpilasi. Jenas õppinud haritlased mõjutasid Baltimaade vaimuelu 1830. aastateni, mil 1802. a taasasutatud Tartu Ülikooli kasvandikud nad välja vahetasid. Baltimaade seisukohast oli aga otsustav Riia toomkooli rektori poja Justus Christian Loderi saamine anatoomia ja kirurgia professoriks.

18. sajandil tõsteti korduvalt üles ülikooli Liivimaale taasasutamise küsimus. Kui see soodsate asjaolude kokkulangemisel oleks sündinud, kas selle tegevus oleks olnud jätkusuutlik? Sellele saaks mitmel põhjusel vastata vaid eitavalt. Tartu rootsiaegse ülikooli üliõpilaskonna enamik olid rootslased, kuid sellegipoolest jäi see ülikool Euroopa üheks väiksemaks. 18. sajandil poleks kohalikule ülikoolile jätkunud üliõpilasi. Niihästi aadlikud, vaimulikud kui jõukam linnakodanikkond saatsid omad pojad nagunii parimatesse ülikoolidesse Hallesse, Jenasse, Göttingeni või Leipzigi. Kohaliku ülikooli üliõpilaste juurdekasvu sotsiaalne tagamaa oli sedavõrd kitsas, et õppejõududele poleks jätkunud piisavalt koormust. Eeldused oma ülikooli asutamiseks kujunesid alles pärast ülikooli tegelikku taasasutamist umbes 1810. a paiku, kui 1780. aastatel asehalduskorra ajal läbi viidud haldusreformi tulemusel tekkinud kreisikeskuste ametimeeste pojad olid saanud ülikooliealisteks ning Vene impeeriumiga liidetud Kuramaal harjuti Tartu ülikooliga.

Kuidas paistsid balti üliõpilased välja õpingutest osavõtu poolest?

Nende osakaal oli suur eriti Jena Loodusuurimusliku Seltsi või Vabade Meeste Seltsi liikmete hulgas. Sama võib öelda Göttingenis õppinud baltlaste kohta Schlözeri ajaloo-, poliitika- ja statistikaloengute kuulajate hulgas. Üllatav on baltisaksa üliõpilaste suur huvi Göttingeni füüsikaprofessori Georg Christoph Lichtenbergi poolt läbi viidud uusimate füüsikaavastuste demonstratsioonloengute vastu. Königsbergis oli I. Kanti ajal 1770. aastatel suhteliselt vähe kuraja liivimaalasi, kuid neist pea kõik kuulasid mingit Kanti loengut kas geograafiast, antropoloogiast või filosoofiast. Enneolematult paljud baltimaalased omandasid 18. sajandi teisel poolel Jena ja Göttingeni ülikoolides meditsiinidoktori kraadi.

Göttingenis oli tudengitel võimalik laenata raamatuid selle suurepärasest raamatukogust. Selles leidus uusimat teedrajavat kirjandust kõikidelt teadusaladelt, eriti inglise ja prantsuse keeles. 1770. aastatest kuni 1790. aastateni Göttingenis õppinud baltimaalastest umbes 40% kasutas ülikooli raamatukogu. Baltlaste hulgast kerkis esile terve rida väga suure lugemusega isiksusi. Suuresti tänu Göttingeni raamatukogu kasutamisele kujunes Justus Christian Loder silmapaistvaks Jena ülikooli meditsiiniprofessoriks, Heinrich Johann Jannau Liivimaa valgustuspublitsistiks ning vabahärra Balthasar von Campenhausen Vene kõrgeks riigiametnikuks.

Mõistagi oli kõikides ülikoolilinnades üliõpilastel võimalus tegelda vabaajaharrastustega, nii seltsielu ahvatluste kui kaunite kunstide nautimise või harrastamisega. Iseäranis rikkalikud võimalused aega veeta olid tudengitel valgus-

Auditoorium Leipzigi ülikooli õigusteaduskonna 1773. a valminud auditooriumihoones. Igal aastal oli loengukuulajate hulgas hulgaliselt baltisakslastest juuratudengeid.

Göttingeni ülikooli raamatukogu 1760. aastatel.

tusajastul. Baltimailt pärit üliõpilased olid aktiivsed nii seltsielus kui intellektuaalses vallas. Nad paistsid silma nii kaasmaalaskondliku organiseerituse kui

osalemise aktiivsusega kogu üliõpilaskonda haaravates ühendustes (vabamüürlaste loožides, eriti Leipzigis; üliõpilasordudes, eriti unitistide ordus; teaduslikes ning kirjanduslikes seltsides). Mitmel juhul olid baltisakslased nii mõnegi suurülikooli üliõpilaskonda haaravate massiürituste juhtideks (pärastine Mäetaguse mõisa pärushärra Eugen von Rosen Leipzigis 1782. a või Kullamaa pastori poeg Heinrich Joachim Dahl Jenas 1792. a). Kõikides ülikoolilinnades oli võimalik õppida nii joonistamist kui pillimängu. Üliõpilastele oli alati suursündmuseks kontsertide ja teatrietenduste külastamine, olgu siis ülikooli- või residentslinnas. Nii oli Jena üliõpilastele, sealhulgas baltlastele, alati suureks elamuseks ühised Weimari teatri külastused nädala lõpul. Üliõpilaste, sealhulgas baltlaste hulgast, kerkis esile kaunites kunstides andekaid isiksusi, kes asjaarmastajatena parnassile tõusid (kirjamehed J. M. R. Lenz, C. Ulrich Casimir Boehlendorff, Carl Petersen, Friedrich Bernhard Albers; kunstnikud Carl Gotthard Grass ja Johann Heinrich Schramm; näitleja Leopold Dietrich Probst).

Paljudel aadlisoost ja linnade raeperekondadesse kuuluvail üliõpilastel oli pärast ülikooliõpinguid võimalik teha üldarendav reis läbi Lääne-Euroopa riikide, mille käigus tutvuti kohalike isiksuste, kultuurimälestiste ja tavadega. Jõukate reisimeeste mentoritena osutus selline reis kättesaadavaks ka vaesematele andekatele üliõpilastele. Reisisihiks olid Madalmaad, Prantsusmaa, Itaalia ning eriti 18. sajandi teisel poolel ka Inglismaa ja Šveits. 18. sajandi lõpukümnendil, Prantsuse Revolutsiooni päevil sattusid nii mitmedki Balti üliõpilased olema suurte ajaloosündmuste tunnistajateks.

Baltimailt pärit üliõpilased olid saksa keeleruumi üks maksujõulisem üliõpilaskontingent: niihästi aadlikud kui vaimulike ja kaupmeeste pojad said endile üliõpilastena lubada suuremaid väljaminekuid kui kaasüliõpilased Saksa aladelt, sealhulgas kuulata rohkem huvipakkuvaid loenguid. Aastane ülikooliõpingute toimetulekupiir oli ülikooliti erinev. Baltimaalastel oli see märksa kõrgem kui kohalikel ühislauavõimalust nautivail õpingukaaslastel. Üldiselt oli see 150, Göttingenis ilmselt 200 taalrit. Normaalseks äraelamiseks kulus olenevalt ülikoolist umbes 200–400 taalrit. Baltisakslastest üliõpilasi, kelle hulgas oli aadlike osakaal palju suurem kui üliõpilaskonnas tervikuna (kuramaalaste hulgas kolmandik ning eesti- ja liivimaalaste hulgas neljandik), peeti kõige maksujõulisemateks üliõpilasteks. Vaesematest oludest noormeestele osutusid õpingukulud juba kohaliku gümnaasiumi kõrgematesse klassidesse jõudmiseks liiga kõrgeks. Aadlisoost üliõpilastele võimaldasid vanemate viinamüügist saadavad sissetulekud lahedat üliõpilaspõlve. Ka vaimulikel, kelle põhisissetulekuks polnud töötasu, vaid kirikumõisatest saadav tulu, oli võimalik poegi ülikoolis koolitada. Baltimail ületas paljude riigi, rüütelkondade või linnade teenistuses olevate isikute töötasu harva 500 taalrit, kuid kõrvalsissetulekud võimaldasid poegade õpingute toetamist.

Väga heldelt toetasid oma poegade akadeemilisi õpinguid kaupmehed, eriti Riia suurkaupmehed, kes olid perekondlikes sidemetes nii raeliikmete kui vai-

mulikega. Eelesitatu valguses näib, et Baltimailt pärit üliõpilaste elu ülikoolilinnas ei läinud isale sugugi liiga kalliks, see oli kindel investeering poja tulevikku, sest haritlased teenisid Baltimail väga hästi, igal juhul paremini kui ametivennad Saksamaal. Rõivad ja raamatud olid ülikoolilinnas palju odavamad kui Riias või Miitavis. Eri ülikoolides tehtud kulutuste võrdlemisel ilmneb, et ei saa jääda uskuma ei kaasaegsete ega neile toetuvate uurijate väidet, et Göttingeni ülikoolis õppimine oli palju kulukam kui Jenas või Halles. Suur osa kulutustest (loengutasu, keelte, tantsu, vehklemise jne õppimine, korteriüür) oli sama suur, küll aga kulus Göttingenis tunduvalt rohkem raha söögile, ratsutama õppimisele ning kõrgema seltskonna meelelahutustele. Samuti ei saa üheselt nõustuda üldtunnustatud väitega üliõpilaste elukalliduse kasvust 18. sajandil ligi kaks korda. Paljud kulutused, sealhulgas õppekulutused ja korteriüür oluliselt ei muutunud, küll aga kasvasid kulutused söögile, kuigi kohv, tee ja suhkur tõenäoliselt hoopis odavnesid. Vanemate silma alt mitmeks aastaks võõrsile iseseisva elu peibutavate valikutega silmitsi sattunud noormeestele jäid nii mõnigi kord koormaks hiigelvõlad või ülikoolilinna maha jäänud vallaslaste emadele saata tulevad alimendid.

Paljude võõrsil õppinud baltlaste õpingud lõppesid järsult 1798. aastal, mil Paul I kõik võõrsil õppivad vene alamad tagasi kutsus. Paul I poolt aetud Venemaa, sealhulgas selle Läänemere provintside kompleksne, ülejäänud Euroopa kultuuriruumist isoleerimise poliitika (tsensuur, sissesõidu- ja ametisse saamise piirangud välismaalastele, Vene alamate välismaale õppimamineku keeld) on võrreldav nõukogudeaegse suletusega, eriti stalinlikul perioodil. Sellise isolatsioonipoliitika tõttu kannatasid iseäranis Läänemere provintside akadeemilised kontaktid Saksa ülikoolidega, eriti tollal Saksa vaimuelu ühe keskuse, Jena ülikooliga. Aastail 1798–1801 söandasid vaid üksikud ülikoolidesse õppima jääda või sinna minna. Enamik sellel ajavahemikul ülikoolielaliseks saanuid jätkas õpinguid kas kohalikes õppeasutustes või mõne vastava ala asjatundja juures. Pikisilmi oodati kohaliku ülikooli avamist, olgu Tartus või Miitavis, ent siin ilmnes paradoksaalne, kuid Vene keskvõimudele nii iseloomulik tegevus: kui ühelt poolt viidi muust Euroopast isoleerimispoliitikat ellu äärmise pedantsuse ja karmusega, siis kohaliku ülikooli avamise ettevalmistused käisid otsekui aegluubis. Kui suur oli vajadus nii oma ülikooli asutamise kui piiride avamise järele, näitas kujukalt see, et pärast Aleksander I võimuletulekut 1801. a pääses Jena ülikooli minejate laviin otsekui paisu tagant valla. Nende hulgas oli ka neid, kel 1798. a olid õpingud pooleli jäänud. Alles Tartu ülikooli taasavamine 1802. a vähendas Saksamaale minekut vastavalt sellele, kuidas kohaliku ülikooli autoriteet järk-järgult kasvas.

Milline oli ülikoolides õppinud baltlaste konkurentsivõime tööturul, st kuivõrd suutsid nad võistelda sisserännanud koduõpetajatega vaimulikukohale kandideerimisel?

Baltimail ei tekkinud varasel uusajal ilmselt kunagi haritlaste üleproduktsiooni. Vajadus eriti teoloogilise ettevalmistusega haritlaste järele oli suurem, kui

neid ülikoolidesse õppima läks. Toimus ventiiliefekt: Saksa aladelt tuli Baltimaile suurel hulgal teoloogilise haridusega tööotsijaid, kuid vastupidine suund oli olematu. Küll aga said mitmed baltlased võõrsil ülikooliprofessoriteks ning koguni riigitegelasteks. Terve rida doktorikraadiga baltlasi sai Saksa linnadesse õpetatud meedikuteks.

KIRJANDUS

Achelis, T. O. (1966). Matrikel der schleswigschen Studenten 1517–1864. Bd. 1–3. Gads-Verlag, Kopenhagen.

Achelis, T. O. (1991). Matrikel der Schleswigschen Studenten 1517–1864 / Nachträge und Berichtigungen von Vello Helk. Gads-Verlag, Kopenhagen. (Familienkundliches Jahrbuch Schleswig-Holstein; Son-derh. 4).

Andrejev, A. J. (2005). Russkije studenty v nemetskih universitetah 18 – pervoi poloviny 19 veka. Znak, Moskva.

Balck, C. W. A. (1883). Mecklenburger auf auswärtigen Universitäten bis zur Mitte des 17. Jahrhunderts. Mecklenburgische Jahrbücher, 48, 54-88; 1884, 49, 73-144, 310-312; 1885, 50, 343-387. (Matrikelaus-züge).

Bots, H., Matthey, I., Meyer, M. (1979). Noordbrabantse Studenten 1550–1750. Stichting Zuidelijk Historisch Contact, Tilburg. (Bijdragen tot de geschiedenis van het Zuiden van Nederland; 44).

Giese, S. (2009). Studenten aus Mitternacht. Bildungsideal und peregrinatio academica des schwedischen Adels im Zeichen von Humanismus und Konfessionalisierung. Franz Steiner Verlag, Tübingen. (Contubernium. Tübinger Beiträge zur Universitäts- und Wissenschafts-geschichte; Band 68).

Helk,V. (1987). Dansk-norske studierejser fra reformationen til enevaelden 1536–1660 med en matrikel over studerende i udlandet. University Press, Odense. (Odense University Studies in History and Social Sciences; 101).

Helk, V. (1991). Dansk-norske Studierejser 1661–1813. Bd. 1. Odense University Press, Odense. (Odense University Studies in History and Social Sciences; 139.1).

Kenkel, H. (1981). Studenten aus Ost- und Westpreussen an ausserpreussischen Universitäten vor 1815 anhand der gedruckten Matrikeln. Hamburg. (Sonderschriften des Vereins für Familienforschung in Ost- und Westpreussen; 46).

Niléhn, L. (1983). Peregrinatio academica. Det svenska samhället och det utrikes studieresorna under 1600-talet. Gleerup, Lund. (Bibliotheca historica Lundensis; 54).

Nuorteva, J. (1997). Suomalaisten ulkomainen opinkäynti ennen Turun akatemian perustamista 1640. Suomen Kirkkohistoriallisen Seura, Helsinki. (Suomen Kirkkohistoriallisen Seuran toimituksia; 177).

Pawlak, M. (1988). Studia uniwersytetckie młodzieży z Prus Królewskich w XVI–XVIII w. Uniwersytet Mikolaja Kopernika, Toruń.

Szabó, M., Tonk, S. (1992). Erdélyiek egyetemjárása a korai újkorban 1521–1700. Jósef Attila Tudományegyetem, Szeged. (Fontes rerum scholasticarum; 4).

Tering, A. (2008). Eesti-, liivi- ja kuramaalased Euroopa ülikoolides 1561-1798. Eesti Ajalooarhiiv, Tartu.

Tering, A. (ilmumisel). Lexikon estländischer, livländischer und kurländischer Studenten an europäischen Universitäten 1561-1800. Böhlau Verlag, Köln, Wien, Weimar. (Quellen und Studien zur Baltischen Geschichte).

Ur nordisk kulturhistoria (1981). XVIII Nordiska historikermötet Jyväskylä 1981. Mötesrapport I, Universitetsbesöken i utlandet före 1660 / redigerad av Mauno Jokipii och Ilkka Nummela. Jyvaskylän Jyvaskylän Yliopisto, Jyväskylä. (Studia historica Jyvaeskylaeensia; 22, 1).

Zonta, C. (2000). Schlesier an italienischen Universitäten in der Frühen Neuzeit 1526-1740. Stuttgart.

RIIGI TEADUSPREEMIATE KOMISJONI KOOSSEIS

Kinnitatud Vabariigi Valitsuse korraldusega 4.09.2008 nr 385

ESIMEES

Richard Villems	akadeemik, Eesti Teaduste Akadeemia president

LIIKMED

Magnus Ilmjärv	Tallinna Ülikooli Ajaloo Instituudi direktor
Ülle Jaakma	Eesti Maaülikooli professor
Rein Küttner	akadeemik, Tallinna Tehnikaülikooli professor
Toomas Luman	Eesti Kaubandus-Tööstuskoja juhatuse esimees
Raul Malmstein	Finantsinspektsiooni juhatuse esimees
Enn Mellikov	akadeemik, Tallinna Tehnikaülikooli professor
Andres Metspalu	Tartu Ülikooli professor
Mart Mägi	Chalmersi Tehnikaülikooli (Rootsi) emeriitprofessor
Eve Oja	Tartu Ülikooli professor
Tiiu Paas	Tartu Ülikooli professor
Tiit Paaver	Eesti Maaülikooli professor
Jaan Ross	akadeemik, Eesti Muusika- ja Teatriakadeemia professor
Peeter Saari	akadeemik, Tartu Ülikooli professor
Mart Saarma	akadeemik, Helsingi Ülikooli Biotehnoloogia Instituudi direktor
Nigulas Samel	Tallinna Tehnikaülikooli professor
Margit Sutrop	Tartu Ülikooli professor
Raimund-Johannes Ubar	akadeemik, Tallinna Tehnikaülikooli professor
Raivo Uibo	akadeemik, Tartu Ülikooli professor

Märkus

Valitsuse poolt kinnitatud liikmetest ei osalenud komisjoni töös Eve Oja ja Tiiu Paas (olid preemiakandidaadid) ja osaliselt (elutöö preemia arutamisel ja otsustamisel) ka Margit Sutrop.