

# EESTI VABARIIGI TEADUSPREEMIAD

2014

TALLINN, 2014

Richard Villems (vastutav toimetaja)  
Riigi teaduspreemiate komisjoni esimees

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

Raamatu kujundamisel kasutati laureaate diplomi ja medali fotot  
ning kätteandmisel 24.02.2014 tehtud fotosid



Vasakult: peaminister Andrus Ansip, haridus- ja teadusminister Jaak Aaviksoo teaduspreemia laureaadi medali ja diplomi üleandmisel professor Ain Heinarule 2014. aastal Pärnu teatris

## SISUKORD

*Richard Villems*

Saateks ..... 6

*Ain Heinaru*

teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest ... 8

*Enn Tarvel*

teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest ..... 26

*Eve Oja*

teaduspreemia täppisteaduste alal uurimuste tsükli  
“Operaatorideaalid ja tensorskorrutised Banachi ruumide struktuuri-  
uuringutes” eest ..... 32

*Kaido Tammeveski*

teaduspreemia keemia ja molekulaarbioloogia alal uurimuste tsükli  
“Funktsionaalsed materjalid elektrokeemilisteks rakendusteks” eest .. 44

*Dmitri Vinnikov, Tanel Jalakas, Indrek Roasto*

teaduspreemia tehnikateaduste alal uurimuste tsükli  
“Uudsed alalispingemuundurid taastuenergeetikas” eest ..... 64

*Aleksandr Žarkovski*

teaduspreemia arstiteaduse alal uurimuste tsükli “Aju plastilisuse regulatsiooni molekulaarsed mehhanismid” eest AJU PLASTILISUSE REGULATSIOON NÄRVIRAKU ADHESIOONIMOLEKULI (NCAM) KAUDU .....	76
---	----

*Leho Tedersoo*

teaduspreemia geo- ja bioteaduste alal uurimuste tsükli “Seente elurikkuse ja biogeograafia globaalsed mustrid” eest MÕLGUTUSI SEENTE SALAPÄRAST JA TEADUSTÖÖST .....	86
---	----

*Krista Lõhmus, Iviķa Ostonen-Märtin*

teaduspreemia põllumajandusteaduste alal uurimuste tsükli “ Juurtoitumise strateegiad metsade jätkusuutlikkuse tagamisel muutuvates kliima- ja maakasutuse tingimustes” eest .....	96
--	----

*Ellu Saar*

teaduspreemia sotsiaalteaduste alal uurimuste tsükli “Hariduslik stratifikatsioon ja elukestev õpe” eest INSTITUTSIOONID JA OSALEMINE ELUKESTVAS ÕPPES .....	110
--	-----

*Andres Kaseķamp*

teaduspreemia humanitaarteaduste alal uurimuste tsükli “Balti riikide poliitiline areng” eest BALTI RIIKIDE IDENTITEET JA KOOSTÖÖ .....	126
Vabariigi teaduspreemiate komisjoni koosseis .....	134

## SAATEKS

*Richard Villems*

Kindlasti pole mitte just väike tõetera ütluses, et harjumus nüristab vaimu. Ju kehtib see ka teaduse ja selle hindamise puhul. Vahest siiski vähem kui paljudel teistel elualadel. Seda põhjusel, et teadus kui tegevusala on ju elukestev õpe *par excellence*. Viimasest, selle tähtsusest räägitakse ja kirjutatakse massiliselt, eriti nüüd. Ja mis on samas ise uurimisobjektiks – heitke kas või pilk sellesama kogumiku lehekülgedel *xx – yy* kirjutatule põhjusel, et üks selle aasta teaduspreemia läks professor Ellu Saarele, elukestva õppe silmapaistvale akadeemilisele uurijale.

Teadus ja uurimistöö on väga lähedased mõisted, enamuses kontekstides sünonüümid. Kuid kui sõna ÕPPIMINE võib mõnes kontekstis olla asendatud sõnaga TUUPIMINE, siis uurimistöö ja tuupimine on pigem vastandid selles semantilises ruumis, kus nad kokku puutuvad (ja lisaks: kaitsku meid taevas elukestvate tuupurite eest akadeemilises, eriti pedagoogilises keskkonnas). Samas on vaid alamosa uurimistööst määratletav teadusena. Siinkohal jääb viidata professor Tarveli lühikestele, kuid seda ilmekamale tekstile, mille läbivaks teemaks on poleemika küsimuses, kas ajalugu on teadus? Elutööpreemia laureaadiga, ammuigi neil veergudel, ei ole paslik vaielda. Kuid kompromissi võib pakkuda – ajalugu meie teaduspreemiate kontekstis on liik uurimistööd. Nagu ka teised distsipliinid, mille eest neid preemiaid jagatakse komisjonipoolse kollektiivse uurimistöö (kuid mitte teadustöö!) tulemusena.

Tavaliselt olen püüdnud omapoolsesse saatesõnasse lisada ka midagi subjektiivset teaduse hetkeseisust. Ja trükise olemust arvestades just positiivses võtmes. Et sinne on mu viimane saatesõna preemiate komisjoni esimehena, siis sedakorda pigem üldistava tagasivaatena kümnele aastale. Tervikuna üle valdkondade on otsuste langetamine muutunud aasta-aastalt keerulisemaks sel lihtsal põhjusel, et heade esildiste/kandidaatide arv on pidevalt kasvanud. See sundis meid kohanema (loodetavasti positiivses tähenduses).

Kui varemalt toimus põhitöö viimasel mammutistungil, mis tavaliselt kestis 6–8 tundi (esildised ise ja kirjalikud arvamused liikmetelt ja tellituna ekspertidelt olid muidugi varem välja jagatud), siis viimase perioodi töökorralduses sai oluliseks intensiivne, pigem informaalne, protokollivaba grupitöö lähedaste erialade esindajate vahel varakult enne lõppkoosolekut.

Paljuski põhjusel, et väljastpoolt tellitud ekspertarvamuste kasutegur otsuse langetamise tähenduses osutus märksa tagasihoidlikumaks kui oleks soovinud. Mitte et need oleksid olnud olulisel määral ebaprofessionaalsed või pealiskaudsed, vaid seetõttu, et liigagi sageli lõppesid nad trafaretselt: “... ja seega vastab esitatud töö igati teaduspreemiales esitatavatele nõuetele, ning väärrib ...”. Mis pole etteheide iga eraldi võetud esildise eksperthinnangu andjale – sageli oligi ju nii. Kuid komisjoni töö seisukohast, eriti kaugemate erialade esindajatele, on niisugustest hinnangutest vähe kasu siis, kui kõigi vastava liigi taotluste kohta laekunud arvamused resümeeruvad sama formuleeringu parafraseeringutena. Ma usun, et samas olukorras on alatasa ka mitmed teised komisjonid, k.a need, kes jagavad IUTE ja PUTe. Usutavasti viis selline grupitöö vähemasti selleni, et me tunnetasime selgemini, et ka meie ise oleme esmajoones (valdkondlikult komplekteeritud) eksperdid ja tellitud lisaekspertiis on just see, mida ta parajasti on, – täiendav aramus.

Summas: valdavalt tublide tööde osakaalu kasv, nende hindamine, pingerritta seadmine on märksa keerulisem kui parima valimine valdavalt keskpäraste hulgast. Kuid samas on see rõõmustav sõnum.

*Teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest*



*Ain Heinaru*



Sündinud 3.10.1943 Tallinnas

1962 Tallinna Ühisgümnaasium

1967 Tartu Ülikool, bioloogia, geneetika

1971 bioloogiakandidaat, Tartu Ülikool

1971–1990 Tartu Ülikooli teadur, assistent, vanemõpetaja, vanemteadur, dotsent; 1990–1995 molekulaar- ja rakubioloogia instituudi direktor, geneetika professor

1995–1998 Haridusministeeriumi teaduse ja kõrghariduse osakonna juhataja

1998–2002 TÜ bioloogia-geograafiateaduskonna dekaan; 2002–2007 teadusprorektor; alates 2008 molekulaar- ja rakubioloogia instituudi professor

2009– Kaitseväge Ühendatud Õppeasutuste teadus- ja arendusnõunik

1992 Eesti Vabariigi teaduspreemia bio- ja keskkonnateaduste alal (kollektiivi juht)

2003 TÜ väike medal

2004 Valgetähe IV klassi teenetemärk

2007 TÜ aumärk

2008 TÜ suur medal

2011 Tartu medal

2012 Eesti Bioloogiaõpetajate Ühingu auliige

2012 Eesti Inimgeneetika Seltsi elutööpreemia

Avaldanud üle 200 teaduspublikatsiooni, neist 42 artiklit *Web of Science* andmebaasis; 1 rahvusvaheline patentne leiutus

Õpikud ja õppevahendid:

Heinaru, A. Pärilikkus ja nukleiinhapped. TRÜ, Tartu, 1980, 104 lk.

Heinaru, A., Viikmaa, M. Geneetika ülesanded. TÜ Kirjastus, Tartu, 1992, 158 lk.

Heinaru, A. Geneetika. Õpik kõrgkoolidele. TÜ Kirjastus, Tartu, 2012, 1143 lk.

## KUST MINU GEENID TULEVAD?

Geneetiliselt on I astme sugulased vaid isa-ema ja õed-vennad. Minu puhul neist vaid esimesena nimetatud paar (vendasid/õdesid mul pole, on üks poolvend). Sündisin Tallinnas, kuid mu vanemad on pärit väljastpoolt Tallinna. Vanaisa Enn Heinaru (kuni 1934 Emil David Heimberg) oli Eesti ohvitser, leitnant (autasustatud II liigi 3. järgu Vabadusristiga ja Valgetähe III klassi teenetemärgiga), kes töötas ka Põllutöoministeeriumis maa-ameti peadirektorina. Tal oli abikaasa Eugenie Antonie Heimbergiga kuus poega (neist üks minu isa) ja üks tütar ning nende koduks oli Raplamaal Kelba mõis. Vene võimu saabudes ei nõustunud vanaema emigreeruma ja ta saadeti koos kolme pojaga Siberisse erinevatesse kohtadesse (Vorkuta, Krasnojarski krai). Vanaisa aga emigreerus koos kahe poja ja tütreaga algul Saksamaale, edasi Suurbritanniasse ja lõpuks USAsse. Minu isa Lembit Heinaru oli eelnevalt Saksa võimude poolt arreteeritud. Kuna isakodusse ei jäänud ühtegi sugulast, jäi ema Vaike Heinaru (snd Reialu) oma vanematekodusse Hagerisse (Põikmäe küla, Pärdimatsu), kus vanematel, kes olid põllupidajad ja kirikuteenistujad, oli suur keskmiktalu. Seal möödus ka minu koolieelne lapsepõlv, meenudes kirkaste mälupiltidena sõjajärgsest sissisõjast (kuulide vilin ja klõpsatused vastu reheluse maakivimüritist, mille taga peidus oldi), imelisest loodusest (kõrval Rabivere raba, karstialad ja maa-alused kevadjõed, paepealsed 'lilleaasad', palju metsaande, värske õhu lõhn ja lindude laul), naturaalmajanduses elamisest (ilma rahata ja küüditamishirmus, kaasavõtmiseks mõeldud kompsude otsas) ning sügavast tänutundest tädidele nende toidukorvi, elujaatuse ja ellujäämise nutikuse eest. Naabripoisiks oli tulevane bioloog ja TÜ rektor professor Jüri Kärner, kelle vanematekodu oli seal. Ema õppis sel ajal Tallinnas naiste rätsepa ametit ja töötas järgnevalt kogu elu kõrgema järgu moeateljeedes Tallinnas.

Kui aga geneetikule kohaselt oma sugupuus ajas tagasi minna, siis see on mul teada 17 sajandini. Isa-liinis oli esiisaks rootslane, kes Põhjasõja ajal jäi siinsele alale, abiellus hispaanlannaga (sulgudes märgitult portugallannaga, kui võrd Portugal oli tol ajal Hispaania osa). Emaliini pidi on geenid tulnud sakslastelt ja juutidelt. Tänapäeval on GENI vahendusel võimalik seda tegusat suguvõsa (kus on praegu dateeritud 1 739 sugulast, kellest 16 on elanud ligi 100-aastaseks) kõigil uurida. Siit aga mõnegi lugeja jaoks võimalik ebaseeldivgi fakt. Nimelt Põhjasõjale järgnenud ajal oli Eesti alal kriitiliselt vähe inimesi (alla 100 000). Seetõttu oleme me tänapäeval küll kõik samamoodi tublid eestlased, geneetiliselt aga ühelt poolt äärmiselt heterogeensed (ja seetõttu elujõulised), kuid teiselt poolt omavahel ikkagi suhteliselt lähisugulased, sest pärineme valdavalt ju väikesest arvust ühiseellastest, geneetiliselt juba mitte kaugemal kui keskeltläbi 7 põlvkonda. Näiteks teada olevatest tuntud inimestest on minu sugupuus mõne põlvkonna kauguses suguluses sellised tuntud isikud kui Georg Ots, Merle Karusoo, Madde Kalda, aga ka Kristjan Jaak (Christian Jakob) Peterson (Petersohn). See aga ei anna alust arvata, et tingi-

mata nende mõningad geenid võiksid olla ka minul. Kui kunstiga seotud geene võiksin endal tunnistada, siis muusikaga seotud olulisi geene mul kindlasti ei ole. Geneetiline otsesugulus ilmneb selgemalt lähtudes indeksisikust (e *proband*), antud juhul esiisast ja -emast mööda sugupuud vertikaalselt läbi põlvkondade kuni minuni. Horisontaalsed lahknemised põlvkondades panustavad palju vähem vertikaalliini geneetilisse sugulusse. Geneetikuna ei saa ma üle ega ümber veel ühest tõdemusest. Nimelt praeguse eestlaste geneetilise populatsiooni erisustest võrreldes nn esimese Eesti Vabariigi aegse eestlaste populatsiooniga. Need populatsioonid on ilmselgelt oluliste erisustega. Esimese Eesti Vabariigi ajal oli suure hulga eestlaste eluviisiks maaelu külades. Külakogukond oli tugev ja inimesed väga paiksed. Noorte inimeste nooruslik kihk ja oma abikaasa leidmise võimalus seostusid tavaliselt samas külas elava kaaslasega, äärmisel juhul naaberküla omaga. See tingis geneetiliselt sugulasabielude (seda sageli ise teadmata) rohkust ning sellest geneetilisest sisearetusest tulenevalt nn halbade geneetiliste tunnuste avaldumissageduse tõusu. Üldtuntud on ju ütlus, et igas külas oma loll. Sõda, küüditamised, emigreerumised ja kaasaegne maailm kui globaalne küla põhjustasid eestlaste hulgas tohutult suurema geneetilise heterogeensuse, mis on, paradoksaalselt, rahva elujõu seisukohalt hoopis väga hea.

Isa Lembit Heinaru oli minu sünnile eelneval ajal Eesti armees sõjaväelane, Saksa-ajal (minu sünni ajal) aga Saksa armee lennuväes ohvitser. Pärast minu sünni ei olnud ta nõus oma peret Eestis maha jätma, läks vastuollu Saksa võimudega ning 'maandus' Pärnu koonduslaagris, kus jäi teadmata kadunuks. Seega jäin isast ilma, kui olin alla-aastane ning mind kasvatas ema, niisiis olen ilmselt memmepoeg. Teisalt, see fakt isa repressiivsest saatusest võimaldas mul hiljem mitte ainult minna ülikooli õppima, vaid olla ka üldisemalt tegus toleaegses ühiskonnas. Loomulikult ei olnud mul oma isapoolsete sugulastega Nõukogude ajal mingit olulist kontakti. Siberist tulid vanaema ja kõik onud tagasi Eestisse, seda küll koos elukoha piirangutega, nagu paljude teiste tol ajal Siberist tagasitulnute puhul. See näitab ilmselt siiski meie perekonna vitaalsust ja elujõudu, sest paljud küüditatud sealseid elutingimusi (vase- ja söekaevandused, metsatööd, nälg) üle elada ei suutnud. Välismaal elavatest sugulastest nägin elusolevana vaid ühte onu (Ilmar Heinaru) koos tema perekonnaga, esmakordselt alles pärast 1992. aastat. Kokkuvõttes kõik see ülaltoodu kukkus välja teatud tüüpi inimkatsetena, kus võimude taotluslike eesmärkide vastaselt jäid ekstreemsetes tingimustes ellu hoopis geneetiliselt tugevamad ja leidlikumad ning haritumad isendid, mis geneetiliselt oli rahvuse edasisele arengule isegi kasulik, olles humaanses dimensioonis ilmselgelt muidugi inimsusvastane tegevus.

#### MAALAPSEST LINNAPOISIKS

Hariduse väärtust tunti ja tunnetati juba tol ajal. Ema otsustas koolimineku ajal ilma kahtlusteta minna minuga koos elama üürikorterisse Tallinna, õige-

mini Nõmmele, Näituse tänava kanti. Tol ajal oli Nõmme aedlinn imeline sümbioos looduse ja elumajade vahel, paljude männikute ja liivapaljandikega linna sees. Männikute all olid vaid vanad männiokkad ja liiv, ilma olulise alustaimestikuta. Mustamäe nõlvast mere poole oli liivane tühermaa, sõjajärgselt ammendamatu territoorium igasuguste padrunite, lõhkeaine ja muu huvitava leidmiseks. Unustamatu mälestus.

Seitsmeklassilise alghariduse sain praeguses Rahumäe Põhikoolis, mis on Tallinnas vanuselt kuues kool (104 a). Seal on õppinud mitu Eesti ühiskonnas olulist rolli mänginud inimest ning õpetajateks olid minu koolitee algul valdavalt Eesti Vabariigi ajast pärit pedagoogid (kui õieti mäletan, siis minu esimese klassijuhataja, soliidsed daami nimi oli Dampff). Ema käis tööl ja koolilaps oli kodus. Tänapäevases mõistes vanemate roll koolitükkide tegemisel ei saanud toimida. Loomulikult oli laps koolivälisel ajal ikka tänaval, koos teiste lastega. Klassis oivikuks see ei muutnud, kuid vähemalt neljaline tase tuli nagu iseenesest ja sellest ju piisas. Maalaps tuli ja ta pandi proovile, näiteks tuli hommikul lumega joosta paljajalu ümber maja. Arvan, et sain hakkama (ka mõne raske haiguse hinnaga) ja minust sai pigem tänaval tegutsevate laste grupiliider. Minu esimene pinginaaber oli naabripoiss Enn-Arno Sillari. Tuntumatest klassikaaslastest nimetaksin maletajat Andres Vooremäed, rallisõitjat Toomas Dienerit, keeleteadlast Mart Remmelit. Sporti sai tublisti harrastatud. Põhialaks oli jalgpall, talvel suusatamine. Lõpetasin paralleelselt kooliga spordikooli jalgpalli alal ja olin hiljem treener Uno Piiri juhendatavas Eesti jalgpallikoondises.

Üldjuhul läksid Nõmmel elavad lapsed Nõmme X Keskkooli. Mina koos mõne sõbraga läksin aga Tallinna XX Keskkooli (praegune Tallinna Ühisgümnaasium). Mäletan, et valiku põhjuseks (ka ema soovitusel) oli võõrkeel (Tallinnas saksa keel, Nõmme koolis inglise keel). Tegelikult andis Tallinna XX Keskkool klassikaaslaste kaudu palju enam seoseid kultuuriringkondadega. Näiteks oli minu klassikaaslasteks hilisem näitleja ja laulja Andres Ots. Põnevalt toimetas tol ajal teatri kontekstis Viive Ernesaks, märkimisväärsed olid Ants Taela juhendatavad tantsuringid koolis ja Tombi klubis. Pärast rasket autoõnnetust (jalgrattaga auto alla) kümnenda klassi eel (pealuus mõra ja kolm päeva meelemärkuseta) keelati aastaks jalgpall. Sellega lõppes minu tõenäoline professionaalse sportlase perspektiiv. Keskkooli lõpetamise järel olid minu dokumendid ette nähtud suunata TTÜsse. Sain konkursiga Ullo Toomi poolt juhendatavasse Eesti rahvatantsurühma, kus olid sama hullud treeningud kui jalgpallis. Juhused määravad enam otsustavaid muutusi elus, kui arvata võib. Igal juhul olen tagantjärele õnnelik, et nooruses väga palju sporti tegin (andis edasiseks piisava füüsilise), kuid samavõrd õnnelik, et minust elukutselist sportlast ei saanud.

Keskkooli ajal moodustas ema uue perekonna, abielludes 1960. a Kalju Artmaga, kes töötas Teatriühingus (tegi lavatehnika seadmeid), ning mulle sündis 1961. a poolvend Tiit Artma. Sisetunne ütles, et pean kuidagi iseseisvuma,

millest tulenes otsus minna ülikooli Tartusse. Keemia oli keskkoolis minu lemmikaine ja Hruštšovi-aegne kemiseerimine jättis oma jälje – ma andsin paberid sisse keemiasse. Esimene eksam oligi keemia ja mulle pandi hindeks '4', sest keemia ülesandes oli kopeerpaberi kvaliteedi tõttu sees viga ja ma lahendasin ettevalmistuslehel ülesande teisiti kui vaja. Tolleaegselt kergelt ülbust täis noor inimene leidis, et see ebaõiglus minu teadmiste hindamisel ei motiveeri mind enam keemiasse taotlema ja ma läksin solvununa samal päeval matemaatika-loodusteaduskonna dekaani Anatoli Mitti jutule sooviga õppida hoopis bioloogiat. Ta ütles, et tore, kuid sa pead tegema ka keemiasse sisseastumiseks ettenähtud eksamid. Nii juhtuski, et tegin nelja asemel kokku 5 eksamit (füüsika, keemia, matemaatika, saksa keel ja eesti keele kirjand) ja õppisin bioloogiks. Juhus, aga bioloogia õppimist pole ma kunagi kahetsenud, seda enam, et Tartusse tulles oli mu mõtetes niikuinii valik keemia ja bioloogia vahel. Bioloogia on elu ja kes ei tahaks end ja ümbritsevat loodust tunda, tunnetada ja seda mõista, või vähemalt püüda sellest aru saada.

Elus on ikka nii, et ka halbade asjadega kaasnevad sageli positiivsed kaasnähud. Minu autoõnnetus oli see, mis vabastas mind ülikoolis Nõukogude armeesse võtmisest ja sõjaväekogemust saamast. Veelgi enam – ma pole ka ülikoolis sõjalist saanud ja seetõttu olen siiani mitteväljaõppinud sõdur, rahuajal kõlbmatu ja sõjaajal kõlblik vaid mitteriviteenistusse. Tegelikult kaasnesid sõjaväest vabastusega mitu korda 'vastikud' meditsiinilised protseduurid, kus selgroost võeti välja üdi ja sealt viidi hapnik peajuu surve alla, et testida võimalike liideste olemasolu. Lisaks ei tohtinud selle protseduuri ajal ära minestada. Aga kes hakkama said, need said arstide austuse osaliseks, mis tähendas antud juhul nende soovitusel patsienti mitte sõjaväkke saata. Minu kursusele jäi mitmekümnest poisist peale minu järele halva silmanägemise tõttu vaid üks (hilisem geneetik Jaak Soom). Teistel kursusekaaslastel põhjustas sõjaväe aeg hiljem nii elulisi muutusi kui ka pöörded õpitavas erialas (näiteks Toomas Vint valis kunstniku ja kirjaniku elukutse, Henn ja Ustav Mikelsaarest said kirjanikud). Vähesed sõjaväkke läinud noormeestest jätkasid pärast sõjaväeteenistust õpinguid bioloogias. Ilmselt ununes sõjaväes palju koolis õpitust ja jätkata oli raske. Ühtlasi olid koolipoistest saanud täiskasvanud ja mehistanud noormehed, uute huvide ja väljakutsetega.

## ÜLIKOOL TEEB TARGAKS

Ülikoolis õppides nautisin esimesed kaks aastat noore inimese vaba elu. Kuski teisel kursusel pidime spetsialiseeruma kateedrite juurde. Olid põnevad ajad, nn Hruštšovi 'sula', mis viis maainimesed nõukogude korda kiitma (investeeringud ja raha maale), linnainimesed aga vabadust ihkavate grupeeringute tekkeni. Geneetikaga otseselt seostuv lõssenkism (elujal omandatud tunnuste pärandumine, nõukogude inimese loomine läbi vastava kasvatus) kui ametlik nõukogude ideoloogia hakkas kokku kukkuma, geneetikuid ei represseritud enam ja lõssenkism hakkas asenduma teadusliku geneetikaga,

mis oli küll veel 1960ndate algul ametlikult keelatud. Tartu Ülikoolis toimusid ühena esimestest Nõukogude Liidus kõnekoosolekud (üks markantsemad Vanemuise 46 ringauditooriumis), kus Eestis lõssenkismi viljelenud juhtivkohtadel olnud professorid ja akadeemikud kahetsesid pattu ja loobusid avalikult lõssenkismi ideoloogiast. Sellega kaasnes ideoloogiliselt represseeritud õppejõudude tagasivõtt tööle ülikooli professoriteks (näiteks professor Juhan Aul). Tolleaegset geneetika ja tsütoloogia kateedrit juhatas tulihingeline geneetika edendaja dotsent Ülo Pavel, kelle käe all oli kolm esimest geneetikatudengit: Tõnu Soidla, kellest sai hiljem Peterburgi ülikooli pärmigeneetika teadur ja õppejõud; Toomas Sutt, tulevane teadusfilosoof ja Tõnu Tamm – tulevane Leigo talu juht. Üllatav ja progressiivne on fakt, et nad eraldasid juba tol ajal nukleiinhappeid. Tegelikult kateedris eksperimentaalse geneetikaga tegelemiseks aparatuurseid võimalusi sisuliselt siiski polnud. Seetõttu saadeti mind praktikale nukleiinhappeid eraldama liblikõielistest bakteritest Harku Eksperimentaalbioloogia Instituuti Vello Tohver laborisse, kus eksperimentaalbioloogilised aparatuurid võimalused olid olemas, ja mitte sugugi halvad. Praktika ajal kohtasin seal hilisemat Eesti molekulaargeneetika 'isa', professor Artur Lindu. Tartus olid töövõimalused toleaeegses geneetika ja darvinismi kateedris ülimalt kesised, eelkõige üliõpilaste geneetika-alaste juhendajate nappuse tõttu. Seetõttu suunati mind arstiteaduskonna mikrobioloogia kateedrisse, mida juhatas professor Akivo Lenzner ja kelle tudengiks oli tol ajal hilisem professor Marika Mikelsaar. Minu juhendajaks sai dotsent Eugen Tallmeister, prantsuskeelse hariduse ja koduse keelega kõrgintelligent, kes oli töötanud ka sõjaväe mikrobioloogina.

#### TEADUS 1: MITMENE RAVIMIRESISTENTSUS SOOLEBAKTERITEL

Vaid paar aastat tagasi olid bakteritel avastatud kromosoomivälised geneetilised elemendid e plasmiidid, mis määravad mitmest ravimiresistentsust ja selle ülekannet ühtedelt bakteritelt teistele (ka patogeensetele). Järelikult bakterite mitmese ravimiresistentsusega plasmiidid muutsid neid kandvad bakterid resistentseteks samaaegselt mitme antibiootikumi suhtes. See oli ja on jätkuvalt tänapäevalgi ülimalt tähtis meditsiiniline probleem, millega tegelevad paljud suured teaduskollektiivid üle maailma. Üsna varsti jõuti tulemusteni, mille põhjal nende geneetiliste elementide kaasabil töötati välja nn võõra DNA ülekandeks sobivad väikesed plasmiidid e vektormolekulid, st geenide kloonimise meetodika koos võõr-DNA ülekandega.

Teaduses muutub juhendav õppejõud sageli sinu akadeemiliseks isaks või emaks ja see innustab. Juhendajat hakkab tudeng piiramatult austama ja armastama. Minu juhendaja dotsent Tallmeister andis mulle näiteks juba ühel esimestest kohtumistest kolm teadusartikli separaati ja ütles, et ma pean need läbi lugema ja sisu talle vastama. Probleem oli ainult selles, et artiklid olid inglise keeles ja mina olin õppinud kogu aeg saksa keelt. Ma sain sõnaraama-

tutega hakkama. Järgnevalt õppisin ma erialase inglise keele ära kirja pildi järgi, teadmata midagi hääldusest. Naljakas, kuid hiljem olen kuulnud, et see polegi väga haruldane (õppida võõrkeeli vaid kirja pildi järgi). See uudne ja ülihuvitav uurimisala, tolle aja kohta isegi vägagi head teadustöö tegemise aparatuursed võimalused ning teaduskollektiivi teaduslik ind ja tööharjumus stimuleerisid mind tõsisele tööle. Mäletan, et kui olin midagi juhuslikult valesti teinud (polnud lepitud kohtumisele tulnud, katses mikroobidega vigu teinud jms), siis õigustatud 'pragamise' asemel manas mu juhendaja endasse ja oma näkku sellise kurbuse, mis ärgitas ja õpetas igal juhul palju enam end parandama kui suvaline muu karistusoperatsioon. Kõik see stimuleeris.

Lõpetasin mulle koostatud 5,5 aastase eriprogrammi pool aastat varem ning astusin kohe samas kateedris kolmeaastasesse aspirantuuri. Nimetatud mitmes ravimiresistentsuse plasmide (e R faktoreid) uurisin nii inimese mittepatogeensetel, kuid eelkõige siiski patogeensetel soolebakteritel, mis põhjustasid kolienteriiti ja düsenteeriat. Kandidaadikraadi kaitsesin 1971. a teemal "R faktorid kolitsinogeensetel ja mittekolitsinogeensetel enterobakteritel". Aspirantuuri ajal oli mul juba ilmunud 12 teaduspublikatsiooni, neist 5 täisartiklit venekeelsetes N. Liidu keskajakirjades. Need artiklid olid käsitletavas valdkonnas Nõukogude Liidus pioneersed. Seega oli kogu kandidaaditöö materjal avaldatud.

Kirjutasin kandidaaditöö eesti keeles, riskides, et juba eelnevalt oponendiks soovitatud Moskva professor A. Kriviski mu tööd oponeerida ei võta. Mul ei lähe kunagi silme eest tema piiritult kurb pilk tõdemaks, et ta ei oska eesti keelt. Ma selgitasin, et seda polegi tal vaja teada, piisab ju ilmunud artiklitest ja kokkuvõtte on ka venekeelses autoreferaadis. Sain ta nõusse ja ta tuli Tartusse, kus kaitsmine toimus eesti keeles, kuid temale kui oponendile vastati vene keeles. Ei tea, mis iganes see eesti keeles kirjutamine tol ajal tähendas, kuid eks see minu sisemine protest ikka oli. Tasub siiski lisada, et need kuld- ja kuuekümnendad ja 1970ndate algusaastad olid erilised. Sel ajal toimus palju: tulised teadusvõitlused ja -väitlused ka geneetikas; mitmesugused legaalsed ja illegaalsed tudengiaktiivsuse väljendused (näiteks üks neist filosoofiahuviliste sõprusringkond koos Uku Masingu ja Toomas Sutiga, milles osalesin). Ega ma suud eriti kinni ei hoidnud ja tudengina kogu aeg ka nn heas nimekirjas ei olnud.

Noor inimene hakkab mingil õpinguetapil end tundma väga targana, tekivad arvamused ja tõekspidamised, mis ei pruugi muidugi ainuõiged olla. Siiski on selge, et iga uus põlvkond võrreldes eelmisega on informatsiooni hulgalst targem. Samas pole see vaimsete võimete kontekstis ilmselt nii. Me võime leida konsensuse tõdemuses, et inimene on targem kui bakter, kuid tõestada, et me oleme vaimselt võimekamad kui Aristoteles, on ülimalt raske, pigem võimatu. Evolutsioonilises skaalas pole inimene ilmselgelt sel ajal bioloogiliselt oluliselt evolutsioneerunud ja muutunud.

## RÄNNUGEEENID

Eks mul ikka mingid rännugeenid genoomis on. Viiel ülikooli- ja kolmel aspirantuuriaastal olin kõik suved tegev loomade viimise (saatjana) N. Liidu erinevatesse osadesse, teenides sellega raha, et edasi matkata järgneva kuu jooksul, valdavalt mägedes (Siber, Tjan-Šan, Kaukasus, Karpaadid jt) või Ukraina steppides. Alati toimus see koos kena 4–6 liikmelise reisiseltskonnaga, kellest lugejale on tuttavad sellised nimed nagu EKMI direktor Toomas Veidebaum, mitme botaanikaiaia direktor Heiki Tamm, karikaturist ja multiplikaator Priit Pärn. Kuidas saab unustada tänavajalatsitega mägisamatkamist 125 km Alma-Atast Issõk-Kuli järve äärde üle 4 200 m lumiste mägede või pulmareisi (1968. a) koos abikaasa Eeva Heinaruga Elbruse (5 665 m) otsa (seda küll juba tavaliste matkasaabastega). Lugesin kokku, minu tööd ja tegemised on viinud mind kokku 62 riiki. Rännugeenid on ilmselt ka minu nooremal tütre Maris Heinarul, kes on käinud 63 erinevas riigis ja valdavalt nendes, kus mina käinud pole. Välisreise on mul aga olnud väga palju rohkem. Ainuüksi kolm aastat tööd EV haridusministeeriumis teadusosakonna juhatajana ja 8 aastat Euroopa klassikaliste ülikoolide nõukogu liikmena ning TÜ teadusproktorina tingisid enam kui 250 väliskomandeeringut, lisaks mitmesugused teaduskoostööd ja konverentsid välisriikides. Ilma reisihuvita ilmselt nii ei toimuks. Tõsi, samade lennujaamade ooteaegade suhtes tekib küll negatiivne tingitud refleks, aga kuuga läheb see juba üle. Neis välismaa üritustes on vaja, tahes või tahtmata, end maksma panna, olles samas ka Eesti riigi esindajaks. Sellest kõigest on koorunud mul sügav veendumus, et eestlased põevad veidi alaväärsuskompleksi (me oleme väike rahvas!), kuid välismaalaste poolt vaadates oleme reeglina objektiivselt palju targemad kui nemad. See on meeldiv tõdemus, kuid seetõttu peavad välismaalased meid eestlasi sageli ülbeteks (mis ei pruugi vale olla!) ja kohati isegi veidi kardavad meid. Igal juhul loevad nad meid tänapäeval pigem konkurentideks kui abi vajavateks väikerahva esindajateks. Veelgi üllatavam on tõdemus, et paljude välismaalaste poolt vaadates on eestlased uskumatult heal elatustasemel, meid peetakse isegi rikasteks. Kõik see ei pruugi ju üksikjuhtudel õige olla ega olegi, kuid üks on selge – kui kritiseerida Eesti riiki, siis enne tasub käia vaatamas, mis muus maailmas toimub ja kuidas see toimib.

## ÕPETAJAKS SÜNNITAKSE, TEADLASEKS SAADAKSE

Ülikooli ajal oli mul kaks veendumust, mis hiljem mõlemad osutusid valeks. Esimene oli veendumus, et ülikool tahab minust teha universaalset lolli, sundides õppima aineid, mida ma enda jaoks ei pea vajalikuks (siit ka eriprogrammi saamise õnnestumine). Ma ei mõtle siin nn punaseid aineid, mida ei saanud ju mingil kombel kõrvaldada, kuid samas polnud neid vaja ka õppida, kuivõrd hinded pandi igal juhul, sest hinnet ei julgenud ka õppejõud panemata jätta. Tagantjärele pean tunnustama, et osa selliseid minu jaoks üleaaruseid loodusteaduslikke aineid polnud ilmselt pahad. Näiteks umbes viie telefoniraa-



matu mahu päheajamine (eksamid erinevate organismide süstemaatikast, eesti ja ladina keeles) polnud ajutreeningu ja üldintelligentsi tõstmise seisukohalt ju mitte pahad. Teine 'kiiks' oli, et mis iganes, kuid õpetajaks ma ei hakka. Nüüd olen olnud Tartu ülikoolis 100 semestrit õppejõud ja ei saa salata, see amet on mulle meeldinud ja meeldib edasi. Kuivõrd ma pole spetsiaalselt pedagoogikat õppinud, siis geneetikuna on mul eelis põhjendada seda nii, et mulle meeldib õpetajaamet, kuna mul esinevad vastavad geenid, st õpetajaks sünnitakse, mitte ei õpita. Muidugi poleks ilmselt ka mõningased pedagoogilised õpingud mööda selga alla jooksnud ja oleksid hõlbustanud mu tegevust (auditooriumi haldamine, igasugused demagoogilised võtted oma seisukohtade õpetatavateni viimiseks jms). Viimastel aastatel on aga õpetamise paradigma, vähemalt Tartu ülikooli kogemuste põhjal, totaalselt muutunud (õpetamine *versus* õppimine). Üliõpilased ei soovi, et õppejõud mängib edasi 'papa-goid', kes räägib sama, mis on mõne kliki kaugusel tudengi süles olevas arvutis. Tudeng soovib, et õpetatakse neid ise õppima. Ja see on sageli pagana raske, nõudes õppejõult väga palju enam nii teadmisi kui ka ettevalmistust õppetöö läbiviimisel. Üks on siiski selge, loengute pidamine on kunst, aga ka etendus, mis õnnestub tõeliselt vaid siis, kui loengu lõpus on auditooriumis kuulajate väljenduseks midagi enam kui viisakas aplaus (ka mõtteline).

Teadus on seevastu mõneti samasugune sõltuvus kui suitsetamine või narko-maania, ehkki suhteliselt lõhnatu ja vähem ohtlik. Eelkõige kehtib see nn avastusliku e eesliini teaduse kohta, kus püstitatakse hüpotees ning eksperimentaalsete katsetega tõestatakse hüpoteesi õigsus või lükatakse see ümber. Teine tüüp teadust on kirjeldamine, mis oma olemuselt on info kogumine, mis koondub eeljoonistatud tabelite lahtrite täitmiseks ja konstateerivateks järeldusteks. Teadus kui uue avastamine, üha sügavamale minek oma probleemis, muudab teadlase jaoks muu ümbritseva väärtushinnanguid, muudab teadustegevuse üliluslikuks ning muu sekundaarseks, sügavad erialased teadmised korvavad selle ego. Nii nagu naised pole üldiselt mitte kunagi nõus raha eest rohkem lapsi sünnitama, ei ole teadlasele (eriti noorele) väga oluline ei raha ega kena elamine. Osaks rikkast ühiskonnakihist saavad vaid väga vähesed teadlased ja seda ikka juba eakatenal! Vanasti nimetati teadlasi sageli egotsentrikuteks, ühiskonnast eristuvateks, kuid kindlasti samal ajal austustärata-vateks.

## TEADUS 2: BIODEGRADATSIOON MULLABAKTERITEL

Pärast kandidaadikraadi kaitsmist alustasin esmalt teadustööd elektronmikroskoopial alal arstide juures, aasta pärast aga maandusin tolleaegsesse geneetika ja darvinismi kateedrisse assistendiks (õppejõuks). Võrreldes arstide laboritega, kus ma olin ju 6–7 aastat töötanud tudengi, aspirandi ja teadurina, oli siin totaalne vaestemaja. Mulle anti vaid üks suur ja kena kirjutuslaud suure ahju taha, mis asus TÜ Botaanikaaias ümberehitatud kunagises hobuste pidamise ja hilisemas kasvuhoone majas. Välismaale minna ei saanud ja reaalsed

väliskontaktide võimalused olid rohkem kui nigelad. Kuid tol ajal oli siiski võimalik kontakteeruda välisteadlastega, saates nendele teadusartiklite separaatide saamise soove. Seda tegin ma massiliselt ja selge see, tulemuseks oli informatsiooni mõttes teadustaseme oluline tõus ning seda teaduse esirinnas, uutel aladel. Kui aga eksperimentaalset teadust sisuliselt teha ei saanud ja õppetöö ettevalmistamiseks ka väga palju aega ei läinud (bioloogidele geneetika ja arstidele üldbioloogia geneetika aluste kursused) ning lapsed peres võtsid võimaluse jätkata mägedes rändamist, siis sel perioodil sain realiseerida veidi oma tolleaegset hobi – võistlusbridži. See ala oli tol ajal ka pooleldi põrandaalune, Tartus initsieeritud Leo Võhandu ja Ülo Kaasiku poolt. Viimasega mängisin küllalt kaua ka ühes meeskonnas. Õpikuid selles vallas levitati põranda all, tõlgiti inglise keelest ning koopiaid paljundati trükimasinal läbi kopeerpaberi. Trükkimine sai selgeks ja ajutreening oli asjakohane. Ometi polnud siin teadusega ju midagi pistmist.

N. Liidu ajal ülikoolist välismaale aastaks teaduse alal täiendama minek sai toimuda vaid üleliidulise konkursi kaudu, kus, tõsi, Eesti NSV tarvis olid ette nähtud kõigi teadusalade peale sageli vaid 1 koht. Küllalt lootusetu situatsioon, kuid kui ei proovi, siis ei saa. Ei tea, kas osalus N Liidu teaduskonverentsidel, stažeerimine pool aastat Moskva ülikoolis, aktiivsus teaduskonna tasandil (õppeprodekaan) ja ilmselt veel palju muud või kõik need kokku, kuid mul õnnestus konkursid ja õppused (välismaale saadetavatel olid sellised laagrid, kus kandidaate töödeldi loengutega ja keeleõppega) ilmselt edukalt läbida ning tulemuseks saada aastatel 1976–1977 stažeerima Edinburghi ülikooli (GB, Šotimaa) molekulaargeneetika alale tolle aja maailma ühte juhtivasse molekulaargeneetika laborisse, mida juhtis professor Paul Broda. Teadusteema oli uus, hiljuti avastatud plasmiidid mullabakteritel, mis määrasid bakteritel võimet üle kanda kataboolseid geene ning lagundada keskkonnoohtlike aineid, näiteks selliseid süsivesinikke nagu toluuataate, salitsüülhapet, naftaleeni, kampriit ja alkaane (õlised). Neid plasmide nimetatakse biodegradatsiooniplasmiidideks. Arusaadavalt on sellistel geneetilistel elementidel ja neid kandvatel bakteritel oluline roll keskkonnas reoainete kõrvaldamisel.

Tol perioodil avaldatud tööd olid ühed esimestest maailmas biodegradatsiooniplasmiidide molekulaargeneetilisest iseloomustamisest. Pole kahtlust, et see periood oli minu teadlaseks saamiseks üks tähtsamaid. Peab tõdema, et teadlaskarjäärile mõjus negatiivselt uue katse ebaõnnestumine aastasele jätkustažeerimisele minekuks Šveitsi professori K. Timmise laborisse. Algul kõik õnnestus, sain Moskvast selleks raha ja suunamise, kuid lennukile minekul anti mulle küll lennupilet kuid teatati, et nad otsustasid mulle elamis- ja tööraha mitte anda, esitamata mingisuguseid põhjendusi. Nii mu välissõidud lõppesid ja esimene võimalus oli sotsriiki sõit vist alles ca 7 aasta pärast. Mul pole alust arvata, et pidurdus oleks olnud seotud millegi muuga kui Eesti tolleaegsete tegelaste otsusega (nimeliselt ma neid inimesi ei tea, aga küllap nad ise seda teavad ja mäletavad, kui nad veel muidugi elus on). Jah, lennukist

mahavõtmine polnud meeldiv, kuid elu läks edasi ja perekonnast lahusolek poleks olnud niikuinii lihtne, sest perekonda oli sündinud kaks tütart, Piret (1970) ja Maris (1979).

414

Ülikooli keemiahoone (tol ajal Jacobi 2) neljandal korrusel oli ruum 414, kuhu tolle aja üks silmapaistvamaid molekulaarbiolooge, professor Artur Lind kogus kokku teadusele andunud noori keemikuid, arste, biolooge ja teiste erialade tudengeid. Sel ajal oligi kogu Eesti molekulaarbioloogia selles ühes ruumis, millest kasvas järgnevalt välja aga kogu tänapäeva eesti molekulaarbioloogia ja -geneetika. Andumus teadusele põhjustas laboris elamise eluviisi tekke, kus vahet polnud ööl ja päeval. Lisaks teadusele toimis samal ajal ka noorte elu, moodustusid perekonnad, sündisid lapsed. Teadustegevus aga ei katkenud. Sealt kasvasid välja kümned praegused Eesti akadeemikud ja professorid. Pärast Inglismaad oli ka minul võimalik maanduda sellesse seltskonda. Kuivõrd ma olin enam seotud tudengite õpetamisega, siis oli selge, et molekulaarbioloogia arendamiseks oli vaja pidevalt noori tudengeid, hakata neid ette valmistama oma õppekava alusel. Vaatamata paljudele pingutustele, see möödunud sajandi 80ndatel ei õnnestunud. Seda blokeerisid sõbrad oma teaduskonnast, põhjendades, et pole õige, et üks eriala muutub teaduskonnas liialt tugevaks.

### TEADUS 3: RAKENDUSUURINGUD

Välismaal alustatud teema biodegradatiivsete bakterite geneetiliste elementide uurimisel jätkus mul ka siin Eestis, ehkki tol ajal polnud isegi mitte ruumis 414 piisavalt aparatuuri ja kemikaale molekulaargeneetiliste katsete jätkamiseks. See-est võimaldas bakterite biodegradatsioonitemaatika teha mahukaid rakenduslikke uurimisprojekte, millest tähtsamad olid järgmised:

- bakterite biomassi kasutamine “Estonia” kaevanduse maa-aluse (60 m sügavusel) tulekahju tagajärjel moodustunud fenoolse vee fenoolide kõrvaldamisel enne selle reovee suundumist Peipsi järve (mis oleks hävitanud selle elustiku);
- Põlva liimpuidutsehhi fenoolirikka liimvee detoksifikatsioon enne puhastusseadmesse suunamist;
- uuetüübiliste silojuuretiste väljatöötamine ja kasutuselevõtt Põlva Biotehnoloogiakeskuses, millest kasvas välja senini tegutsev firma “Starter”;
- taimede kasvu stimuleerivate bakterite kasutamine saagikuse tõstmisel (laiaulatuslikud põldkatsed).

Nende teadustööde ja rakendusprojektide alusel omistati minu juhitavale kollektiivile Eesti teaduspreemia. Samal ajal sai tegutsetud N. Liidu tasandil, kus meie teadusrenomee tõusis päris heale tasemele, eriti arvestades molekulaar-

bioloogia ja -geneetika seost tekkivate biotehnoloogiliste rakendustega. Teadussaavutusena väärrib märkimist minu toleaeegse tudengi Maia Kivisaare (praegu TÜ MRI professor) võistlustöö fenooli lagundavast biodegradatsiooniplasmiidist, mis sai üleliidulisel konkursil I koha (analoogset auhinda tolle aja Eestis ei meenugi). Teostasin päris suuri lepingulisi uurimistöid erinevaid keemilisi ühendeid lagundavate bakterite geneetiliste elementide uurimisel Moskva alluvuses olevatele instituutidele. Nimetan üleliidulist Geneetika Instituuti, NSVL Teaduste Akadeemia instituute Puštšinos (Oka jõel) ja sõjameestega seotud instituute Protvino's (viimastesse mind eriti sisse ei lastud). Tavaliselt ülenädalased aruanded teadustulemustest Moskvast võimaldasid tagasitulekul kaasa tuua hulgaliselt igasuguseid välismaa kemikaale, mis kulusid 'marjaks' ära teadustöö tegemisel Tartus.

N. Liidu toleaeegsed ambitsioonid põhjustasid üleriigiliselt kolme biokeskuse loomise, nende sisustamise kõige kaasaegsema teadusaparatuuriga. Tartu sai ühena neist Eesti Teaduste Akadeemia juures asuva Eesti Biokeskuse (direktor Richard Villems). Selle keskuse loomisel me deklareerisime ametlikult, et sõjalise sisuga uurimistega me ei tegele, ja nii oligi. Eesti Biokeskust ei saanud tol ajal luua TRÜ juurde, sest N. Liidus oli teadus ülikoolidest lahutatud ning suuremahuline ja aparatuurne teadus sai toimuda vaid Teaduste Akadeemiates alluvuses. Üalnimetatud kümnendi lõpuks oli enamus 414-nda ruumi algasukaid stažeerinud välismaal, kohale oli saabunud fantastilise tasemega kõige uuem teadusaparatuur. Mis muud, kui teha tööd, kuid puudu oli kaks asja: aparate polnud kuhugi üles panna, sest polnud ruume ning noori tudengeid ei jätkunud. Maja ehitamiseks oli projekt ja raha tegelikult olemas, kuid N. Liit sai enne otsa ja seda raha meil kasutada ei õnnestunud ning nimetatud uuest majast jäime me ilma.

## ÕUNAUSSID

Olgu õun kui tahes ilus ja punane, temas võivad alati olla õunaussid. Mõõdunud sajandi 80ndad olid ajalehtede järgi ilusad ajad, kus karjabrigadir Anette oli Ameerikast jõudnud ette. Tegelik nõukogude aeg oli muidugi erinev. Selleks, et saada võimalus minna välismaale stažeerima, andsin ma lubaduse, et tagasi tulles astun parteisse. Tegelikuses venis see vastuvõtt mulle teadmata põhjustel mitu aastat, kuid partei liikmeks saamine oli tol ajal absoluutseks vajaduseks ka näiteks suvaliseks kateedrijuhatajaks määramisel, antud juhul siis aktiivsusega molekulaargeneetika kateedri loomise vajadusi arvestades. Me võime neid mitteideoloogilisi parteilasi nimetada ka karjeristideks (karjääri tegijateks). Sõjaaegsest perioodist enam, kuid noorematest ülimalt üksikud parteisse astujad olid nn kommunistmigeenidega, ideoloogiliselt muutumatud, sündinult geenidega kommunistid. Tolle aja noorem põlvkond käsitles komparteis olemist kui võimalust midagi ära teha, eriti Eesti kontekstis. Vähemalt üheksa kümnest olid õunaussideks ja arvan, et see oli tol ajal aktsepteeritav ja õige tegevus, milleta laiemas kontekstis Eesti iseseis-

vumine poleks vast nii läinud, kuidas ta läks. Mõnede hüüdlauseid panna kõik kunagised parteilased ahju näitab selliste inimeste vaimset piiratust ja odavat demagoogia ja populaarsuse tagaajamist. Nii või teisiti, ma olin siiski üks esimesi ülikoolis, kes ise oma avalduse alusel lahkus komparteist.

## MRI

Möödunud sajandi 90ndad tõid meile tagasi Tartu ülikooli, mis oli vaja muuta ja ümber korraldada teaduspõhiseks rahvusvaheliseks kõrgharidusega rahvusülikooliks. Rektor professor Jüri Kärneri ja EBK direktori akadeemik Richard Villemsi toetusel initsieerisime uuetüübilise õppe-teadusinstituudi, TÜ Molekulaar- ja Rakubioloogia Instituudi, projekti. Projekti põhiseisukohad olid: õpetamisel osalevad ühteviisi õppejõududega ka teadustöötajad, sest mõlematele kehtivad samad teaduse kvaliteedinäitajad; kõik akadeemilised kohad on konkursipõhiselt valitavad; instituudi koosseisu tuleb koondada Eestis ja parajasti välismaal olevatest inimestest kõige parema teadustasemega töötajad; luua tuleb õppetoolid ja uued õppekavad üliõpilaste teaduspõhiseks ettevalmistamiseks, samuti kraadiõpe. TÜMRI esimeste professoritena töötasid paljud Eesti teaduse võtmefiguurid, näiteks akadeemikud Richard Villems, Mart Saarma, Mart Ustav, Andres Metspalu.

Endise sõjalise kateedri asukohta sai kapitaalselt renoveeritud Riia 23 hoone, mis hilisematel aastatel on kompleksis Eesti Biokeskuse ja Eesti Geenivaramuga laienenud terveks hoonete kompleksiks, seda nii Euroopa struktuurifondi kui ka erafondide (*Citrina Foundation*, UK) ja eraisikute rahastamisega. Lisaks bioloogia õppekavale käivitati geenitehnoloogia õppekava ja toimiv doktoriõpe (PhD). Instituudist on välja kasvanud TÜ Tehnoloogiainstituut, TÜ Eesti Geenivaramu, TTÜ geenitehnoloogia osakond, mitukümmend edukat biotehnoloogiafirmat. TÜMRI lõpetajaid on arvukalt teistes ülikooli teaduskondades ja teadusparkides. Seda pole vähe.

Isiklikus plaanis realiseerisin sel perioodil veel oma uut hobi, ehitada Elva lähedale ise oma maja, seda nädalalõppudel ja suvevaheaegadel. See tegevus andis õppejõu lõtvadele lihastele lisatoonust. Seepärast soovitan kõigil viljeleda sellist hobi, muidugi kui inimesel selleks piisavalt käelisi oskuseid jagub.

## KLERK

Teadus- ja õppetegevus ei päädi vaid vaikselt laboritöö, publitseerimise ja konverentsil käimisega, vähemalt mitte kõigi teadlaste puhul. Lisaks pidevale rahastamise taotluste kirjutamisele peavad teadlased ise seisma selle eest, et teadussüsteem ja selle finantseerimine oleksid piisavalt kvaliteedipõhised ja jätkusuutlikud. See töö eeldab aga sageli tegutsemist, vähemalt mingitel ajavahemikel, administratiivsetel ametikohtadel, ülikoolis ja ministeeriumis ning valitavatel kohtadel välismaal. Noore Eesti riigi ülesehitamisel möödunud sajandi viimasel kümnendil oli selline tegevus lausa möödapääsmatu. Teadlase ja õppejõu jaoks on need karmid otsused, sest intensiivse administratiivse

koormusega töökohtadel väga intensiivset teadus- ja õppetööd teha ei saa. Töötasin kolm aastat akadeemik Jaak Aaviksoo initsiatiivil Eesti Haridusministeeriumis kõrghariduse osakonna juhatajana, kus minu esmaülesandeks oli siduda Eestis teadusasutused ülikoolidega, ühildada ja pidada läbirääkimisi nii diplomite vastastikuse tunnustamise kui ka ELga lõimimise osas, töötada välja kvaliteedipõhine teaduse sihtotstarbeline finantseerimine. Inimesed, kes arvavad, et ministeeriumi ametnikud on 'muidusööjad', pole ise ministeeriumides töötanud. Ametniku (klerki) elu on üks raskemaid, selle ametiga kaasneb pidev kriitika talumine.

Ometi arvan, et ülalnimetatu oli minu õige otsus ning kasulik eesti teaduse arengule. Ei saa eitada, et kogutud teadmised, kontaktid ja arendused mõjusid positiivselt minu edasistele tegemistele ja kaudselt geneetika arengule. Selle kaudseks väljenduseks on Eesti geneetika tänapäevane rahvusvaheline tase-mevõrdluse tase, aga ka mahuosa kasv Eesti teadusmaastikul ning ettevõtluses.

#### TEADUS 4: KOHTLA-JÄRVE TUHAMÄED

Kui teaduslabor on õieti komplekteeritud, siis ta töötab mõneti 'automaatjuhtimisel ja -režiimil', vähemalt mõningad aastad. See võimaldab teadusteamade vastutaval juhil olla veidi eemal igapäevasest laboritegutsemisest. Minu teadustöö teema biodegradatsiooniplasmiidide molekulaargeneetilisel uurimisel ning Kohtla-Järve tuhamägede fenoolse heitvee reostustaseme kõrvaldamisel bioaugmentatsioonikatsetes (bakteriaalse biomassi manustamisel looduskeskkonda) täitmine TÜ Bioloogia-geograafiateaduskonna dekaanina ja TÜ teadusprorektorina oli võimalik tänu minu labori inimeste tublidusele. Labori teadustöö toimus nimetatud teadusvaldkonnas igati rahvusvahelisel tasemel, mida iseloomustas rahvusvaheliste teaduskonverentside organiseerimine, esinemised juhtivatel rahvusvahelistel teaduskonverentsidel, artiklite avaldamine juhtivates erialastes ajakirjades ning arvukate üliõpilastööde kaitsmised.

Selle perioodi teadustöö võimaldas selgitada olulise hulga uut teaduslikku materjali, mida saab kokku võtta alljärgnevate põhitulemustena:

- Selgitasime Kohtla-Järve tuhamägedest väljaleostuva fenoolse reostuse loodusliku biodegradatsioonivõime 85%-lise taseme teekonnal läbi Purtse jõe Balti merre. Näitasime fenoolsete ühendite lagundamise kolme erinevat põhitüüpi nimetatud ökosüsteemist isoleeritud bakteritüvedel ning iseloomustasime vastavate mikroobitüüpide esindajate biodegradatsioonivõime molekulaargeneetilised tagamaad.
- Leidsime tehnoloogiad, kuidas Kohtla-Järve tuhamägedest väljaleostuvast fenoolsest reoveest reoained kõrvaldada, nimelt sellega, et lokaalse reostustaseme alandamisel oli võimalik aheraine mäed katta teatud taimedega, muuta reostusaine säilitatavaks 'maavaraks', kust

reained välja ei leostu. Tegelikult seda tehnoloogiat meil aga laiamastaapselt kahjuks juurutada ei õnnestunud, eelkõige lähtuvalt EL direktiivsetest suunistest.

- Mudelkatsetes (nn mikrokosmid), imiteerides laboris looduslikke tingimusi, õnnestus meil kokku panna loodusest eraldatud mikroobidest segakultuurid, mis osutusid äärmiselt efektiivseteks fenoolsete ühendite kõrvaldajateks. Nimetatud kultuurid on kasutatavad biomassina fenoolse reostusega seonduvate loodusõnnetuste korral.
- Näitasime, et segasubstraatide tingimustes (mis on looduses ju tavalukord) toimub erinevate reoainete järk-järguline kõrvaldamine, millega saavutatakse toksiliste vaheühendite kuhjumise vältimine ja mikroobipopulatsioonis mikroobide üldarvukuse tasakaal ka erinevate liikide osaproportsioonide muutustel konkreetsetel ajamomentidel.
- Lisaks nimetatud keskkonna biotehnoloogilisele uurimissuunale jätkasime biodegradatsiooniplasmiidide molekulaargeneetilist uurimist. Sel perioodil olime me maailmas esimesed näiteks herbitsiidi 2,4-D (2,4-dikloorfenoksüädikhape) lagundava biodegradatsiooniplasmiidi (seda kandev bakteritüvi isoleeriti Eestist) täielikul nukleotiidsel järjestusel määratlemisel. Herbitsiid 2,4-D lagundamine on näide bakterite looduslikust evolutsioonist, sest 2,4-D on ksenobiootik, sünteetiline keemiline aine, mida looduses ei esine. Põhjuseks on selektiivne surve, kuivõrd nimetatud herbitsiidi kasutati Eestis varasematel aastatel laialdaselt.

Selle teadusteema tulemuslikkust näitab fakt, et kaitsti edukalt üle kümne teaduskraadi ning valmistati ette hulgaliselt molekulaargeneetikuid ja geenitehnolooge, kes töötavad praegu teadurite ja juhtivate õppejõududena Eestis või välismaa laborites või kes on loonud oma biotehnoloogiafirmasid ning juurutavad rakendusuringute tulemusi edukalt praktikasse. Äri tegemine ülikooli pindadel ja ülikooli inimeste poolt on alati seotud riskiga, sest eraraha eristamine avalikust rahast polegi nii lihtne (näiteks aparatuuri kasutamisel). Seejärel saab ülikooli õppejõud ja teadlane teha eraäri ikkagi täiesti lahusalt ülikooli põhitegevusest, kuid see määrab ka ajalised limiidid ja prioriteetide seadmise vajaduse. Mida mastaapsem on äriprojekt, seda raskem on seda edukalt lõpuni viia. Minu selle perioodi rakenduslik äri suunatud tegevus oli seotud biolagundava plastmassi tootmistehnoloogia väljatöötamisega spetsiifilise piimhappebakteri tüve baasil. Nimetatud tehnoloogia patenteeriti edukalt ligi paarikümnes riigis ja patendipiirkonnas ning oli ka teatud ajaperioodil äri- liselt ülimalt perspektiivne. Ometi pole see projekt siiani veel oma lõpprealisatsiooni saavutanud, ehkki nimetatud temaatika aktuaalsus ei kao kuhugi ning projekti realiseerimine tulevikus võib tulla uuesti päevakorda. Seoses tuhamägede projektiga on meil olemas patenteerimisküpsed bakteritüved, nende konsortsiumid ja tehnoloogia, kuid kuivõrd patentide hoidmine nõuab rahalisi lisakulutusi, siis ootavad nad aega kui äris olevad inimesed otsustavad tõstatada vastavaid projekte.

## TEADUS 5: LÄÄNEMERI

Pärast teadusprorektori töö lõppemist initsieerisime uue teadussuuna, Läänemere mikrobikoosluste uurimise. Tavaliselt teaduslaborid ei muuda oma teadussuundi väga sageli, sest lihtsam on olla edasi oma ülikitsas valdkonnas. Teada on aga ka see, et iga teadusteema ammendab end 7–10 aasta jooksul. Minu teadlaskarjääri jooksul oli siinnimetatu viiendaks uurimissuuna muutuks. Loomulikult on eeldatav õnnestumine alati seotud teatud riskidega, sest uus on alati mingil määral tundmatu maailm. Tagantjärele saab tõdeda, et see 6–7 aastat toimunud projekt osutus samuti edukaks ja kõik uue teemaatikaga seotud eesmärgid täideti. Põhitulemused on kokku võetavad järgmiselt:

- Meil õnnestus selgitada, et Läänemeres on maismaalt mageveekogude valgalalt merre suubuvate vete mikrobikooslustel väga suur osa mere bakteriplanktoni formeerumisel ja funktsioneerimisel. Paljud meres leiduvad biodegradatsioonivõimega bakteriliigid on hoopis maismaale iseloomulikud liigid.
- Läänemere biodegradatsioonivõimeline bakteripopulatsioon osutus tohutult heterogeensemaks kui arvata võis. Nimelt isegi erinevat tüüpi õlide lagundamisel selekteeritakse välja erinevad bakteripopulatsioonid. See näitab, et tegelikkuses on Läänemeri valmis lagundama kõige erinevamaid õlireostusi.
- Samuti selgus, et biodegradatsiooniplasmiidide horisontaalne geeniülekanne looduses on seni arvatust palju ulatuslikum ning nimetatud plasmiidid on võimelised looduses aastaid säilima ja levima, isegi kui nende peremehed muutuvad. Seda näitasime meie poolt aastaid tagasi loodusesse viidud mikroobide biodegradatsiooniplasmiidide alusel, samuti uuisolaatide biodegradatsiooniplasmiidide sekveneerimisel ja geenide võrdleval analüüsil.
- Selgitasime Läänemeres esinevate biodegradatiivsete bakterite enamlevinud liikide ja isolaatide geneetilise eripära. Üldnimetatud uurimuste käigus sekveneerisime Eestis esimestena kümneid bakterigenoome, neist osa ka uuteliikidel.
- Lisaks õnnestus meil selgitada, et Läänemere mikroobid on reservuaariks paljude antibiootikumide ravimiresistentsuse geenidele. Õnneks on nimetatud bakterite ravimiresistentsuse geenide esinemissagedus siiski madal, mitmel juhul lähedane detekteerimispiirile.
- Samuti näitasime, et biodegradatsiooniplasmiidide horisontaalse geeniülekannde tõttu moodustuvad uued plasmiidsed struktuurid, ka näiteks taimpatogeensetele bakteritele iseloomulike plasmiidide struktuurimoodulite kaasosalusel.

## GENEETIKAÕPIK

Geneetika, eriti molekulaargeneetika ja molekulaarbioloogia on kaasajal ilmselt kõige kiiremini arenev teadusvaldkond. On levinud arvamus, et kuivõrd



uut informatsiooni tuleb juurde väga suurel hulgal, siis kõrgkooli õpiku kirjutamine eesti keeles polegi mõttekas, see osutub vananenuks juba ilmumise ajal. Geneetika õpikut oli varem püütud kirjutada nii minu kui ka minu kolleegide poolt mitmel korral, kõigil juhtudel ebaõnnestunult. Põhjuseid oli põhiliselt kaks: meeskonnatöö puhul osutub terminoloogia ühtlustamine realselt mittevõimalikuks ja jooniste tegemine tellimustööde kaudu pole meie finantsvõimaluste tasemel võimalik. Seepärast õppisin enne õpiku kirjutamist jooniste arvutis tegemise ära ning otsustasin kirjutada õpiku üksi, kaasates toimetajateks oma ala parimaid spetsialiste (Sulev Kuuse, Rein Sikut, Mart Viikmaa). Üksikute paragrahvide materjalide läbivaatamisel 'ekspluateerisin' oma ala parimaid spetsialiste erinevatest teaduslaboritest. Raskeim polnud mitte kirjutamine ise, sest olen ju üldgeneetikat õpetanud aastakümneid, ega ka jooniste tegemine, vaid terminoloogia ühtlustamine, seda nii erialaspetsialistide kui ka keeleteadlastega arutades.

Kokkuvõtteks tõden, et ülikoolis õpetamisel on eestikeelsele geneetikaalasele terminoloogiale ülisuur roll ja seda ilmselt ka kultuurilises dimensioonis. Minu geneetikaõpik sisaldab 1 143 leheküljel 417 originaaljoonist (disainisin arvtis), lisatud on ligi 3 500 geneetikatermit seletavas sõnaraamatu osas, eesti ja ingliskeelsete vastetena on ristviitamisega tekstis umbes 6 000 geneetikatermit. See ongi geneetika-alane eestikeelne sõnavara. Järelikult on õpik kirjutatud ka käsiraamatuna kasutamiseks laialdasemalt, seda siis pigem juba teatmeteosena, seega ka kultuurikomponendina. Geneetika on muutunud tänapäeval inimühiskonna toimetamisel igapäevaseks osaks.

## LÕPETUSEKS

Inimeste tegemised on sageli mõtetes ja eelarvamustes kinni. Küllap jõuame pea ka olukorrani, kus DNA on arvtite mikrokiipideks, kus inimeste mõtetes geenid ja DNA on sama loomulik kui igapäevane leib. Samas küllap veel praegugi noored inimesed ei vaevu mõtlema ja oma tegevusi planeerima realselt eksisteerival eeldusel, et tegelikult suure tõenäosusega on neil geneetiliselt potentsiaal elada saja aastani. Nad ei pruugi seda fakti teadagi.

Mõiste elutööpreemia on selles kontekstis kahetine, seda eriti juhul, kui oled veel igati tegus ja töötad täiskohaga, oled 'kaubandusliku välimusega', kus aju töötab kui masinavärk ja sul pole näha eelduseid dementsuse ajajärku sisenemiseks. Kas elutöö ongi tehtud? Kuid ärme norime. Elutööpreemia on igal juhul äärmiselt meeldiv tunnustus, millega kaasneb isiklikult tänu, et sinu tööd on märgatud ja hinnatud. Ja alati jääb kripeldama 'ussikene', et tegelikult pole sa 'ujunud' üksi tühjas fluidumis, sinu elutöös on osalenud paljud teised inimesed, kolleegid, töökaaslased ja eelkõige pereliikmed ja neid pole esile tõstetud ja tänatud. Teen seda siinkohal. Inimene on alp ja mehed eelkõige. Mis saab veel ilusamat olla saabuvast kevadest ja saadud elutöö preemiast?

*Teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest*



*Enn Tarvel*

Sündinud 31.07.1932 Metsiku külas Vihula vallas Virumaal

- 1950 Rakvere Gümnaasium
- 1955 Tartu Ülikool, ajalugu
- 1971 ajaloodoktor, Eesti TA Ajaloo Instituut
- 1960–1978 Eesti TA Ajaloo Instituudi nooremteadur, vanemteadur;
- 1978–1993 feodalismiperioodi ajaloo sektori juhataja
- 1983–1993 Tallinna Tehnikaülikooli majandusajaloo professor
- 1993–1997 Stockholmi Ülikooli Baltimaade ajaloo professor
- 2001 Valgetähe III klassi teenetemärk
- 2009 Poola Vabariigi teeneteordeni ohvitseririst

*Mulle omistati Eesti riigi teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest. See tunnustus äratas peale loomulike ja ootuspäraste positiivsete emotsioonide minus vastakaid tundeid. Nimelt sellepärast, et olen aastakümneid püüdnud igal sobival ja sobimatul juhul rõhutada, et mina pole teadlane, kuna see, millega ma pikaajaliselt olen tegeleenud – nimelt ajalugu – pole teadus. Ja teiseks, nendin, et ma pole isegi professionaalne ajaloolane, kuna pole sisuliselt võttes saanud mingit erialast ettevalmistust.*

1950. aastal, pärast keskkooli lõpetamist, seisis ees lihtne ja selge valik: kas õpingud mingis kõrgkoolis või ajateenistus Nõukogude Armees (mida alles neli aastat tagasi oli nimetatud Tööliste ja Talupoegade Punaarmee). Andsin endale tollal – täpselt samuti nagu praegu – täiel määral aru, et ainumõistlik oleks valida endale mingi tõsiselt võetav eriala ja amet. Kuna olin keskkoolis hõbemedali pälvinud, ei oleks kõrgkooli sisseastumisega olnud tõenäoliselt erilisi raskusi – sisseastumiseksameid sel juhul ei nõutud. Aga Eesti NSV kõrgkoolide sisseastujatele määratud teatmikke lapates ja lugedes ei õnnestunud mul leida ühtegi eriala, mis oleks olnud pisinatukegi huvitav, pakkunud raasukegi pinget. Valisin siis ajaloo eriala Tartu Riiklikus Ülikoolis, mis ikkagi sobis. Illusioone mul ei olnud. Teadvustasin endale ka tollal suurepäraselt, et omandatava erialaga polnud midagi peale hakata: nõukogude koolis ajaloo õpetajaks hakata polnud mõeldav, veel vähem aga saada ajaloo uurijaks ja kirjutajaks. Olin aga piisavalt enesekindel arvama, et küllap ma mingi tagasihoidliku ameti ikka leiain, et ära elada, kui teised kõik leiavad. Olin päris veendunud, et nii kole asi kui see nn nõukogude kord ei saa igavesti püsima jääda, aga teistpidi olin ka veendunud, et minu silmad selle kokkuvarisemist küll ei näe, kuna see kord paistis olevat nii kindel ja võimas. Suur küüditamine oli eelmisel aastal just ära olnud, nii ei osanud kartagi selle võimalikku kordumist – ei tulnud nagu pähegi.

Oli mul kursusekaaslane, Haapsalust tulnud, väga andekas poiss. Tema kõneles hiljem, millise halvava, kauakestva šoki ta ülikooli astumisel sai. Oli ju kodus alati kõneldud ülikoolist lugupidamisega kui tõesti hariduse, kultuuri, teaduse keskusest. Ja kuhu ta oli nüüd sattunud, milliste inimeste käe alla! Mina küll mingit erilist šokki üle ei elanud. Vaevalt nüüd sellepärast, et oleksin olnud kuidagi rohkem ette valmistatud, võib-olla olin meelelaadilt negativistlikum, küünilisem või lihtsalt tuimem. Aga kole oli see õppeasutus küll, ja seal õpetatav, ja seal õpetajad. Põhikaader, vennasvabariikidest saabunud teadlased ja pedagoogid, oli ilma igasuguse tavahariduseta, aga marksismi-leninismi-stalinismi põhitõdedes hästi koolitatud isikud. Minu arust (tollal ja ka praegu tagasi mõeldes) olid nad enamasti lihtsalt imbetsiilsed inimesed, kes noori inimesi päris tõemeeli õpetasid ja kasvasid. Ja kui mõnes teaduslikus peas arusaamise sädet võis väljatadagi, siis pigem ainult selleks, et veel õelamaks muutuda kõige väheideelise vastu.

Mõned minu eakaaslased ja õpingukaaslased arutasid hiljaaegu mälestusi ning leidsid, et nad said omal ajal väga hea ajaloohariduse, parema kui praegused ajalootudengid. Mina sain selle jutu peale väga pahaseks, täpsimini öeldes vihastasin ja ütlesin, et mõtle ometi, armas V., mida sa räägid. Poistel läks üks päev nädalas sõjaväelisele ettevalmistusele ja kui ülejäänud nelja aasta õppekavu vaatad, mida sa seal näed. Peale põhjaliku ettevalmistuse ÜK(b)P ajaloos, marksismi-leninismi alustes, dialektilises ja ajaloolises materialismis, kapitalismi ja sotsialismi poliitilises ökonomias

oli mõningaid üldkursusi maailma (sealhulgas eraldi idamaade ning slaavlaste, eelkõige aga muidugi NSV Liidu) ajaloost, kus samadesse teoreetilistesse raamidesse oli lisatud faktoloogilist teavet. Ilmselge ainuesmärk oli kommunismiehitajate vormimine, tuimaks tampimine, nõukogude pedagoogide ettevalmistamine, põrmugi mitte mingi erihariduse andmine. Õppekavades ei olnud vähimatki professionaalse ajaloolase ettevalmistuseks vajalikku, paleograafiatki mitte. Ainult historiograafia kursust loeti. Ja osakonnas oli ainult paar inimest, paar dotsenti, kel oli õppejõu kompetents.

Valus ja solvav oli, et vennasvabariikidest saabunud spetsialistide kõrval oli õppejõudude hulgas ka eestiaegseid ajaloolasi, kes olid Tartu ülikoolis hariduse saanud, pedagoogina töötanud, aga absoluutselt ebakompetentsed, jõudes küll edukalt edasi parteilisel karjääriredelil. Kui minu õpingute ajal A. A. Ždanovi nimelisest Leningradi Riiklikust Ülikoolist saabus Tartusse õppejõuks noori haritud marksistlikke filosoofe, siis ajalooüliõpilaste ettevalmistusse ei toonud see kaasa mingeid erilisi värskeid tuuli (semiootikast ei tea ma midagi), vaid tõi pigem nii mõnelegi õppurile (eriti neile, kes nõrgema vene keele oskusega) täiendavaid tõsiseid piinu subtiilsemal süvenemisel marksismi-leninismi teooriasse.

Kui 1955. aastal Tartu Riikliku Ülikooli ajaloo osakonna ajalooeadlase diplomiga lõpetasin, oli seltsimees Stalin meid maha jätnud ning ajad olid imelikul kombel nii muutunud, et võis hakata ajaloo uurimisega ja ajaloo kirjutamisega tegelema. Hakkasin 1956. aastal ülikooli juures nn kraadi- taotlejaks ja 1957. aastal võeti mind vastu ENSV Teaduste Akadeemia Ajaloo Instituudi aspirantuuri. Sealne kollektiiv oli osakonnas, kus randusin, meeldiv, koosnes valdavalt arukatest ja tõsiselt võetavatest inimestest. Seal töötamine oli arendav ning enesetäiendamise võimalused märksa avaramad. Võimalus töötada Poolas (1959. a üks kuu, 1969. a pool aastat) avas minu jaoks akna Euroopasse. Erialakirjanduse kättesaadavus oli seal hoopis-hoopis teine kui Tallinnas. Võtsin seal osa ka (mis sest, et kuulajana-vaatajana) Teaduste Akadeemia Ajaloo Instituudi tööst. Kui ma ei oleks Poolasse pääsenud, ei oleks küll kumbki minu väitekiri valmis saanud. Hiljem, kui ma ametialaselt vanemaks sain, kujunesid hõlpsamaks ja sagedamaks ametireisid Moskvasse tööks arhiivis ja Lenini-nimelises raamatukogus.

Kõigest öeldust peaks täie selgusega järelduma, et ma olen ajaloolasena asjaarmastaja, isehakanu, olemata saanud mingit korrapärast ettevalmistust või väljaõpet.

Ilmselt oleks nüüd nõutav sissejuhatavalt ajaloo kohta väidetut stsientsioloogiliste ja teadusfilosoofiliste mõttekäikudega toetada ja põhjendada. Aga võib-olla tohiks antud kontekstis piirduda lihtsalt kodukootud, pretenioonideta arutlustega. Arvan, et teaduseks võib nimetada olulisi, suunavate põhimõtete järgi süsteemseks korraldatud teadmisi ja nende rakendamist

ning süsteemi loomiseks ja juhtimiseks kasutatud mõisteid ja teooriaid. Paljad teadmised on teaduse aine, teadmiste kogumine ja valdamine on õpetatus, see tähendab, et empiiriliste teadmiste kuhi pole veel teadus. Aga nende teadmiste korrastamine, süsteemi loomine (näiteks uurimisobjektide liigitamine jalakeste või ripsmete või tolmuksate vms arvu järgi) lähendab neid teadusele. Ja sellest kasvab välja teadus: selgituste, seoste, seaduspärasuste leidmine.

Muidugi mitte alati. (Ei maksa kohe jalamaid mõelda ainult alkeemiales, astroloogiale vms.) Võib kasvada välja pseudoteadus, nagu Karl Heinrich Marxil, kus ebaloogilisi väiteid just nagu kinnitataks mingite valemitega, või kvaasiteadus, nagu 1993. aasta Nobeli majanduspreemia laureaadil Robert Fogelil, kes puudulikke ja tendentslikult valitud algandmeid töötles matemaatiliste meetoditega, saamaks rabavaid tulemusi (näiteks, et raudteedel polnud USA majanduslikus arengus veeteede kõrval erilist tähtsust). Veel märksa halenaljakamad on näiteks marksistlik-leninlike nõukogude ajalooteadlaste, talurahvaliikumise uurijate püüded ülestõuse ja nende tekkepõhjusi klassifitseerida ja seaduspärasusi kindlaks määrata. Asja nii olles ei ole nn ajalooteadusel minu arust kohta tõsiselt võetavate teaduste rivis. (Muudest humanitaar- ja sotsiaalteadustest pole ma sõnagi öelnud.)

Selline veendumus ei ole laialt levinud. Ajalooga tegelejad laial rindel, olgu nooremad teadlased, kes on ametis doktoridissertatsiooni koostamise või kaitsmisega, või oma karjääriredeli kõrgeimal pulgal seisvad teenekad professorid, rõhutavad kaalukalt iseenda ja viljeldava eriala teaduslikkust. Ei teagi, miks õieti – kas harjumuspärasest nomenklatuursest mõtlemisest või hoopis ühiskondlikust mõttelaadist, püüust anda võimalikult kaalukas panus inimõtte varasalve, pakkuda end kui teadlast parimal moel ühiskonna teenistusse. Aga ühiskond ei tarbi ainuüksi teadust, tema vajadused on väga laias skaalas. Juba Rooma keisrid pakkusid rahvale leiba ja tsirkust (*panem et circenses*). Samuti tarbib, vajab ja nõuab tänapäeva inimene tugitoolisporti ja estraadilaulu, teleseriaale ja ajalooramatuid, ja palju muud. Turu nõudmise järgi finantseerib ühiskond tarbitavaid elualasid, hoolimata, kas tegemist on meelelahutuse või teadusega. Kuni ajaloolaste loomingul on tarbijaid, ajaloo küsimuste vastu huvi tundjaid, seni on ajalugu (öelgem: ajalooteadus) relevantne.

Tihtilugu rõhutatakse nn rahvusteaduste (sealhulgas ajaloo) suurt tähtsust rahva ja riigi identiteedi kujundamisel ja hoidmisel. See on kindlasti nii, aga mitte just nagu natsiooni eksistentsi mingi ainsa või vähemalt peamise tugisambana. Muusikal või spordil on väga suur rahvuslikku iseolemist ja solidaarsust kindlustav jõud. Meenutagem kas või Palusalu esilekerkimise üldrahvalikku tähtsust 1936. aastal või Eesti kümnevõistleja või suuskurite olulist panust. Siiski on just siin õige koht ajaloolasele aidata otsustavalt kujundada meie suhteliselt noort ja heitlikku identiteeti, esile tõsta rahva

otsustavaid eneseavaldusmomente minevikus ja anda neile elujõulist õigustust. Rahvusluse ideed ei tohi rinnastada šovinismiga, tagurlusega, juhmi kitsarinnalisusega. Siin on ajaloolasel võimalus ühildada rahvuslikud väärtushinnangud ja metodoloogilise objektiivsuse nõudmised. Ja nii peaks ta suutma leida endale väärikas koht üldinimlikul kultuuripõllul, põdemata sellepärast, kas ta on teadlane või võib-olla ei olegi.

*Teaduspreemia täppisteaduste alal uurimuste tsükli  
“Operaatorideaalid ja tensorikorrutised Banachi ruumide struktuuri-  
uuringutes” eest*



*Eve Oja*



Sündinud 10. oktoobril 1948 Tallinnas

1967 Tallinna Gustav Adolfi Gümnaasium

1972 Tartu Ülikool, rakendusmatemaatika

1975 füüsika-matemaatikakandidaat, Tartu Ülikool

1975–1990 Tartu Ülikooli assistent, vanemõpetaja, dotsent; alates 1992 funktsionaalanalüüsi professor; aastatel 1994, 1998, 2003, 2004 puhta matemaatika instituudi juhataja

2009– Eesti matemaatika ja statistika doktorikooli juht

Ameerika matemaatikaühingu (AMS), Eesti Matemaatika Seltsi, Euroopa Teaduste ja Kunstide Akadeemia liige. Ajakirja *Acta et Commentationes Universitatis Tartuensis de Mathematica* peatoimetaja (alates 1998)

2001 Eesti Vabariigi teaduspreemia täppisteaduste alal

2010 Eesti Teaduste Akadeemia liige

Avaldanud 91 teaduspublikatsiooni eelretsenseeritavates ajakirjades, 1 monograafia, 1 õpiku

## BANACHI RUUMIDE STRUKTUUR

Uurimuste tsükkel “Operaatorideaalid ja tensorkorrutised Banachi ruumide struktuuri-uuringutes” tegeleb matemaatika alusuuringutega. Luuakse funktsionaalanalüüsi ja operaatorite teooria piirimail asuvaid uusi meetodeid ning rakendatakse neid Banachi ruumide struktuuri uurimisel.

Banachi ruumide teooria, aga ka kaasaegse funktsionaalanalüüsi sünniaastaks peetakse aastat 1932, mil ilmus kuulsa poola matemaatiku Stefan Banachi monograafia “Théorie des opérations linéaires” (Lineaarsete operatsioonide teooria).

Banachi ruumi mõistet on lihtne tajuda. Meil kõigil on olemas intuiitvne ettekujutus HULGAST kui mingist objektide ehk elementide kogumist (näiteks: kõigi punktide hulk tasandil, kõigi reaalarvude hulk  $\mathbb{R}$ ). BANACHI RUUMIKS nimetatakse niisugust hulka, mille elemente saab liita ja arvudega korrutada

(st tegemist on vektorruumiga) ning mille iga elemendi  $x$  jaoks on defineeritud norm  $\|x\|$  – elemendi  $x$  ‘pikkus’ (norm on oma olemuselt arvu absoluutväärtuse ja ka vektori pikkuse üldistus). Lisaks kehtib nn täielikkuse aksiom, mis kirjeldab selles ruumis koonduvaid jadasid (jada  $(x_n)$  koondub parajasti siis, kui  $\lim \|x_n - x_m\| = 0$ ).

Toome mõned Banachi ruumide näited.

Näide 1. Arvsirge  $\mathbb{R}$  on Banachi ruum, kus arvu  $x$  norm defineeritakse tema absoluutväärtusena:  $\|x\| = |x|$ .

Näide 2. Eukleidiline tasand  $\mathbb{R}^2$  on Banachi ruum, kus vektori  $x = (a_1, a_2)$  norm defineeritakse tema pikkusena:

$$\|x\| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}.$$

Näide 3. Lõigus  $[a, b]$  pidevad funktsioonid moodustavad Banachi ruumi  $C[a, b]$ , kus funktsiooni  $x = x(t)$  norm defineeritakse maksimumi abil:

$$\|x\| = \max_{a \leq t \leq b} |x(t)|.$$

Ruum  $C[a, b]$  on Banachi ruumide teooria rakendustes üks sagedamini kasutatavaid ruume. Aga ei ruum  $C[a, b]$ , rääkimata tasandist  $\mathbb{R}^2$  või arvsirgest  $\mathbb{R}$ , peegelda vähemalgi määral seda teoreetilist ja rakenduslikku rikkust, mida pakuvad Banachi ruumid oma üldisuses ja abstraktsuses.

Banachi ruumide teooria ja selle arvukate rakenduste (arvutusmatemaatikas, harmoonilises analüüsis, osatuletistega diferentsiaalvõrrandite teoorias, tõenäosusteoorias jm) jaoks on kasulikud eelkõige niisugused ruumid, millel on teatav ‘rikas’ struktuur, mis võimaldab Banachi ruumi üldiste elementide lähendamist lõplikumõõtmeliste, kompaksete või muude ‘lihtsamate’ objektide kaudu. Eriti hea on, kui ruumis on olemas baas.

Õeldakse, et Banachi ruumis  $X$  on olemas BAAS, kui selles ruumis leiduvad niisugused elemendid  $e_1, e_2, \dots$  (baasielemendid), et ruumi  $X$  iga element  $x$  esitub üheselt lõpmatu summana

$$x = a_1 e_1 + a_2 e_2 + \dots + a_n e_n + \dots,$$

kus  $a_1, a_2, \dots$  on arvud. Baasiga Banachi ruumi igat elementi  $x$  saab seega lähendada ‘lihtsa’ lõpliku summaga  $a_1 e_1 + a_2 e_2 + \dots + a_n e_n$ , kus on ‘mängus’ ainult (arvudega korrutatud) baasielemendid.

Baasiga Banachi ruumile on lähedane SEPARAABLI ruumi mõiste. Seal saab elemente lähendada mingi loenduva hulga elementidega. Baasiga Banachi ruumid on separaablid. Kas aga igas separaablis Banachi ruumis on olemas baas? See nn BAASIPROBLEEM oli sõnastatud juba Banachi monograafias

1932. aastal ning baasiprobleemi on peetud üheks kõige olulisemaks ja haaravamaks probleemiks Banachi ruumide teoorias. Baasiprobleem on tihedalt seotud aproksimatsiooniprobleemiga (vt “Aproksimatsiooniprobleem ja valge hani” artiklist (Oja, 2001)). Tuhanded matemaatikud tegelesid baasi otsimisega separaablis Banachi ruumis, sest valdavalt usuti baasiprobleemi positiivsesse lahendusse.

Pisut sain minagi näha baasiprobleemi ümber möllavat kirge matemaatikute kogukonnas. Nimelt oli mul tudengina see õnn, et Gennadi Vainikko võttis ka mind (kuigi minu juhendaja oli Gunnar Kangro) kaasa Voroneži talvekooli, kuhu kogunesid matemaatikaprominendid kogu N. Liidust. Kõige elavamast vastukaja tekitas seal üks baasiprobleemile võimalikku positiivset lahendust ennustav ettekanne (F. Vaher). Tudengina oli päris naljakas pealt vaadata, kuidas auväärased hallipäised akadeemikud ja professorid nagu poisikesed üksteisest üle rääkides arutasid, et kas võib olla baasi või mitte, nii et asi läks peaaegu hääletamiseks. See oli jaanuaris 1972.

Seda dramaatilisem oli negatiivne lahendus, mis saabuski juba 1972. aastal: noor rootsi matemaatik Per Enflo konstrueeris separaabli Banachi ruumi (pealegi veel nii hea omadusega nagu refleksiivsus), milles ei olnud baasi (sel ruumil polnud isegi mitte aproksimatsiooniomadust). Enflo kandis oma konstruktsiooni ette esinduslikul konverentsil Jeruusalemmas 1972. aasta juunis. Kuulus rumeenia matemaatik Ivan Singer kirjeldas seda mulle 9 aastat hiljem järgmiselt. Auditorium olevat alguses olnud rõõmsalt-skeptiliselt meelestatud: loodeti, et Enflo tõestuses on ehk lünk sees. Aga tõestuskäigu arenedes olevat saal järjest tõsisemaks muutunud ning ettekande lõppedes olevat pikka aega valitsenud sünge hauavaikus: liigagi paljud auditoriumi hulgast olid ju aastakümnete jooksul andnud kogu oma energia püüdmaks baasiprobleemi positiivselt lahendada.

Niisiis, baasi ei tarvitse olla isegi separaablites refleksiivsetes Banachi ruumides ning baasi pole ammu olemas mitteseparaablites ruumides. Nendel ruumidel võib aga olla mingit sorti APROKSIMATSIOONIOMADUS. See on teooria ja rakenduste jaoks kasulik Banachi ruumide struktuuriomadus, mis võimaldab ruumi üldiseid elemente lähendada elementidega teatud lõplikumõõtmelistest alamruumidest. Aproksimatsiooniomadustega ruumide kirjeldamine on olnud üheks kõige populaarsemaks klassikaliseks probleemiks funktsionaalanalüüsis, huvitõusudega 1970ndatel ja 1990ndatel aastatel.

Märgatav huvitõus on nüüd täheldatav alates aastast 2005, mil ajakirjas *Mathematische Annalen* ilmus artikkel (Lima, Oja, 2005), kus evitasime uue mõiste NÖRK TÕKESTATUD APROKSIMATSIOONIOMADUS ning analüüsisime klassikalise aproksimatsiooniomadustega seotud probleeme täiesti uutest vaatenurkadest. Uuringutesse on olnud haaratud matemaatikud enam kui tosinast riigist üle maailma, nende seas näiteks niisugused tippmatemaatikud nagu Aron, Botelho, Figiel, Godefroy, Johnson, Å. Lima, Maestre, Pelczyński, Piñeiro, Plichko, Reinov, Yost jt. Auhinnatud uurimuste tsükkel kuulub samasse

'lainsesse': Banachi ruumide struktuuri iseloomustatakse uutes, viimasel kümnel aastal ilmunud aproksimatsiooniomaduste terminites. Töödetsükliks on selleks loodud uued tõestusmeetodid, mis paiknevad funktsionaalanalüüsi ja operaatorite teooria interaktsioonialal. Olulisemateks võtmesõnadeks on seejuures TENSORKORRUTISED ja OPERAATORIDEAALID.

## TENSORKORRUTISED JA OPERAATORIDEAALID

Käesolevate ridade autor sukeldus Banachi ruumide teoriasse 1980. aasta sügiskülal. Eelnevalt olin tegelenud summeeruvusteooriaga ning lokaalselt kumerate ruumidega (Banachi ruumidest tunduvalt üldisemad objektid, mistõttu nende struktuur nii rikkalik olla ei saa kui Banachi ruumidel), õppinud Leningradi Riiklikus Ülikoolis prantsuse keelt, õpetanud selles keeles tulevasi insenere Mali Vabariigi pealinnas Bamakos (Oja, 1979) ning teinud palju muudki. Nii et vahele oli jäänud juba viis aastat, mil ma üleüldse matemaatilise uurimistööga polnud tegelenud.

1980–81 õppeaasta oli mul õnn veeta N. Liidu stažöörina ja ühtlasi Prantsuse Vabariigi stipendiaadina Marseille's. Sinna sattusin ma seoses N. Liidu poolt vallapäastetud Afganistani sõjaga. Ise soovisin küll Pariisi ning N. Liidu poolne taotlus oligi Pariisi, kuid maailmakuulus matemaatik Laurent Schwartz (Fieldsi preemia 1950), kes Afganistani sõja pärast aktiivselt N. Liidu vastu välja astus, olevat soovinud vaenuliku N. Liidu stažööri endast ja seega ka Pariisist võimalikult kaugele saata. Sellest Marseille'sse pagendamise loost rääkis mulle professor Billard, kelle juurde Schwartz mind suunaski.

Professor Billard'i seminaris uuriti parajasti üht Retherfordi ja Stegalli fundamentaalset tööd, mis tugines Banachi ruumide tensorkorrutiste teooriale. Nii siis pidin ma iseseisvalt ja kiiresti endale selle teooria selgeks tegema. Tensorkorrutiste teooria oli loonud Alexander Grothendieck (Fieldsi preemia 1966) 1950ndatel ja seda peetakse üheks kõige raskepärasemaks teooriaks üldse. Õppida tuli põhiliselt Grothendiecki 1955. aastal ilmunud põhjapaneva, aga lakoonilises stiilis monograafia "Produits tensoriels topologiques et espaces nucléaires", nn GROTHENDIECKI MEMUAARID, järgi. Nii juhtuski, et mõtlesin enda tarbeks välja lihtsama alternatiivse käsitluse, mis võimaldas mul juba paari kuu pärast kirjutada oma esimene teadusartikkel tensorkorrutiste kohta. Igatahes peeti mind mõne aasta pärast tensorkorrutiste spetsialistiks ning kutsuti 1989. aastal sellekohast loengukursust lugema Pariisi VI ja VII Ülikooli doktorantidele, teaduritele ja õppejõududele.

Kui kahe Banachi ruumi TENSORKORRUTIS on üks uus (rikkalike omadustega) Banachi ruum, mis nende kahe põhjal moodustatakse, siis operaatorideaali jaoks peaks kõigepealt rääkima operaatorist. Operaator on koolimatemaatikast tuntud funktsiooni üldistus: OPERAATOR on niisugune funktsioon, mille määramispiirkonnaks on mingi Banachi ruum ja ka muutumispiirkonnaks on mingi Banachi ruum. Lisaks eeldatakse operaatorilt linearsust ja pidevust. Kui

operaatori väärtuste hulk on lõplikumõõtmeline, siis räägitakse LÕPLIKUMÕÕTMELISEST OPERAATORIST.

OPERAATORIDEAAL on mugav abstraktsioon, mis võimaldab käsitleda teatud liiki operaatoreid kui ühte tervikut, täpsustamata seejuures operaatorite määramis- või muutumispiirkonnaks olevaid Banachi ruume. Näiteks räägitakse kõigi operaatorite ideaalist, mis on ka kõige suurem operaatorideaal. Lõplikumõõtmeliste operaatorite ideaal on aga kõige väiksem: ta sisaldub igas operaatorideaalis. Operaatorideaalide teooria lõi saksa matemaatik Albrecht Pietsch 1970ndatel. Praegu on Pietsch umbes 80-aastane klassik. Kui matemaatikategemist kiputakse pidama noorte pärusmaaks (Fieldsi preemiat antakse ju ainult noortele matemaikutele), siis Pietsch on küpse matemaatikuna jäänud samas 'nooreks matemaikuks', demonstreerides aina uusi nutikaid ideesid ja tõestades tugevaid teoreeme ka kõrges vanuses.

Operaatorideaalide teooria ja tensorkorrutiste teooria 'kohtuvad' lõplikumõõtmelistel operaatoritel. See on üldteada lihtne fakt, millele siiaamaani pole erilist tähelepanu pööratud. Auhinnatud töödetsükli artiklis (Oja, 2011b) pannakse tähele, et ülalmainitud 'kohtumispaias' tekivad teatud võrratused, mille abil saab väljendada Banachi ruumi omadusi nii ruumi enese terminites (SISEVÕRRATUSED) kui ka sellest ruumist erinevate ruumide klasside kaudu (VÄLISVÕRRATUSED). Matemaatikas on aga üheks laialt levinud ÜLDISEKS PROBLEEMIKS küsimus, kuidas ruumi 'välisterminites' kirjeldatud omadusi mõista ruumi enese terminites? Ning, vastupidi, kuidas ruumi sisestruktuur mõjutab 'koostegevust' teiste ruumidega?

Sedasorti üldist huvi pakkuvate küsimuste lahendamiseks sobib hästi artiklis (Oja, 2011b) loodud tensorkorrutisi ja operaatorideaale siduv sise- ja välisvõrratuste teooria. Teooria rakendusena on näiteks antud uus lihtne tõestus Grothendiecki teoreemile projektiivse ja injektiivse tensorkorrutise kokkulangemise kohta ning on välja töötatud ühtne meetod Grothendiecki klassikaliste, Lima–Oja nõrga tõkestatud ja Saphari  $p$ -aproksimatsiooniomaduste ( $p \geq 1$  on arvuline parameeter) uurimiseks. Muuhulgas on tuletatud nõrga tõkestatud aproksimatsiooniomaduse olemuslik kriteerium ruumi enese terminites (varasemates töödes olid alati 'appi võetud' ka teised, 'välised' Banachi ruumid) ning tõestatud Bourgaini (Fieldsi preemia 1994) ja Reinovi tulemusena Saphari  $p$ -aproksimatsiooniomaduste separaabli ja refleksiivse määratuse kohta. Töö (Oja, 2011b) ilmus ülimalt selektiivses ajakirjas *Transactions of the AMS*, mis on matemaatikute kogukonnas sama prestiižne nagu *Nature* loodusteadlastel.

#### KOMPAKTSUSE VORMID JA NENDEGA SEOTUD OPERAATORIDEAALID

Banachi ruumide teorias ning rakendustes mängib tähtsat rolli hulkade kompaktsus. Põhjus on selles, et kompaktsed hulgad on küllastunud koonduvate

jadadega: iga jada sisaldab endas koonduva osajada. Koonduvate jadade abil saab aga lähendada ruumi üldiseid elemente, mis omakorda – tänu rakendusmatemaatika vahendusele – avab tee arvutite kasutamisele. Kompaktsuse tugevam vorm on  $p$ -kompaktsus (kus  $p \geq 1$  on arvuline parameeter). Sedasorti tugevat kompaktsust ja vastavate  $p$ -kompaktsete operaatorite poolt moodustuvaid operaatorideaale on viimasel kümnel aastal aktiivselt uurinud paljud matemaatikud üle ilma. Mitmed taoliste operaatorideaalide kohta püstitatud struktuuriprobleemid lahendatakse töödetsükli artiklites (Ain jt, 2012; Haller jt, 2012; Oja, 2012ab).

Artikli (Oja, 2012b) ajendiks oli ajakirjas *Proceedings of the AMS*, 2011, hispaania matemaatikute Delgado ja Piñero poolt püstitatud väljakutsuvalt elementaarse sõnastusega probleem: kas Banachi ruumis nulliks koonduv  $p$ -kompaktne jada on alati  $p$ -null jada? Matemaatika ajalugu on korduvalt näidanud, et lihtsalt sõnastatavad probleemid võivad olla raskesti lahendatavad. Lahendamisel tekivad aga reeglina uued meetodid, mis võivad kasutada väga gi keerulist matemaatilist aparatuuri. Täpselt nii juhtus ka Delgado–Piñero probleemiga (Oja, 2012b): probleemi lahendusvõti oli peidus operaatorideaalide ja tensorkorruutiste teooriate piirimaal.

Artikli (Oja, 2012b) üheks põhitulemuseks on Grothendiecki kuulsa tuumaoperaatorite teoreemi parendus-üldistus, mis annab kvalitatiivse panuse isegi tuumaoperaatorite teooria klassikasse. Selle põhitulemuse rakendusena arendatud teooria sisaldab uusi tulemusi mitmesuguste operaatorideaalide vallas ( $p$ -tuumoperaatorid,  $(r,p,q)$ -tuumoperaatorid,  $p$ -kompaktsed operaatorid) ning võimaldas pärast  $p$ -null jadade kirjeldamist Chevet–Saphari tensorkorruutiste kaudu (veel üks fundamentaalne tulemus!) lahendada positiivselt Delgado–Piñero probleem. Töö (Oja, 2012b) ilmus ajakirjas *Journal of Functional Analysis*, mis on funktsionaalanalüüsi valdkonna absoluutne tippajakiri.

Artiklis (Oja, 2012a) on tõestatud, et india matemaatikute Sinha ja Karni poolt ajakirjas *Studia Mathematica*, 2002, sisse toodud  $(p,p)$ -aproksimatsiooniomadus ühtib alati klassikalise aproksimatsiooniomadusega, ning ta ei ole mitte viimase üldistus nagu siia maani arvati. Rakendusena on iseloomustatud Lebesgue'i ruumide kinniste alamruumide ja faktorumide aproksimatsiooniomadust  $p$ -kompaktsete operaatorite ideaali kaudu. Samuti on lahendatud üks Delgado, Piñero ja Serrano püstitatud probleem (*J. Math. Anal. Appl.*, 2010) ning näidatud, et  $p$ -kompaktsete ja klassikaliste Pietsch–Fourie–Swarti  $p$ -kompaktsete operaatorite ideaalid on omavahel täiesti erinevad operaatorite klassid.

Artiklis (Ain jt, 2012) on evitatud  $(p,r)$ -kompaktse operaatori mõiste, mis erijuhtudena haarab endasse nii Bourgain–Reinovi kui ka Sinha–Karni  $p$ -kompaktsete operaatorite versioonid. On tõestatud, et  $(p,r)$ -kompaktsed operaatorid moodustavad teatavate tuumaoperaatorite ideaali sürjektiivse katte. Sellest tulemusest lähtudes arendatakse  $(p,r)$ -kompaktsete operaatorite ideaali

kui teatava kvaasi-Banachi operaatorideaali süstemaatilist teooriat. Selle uue teooria erijuhuna tekib alternatiivne tunduvalt lihtsam teooria ka  $p$ -kompaktsete operaatorite käsitlemiseks. Artikkel (Haller jt, 2012) on ulatuslik süstemaatiline uurimus kompaktsete operaatorite ideaalstruktuuri kohta, mille põhitulemusena on olemuslikult avatud  $M(r,s)$ -ideaalstruktuuri tekkemehhanism.

## MEETRILISE APROKSIMATSIOONI PROBLEEM IKKA VEEL LAHTINE

Klassikaline APROKSIMATSIOONIOMADUS tähendab seda, et Banachi ruumi elemente saab lähendada, kasutades lõplikumõõtmelisi operaatoreid. Kui neid lõplikumõõtmelisi operaatoreid on võimalik valida nii, et operaatorite normid on väiksemad mingist kindlast arvust, näiteks väiksemad kui 1 000 000, siis öeldakse, et ruumil on TÕKESTATUD APROKSIMATSIOONIOMADUS. Väikseim selline tõke saab olla arv 1. Sel juhul öeldakse, et ruumil on MEETRILINE APROKSIMATSIOONIOMADUS. See oleks siis kõige parem aproksimatsiooniomadus!

GROTHENDIECKI MEMUAARI nähtamatuks telgjooneks, millest kord kauge-netakse ja millele kord lähenetakse, tundub olevat küsimus, millises olukorras aproksimatsiooniomadus saab olla meetriline? Sealt pärineb ka MEETRILISE APROKSIMATSIOONI PROBLEEM: kas Banachi ruumi kaasruumi aproksimatsiooniomadus on alati meetriline? (Märgime, et Banachi ruumi  $X$  kaasruum on ruumist  $X$  lähtuvate kõigi arvuliste väärtustega operaatorite ruum; kaasruum on ka ise Banachi ruum.)

Meetrilise aproksimatsiooni probleem on kuulus ja oluline Banachi ruumide teooria klassikaline probleem, mida ligemale 60 aasta jooksul on 'rünnanud' paljud silmapaistvad matemaatikud (õigem oleks vast öelda, et seda probleemi on (mõnevõrra) uurinud enamus Banachi ruumide huvilisi). Hoolimata kõigist jõupingutustest, on probleem ikka veel lahtine. Kõige kaugeleulatavam lahendus positiivses suunas on: 'jah', kui kaasruumil või kaasruumi kaasruumil on Radon–Nikodými omadus. Kuid seegi teoreem on vana, pärinedes 1970ndate lõpust. Sedalaadi teoreemide tõestusi iseloomustab kuulus ameerika matemaatik Casazza kui 'müstilisi': iga samm tõestuses on küll arusaadav, aga müstiliseks jääb üldpõhjus, miks need sammud kokku ikkagi tõestuse annavad!?! Selle vana teoreemi (või erijuhtude) üksteisest erinevaid tõestusi on leitud palju (autoriteks näiteks Cho, Diestel, Godefroy, Grothendieck, Johnson, Á. Lima, Lindenstrauss, Nygaard, Oja, Reinov, Saphar, Tzafriri, Uhl). Kuigi on ilmunud ka asja olemust selgelt avavaid tõestusi (Lima, Oja, 2005; Oja, 2006a; Oja, 2011b), pole siin veel mitte keegi suutnud ületada 1970ndatest aastatest pärinevat Radon–Nikodými omaduse "piiri".

Meetrilise aproksimatsiooni probleemile lahenduste otsimisel peetakse läbimurdeks artikleid (Lima, Oja, 2005) (kus tõestasime näiteks, et kaasruumi

aproksimatsiooniomadus on alati nõrgalt(!) meetriline) ning (Oja, 2006a) (mis näitab kätte probleemi lahendustee, kui ainult keegi oskaks sobivalt kirjeldada kompaksete operaatorite kaasruumi!). Minu hea kolleeg Åsvald Lima (Norra) emeriteerus 62-aastasena selleks, et viimaks ometi olla vaba bürokraatlikust tegevusest ning püüda probleemi põhjalikult uurida. See oli ligi 10 aastat tagasi. Meiega töötab koos ka Åsvaldi poeg Vegard ning auhinnatud töödest neli ongi selle ‘sünergia’ tulem.

Artiklis (Lima jt, 2010a) on evitatud uudne Banachi operaatorideaalist sõltuva tõkestatud aproksimatsiooniomaduse mõiste. Originaalse tensorkorrutiste ja lõplikumõõtmeliste operaatorite faktorisatsiooni meetodiga on tõestatud, et integraalsete operaatorite ideaal määrab tõkestatud aproksimatsiooniomaduse, kuid tuumaoperaatorite ideaal määrab nõrga tõkestatud aproksimatsiooniomaduse. Rakendusena selgub, et esimesel juhul sobib testruumiks (absoluutselt summeeruvate arvjadade) ruum  $\ell_1$ , teisel juhul aga (nulljadade) ruum  $c_0$ . Siit püstitub loomulik küsimus, kas testruumiks võiks sobida ka mingi üks klassikaline ruum? Artiklites (Lima jt, 2012) ja (Lima jt, 2014) ongi tõestatud, et mõlemal juhul sobivad testruumiks nii funktsioonide ruumid  $C[0,1]$  (lõigus  $[0,1]$  pidevad funktsioonid; vt Näide 3) ja  $L_1[0,1]$  (lõigus  $[0,1]$  integreeruvad funktsioonid) kui ka suvaline Lindenstraussi ruum, mille kaasruumil puudub Radon–Nikodými omadus. Tõestusmeetod on küllaltki komplitseeritud ning kasutab artikli (Oja, 2011b) tulemusi.

Artikli (Lima jt, 2010a) edasiarendusena (tuues sisse uudse momendina lineaarsplainid) avastati artiklis (Lima jt, 2010b), et Banachi ruumidel võib esineda täiesti uut tüüpi struktuur, mis meenutab kahe tüvega puud. Artiklis (Lima jt, 2010b) evitataksegi kahe tüvega puu mõiste ja põhitulemusena kirjeldakse absoluutselt summeerivate operaatorite ruumi kahe tüvega puude terminites. Põhitulemusel on olulisi rakendusi isegi Banachi ruumide klassikasse: näiteks lõigus pidevate (ka vektorväärtustega) funktsioonide ruumi uued struktuuriomadused ja Radon–Nikodými omaduse uus kriteerium. Artikli (Lima jt, 2010b) edasiarendusena on artiklis (Lima jt, 2014) saadud olulisi tulemusi Lindenstraussi ruumidelt lähtuvate operaatorite ruumide struktuuri kohta, kusjuures on evitatud separaabli Lindenstraussi ruumiga seotud puu mõiste, millega saab kasulikult iseloomustada Banachi ruumide struktuuri.

## UUED APROKSIMATSIOONIOMADUSED

Matemaatikaklassikud Figiel, Johnson ja Pelczyński (*Israel J. Math.*, 2011) tõid hiljuti sisse uue olulise Banachi ruumide struktuuriomaduse – PAARIDE TÕKESTATUD APROKSIMATSIOONIOMADUS. Paari moodustavad siin Banachi ruum  $X$  ja tema alamruum  $Y$  ning tegemist on niisuguse tõkestatud aproksimatsiooniomadusega, mille puhul lähendavad lõplikumõõtmelised operaatorid peavad ‘respekterima’ alamruumi  $Y$ : viima ruumi  $Y$  elemendid tagasi ruumi  $Y$ .



Selle uue struktuuriomaduse uuringutesse annavad tuntava panuse artiklid (Lissitsin, Oja, 2011) ja (Oja, Treialt, 2013). Artiklis (Oja, Treialt, 2013) sisaldub vähemalt kaks fundamentaalset teoreemi, sealhulgas paaride tõkestatud aproksimatsiooniomaduse duaalsusteoreem. Tõestamiseks on loodud üldine meetod, mis tugineb nii integraalsete operaatorite ideaali ärakasutamisele (teoreemide sõnastuses ei viita miski integraalsetele operaatoritele) kui ka operaatorideaalide poolt määratud tõkestatud aproksimatsiooniomaduse kriteeriumile artiklist (Oja, 2006b). Artiklis (Lissitsin, Oja, 2011) on evitatud operaatorite kumera hulga poolt defineeritud aproksimatsiooniomaduse mõiste – KUMER APROKSIMATSIOONIOMADUS – ning loodud vastav ühtne tõestusmeetodika. See sobib näiteks Banachi võrede positiivsete aproksimatsiooniomaduste käsitlemisel asendama Nielsen (*Israel J. Math.*, 1988) vägagi tehnilist võrespetsiifilist aparatuuri. See hõlmab aga ka Banachi ruumide paaride aproksimatsiooniomadust, mille kohta käiv, artiklis (Lissitsin, Oja, 2011) tõestatud, Radon–Nikodými omaduse mõjuteoreem on üldse esimene sedalaadi tulemus matemaatilises kirjanduses.

Üheks kõige lähemaks baasi üldistuseks on struktuuriomadus KOMMUTEERUV TÕKESTATUD APROKSIMATSIOONIOMADUS, mille korral lähendavad lõplikumõõtmelised operaatorid on omavahel paarikaupa kommuteeruvad. Seda omadust on põhjalikult uuritud üle 20 aasta. 2001. aastal ilmus Casazza, Kaltoni ja Wojtaszczyki teoreem, millest selgus, et kommuteeruv tõkestatud aproksimatsiooniomadus on üsna haruldane omadus, mida pole isegi klassikalisel (tõkestatud arvjadade) ruumil  $\ell_\infty$ . Töös (Oja, Zolk, 2013) on evitatud uus struktuuriomadus ASÜMPTOOTILINE KOMMUTEERUV TÕKESTATUD APROKSIMATSIOONIOMADUS, mis on laialt levinud (nt on olemas kõigil Banachi ruumide kaasruumidel, sh jadaruumil  $\ell_\infty$ ). Artikkel (Oja, Zolk, 2013) sisaldab neli fundamentaalset teoreemi, kust muuhulgas selgub, et kui ruumil on asümptootiline kommuteeruv tõkestatud aproksimatsiooniomadus, siis see ruum on küllastunud alamruumidega, millel on ‘väga heal’ kujul kommuteeruv tõkestatud aproksimatsiooniomadus. Need alamruumid on lokaalselt täiendatavad ja erijuhtudel koguni täiendatavad. Tõestusmeetod on suhteliselt komplitseeritud ning kasutab mitmekesisest operaatorite teooria ja funktsionaalanalüüsi aparatuuri.

## LÕPETUSEKS

Funktsionaalanalüüsi rajaja Stefan Banach (1892–1945) elas ja töötas põhiliselt Lvovis, mis enne II ilmasõda oli Poola linn. Praegu on Lvov ehk Lviv Ukraina linn, kus iga kümne aasta järel tähistatakse konverentsiga Banachi sünnipäeva. Banachi 120ndale sünniaastapäevale pühendatud mastaapsel konverentsil (400 osavõtjat) 2012. aastal olin ka mina plenaariesinejate seas. Nimetagem allpool veel mõned hiljutised olulisemad teadusesinemised. Näiteks kutsuti mind esinema plenaarettekandega esinduslikul rahvusvahelisel konverentsil “Banach Algebras 2009”, hoolimata sellest, et mul pole Banachi

algebrate vallas ühtegi teadustööd. Sooviti ettekannet just nimelt aproksimatsiooniomaduste kohta ning selle ettekande põhjal telliti ülevaateartikkel (Oja, 2010). Ülevaateartikkel (Oja, 2011a) telliti aga plenaarettekande põhjal Rahvusvahelisel Matemaatilise Analüüsi Kongressil 2009. Aastatel 2010 ja 2011 olin kümnekonna nimeka matemaatiku seas kutsutud seminariloenguid lugema esinduslikel sümposiumidel Hispaanias ja USAs. Kõikjal on organiseerimiskomiteed heldelt toetanud mitte ainult minu vaid ka paari kaasa võetud doktorandi osalemist. Olgu siinkohal tänuga ära märgitud järgmised toetajad: Poola Teaduste Akadeemia, *European Science Foundation*, *Junta de Andalucía*, *Ingenio Mathematica*, *Texas A&M Research Foundation*. Praegust teadustegevust toetavad ETF grant nr 8976 ja IUT20-57.

Mulle meeldib matemaatika ja rõõmu valmistavad kõik saavutused matemaatikas. Matemaatilist artiklit kirjutada on samuti rõõm, sest ma ei alusta artikli kirjutamist enne, kui see ennast ise peale suruma hakkab, vahel lausa painama. Mõnigi kord saab asi alguse mingist teoreemist, mis otsekui kõrgemalt poolt antuna, enamasti küll pisut ähmasena, vahel aga ka täies selguses ennast ilmutab. (Viimastel aastatel tundub, et kõrge palavikuga haigevoosis lamamine on sedasorti 'ilmutusi' soodustav seisund.)

2014. aasta Riigi teaduspreemiate puhul valmistab mulle erilist rõõmu see, et laureaatide seas on koguni kolm matemaatikut, kolm Tartu Ülikooli matemaatikateaduskonna vilistlast. Lisaks sellele, et täppisteaduste preemia tuli seekord matemaatikasse, pälvis mu kursusekaaslane Krista Lõhmus teaduspreemia põllumajandusteaduste alal ning Ellu Saar sotsiaalteaduste alal.

Teadusetegemine sarnaneb võistlusspordile (Uustalu, 2013). Teaduses aga olümpiamänge ei korraldata; ei korraldata ka maailmameistrivõistluseid. Seda enam hindab Eesti teadlaskond Riigi teaduspreemiate süsteemi ning on tänulik teaduspreemiate komisjonile nende pingelise ja tähtsa töö eest.

## KIRJANDUS

Ain, K., Lillemets, R., Oja, E. (2012). Compact operators which are defined by  $\ell_p$ -spaces. *Quaestiones Math.*, 35, 145-159.

Haller, R., Johanson, M., Oja, E. (2012).  $M(r,s)$ -ideals of compact operators. *Czechoslovak Math. J.*, 62, 673-693.

Lima, Å., Lima, V., Oja, E. (2010a). Bounded approximation properties via integral and nuclear operators. *Proc. Amer. Math. Soc.*, 138, 287-297.

Lima, Å., Lima, V., Oja, E. (2010b). Absolutely summing operators on  $C[0, 1]$  as a tree space and the bounded approximation property. *J. Funct. Anal.*, 259, 2886-2901.

Lima, Å., Lima, V., Oja, E. (2012). Bounded approximation properties in terms of  $C[0,1]$ . *Math. Scandinavica*, 110, 45-58.

- Lima, Å., Lima, V., Oja, E. (2014). Absolutely summing operators on separable Lindenstrauss spaces as tree spaces and the bounded approximation property. *Banach J. Math. Anal.*, 8, 190-210.
- Lima, Å., Oja, E. (2005). The weak metric approximation property. *Math. Annalen*, 333, 471-484.
- Lissitsin, A., Oja, E. (2011). The convex approximation property of Banach spaces. *J. Math. Anal. Appl.*, 379, 616-626.
- Oja, E. (1979). Bamako-päevade pudemeid. *Noorus*, 11, 22-25; *Noorus*, 12, 26-28.
- Oja, E. (2001). Teaduspreemia täppisteaduste alal tööde tsükli "Banachi ruumide aproksimatsiooniomadused ja kaasruumide geomeetria" eest. Eesti Vabariigi teaduspreemiad 2001. Eesti Teaduste Akadeemia, Tallinn, 22-29.
- Oja, E. (2006a). The impact of the Radon-Nikodým property on the weak bounded approximation property. *Rev. R. Acad. Cien. Ser. A. Mat.*, 100, 325-331.
- Oja, E. (2006b). Lifting bounded approximation properties from Banach spaces to their dual spaces. *J. Math. Anal. Appl.*, 323, 666-679.
- Oja, E. (2010). On bounded approximation properties of Banach spaces. *Banach Algebras 2009*. Banach Center, Warszawa, 219-231. (Banach Center Publ.; 91).
- Oja, E. (2011a). Bounded approximation properties via Banach operator ideals. *Advanced Courses of Mathematical Analysis IV. Proceedings of the Fourth International School. In Memory of Professor Antonio Aizpuru Tomas, Jerez de la Frontera, 8-12 September 2009*. World Scientific, New Jersey–London–Singapore, 196-215.
- Oja, E. (2011b). Inner and outer inequalities with applications to approximation properties. *Trans. Amer. Math. Soc.*, 363, 5827-5846.
- Oja, E. (2012a). A remark on the approximation of  $p$ -compact operators by finite-rank operators. *J. Math. Anal. Appl.*, 387, 949-952.
- Oja, E. (2012b). Grothendieck's nuclear operator theorem revisited with an application to  $p$ -null sequences. *J. Funct. Anal.*, 263, 2876-2892.
- Oja, E., Zolk, I. (2013). The asymptotically commuting bounded approximation property of Banach spaces. *J. Funct. Anal.*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfa.2013.07.028>
- Oja, E., Treialt, S. (2013). Some duality results on bounded approximation properties of pairs. *Studia Math.*, 217, 79-94.
- Uustalu, T. (2013). Teadus ja väärtus. Teadusmõtte Eestis (VIII). Teaduskultuur. Eesti Teaduste Akadeemia, Tallinn, 11-15.

*Teaduspreemia keemia ja molekulaarbioloogia alal  
uurimuste tsükli  
“Funktsionaalsed materjalid elektrokeemilisteks rakendusteks” eest*



*Kaido Tammeveski*

Sündinud 13.03.1964 Tartus

1982 Antsla Gümnaasium

1989 Tartu Ülikool, keemia

1998 PhD, keemia, Tartu Ülikool

1999–2000 järel doktorantuur Liverpools Ülikoolis

Alates 1989 Tartu Ülikooli füüsikalise keemia instituudi teadur, dotsent; alates 2006 keemia instituudi kolloid- ja keskkonnakeemia õppetooli juhataja

Avaldanud 80 teaduspublikatsiooni

## SISSEJUHATUS

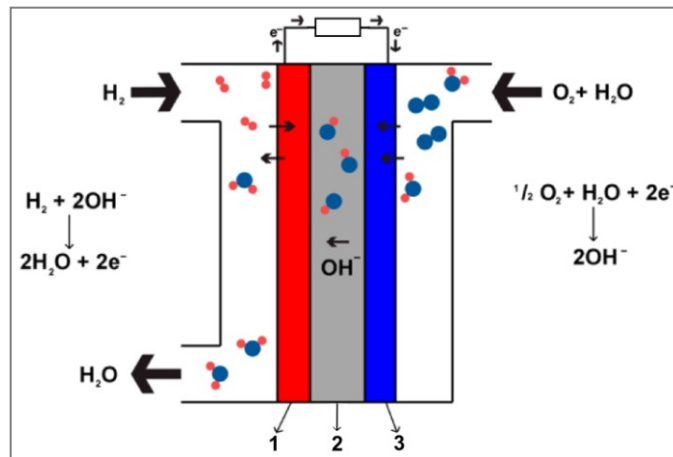
Nanostruktuursete materjalide elektrokatalüütiliste omaduste uurimisest on viimase paari kümnendiga kujunenud keskne teema elektrokeemiateaduses. Peamine eesmärk on leida seoseid katalüütiliste omaduste ja katalüsaatori struktuuri vahel, et töötada välja veelgi kõrgema aktiivsusega elektrokatalüsaatoreid. Kuna katalüsaatormaterjale kasutatakse muu hulgas madalatemperatuurilistes kütuseelementides ja metall-õhk patareides, on vajadus sellise uurimistöo järele ilmne. Kütuseelement on seade, mis muudab süsteemi komponentide keemilise energia elektrienergiaks. Kütuseelemendi katoodil toimub hapniku reduktsioon ja anoodil vesiniku (kütuse) oksüdatsioon (joonis 1).

Kütuseelemendid, mis töötavad madalamal temperatuuril kui  $100^{\circ}\text{C}$ , on osutunud väga atraktiivseteks energia muundamise tehnoloogia seadmeteks mitmes valdkonnas (sh autotranspordis). Sellist tüüpi kütuseelementides kasutatakse enamasti plaatinal ning Pt sulamitel põhinevaid katalüsaatoreid. Plaatina kõrge hind ning piiratud kättesaadavus on peamised tegurid, mis piiravad madalatemperatuuriliste kütuseelementide laiemat rakendust. Seetõttu on viimastel aastatel kujunenud üheks oluliseks suunaks selliste elektrokatalüsaatorite väljatöötamine, mis oleksid alternatiiviks kallihinnalisele plaatinalle. Põhilised nõuded uudsetele ja oluliselt odavamatele katoodimaterjalidele on kõrge elektrokatalüütiline aktiivsus ja stabiilsus nende pikaajalises kasutamisel kütuseelemendi tingimustes. Need näitajad peaksid olema võrreldavad tehnika viimase sõna järgi valmistatud Pt-katalüsaatorite vastavate näitajatega.

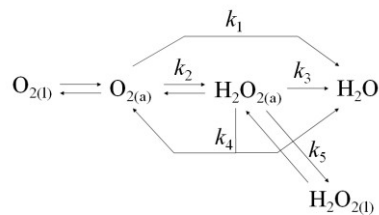
Madalatemperatuurilised  $\text{O}_2\text{-H}_2$  kütuseelemendid jagunevad membraani tüübist lähtuvalt prootonvahetusmembraaniga ja anioonvahetusmembraaniga kütuseelementideks. Eristatakse veel teisigi kütuseelemendi tüüpe, kui kasutada vesiniku asemel kütusena teisi aineid (metanool, etanool, metaanhape jt). Loomulikult on keskkonnahoiu seisukohast eelistatuim kütus vesinik, sest sellisel juhul on ainsaks saaduseks kütuseelemendis toimuvates protsessides vesi. Üks suurem eesmärk on rakendada kütuseelemente autodes sisepõlemismootorite asemel. Vesiniku kasutamisel kütusena osutub ülimalt keeruliseks probleemiks selle mahutamine, sest tegemist on toatemperatuuril gaasilise ainega, mille suure rõhu all hoidmiseks on vajalikud gaasiballoonid, mille transport on komplitseeritud. Seetõttu tehakse järjest laiaulatuslikumat uurimistööd, et võtta kasutusele üha uued kütused. Edasiminekuks sellel alal on ilmne, aga paljud probleemid alles ootavad lahendamist.

Meie töörühm uurib just kütuseelemendi katoodil toimuvat protsessi, milleks on hapniku elektrokeemiline redutseerumine.  $\text{O}_2\text{-H}_2$  kütuseelementide teoreetilisest madalam efektiivsus ongi põhjustatud peamiselt hapniku redutseerimisprotsessi aeglasest kulgemisest katoodil. Hapniku elektrokeemiline redutseerumine on mitme-elektroniline protsess (vt joonis 2).

Hapnik võib redutseeruda 4-elektronilisel protsessil veeks või 2-elektronilisel protsessil vesinikperoksiidiks. Need protsessid võivad toimuda ka üheaegselt



Joonis 1. Anioonvahetusmembraaniga kütuseelemendi tööprintsip. 1-anood, 2-anioonvahetusmembraan ja 3-katood.



Joonis 2. Hapniku redutseerumise lihtsustatud skeem, kus  $k_i$  tähistab vastavaid kiiruskonstante. (a) ja (l) vastavad  $\text{O}_2$  ja  $\text{H}_2\text{O}_2$  esinemisele adsorbeerunud olekus ja lahuses.

ja eelistatud reaktsioonitee sõltub peamiselt katalüsaatormaterjalist, potentsiaalset ja elektrolüüdilahuse koostisest (Tammeveski, 1998). Hapniku neljaelektronilist redutseerumist katalüüsivad eelkõige platinametallid ning Pt on sellele reaktsioonile parim monometalne katalüsaator. Kahjuks pärsib platinale kõrge hind kütuseelementide komertsialiseerimist. Seetõttu tegeletakse viimasel ajal väga aktiivselt platinale asendajate otsimisega, millel oleks võrreldav elektrokatalüütiline aktiivsus ja piisav pikaajaline stabiilsus kütuseelemendis rakendamiseks. Kõige perspektiivsemad alternatiivid platinale tunduvad olevat M-N-C tüüpi katalüsaatorid, kus M on metall (eelkõige Co, Fe, aga ka Mn või Cu jt), mis on seondunud süsinikmaterjalide struktuuri viidud lämmastikutsentrile. Varem valmistati sellised katalüsaatorid  $\text{MN}_4$  makrotsükliliste ühendite (metalloporfüriinid, metalloftalotsüaniinid jt) kuumtöötlemisel. Praeguseks on selgunud, et samasuguse keemilise loomusega aktiivseid tsentreid süsinikmaterjalide pinnal saab tekitada ka lihtsamate ning oluliselt

odavamate ühendite pürolüüsil. Seega on täiesti olemas väljavaade asendada kütuseelemendi katoodil kallihinnaline plaatina mõne palju odavama katalüsaatormaterjaliga. See looks võimaluse kütuseelementide hinda märkimisväärselt alandada ning aitaks seeläbi juurutada neid seadmeid tavatarbimisse.

## KUIDAS KÕIK ALGAS

Minu sattumine sellesse valdkonda oli mõnes mõttes juhuslik. 1980ndatel aastatel tegeldi professor Toomas Tenno töörühmas intensiivselt amperomeetrilise hapnikuanduri uurimisega ning arendustööga selles vallas. Hapnikuandur määrab hapnikusisaldust ning on seega vajalik mõõtevahend keskkonnamonitooringus ja ka mitmes tehnoloogilises protsessis (sh reoveepuhastuses). Pärast diplomitöö kaitsmist liitusin selle töörühmaga ning esimene ülesanne oli välja töötada seade naha hapnikutarbe määramiseks, mis põhineks amperomeetrilisel hapnikuanduril. Tol ajal kasutusel olnud andureid oli keeruline sellel eesmärgil rakendada nende suurte mõõtmete tõttu. Sellega seoses tõusetas vajadus miniatuursete hapnikuandurite järele. Andurite mõõtmeid tuli oluliselt vähendada ning kasutada uudset tehnoloogiat nende valmistamiseks. Kirjandusotsing näitas, et miniatuursete sensorite puhul võiks nende elektrootodide valmistamiseks kasutada õhukese kile tehnoloogiaid, käesoleval juhul siis vaakumaurustamist või magnetrontolmustamist. Põhimõte on selles, et metall kas aurustatakse vaakumis või tolmustatakse ja see sadeneb alusmaterjali pinnale õhukese kilena ning maski abil saab metallikilele anda vajaliku kuju.

Eelnimetatud meetodid olid kasutuses Eesti Teaduste Akadeemia füüsika instituudis (FI) ning sellest sai alguse minu esimene koostöö FI teadlastega (Väino Sammelselg, Arnold Rosental, Jaan Aarik). Vahemärkusena olgu öeldud, et ka FIs, kus eelneval perioodil oli tegeletud põhiliselt alusuuringutega, hakati otsima võimalikke rakenduslikke väljundeid. Ning seda aspekti silmas pidades võib-olla polnudki miniatuursete sensorite valmistamine esmapilgul üldse halb mõte. Enne kui me jõudsime midagi toimivat välja töötada, leidsid nii ülikoolis kui ka kogu riigis aset suured muudatused. Isiklikus plaanis tähendas see seda, et pärast kolme aastat töötamist nooremteadurina astusin ma 1992. a magistrantuuri. Seetõttu tuli uurimisteema sõnastada teaduslikumas võtmes, sest hapnikuanduri uurimine ei paistnud teadusmagistri kraadi taotlemiseks piisavalt atraktiivsena. Samas jäime senise temaatika juurde, formuleerides teemaks hapniku elektrootseerumise uurimise õhukestel metallkatetel. Amperomeetrilise hapnikuanduri katoodil toimub teadupärast hapniku redutseerumine ning selle protsessi uurimisega olin ma eelnevatel aastatel põgusalt algust teinud, aga eelkõige rakenduslikel eesmärkidel. Nüüd pidin astuma sammukese lähemale alusuuringutele. Pärast magistratöö kaitsmist (Tammeveski, 1993) jätkasin sama teemaga doktorantuuris. Peagi selgus, et meil kasutada olev aparatuur ei võimalda teha vajalikul tasemel elektrokeemilisi mõõtmisi.

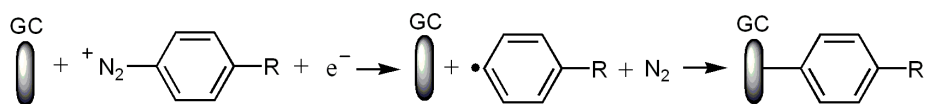
Selleks, et uurimistööga edasi liikuda, kasutasin 1995. a ära võimaluse suunduda Tempuse projekti raames Barcelona Ülikooli. Need välisülikoolis töötatud neli kuud osutusid minu edasise teadlaskarjääri seisukohast üliolulisteks. Barcelonas töötasin professor Josep Clareti rühmas, kus olid viljakaks teadustööks tagatud kõik võimalused ning tulemuste saavutamine sõltus eelkõige vaid minust endast. Töö iseloomu tõttu olid tööpäevad pikad, millele sageli lisandusid ka töised nädalavahetused. See töö oli aga äärmiselt vajalik, et koguda doktoritöö jaoks kvaliteetseid andmeid, sest Tartus olid tol ajal tingimused teadustöö tegemiseks palju kehvemad. Näiteks puudus meil kõrglahutusega läbistuselektronmikroskoop, mis oli Barcelonas olemas. See oli veel vanemat tüüpi mikroskoop, mis ei salvestanud kujutist digitaalsel kujul, vaid see jäädvustati filmilindile. Mikroskoopilisi mõõtmisi aitas läbi viia operaator, aga pildid tuli endal ilmutada. Nii pidin elus esimest korda tegelema fotograafiaga. Aga Pt nanoosakeste mikrofotod tulid suurepärased ja nendel olid selgesti näha ka Pt aatomite read. Koostöös Barcelona Ülikooli teadlastega avaldasime kaks artiklit (Tammeveski jt, 1997ab), mis andsid olulise panuse minu doktoritöö valmimisse.

Seejärel sain minna CIMO grandiga viieks kuuks Helsingi Tehnikaülikooli (praegune Aalto Ülikool) professor Lauri Niinistö laborisse (1996. a). Seal uurisin põhiliselt Pt-TiO<sub>2</sub> segakatalüsaatorite elektrokeemilisi omadusi hapniku redutseerumisel. Need materjalid valmistasime termilise lagundamise meetodil. Katalüsaatorite valmistamisprotseduuri optimeerimine oli küllaltki aeganõudev tegevus, aga jällegi olid seal laboris olemas kõik vajalikud meetodid õhukeste kilede pinna uurimiseks. Tuleb mainida, et tolles laboris töötades kujunes mu töökeeleks eesti keel, sest Niinistö tõsise estofiilina eelistas kõneleda minuga mu emakeeles ja kõrvalruumis töötas tol korral doktorant Kaupo Kukli, kes oli mulle suureks abiks tehniliste probleemide lahendamisel. Soomes kogutud andmete põhjal avaldasime artikli (Tammeveski jt, 1999) ning seejärel võisin asuda doktoritööd kaitsma. Kaitsmine toimus 1998. a oktoobris, oponentideks olid professorid Kyösti Kontturi ja Vello Past.

Doktoritöö kaitsmise järel tegi Kyösti mulle pakkumise suunduda järeldoktorantuuri Liverpooli Ülikooli, sest neil oli ühine projekt sealse elektrokeemia professori David J. Schiffriniga ning TEKESi finantseeritud projekti teostamiseks vajati asjatundjat hapniku redutseerumise alal. David oli elektrokeemiamailmas tuntud tegija, aga ta kogus 1990ndate keskel lisa-kuulsust kulla nanoosakeste uudse sünteesimeetodiga, mille ta pakkus välja koos Mathias Brustiga jt kolleegidega. Minu tööülesandeks oli tegeleda vesinik-peroksiidi elektrokeemilise sünteesiga, täpsemalt uurida peroksiidi produktsiooni kütuseelemendi tingimustes. Eesmärk oli kasutada sama seadet, mis on välja toodud joonisel 1, aga valida selline katalüsaator, mis katalüüsiks hapniku 2-elektronilist redutseerumist vesinikperoksiidiks (vt joonis 2). Seega protsess, mis tavalises kütuseelemendis on täiesti ebavajalik ning vähendab elemendi efektiivsust, osutus antud juhul taotluslikuks. Materjalide valik, mis võimaldaks



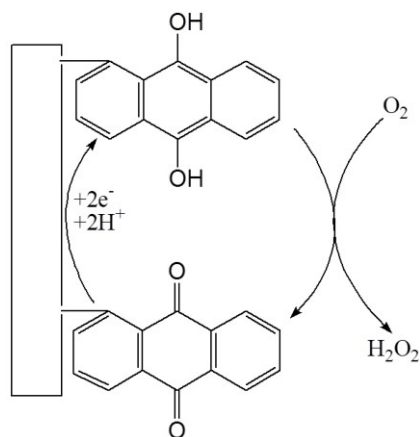
selektiivselt teostada kaheelektronilist redutseerumist peroksiidiks pole kuigi suur. Me otsustasime teha panuse pinnaga seondunud kinoonidele. Selleks kasutasime uudset meetodit, mis põhineb vastavate diasooniumi-soolade elektrokeemilisel redutseerumisel (joonis 3).



Joonis 3.

Klaassüsinikelektroodi (GC) pinna modifitseerimine arüülrühmadega diasooniumisoolade elektroredutseerumisel.

Protsessi esimeses etapis moodustub arüülradikaal, mis teises etapis seondub kovalentselt süsinikmaterjali pinnaga. Tekkiv kovalentne C-C side tagab olukorra, et modifikaator ei desorbeeru pinnalt selle pikaajasel kasutamisel. See on eriti tähtis praktilistes rakendustes, muu hulgas vesinikperoksiidi elektrokeemilisel sünteesil. Peroksiidi kasutatakse mitmes tööstusharus laialdaselt ja see kuulub 20 enimtoodetud anorgaanilise kemikaali hulka (2013. a toodeti ligikaudu  $4 \times 10^6$  tonni). Vesinikperoksiid on väga keskkonnasõbralik reagent, sest selle lagunemise saadusteks on  $\text{O}_2$  ja vesi, mis on keskkonnas niigi olemas. Peroksiidi kasutatakse põhiliselt paberitööstuses pleegitajana (varem kasutati selleks kloori, aga kloor on palju mürgisem), reoveepuhastuses, keemiatööstuses, desinfitseerijana jm valdkondades. Peroksiidi elektrosünteesi skemaatiline esitus on välja toodud joonisel 4 (Sarapuu jt, 2003).



Joonis 4.

Vesinikperoksiidi elektrokeemiline süntees antrakinooniga modifitseeritud elektroodil.

Traditsiooniliselt toodetakse peroksiidi antrakinooni protsessil, aga selleks, et see ennast ära tasuks, peab ühes tehases toodetud kogus olema küllaltki suur. Elektrokeemilisel sünteesil on mitmeid eeliseid teiste sünteesimeetodite ees, nagu näiteks paindlikkus, toota saab lokaalselt ning pole tarvis suuri tootmishooneid. Me leidsime, et kinoonidega modifitseeritud elektrodid on suurepäraseks katalüsaatoriks hapniku redutseerumisel vesinikperoksiidiks (Tammeski jt, 2001), kuid kõiki elektrosünteesiga seotud tehnilisi probleeme ühe järel doktorantuuri aastaga lahendada ei õnnestunud ning selle teemaga tegelesime edaspidi veel kahe Euroopa Liidu raamprogrammi projekti raames.

Pärast järel doktorantuuri saabusin 2000. a sügisel tagasi Tartusse ning sain teadustööd jätkata juba mõnevõrra paremates tingimustes, sest aparatuurne baas oli vahepeal täienenud (soetatud oli esimene arvuti poolt juhitud potentsiostaat elektrokeemilisteks mõõtmisteks, Flisse osteti aatomjõumikroskoop, jne). Lisatõuke teadustegevuse edenemisele andis kolimine uude keemiahoonesse 2009. a sügisel. Vanas majas töötas tipp hetkel meie 28 m<sup>2</sup>-ses laboris seitse inimest!

#### KOKKUVÕTE TEADUSTULEMUSTEST

Nanostruktuursete materjalide elektrokatalüütilist aktiivsust hapniku redutseerumisel iseloomustatakse mitmesuguste kineetiliste parameetritega (vahetusvoolu tihedus ( $j_0$ ), standardne heterogeense laenguülekande kiiruskonstant ( $k^\circ$ ), poollainepotentsiaal ( $E_{1/2}$ ), eriaktiivsus (SA) ja massaktiivsus (MA)). Enamasti määratakse need parameetrid pöörleva ketaselektroodi meetodil saadud andmetest (registreeritakse hapniku redutseerumise polarisatsioonikõverad erinevatel elektroodi pöörlemiskiirustel). Parameetrite määramiseks leitakse kõigepealt kineetilise voolu ( $i_k$ ) väärtused erinevatel elektrodipotentsiaalidel ( $E$ ) ning koostatakse saadud andmete alusel massiülekanne osas korrigeeritud Tafeli sõltuvuse ( $E$  vs  $\log i_k$ ) graafikud. Hapniku elektroredutseerumisel on  $j_0$  ja  $k^\circ$  väärtuste täpne määramine sageli komplitseeritud. Ka  $E_{1/2}$  ei anna alati materjali aktiivsuse kohta ühest informatsiooni, kuna sõltub muu hulgas elektroodi pöörlemiskiirusest ( $\omega$ ) ja katalüsaatori kogusest pinnal.

Seega on kõige olulisemad hapniku redutseerumise aktiivsust iseloomustavad kineetilised parameetrid eriaktiivsus ja massaktiivsus. SA saadakse  $i_k$  läbijagamisel elektrokatalüsaatori tõelise pindalaga ( $A_r$ ) konstantsel potentsiaalil. Alusuuringute puhul on just SA kõige tähtsam kineetiline parameeter. Katalüütilist aktiivsust iseloomustab ka muundumiskiirus (muundumiste arv aktiivse tsentri kohta ajaühikus). Viimast suurust on raske määrata, sest sageli pole teada, milline on aktiivsete tsentrite arv pinnal. Metallkatalüsaatorite puhul tehakse mõnikord lihtsustus ning võetakse aktiivsete tsentrite arv võrdseks metalli pindaatomite arvuga, aga enamasti pole selline lähenemine adekvaatne. Elektrokatalüüsi puhul on eriti oluline välja selgitada, kuidas sõltub katalüütiline aktiivsus osakese suurusest. Eksperimentaalsel lähenemisel varieeri-

takse osakese suurst ning uuritakse selle mõju hapniku elektroredutseerumise aktiivsusele. Elektrokatalüsaatorite praktiliseks rakendamiseks kütuseelementides on kõige olulisem neid iseloomustav suurus massaktiivsus (eriti väärismetallkatalüsaatorite puhul). Sellest sõltub suurel määral kütuseelemendi hind. MA saadakse  $i_k$  läbijagamisel elektrokatalüsaatori massiga. Mida kõrgem MA, seda vähem väärismetallkatalüsaatorit kulub ja seda odavamalt on võimalik kütuseelementi toota. Sageli nõuab see elektrokatalüsaatori disaini optimeerimist, et saavutada võimalikult kõrge MA. Lisaks peab rakenduste puhul elektrokatalüsaator olema piisavalt stabiilne.

Järgnevalt on toodud ülevaatlukult meie töörühma viimase 10 a põhilised teadustulemused.

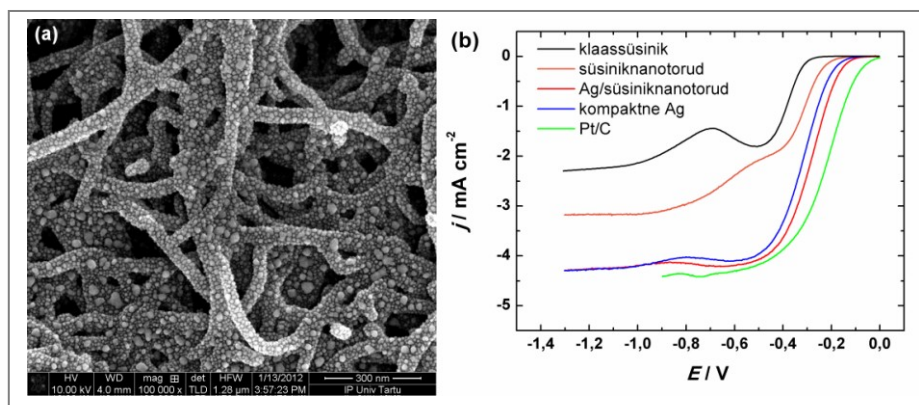
#### HAPNIKU REDUTSEERUMINE NANOSTRUKTUURSETEL ELEKTROODIDEL

Praktilised väärismetallkatalüsaatorid kujutavad endast odavale süsinikkandjale kantud nanoosakesi. Me oleme kasutanud mitmesuguseid sünteesismeetodeid mono- ja bimetalsete nanoosakeste valmistamiseks. Katalüsaatorikandjana on pakkunud viimasel ajal suurt huvi süsinikkanotorud ning seetõttu oleme palju tähelepanu pööranud nanotorudel põhinevate komposiitmaterjalide elektrokatalüütiliste omaduste uurimisele hapniku redutseerumisel.

Sünteesisime kahel erineval meetodil Pd-M bimetalised nanoosakesed (M = Fe, Co), mille viisime kommertsiaalsele suurepinnalisele süsinikkandjale (Vulcan XC-72R). Vaatlesime sünteetingimuste mõju eriaktiivsusele jt kiineetilistele parameetritele. Pd-M nanoosakesed näitasid kõrget katalüütilist aktiivsust hapniku 4-elektronilisel redutseerumisel. Nende eriaktiivsus oli kõrgem kui kompaktsel Pd-elektroodil (Alexeyeva jt, 2011).

Me uurisime ka O<sub>2</sub> elektroredutseerumise kineetikat kommertsiaalsetel 20% ja 30% Au/C katalüsaatoritel. Leidsime, et katalüsaatorikihi paksus (vahemikus 1,5–10 µm) ei mõjuta redutseerumisprotsessi kineetikat, seega nendes tingimustes ei limiteeri protsessi aeglane massiülekanne läbi katalüsaatorikihi (Erikson jt, 2009). Selle töö edasiarenduseks oli erisuguse kujuga kulla nanoosakeste süntees ning nende elektrokatalüütiliste omaduste uurimine. Selgus, et kõrgeima eriaktiivsusega on kuubikujulised Au nanoosakesed. Põhjuseks on see, et nende pinnal domineerib (100) tahk ja see on ka monokristalsete Au(*hkl*)-elektroodide korral aktiivsem tahk hapniku elektroredutseerumisel. Me oleme kasutanud ka tsitraadi meetodil sünteesitud Au nanoosakesi (suurus 15 ± 3 nm) ning valmistanud kiht kihi haaval Au nanoosakestest ning süsinikkanotorudest koosnevaid komposiitmaterjale. Elektrokatalüütiline aktiivsus kasvas kihtide arvu suurenemisega, mis on eelkõige seotud elektroaktiivse kulla pindala suurenemisega (Alexeyeva, Tammeveski, 2008). Veel oleme teostanud kulla elektrosadestamist ja leidnud, et see on hea O<sub>2</sub> redutseerumise katalüsaator leeliselises lahuses, aga üsna tagasihoidliku katalüütilise aktiivsusega happelises keskkonnas.

Koostöös TÜ füüsika instituudi teadlastega kasutasime magnetrontolmustamist nanotorude katmiseks väärismetallkatalüsaatoriga (Au, Ag, Pd, Pt). Varieerisime sadestatud Pd ja Pt kogust ning uurisime selle mõju komposiitmaterjali elektrokatalüütilisele aktiivsusele  $O_2$  redutseerumisel (Jukk jt, 2013ab). Süsiniknanotorudele sadestatud Ag nanoosakesed osutusid väga aktiivseks katalüsaatoriks hapniku redutseerumisreaktsioonile leeliselises lahuses (joonis 5). Selle komposiitmaterjali eriaktiivsus 0,1 M KOH lahuses oli mõnevõrra kõrgem, võrreldes kompaktsel Ag-elektroodi omaga (Tammeveski jt, 2012). Selgus ka, et Ag/nanotorud komposiitmaterjal on kõrge elektrokatalüütilise aktiivsusega peroksiidi redutseerumisel. Kuna hõbeda hind on märkimisväärselt madalam võrreldes Pt hinnaga, siis on Ag näol tegemist perspektiivse katoodimaterjaliga anioonvahetusmembraaniga kütuseelemendis.



Joonis 5.

(a) Ag/süsiniknanotorud katalüsaatori mikrofoto. (b) Hapniku redutseerumise polarisatsioonikõverad erinevatel elektroodidel  $O_2$ -küllastatud 0,1 M KOH lahuses.  $\omega = 960 \text{ p min}^{-1}$ ,  $\nu = 10 \text{ mV s}^{-1}$ . Võrdluselektrood: küllastatud kalomelektrood.

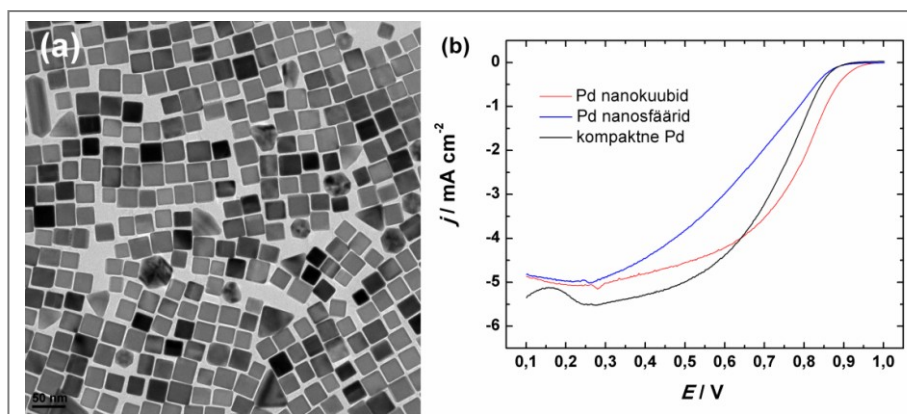
Vaakumaurustatud õhukesed metallikiled koosnevad üksikutest saarekestest ning seetõttu võib neid vaadelda kui nanostruktuurseid katalüsaatoreid, mille abil saab uurida osakese suurusest põhjustatud efekte ja alusmaterjali mõju elektrokatalüütilisele aktiivsusele. Seega võib õhukesekilisi elektroode kasutada praktiliste katalüsaatorite mudelsüsteemina. Kõige aktiivsem hapniku redutseerumise katalüsaator on Pt, kuid me oleme sadestanud ka Pd kiled (paksusega 0,5–20 nm) klaassüsinik- või kuldelektroodidele (Sarapuu jt, 2008ab; Sarapuu jt, 2010; Erikson jt, 2011a). Elektrokeemilised mõõtmised viisime läbi erinevates lahustes ( $H_2SO_4$ ,  $HClO_4$ , KOH), et uurida anioonide adsorptsioonist põhjustatud efekte. Meil õnnestus näidata, et  $O_2$  redutseerumi-

se mehhanism õhukesekilelistel elektroodidel on sama, mis kompaktsel Pt- ja Pd-elektroodidel, ning kiirust limiteerivaks staadiumiks on esimese elektroni aeglane ülekanne O<sub>2</sub> molekulile. Õhukestel Pt- ja Pd-kiledel on domineerivaks protsessiks hapniku 4-elektroniline redutseerumine kõigis uuritud lahustes. Hapniku redutseerumise eriaktiivsus ei sõltunud olulisel määral kasutatud alusmaterjalist, kuid mõnel juhul SA väärtus vähenes nominaalse kattepakuse ja osakese suuruse vähenedes. Vaakumaurustatud Au-kiledel kulges eelistatult hapniku 2-elektroniline redutseerumine happelises lahuses, aga leeliselises lahuses domineeris 4-elektroniline protsess (Sarapuu jt, 2008c). Sellel alal tegime koostööd prof Kyösti Kontturi töörühmaga Aalto Ülikoolis.

Metalli nanoosakeste elektrokatalüütiline aktiivsus sõltub lisaks osakeste suurusele ka nende kujust. Seetõttu on tänapäeval uue suunana tõusnud esile etteantud kujuga nanoosakeste süntees ja nende elektrokatalüütiliste omaduste uurimine. Eriti oluline on see just hapniku redutseerumisreaktsiooni puhul, mis on katalüsaatori struktuurist sõltuv reaktsioon. Seetõttu peaks etteantud kujuga metalli nanoosakeste süntees võimaldama valmistada veelgi paremate elektrokatalüütiliste omadustega katalüsaatoreid madalatemperatuuriliste kütuselementide jaoks. Kuubikujulisi Pd nanoosakesi uurisime koostöös Alicante Ülikooli teadlastega (prof Juan M. Feliu, dr Jose Solla-Gullon). Pd nanoosakeste suurus oli 27 nm ning nende eriaktiivsus hapniku redutseerumisel oli kõrgem nii happelises kui ka leeliselises lahuses võrreldes sfääriliste Pd nanoosakestega ja kompaktsel Pd-elektroodiga (joonis 6). Kõrgem aktiivsus on nähtavasti seotud (100) eelistatud orientatsiooniga nanosakeste pinnal ja Pd(100) on kõige kõrgema O<sub>2</sub> redutseerumise aktiivsusega monokristalse Pd(*hkl*)-elektroodi tahk. Sellel tahul on ka kõige nõrgem SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-ioonide adsorptsioon, viimased teadupärast inhibeerivad O<sub>2</sub> redutseerumist. Ka Pd nanoosakeste pinnal toimub hapniku 4-elektroniline redutseerumine ning Tafeli analüüs näitas, et O<sub>2</sub> redutseerumise mehhanism on sama, mis sfäärilistel Pd nanoosakestel ja kompaktsel Pd-elektroodil (Erikson jt, 2011b; Erikson jt, 2012).

#### HAPNIKU ELEKTROREDUTSEERUMINE SÜSINIKNANOMATERJALIDEL PÕHINEVATEL KATALÜSAATORITEL

Me oleme uurinud hapniku redutseerumist mitmesugustel süsiniknanomaterjalidel, mida võib kasutada kas elektrokatalüsaatorina või katalüsaatorikandjana. Koostöös Tartu firmaga Skeleton Technologies OÜ uurisime O<sub>2</sub> redutseerumisprotsessi esmakordselt karbiidset päritolu süsinikmaterjalidel leeliselises lahuses. Sellisel viisil saab valmistada katalüsaatoreid, millel on kõrge eripind ja sobiv pooride jaotus (eriti tähtis roll on seejuures mesopooridel). Elektrokeemilised mõõtmised viisime läbi pöörleva rõngaga ketaselektroodi meetodil. Kõik uuritud materjalid näitasid kõrget elektrokatalüütilist aktiivsust hapniku 2-elektronilisel redutseerumisel peroksiidiks (Kruusenberg jt, 2010a). Nähtavasti on see põhjustatud nende süsinikmaterjalide pinnal olevatest kiirgustest tüüpi funktsionaalrühmadest.



Joonis 6.

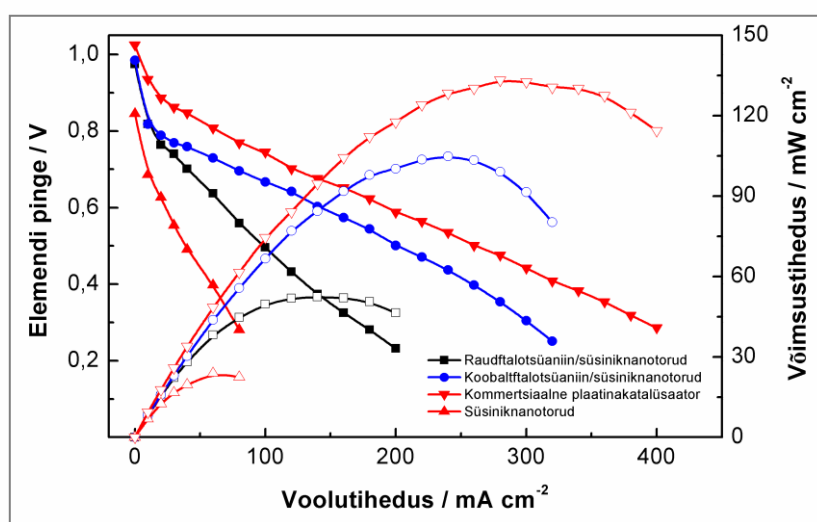
(a) Pd nanokuupide mikrofoto. (b) Hapniku redutseerumise polarisatsioonikõverad erinevatel elektroodidel  $O_2$ -küllastatud 0,5 M  $H_2SO_4$  lahuses.  $\omega = 1900 \text{ p min}^{-1}$ ,  $v = 10 \text{ mV s}^{-1}$ . Võrdluselektrood: pöörduv vesinikelektrood.

Süsteemaatiliselt oleme uurinud hapniku elektroredutseerumist süsinikanotorudega (ühe-, kahe- ja mitmeserialised) modifitseeritud elektroodidel (Jürmann, Tammeveski, 2006; Kruusenberg jt, 2010b). Võrdleval eesmärgil kasutasime erinevaid pindaktiivseid aineid nanotorude dispergeerimiseks enne pinda modifitseerimist. Selgitasime välja lahuse pH mõju  $O_2$  redutseerumisprotsessile nanotorudega modifitseeritud elektroodidel (Kruusenberg jt, 2009). pH-sõltuvuse uurimisel selgus, et madalamatel pH väärtustel on üleminevate elektronide arv ligikaudu 2, mis näitab, et toimub  $O_2$  redutseerumine peroksiidiks, kõrgema pH-ga lahustes näitasid süsinikanotorud suurepäraselt elektrokatalüütilist aktiivsust.

Selgitasime välja ka süsinikanotorudes nende valmistamise käigus keemilisel aurufaasist sadestamisel jäänud metalsete lisandite mõju hapniku redutseerumisprotsessile (Alexeyeva, Tammeveski, 2007). Hapetega töötlemine võimaldab oluliselt vähendada lisandite (enamasti Fe) kogust nanotorudes ning seeläbi muuta nende elektrokatalüütilisi omadusi.

Süsinikanotorusid kasutasime ka katalüsaatorikandjatena, sadestades nende pinnale  $MN_4$  makrotsüklilisi ühendeid (metalloporfüriinid, metalloftalotsüaniinid). Uurisime kuumtöötlemise mõju nende materjalide elektrokatalüütilistele omadustele  $O_2$  redutseerumisel ja leidsime, et pürolüüs  $800^\circ\text{C}$  juures annab kõrgeima elektrokatalüütilise aktiivsuse ning tõstab oluliselt katalüsaatormaterjalide stabiilsust elektrokeemilistes tingimustes. Pürolüüsi käigus  $MN_4$  makrotsüklilise ühendi lagunemise ja tekivad aktiivsed M- $N_x$  tsentrid süsinikmaterjalide pinnal. Makrotsükliliste ühendite pürolüüsil saadud katalüsaatoreid rakenda-

sime anioonvahetusmembraaniga kütuseelemendi katoodimaterjalina (joonis 7), kuid anoodiks oli kommertsiaalne Pt/C katalüsaator. Koobaltfaloosüaniin/süsiniknanotorud katalüsaator näitas märkimisväärselt kõrget võimsustihedust ( $100 \text{ mW cm}^{-2}$ ), mis jäi ainult veidi alla võrdluseks kasutatud Pt/C katalüsaatorile ( $120 \text{ mW cm}^{-2}$ ). Seega on pürolüüsitud  $\text{MN}_4$  makrotsükliliste ühendite näol tegemist perspektiivse katalüsaatormaterjaliga sellist tüüpi kütuseelementidele (Kruusenberg jt, 2012). Seda tööd võib pidada sellel alal teedrajavaks, sest Pt-vaba katalüsaatoriga pole sellist tüüpi kütuseelementides nii häid väljundkarakteristikuid varem saavutatud. Neid katalüsaatoreid uurisime koostöös dr Arunachala Madakannani töörühmaga Arizona Riiklikus Ülikoolis.



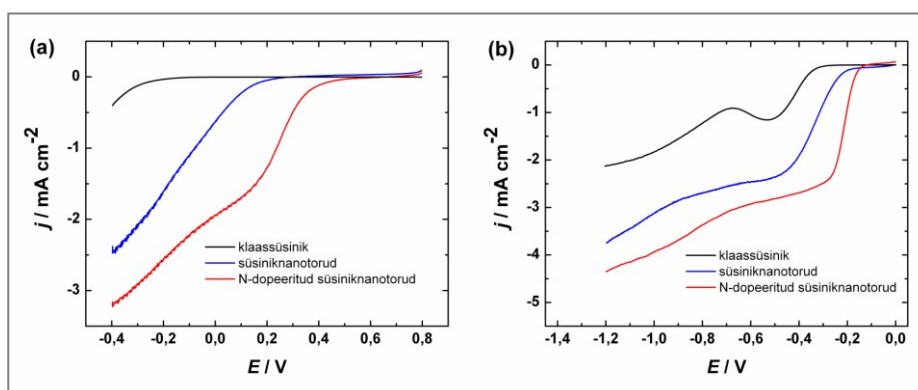
Joonis 7.

Anioonvahetusmembraaniga kütuseelemendi polarisatsioonikõverad ja võimsustihedus-voolutihedus sõltuvuse graafikud erinevate katoodimaterjalide korral.

Lisaks süsiniknanotorudele oleme kasutanud katalüsaatorikandjana ka redutseeritud grafeenoksiidi nanoliistakuid.  $\text{MN}_4$  makrotsüklilised ühendid seondati grafeenile füüsikalise adsorptsiooni meetodil, kusjuures kuumtöötlemist ei tehtud. Saadud elektrokatalüsaatorid osutusid väga aktiivseteks  $\text{O}_2$  elektrokeemilisel redutseerumisel 0,1 M KOH lahuses, mis näitab grafeeni tähtsust sellist tüüpi katalüsaatorite puhul (Kruusenberg jt, 2013). See töö jätkub, et rakendada katalüsaatorikandjana grafeen/süsiniknanotorud komposiitmaterjali.

Viimasel viiel aastal oleme suurt tähelepanu pööranud lämmastikuga dopeeritud süsiniknanomaterjalide uurimisele. Selgus, et lämmastiku lisand suuren-

dab märgatavalt elektrokatalüütilist aktiivsust hapniku redutseerumisel. N-dopeeritud vertikaalselt orienteeritud süsiniknanotorude valmistamiseks kasutatakse keemilist aurufaasist sadestamist. Lämmastiku allikana kasutatakse atsetonitriili ja röntgenfotoelektron-spektroskoopiline analüüs näitas edukat lämmastikuga dopeerimist (3 at.%). Võrreldes dopeerimata materjaliga olid N-dopeeritud süsiniknanotorud märkimisväärselt kõrgema  $O_2$  redutseerumise aktiivsusega nii happelises kui ka leelises keskkonnas (Alexeyeva jt, 2010). Eriti kõrget elektrokatalüütilist aktiivsust näitasid N-dopeeritud materjalid leelises lahuses (joonis 8). Seega on võimalik valmistada heade elektrokatalüütiliste omadustega täiesti metallivaba  $O_2$  redutseerumise katalüsaator.



Joonis 8.

Hapniku redutseerumise polarisatsioonikõverate võrdlus  $O_2$ -küllastatud 0,5 M  $H_2SO_4$  (a) ja 0,1 M KOH (b) lahuses.  $\omega = 960 \text{ p min}^{-1}$ ,  $v = 10 \text{ mV s}^{-1}$ . Võrdluselektrood: küllastatud kalomelelektrood.

N-dopeeritud süsinikmaterjalide elektrokatalüütilised omadused on paljuski määratud selle poolt, milline on lämmastiku üldsisaldus nendes materjalides ja millist tüüpi lämmastikku-sisaldavate rühmadega on tegemist. Eelkõige tulevad kõne alla püridiinne ja grafiitne N, aga praegu puudub täielik selgus, miks just need rühmad on olulised  $O_2$  redutseerumisel.

Seoses grafeeni mitmesuguste ainulaadsete omaduste ja perspektiivsete rakendustega oleme viimasel ajal tegeleenud ka selle materjali uurimisega. Ni substraadile keemilise aurufaasist sadestamise meetodil kasvatatud suurepinnaliste mitmekihiliste grafeenikilede elektrokatalüütiline aktiivsus hapniku redutseerumisel oli sarnane kõrgorienteeritud pürolüütilise grafiidi pinna omaga (Kibena jt, 2013a). Sarnased olid ka mõlema materjali Ramani spektrid (D piik oli vaevumärgatav), mis näitab defektide puudumist sellisel viisil valmistatud grafeenis. Hoopis teistsugused elektrokatalüütilised omadused ilmsesid grafeenoksiidi (GO) redutseerumisel saadud grafeeni nanoliistakute korral.

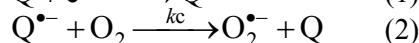
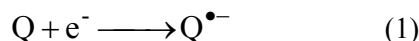


Redutseeritud GO oli elektrokatalüütiliselt käitumiselt sarnane klaassüsinik-elektroodiga (Kruusenberg jt, 2013).

Me dopeerisime grafeeni lämmastikuga pürolüüsides GO lämmastikuühendite (uurea, melamiin, ditsüanodiamiid) juuresolekul 800°C juures argooni atmosfääris. Kõige kõrgemat elektrokatalüütilist aktiivsust näitas GO ja ditsüanodiamiidi pürolüüsil saadud materjal (Vikkisk jt, 2014). Veelgi paremad elektrokatalüütilised omadused olid N-dopeeritud grafeen/süsinikkanotorud komposiitmaterjalidel (Ratso jt, 2014). Selle materjali katalüütiline aktiivsus O<sub>2</sub> redutseerumisel leeliselises lahuses oli võrreldav kommertsiaalse Pt/C katalüsaatori omaga. Seega oleme valmistanud materjali, mida võiks kasutada kütuseelemendi katoodina Pt asemel. Praegu testime kütuseelementi, milles on kasutatud katoodina N-dopeeritud süsinikmaterjale.

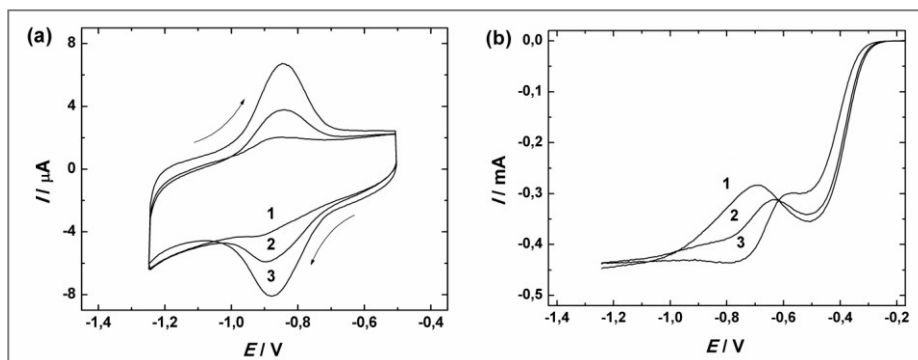
#### KEEMILISELT MODIFITSEERITUD ELEKTROODIDE UURIMINE

Pindade keemiline modifitseerimine annab suurepärase võimaluse nende mitmesuguste omaduste (sh elektrokeemiliste omaduste) muutmiseks. Pindade funktsionaliseerimise alal oleme teinud intensiivset koostööd prof David J. Schiffriniga (Liverpooli Ülikool) ja dr Gilberto Maiaga (Mato Grosso do Sul'i Ülikool, Brasiilia). Põhjalikult oleme uurinud mitmesuguste kinoonidega modifitseeritud elektrodide elektrokatalüütilisi omadusi hapniku redutseerumisel. Need kinoonid (antrakinoon ja selle derivaadid, fenantreenkinoon jt) seondati kovalentselt süsinikmaterjalide pinnale, kasutades diasooniumisoolade redutseerumise meetodit (Sarapuu jt, 2003; Vaik jt, 2004). Kinoonidega modifitseeritud elektroodidel toimub hapniku 2-elektroniline redutseerumise peroksiidiks vastavalt elektrokeemilis-keemilisele mehhanismile:



Q on pinnaga seotud kinoon ja  $k_c$  kinooni radikaalaniooni ( $Q^{\bullet-}$ ) ja molekulaarse O<sub>2</sub> vahelise reaktsiooni kiiruskonstant. Arvatakse, et hapniku redutseerumise kiirust limiteerivaks staadiumiks on reaktsioon (2). Moodustunud superoksiidanioon võib kas edasi redutseeruda või disproportsioneeruda ning mõlemad staadiumid on kiired ja viivad peroksiidi tekkele. Vastavalt ülaltoodud mehhanismile määravad kinoonidega modifitseeritud elektroodi aktiivsuse peamiselt kinooni redokspotentsiaal ( $E_f$ ) ja kiiruskonstant  $k_c$ . Mida positiivsem  $E_f$ , seda kõrgem elektrokatalüütiline aktiivsus O<sub>2</sub> redutseerumisel. Me varieerisime antrakinooni (AQ) pindkontsentratsiooni ( $\Gamma_{AQ}$ ) ja määrasime  $k_c$  väärtuse ( $k_c=4,7 \times 10^8 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ).

Näitena on toodud pinnaga seotud antrakinooni tsüklilised voltamperogrammid ja hapniku redutseerumise polarisatsioonikõverad antrakinooniga modifitseeritud elektroodidel 0,1 M KOH lahuses erinevate  $\Gamma_{AQ}$  väärtuste korral (joonis 9).



Joonis 9.

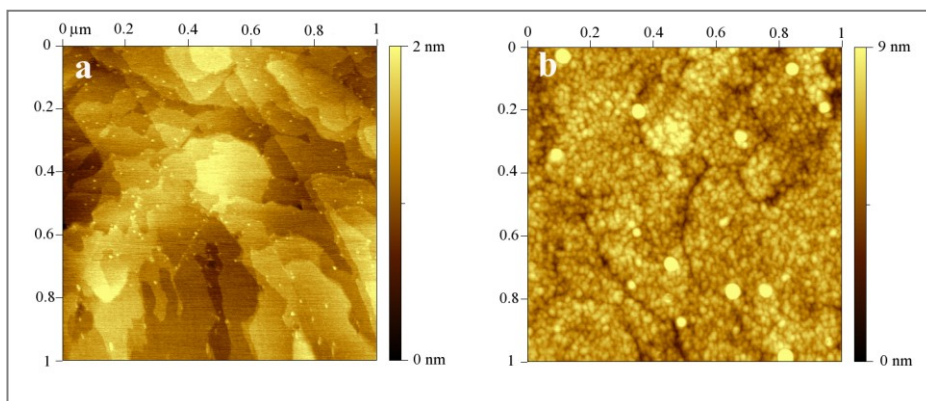
(a) Antrakinooniga modifitseeritud klaassüsinikelektroodide tsüklilised volt-ampereogrammide Ar-küllastatud 0,1 M KOH lahuses.  $\Gamma_{AQ}$ : (1)  $5,2 \times 10^{-11}$ ; (2)  $2,3 \times 10^{-10}$ ; (3)  $4,3 \times 10^{-10}$  mol  $\text{cm}^{-2}$ .  $\nu = 50$  mV  $\text{s}^{-1}$ . (b) Hapniku redutseerumise polarisatsioonikõverate võrdlus  $\text{O}_2$ -küllastatud 0,1 M KOH lahuses. (1) klaassüsinik, (2)  $\Gamma_{AQ} = 7,3 \times 10^{-11}$  mol  $\text{cm}^{-2}$ , (3)  $\Gamma_{AQ} = 4,3 \times 10^{-10}$  mol  $\text{cm}^{-2}$ .  $\omega = 960$  p  $\text{min}^{-1}$ ,  $\nu = 20$  mV  $\text{s}^{-1}$ . Võrdluselektrood: küllastatud kalomelektrood.

Eriti aktiivne oli fenantreenkinooniga modifitseeritud elektrood, mida võib seostada selle kinooni kõrge redokspotentsiaaliga (Vaik jt, 2004; Jürmann jt, 2007). Kõigi uuritud kinoonide korral määrasime kinooni radikaalaniooni ja molekulaarse hapniku vahelise reaktsiooni kiiruskonstandid. Esmakordselt modifitseerisime kõrgorienteeritud pürolüütilise grafiidi ja booriga dopeeritud teemantelektroodide pinna kinoonidega (Sarapuu jt, 2005). Mõlemal juhul on tegemist väga madala elektrokatalüütilise aktiivsusega alusmaterjaliga ja seetõttu tuleb kinoonidest põhjustatud efekt selgemini esile. Hapniku redutseerumise pH-sõltuvuse uurimisel ilmnas, et kinoonidega modifitseeritud elektroodidel on kõrgem elektrokatalüütiline aktiivsus kõrge pH-ga lahustes, kuid kogu uuritud pH vahemikus toimub nendel elektroodidel hapniku 2-elektroniline redutseerumine vesinikperoksiidiks (Jürmann jt, 2007).

Huvitava kombel selgus, et teatud tingimustel osutub võimalikuks ka kinoonide kovalentne seondamine süsinikmaterjali pinnale ilma elektrilist potentsiaali rakendamata. Seda nimetatakse spontaanseks modifitseerimiseks (Seinberg jt, 2008). Samuti õnnestus meil näidata, et ka *in situ* sünteesitud AQ diasooniumiühendit on võimalik kasutada pinna modifitseerimiseks (Kullapere jt, 2009a). Nii atsetonitriilis kui ka happelises vesikeskkonnas toimunud modifitseerimine oli edukas ja AQ pindkontsentratsioon oli võrreldav eelnevalt sünteesitud AQ diasooniumisoolade kasutamisel leitud AQ pindkontsentratsiooniga. Mõlemas lahuses modifitseeritud elektroodid näitasid sarnast elektrokatalüütilist aktiivsust  $\text{O}_2$  redutseerumisel 0,1 M KOH lahuses. Teatud tingimustel on võimalik valmistada küllaltki paksud AQ kiled (Mooste jt, 2013).

Alternatiivse meetodina kasutasimeokinoonide karboksüülderivaatide anoodset oksüdeerumist elektroodi pinna modifitseerimisel. Kinoonidega modifitseeritud elektroode saab edukalt rakendada vesinikperoksiidi elektrokeemiliseks sünteesiks (Lobyntseva jt, 2007).

Elektroodide pinna modifitseerimine arüülrühmadega tekitab täiendava barjääri laenguülekandeprotsessile ja muudab nende elektrokeemilisi omadusi. Klaassüsinikelektroodi pinda modifitseerisime fenüül-, naftüül-, antratsenüül-, bifenüül-, 4-bromofenüül-, 4-detsüülfenüül-, 4-nitrofenüül- ja 4-karboksüfenüülrühmadega ning asobenseeni derivaatidega (Kullapere jt, 2007; Kullapere jt, 2010a; Kibena jt, 2012). Selleks sünteesiti vastavad diasooniumisoolad või kasutati diasooniumiühendeid, mis on kommertsiaalselt saadaval. Arüülkiled blokeerivad elektroodi pinna ja inhibeerivad elektrokeemiliste reaktsioonide kulgemist nendel pindadel. Seda võisime täheldada nii hapniku redutseerumisel kui ka heksatsüanoferraat(III)ioonide redutseerumisel. Inhibeerimise määr sõltus pinnaloleva arüülrühma struktuurist ning reageeriva osakese suurusest ( $O_2$  molekul vs.  $Fe(CN)_6^{3-}$  ioon). Kuna  $O_2$  molekul on mõõdetelt palju väiksem, siis läbib see hõlpsalt hüdrofoobse arüülkile ning redutseerub elektroodi pinnal.



Joonis 10.

Kuldelektroodi (a) ja antrakinooniga modifitseeritud kuldelektroodi (b) aatomjõumikroskoopilised kujutised.

Lisaks süsinikmaterjalidele oleme kasutanud diasooniumisoolade redutseerumise meetodit ka metallelektroodide (Au, Ni) pinna modifitseerimisel (Kullapere jt, 2009b; Kullapere jt, 2010b; Kullapere jt, 2012; Kibena jt, 2013b). Kulla pinna modifitseerimist saab kvantitatiivselt iseloomustada kvartsmikrokaalude abil. Olulist informatsiooni moodustuva arüülkile koostise ja pinna morfoloogia kohta annavad ka röntgenfototelektron-spektroskoopia ja aatom-

jõumikroskoopia. Pinna morfoloogia uuringud näitasid, et arüülkile ei kasva ühtlaselt kulla pinnal ja pigem on tegu teralise kasvumehhanismiga (joonis 10). Modifitseeritud metallipindadel on oluline väljund molekulaarelektroonikas.

#### KIRJANDUS

Alexeyeva, N., Tammeveski, K. (2007). Electrochemical reduction of oxygen on multi-walled carbon nanotubes modified glassy carbon electrodes in acid media. *Electrochem. Solid-State Lett.*, 10, F18-F21.

Alexeyeva, N., Tammeveski, K. (2008). Electroreduction of oxygen on gold nanoparticle/PDDA-MWCNT nanocomposites in acid solution. *Anal. Chim. Acta*, 618, 140-146.

Alexeyeva, N., Shulga, E., Kisand, V., Kink, I., Tammeveski, K. (2010). Electroreduction of oxygen on nitrogen-doped carbon nanotube modified glassy carbon electrodes in acid and alkaline solutions. *J. Electroanal. Chem.*, 648, 169-175.

Alexeyeva, N., Sarapuu, A., Tammeveski, K., Vidal-Iglesias, F. J., Solla-Gullón, J., Feliu, J. M. (2011). Electroreduction of oxygen on Vulcan carbon supported Pd nanoparticles and Pd-M nanoalloys in acid and alkaline solutions. *Electrochim. Acta*, 56, 6702-6708.

Erikson, H., Jürmann, G., Sarapuu, A., Potter, R. J., Tammeveski, K. (2009). Electroreduction of oxygen on carbon-supported gold catalysts. *Electrochim. Acta*, 54, 7483-7489.

Erikson, H., Kasikov, A., Johans, C., Kontturi, K., Tammeveski, K., Sarapuu, A. (2011a). Oxygen reduction on Nafion-coated thin-film palladium electrodes. *J. Electroanal. Chem.*, 652, 1-7.

Erikson, H., Sarapuu, A., Tammeveski, K., Solla-Gullón, J., Feliu, J. M. (2011b). Enhanced electrocatalytic activity of cubic Pd nanoparticles towards the oxygen reduction reaction in acid media. *Electrochem. Commun.*, 13, 734-737.

Erikson, H., Sarapuu, A., Alexeyeva, N., Tammeveski, K., Solla-Gullon, J., Feliu, J. M. (2012). Electrochemical reduction of oxygen on palladium nanocubes in acid and alkaline solutions. *Electrochim. Acta*, 59, 329-335.

Jukk, K., Alexeyeva, N., Sarapuu, A., Ritslaid, P., Kozlova, J., Sammelselg, V., Tammeveski, K. (2013a). Electroreduction of oxygen on sputter-deposited Pd nanolayers on multi-walled carbon nanotubes. *Int. J. Hydrogen Energy*, 38, 3614-3620.

Jukk, K., Alexeyeva, N., Ritslaid, P., Kozlova, J., Sammelselg, V., Tammeveski, K. (2013b). Sputter-deposited Pt nanoparticle/multi-walled carbon na-

notube composite catalyst for oxygen reduction reaction. *J. Electroanal. Chem.*, 708, 31-38.

Jürmann, G., Tammeveski, K. (2006). Electroreduction of oxygen on multi-walled carbon nanotubes modified highly oriented pyrolytic graphite electrodes in alkaline solution. *J. Electroanal. Chem.*, 597, 119-126.

Jürmann, G., Schiffrin, D. J., Tammeveski, K. (2007). The pH-dependence of oxygen reduction on quinone-modified glassy carbon electrodes. *Electrochim. Acta*, 53, 390-399.

Kibena, E., Mäeorg, U., Matisen, L., Sulamägi, P., Tammeveski, K. (2012). A study of glassy carbon electrodes modified with azobenzene derivatives. *J. Electroanal. Chem.*, 686, 46-53.

Kibena, E., Mooste, M., Kozlova, J., Marandi, M., Sammelselg, V., Tammeveski, K. (2013a). Surface and electrochemical characterisation of CVD grown graphene sheets. *Electrochem. Commun.*, 35, 26-29.

Kibena, E., Marandi, M., Mäeorg, U., Venarusso, L., Maia, G., Matisen, L., Kasikov, A., Sammelselg, V., Tammeveski, K. (2013b). Electrochemical modification of gold electrodes with azobenzene derivatives by diazonium reduction. *ChemPhysChem*, 14, 1043-1054.

Kullapere, M., Jürmann, G., Tenno, T. T., Paprotny, J. J., Mirkhalaf, F., Tammeveski, K. (2007). Oxygen electroreduction on chemically modified glassy carbon electrodes in alkaline solution. *J. Electroanal. Chem.*, 599, 183-193.

Kullapere, M., Seinberg, J.-M., Mäeorg, U., Maia, G., Schiffrin, D. J., Tammeveski, K. (2009a). Electroreduction of oxygen on glassy carbon electrodes modified with in situ generated anthraquinone diazonium cations. *Electrochim. Acta*, 54, 1961-1969.

Kullapere, M., Marandi, M., Sammelselg, V., Menezes, H. A., Maia, G., Tammeveski, K. (2009b). Surface modification of gold electrodes with anthraquinone diazonium cations. *Electrochem. Commun.*, 11, 405-408.

Kullapere, M., Mirkhalaf, F., Tammeveski, K. (2010a). Electrochemical behaviour of glassy carbon electrodes modified with aryl groups. *Electrochim. Acta*, 56, 166-173.

Kullapere, M., Kozlova, J., Matisen, L., Sammelselg, V., Menezes, H. A., Maia, G., Schiffrin, D. J., Tammeveski, K. (2010b). Electrochemical properties of aryl-modified gold electrodes. *J. Electroanal. Chem.*, 641, 90-98.

Kullapere, M., Marandi, M., Matisen, L., Mirkhalaf, F., Carvalho, A. E., Maia, G., Sammelselg, V., Tammeveski, K. (2012). Blocking properties of gold electrodes modified with 4-nitrophenyl and 4-decylphenyl groups. *J. Solid State Electrochem.*, 16, 569-578.

- Kruusenberg, I., Alexeyeva, N., Tammeveski, K. (2009). The pH-dependence of oxygen reduction on multi-walled carbon nanotube modified glassy carbon electrodes. *Carbon*, 47, 651-658.
- Kruusenberg, I., Leis, J., Arulepp, M., Tammeveski, K. (2010a). Oxygen reduction on carbon nanomaterial-modified glassy carbon electrodes in alkaline solution. *J. Solid State Electrochem.*, 14, 1269-1277.
- Kruusenberg, I., Matisen, L., Jiang, H., Huuppola, M., Kontturi, K., Tammeveski, K. (2010b). Electrochemical reduction of oxygen on double-walled carbon nanotube modified glassy carbon electrodes in acid and alkaline solutions. *Electrochem. Commun.*, 12, 920-923.
- Kruusenberg, I., Matisen, L., Shah, Q., Kannan, A. M., Tammeveski, K. (2012). Non-platinum cathode catalysts for alkaline membrane fuel cells. *Int. J. Hydrogen Energy*, 37, 4406-4412.
- Kruusenberg, I., Mondal, J., Matisen, L., Sammelseg, V., Tammeveski, K. (2013). Oxygen reduction on graphene-supported MN4 macrocycles in alkaline media. *Electrochem. Commun.*, 33, 18-22.
- Lobyntseva, E., Kallio, T., Alexeyeva, N., Tammeveski, K., Kontturi, K. (2007). Electrochemical synthesis of hydrogen peroxide: Rotating disk electrode and fuel cell studies. *Electrochim. Acta*, 52, 7262-7269.
- Mooste, M., Kibena, E., Sarapuu, A., Matisen, L., Tammeveski, K. (2013). Oxygen reduction on thick anthraquinone films electrografted to glassy carbon. *J. Electroanal. Chem.*, 702, 8-14.
- Ratso, S., Kruusenberg, I., Vikkisk, M., Joost, U., Shulga, E., Kink, I., Kallio, T., Tammeveski, K. (2014). Highly active nitrogen-doped few-layer graphene/carbon nanotube composite electrocatalyst for oxygen reduction reaction in alkaline media. *Carbon*, 73, 361-370.
- Sarapuu, A., Vaik, K., Schiffrin, D. J., Tammeveski, K. (2003). Electrochemical reduction of oxygen on anthraquinone-modified glassy carbon electrodes in alkaline solution. *J. Electroanal. Chem.*, 541, 23-29.
- Sarapuu, A., Helstein, K., Schiffrin, D. J., Tammeveski, K. (2005). Kinetics of oxygen reduction on quinone-modified HOPG and BDD electrodes in alkaline solution. *Electrochem. Solid State Lett.*, 8, E30-E33.
- Sarapuu, A., Kasikov, A., Laaksonen, T., Kontturi, K., Tammeveski, K. (2008a). Electrochemical reduction of oxygen on thin-film Pt electrodes in acid solutions. *Electrochim. Acta*, 53, 5873-5880.
- Sarapuu, A., Kallip, S., Kasikov, A., Matisen, L., Tammeveski, K. (2008b). Electroreduction of oxygen on gold-supported thin Pt films in acid solutions. *J. Electroanal. Chem.*, 624, 144-150.

- Sarapuu, A., Nurmik, M., Mändar, H., Rosental, A., Laaksonen, T., Kontturi, K., Schiffrin, D. J., Tammeveski, K. (2008c). Electrochemical reduction of oxygen on nanostructured gold electrodes. *J. Electroanal. Chem.*, 612, 78-86.
- Sarapuu, A., Kasikov, A., Wong, N., Lucas, C. A., Sedghi, G., Nichols, R. J., Tammeveski, K. (2010). Electroreduction of oxygen on gold-supported nanostructured palladium films in acid solutions. *Electrochim. Acta*, 55, 6768-6774.
- Seinberg, J.-M., Kullapere, M., Mäeorg, U., Maschion, F. C., Maia, G., Schiffrin, D. J., Tammeveski, K. (2008). Spontaneous modification of glassy carbon surface with anthraquinone from the solutions of its diazonium derivative: An oxygen reduction study. *J. Electroanal. Chem.*, 624, 151-160.
- Tammeveski, K. (1993). Hapniku redutseerumisreaktsiooni uurimine klaas-süsinikul ja vaakumaurustatud metallkatetel. Magistritöö.
- Tammeveski, K. (1998). Oxygen electroreduction on thin platinum films and the electrochemical detection of superoxide anion. PhD thesis, University of Tartu.
- Tammeveski, K., Tenno, T., Claret, J., Ferrater, C. (1997a). Electrochemical reduction of oxygen on thin-film Pt electrodes in 0.1 M KOH. *Electrochim. Acta*, 42, 893-897.
- Tammeveski, K., Arulepp, M., Tenno, T., Ferrater, C., Claret, J. (1997b). Oxygen electroreduction on titanium-supported thin Pt films in alkaline solution. *Electrochim. Acta*, 42, 2961-2967.
- Tammeveski, K., Tenno, T., Rosental, A., Johansson, L. S., Niinisto, L. (1999). The reduction of oxygen on Pt-TiO<sub>2</sub> coated Ti electrodes in alkaline solution. *J. Electrochem. Soc.*, 146, 669-676.
- Tammeveski, K., Kontturi, K., Nichols, R. J., Potter, R. J., Schiffrin, D. J. (2001). Surface redox catalysis for O<sub>2</sub> reduction on quinone-modified glassy carbon electrodes. *J. Electroanal. Chem.*, 515, 101-112.
- Tammeveski, L., Erikson, H., Sarapuu, A., Kozlova, J., Ritslaid, P., Sammelselg, V., Tammeveski, K. (2012). Electrocatalytic oxygen reduction on silver nanoparticle/multi-walled carbon nanotube modified glassy carbon electrodes in alkaline solution. *Electrochem. Commun.*, 20, 15-18.
- Vaik, K., Sarapuu, A., Tammeveski, K., Mirkhalaf, F., Schiffrin, D. J. (2004). Oxygen reduction on phenanthrenequinone-modified glassy carbon electrodes in 0.1 M KOH. *J. Electroanal. Chem.*, 564, 159-166.
- Vikkisk, M., Kruusenberg, I., Joost, U., Shulga, E., Kink, I., Tammeveski, K. (2014). Electrocatalytic oxygen reduction on nitrogen-doped graphene in alkaline media. *Appl. Catal. B: Environ.*, 147, 369-376.

*Teaduspreemia humanitaarteaduste alal uurimuste tsükli  
“Balti riikide poliitiline areng” eest*



*Andres Kasekamp*



Sündinud 7.12.1966 Torontos (Kanada)

1985 Toronto Earl Haigi Keskkool

1989 Toronto Ülikool, ajalugu

1996 PhD, ajalugu, Londoni Ülikool

Alates 1996 Tartu Ülikooli külalislektor; dotsent riigiteaduste instituudi Balti poliitika professor

2002–2003 Berliini Humboldti Ülikooli külalisprofessor

2004 Toronto Ülikooli külalisprofessor

1996–2000 Euroopa Komisjoni Eesti esinduse info- ja poliitikanõunik

2000–2013 SA Eesti Välispoliitika Instituudi juhatuse esimees

2006–2008 Avatud Eesti Fondi nõukogu esimees

2011 Balti Assamblee teaduspreemia

2012 Balti uuringute edendamise ühingu (AABS) raamatu auhind

AABSi liige, Balti ajalookomisjoni BHK (Göttingen) kirjavahetajaliige

Avaldanud üle saja teaduspublikatsiooni

## BALTI RIIKIDE IDENTITEET JA KOOSTÖÖ

Humanitaarteadustes on kahtlemata võrdlev lähenemine oluline. Et endast paremini aru saada, nii oma edust kui eksimustest, on võrdlus tingimata vajalik. Oma naabreid tundes jõuame ka enda kohta selgusele lähemale. See võimaldab saada objektiivsema pildi Eestist. Balti ajaloo ja poliitika uurimine pakub just sellise võimaluse ning Balti riikide kujunemisloo mõistmine aitab saada terviklikuma pildi Euroopa arengutest.

Väljastpoolt vaadates pannakse Balti riigid tihtipeale ühte patta. Mõnikord arvatakse isegi ekslikult, et Balti riikide pealinn on Riia. Halvimal juhul aetakse segi Balkani riigid ja Balti riigid, mis on inglise keeles sarnase kõlaga (*Balkans* ja *Baltics*).

‘Balti’ ei ole mõiste, mida kasutasid algselt tänapäeval Balti ehk Läänemereks nimetatava veekogu ääres elavad inimesed, kuigi sageli kinnitatakse, et selle sõna etimoloogiline taust peitub läti ja leedu tüves *balts*, mis tähendab ‘valge’ või ‘soo’ (Bojtár, 1999: 7). Esimest korda nimetas merd *Mare Balticum*'iks XI

sajandi saksa kroonik Bremeni Adam, kes võttis aluseks ladina sõna *balteus* (vöö), sest tollases ettekujutuses venis meri nagu vöö ida suunas. See tundub olevat Adami enda väljamõeldis, sest meresõitjad on nimetanud seda Idamereks nii germaani keeltes (saksa *Ostsee*, rootsi *Östersjön*, taani *Østersøen*) kui ka isegi soome keeles (*Itämeri*), kus on tegemist küll laenuga rootsi keelest. Eestlased kutsusid seda päris loogiliselt Läänemereks, Läti kalurid aga Suureks mereks (*Lielā jūra*), eristades seda Väikesest merest ehk Liivi lahest.

Mõiste 'balti keeled', mis tulenes Balti merest, võttis 1845. aastal kasutusele Königsbergi ülikoolis töötav saksa keeleteadlane G. H. F. Nesselmann, kes uuris väljasurnud preisi keelt (Zinkevičius jt, 2006: 27). Nagu slaavi, germaani ja romaani keeled, kuuluvad ka balti keeled indoeuroopa keelte hulka. Lätlased ja leedulased kõnelevad lähedalt seotud balti keeli, eesti keel aga kuulub soome-ugri keelkonda ja sellele on lähim soome keel. Keeleteaduslikust seisukohast on niisiis läti ja leedu keel lähemal teistele Euroopa keeltele kui oma naabrile eesti keelele. Aga kui uurida kultuurimustreid, on pilt sootuks teine: pikka aega kestnud ühiselu tõttu saksa eliidi võimu all on lätlased ja eestlased väga sarnased. Enne 20. sajandit oli leedulastel rohkem ühist poolakatega kui lätlastega.

Mõiste 'balti' sisu on aja jooksul muutunud. 20. sajandi algul ei tähistanud see sugugi eestlasi, lätlasi ega leedulasi. Selle nime võttis 19. sajandi keskel teadlikult enda tähistamiseks kasutusele Venemaa kolme kubermangu – Eestimaa, Liivimaa ja Kuramaa, mida üheskoos nimetati saksa keeles *Ostseeprovinzen* – valitsev saksa ülemkiht. Esimese Maailmasõja lõpupoole 1918. aastal baltisakslastel peaaegu õnnestus ühendada kolm kubermangu Saksamaa keisrile alluvaks Balti hertsogiriigiks. Mõiste 'Balti riigid' tuli kasutusele alles pärast Esimest maailmasõda. Aga ka siis oli see laialivalgud, hõlmates mõnigi kord ka teisi Tsaari-Venemaa kokkuvarisemisel tekkinud riike. Kahe maailmasõja vahelisel ajastul peeti sageli ka Soomet Balti riigiks. Siis tehti esimesi samme Balti riikide koostöös, aga sõja puhkedes ilmnes selle nõrkus. NSV Liitu kuulumise ajal kasutati Eesti, Läti ja Leedu vabariikide kohta vene keeles sageli ühisnimetust *Прибалтика*. Balti rahvaste koostöö oli kõige tugevam, kui nad üheskoos rabelesid välja Nõukogude võimu kütkest, saavutades ülemaailmset imetlust 1989. aastal, kui eestlased, lätlased ja leedulased ühendasid käed Balti ketis Tallinnast Riia kaudu Vilniuseni.

Vaadakem lähemalt Eesti, Läti ja Leedu poliitiliste arengute kokkupuutepunkte ja koostöö katseid alates sõltumatute riikide loomisest kuni tänapäevani.

Vastisesisevunud Balti riigid asusid kindlustama oma kohta rahvusvahelises süsteemis. Nad seadsid suuri lootusi ka äsja rajatud Rahvasteliidule, mille kollektiivse julgeoleku garantii nägi ette meetmeid selle liikmete vastu suunatud agressiooni korral (Made, 1999). Nõukogude Venemaa ja Saksamaa vahel paiknevad uued piiririigid püüdsid kohe oma julgeolekut tugevdada. Arutati paljusid suurejoonelisi väiksema või suurema piirkondliku bloki loomise ka-

vasid ning tundus usutav, et vähemalt endiste Romanovite impeeriumi alamate liit Helsingist Varssavini on ka teostatav (Rodgers, 1975). Ent Vilniuse tüli õõnestas kõiki tõhusa Balti liidu loomise püüdeid, muutes võimatuks Leedu ja Poola kuulumise samasse ühendusse. Leedu põhjapoolsed partnerid eelistasid partnerina sõjaliselt tugevat Poolat. 1922. aastal jõudsid Soome, Eesti, Läti ja Poola välisministrid kokkuleppele luua liit, aga see põrkus Soome parlamendi vastuseisule. Soomlased ei soovinud, et lõunanaabrid võiksid neid sõtta kiskuda, ning hakkasid selle asemel orienteeruma Skandinaaviale (Lehti, 1999). 1923. aastal sõlmiti lõpuks kavandatu minivariant, kõigest Eesti ja Läti kaitseliit. Sellele lisaks kavandatud tolliliit ei saanudki teoks.

Kolmest Balti riigist kõige vähem võis kadestada Leedu olukorda. Poola väed hõivasid 1920. aastal Vilniuse, kuigi leedulased olid kuulutanud Vilniuse oma pealinnaks. Poolakate poolel olid jõud ja mõjuvõimsad liitlased ning 1923. aastaks oli Rahvasteliit lahenduse otsimisest loobunud ja tunnustas *status quo*'d. Leedu jäi Vilniuse Poolale kuulumise vaidlustamisel üksi. Ainuke, kes Leedut selles toetas, oli NSV Liit. Leedu jätkas oma retoorikat, kuid ei olnud võimeline midagi ette võtma. Poola ja Leedu piir oli üks sõdadevahelise Euroopa tulipunkte, kus pinged püsisid kõrgel (Eidintas, Žalys, 1997). Piiriülene transport ja side puudus ning aastate jooksul lasti vahejuhtumite käigus maha mitu piirivalvurit.

Vastukaaluks Poolale tugines Leedu Saksamaale ja Nõukogude Liidule. Kuid pärast seda, kui Saksamaal oli 1933. aastal võimule tulnud Adolf Hitler, sattus Leedu tugeva surve alla loovutada sakslastest enamusega Klaipėda (Memeli) piirkond. Kui Poola sõlmis 1934. aastal mittekallaletungilepingud nii Saksamaa kui ka NSV Liiduga, sattus Leedu isolatsiooni, mis sundis muutma varasemat negatiivset suhtumist Balti koostöösse. NSV Liit sel ajal ei töötanud Balti riikide koostöö ideele vastu, sest tal oli Leeduga salajane kokkulepe, mille järgi viimane pidi teavitama NSV Liitu 'vastastikust huvi' pakkuvatest aruteludest Balti Antandi raames (Ilmjärv, 2004: 245). Lõpuks sõlmitigi 1934. aastal Leedu, Läti ja Eesti sõpruse ja koostöö leping, millega tekkis nõndanimetatud Balti Antant. Leping suudeti sõlmida ainult seetõttu, et sellest jäeti välja Vilniuse ja Klaipėda 'erijuhtumid'. See tähendas peamiselt diplomaatiliselt ja kultuurilist koostööd, näiteks iga poole aasta tagant peetavaid välisministrite kohtumisi. Tagasi vaadates on ajaloolased suhtunud väga kriitiliselt Balti riikide suutmatusse luua tõhus liit (Medijainen, 2012). Ent Saksamaa, Poola ja Nõukogude Liit tegid kõik, et selline Balti Antant ei tekiks, ja kui see siiski tekiks, ei suudaks korralikult tegutseda. Ega ka mujal sõdadevahelises Euroopas regionaalne koostöö ei hiilunud.

Balti koostööd nõrgestasid eri arusaamad ohtudest: eestlased pidasid ainsaks võimalikuks vaenlaseks Nõukogude Venemaad, lätlased tundsid muret nii NSV Liidu kui ka Saksamaa pärast ning leedulastele oli NSV Liit ainuke toetaja Poola vastu, mida lätlased ja eestlased pidasid väga oluliseks liitlaseks. Leedu oli ainuke Balti riik, millel puudus piir NSV Liiduga, küll aga oli piir

Saksamaaga. Nõukogude Liit pidas Balti koostööd ohuks ning kasutas selle vältimiseks ära Leedu ja Poola konflikti Vilniuse küsimuses. Moskva kasutas Leedut vastukaaluna Poola mõjule piirkonnas. Leedu oli esimene riik, mis sõlmis 1926. aastal NSV Liiduga vastastikuse abistamise lepingu (Ilmjärv, 2004).

Teises Maailmasõjas tabas Balti riike sarnane traagiline saatus, ent oli siiski olulisi erinevusi. Eesti oli esimene riik, keda Nõukogude Liit jõuga ähvardas septembris 1939 ning Eesti juhtkonna otsus lubada Punaarmee baase enda territooriumile sai saatuslikuks ka Lätile ja Leedule, kellelt sisuliselt võeti sellega ära võimalus tegutseda teisiti. Järgnev saksa okupatsiooni võim aastatel 1941–1944 pani kõik kolm riiki kokku ühte haldusüksusesse, *Reichskommissariat Ostland*'i (Myllyniemi, 1973). Koostöö kohalike kollaborantidega laabus sujuvalt Lätis ja eriti Eestis, aga leedulased olid tõrksamad. Erinevus ilmnis, lähtudes rassilisest vaatevinklist, mis oli saksa natsionaalsotsialistide maailmavaates määrav. Rassilise väärtuse järgi paigutasid natsid leedulased samale tasemele poolakatega, eestlaste ja lätlaste eelistamise põhjuseks oli sajanditepikkune veresegamine baltisakslastega. Leedulased ja poolakad oli need kaks rahvust okupeeritud Euroopas, kelle seast natsid ei värvanud liikmeid oma *Waffen-SS* diviisi.

Arvuliselt kaugelt suurim osa tsiviilohvritest saksa okupatsiooni ajal olid leedu ja läti juudid, samas kui Eesti kodanike seast hukati valdavalt eestlasi. Pärast sõda kaotasid Eesti ja Läti osa oma territooriumist Venemaale, Leedu aga sai endale tagasi nii Vilniuse kui Klaipeda. Selgelt kõige kaugemale ulatuvate tagajärgedega muudatus sõjajärgse Nõukogude võimu ajal oli demograafiline. Massiline sissēränne mujalt Nõukogude Liidust mõjutas Eesti ja Läti ühiskonna arengut pöördumatult. Etniliste leedulaste osakaal Leedus püsis stabiilsena, millel kindlasti oli seos sellega, et relvastatud vastupanu Nõukogude võimule oli kõige intensiivsem Leedus. Samas leedulaste osakaal kohalikus Kommunistlikus Parteis oli tunduvalt suurem – Nõukogude võimu viimasel kahel dekaadil oli üle kahe kolmandiku Leedu Kommunistliku Partei liikmetest leedulased, samal kui Eestis oli eestlaste osakaal komparteis ligikaudu pool ja Lätis lätlaste osakaal alla poole (Misiunas, Taagepera, 1993).

Nõukogude Liidu Kommunistliku Partei uue juhtkonna *гласность* ja *перестройка* (avalikustamine ja uutmine) poliitika 1980ndate teisel poolel lõi võimaluse Balti rahvastel nõuda oma iseseisvumise taastamist. Ühe Balti rahvuse algatus leidis kohe jäljendamist teiste poolt, nt rahvarinde moodustamine ja suveräänsuse deklaratsioon (Lieven, 1993; Beissinger, 2002). Kõige eredam hetk Balti koostöös oli Balti kett 23. augustil 1989, kurikuulsa Molotov-Ribbentropi Pakti 50. aastapäeval. Sellist suurejoonelist protestivormi on hiljem korratud Taivanis ja Kataloonias.

Selleaegset Balti koostööd võib võrrelda jalgrattaspori meeskonnasõiduga, kus üks jalgrattur (ehk rahvus) teeb mõne ringi vältel kõva tööd, teised tema

taga tuules, ning siis vahetatakse kohad (Misiunas, Taagepera, 1993: 312). Algne Läti faas oli lühim, alates 1986. aasta keskkonnaprotestide ja 1987. aasta 'kalendrimeeleavaldustega'; laulvat revolutsiooni juhtisid eestlased alates 1987. aasta septembris esitatud isemajandamise ettepanekust kuni 1989. aasta sügiseni; leedulased juhtisid liikumist iseseisvuse suunas alates 1989. aasta lõpust, mil Leedu kommunistlik partei läi NLKPst lahku. Niisugune järgnevus tulenes suurel määral eri vabariikide demograafilisest olukorrast (Taagepera, 2000: 69). Lätlased alustasid esimesena, sest tundsid eksistentsiaalset ohtu jääda vähemusse omaenda kodumaal. Kuid nad ei suutnud avaldada nii suurt survet, mis oleks esile kutsunud venekeelse elanikkonna võimsa vastulöögi. Eestis oli olukord veidi soodsam, kuid ka siin ei saanud riskida kõiki kaarte korraga lauale panna. Leedulased ärkasid viimasena, aga kõige homogeensem ja ühtsemana suutsid nad võtta juhtrolli viimasel iseseisvusele viival etapil ja jagu saada teravaimatest vastasseisudest.

Iseseisvuse taastanud Eesti, Läti ja Leedu rajasid uusi Balti koostöö formaate, nagu parlamentide vaheline Balti Assamblee ja Balti Ministrite Nõukogu, aga pärast Vene vägede lahkumist vaibus ind sisuliseks koostööks. Arusaadavalt püüdsid kõik kolm noort riiki leida iseenda tee maailmas. 1990ndate lõpul hakkas Eesti end sageli nimetama Põhjala riigiks ja salgas maha oma Balti identiteedi (Lagerspetz, 2003; Lehti, 2003: 39). Selleks olid head argumentid – kultuurilised, ajaloolised ja keelelised, eriti sidemed Soomega, ning ka uuemad saavutused, nagu infotehnoloogia ulatuslik tarbimine. Samas olid aga Põhjamaades paljude jaoks identiteedi keskmes neile omane sotsiaalmajanduslik mudel ehk heaoluriik, millest Eesti ja Baltimaad oma liberaalse majandusega kaugele maha jäid. Selge oli samuti poliitiline eesmärk. Tollal käisid Eesti läbirääkimised Euroopa Liiduga liitumiseks ja oli oluline eristuda lõuna-naabritest, kelle nõutud reformid kulgesid aeglasemalt kui meil. Oli reaalne oht, et Eesti liitumine peab ootama kuni nõrgem Balti lüli järele jõuab (Van Elsuwege, 2008). Põhjala riigid olid paljuski maailma esiridades ja omasid laitmatut mainet, samas kui Balti riike nimetati veel alandavat 'postsovjettlikeks' riikideks. Leedu püüdis sarnaselt Eestiga ka eemalduda Balti riikide nimetusest, rääkides hoopis oma Kesk-Euroopa identiteedist. Ajalooliste ja kultuuriliste põhjenduste kõrval oli Leedul samuti poliitiline eesmärk – NATOga liitumine. Kuna mõni aasta varem oli toimunud NATO Kesk-Euroopa laienemise voor, milles Leedu naaber Poola sai NATO liikmeks, siis Leedu püüdis esile tõsta oma seost Kesk-Euroopaga. Lätil polnud muud valikut kui olla Balti riik. Lõpuks võeti Eesti, Läti ja Leedu siiski koos ELi ja NATOsse, sest meid käsitleti ikka ühtse piirkonnana.

Balti riikide koostöö sai olulise tõuke väljastpoolt, mis oli eriti tähelepanuvääriv ja edukas riigikaitse valdkonnas. NATO liikmelisuseks valmisoleku näitamisel oli võtmetähtsusega Eesti, Läti ja Leedu koostöö ühise jalaväepataljoni (BALTBAT), mereväeskaadri (BALTRON), õhutorjesteemi (BALTNET) ja kõrgema õppeasutuse, Balti Kaitsekolledži (BALTDEFCOL),

loomisel 1990. aastate teisel poolel. Lääneriigid eeldasid, et Balti riigid näitavad küpsust omavahelise koostööga enne vastuvõtmist suuremasse allianssi (Jermalavičius, 2009).

Tänapäeval Euroopa Liidu ja NATO sees on Eesti, Läti ja Leedu koostöö tihedam kui iialgi varem. Sellegipoolest ei ole kuhugi kadunud erimeelsused ja rivaalitsemine suurtes taristu ühisprojektides. Kuigi kõik kolm on varem kokku leppinud, kerkivad järjest esile erihuvid, mis raskendavad ühise eemärgi saavutamist. Toogem näiteks Rail Baltic, planeeritav kaasaegne raudtee kiirühendus Tallinnast läbi Läti ja Leedu Varssavisse ja edasi Euroopa südamesse, regionaalse vedeldatud gaasi (LNG) terminali rajamine või uue tuumajäajaama ehitamine Leedus, milles kõik kolm riiki peaksid olema osanikud (Griegas jt, 2013: 84).

Balti riikide koostöö ja majandussidemed Põhjamaadega aina tugevnevad. Põhjamaad on piirkonna kõige suuremad investorid ja nad toetasid Balti riikide huve rahvusvahelistes organisatsioonides. Kahekümne esimese sajandi alguseks oli mitmepoolse koostöö levinud mudeliks kujunenud 5+3 ehk viis Põhjala ja kolm Balti riiki. Piirkondlik vastastikune suhtlemine ei käinud ainult valitsuste, vaid ka inimeste tasandil: kirikud, koolid, kutseühingud, spordiklubid, kultuuriseltsid ja veel paljud kodanikuühiskonna komponendid rajasid innukalt Läänemere eri kaldaid hõlmava tiheda inimestevahelise kontaktvõrgustiku. Erilistena paistsid silma Eesti ja Soome suhted, seda nii seetõttu, et kaks pealinna asusid teineteisele väga lähedal ja Soome oli Eesti suurim kaubanduspartner, kui ka keelesuguluse ja tihedate kultuurisidemete tõttu. Samamoodi olid Leedul tihedad suhted Poolaga. Kuna kõik Läänemere-maad (v.a Venemaa) on nüüd Euroopa Liidus, on tekkimas ka laiem Baltimaade mõiste, mis hõlmab kõiki Läänemerega piirnevaid riike. Märkimisväärne samm selles suunas oli 2009. aastal vastu võetud Euroopa Liidu Läänemere strateegia, esimene taoline regionaalne strateegia Euroopas, mis on saanud eeskujuks juba teistele regioonidele ELs, näiteks ELi Doonau strateegia (Bengtsson, 2012).

## KIRJANDUS

Beissinger, M. R. (2002). *Nationalist Mobilization and the Collapse of the Soviet State*. Cambridge University Press, Cambridge.

Bengtsson, R. (2012). The EU Strategy for the Baltic Sea Region: Golden or missed opportunity? Kasekamp, A. (ed.) *Estonian Foreign Policy Yearbook 2011*. Estonian Foreign Policy Institute, Tallinn, 7-32.

Bojtár, E. (1999). *Forward to the Past: A Cultural History of the Baltic People*. Central Europe University Press, Budapest.

Eidintas, A., Žalys, V. (1997). *Lithuania in European Politics: The Years of the First Republic, 1918–1940*. St Martin's Press, New York.

- Grigas, A., Kasekamp, A., Maslauskaitė, K., Zorgenfrei, L. (2013). *The Baltic States in the EU: Yesterday, Today and Tomorrow*. Notre Europe – Jacques Delors Institute, Paris.
- Ilmjärv, M. (2004). *Hääletu alistumine. Eesti, Läti, Leedu välispoliitilise orientatsiooni kujunemine ja iseseisvuse kaotus 1920. aastate keskpaigast anneksioonini*. Argo, Tallinn.
- Jermalavičius, T. (2009). *Baltic military cooperation: Past, present and future*. Kasekamp, A. (ed.) *Estonian Foreign Policy Yearbook 2009*. Estonian Foreign Policy Institute, Tallinn, 123-148.
- Lagerspetz, M. (2003). *How many Nordic countries? The possibilities and limits of geopolitical identity construction*. *Cooperation and Conflict*, 38, 1, 48-60.
- Lehti, M. (2003) *Possessing a Baltic Europe: Retold national narratives in the European North*. Lehti, M., Smith, D. J. (eds.) *Post-Cold War Identity Politics: Northern and Baltic Experiences*. Frank Cass, London, 11-49.
- Lieven, A. (1993). *The Baltic Revolution: Estonia, Latvia, Lithuania, and the Path to Independence*. Yale University Press, New Haven (Connecticut).
- Made, V. (1999). *Külalisena maailmapoliitikas. Eesti ja Rahvasteliit, 1919–1946*. Tartu Ülikooli Kirjastus, Tartu.
- Medijainen, E. (2012). *The 1934 Treaty of the Baltic Entente: Perspectives for understanding*. *Ajalooline Ajakiri*, 2012, 1/2 (139/140), 183-200.
- Misiunas, R. J., Taagepera, R. (1993). *The Baltic States: Years of Dependence, 1940–1990*. 2. uuend. tr. University of California Press, Berkeley (California); eesti keeles: *Balti sõlтеаastad, 1940–1990*. Koolibri, Tallinn, 1997.
- Myllyniemi, S. (1973). *Die Neuordnung der Baltischen Länder 1941–1944. Zum nationalsozialistischen Inhalt der deutschen Besatzungspolitik*. *Historiallisia tutkimuksia 90*. Suomen Historiallinen Seura, Helsinki.
- Rodgers, H. I. (1975). *Search for Security: A Study in Baltic Diplomacy, 1920–1934*. Archon Books, Hamden.
- Zinkevičius, Z., Luchtanas, A., Česnys, G. (2006). *Where We Come From: The Origin of the Lithuanian People*. Science & Encyclopaedia Publishing Institute, Vilnius.
- Taagepera, R. (2000). *The Baltic perspectives of Estonian turning points*. *Acta Historica Tallinnensia*, 4, 59-70.
- Van Elsuwege, P. (2008). *From Soviet Republics to EU Member States: A Legal and Political Assessment of the Baltic States' Accession to the EU*. Brill, Leiden.

*Teaduspreemia tehnikateaduste alal uurimuste tsükli  
"Uudsed alalispingemuundurid taastuvenergeetikas" eest*



*Dmitri Vinnikov* (kollektiivi juht, keskel)

Sündinud 07.04.1976

1993 Tallinna Pae Gümnaasium

1999 Tallinna Tehnikaülikool, elektriajamid ja jõuelektroonika

2005 DSc, jõuelektroonika, Tallinna Tehnikaülikool

1998 Estel Elektro AS insener

Alates 1999 Tallinna Tehnikaülikooli elektriajamite ja jõuelektroonika instituudi teadur, vanemteadur; elektrotehnika instituudi vanemteadur, jõuelektroonika uurimisgrupi juht

2009– Eesti energia- ja geotehnika doktorikooli (II) juht

2000 Brandenburgi Tehnikaülikooli elektrimasinate ja elektriajamite instituudi (Saksamaa) erakorraline teadur

TTÜ 2012. a parima aasta teadusartikli autor tehnika ja tehnoloogia valdkonnas  
Rahvusvahelise elektri- ja elektroonikainseneride instituudi (IEEE) vanemliige,  
Raudteeuringute Euroopa tippvõrgustiku (EURNEX) liige  
Avaldanud üle 200 teaduspublikatsiooni



## *Tanel Jalakas* (vasakul)

Sündinud 15.10.1979

1998 Pärnu Raeküla Gümnaasium  
2003 Tallinna Tehnikaülikool, elektriajamid ja jõuelektronika  
2010 PhD, energia ja geotehnika, Tallinna Tehnikaülikool

Alates 2004 Tallinna Tehnikaülikooli elektriajamite ja jõuelektronika instituudi insener, teadur, vanemteadur; elektrotehnika instituudi vanemteadur

Avaldanud 55 teaduspublikatsiooni.

## *Indrek Roasto* (paremal)

Sündinud 02.07.1980

1999 Tallinna Kadrioru Saksa Gümnaasium  
2003 Tallinna Tehnikaülikool, elektriajamid ja jõuelektronika  
2005 Giessen-Friedbergi Rakendusteaduste Ülikool (Saksamaa)  
2009 PhD, energia ja geotehnika, Tallinna Tehnikaülikool

Alates 2005 Tallinna Tehnikaülikooli elektriajamite ja jõuelektronika instituudi teadur, vanemteadur; elektrotehnika instituudi vanemteadur

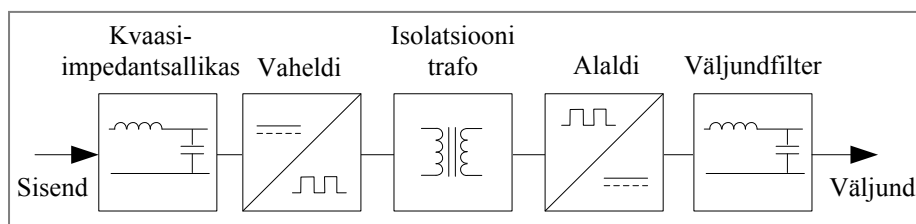
2009, 2013–2014 Gdynia Mereülikooli (Poola) erakorraline teadur

Avaldanud 89 teaduspublikatsiooni

Me elame muutavas maailmas, energianäljases ühiskonnas. Vähenevate ressursside taustal pööratakse üha rohkem tähelepanu taastuvatele energiaallikatele. Need allikad on küll taastuvad, ent neist energia kättesaamine on ebamugav, kallis ning seotud mitme probleemiga. Teadlastele meeldivad probleemid, mis annavad neile huvitavat peamurdmist, võimaldavad luua uusi väärtuseid ning muuta seni kättesaamatu kättesaadavaks. Tallinna Tehnikaülikooli elektrotehnika instituudis tegutseva jõuelektronika uurimisgrupi liikmed pole selles suhtes erandid. Dmitri Vinnikovi poolt juhitava töögrupi (D. Vinnikov, I. Roasto ja T. Jalakas) teadustöö põhisuunaks on uudsete jõupooljuhtmuundurite väljatöötamine taastuvenergeetika rakendustele.

Taastuenergeetika põhiprobleemiks on energiatootmise ebaühtlus ning sellest tulenev vajadus energia lühi- ja pikaajaliseks salvestamiseks. Energia lühiajaliseks salvestamiseks sobivad kas elektrokeemilised patareid või ülikondensaatorid, pikaajaliseks salvestamiseks on sobiv vesinik (salvestamise ajavahemik päevad, nädalad, kuud, aastad). Vesinikku saab elektrienergiaks muundada kütuselementide abil. Kütuselemendi sidumiseks tavalise elektrivõrguga (3x400 V/1x230 V, 50 Hz) on vaja alalispingemuundurit ja vaheldit. Alalispingemuundur stabiliseerib kütuselemendi väljundpinge (alalis-) ja tõstab selle kas 400 või 600 voldini. Vaheldi muudab aga saadud alalispinge kvaliteetseks vahelduvaks siinuspingeks. Kõige selle juures ei tohi unustada tõsiasi, et kütuselement on äärmiselt tundlik voolupulsatsioonile, mis vähendab oluliselt kalli aparraadi eluiga.

2009. a mais pakkus TTÜ jõuelektronika uurimisgrupp välja maailmas täiesti ainulaadse skeemilahendusega muunduri, mis on mõeldud eelkõige kütuselementidele, kuid sobib suurepäraselt ka teistele taastuenergiatallikatele. Tegu on pinget tõstva alalispingemuunduriga, mille teeb ainulaadseks muunduris kasutatud kvaasi-impedantsallikaga vaheldi (ingl *quasi-Z-source inverter*) (joonis 1).

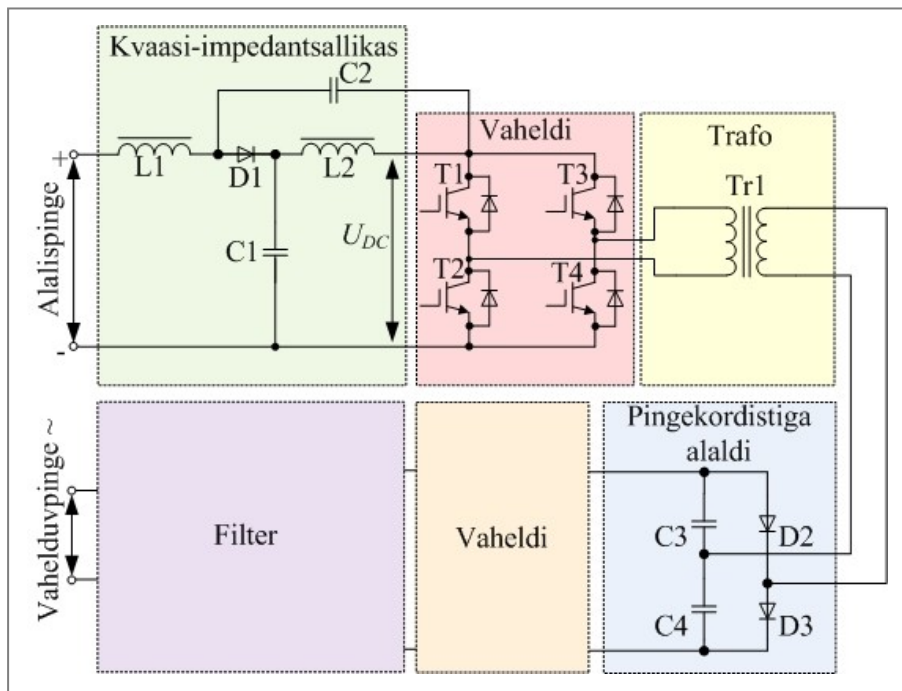


Joonis 1.

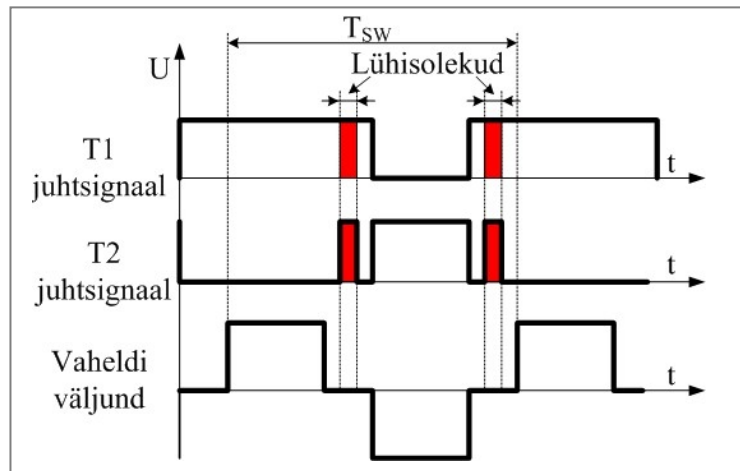
Kvaasi-impedantsallikaga alalispingemuunduri põhimõtteskeem.

Võrreldes teiste sarnaste seadmetega on uus muundur (joonis 2) lihtsama ehitusega ning realiseeritav väiksema transistoride arvuga, seetõttu ka odavam. Tänu topoloogia iseärasustele on tagatud transistoride täielik kaitse lühise vastu ning vähendatud on ka kütuselemendi eluiga mõjutavat voolupulsatsiooni.

Sisuliselt on tegu impulsspingemuunduriga, st tema transistore (T1...T4) juhitakse kõrgsagedusimpulssidega (joonis 3). Muunduri väljundpinget reguleeritakse spetsiaalsete lühisolekute abil. Lühisolek tekitatakse vaheldi ülemiste (T1, T3) ja alumiste (T2, T4) transistoride samaaegsel sisselülitamisel. Lühisolekute kestel salvestub energia induktiivpoolides L1 ja L2. Lühisoleku lõppedes tõstetakse selle energia abil pinget kondensaatoril C1. Kondensaatori pinge on sõltuvuses lühisolekute suhtelise kestusega lülitusperioodi kohta. Muutes lühisolekute suhtelist kestust saab seda tüüpi muundurit hõlpsasti juhtida (joonis 3).



Joonis 2. Kvaasi-impedantsallikaga kütuselemendi ühefaasilise sidumismuunduri skeemilahendus.



Joonis 3 Kvaasi-impedantsallikaga alalispingemuunduri juhtsignaalid ja lühisolekute tekitamine.

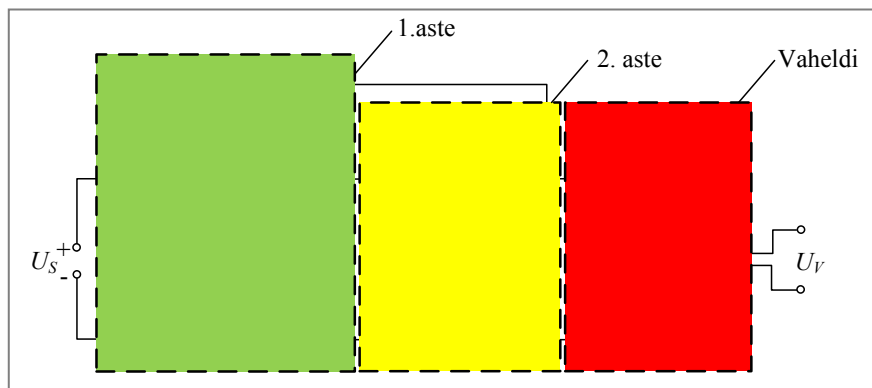
Muunduri esimene katseseade valmis 2009. a suvel tihedas koostöös Poola Gdynia Mereakadeemia teadlastega TTÜ baasfinantseerimise (BF113) toetusel. Esimesi tulemusi tutvustati erialaspetsialistidele IEEE tööstuselektronika seltsi aastakonverentsil (Vinnikov jt, 2009). 2009. a detsembris välja töötatud lahendus on kaitstud Eesti kasuliku mudeliga (Vinnikov jt, 2010a). Uurimistöö põhjalikumad tulemused avaldati ajakirjas IEEE *Transactions on Industrial Electronics* 2011 jaanuaris (Vinnikov, Roasto, 2011).

Katsetused ei kulgenud alati sugugi ladusalt, vaid esines ka probleeme. Aastatel 2010–2011 läbi viidud teadustöö käigus tehti kindlaks, et lisaks tavapärasele püsivoolu-töörežiimile võib kvaasi-impedantsallikaga muundur töötada ka katkevoolutalitluses. Katkevoolutalitlus on ohtlik nii kütuselemendile kui ka muundurile endale. See põhjustab liigset ning kontrollimatut sisendpinge tõusu, mis võib saada saatuslikuks muunduri transistoridele. Katkevoolutalitluses muutub muunduri dünaamika halvemaks, mis võib põhjustada terve süsteemi ebastabiilsuse. Ühtlasi langeb kirjeldatud režiimil töötades muunduri sisendvool perioodiliselt nullini, mis vähendab oluliselt kütuseelemendi eluiga. Uuringute käigus suudeti need probleemid siiski lahenda. Leiti, et liigset pingetõusu ja ühtlasi ka katkevoolutalitlust saab vältida õigesti arvatud kvaasi-impedantsallika skeemielementide väärtustega ja lülitussageduse muutmisega. Muundur tuleb täpselt häälestada ettenähtud tööpunkti. Nende teadmiste põhjal koostati uudne meetodika kvaasi-impedantsallika induktiivpoolide minimaalse nõutava induktiivsuse arvutamiseks ning protsessi matemaatiliseks kirjeldamiseks (Strzelecki, Vinnikov, 2010; Vinnikov jt, 2011bcd; Roasto, Vinnikov, 2012).

Kui vesinik on sobiv energia pikaajaliseks salvestamiseks, siis ülikondensaatorid sobivad energia lühiajaliseks salvestamiseks tüüpiliselt ajavahemikus kuni mõned tunnid. Sarnaselt kütuselementidele on tegemist üpriski madalapingeliste alalisvooluseadmetega, mille väljundpinge väärtus pole püsiv. Seega on võimalik ülikondensaatoreid siduda tarbijatega läbi muundurite, mis sobivad ka kütuselementidele. Samas on erinevalt kütuselementidest vajalik kahesuunaline energiavoo juhtimine (kondensaatori laadimine, tühjenemine). 2010. aastal pakuti TTÜ jõuelektronika uurimisgrupi poolt välja uus kvaasi-impedantsallikal põhinev kahesuunaline alalispingemuundur ülikondensaatorite sidumiseks elektrivõrguga (Vinnikov jt, 2010b; Zakis, Vinnikov, 2011). Kirjeldatav seade töötab ülikondensaatori laadimisel pinget madaldavas režiimis ja tühjendamisel pinget tõstvas režiimis. Uurimistöö käigus selgus, et ülikondensaatori laadimisrežiimis toimib kvaasi-impedantsallikas madalpääsfiltrina, siludes ülikondensaatori väljundvoolu, rikkumata sealjuures alalispingesiini pinge- ja voolukuju (Zakis jt, 2012).

Kvaasi-impedantsallikaga alalispingemuundurid võimaldavad pinget nii tõsta kui madaldada. Taastuenergiaallikate puhul on pinge tõstmine eriti tähtis. Reaalselt ei luba aga kaod komponentides pinget üle kolme korra tõsta. Seega

tekkis mõte ühendada omavahel mitu kvaasi-impedantsahelat. Vastused tuli leida küsimustele, kas kaks järjestikku ühendatud kvaasi-impedantsahelat võimaldavad pinget vastavalt ka kaks korda rohkem tõsta ning kust läheb mõistlik piir seadme keerukuse ning lisanduvate kadude vahel. Selle tulemusena loodi ja katsetati aastatel 2011–2013 parendatud pingetõstmisvõimega ja püsiva sisendvooluga kaskaadlülituses kvaasi-impedantsallikaga vaheldi (joonis 4) (Vinnikov jt, 2012a).

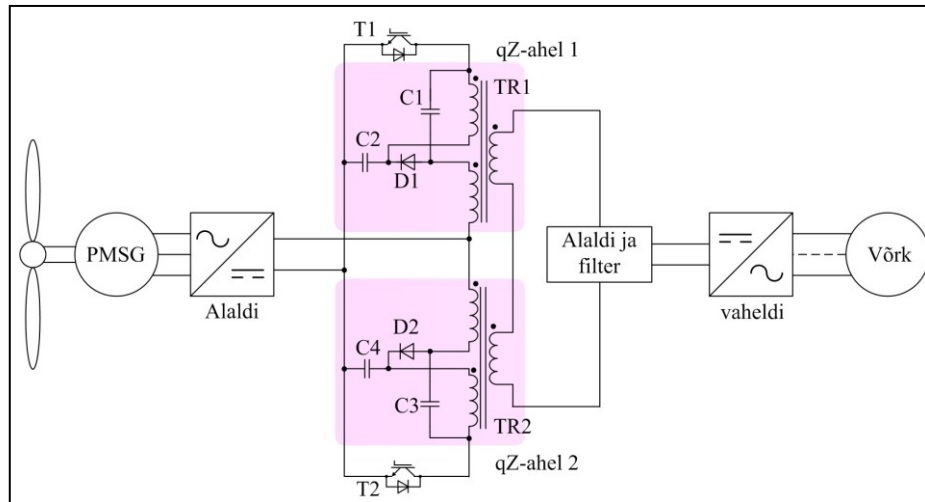


Joonis 4.  
Kaskaadlülituses kvaasi-impedantsallikaga vaheldi.

Kõik loodud topoloogiad sisaldavad sisendis ühte lisainduktiivsust, mis puhverdab muunduri sisendvoolu. See tähendab, et püsivoolurežiimil ei lange muunduri sisendvool kunagi nulli ja väheneb ka voolu pulsatsioon, mis on tähtis omadus päikesepaneelide ning kütuselementide puhul (Vinnikov jt, 2010, 2012).

Pingetõstmisvõime parendamiseks töötati välja veel teinegi täiesti uudne kvaasi-impedantsallikaga vastastakt-tüüpi alalispingemuundur, mida tutvustati laiemale spetsialistide ringkonnale 2012. aasta veebruaris jõuelektroonika alasel konverentsil (Applied Power Electronics Conference) USA-s (Vinnikov jt, 2012c). See muundur sobib kasutamiseks suurt pingetõstmisvõimet nõudvates rakendustes, kus on nõutud ka sisendi ja väljundi galvaaniline eraldatus, nt tuulegeneraatorid. Huvitava edasiarendusena võib välja tuua kvaasi-impedantsallika induksioonpooli, mis on integreeritud eraldustrafo primaarmähisesse (joonis 5). See omadus tõstab kogu seadme võimsustihedust vähemalt 15%. Lihtne juhtimisalgoritm, hea lühisekindlus, väike komponentide arv, lai sisendpinge diapason ja koormusvahemik ning hea häiringukindlus teevad sellest topoloogiast tõsiseltvõetava konkurendi traditsioonilistele täisisillal baseeruvatele alalispingemuunduritele. 2013. aastal avaldati artikkel,

milles toodi ära uue muunduri põhjalik analüütiline uuring ja kirjeldati tööprinsiip (Husev jt, 2013). Lõpptulemusena töötati välja muunduri projekteerimismetoodika ning koostati seadme laboratoorne katseseade. Laborikatsed kinnitasid eelneva teoreetilise uuringu tulemusi (Blinov jt, 2013).



Joonis 5.

Vastastaktilütuses kvaasi-impedantsallikaga alalispingemuunduri kasutamine tuulegeneraatorit elektrivõrguga siduvas muundusseadmes (Husev jt, 2013).

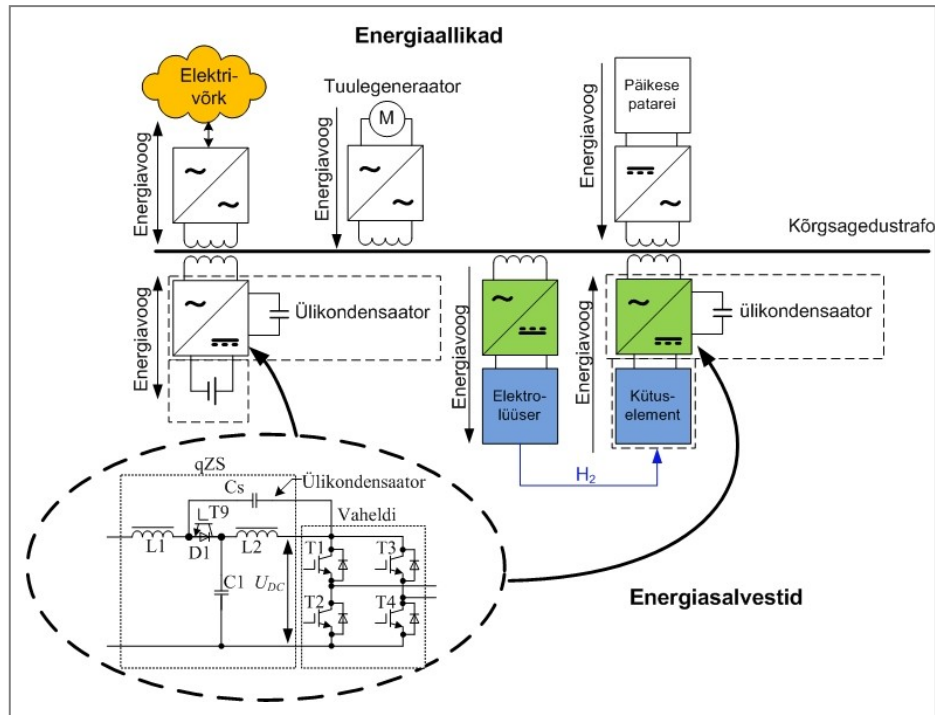
Kütuselemendi sidumine energiavõrguga on energia salvestamise seisukohalt ainult poolik lahendus. Elektrienergia abil vesiniku tootmiseks on vaja elektrolüüserit, mis omakorda vajab sobivat muundurit võrguga ühendamiseks. Tekivad keerukad ja kohmakad süsteemid mitme muunduriga, mis tänu suurele komponentide arvule on lisaks kõigele ka kallid. Selle temaatikaga tegeles TTÜ jõuelektroonika uurimisgrupp aastatel 2011–2013.

Eelkõige uuriti võimalusi kõigi muundurite integreerimiseks ühtsesse süsteemi. Uuringute tulemusel pakuti välja uudne kolme väljundiga ühise magnetahelaga alalispingemuunduri skeemilahendus (joonis 6).

Väljapakutud muundur vähendab energia muundamise astmeid, mis omakorda lihtsustab juhtimist, vähendab kadusid, komponentide arvu ja seadme kogumaksumust (Vinnikov jt, 2011a; Andrijanovits jt, 2012ab).

Riikliku teaduspreemia pälvinud uurimistöö kohta on aastatel 2009–2013 avaldatud kokku üle 60 teadusartikli, millest 25 on ilmunud rahvusvahelistes eelretsenseeritavates ajakirjades. Ülejäänud, kuid teaduslikust vaatevinklist mitte vähemtähtsad artiklid, on avaldatud rahvusvaheliste konverentside ko-

gumikes. Vähemtähtsaks ei saa lugeda ka sellel ajaperioodil paralleelselt teadusliku tegevusega läbi viidud õppetööd uute teadlaste ettevalmistamisel. Seisuga 30.11.2013 on selle uurimistöö põhjal kaitstud kolm doktoritööd.



Joonis 6.

Ühise magnetahelaga vesiniku-energiasalvesti koos taastuenergia allikatega (tuul, päike).

Eelnevalt kirjeldatud uurimistöö läbiviimiseks ning osalt ka selle käigus on loodud TTÜ Elektrotehnika instituudis jõuelektroonika labor uudsete jõuelektroonika muundurite ja komponentide teoreetiliseks ja praktiliseks uurimiseks. Labor liidab jõuelektroonika valdkonnas elektroonika ning elektrotehnika teadlasi ja on loonud hea baasi rahvusvaheliseks koostööks teiste ülikoolidega. Alates oktoobrist 2011 on TTÜ jõuelektroonika labor Euroopa Jõuelektroonika Keskuse (ECPE) aktiivne liige ning omab ka Euroopa jõuelektroonika kompetentsikeskuse tiitlit. Aastal 2012 moodustati aktiivsete energiaülekandevõrkude alane konsortsium, mille raames käib aktiivne koostöö teiste Euroopa jõuelektroonika uurimiskeskuste ja -asutustega, nagu TTÜ Elektrotehnika instituut, Extremadura Ülikool (Hispaania), Universidade Nova de Lisboa (Portugal), Kempteni Rakendusülikool (Saksamaa), Gdynia Mereülikool (Poola), Zielona Gora Ülikool (Poola) ning Kataloonia Polütehniline Ülikool (Hispaania). Sama konsortsiumi liikmete poolt organiseeritakse

ka iga-aastasel IEEE Tööstuselektronika Ühingu (*IEEE-IES*) aastakonverentsil IECON jõuelektronikale ja aktiivsetele elektrivõrkudele suunatud sessioon.

Rakendusliku taustaga teadustööd on raske teha ilma ettevõtete moraalse, finantsilise ja infoalase toeta. Mitmed tehnoloogiaettevõtted on andnud väärtuslikku infot turul valitsevate tingimuste ja vajaduste kohta, teised on alltöövõtjatena panustanud teadusesse oma teadmiste, kogemuste ning seadmetega. Teadusgrupi põhilised koostööpartnerid on: Ubik Solutions OÜ, Estel Elektro AS, 4 Energia AS, Clifton OÜ, Balti Trafo AS, Vardar Eurus AS.



Foto

Firmale Ubik Solutions loodud kvaasi-impedantsallikaga muundur kütuselementi sidumiseks võrguga.

Kokkuvõtvalt võib öelda, et kirjeldatud tegevusest on kasu saanud nii taastuvenergeetika kui ka Eesti teadus, ja seda nii uute teadmiste kui ka uurimistöö käigus kraadiõppe läbinud uue põlvkonna teadlaste näol. Firma Ubik Solutions OÜ toel toimub teadustulemuste siirdamine tööstusesse ja kirjeldatud seadmete tootmiseks ettevalmistamine. Võib öelda, et väljatöötatud tehnoloogia kasutamine kütuselemente ja ülikondensaatoreid elektrivõrguga siduvates seadmetes aitab kaasa nii nende tehnoloogiate massidesse jõudmisele kui ka taastuvenergeetika võidukäigule üldiselt. Samas on kirjeldatud tehnoloogia kasutatav palju laiemalt kui käesolevas artiklis kirjeldatud.

Võimalikud kasutusala oleks veel: päikesepaneelide ja väikeste elektrituulikute võrgumuundurid, telekommunikatsioon, maismaatranspordis või lennunduses kasutatavad muundusseadmed ning elektroemiliste akude kiiralaadijad



elektersõidukitele. Seega pole töö antud suunal veel kaugeltki lõppenud, vaid alles alguses.

#### KIRJANDUS

Andrijanovits, A., Blinov, A., Husev, O., Vinnikov, D. (2012a). Multiport converter with integrated energy storage for hydrogen buffer interfacing with renewable energy systems. IEEE Int. Conf. on Industrial Technology (ICIT), March 19-21, 2012, 230-235.

Andrijanovits, A., Blinov, A., Vinnikov, D., Martins, J. (2012b). Magnetically coupled multiport converter with integrated energy storage. Przegląd Elektrotechniczny, 88, 7b, 171-176.

Blinov, A., Vinnikov, D., Husev, O., Chub, A. (2013). Experimental analysis of wide input voltage range qZS-derived push-pull DC/DC converter for PMSG-based wind turbines. Proc. of PCIM Europe 2013: PCIM Europe 2013, Nuremberg, Germany, May 14-16, 2013. VDE Verlag GMBH, Berlin, 1435-1444.

Husev, O., Blinov, A., Vinnikov, D., Chub, A. (2013). Steady-state analysis of qZS-derived push-pull DC/DC converter with wide input voltage regulation range. 8th Int. Conf.-Wrksh. Compatibility and Power Electronics (CPE2013), Ljubljana, Slovenia, June 05-07, 2013. IEEE, 320-325.

Roasto, I., Vinnikov, D. (2012). Impact of component losses on the voltage boost properties and efficiency of the qZS-converter family. COMPEL: Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng., 31, 6, 1945-1963.

Strzelecki, R., Vinnikov, D. (2010). Models of the qZ-converters. Przegląd Elektrotechniczny, 86, 6, 80-84.

Zakis, J., Vinnikov, D., Roasto, I., Ribickis, L. (2011). Quasi-Z-source inverter based bi-directional DC/DC converter: Analysis of experimental results. 7th Int. Conf.-Wrksh. Compatibility and Power Electronics (CPE), June 1-3, 2011, 394-399.

Zakis, J., Vinnikov, D., Husev, O., Rankis, I. (2012). Dynamic behaviour of qZS-based bi-directional DC/DC converter in supercapacitor charging mode. Int. Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), June 20-22, 2012, 764-768.

Vinnikov, D., Roasto, I. (2011). Quasi-Z-source-based isolated DC/DC converters for distributed power generation. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 58, 1, 192-201.

Vinnikov, D., Roasto, I., Jalakas, T. (2009). New step-up DC/DC converter with high-frequency isolation. 35th Annual IEEE Conf. of Industrial Electronics, IECON '09, November 3-5, 2009, 670-675.

- Vinnikov, D., Jalakas, T., Roasto, I., Lehtla, T., Laugis, J. (2010a). Voltage-fed quasi-impedance-source inverter. Utility Model Registration EE00930U1, 15.04.2010.
- Vinnikov, D., Roasto, I., Zakis, J. (2010b). New bi-directional DC/DC converter for supercapacitor interfacing in high-power applications. 14th Int. Power Electronics and Motion Control Conf. (EPE/PEMC), September 6-8, 2010, T11-38-T11-43.
- Vinnikov, D., Andrijanoviš, A., Roasto, I., Jalakas, T. (2011a). Experimental study of new integrated DC/DC converter for hydrogen-based energy storage. 10th Int. Conf. on Environment and Electrical Engineering (EEEIC'11), Italy, May 8-11, 2011, 1-4.
- Vinnikov, D., Husev, O., Roasto, I. (2011b). Lossless dynamic models of the quasi-Z-source converter family. *Scientific Journal of RTU: Power and Electrical Engineering*, 29, 73-78.
- Vinnikov, D., Roasto, I., Strzelecki, R., Adamowicz, M. (2011c). CCM and DCM operation analysis of cascaded quasi-Z-source inverter. *IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics (ISIE)*, June 27-30, 2011, 159-164.
- Vinnikov, D., Roasto, I., Zakis, J., Strzelecki, R. (2011d). New step-up DC/DC converter for fuel cell powered distributed generation systems: some design guidelines. *Przeład Elektrotechniczny*, 86, 8, 245-252.
- Vinnikov, D., Roasto, I., Jalakas, T., Strzelecki, R., Adamowicz, M. (2012a). Analytical comparison between capacitor assisted and diode assisted cascaded quasi-Z-source inverters. *Przeład Elektrotechniczny*, 88, 1a, 212-217.
- Vinnikov, D., Roasto, I., Strzelecki, R., Adamowicz, M. (2012b). Step-up DC/DC converters with cascaded quasi-Z-source network. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59, 10, 3727-3736.
- Vinnikov, D., Zakis, J., Husev, O., Strzelecki, R. (2012c). New high-gain step-up DC/DC converter with high-frequency isolation. 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conf. and Exposition (APEC), February 5-9, 2012, 1204-1209.

*Teaduspreemia arstiteaduse alal uurimuste tsükli “Aju plastilisuse regulatsiooni molekulaarsed mehhanismid” eest*



*Aleksandr Žarkovski*

Sündinud 31.01.1950 Gomelis (Valgevene)

1974 Tartu Ülikool, ravi

1978 meditsiinikandidaat, farmakoloogia, Tartu Ülikool

1988 meditsiinidoktor, farmakoloogia, Leningradi Eksperimentaalse Meditsiini Instituut

1978–1991 Tartu Ülikooli farmakoloogia instituudi teadur, lektor, dotsent, vanemteadur; alates 1992 farmakoloogia ja ravimite toksikoloogia professor, farmakoloogia osakonna juhataja

1989–1991 Londoni Ülikooli Guy's Haigla vanemteadur

1991–1992 Helsingi Ülikooli farmaatsiainstituudi vanemteadur

1992–1993 Stockholmi Karolinska Instituudi vanemteadur

2001 Eesti Vabariigi teaduspreemia arstiteaduse alal (kollektiivi juht)

Briti psühhofarmakoloogia, Euroopa biomeditsiiniliste alkoholismiuuringute ja Euroopa käitumusfarmakoloogia ühingute liige; Läti Farmakoloogia Seltsi auliige; Eesti farmakoloogia ja toksikoloogia seltside liige

Avaldanud 118 teaduspublikatsiooni

## AJU PLASTILISUSE REGULATSIOON NÄRVIRAKU ADHESIOONIMOLEKULI (NCAM) KAUDU

### UUED NÄRVIRAKU ADHESIOONI MODULAATORID NEURODEGENERATIIVSETE JA PSÜÜHILISTE HAIGUSTE RAVIS

Ägedad (insult, neurotrauma) ja kroonilised neurodegeneratiivsed haigused (Alzheimeri tõbi, Parkinsoni tõbi, Huntingtoni tõbi, väikeaju degeneratsioon jms), aga ka psüühilised häired (depressioon, skisofreenia, autism, narkomaa-  
nia) kujutavad üha suurenevat ohtu rahva tervisele, mõjutades ka patsienti-  
dega koos elavaid inimesi ja nende perekondi.

Nii neurodegeneratiivsetele haigustele kui ka psüühilistele häiretele on ise-  
loomulik aju düsfunktsionaalne plastilisus. Plastilisust võib määratleda kui aju

võimet teha adaptatiivseid muutusi närvisüsteemi struktuuris ja funktsioonis ning seda peetakse aju funktsionaalsuse tähtsaks tunnuseks. Aju vähenenud plastilisus aju arenemise ajal või täiskasvanu eas on seotud depressiooni, ärevuse, posttraumaatilise stresshäire, skosifreenia, autismi ning neurodegeneratiivsete haigustega, nagu Alzheimeri tõbi, amüotroofiline lateraalsklerooos, vananemisega seotud dementsus.

Ajukahjustuse ja insuldijärgne paranemine ning funktsionaalne taastumine sõltub suuresti säilunud neuronaalsete võrgustike struktuurset ja funktsionaalset plastilisusest. Teisest küljest võib epilepsiahoogudest tingitud aju ebanormaalne plastilisus olla vastutav neuronaalsete võrgustike reorganiseerumise ja 'epileptilise aju' moodustumise eest. Aju plastilisuse regulatsioonis kuulub väga tähtis roll adhesioonimolekulidele. Adhesioonimolekulide kaudu kontrollitakse õppimisprotsesse, meeleolu, samuti funktsioonide taastumist ägedate ning krooniliste neurodegeneratiivsete haiguste korral. Aju plastilisuse regulatsiooni molekulaarsete mehhanismide uurimise eesmärgiks on leida häirunud aju plastilisuse uusi biomarkereid neuropsühhiaatriliste häirete ja neurodegeneratiivsete haiguste puhul ning määratleda uued sihtmärgid aju düsfunktsionaalse plastilisuse korrigeerimiseks.

Kõige tähtsamad adhesioonimolekulid, mis osalevad aju plastilisuse regulatsioonis, on närviraku adhesioonimolekul (NCAM), L1 ja sünaptilise raku adhesioonimolekulid (sünaptilised CAMid) (Cremer jt, 1998; Amoureux jt, 2000; Kiss, Muller, 2001).

NCAM on adhesioonimolekulide immunoglobuliini perekonna liige, mis kodeeritakse ühe geeni poolt ning alternatiivse splaisingu tulemusena tekib kolm peamist isovormi 180, 140 ja 120 kDa (Cunningham jt, 1987). Need kolm isovormi erinevad oma tsütoplasmaatiliste domeenide või oma rakumembraanile kinnitumise poolest. NCAMi ekstratsellulaarne domeen sisaldab viit immunoglobuliinisarnast domeeni ja kahte III tüüpi fibronektiini domeeni.

NCAM reguleerib neuronaalset plastilisust kahe peamise mehhanismi kaudu:

①

NCAM loob rakkudevahelise adhesiooni oma ekstratsellulaarsete domeenide homofiilse sidumise kaudu ja tagab seega neuronaalsete võrgustike stabiilsuse. Posttranslatsioonilised modifikatsioonid, mis on tingitud  $\alpha$ -2,8-polüsiaalhappe (PSA) ahelate liitumisest NCAM ekstratsellulaarse domeeni immunoglobuliini (Ig5) mooduliga (Seki, Arai, 1993; Rougon, 1993), nõrgendavad NCAM-vahendatud adhesiooni ja tagavad seega plastilisuse: rakkude proliferatsiooni, rakkude migratsiooni, aksonaalset/dendriitilist fastsikulatsiooni ja jätkete moodustumist, rakkude spetsifitseerumist/diferentseerumist. PSA liitumine NCAMiga toimub kahe Golgi aparaadiga seotud polüsialüültransferaasi St8SiaII ja ST8SiaIV kaudu. Üldiselt ekspresseeritakse mõlemat ensüümi peamiselt arenemisperioodil, kuid nende maharegulatsioon toimub täiskasvanueas. Kuigi pärast sündimist ST8SiaII tase drastiliselt väheneb, esi-

neb ST8SialV ikkagi väikestes kogustes mitmes suure plastilisusega ajukoos, nagu hipokampus ja prefrontaalkoor, mandeltuum, olfaktoorne süsteem.

②

Lisaks PSA rollidele NCAM-vahendatud adhesiooni regulatsioonis kinnitavad paljud tõendid, et PSA-NCAM/NCAM reguleerib plastilisust interaktsiooni kaudu türosiinkinaasete retseptoritega, nagu fibroblasti kasvufaktori retseptor (FGFR) (Kiselyov jt, 2005; Rutishauser, 2008) ja ajast pärineva neurotroofse faktori (BDNF) retseptor TrkB (Vutskits jt, 2001), mis hõlbustavad FGF- või BDNF-vahendatud signaaliülekanne. Meie viimase aja uuringud on näidanud PSA-NCAM/NCAM ning FGF- ja BDNF-vahendatud signaaliülekanne vaheliste interaktsioonide tähtsust aju plastilisuse regulatsioonis täiskasvanueas (Aonurm-Helm jt, 2008a, 2010).

Niisiis on aju plastilisus/stabiilsus otseselt sõltuv tasakaalust PSA-NCAM ja NCAM vahel. Embrüonaalses ja varajases postnataalses perioodis on NCAM leitud olevat polüsialüülitud vormis ning see on tähtis struktuurse plastilisuse seisukohalt, samas aga sisaldab täiskasvanu aju suurel määral NCAMi, mis tagab neuraalsete võrgustike stabiilsuse. Täiskasvanu ajus leidub suures koguses PSA-NCAMi vaid suure plastilisusega piirkondades, kus PSA-NCAM on väga tähtis KNSi funktsiooni korrigeerimises täiskasvanueas. Mitmed tõendid näitavad NCAMi seotust täiskasvanu hipokampuse neurogeneesiga, mida peetakse aju plastilisuse ja parandamise spetsiifiliseks vormiks.

Üha rohkem tõendeid kinnitavad PSA-NCAM/NCAM seotust mitmesuguste neuropsühhiaatriliste häirete ja neurodegeneratiivsete haigustega, nagu depressioon, skisofreenia, autism, temporaalsagara epilepsia, Alzheimeri tõbi, hulgiskleroos. Meie varasemad, mitmel loomudelil läbi viidud uuringud on näidanud NCAM/NCAM rolli kognitsioonis (Jürgenson jt, 2010), depressioonis (Aonurm-Helm jt, 2008a; Jürgenson jt, 2012; Jaako-Movits, Zharkovsky, 2005; Jaako-Movits jt, 2006), ägedas ja kroonilises neurodegeneratsioonis ja epilepsias (Jaako jt, 2011), kognitsiooni häirumises, mis on põhjustatud glutamaadireseptori signaliseerimise häirumisest (Procaccini jt, 2011), keskkonnamürkidest, nagu plii (Procaccini jt, 2011), ja narkootilistest ainetest (Heidmets jt, 2006).

Üldiselt on psüühilisi häireid, nagu skisofreenia, depressioon ja autism, seostatud NCAMi ja PSA-NCAM vähenenud tasemega. Neurodegeneratiivsete haiguste, nagu Alzheimeri tõbi, insult, temporaalsagara epilepsia, puhul on PSA-NCAM tase suurenenud, mis tõenäoliselt viitab aju plastilisuse aktiveerumisele ja selle võimele remodelleeruda. NCAMi on seostatud ka hulgiskleroosi patogeneesiga. PSA-NCAM ekspressioon takistab aksonite remüelinisatsiooni ja seega võib PSA-NCAM osaleda haiguse progresseerumises.

Meie uurimisprojekti eesmärgiks oli selgitada aju düsfunktsionaalse plastilisuse rakulisi ja molekulaarseid mehhanisme ning töötada selle põhjal välja

uued ravivõimalused neurodegeneratiivsete ja psüühiliste häiretega võitlemiseks.

Projekti põhilisteks uurimissuundadeks olid:

- närviraku adhesioonimolekuli-(NCAM)-defitsiitsetel hiirtel välja selgitada häirunud signaalirajad ja kuidas need signaalirajad osalevad fenotüübi väljakujunemisel;
- uurida NCAM mimeetikumide ja teiste aju plastilisuse modulaatorite terapeutilist potentsiaali aju plastilisuse taastamiseks;
- uute loomudelite väljatöötamine ja biomarkerite valideerimine aju plastilisuse hindamiseks.

Oma uuringutes kasutasime geneetiliselt modifitseeritud hiiri, kellel puudus *NCAM* i geen. NCAMi puudulikkus põhjustas nendel hiirtel tõsist õppimis- ja mäluhäireid ning esinesid käitumuslikud muutused, mis meenutasid depressiooni (Aonurm-Helm jt, 2008a). Me uurisime põhjalikult, kuidas on seotud vähenenud õppimisvõime depressioonisarnase käitumisega. Selleks kasutasime emotsionaalsest stressist tingitud mälu formeerumist ning vaatasime, kas NCAM-defitsiitne hiir on võimeline ümber õppima, teiste sõnadega, kas loom on võimeline vabanema negatiivsest mälust. Selgus, et see protsess on oluliselt aeglustunud (Jürgenson jt, 2010, 2012). See võimaldas järeldada, et vähenenud plastilisus ja sellest tulenev kognitiivne häire on otseselt seotud negatiivsete skeemide fikseerumisega, mis on iseloomulik depressiivsele käitumisele. Kuigi depressiooni tekkemehhanismid on suuresti selgusetud, püstitasime hüpoteesi, et depressioonisarnane sümptomaatika on seotud NCAM-vahendatavate radade düsfunktsiooniga. Kõigepealt leidsime, et NCAM-defitsiitsetel hiirtel on fosforüülitud CREBi (tsükliilise AMP vastuselemendiga seonduv valk) tase oluliselt langenud (Aonurm-Helm jt, 2008a). Edasine uurimine näitas, et CREBi fosforüülimise taseme langus on tõenäoliselt seotud fibroblastide kasvufaktori (FGF) retseptori aktivatsiooni langusega ning CaMKII ja CaMKIV kinaaside fosforüülimise defitsiitsusega (Aonurm-Helm jt, 2010). Teised rajad, nagu Src kinaaside rada või FYN kinaasi rada, ei olnud NCAM-defitsiitsetel loomadel häirunud. Samuti uurisime, kas NCAM-heterosügootsetel hiirtel esinevad depressioonisarnane sümptomaatika ja kognitiivsed häired ning leidsime, et neil hiirtel esinevad depressioonisümptomid on sarnased homosügootsetel hiirtel esinevatega, aga heterosügootidel puuduvad kognitiivsed häired (Jürgenson jt, 2012).

Järgmisena tahtsime teada, kas NCAMi toimeid soodustavad molekulid on võimelised normaliseerima seda düsfunktsionaalsust. Selleks sünteesiti koostöös Taani kolleegidega (professor E. Bock ja professor V. Berezin) rida peptiidstruktuuriga NCAMi analooge, mis olid võimelised aktiveerima FGF-retseptorit. Üks neist peptiidmolekulidest nimega FGL (fibroblasti kasvufaktori retseptori linker) näitas häid farmakokineetilisi omadusi – süstimisel kõhuõõnde püsis kaua aega organismis, oli võimeline läbima hematoentsefaal-

barjääri ja kutsus esile FGF-retseptori aktivatsiooni. Järgmisena manustasime NCAM-defitsiitsetele loomadele mimeetikumi FGLi ning uurisime, kas FGL on võimeline avaldama antidepressiivset toimet meie muldelis. Meie katsed näitasid, et FGL avaldas antidepressiivset toimet ning toime efektiivsus oli võrdne tuntud antidepressandi amitriptüliiniga (Aonurm-Helm, 2008a, 2010). Samuti taastas FGL pärsitud signaalirajad, normaliseerides nii FGF-retseptori fosforüülimise kui ka CaMKII ja CaMKIV kinaaside fosforüülimise taset. Seega näitasime, et FGL avaldab antidepressiivset toimet, mõjutades FGF-retseptori – CaMK kinaaside – CREBi kaskaade (Aonurm-Helm jt, 2010; Enevolsen jt, 2012). Need tulemused tõendavad, et NCAM-defitsiitsus tingib CREB-vahendatud signaaliradade regulatsiooni häirumist neis ajupiirkondades, mis on seotud depressioonisarnase fenotüübiga.

Järgmisena huvitusime, kas teised aju plastilisuse reguleerivad molekulid erütropoetiin ja Sonic hedgehog on samuti võimelised mõjutama aju plastilisust ja kas peptiidstruktuuriga molekulid on võimelised moduleerima aju plastilisust ning sellega avaldama neuroprotektiivset toimet nende neuroreguleerivate molekulide kaudu ning kas nende retseptorite modulaatorid omavad terapeutilist potentsiaali aju plastilisuse taastamiseks. Leidsime, et Sonic hedgehogi agonist SAG on võimeline soodustama neurogeneesi ja taastama seeläbi aju plastilisuse (Bragina jt, 2010). Koostöös Taani teadlastega viisime läbi kompleksuuringu erütropoetiinireseptori agonistide neuroprotektiivse toime mehhanismi ning efektiivsuse väljaselgitamiseks. Leidsime, et üks erütropoetiinireseptori agonist Epotris avaldab tugevat neuroprotektiivset toimet, samas puuduvad tal erütropoetiinile iseloomulikud kõrvaltoimed (Pankratova jt, 2010).

Meie järgmiseks ülesandeks on uurida, milliseid neuronaalse plastilisuse vorme mõjutab sialüültransferaaside ST8SiaII ja ST8SiaIV defitsiitsus. Närvi-raku adhesioonimolekuli (NCAM) posttranslatsiooniline modifitseerimine polüsiaalhappe (polySia) poolt omab olulist tähtsust närvisüsteemi arengus ja aju plastilisuses. PolySia kinnitumist katalüüsivad polüsialüültransferaasid (polySia) ST8SiaII ja ST8SiaIV, kaks ensüümi, millel on erinevad, kuid samas ka ühised funktsioonid arenevas ja täiskasvanu ajus. Üha enam tõendeid seob NCAM-i ja polySia averrantset taset neuropsühhiaatriliste häirete, sealhulgas skisofreeniaga. Et kindlaks teha, kas polyST defitsiit võiks põhjustada ski-sofreeniasarnast fenotüüpi, uurisime me neuroanatomiliselt *St8sia2<sup>-/-</sup>* hiiri, *St8sia4<sup>-/-</sup>* hiiri ja nende metsiktüüpi liigikaaslasi ning testisime nende kog-nitiivseid ja sensoorseid funktsioone. *St8sia2<sup>-/-</sup>* hiirtel, kuid mitte *St8sia4<sup>-/-</sup>* hiirtel, esinesid suurenenud lateraalsed ajuvatsakesed ja talamuse suurus oli vähenenud, millega kaasnes ka väiksem sisekihn ning talamus ja suurajukoort ühendavate kiudude suuresti desorganiseeritud muster. Vesikulaarse glutaamaadi transporteri VGLUT2 vähenenud tase viitas frontaalkoorde jõudvale nõrgenenud glutamaatergilisele talamokortikaalsele impulsile *St8sia2<sup>-/-</sup>* hiirtel. Mõlemal polyST-defitsiitsel liinil oli häiritud ka



lühij- ja pikaajaline äratund-mismälu, kuid töömälu häirumine ja eelimpulsi inhibeerimise defitsiit esines vaid *St8sia2<sup>-/-</sup>* hiirtel, mida saab vähendada klosapiinraviga. Peale selle esines *St8sia2<sup>-/-</sup>* hiirtel anhedoonne käitumine ja suurenenud tundlikkus amfetamii-niga esile kutsutud lokomotoorse aktiivsuse suurenemise suhtes. Kokkuvõttes kinnitavad need andmed, et vähenenud polüsialüüliline *St8sia2<sup>-/-</sup>* hiirtel viib ajupatoloogia arenemisele ja skisofreeniasarnase käitumise tekkimisele. Seega me arvame, et ST8SIA2-defitsiitsus võib anda neuroarengulise eelsoodumuse skisofreenia tekkeks (Kröcher jt, 2013).

Kokkuvõttes näitasime me oma uuringutes, kuidas aju plastilisuse regulaatorid, nagu NCAM, erütropoetiin, Sonic hedgehog, osalevad aju plastilisuse regulatsioonis, kuidas aju häirunud plastilisus võib osaleda psüühiliste ja neurodegeneratiivsete haiguste tekkes ning näitasime ka uusi võimalusi düsfunktsionaalse plastilisuse normaliseerimiseks ning selle kaudu psüühiliste ja neurodegeneratiivsete haiguste raviks.

#### TÄNUAVALDUSED

Teadustööd finantseeriti järgmistest fondidest: ETF grant 7955, EL grant “Promemoria”, IUT 2-3.

#### KIRJANDUS

Amoureux, M. C., Cunningham, B. A., Edelman, G. M., Crossin, K. L. (2000). N-CAM binding inhibits the proliferation of hippocampal progenitor cells and promotes their differentiation to a neuronal phenotype. *J. Neurosci.*, 20, 3631-3640.

Aonurm-Helm, A., Jurgenson, M., Zharkovsky, T., Sonn, K., Berezin, V., Bock, E., Zharkovsky, A. (2008a). Depression-like behaviour in neural cell adhesion molecule (NCAM)-deficient mice and its reversal by an NCAM-derived peptide, FGL. *Eur. J. Neurosci.*, 28, 8, 1618-1628.

Aonurm-Helm, A., Zharkovsky, T., Jürgenson, M., Kalda, A., Zharkovsky, A. (2008b). Dysregulated CREB signaling pathway in the brain of neural cell adhesion molecule (NCAM) deficient mice. *Brain Res.*, 1243, 104-112.

Aonurm-Helm, A., Berezin, V., Bock, E., Zharkovsky, A. (2010). NCAM-mimetic, FGL peptide, restores disrupted fibroblast growth factor receptor (FGFR) phosphorylation and FGFR mediated signaling in neural cell adhesion molecule (NCAM)-deficient mice. *Brain Res.*, 1309, 1-8.

Bragina, O., Sergejeva, S., Serg, M., Žarkovsky, T., Maloverjan, A., Kogerman, P., Žharkovsky, A. (2010). Smoothened agonist augments proliferation and survival of neural cells. *Neurosci. Lett.*, 482, 81-85.

Cremer, H., Chazal, G., Carleton, A., Goridis, C., Vincent, J. D., Lledo, P. M. (1998). Long-term but not short-term plasticity at mossy fiber synapses is

impaired in neural cell adhesion molecule-deficient mice. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 95, 13242-13247.

Cunningham, B. A., Hemperly, J. J., Murray, B. A., Prediger, E. A., Brackenbury, R., et al. (1987). Neural cell adhesion molecule: structure, immunoglobulin-like domains, cell surface modulation, and alternative RNA splicing. *Science*, 236, 799-806.

Enevoldsen, M. I., Kochoyan, A., Jürgenson, M., Jaako, K., Dmytriyeva, O., Walmod, P. R., Nielsen, J., Nielsen, J., Li, S., Korshunova, I., Klementiev, B., Novikova, T., Zharkovsky, A., Berezin, V., Bock, E. (2012). Neuroprotective and memory enhancing properties of a dual agonist of the FGF receptor and NCAM. *Neurobiol. Disease*, 48, 533-545.

Heidmets, L. T., Zharkovsky, T., Jurgenson, M., Jaako-Movits, K., Zharkovsky, A. (2006). Early post-natal, low-level lead exposure increases the number of PSA-NCAM expressing cells in the dentate gyrus of adult rat hippocampus. *Neurotoxicology*, 1, 39-43.

Jaako, K., Zharkovsky, T., Zharkovsky, A. (2009). Effects of repeated citalopram administration on kainic acid-induced neurogenesis in adult mouse hippocampus. *Brain Res.*, 1288, 18-28.

Jaako, K., Aonurm-Helm, A., Kalda, A., Anier, K., Zharkovsky, T., Shastin, A., Zharkovsky, A. (2011). Repeated citalopram administration counteracts kainic acid-induced spreading of PSA-NCAM-immunoreactive cells and loss of reelin in the adult mouse hippocampus. *Eur. J. Pharmacol.*, 666, 1-3, 61-71.

Jaako-Movits, K., Zharkovsky, A. (2005). Impaired fear memory and decreased hippocampal neurogenesis following olfactory bulbectomy in rats. *Eur. J. Neurosci.*, 22, 11, 2871-2878.

Jaako-Movits, K., Zharkovsky, T., Pedersen, M., Zharkovsky, A. (2006). Decreased hippocampal neurogenesis following olfactory bulbectomy is reversed by repeated citalopram administration. *Cell Mol. Neurobiol.*, 26, 1559-1570.

Jürgenson, M., Aonurm-Helm, A., Zharkovsky, A. (2010). Behavioral profile of mice with impaired cognition in the elevated plus-maze due to a deficiency in neural cell adhesion molecule. *Pharmacol. Biochem. Behav.*, 96, 461-468.

Jürgenson, M., Aonurm-Helm, A., Zharkovsky, A. (2012). Partial reduction in neural cell adhesion molecule (NCAM) in heterozygous mice induces depression-like behaviour without cognitive impairment. *Brain Res.*, 1447, 106-118.

Kiselyov, V. V., Soroka, V., Berezin, V., Bock, E. (2005). Structural biology of NCAM homophilic binding and activation of FGFR. *J. Neurochem.*, 94, 1169-1179.

Kiss, J. Z., Muller, D. (2001). Contribution of the neural cell adhesion molecule to neuronal and synaptic plasticity. *Rev. Neurosci.*, 12, 297-310.

- Kröcher, T., Malinovskaja, K., Jürgenson, M., Aonurm-Helm, A., Zharkovskaya, T., Kalda, A., Röckle, I., Schiff, M., Weinhold, B., Gerardy-Schahn, R., Hildebrandt, H., Zharkovsky, A. (2013). Schizophrenia-like phenotype of polysialyltransferase ST8SIA2-deficient mice. *Brain Struct Funct.* DOI: 10.1007/s00429-013-0638-z.
- Pankratova, S., Kiryushko, D., Sonn, K., Soroka, V., Køhler, L. B., Rathje, M., Gu, B., Gotfryd, K., Clausen, O., Zharkovsky, A., Bock, E., Berezin, V. (2010). Neuroprotective properties of a novel, non-haematopoietic agonist of the erythropoietin receptor. *Brain*, 133, 2281-2294.
- Procaccini, C., Aitta-Aho, T., Jaako-Movits, K., Zharkovsky, A., Panhelainen, A., Sprengel, R., Linden, A.-M., Korpi, E. (2011). Excessive novelty-induced c-Fos expression and altered neurogenesis in the hippocampus of GluA1 knockout mice. *Eur. J. Neurosci.*, 33, 1, 161-174.
- Rougon, G. (1993). Structure, metabolism and cell biology of polysialic acids. *Eur. J. Cell Biol.*, 61, 197-207.
- Rutishauser, U. (2008). Polysialic acid in the plasticity of the developing and adult vertebrate nervous system. *Nat. Rev. Neurosci.*, 1, 26-35.
- Seki, T., Arai, Y. (1993). Distribution and possible roles of the highly polysialylated neural cell adhesion molecule (NCAM-H) in the developing and adult central nervous system. *Neurosci. Res.*, 17, 265-290.
- Vutskits, L., Djebbara-Hannas, Z., Zhang, H., Paccaud, J. P., Durbec, P., et al. (2001). PSA-NCAM modulates BDNF-dependent survival and differentiation of cortical neurons. *Eur. J. Neurosci.*, 13, 1391-1402.

*Teaduspreemia geo- ja bioteaduste alal uurimuste tsükli  
"Seente elurikkuse ja biogeograafia globaalsed mustrid" eest*



*Leho Tedersoo*

Sündinud 3.04.1980

1998 Tallinna Kristiine Gümnaasium

2002 Tartu Ülikool, botaanika ja mükoloogia

2007 PhD, botaanika ja mükoloogia, Tartu Ülikool

Alates 2005 Tartu Ülikooli ökoloogia ja maateaduse instituudi spetsialist, botaanika ja ökoloogia instituudi ning ökoloogia ja maateaduse instituudi laborant, erakorraline teadur, loodusmuuseumi teadur, loodusmuuseumi botaanika- ja mükoloogiamuuseumi vanemteadur

2003, 2007 Üliõpilaste teadustööde riikliku konkursi I preemia

Eesti mikrobioloogia ja mükoloogia ühingute, Eesti Loodusuurijate Seltsi liige

Avaldanud üle 60 teaduspublikatsiooni

## MÕLGUTUSI SEENTE SALAPÄRAST JA TEADUSTÖÖST

### SEENTE ELURIKKUS

Seeneriik hõlmab väga huvitava eluviisiga organisme, kelle keha varieerub ühest ainsast viburiga rakust plastilise pärmirakuni ja mitut hektarit hõlmava hulkrakse niidistikuni. Seenediivid ehk hüüfid on tegelikult piklikud mikroskoopilised rakud. Inimsilm eristab tihedalt koos kasvavaid seeneniite, näiteks hallitused, ja tuhandeid kokkupõimunud seeneniite, mis moodustavad hüüfipõimikuid ehk seeneväate. Majavammi seeneväädid võivad olla isegi sentimeetrise läbimõõduga. Ka seente viljakehad koosnevad tihedalt koos kasvavatest hüüfidest, mis erinevates kudedes võivad olla väga erineva kujuga. Silmaga nähtavaid viljakehi moodustab alla poole 70 000-st kirjeldatud seeneliigist, mis viitab sellele, et enamikku neist ei ole võimalik looduses vahetult jälgida. Seeneriigi elurikkuseks hinnatakse 1,5–5 miljonit liiki, mis paigutab nad putukate järel suuruselt teiseks organismirühmaks maailmas (Blackwell, 2011). Eestist on teada umbkaudu 7 000 seeneliiki, mis näitab siinset head uurimistaset ligi sajandi jooksul.

### SEENTE SALAPÄRANE ELUVIIS

Seened on oma elutegevuse poolest looduses asendamatud. Enamik seeni on lagundajad, kes toituvad surnud orgaanilisest aineist, peamiselt taimejäänustest. Ilma seente lagundamistegevuseta kuhjuks orgaaniline aine mullapinnale ja taimede kasvu pärsiks fotosünteesiks vajaliku süsihappegaasi puudus juba üsna peatselt pärast seente kadumist. Paljud seened assotsieeruvad rohevetikatega või sinikute ehk tsüaanobakteritega, moodustades samblikke. Samblik on väga ürgne kooseluvorm, mis võimaldas erinevatel organismidel väga rasketes keskkonnatingimustes ellu jääda ja paljuneda. Seened on samas ka ühed kõige olulisemad taimehaiguste tekitajad ning teiste seente ja loomade parasiidid. Haigustekitajad võivad paradoksaalsel kombel hoopiski suurendada taimede liigirikkust, sest taimeliikide-spetsiifilised haigustekitajad kuhjuvad nende ümber mullas. Seejuures eriti tugevasti pärsitakse tavalisemate taimeliikide seemnete idanemist ning idandite kasvu, mis soodustab haruldasemate taimeliikide püsimist kooslustes (Bagchi jt, 2014).

Seentel on ainulaadne roll ka taimede varustamisesel mullas leiduvate toitainetega. Mükoriisa ehk seenjuur arenes selle tarbeks juba esimestel maismaataimedel ligi 400 miljonit aastat tagasi (Selosse, Le Tacon, 1998). Mükoriisa on taimejuure ja seene ühisorgan, mille kaudu enamik maismaataimi ammutab mullast vees lahustunud toitaineid (Smith, Read, 2008). Seensümbiont saab taimelt fotosünteesiproduktide näol kogu või väga olulise osa oma energiast. Mükoriisasid on mitu erinevat tüüpi, millest olulisimad on ektomükoriisa ja juuresiseste põõsasjate struktuuridega arbuskulaarne mükoriisa. Ektomükori-

riisas on taimede peenjuured tihedalt kaetud seenerakkudega, mida nimetatakse seenmantliks. Seenmantli värvus võib tänu erinevatele pigmentidele tugevasti varieeruda ja erksat värvi metsapuude mükoriissid juured on vaadeldavad ka palja silmaga (joonis 1). Juure välimise rakukihi vahele ulatuvad seeneniidid moodustavad nn Hartigi võrgustiku, mille kaudu toimub toitainete vahetus seene ja taimede vahel. Taimed investeerivad juurtoitumisse seente vahendusel veerandi kuni kaks kolmandikku oma fotosünteesiproduktidest.



A

B

Joonis 1.

Ektomükoriisa.

A. Kahe ektomükoriisaseenega eksperimentaalselt nakatatud hariliku männi 6-kuune seemik. Ere kollast mükoriisat moodustab koorikja viljakehaga *Piloderma fallax*, mis on sage eriti kuivemates okasmetsades metsakõdus. Valget mükoriisat silmapaistvate seeneväärtidega moodustab liivtatik (*Suillus granulatus*), mis kasvab ainult koos mändidega rabadest nõmmemetsadeni.

B. Lähiplaanis männijuurte mükoriisad, mis kuuluvad liikidele *Tomentellopsis submollis* (alumised roosad) ja *Tylospora fibrillosa* (ülemised beežikad), mis on sagedad liigid kõikides metsatüüpides. Mükoriisade läbimõõt on u 0,3 mm.

Mükoriisaseened moodustavad kuni 40% mullamikroobide biomassist ja panustavad ligi 25% mullahingamisest (Heinemeyer jt, 2007; Högberg jt, 2010). Puujuurte ja mükoriisaseente rakuseinad moodustavad peamise osa metsahuumusest (Clemmensen jt, 2013).

Eesti teadlased on eksperimentaalsete ja molekulaarsete meetoditega esimesena tuvastanud üle 20 uue mükoriisat moodustava seeneharu (Kõljalg, 1992; Tedersoo jt, 2006, 2010a, 2013; Tedersoo, Smith, 2013). Enamik avastatud seenerühmi moodustab pisikesi kausikujulisi või koorikjaid viljakehi, mis äratavad vähe tähelepanu. Üheainsa täiskasvanud puu juuri koloniseerib mitusada seeneliiki ja mitukümmend ühe seeneliigi indiviidi (Bahram jt, 2011).

#### MOLEKULAARSED MÄÄRAMISMEETODID

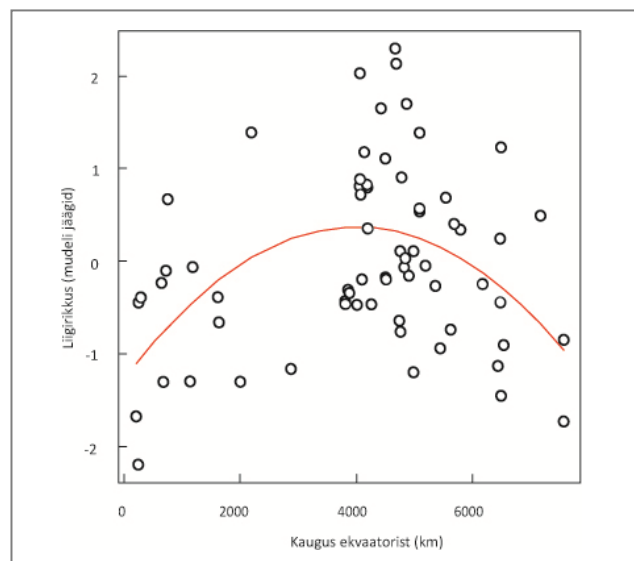
Hoolimata seeneriigi suurusest ja ülimalt tähtsates rollides looduslike protsesside toimimises on seeni ligi suurusjärgu võrra vähem uuritud kui näiteks baktereid ja eriti taimi ja loomi. Viimastel aastatel on kirjeldatud palju uusi seente hõimkondi, mis viitab otseselt vähesele uuritusele (James jt, 2006; Lara jt, 2010). Kuna seeneniidistik on mikroskoopiline ja üle poole teadaolevatest seeneliikidest ei suudeta kultuuris kasvatada, on nende uurimine olnud ka raskestatud. Alles viimase 15 aasta jooksul piisavalt arenenud ja paljudele uurimiserühmadele kättesaadavaks muutunud molekulaarsed meetodid võimaldasid heita pilku seente salapärasesse maailma mullas, vees, puidus, lehtedes ja loomorganismides (Peay jt, 2008). Laialdaselt on levinud ribosomaalse DNA mittetranskribeeritava ITS regiooni primaarse järjestuse kasutamine seeneliikide eristamiseks. See geenilõik esineb genomis kümnete või sadade koopiatena, on vähe-konserveerunud ning seetõttu kergesti paljundatav polümeraase ahelreaktsiooni (PCR) käigus (Schoch jt, 2012; Kõljalg jt, 2013). Tartu Ülikooli mükoloogia ja bioloogiliste interaktsioonide ökoloogia töörühmad on olnud esirinnas ka uudsete nn uue põlvkonna DNA järjestuse määramise meetodite arendamisel ja valideerimisel (Tedersoo jt, 2010b; Nilsson jt, 2011). Need meetodid võimaldavad määrata tuhandeid seeneliike sadadest proovidest samaaegselt ning mõistliku hinnaga. See on andnud mikroorganismide uuringule uue mõõtme, ent ei võimalda siiski tuvastada eri liikide funktsiooni keskkonnas. Ektomükoriissed seeneliigid ja sugukonnad erinevad üksteisest funktsionaalsete omaduste poolest suurel määral (Ostonen jt, 2009; Tedersoo jt, 2012b).

#### SEENESTIKU GLOBAALSED MUSTRID

Kuna seente elurikkuse uurimist molekulaarsete meetoditega saavad endale lubada eeskätt Põhja-Ameerika ja Euroopa riigid ning Jaapan, on enamik sellistest töödest läbi viidud põhja-poolkera parasvöötme metsades. TÜ bioloogiliste interaktsioonide ökoloogia töörühma liikmed on kogunud tuhandeid bioloogilisi proove paljudest uurimata troopilistest piirkondadest – Austra-

liast, Paapua Uus-Guineast, Malaisiast, Taimaalt, Seishellidelt, Kamerunist, Gabonist, Zambias, Beninist, Madagaskarilt, Ekuadorist, Argentiinast ja mujalt, et saada globaalset pilti ektomükoriisaseente elurikkusest. See on olnud siiani kõige laialatuslikum troopilistele ökosüsteemidele keskendunud projekt Eesti teadusajaloos. Ekspeditsioonide raames olen välja õpetanud ligikaudu kümme Eesti kraadiõppurit, kellest enamik on tõenäoliselt tänu sellele võimelised iseseisvalt töötama maailma eri paikades keerulistes tingimustes. Võime organiseerida koostööd kohalikest hõimudest taimetundjatega ning teha minutite jooksul meetodikasse otsustavaid korrekture vastavalt kohalikele oludele on väga olulised oskused noorte inimeste tulevases elus teadlaste või teiste spetsialistidena.

Lisaks massilisele seene- ja taime-eksemplaride mikroskoopilisele ja molekulaarsele määramisele püstitasime koos tudengitega erinevates kooslustes teaduslikud hüpoteesid mükoriisaseente peremehe-spetsiifilisuse, mullastiku eelistuse ja seeneniidistiku ruumilise struktuuri ning neid põhjustavate looduslike protsesside kohta (Tedersoo jt, 2007, 2008, 2009ab, 2010c, 2011, 2012b; Suvi jt, 2010; Jaurus jt, 2011; Phosri jt, 2012; Tedersoo, Põlme, 2012; Nouhra jt, 2013). Nende tööde üldistuse käigus selgus, et vastupidiselt teistele teadaolevatele organismirühmadele on ektomükoriisete seente liigiline ja fülogeneetiline elurikkus troopikas märksa madalam kui parasvöötmes (Tedersoo, Nara, 2010; Tedersoo jt, 2010a, 2012a; Tedersoo, Smith, 2013) (joonis 2).



Joonis 2.

Ektomükoriisaseente liigirikkuse seos kaugusega ekvaatorist. Arvutused on tehtud jääkidega parimast mudelist, mis sisaldab ka läbiuuritud mulla kogust, häiringuid ja aasta keskmist sademetehulka.



Tõenäoliselt on ektomükoriisne sümbioos tekkinud männilistega juura-ajastul just parasvöötme-metsades või Lõuna-Aasia mägedes, mistõttu paljud seal arenenud seenerühmad pole kohanenud troopiliste tingimustega. Seni avaldamata andmed paarikümnest tuhandetest mullaproovist viitavad sellele, et lagundajate ja parasiitide elurikkus tipneb ikkagi troopilistes kooslustes nagu taimedel ja loomadel.

#### KÄESOLEV TEADUSTÖÖ

Hetkel ja lähitulevikus keskendub meie töörühm oma uurimustöös järgmistele teaduslikele küsimustele:

- Kõigi seeneriigi peamiste taksonoomiliste ja ökoloogiliste rühmade globaalse elurikkuse ja biogeograafiliste mustrite tuvastamine, kasutades kõige uuemaid molekulaarse määramise meetodeid;
- Seente, protistide ja taimede elurikkuse suhte modelleerimine nii Eesti skaalas kui ka globaalses mastaabis;
- Mulla mikroorganismide funktsionaalsete geenide globaalne levik ja seda mõjutavad kliimaatilised ja mullatekke protsessid;
- Kliimamuutuste otsese ja kaudse (läbi taimkatte muutuste) mõju modelleerimine seente erinevate ökoloogiliste rühmade elurikkusele ja koosluste struktuurile;
- Ruumilised mustrid ja neid põhjustavad protsessid mullaseente ja -protistide kooslustes;
- Sümbiontsete seente ruumilise struktuuri mõju käpaliste levikule Lääne-Eesti niitudel;
- Trühvlikasvatuse võimalikkus Eestis ja Põhjamaade trühvlite elurikkus. Vastupidiselt kõigile ootustele oleme Eestist siiani leidnud ligi 30 liiki trühvleid (vt ka Tedersoo, Naadel, 2011).

#### TEADUSLIKU HARIDUSE TUGITALAD

Hoolimata molekulaarsete meetodite kiirest pealetungist on ilmnunud järjest suurem vajadus noorte naturalistide järele, kes tunnevad elusorganismide looduses, oskavad neid korjata ja säilitada ning ka hiljem klassikaliste meetoditega määrata. Seetõttu palun oma tudengitel osa võtta võimalikult paljudest praktikumidest ning tähtsustan ka nende head statistilise ja bioinformaatilise andmetöötluse oskust ning teaduslikku inglise keelt. Neid oskusi pean looduslike protsesside ja seoste loomise võime vundamendiks. Pärast eesti keeles kirjutatud bakalaureusetööd eeldan tudengitelt teadusartiklina vormistatud ingliskeelset magistritööd, mis on annab suurepärase ettevalmistuse tulevaseks doktoriõppeks. Senine kogemus on näidanud, et tudengid, kes sellega toime ei tule, pole ka piisavalt võimekad ega iseseisvad doktorantuuri läbimiseks. Kuigi Tartu Ülikool annab nn roheline bioloogia valdkonnas suurepärase ja konkurentsivõimelise hariduse, pooldan tudengite mõnekuist õpet välisüli-

koolis, et laiendada silmaringi ja parandada keeleoskust ning värske pilguga muuta paremaks ka meie töörühma õhkkonda ning õppetööd. Ingliskeelset suhtlemis- ja kirjutamisoskust on aidanud märkimisväärselt parandada ka meie töörühmas õppivad välisdoktorandid.

## KIRJANDUS

Bagchi, R., Gallery, R. E., Gripenberg, S., Gurr, S. J., Narayan, L., Addis, C. E., Freckleton, R. P., Lewis, O. T. (2014). Pathogens and insect herbivores drive rainforest plant diversity and composition. *Nature*, trükis.

Bahram, M., Pölme, S., Kõljalg, U., Tedersoo, L. (2011). A single European aspen (*Populus tremula*) tree individual may potentially harbour dozens of *Cenococcum geophilum* ITS genotypes and hundreds of species of ectomycorrhizal fungi. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 75, 313-320.

Blackwell, M. (2011). The Fungi: 1, 2, 3 ... 5.1 million species? *Am. J. Bot.*, 98, 936-948.

Clemmensen, K. E., Bahr, A., Ovaskainen, O., Dahlberg, A., Ekblad, A., Wallander, H., Stenlid, J., Finlay, R. D., Wardle, D. A., Lindahl, B. D. (2013). Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest. *Science*, 339, 1615-1618.

Heinemeyer, A., Hartley, I. P., Evans, S. P., Carreira de la Fuente, J. A., Ineson, P. (2007). Forest soil CO<sub>2</sub> flux: uncovering the contribution and environmental responses of ectomycorrhizas. *Glob. Change Biol.*, 13, 1786-1797.

Högberg, M. N., Briones, M. J. I., Keel, S. G., Metcalfe, D. B., Campbell, C., Midwood, A. J., Thornton, B., Hurry, V., Linder, S., Näsholm, T., Högberg, P. (2010). Quantification of effects of season and nitrogen supply on tree below-ground carbon transfer to ectomycorrhizal fungi and other soil organisms in a boreal pine forest. *New Phytol.*, 187, 485-493.

Jairus, T., Mpumba, R., Chinoya, S., Tedersoo, L. (2011). Invasion potential and host shifts of Australian and African ectomycorrhizal fungi in mixed eucalypt plantations. *New Phytol.*, 192, 179-187.

James, T. Y., Kauff, F., Schoch, C. L., 68 others. (2006). Reconstructing the early evolution of fungi using a six-gene phylogeny. *Nature*, 443, 818-822.

Kõljalg, U. (1992). Mycorrhiza formed by basidiospores of *Tomentella crinalis* on *Pinus sylvestris*. *Mycol. Res.*, 96, 215-220.

Lara, E., Moreira, D., Lopez-Garcia, P. (2010). The environmental clade LKM11 and *Rozella* form the deepest branching clade of fungi. *Protist*, 161, 116-121.

Nilsson, R. H., Tedersoo, L., Lindahl, B., Kjoller, R., Carlsen, T., Quince, C., Abarenkov, K., Pennanen, T., Stenlid, J., Bruns, T., Larsson, K.-H., Kõljalg, U.,

- Kausrud, H. (2011). Towards standardization of the description and publication of next-generation sequencing datasets of fungal communities. *New Phytol.*, 191, 314-318.
- Nouhra, E., Urcelay, C., Longo, S., Tedersoo, L. (2013). Ectomycorrhizal fungal communities associated to *Nothofagus* species in Northern Patagonia. *Mycorrhiza*, 23, 487-496.
- Ostonen, I., Tedersoo, L., Suvi, T., Lõhmus, K. (2009). Does a fungal species drive ectomycorrhizal root traits in *Alnus* species? *Can. J. For. Res.*, 39, 1787-1796.
- Peay, K. G., Kennedy, P. G., Bruns, T. D. (2008). Fungal community ecology: a hybrid beast with a molecular master. *Bioscience*, 58, 799-810.
- Phosri, C., Pölme, S., Taylor, A. F. S., Kõljalg, U., Suwannasai, N., Tedersoo, L. (2012). Diversity and community composition of ectomycorrhizal fungi in a dry deciduous dipterocarp forest in Thailand. *Biodiv. Conserv.*, 21, 2287-2298.
- Schoch, C. L., Seifert, K. A., Huhndorf, S., Robert, V., Spouge, J. L., Levesque, C. A. et al. (2012). Nuclear ribosomal internal transcribed spacer (ITS) region as a universal DNA barcode marker for Fungi. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 109, 6241-6246.
- Selosse, M.-A., Le Tacon, F. (1998). The land flora: a phototroph-fungus partnership? *Trends Ecol. Evol.*, 13, 15-20.
- Smith, S. E., Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*, 3rd edn. Academic Press, London, UK.
- Suvi, T., Tedersoo, L., Abarenkov, K., Gerlach, J., Beaver, K., Kõljalg, U. (2010). Mycorrhizal symbionts of *Pisonia grandis* and *P. sechellarum* in Seychelles: identification of mycorrhizal fungi and description of new *Tomentella* species. *Mycologia*, 102, 522-533.
- Tedersoo, L., Naadel, T. (2011). Trühvleid kasvab ka Eestis. *Eesti Loodus*, 62, 8-13.
- Tedersoo, L., Nara, K. (2010). General latitudinal gradient of biodiversity is reversed in ectomycorrhizal fungi. *New Phytol.*, 185, 351-354.
- Tedersoo, L., Pölme, S. (2012). Infrageneric variation in partner specificity: multiple ectomycorrhizal symbionts associate with *Gnetum gnemon* (Gnetophyta) in Papua New Guinea. *Mycorrhiza*, 22, 663-668.
- Tedersoo, L., Smith, M. E. (2013). Lineages of ectomycorrhizal fungi revisited: foraging strategies and novel lineages revealed by sequences from below-ground. *Fung. Biol. Rev.*, 27, 83-99.
- Tedersoo, L., Hansen, K., Perry, B. A., Kjoller, R. (2006). Molecular and morphological diversity of pezizalean ectomycorrhiza. *New Phytol.*, 170, 581-596.

- Tedersoo, L., Suvi, T., Beaver, K., Kõljalg, U. (2007). Ectomycorrhizal fungi of the Seychelles: diversity patterns and host shifts from the native *Vateriopsis seychellarum* (Dipterocarpaceae) and *Intsia bijuga* (Caesalpiniaceae) to the introduced *Eucalyptus robusta* (Myrtaceae), but not *Pinus caribea* (Pinaceae). *New Phytol.*, 175, 321-333.
- Tedersoo, L., Jairus, T., Horton, B. M., Abarenkov, K., Suvi, T., Saar, I., Kõljalg, U. (2008). Strong host preference of ectomycorrhizal fungi in a Tasmanian wet sclerophyll forest as revealed by DNA barcoding and taxon-specific primers. *New Phytol.*, 180, 479-490.
- Tedersoo, L., Gates, G., Dunk, C., Lebel, T., May, T. W., Dunk, C., Lebel, T., Kõljalg, U., Jairus, T. (2009a). Establishment of ectomycorrhizal fungal community on isolated *Nothofagus cunninghamii* seedlings regenerating on dead wood in Australian wet temperate forests: does fruit-body type matter? *Mycorrhiza*, 19, 403-416.
- Tedersoo, L., Pärtel, K., Jairus, T., Gates, G., Põldmaa, K., Tamm, H. (2009b). Ascomycetes associated with ectomycorrhizas: molecular diversity and ecology with particular reference to the Helotiales. *Environ. Microbiol.*, 11, 3166-3178.
- Tedersoo, L., May, T. W., Smith, M. E. (2010a). Ectomycorrhizal lifestyle in fungi: global diversity, distribution, and evolution of phylogenetic lineages. *Mycorrhiza*, 20, 217-263.
- Tedersoo, L., Nilsson, R. H., Abarenkov, K., Jairus, T., Sadam, A., Saar, I., Bahram, M., Bechem, E., Chuyong, G., Kõljalg, U. (2010b). 454 Pyrosequencing and Sanger sequencing of tropical mycorrhizal fungi provide similar results but reveal substantial methodological biases. *New Phytol.*, 188, 291-301.
- Tedersoo, L., Sadam, A., Zambrano, M., Valencia, R., Bahram, M. (2010c). Low diversity and high host preference of ectomycorrhizal fungi in Western Amazonia, a neotropical biodiversity hotspot. *ISME J.*, 4, 465-471.
- Tedersoo, L., Bahram, M., Jairus, T., Bechem, E., Chinoya, S., Mpumba, R., Leal, M., Randrianjohany, E., Razafimandimbison, S., Sadam, A., Naadel, T., Kõljalg, U. (2011). Spatial structure and the effects of host and soil environments on communities of ectomycorrhizal fungi in wooded savannas and rain forests of Continental Africa and Madagascar. *Mol. Ecol.*, 20, 3071-3080.
- Tedersoo, L., Bahram, M., Toots, M., Diédhiou, A. G., Henkel, T. W., Kjoller, R., Morris, M. H., Nara, K., Nouhra, E., Peay, K. G., Põlme, S., Ryberg, M., Smith, M. E., Kõljalg, U. (2012a). Towards global patterns in the diversity and community structure of ectomycorrhizal fungi. *Mol. Ecol.*, 21, 4160-4170.

Tedersoo, L., Naadel, T., Bahram, M., Pritsch, K., Buegger, F., Leal, M., Kõljalg, U., Põldmaa, K. (2012b). Enzymatic activities and stable isotope patterns of ectomycorrhizal fungi in relation to phylogeny and exploration types in an afro-tropical rain forest. *New Phytol.*, 195, 832-843.

Tedersoo, L., Arnold, A. E., Hansen, K. (2013). Novel aspects in the life cycle and biotrophic interactions in Pezizomycetes (Ascomycota, Fungi). *Mol. Ecol.*, 22, 1488-1493.

*Teaduspreemia põllumajandusteaduste alal uurimuste tsükli  
"Juurtoitumise strateegiad metsade jätkusuutlikkuse tagamisel  
muutuvates kliima- ja maakasutuse tingimustes" eest*



*Krista Lõhmus*

Sündinud 5. 11.1948 Rakveres

1967 Rakvere Gümnaasium

1972 Tartu Ülikool, rakendusmatemaatika

1987 bioloogiakandidaat, Tartu Ülikool

1972–1975 Eesti Maaülikooli vaneminsener

1975–1983 Eesti Teaduste Akadeemia Zooloogia ja Botaanika Instituudi  
vaneminsener, nooremteadur

Alates 1983 Tartu Ülikooli ökosüsteemide laboratooriumi nooremteadur, va-  
nemteadur, ökoloogiajaama ja geograafia instituudi vanemteadur, rakendus-  
ökoloogia professor

2012– KESTA programmi tegevuse BioAtmos FAHM tööühma juht

2001 Eesti Vabariigi teaduspreemia põllumajandusteaduste alal  
(kollektiivi liige)

Rahvusvahelise juureteadlaste ühingu (ISSR) liige

Avaldanud 65 artiklit *Web of Science* andmebaasis



### *Iviķa Ostonen-Märtin*

Sündinud 25.02.1973 Jõgeval

1991 Jõgeva Ühisgümnaasium

1995 Tartu Ülikool, botaanika-ökoloogia

2003 PhD, taimeökoloogia ja ökofüsioloogia, Tartu Ülikool

Alates 1996 Tartu Ülikooli ökoloogia ja maateaduste instituudi teadur ja vanemteadur

1998 Rootsi Kuningliku Akadeemia stipendiaat Rootsi Põllumajanduse Ülikoolis, Uppsala

1999–2001 Eesti Metsakaitsealade Võrgustiku botaanik

1997 Esimene preemia Eesti üliõpilaste teadustööde riiklikul konkursil geo- ja bioteaduste valdkonnas

Rahvusvahelise juureteadlaste ühingu (ISSR) liige

Avaldanud üle 40 teaduspublikatsiooni

## SISSEJUHATUSEKS

Kogu maailma metsade biomassist asub 20 kuni 40% maa all, juurestikes. Juured on puude vee ja mineraaltoitainetega varustajad, sageli ka varuainete ladustajad, lisaks ankurdavad nad puu kindlalt mulda, tagades puu püsti püsimise.

Metsade maa-aluse osa ehk juurte tähtsus maismaaökosüsteemide ainerings ja süsinikubilansis tõusis teadusuuringute fookusesse, kui läinud sajandi 80ndatel avastati, et põhjapoolsetes boreaalsetes metsades võib kuni 75% puistu aastasest netoproduksioonist minna puude peenjuurtesse, nende moodustamiseks ja säilitamiseks (Fogel, 1985; Keyes, Grier, 1981; Persson, 1979; Vogt jt, 1986, 1996). Lisatõuke täpsemate juureuuringute tegemiseks andis happyvihmadest tingitud okasmetsade suremise laine Kesk-Euroopas 1980–1990, kui leiti, et lisaks võrakahjustustele on suur roll ka juurekahjustustel. Happelised mullad ei suuda neutraliseerida happeliste sademete mõju, alumiinium mullas muutub liikuvaks ja tekitab juurekahjustusi ning just sellistel aladel hävisid okasmetsad massiliselt (Matzner, Ulrich, 1985; Ulrich, 1983).

Eesti pindalast moodustavad metsad poole ja nende jätkusuutlikkuse tagamine on vägagi aktuaalne nii majanduslikus kui looduskeskkonna ja selle mitmekesisuse säilimise mõttes. Eesti metsade enamuspüliigid on harilik kuusk, harilik mänd, aru- ja sookask, hall lepp, sanglepp ja harilik haab.

Peenjuured moodustavad kogu juurestiku biomassist sõltuvalt puistu vanusest ja liigilisest koosseisust vaid kuni viiendiku (Brunner, Godbold, 2007). Peenjuurteks (foto 1) loetakse kokkuleppeliselt < 2 mm juuri, mis koosnevad mitmest erineva ehituse, funktsiooni ja elueaga juurte fraktsioonist. Neist kaks olulisimat on primaarse ehitusega imijuured ja sekundaarse ehitusega juhtejuured. Esimesed vastutavad puu vee- ja mineraaltoitainete omastamise eest ja teised nende transpordi eest maapealsetesse osadesse.

Just imijuur peab kohanema metsakasvukoha kliima ja mulla füüsikaliste, keemiliste ning bioloogiliste tingimustega. Maapeal on võrreldavaks üksuseks näiteks leht. Peenjuured elavad mõnest kuust mõne aastani ja nende pidev uuenemine tagabki muutuvate keskkonnatingimustega kohanemise, ehkki nõuab samas puult pidevalt suuri ressursse: Euroopas läheb peenjuurte uuendamiseks 8–75% süsinikühenditest, mis fotosünteesi käigus toodetakse (Helmisaari jt, 2002; Vogt jt, 1996). Puu peenjuurte kohanemine muutuvate keskkonnatingimustega peegeldub nii imijuurte morfoloogilises struktuuris, juurtega ektomükoriisses sümbioosis elavate seente koosluse muutustes (Parts jt, 2013) kui ka peente juurte osatähtsuses puistu biomassist (Ostonen jt, 2011). Hariliku kuuse (*Picea abies* L. Karst.) peenjuurte biomass varieerub Euroopa erinevates okas- ja lehtpuumetsades 600–5750 kg ha<sup>-1</sup> (Borken jt, 2007; Finer jt, 2007; Godbold jt, 2003; Majdi, Persson, 1995).

Metsade jätkusuutlikkuse üks suurim võtmetegur muutuv keskkonnas on juurtoitumine ehk vee ja mineraalainete omastamine mullast, mis tagab metsa





Foto 1.

Hariliku kuuse peenjuured (< 2 mm läbimõõduga) koosnevad primaarse ehitusega imijuurtest (A) ja sekundaarse ehitusega ehk puitunud juhtejuurtest (B). Kuuse imijuured on boreaalsetes metsades enamasti kõik ektomükoriisaseentega koloniseeritud, mis muudab juuretippud tõmbiks ja pärsib pikkuskasvu.

kasvamise (Lõhmus jt, 2010; Ostonen jt, 2011). Teisalt tähendab juurte kasv fotosünteesi käigus toodetud orgaanilise aine voogu, sh süsiniku salvestumist mulda, mis omakorda on mullaelustiku elu ja arengu aluseks (Rosenvald jt, 2011ab; Parts jt, 2013; Varik jt, 2013) ning võiks olla globaalses süsinikuringes oluline kliimamuutusi pehmendav protsess. Kõrgendatud CO<sub>2</sub> kontsentratsiooniga õhus kasvatatud taimed seovad fotosünteesi käigus ka rohkem süsinikku ja nende netoproduktioon suureneb keskmiselt 23%, haabadel koguni 62% (Norby jt, 2005; Lukac jt, 2003). Samas suureneb ka süsiniku voog mulda ning juurte produktioon, ent paraku kiireneb ka peenjuurte käive – uusi juuri moodustatakse rohkem ja neid sureb ka rohkem. Peenjuurte produktiooni tõusu kaudu suurenenud süsiniku voog mulda ei tähenda paraku aga seotud süsiniku salvestumist mulda, vaid mulla mikroobikoosluste elutegevuse elavnemist, mille tagajärjel mõnes ökosüsteemis hoopis vabaneb mulda seotud vana süsinik (Lukac jt, 2009).

Äärmiselt oluline on prognoosida, mis juhtub Euroopa metsade maa-aluses osas lähitulevikus prognoositud kliima soojenemisel.

Peamiseks globaalseks riskiks on süsiniku salvestumise vähenemine mulda, mis võimendaks kasvuhuoneefekti. Juurtootumise soodsat kulgu mõjutav muldlaelustik on muutustele väga tundlik – selle kahjustudes keskkonnamuutuste käigus võib metsa kasv känguda, sest puu peab panustama rohkem juurestiku kasvatamisse ja uue tasakaalu saavutamisse risosfääris – juurte lähieesruumis.

Põhiküsimus on, kuidas hakkavad metsad mullas ja biomassis süsinikku salvestama keskkonnamuutuste käigus, kui õhutemperatuur tõuseb, muld soojeneb ning kõrgematel laiuskraadidel, sh Eestis, on oodata ka sademetehulga suurenemist ja õhuniiskuse kasvu (Kont jt, 2003).

## JUURTOITUMISE STRATEEGIAD

Meie uurimustükli aluseks on tööd, mille käigus oleme välja töötanud ja rakendanud puude mineraaltoitumise strateegia uudset kontseptsiooni, mis võimaldab paremini modelleerida keskkonnamuutustest tingitud muutusi metsade maa-aluses osas (Lõhmus jt, 2006, 2010; Ostonen jt, 2011, 2013; Parts jt, 2013; Sellin jt, 2013; Rosenvald jt, 2011ab, 2012).

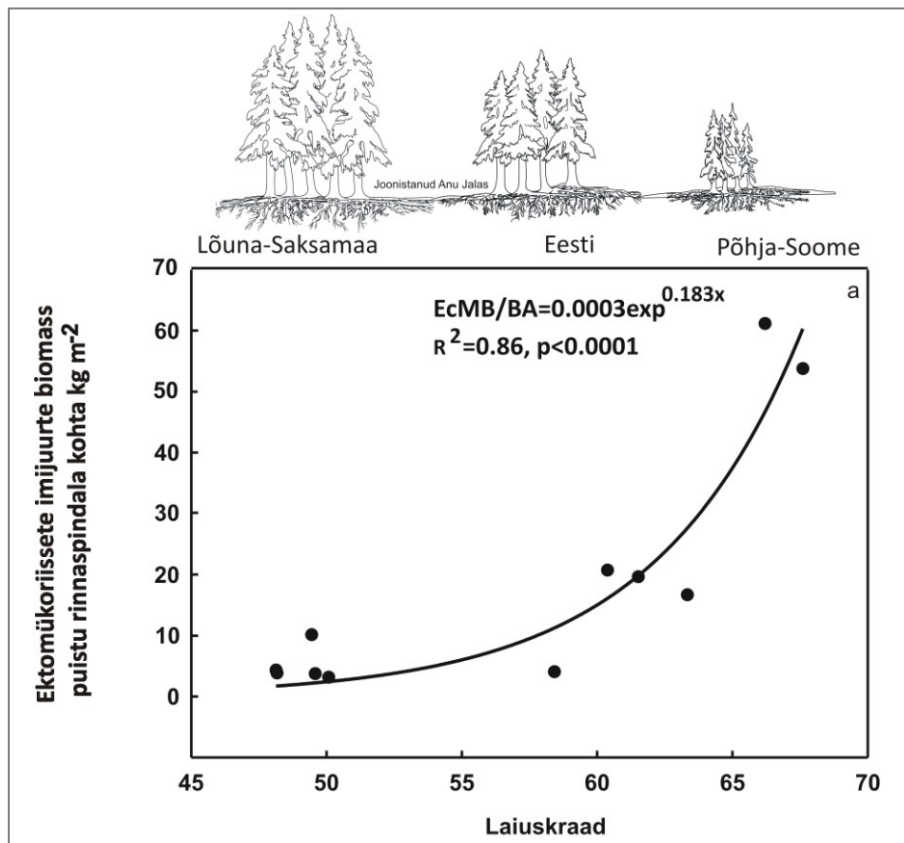
Selle kontseptsiooni järgi on PUUDE MINERAALTOITUMISEL KAKS PÕHISTRATEEGIAT:

- EKSTENSIIVNE ehk aktiivselt vett ja mineraaltoitaineid omastavate peenjuurte biomassi suurendamine;
- INTENSIIVNE ehk peenjuurte massiühiku efektiivsuse suurendamine mineraaltoitainete omastamisel, mis saavutatakse muutustega juurte morfoloogias ning juuri koloniseerivates mükoriisaseente ja mikroobi-kooslustes.

Põhimõtteline strateegiline erinevus seisneb vett ja toitaineid imava juure pinnahüki efektiivsuses, mis on väiksem ekstensiivse ja suurem intensiivse strateegia puhul. Seejuures on ekstensiivne strateegia puudele kulukam (puistu maapealne juurdekasv väheneb). Olulisim selle kontseptsiooni juures on asjaolu, et muutus mineraaltoitumise strateegias tähendab muutust juurte süsinikuringe strateegias.

Peenjuurestiku ja risosfääri kohanemist ja kohastumist analüüsisime Euroopa kuusikutes sõltuvalt piki laiuskraadide gradienti ( $68^{\circ}$  N– $48^{\circ}$  N) muutuvaid keskkonnatingimusi. Geograafiline laius ja lämmastikusaaste kirjeldasid suurima osa peenjuureparameetritest. Parimaks puistu juurtootumist iseloomustavaks parameetriks osutus ektomükoriisete imijuurte mass puistu rinnaspinna (puude summaarne ristlõikepind rinnakõrgusel  $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ) kohta ( $\text{kg m}^{-2}$ ). See parameeter näitab kui palju juuretippe varustab maapealset rinnaspinna ühikut nt subarktilistes Lapimaa kuusikutes, kus puude keskmine kõrgus on 10 m, võrrelduna Lõuna-Saksamaa 30 m kõrguste kuuskedega. Kõikidest analüüsitud teguritest (sh aasta keskmine temperatuur, sademed, lämmastiku depositsioon, mulla füüsikalised ja keemilised karakteristikud jne) kirjeldas ektomükoriisete imijuurte biomassi muutumist kõige paremini laiuskraad,

mis hõlmab antud geograafilise punkti keskkonnategurite kompleksi. Selgus, et Lõuna-Saksamaaga võrreldes oli Eesti kuusikute puistu rinnaspindala kohta maa all vaja keskmiselt 13 kg rohkem imijuuri ning võrrelduna omakorda Eesti kuusikutega vajasis puud Lapimaa kuusikutes ligikaudu 45 kg rohkem imijuuri (joonis 1).



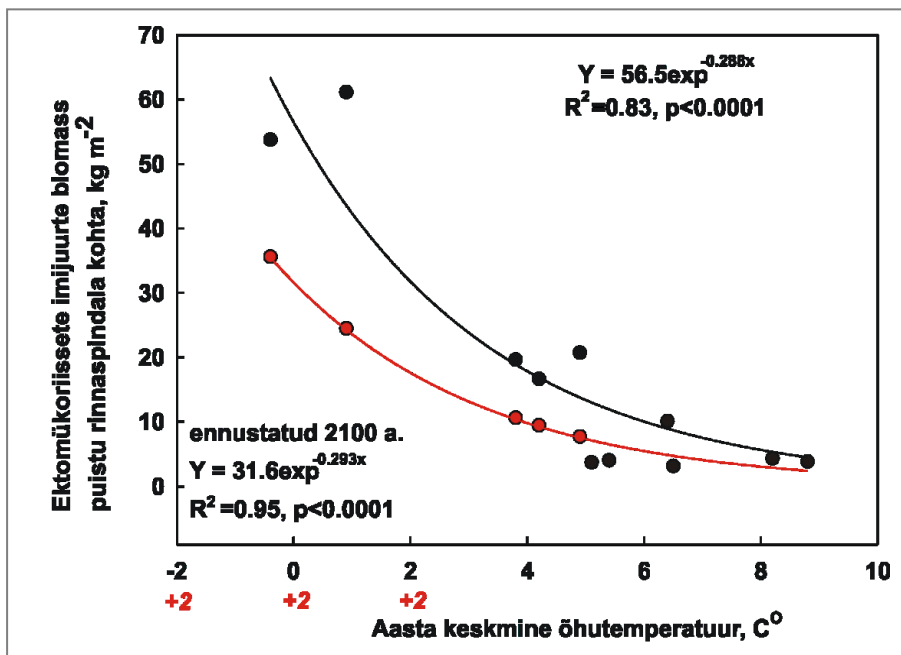
Joonis 1.

Harilikku kuuse ektomükoriisete imijuurte biomass puistu rinnaspindala kohta piki geograafilisi laiuskraade. Põhja-Soomes on kolm korda väiksemate puude all kuni 11 korda rohkem imijuuretippe. Modifitseeritud joonis (Ostonen jt, 2011) põhjal.

Paralleelselt analüüsisime imijuurte morfoloogilisi muutusi ja domineerivaid seenekooslusi, kes koloniseerisid juuretippe. Selgus, et põhjapoolsemates metsades on imijuuretipud pikemad ning suurema kudede tihedusega, mis viitab sellele, et nende eluiga on pikem, ent efektiivsus tõenäoliselt väiksem. Lõuna-Saksamaa kuusikute imijuurte käive (produktioon/biomass) on kii-

rem, juuretipud nooremad ja vesisemad. Samuti muutusid imijuuri koloniseerivad ektomükoriissed seenekooslused piki laiuskraade ning analüüsid seeneliike selgus, et parasvöötme kuusikutes oli 19% rohkem mulda ulatuslikku seeneniidistikku moodustavate seeneliikidega koloniseeritud imijuuretippe. Muutused imijuurte morfoloogias ja seenekooslustes viitavad sellele, et imijuurte imav pinnauhik on parasvöötmes efektiivsem, mis tähendab juurtoitumises intensiivset strateegiat.

Modelleerisime ektomükoriisete imijuurte biomassi dünaamikat puistu rinnaspindala kohta ka piki Euroopa kuusikute temperatuurigradiendi. Kui boreaalsetes metsades suureneks aasta keskmine temperatuur 2 °C võrra (IPCC), tooks see meie leitud mudeli järgi kaasa ektomükoriisete juurte biomassi kahanemise puistu rinnaspinnaühiku kohta ligikaudu 50% (joonis 2; Ostonen jt, 2011). See tähendab oluliselt vähenevat süsinikuvoogu mulda, mille tagajärjel võib väheneda süsiniku salvestumine boreaalsete metsade mullas. Samal ajal peaks suurenema boreaalse metsa puiduproduksioon.



Joonis 2. Põhja- ja lõuna-Euroopa kuusikute keskmine aastane õhutemperatuur ja ektomükoriisete imajuurte biomass puistu rinnaspindala kohta 2020. aastal (mustad punktid) ja 2100. aastal (punased punktid). Ennustatud imajuurte biomass on määratud puusorte moodustavate ektomükoriisete juurte biomassi kahanemise puistu rinnaspinnaühiku kohta ligikaudu 50%. Ennustatud imajuurte biomass on määratud puusorte moodustavate ektomükoriisete juurte biomassi kahanemise puistu rinnaspinnaühiku kohta ligikaudu 50% (joonis 2; Ostonen jt, 2011) põhjal.

Seega tõestasime Euroopa kuusikute näitel hüpoteesi, et boreaalsetes metsades valitseb ekstensiivne juurtootumise strateegia ja parasvöötmes intensiivne.

Edasistes analüüsides selgus, et intensiivse strateegia puhul osutusid väga olulisteks nii puuliigi eripära (Ostonen jt, 2013) kui puuliigi ja keskkonnatingimuste koosmõjud (Parts jt, 2013). Seni on paremini uuritud peenjuurte morfoloogilisi adaptatsioone ning juurtega assotsieerunud mikroobikoosluste toetamist (Rosenvald jt, 2011ab). Tulemused viitavad sellele, et risosfääri bakterikoosluste toetamisel assimilaatidega mineraaltootumise parandamiseks on väga oluline limiteeriv tegur lämmastiku kättesaadavus, mistõttu sümbiontselt molekulaarset lämmastikku siduvad lepikud on eelisseisundis (Lõhmus jt, 2010; Kuznetsova jt, 2010, 2011; Preem jt, 2013; Soosaar jt, 2011; Uri jt, 2011, 2012). Intensiivse strateegia ehk risosfääriefekti puhul on väga oluline, kuid väheuuritud teema, millised muutused toimuvad puistu suksessiooni käigus (Rosenvald jt 2011ab; 2012). Suksessiooniliste muutuste väljaselgitamiseks kasutati puistute vanuseridade meetodikat (Rosenvald jt, 2012; Uri jt, 2012) ja selgus, et arukase imijuurte morfoloogiale avaldavad väga olulist mõju nii puude vanus kui kasvukoha varasem maakasutus (metsamaa, endine põllumaa, põlevkivikarjäär). Imijuurte eripind ja eripikkus olid suuremad väiksema lehelämmastiku, seega halvema lämmastikutootumuse korral nii endistel põllumaadel kui ka metsamaal kasvavates kaasikutes. Kaasikute suksessiooni käigus (analüüsiti rekultiveeritud põlevkivikarjääridesse istutatud ning metsamaadel kasvavate arukaasikute vanuseridasid) tuvastasime suksessioonilised muutused ka kase peenjuurestiku arengus – ektomükoriisete imijuurte morfoloogia, do-mineerivate mükoriisaseente mütseelitüüp (st kui ulatusliku seeneniidistiku liik moodustab) ja risosfääriefekti dünaamika oli sarnane nii happelisel metsa-maal kui ka lubjakivirikkal karjääripuistangul kasvavate puistute vanuseridades (Rosenvald jt, 2011b; Ostonen jt, 2013).

Kliima- ja maakasutuse muutustega seotud tagajärgede prognoosimiseks, leevendamiseks ja metsade majandamiseks uutes tingimustes on vajalikud interdistsiplinaarsed süvateadmised juureprotsesside paremaks mõistmiseks. Esmakordselt maailmas uuritakse suurendatud õhuniiskuse kui kliimamuutuste ühe komponendi mõju metsaökosüsteemi õhuniiskusega manipuleerimise eksperimendis FAHM (Free Air Humidity Manipulation of the forest ecosystem; foto 2), mis on rajatud Eestisse (Kupper jt, 2011).

Eksperimentides, kus imiteeriti tulevikus prognoositud kliimamuutusi õhuniiskuse või mullatemperatuuri suurendamise teel, lülitusid puud alati põhiliselt ekstensiivsele strateegiale ja suunasid suure osa aastasest netoproduktioonist peenjuurte kasvatamiseks (Hansen jt, 2013; Leppälamm-Kujansuu jt, 2013). Samal ajal võis sellega kaasneda maapealse majanduslikult huvipakkuva produktsiooni kahanemine (Kupper jt, 2011; Sellin jt, 2013; Tullus jt, 2012).

Kui küsimus on puuliigi elujõus ja ellujäämises näiteks kõrgete laiuskraadide metsade karmis kliimas või äsjametsastatud põlevkivikarjäärides, on esimene valik toota rohkem peenjuuri, seejärel tõsta juure massiühiku efektiivsust. Mida kehvemad on keskkonnatingimused (kliimaatilised, mullatingimused), seda suurem on juurte eluiga ja süsiniku vanus juurtes, juurtega seotud süsinikuringe on aeglasem (Hansen jt, 2013; Kuznetsova jt, 2010, 2011; Ostonen jt, 2011, 2013; Sah jt, 2013). Mida nooremad olid puud, seda rohkem juurepinda või -pikkust imijuurte massiühiku kohta moodustus, lehtede eripind kahanes puistu vanuse kasvades (Rosenthal jt, 2011a, 2012).



Foto 2.

Eksperimentis FAHM suurendatakse kunstlikult õhuniiskust, imiteerimaks niiskemaid kliimatingimusi. Eksperimenti kirjeldus vt (Kupper jt, 2011).

Meie uurimustsükli raames saadud uued alusteadmised on vajalikud ökosüsteemide kohanemise ja globaalse aineriingi tulevikustsenaariumide koostamisel ja praktiliste soovitusete andmiseks jätkusuutliku metsamajanduse jaoks.

#### TÄNUAVALDUSED

Meie uuringuid on toetanud Euroopa Regionaalarengu fond Keskkonnamuutustele Kohanemise tippkeskuse ENVIRON ja KESTA programmi alategevuse BioAtmos kaudu, Eesti Teadusagentuur nelja sihtfinantseeritava teema

osas (SF0180127s08; SF0182732s06; SF0180025s12; IUT2-16), kolm Eesti Teadusfondi granti (6011, 7452, 7792) ja mitmed väiksemad allikad. Juurelaboris on aidanud aeganõudvaid töid, nagu juurte mullast väljapesemine ja mikroskoobi all puuliikide ning elusate ja surnud juurte eristamine, teha väga suur hulk tudengeid ja kraadiõppureid, kellele siinkohal siiras tänu.

#### KIRJANDUS

Borken, W., Kossmann, G., Matzner, E. (2007). Biomass, morphology and nutrient contents of fine roots in four Norway spruce stands. *Plant and Soil*, 292, 79-93.

Brunner, I., Godbold, D. L. (2007). Tree roots in a changing world. *J. Forest Res.*, 12, 78-82.

Finer, L., Helmisaari, H. S., Lõhmus, K., Majdi, H., Brunner, I., Borja, I., Eldhuset, T. D., Godbold, D., Grebenc, T., Konopka, B., Kraiger, H., Möttönen, M. R., Ohashi, M., Oleksyn, J., Ostonen, I., Uri, V., Vanguelova, E. (2007). Variation in fine root biomass of three European tree species: Beech (*Fagus sylvatica* L.), Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Plant Biosystems*, 141, 394-405.

Fogel, R. (1985). Roots as primary producers in below-ground ecosystems. *Ecol. Inter. Soil*, 4, 23-36.

Godbold, D. L., Fritz, H. W., Jentschke, G., Meesenburg, H., Rademacher, P. (2003). Root turnover and root necromass accumulation of Norway spruce (*Picea abies*) are affected by soil acidity. *Tree Physiol.*, 23, 915-921.

Hansen, R., Mander, Ü., Soosaar, K., Maddison, M., Lõhmus, K., Kupper, P., Kanal, A., Söber, J. (2013). Greenhouse gas fluxes in an open air humidity manipulation experiment. *Landscape Ecology*, 28, 4, 637-649.

Helmisaari, H. S., Makkonen, K., Kellomäki, S., Valtonen, E., Mälkönen, E. (2002). Below- and above-ground biomass, production and nitrogen use in Scots pine stands in eastern Finland. *Forest Ecol. Manag.*, 165, 317-326.

Keyes, M. R., Grier, C. C. (1981). Above- and below-ground net production in 40-year old Douglas-fir stands on low and high productivity sites. *Can. J. For. Res.*, 11, 599-605.

Kont, A., Jaagus, J., Aunap, R. (2003). Climate change scenarios and the effect of sea level rise for Estonia. *Global and Planetary Change*, 36, 1-2, 1-15.

Kupper, P., Söber, J., Sellin, A., Lõhmus, K., Tullus, A., Raim, O., Lubenets, K., Tulva, I., Uri, V., Zobel, M., Kull, O., Söber, A. (2011). An experimental facility for Free Air Humidity Manipulation (FAHM) can alter water flux through deciduous tree canopy. *Environ. Exp. Bot.*, 72, 3, 432-438.

Kuznetsova, T., Rosenvald, K., Ostonen, I., Helmisaari, H. S., Mandre, M., Lõhmus, K. (2010). Survival of black alder (*Alnus glutinosa* L.), silver birch

(*Betula pendula* Roth.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings in a reclaimed oil shale mining area. *Ecol. Eng.*, 36, 4, 495-502.

Kuznetsova, T., Lukjanova, A., Mandre, M., Lõhmus, K. (2011). Above-ground biomass and nutrient accumulation dynamics in young black alder, silver birch and Scots pine plantations on reclaimed oil shale mining areas in Estonia. *Forest Ecol. Manag.*, 262, 56-64.

Leppälampi-Kujansuu, J., Ostonen, I., Strömberg, M., Nilsson, L. O., Kleja, D. B., Sah, S. P., Helmisaari, H. S. (2013). Effects of long-term temperature and nutrient manipulation on Norway spruce fine roots and mycelia production. *Plant and Soil*, 366, 1-2, 287-303.

Lukac, M., Calfapietra, C., Godbold, D. L. (2003). Production, turnover and mycorrhizal colonization of root systems of three *Populus* species grown under elevated CO<sub>2</sub> (POPFACE). *Global Change Biol.*, 9, 838-848.

Lukac, M., Lagomarsino, A., Moscatelli, M. C., DeAngelis, P., Cotrufo, M. F., Godbold, D. L. (2009). Forest soil carbon cycle under elevated CO<sub>2</sub> – a case of increased throughput? *Forestry*, 82, 1, 75-86.

Lõhmus, K., Truu, J., Truu, M., Kaar, E., Ostonen, I., Alama, S., Kuznetsova, T., Rosenvald, K., Vares, A., Uri, V., Mander, Ü. (2006). Black alder as a perspective deciduous species for reclaiming of oil shale mining areas. Brebbia, C. A., Mander, Ü. (eds). *Brownfields III. Prevention, Assessment, Rehabilitation and Development of Brownfield Sites*. WIT Press, Southampton, Boston, 87-97.

Lõhmus, K., Truu, J., Truu, M., Kaar, E., Ostonen, I., Meel, S., Kuznetsova, T., Rosenvald, K., Vares, A., Kurvits, V., Kanal, A., Uri, V. (2010). Risosfääri-protsesside mõju metsaökosüsteemi kujunemisele erineva liigilise koosseisuga puistutes põlevkivikarjäärade puistangutel. Kaar, E., Kiviste, K. (toim). *Maavarade kaevandamine ja puistangute rekultiveerimine Eestis*. Eesti Maaülikool, Tartu, 185-194.

Majdi, H., Persson, H. (1995). A study on fine-root dynamics in response to nutrient applications in a Norway spruce stand using the minirhizotron technique. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 158, 429-433.

Matzner, E., Ulrich, B. (1985). Implications of the chemical soil condition for forest decline. *Experientia*, 4, 578- 584.

Norby, R. J., DeLucia, E. H., Gielen, B., Calfapietra, C., Giardina, C. P., King, J. S., Ledford, J., McCarthy, H. R., Moore, D. J. P., Ceulemans, R., De Angelis, P., Finzi, A. C., Karnosky, D. F., Kubiske, M. E., Lukac, M., Pregitzer, K. S., Scarascia-Mugnozza, G. E., Schlesinger, W. H., Oren, R. (2005). Forest response to elevated CO<sub>2</sub> is conserved across a broad range of productivity. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 102, 18052-18056.



- Ostonen, I., Helmisaari, H. S., Borken, W., Tedersoo, L., Kukumägi, M., Bahram, M., Lindroos, A. J., Nöjd, P., Uri, V., Merilä, P., Asi, E., Lõhmus, K. (2011). Fine root foraging strategies in Norway spruce forests across a European climate gradient. *Global Change Biol.*, 17, 12, 3620-3632.
- Ostonen, I., Rosenvald, K., Helmisaari, H. S., Godbold, D., Parts, K., Lõhmus, K. (2013). Morphological plasticity of ectomycorrhizal short roots in *Betula* sp and *Picea abies* forests across climate and forest succession gradients: its role in changing environments. *Front. Plant Sci.*, 4, 335.
- Parts, K., Tedersoo, L., Lõhmus, K., Kupper, P., Rosenvald, K., Sõber, A., Ostonen, I. (2013). Increased air humidity and understory composition shape short root traits and the colonizing ectomycorrhizal fungal community in silver birch stands. *Forest Ecol. Manag.*, 310, 720-728.
- Persson, H. (1979). Fine-root production, mortality and decomposition in forest ecosystems. *Vegetatio*, 41, 101-109.
- Preem, J. K., Truu, J., Truu, M., Mander, Ü., Oopkaup, K., Lõhmus, K., Helmisaari, H. S., Uri, V., Zobel, M. (2012). Bacterial community structure and its relationship to soil physico-chemical characteristics in alder stands with different management histories. *Ecol. Eng.*, 49, 10-17.
- Rosenvald, K., Ostonen, I., Truu, M., Truu, J., Uri, V., Vares, A., Lõhmus, K. (2011a). Fine-root rhizosphere and morphological adaptations to site conditions in interaction with tree mineral nutrition in young silver birch (*Betula pendula* Roth.) stands. *Eur J. Forest Res.*, 130, 6, 1055-1066.
- Rosenvald, K., Kuznetsova, T., Ostonen, I., Truu, M., Truu, J., Uri, V., Lõhmus, K. (2011b). Rhizosphere effect and fine-root morphological adaptations in a chronosequence of silver birch stands on reclaimed oil shale post-mining areas. *Ecol. Eng.*, 37, 7, 1027-1034.
- Rosenvald, K., Ostonen, I., Uri, V., Varik, M., Tedersoo, L., Lõhmus, K. (2012). Tree age effect on fine-root and leaf morphology in a silver birch forest chronosequence. *Eur. J. Forest Res.*, 132, 2, 219-230.
- Sah, S. P., Bryant, Ch., Leppälammil-Kujansuu, J., Lõhmus, K., Ostonen, I., Helmisaari, H-S. (2013). Variation of carbon age of fine roots in boreal forests determined from <sup>14</sup>C measurements. *Plant and Soil*, 363, 1-2, 77-86.
- Sellin, A., Tullus, A., Niglas, A., Õunapuu, E., Karusion, A., Lõhmus, K. (2013). Humidity-driven changes in growth rate, photosynthetic capacity, hydraulic properties and other functional traits in silver birch (*Betula pendula*). *Ecol. Res.*, 28, 3, 523-535.
- Soosaar, K., Mander, Ü., Maddison, M., Kanal, A., Kull, A., Lõhmus, K., Truu, J., Augustin, J. (2011). Dynamics of gaseous nitrogen and carbon fluxes in riparian alder forests. *Ecol. Eng.*, 37, 1, 40-53.

Tullus, A., Kupper, P., Sellin, A., Parts, L., Söber, J., Tullus, T., Lõhmus, K., Söber, A., Tullus, H. (2012). Climate change at Northern latitudes: rising atmospheric humidity decreases transpiration, N-uptake and growth rate of hybrid aspen. PLoS ONE, 7, 8, e42648.

Ulrich, B. (1983). Soil acidity and its reaction to acid deposition. Ulrich, B., Pankrath, J. (eds). Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems. Reidel Publ. Co, Dordrecht, 127-146.

Uri, V., Lõhmus, K., Mander, Ü., Ostonen, I., Aosaar, J., Maddison, M., Helmissaari, H.-S., Augustin, J. (2011). Long-term effects on nitrogen budget of a short-rotation grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) forest in abandoned agricultural land. Ecol. Eng., 37, 6, 920-930.

Uri, V., Varik, M., Aosaar, J., Kanal, A., Kukumägi, M., Lõhmus, K. (2012). Biomass production and carbon sequestration in a fertile silver birch (*Betula pendula* Roth) forest chronosequence. Forest Ecol. Manag., 267, 117-126.

Varik, M., Aosaar, J., Ostonen, I., Lõhmus, K., Uri, V. (2013). Carbon and nitrogen accumulation in belowground tree biomass in a chronosequence of silver birch stands. Forest Ecol. Manag., 302, 62-70.

Vogt, K. A., Grier, C. C., Vogt, D. J. (1986). Production, turnover, and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests. Adv. Ecol. Res. 15, 303-378.

Vogt, K. A., Vogt, D. J., Palmiotto, P. A., Boon, B., OHara, J., Asbjornsen, H. (1996). Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. Plant Soil, 187, 159-219.

*Teaduspreemia sotsiaalteaduste alal  
uurimuste tsükli "Hariduslik stratifikatsioon ja elukestev õpe" eest*



*Ellu Saar*

Sündinud 8.10. 1955 Tallinnas

1973 Loxsa Gümnaasium

1978 Tartu Ülikool, rakendusmatemaatika

1983 filosoofiakandidaat, sotsioloogia, Valgevene Riiklik Ülikool

1978–1989 Eesti TA Ajaloo Instituudi nooremteadur, vanemteadur

1989–1994 Eesti TA Filosoofia, Sotsioloogia ja Õiguse Instituudi juhtivteadur

Alates 1994 Tallinna Ülikooli Rahvusvaheliste ja Sotsiaaluuringute Instituudi vanemteadur, sotsioloogia professor

1991–1992 Berliini Max Plancki Inimarengu Instituudi külalisteadur

Ajakirja *Journal of Transition States and Societies* peatoimetaja, Euroopa Sotsioloogiliste Uuringute Konsortsiumi juhtkomitee, Rahvusvahelise Sotsioloogia Assotsiatsiooni uurimisgrupi RC28 liige

Avaldanud üle 100 teaduspublikatsiooni

## INSTITUTSIOONID JA OSALEMINE ELUKESTVAS ÕPPES<sup>1</sup>

### SISSEJUHATUS

Inimeste osalemine elukestvas õppes<sup>2</sup> erineb riigiti oluliselt. Riikidevahelised suured erinevused ilmnevad ka selles, kuivõrd suur on ebavõrdsuse ulatus eri-

---

<sup>1</sup> Artikli põhiosa põhineb mitmel varasemal artiklil (vt näiteks Roosmaa, Saar, 2010; Saar, Ure, 2013; Saar jt, 2013).

<sup>2</sup> Elukestev õpe haarab formaalharidust, mitteformaalset haridust ja informaalset haridust. Formaalharidus on riiklike õppekavadega fikseeritud, eesmärgiliselt organiseeritud õppetegevus, millel on fikseeritud kestus ja õppekava, mis on astmete ja hinnete tasandite alusel hierarhiliselt struktureeritud, millel on vastuvõtu tingimused ja formaalne registreerimine; kaasneb aktsepteeritud kraadi, diplomi või tunnistuse omistamine. Mitteformaalne haridus – eesmärgiliselt organiseeritud õppetegevus kindlate programmide alusel, mis toimub institutsionaalsel foonil, kuid ei vasta ühele või enamale formaalhariduse definitsioonis toodud tingimusele; võimalik omandada täiskasvanukoolitusasutustes, töökohas, samuti ühiskondlike organisatsioonide, huvigruppide ja kutseliitude vahendusel; läbimise järgselt võib saada osalemise kohta tunnistuse või mitte.

nevate sotsiaalsete gruppide osalusprotsendis (OECD, 2003). Senini on vasta-va ala teaduskirjanduses suuremat tähelepanu pööratud pigem sellele, kuidas individuaalsed karakteristikud mõjutavad inimeste osalemist (Blundell jt, 1996; McGivney, 2001; O'Connell, 2002; Kailis, Pilos, 2005; Dieckhoff jt, 2007). On leitud, et osalus on väiksem nende gruppide puhul (näiteks vanem-ealisel, töötud ja mitteaktiivsed, vaid põhihariduse omandanud, vähekvalifitseeritud töötajad jne), kes vajaksid just enam täiendavat koolitust ja seega praegune osalusmudel pigem suurendab gruppide vahelist erinevust. Samas on riikidevaheliste erinevuste seletamisele seni pööratud suhteliselt vähe tähelepanu. Käesoleva artikli eesmärgiks on anda lühiülevaade vastavatest käsitlustest, sealhulgas TLÜ RASI uurimisgrupi saavutustest sellel alal.

### OSALEMISE MUSTRID

Selles osas keskendun mitteformaalõppele, kuna enamik täiskasvanuid osaleb seda laadi õppes ja suurimad erinevused ilmnevad just nende osalemisel mitteformaalõppes. Tabelis 1 toodud andmed näitavad, et osalusprotsendi poolest on eesotsas Põhjamaad ja Suurbritannia. Eesti kuulub koos enamiku Mandri-Euroopa riikidega 'keskmike' hulka. Osalemise määr on madal Lõuna-Euroopa riikides ja osas Euroopa Liidu uutes liikmesriikides.

Koolituses osalemise üldprotsent ei anna aga teavet selle kohta, kui võrdselt/ebavõrdselt osalevad koolituses erinevad elanikkonna grupid. Bulgaarias, Slovakkias ja Tšehhis erineb lihttöölise mitteformaalses koolituses osalemise määr väga vähe juhtide ja spetsialistide omast, samas on neis riikides aga vaeslapse osas grupid, kes ei tööta – mitteaktiivsed ja töötud. Seega määrab koolitusele juurdepääsu eelkõige tööturuseisund. Poola, Leedu ja Läti kuuluvad riikide hulka, kus ebavõrdsus koolitusel osalemises on suur nii ametigrupi kui ka tööturuseisundi lõikes. Lõuna-Euroopa riikides ei ole üldine osalusprotsent küll eriti kõrge, erinedes suhteliselt palju lihttöölise ja juhtide/spetsialistide osas, seevastu on aga suudetud vältida töötute ja töötajate ebavõrdset seisundit koolitusel osalemise mõttes. Saksamaa, Prantsusmaa, Belgia kuuluvad keskmike hulka nii erinevas tööturupositsioonis olevate gruppide kui ka ametigruppide suhtelise erinevuse poolest. Ka Põhjamaades on töötajatel märgatavalt paremad väljavaated koolituse saamiseks võrreldes töötute ja mitteaktiivsetega, siiski näiteks Rootsis ületab töötute koolituses osalemise protsent enamiku teiste Euroopa riikide, sh ka Eesti, töötajate vastava näitaja. Põhjamaad ja Suurbritannia kuuluvad teiste riikide seas etteotsa väiksema ebavõrdsuse poolest nii ametigruppide kui ka tööturupositsiooni iseloomustavate gruppide hulgas.

Toodud analüüs ärgitab küsima, mis on nii suurte riikidevaheliste erinevuste põhjuseks. Oluliseks põhjuseks peetakse riikide institutsionaalset konteksti. Teaduskirjanduses on termin 'institutsionaalne kontekst' määratletud väga laialt, tihti ei ole seda täpsustatud. Kõige üldisemal tasandil tähistab see ühiskonna makrotasandi poliitika, organisatsioonide ja praktikate konfiguratsiooni,

Tabel 1

Täiskasvanute mitteformaalõppes osalemine riigiti ja ebavõrdsus osalemises

	Osalus, %	Lihttöölis- te osalus, %	Ebevõrdsus osaluses ametigrupiti	Töötute osalus, %	Ebevõrdsus osaluses töötu- ruseisunditi
Kõrge osalus, väike ebavõrdsus					
Rootsi	69,4	56,6	1,60	47,4	1,65
Soome	51,2	40,6	1,75	31,3	1,90
Norra	50,6	36,8	1,80	33,0	1,76
Holland	42,1	36,4	1,58	39,3	1,29
Suurbritannia	40,3	35,6	1,52	23,8	2,00
Keskmine kuni kõrge osalus, keskmine ebavõrdsus					
Saksamaa	43,1	32,6	2,06	25,9	1,99
Eesti	40,2	29,4	2,25	16,3	2,93
Austria	39,8	21,5	2,90	37,5	1,26
Sloveenia	36,2	25,6	2,38	22,1	1,97
Prantsusmaa	34,1	28,4	1,95	26,8	1,55
Belgia	33,5	27,4	1,95	23,2	1,81
Hispaania	27,2	20,7	2,25	20,7	1,56
Keskmine osalus, väike ebavõrdsus ametigrupiti, suur ebavõrdsus tööturuseisunditi					
Slovakkia	41,2	49,3	1,21	12,1	4,26
Tšehhi	35,4	41,5	1,45	11,8	3,89
Bulgaaria	35,2	48,2	1,16	6,3	7,83
Väike kuni keskmine osalus, suur ebavõrdsus ametigrupiti, keskmine kuni suur ebavõrdsus tööturuseisunditi					
Leedu	30,9	17,1	3,83	14,6	2,76
Läti	30,7	20,1	2,98	16,6	2,31
Portugal	22,5	18,1	2,83	12,3	2,30
Itaalia	20,2	...	...	13,6	1,94
Poola	18,6	13,9	3,32	8,8	2,99
Kreeka	12,7	7,0	3,59	11,3	1,44
Ungari	6,8	6,4	2,34	4,5	2,13

*Allikas:* Roosmaa, Saar, 2010.

Andmed peegeldavad koolituses osalemist küsitlusele eelnenud aasta vältel.

mis moodustab struktuurse ja kultuurilise raamistiku eluteede kujunemisel ja vastavate individuaalsete otsuste vastuvõtmisel. Elukestvas õppes osalemise korral on oluliseks peetud eeskätt haridussüsteemi ja tööturuinstitutsioonide mõju (vt ka Brunello, Medio, 2001; Brunello, 2004; Bassanini jt, 2007; Bassanini, Brunello, 2007).

## HARIDUSSÜSTEEM JA ELUKESTVAS ÕPPES OSALEMINE

Üheks faktoriks, mis peaks mõjutama erinevate sotsiaalsete gruppide elukestvas õppes osalemist, peetakse haridussüsteemi STRATIFITSEERITUST (vt ka Saar jt, 2013). Stratifikatsiooni all peetakse silmas, kuivõrd erinevate 'rõõpmetega' on haridussüsteemis tegemist, kusjuures need võivad kujuneda mitmesugustel alustel (näiteks võimete alusel, õppekeele alusel jne). Sealjuures on oluline, kas ja kuivõrd eristuvad suunad erinevatel haridustasemetel, eeskätt just keskhariduse tasandil kutse- ja üldhariduses, millal toimub haridussüsteemis õpilaste 'sorteerimine', kui jäigad on piirid erinevate suundade vahel. Samuti on haridussüsteemi stratifitseerituse (ehk diferentseerituse) taseme määramisel oluline, kas ja kuivõrd erinevad koolitüüpide lõpetajate edasiõppimisvõimalused ning kas haridussüsteemis on tupikteid (vt Allmendinger, 1989). Kõige tüüpilisemaks haridussüsteemi stratifitseerituse aluseks on jagunemine üldhariduslikuks või kutsealaseks kallakuks/suunaks (Müller, Gangl, 2003). Just sellest tulenevalt ilmnevad riikide haridussüsteemides kõige suuremad erinevused. Stratifitseeritud haridussüsteemidega on tegemist näiteks Saksamaal ja Austrias, aga ka Hollandis ja Šveitsis, kus keskhariduse struktuuris on suur osakaal kutseharidusel ja valik ühe tüübi kasuks toimub väga varakult (10–11-aastaselt). Kesk- ja Ida-Euroopa riikidest on Tšehhi, Slovakkia, Sloveenia ja Ungari haridussüsteemid pigem lähedased Saksa haridussüsteemile. Neis domineerib orientatsioon kutseharidusele üldharidusega võrreldes (Strietska-Ilina, 2001; Kogan, Unt, 2005; Ivančič, 2000). Vähe stratifitseeritaks peetakse Suurbritannia haridussüsteemi. Nn Rootsi mudel koos muude Põhjamaadega (ühtluskool, praktiline õpe on koolikeskne, rõhutatakse võrdseid võimalusi ja sotsiaalset sidusust) jääb pigem nende kahe äärmuse vahele (Green, 1999).

Uurijatel ei ole ühtset seisukohta, kuidas stratifikatsioon peaks täiskasvanuõppes osalemist mõjutama. Käsitlused jagunevad vastavalt sellele, kas täiskasvanuharidust nähakse esmase hariduse asendajana või esmase hariduse täiendajana (Wolbers, 2005). Kui keskhariduse struktuuris domineerib üldharidus ja seega on haridussüsteemi STRATIFITSEERITUS MADAL, jääb spetsiifiliste oskuste andmine täiskasvanuhariduse kanda. Sel juhul on täiskasvanuharidusel asendav/kompenseeriv roll (Brunello, 2001) ning täiskasvanuna peaks koolitust vajama rohkem inimesi.

KÕRGE STRATIFITSEERITUSE taseme puhul (kutseharidusel suur osakaal) omandatakse spetsiifilised oskused juba haridussüsteemi kaudu ja täiskasvanuharidusel on pigem täiendav roll. Seega peaks stratifitseeritud haridussüs-

teemi puhul koolituses osalemine olema pigem madal. Samas rõhutab enamik autoreid, et tehnoloogia areng toob kaasa spetsiifiliste oskuste kiirema vananemise võrreldes üldoskustega ja need vajavad seetõttu sagedamini täiendamist. Kuna stratifitseeritud haridussüsteemi puhul on kutsehariduse osakaal keskhariduse struktuuris suurem, kaasneb sellega reeglina üldoskuste madalam tase ja suurem varieeruvus (Jungblut, 2008). Need tegurid omakorda võivad tekitada stratifitseeritud haridussüsteemidega riikides täiendava vajaduse täiskasvanuhariduses osalemiseks. Nii on Estevez-Abe jt (2001) seisukohal, et täiskasvanuhariduses osalus on kõrgem just stratifitseeritud haridussüsteemi puhul ning kutsehariduse domineerimine toob kaasa ka väiksema ebavõrdsuse täiskasvanuhariduses osalemises. Siiski on varasemad empiirilised uuringud näidanud, et haridussüsteemi kõrge stratifitseeritus pigem vähendab elukestvas õppes osalemist ja suurendab ebavõrdsust osalemises (Wolbers, 2005; Roosmaa, Saar, 2010). Seega näivad varasemad tulemused pigem kinnitavat nende autorite seisukohta, kes rõhutavad haridussüsteemi stratifitseerituse negatiivset mõju täiskasvanuhariduses osalemisele ja ka täiskasvanuhariduse kompenseerivat rolli.

#### TÖÖTURUINSTITUTSIOONID JA ELUKESTVAS ÕPPES OSALEMINE

Inimkapitali teooria kohaselt peaks tööturul toimuma vaba võistlus, mille tulemusena tööandjad ei peaks investeerima töötajate üldoskustesse, kuna üldoskused on ülekantavad ehk neid on võimalik kasutada erinevatel ametikohtadel (Becker, 1975). Varasemad uuringud ei kinnita seda järeldust, sest tööturg on segmenteeritud ja tööturuinstitutsioonid mängivad olulist rolli. Just tööturuinstitutsioonid määratlevad töösuhted laiemalt. Nendest sõltub, kui suured riskid kaasnevad oskustesse-teadmistesse investeerimisega, kas need tasuvad end ära või mitte. Selle järgi, millise – kas konkurentsi- või koostöökeskse – loogika järgi tööturuinstitutsioonid toimivad, võib eeldada, milliseks kujuneb tööandja ja haridussüsteemi tööjaotus töötaja oskuste kujundamisel.

Tööturuinstitutsioonide puhul rõhutavad erinevad autorid eelkõige ametiühingute ning tööturu reguleerituse mõju elukestvas õppes osalemisele. Mehhanism, mille kaudu AMETIÜHINGUD mõjutavad osalemist, on kompleksne, olenedes nii tööturul toimuva võistluse ulatusest kui ka sellest, kas ametiühingud mõjutavad õppes osalemist otseselt (kokkulepete kaudu õppe pakkumisel) või kaudselt (kuivõrd suur on ebavõrdsus töö tasustamisel) (Booth jt, 2003). Ametiühingud võivad sõlmida kokkuleppeid tööandjatega töötingimuste ja ka täiendkoolituse pakkumise osas. Sealjuures ei ole tööandjatel formaalset kohustust pakkuda koolitust nendele töötajatele, kelle suhtes ametiühingutega kokkuleppeid ei ole sõlmitud (Elman, O’Rand, 2002). Töötajate suurem osalus ametiühingutes peaks eeldatavalt aitama kaasa ebavõrdsuse vähendamisele osaluses (Ryan, 2002). Siiski sõltub see, kas ametiühingud aitavad vähendada või hoopiski suurendavad ebavõrdsust sellest, kas nad esindavad pigem spetsialistide ja oskustöötajate või hoopis lihttöölise huvisid (Crouch jt,



1999). Kui ametiühingud on esindanud pigem valgekraede huve, siis peaks see kaasa tooma hoopiski ebavõrdsuse suurenemise. Kaudne mehhanism, mille kaudu ametiühingud saavad mõjutada koolituse pakkumist, on palgaläbirääkimised. Palkade väiksem varieeruvus võib tähendada seda, et töötajatel kaob huvi koolituses osalemise vastu, kuna see ei too kaasa palga olulist suurenemist. Siiski on varasemad tulemused näidanud, et ametiühingute suurem roll on pigem aidanud suurendada koolituses osalemist ja vähendada ebavõrdsust osalemises, kuna palgaerinevuste vähenemine toob kaasa tööandjate soovi koolitada vähe kvalifitseeritud töötajaid, et viia nende tootlikkus ja palk kooskõlla (Bassanini jt, 2007).

TÖÖTURU REGULEERITUSE mõju elukestvas õppes osalemisele on vähe uuritud. Siiski on eeldatud, et kuna tugevam tööturukaitse vähendab tööandja võimalusi töötaja vallandamiseks, peaks see kaasa tooma ka tööandja suurema panustamise töötaja koolitusse ja ühtlasi ebavõrdsuse vähenemise osaluses (Dieckhoff jt, 2007). Teisalt aga eeldatakse, et tugevam tööturukaitse suurendab polariseerumist tööturul ja toob ühtlasi kaasa pigem ebavõrdsuse suurenemise (sealhulgas ka koolitusel osalemisel) (DiPrete jt, 2001). Samas võib tööturu vähenenud reguleeritus suurendada tööalast liikumist ja seega ka töötajate soovi osaleda elukestvas õppes ja ise maksta koolituses osalemise eest, sest see soodustab mobiilsust. Sealjuures sõltuvad aga töötaja koolitusse panustamise võimalused ametikohast (mida kõrgem see on, seda suuremad on võimalused) ja seega kaasa tuua ebavõrdsuse suurenemise osalemisel (Blossfeld, 2003).

## KAPITALISMI MITMEKESISUS JA ELUKESTVAS ÕPPES OSALEMINE

Nii teoreetiliste arutluste kui ka varasemate empiiriliste tulemuste põhjal on väga raske välja tuua, kuidas ikkagi eraldivõetavad institutsionaalsed karakteristikud mõjutavad nii elukestvas õppes osalemist kui ka ebavõrdsust osalemises. Ka meie varasemad tulemused on näidanud, et institutsionaalsete karakteristikute mõju on suhteliselt erinev vanades ja uutes Euroopa Liidu liikmesriikides (Roosmaa, Saar, 2010, 2012). Järelikult ei peaks analüüsima üksikute eraldi võetavate institutsioonide mõju elukestvas õppes osalemisele, vaid pigem keskenduma teatud riikide tüüpide võrdlemisele. Kõige üldisema raamistiku selleks pakub kapitalismi variatsioonide (mitmekesisuse) käsitlus (vt tabel 2).

Kapitalismi mitmekesisuse kontseptsiooni kohaselt on institutsioonid omavahel tihedalt seotud ning täiendavad üksteist (haridussüsteem on kohandatud just antud maa tööturu vajadustele, hõivestruktuurid on kooskõlas antud riigis levinud perekonnamuudelitega jne) (Ebbinghaus, Manow, 2003). Teooria kohaselt moodustavad igas arenenud riigis selle institutsioonid 'integreeritud paketi', kus erinevate institutsioonide reeglid on omavahel kooskõlas ja toetavad-võimendavad üksteist (Hall, Soskice, 2001). Need igas riigis ajalooliselt

väljakujunenud riigile spetsiifilised institutsioonide kogumid toovad analoogsete poliitiliste reformide puhul kaasa üsna erinevaid tulemusi (Blossfeld, 2003).

Kõige üldisemal tasemel eristatakse kahte süsteemi: liberaalset ja koordineeritud turumajandust. LIBERAALSET MAJANDUSSÜSTEEMI iseloomustab pigem masstootmine, mis põhineb peamiselt madala kvalifikatsiooniga tööjõul. Ettevõtetevaheline koordineeritus on piiratud. Liberaalsetes süsteemides on sotsiaalsete suhete puhul suhteliselt väike roll vastastikusel usaldusel. Erinevate sotsiaalsete partnerite vahelised kohustused on üldjuhul väga vähesel määral defineeritud. Riik on tööandja ja -võtja vaheliste suhete korraldamisel pigem kõrvalseisja. Puuduvad juhtkonna ja töötajate huvide tasakaalustamise ja koordineerimise mehhanismid. Töösuhete turukesksus tähendab seda, et töösuhe on lühiajalisele perspektiivile orienteeritud. Selles mõttes on vastastikused kohustused minimaalsed – kui horisondile ilmub soodsam töö(võtja), toimub vahetus. Et tööandja võib töötajat vaat et suvalisel hetkel vallandada, siis on töötaja huvitatud võimalikult laiema kasutusala oskuste-teadmiste omandamisest. Nii on tal lihtsam tööd leida ning ta sõltub vähem konkreetsest tööandjast (Estevez-Abe jt, 2001). Haridussüsteem pakubki talle eelkõige üldisemat laadi teadmisi-oskusi. Tööandjal aga ei ole mõtet investeerida töötaja üldisemat laadi oskustesse. Kuna töötaja võib suvalisel hetkel lahkuda kõrgema palga otsingutele, siis on suur risk, et profiiti antud tööandja investeeringutest töötajasse võiks lõigata hoopis teine ettevõtja (nn üleostmise probleem). Seega on tööandja töötajate koolitamisel väga valiv. Kuna tööturukaitse on nõrk, siis ei ole töötajatel kasulik investeerida kutse- ja erialasesse õppesse. Töökoha kaotamisel aitab uut töökohta leida pigem üldisem haridus. Tegemist on nn ÜLDISTE oskuste süsteemiga. Samas peaks ebavõrdsus osalemises olema suhteliselt suur ja sõltuma eelkõige varasematest oskustest.

KOORDINEERITUD SÜSTEEMI iseloomustavad vastastikusel usaldusel põhinevad suhted. Ettevõtjate ühendused on tugevad, ettevõtetevaheline võrgustik on hästi arenenud, sotsiaalsete partnerite roll on oluline. Seadusandlusega on määratletud töötajate kohustuslik osalus ettevõtte jaoks strateegiliste küsimuste otsustamisel. Riik osaleb tööturu reguleerimisel, tööturukaitse on tugev. Nii riigi poolt kehtestatud tööalane seadusandlus kui ka sotsiaalsed partnerid kannavad hoolt selle eest, et kumbki pool omaks teise suhtes kohustust säilitada teatud perioodi jooksul töösuhe ka juhul, kui ühel pooltest on juba soodsamad töösuhte variandid valida. Küll aga toetab riik tööst ilmajäänuid, aidates neid tööotsingutel, võimaldades tänu üsna kõrgetele toetustele piisavalt aega sobiva (st antud kitsal alal rakendatavatele teadmiste- oskustele vastava) töö leidmiseks, pakkudes ühtlasi töö kaotanule tasuta koolitust. Haridussüsteemi oluline osa pakub spetsialiseeritud oskuste omandamise võimalust. Samas sponsoreerib riik kaudsel sel moel ka tööandjat, vabastades ta vajadusest kanda töötaja koolitusega seotud kulutusi. Riigipoolne oskustesse investeerimise riskide maandamine, nii töösuhte stabiilsuse kui ka töötute kaitse kindlusta-

## Kapitalismi variatiivsuse käsitlus

Allikas: autori kokkuvõte (Hall, Soskice, 2001; Estevez-Abe jt, 2001; Esping-Andersen, 1990, 1999; Ebbinghaus, Manow, 2003; Bohle, Greskovits, 2007a; Nölke, Vliegenthart, 2009) põhjal.

	LIBERAALNE TURUMAJANDUS	KOORDINEERITUD TURUMAJANDUS	SÕLTUV TURUMAJANDUS
Majanduse juhtimine	Piiratud ettevõtete vaheline koordineeritus	Tugevad ettevõtjate ühendused, ettevõtete vaheline võrgustik	Rahvusvaheliste ettevõtete hierarhia
Tootmissüsteem	Tootmine põhineb peamiselt madala kvalifikatsiooniga tööjõul Masstootmine Arvuline paindlikkus	Tootmine põhineb peamiselt kõrge kvalifikatsiooniga tööjõul Kõrgekvaliteetsed tooted Paindlik spetsialiseerumine	Suhteliselt kõrge kvalifikatsiooniga tööjõud
Tööturu-institutsioonid	Turukesksus, kollektiivlepete vähesus Detsentraliseeritud palgakokkulepped Nõrgad ametiühingud ja tööandjate organisatsioonid	Koordineeritus, majandusharude sisesed ja riiklikud kollektiivlepingud Tsentraliseeritud palgakokkulepped Tugevad ametiühingud ja tööandjate organisatsioonid	Ettevõtte tasemel kollektiivlepingud Detsentraliseeritud palgakokkulepped Nõrgad ametiühingud ja tööandjate organisatsioonid
Tööturu reguleeritus	Nõrk tööturukaitse	Tugev/keskmine tööturukaitse	
Oskuste süsteem	Üldiste oskuste süsteem	Spetsialiseeritud oskuste süsteem	Üldiste ja spetsialiseeritud oskuste süsteem

HEALURIIK	LIBERAALNE	SOTSIAAL- DEMOKRAATLIK	KONSERVATIIVNE	NEOLIBE- RAALNE	KAMMITSETUD NEOLIBERAALNE
Tööturupoliitika meetmed a) Aktiivsed meetmed  b) Passiivsed meetmed	Tagasihoidlikud kulutused  Madal/lühiajaline töötute abiraha	Suured kulutused  Keskmised/kesk- mise kestusega abirahad töötutele	Keskmised kulutused  Kõrged/pika- ajalised abirahad töötutele	Tagasi- hoidlikud kulutused  Madal töötute abiraha	Keskmised kulutused  Madal töötute abiraha
Elukestev õpe	Osalus suhteliselt kõrge, töökohapõhine õpe, ebavõrdsus suhteliselt suur	Osalus kõrge, ebavõrdsus madal, oluline riigi roll	Haridus- süsteemil suur roll, osalus suhteliselt madal	Osalus keskmine, ebavõrdsus kõrge	Osalus suhteliselt madal, ebavõrdsus keskmine
Riigid	USA, Suurbritannia, Iirimaa, Kanada, Austraalia, Uus-Meremaa	Rootsi, Soome, Norra, Taani	Saksamaa, Austria, Belgia, Šveits, Itaalia, Kreeka, Hispaania, Portugal, Sloveenia	Balti riigid, Bulgaaria	Ungari, Tšehhi, Poola, Slovakkia

mise kaudu, on eelduseks spetsialiseeritud oskuste süsteemi kujunemisele (Estevez-Abe jt, 2001).

Kapitalismi variatiivsuse käsitlus kasvas välja lääneriikide võrdlusuuringutest. Kuid seda käsitlust on päris palju kritiseeritud (Bohle, Greskovits, 2009; Streeck, 2009, 2010, 2011; Trampusch, Eichenberger, 2012). Üheks etteheiteks on olnud asjaolu, et tegemist väga laiade tüüpidega, mille sisesed erinevused on suured. Seetõttu on hiljem hakatud eristama koordineeritud turumajanduse alatüüpe: Skandinaavia riikide sotsiaaldemokraatliku värvinguga kapitalismi ja kristlik-demokraatlikke Mandri-Euroopa riike. Esimestes panustatakse enam riiklikku haridussüsteemi, hästi on välja arendatud kutseharidussüsteem, rakendatakse aktiivseid tööturumeetmeid, mõeldud on töötajate kaitset, mille tulemusena on tasakaalus nii spetsiifiliste oskuste kui üldiste oskuste tase. Osalus täiskasvanuõppes on kõrge ja ebavõrdsus madal (Rubenson, 2006). Kristlik-demokraatlikke heaoluriike iseloomustab madalam riiklik panus aktiivsetesse tööturumeetmetesse, kuid kõrge tööturukaitse, mis soodustab investeerimist esmajoonel spetsiifiliste, firma- või sektoripõhiste oskuste arendamisse. Nii osalus kui ka ebavõrdsus osalemises on neis riikides eeldatavalt keskmisel tasemel. Samas eristuvad teistest Euroopa kristlik-demokraatlikest riikidest selgelt Lõuna-Euroopa riigid, kus on osalus madal ja ebavõrdsus kõrge (Saar, Helemäe, 2008; Roosmaa, Saar, 2010).

Paraku ei hõlmanud esialgne kapitalismi variatiivsuse käsitlus uusi Euroopa Liidu liikmesriike. Nende riikide osas ei ole uurijatel ühest seisukohta. Osa neist väidab, et Kesk- ja Ida-Euroopas on kujunemas koordineeritud turumajandus (Lane, 2005), samas kui mitmed autorid on seisukohal, et pigem on tegemist liberaalse turumajandusega (Cernat, 2005). Kolmas grupp pooldab seisukohta, et tegemist on hoopiski kombineeritud (Iankova, 2002) või unikaalsete tüüpidega (Bohle, Greskovits, 2007a). Mitu autorit on omakorda väitnud, et Kesk- ja Ida-Euroopa riikide puhul ei saa veel rääkida selgelt väljakujunenud kapitalismimudelitest (Green, 2006; Norkus, 2012). Siiski on Sloveenia puhul täheldatud suurt kaldumist koordineeritud turumajandusliku mudeli suunas. Hilisemad käsitlused on eeskätt Visegradi riikide puhul toonud ühise joonena välja välisosalusega ettevõtete suure osakaalu (Nölke, Vliegert, 2009). Seetõttu on neid hakatud nimetama sõltuva turumajandusega riikideks. Sõltuva turumajanduse eripäraks on heade oskustega odav tööjõud, välisinvesteeringud majandusse, rahvusvaheliste firmade kaudu toimuv innovatsioon. Uut tehnoloogiat eelistatakse pigem importida ning kulutused töötajate koolitusele on vähesed, kuna töötajate haridustase on suhteliselt kõrge ja samas püüavad tööandjad hoida tööjõukulutusi kontrolli all. Tööandjad ootavad, et haridussüsteem valmistaks neile tööjõudu. Keskkhariduse struktuuris domineerib kutseharidus ning haridussüsteem on suhteliselt sarnane saksa-keelsete riikide omaga. Ilmselt erineb Balti riikide mudel oluliselt Visegradi riikide omast, kuigi neil riikidel on kindlasti ka ühiseid jooni.

Bohle ja Greskovits (2007ab, 2012) eristavadki Visegradi riikide kammitsetud neoliberaalsel mudelil Balti riikide neoliberaalsest mudelist. Nad nõustuvad ka mitme teise autori varasema järeldusega, et Sloveenia mudel on lähedane koordineeritud turumajandusele (vt ka Feldman, 2007; Adam jt, 2009). Balti riikide neoliberaalse mudeli eripäraks on madalad kulutused aktiivsetesse tööturumeetmetesse. Keskkariduses domineerib üldharidus. Elukestvas õppes osalemist soodustab asjaolu, et riik maksab osa ametigruppide osaluse eest. Samas suurendab see aga ametigruppide vahelist ebavõrdsust. Kammitsetud neoliberaalse mudeli puhul panustab riik tööturumeetmetesse märksa enam. Seetõttu võiks eeldada, et selle mudeliga riikides on ebavõrdsus osalemises väiksem kui neoliberaalsetes riikides.

## KOKKUVÕTTEKS

Enamik seniseid katseid välja töötada elukestva õppe süsteemide tüpoloogiat on aluseks võtnud mingi ühe kindla institutsioonide kogumi, näiteks haridussüsteemi, oskuste kujundamise süsteemi, tööturuinstitutsioonid jne. Kompliksemad käsitlused (näiteks kapitalismi variatiivsuse käsitlus) on pööranud küll tähelepanu ka elukestvas õppes osalemisele, kuid probleemiks on see, et need käsitlused eristavad vaid paari väga laia ja sisemiselt heterogeenset tüüpi. Kriitikud ongi pidanud seda üheks tüpoloogiate puuduseks, kuna need pigem näitavad tüüpide sisemisi erinevusi väiksematena ja samas tüüpide vahelisi erinevusi suurematena (Crouch, Farrell, 2004). Teiseks probleemiks on asjaolu, et tavaliselt keskendutakse vaid piiratud arvule riikidele (näiteks Suurbritannia, Saksamaa, USA jne), mis sobivad hästi teatud tüüpi. Teised riigid, mida on raskem kindlasse tüüpi klassifitseerida, jäetakse vaatluse alt välja. Seetõttu on Kesk- ja Ida-Euroopa riigid üldse 'ära unustatud'. Parimal juhul vaadeldakse neid ühe tüübina, kuigi selle tüübi sisemine heterogeensus on väga suur.

Samas on tüpoloogiatel nii teoreetiline väärtus, sest nende alusel on võimalik avada mehhanisme, mis mõjutavad elukestvas õppes osalemist. Tüpoloogiad võimaldavad püstitada hüpoteese empiiriliste uuringute jaoks ja nad on tähtsad ka poliitikate analüüsimisel, võimaldades võrrelda erinevate institutsionaalsete pakettide efektiivsust ja kindlaks teha, milliste institutsionaalsete kogumite korral teatud poliitilised lahendused annavad parimaid tulemusi (Ebbinghaus, 2006; Raffe, 2008). Näiteks nii Põhjamaades kui ka Suurbritannias on elukestvas õppes osamine kõrge. Kui oskuste kujundamise süsteem on neis maades pigem sarnane, siis töösuhete osas on tegemist väga selgelt vastanduvate süsteemidega. Põhjamaade puhul on tegemist koostööle orienteeritud majandustega. Selle poolt kõneleb väga oluline ametiühingute ja ka riikliku tööturupoliitika roll. Suurbritannia aga on turukeskse ehk eelkõige konkurentsile orienteeritud majanduse näide. Seega võib edu pandiks olla nii üks kui teine süsteem. Paistab, et oluline on mitte üksikute institutsioonide 'eelis', vaid teatud institutsionaalsete reeglite koosõla. Pole mingit univer-

saalset ja ainuõiget lahendust, seda enam peab valikut kaaluma – nii oma eesmäärke kui ka nende saavutamise võimalusi.

#### KIRJANDUS

- Adam, F., Primož Kristan, P., Tomšič, M. (2009). Varieties of capitalism in Eastern Europe (with special emphasis on Estonia and Slovenia). *Commun. Post Commun. Stud.*, 42, 65-81.
- Allmendinger, J. (1989). Educational systems and labour market outcomes. *Eur. Sociol. Rev.*, 5, 231-250.
- Bassanini, A., Booth, A., Brunello, G., De Paola, M., Leuven, E. (2007). Workplace training in Europe. Brunello, G., Garibaldi, P., Wasmer, E. (eds). *Education and Training in Europe*. Oxford University Press, Oxford, 143-309.
- Bassanini, A., Brunello, G. (2007). Barriers to Entry, Deregulation and Workplace Training. IZA Discussion Paper No. 2746.
- Becker, G. (1975). *Human Capital*, 2nd ed. Columbia University, New York.
- Blossfeld, H.-P. (2003). Globalization, social inequality and the role of country-specific institutions. Open research questions in a learning society. Conceicao, P., Heitor, M. V., Lundvall, B.-A. (eds.) *Innovation, Competence Building and Social Cohesion in Europe: Towards a Learning Society*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK, 303-324.
- Blundell, R., Dearden, L., Meghir, C. (1996). *The Determinants and Effects of Work-related Training in Britain*. Institute for Fiscal Studies, London.
- Bohle, D., Greskovits, B. (2007a). Neoliberalism, embedded neoliberalism and neocorporatism: towards transitional capitalism in Central-Eastern Europe. *W. Eur. Polit.*, 30, 443-466.
- Bohle, D., Greskovits, B. (2007b). The State, internationalization, and capitalist diversity in Eastern Europe. *Compet. Change*, 11, 90-115.
- Bohle, D., Greskovits, B. (2009). Varieties of capitalism and capitalism 'tout court'. *Archives Européennes de Sociologie*, 50, 355-368.
- Bohle, D., Greskovits, B. (2012). *Capitalist diversity on Europe's periphery*. Cornell University Press, Ithaca and London.
- Booth, A. (1991). Job-related formal training: Who receives it and what is it worth? *Oxf. Bull. Econ. Stat.*, 53, 281-294.
- Booth, A., Francesconi, M., Zoega, G. (2003). Unions, work-related training and wages: Evidence for British men. *Indust. Lab. Rel. Rev.*, 57, 68-91.
- Brunello, G. (2001). On the Complementarity Between Education and Training in Europe. IZA Discussion Paper No. 309.

- Brunello, G., Medio, A. (2001). An explanation of international differences in education and workplace training. *Eur. Econ. Rev.*, 1, 307-322.
- Cernat, L. (2002). Institutions and economic growth: Which model of capitalism for Central and Eastern Europe? *Journal of Institutional Innovation, Development and Transition*, 6, 18-34.
- Crouch, C., Farrell, H. (2004). Breaking the path of institutional development? Alternatives to the new determinism. *Ration. Soc.*, 16, 5-43.
- Crouch, C., Finegol, D., Sako, M. (1999). *Are Skills the Answer? The Political Economy of Skill Creation in Advanced Industrial Countries*. Oxford University Press, Oxford.
- Dieckhoff, M., Jungblut, J.-M., O'Connell, P. J. (2007). Job-related training in Europe: Do institutions matter? Gallie, D. (ed.) *Employment Regimes and the Quality of Work*. Oxford University Press, Oxford, 77-104.
- DiPrete, T., Goux, D., Maurin, E., Tåhlin, M. (2001). Institutional determinants of employment chances: The structure of unemployment in France and Sweden. *Eur. Sociol. Rev.*, 17, 233-254.
- Ebbinghaus, B. (2006). *Reforming Early Retirement in Europe, Japan and the USA*. Oxford University Press, Oxford.
- Ebbinghaus, B., Manow, P. (eds.) (2003). *Comparing Welfare Capitalism. Social Policy and Political Economy in Europe, Japan and the USA*. Routledge, London.
- Elman, C., O'Rand, A. M. (2002). Perceived job insecurity and entry into work related education and training among adult workers. *Soc. Sci. Res.*, 31, 49-76.
- Esping-Andersen, G. (1990). *The Three Worlds of Welfare Capitalism*. Policy Press, Cambridge.
- Esping-Andersen, G. (1999). *Social Foundations of Postindustrial Economies*. Oxford University Press, Oxford.
- Estevez-Abe, M., Iversen, T., Soskice, D. (2001). Social protection and the formation of skills: A reinterpretation of the welfare state. Hall, P. A., Soskice, D. (eds.) *Varieties of Capitalism. The Institutional Foundations of Comparative Advantage*. Oxford University Press, Oxford, 145-183.
- Feldmann, M. (2006). Emerging varieties of capitalism in transition countries: industrial relations and wage bargaining in Estonia and Slovenia. *Comp. Polit. Stud.*, 39, 829-854.
- Green, A. (1999). Education and globalization in Europe and East Asia: Convergent and divergent trends. *J. Educ. Pol.*, 14, 55-71.
- Green, A. (2006). Models of lifelong learning and the 'knowledge society'. *Compare*, 36, 307-325.



- Hall, P. A., Soskice, D. (2001). An introduction to varieties of capitalism. Hall, P. A., Soskice, D. (eds.) *Varieties of Capitalism. The Institutional Foundations of Comparative Advantage*. Oxford University Press, Oxford.
- Iankova, E. A. (2002). *Eastern European Capitalism in the Making*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Ivančič, A. (2000). Education and shifts between labour-market states in the transition from the socialist to the market economy: The Slovenian case. *Eur. Sociol. Rev.*, 16, 403-425.
- Iversen, T., Stephens, J. D. (2008). Partisan politics, the Welfare State, and three worlds of human capital formation. *Comp. Polit. Stud.*, 41, 600-637.
- Jungblut, J.-M. (2008). Worker competence and the training gap: does learning begets learning? Paper presented at the Equalsoc Lifelong Learning group workshop, October 14-15, Barcelona, Spain.
- Kailis, E., Pilos, S. (2005). Lifelong learning in Europe. *Statistics in focus*, 8, 2-7.
- Kogan, I., Unt, M. (2005). Transition from school to work in transition economies. *Eur. Soc.*, 7, 219-253.
- Lane, D. (2005). Emerging varieties of capitalism in former State Socialist societies. *Compet. Change*, 9, 227-247.
- McGivney, V. (2001). Fixing or changing the pattern. Reflections on widening adult participation in learning. NIACE, Leicester.
- Müller, W., Gangl, M. (eds.) (2003). *Transitions from Education to Work in Europe. The Integration of Youth into EU Labour Markets*. Oxford University Press, Oxford.
- Norkus, Z. (2012). *On Baltic Slovenia and Adriatic Lithuania*. CEU Press, Budapest.
- Nölke, A., Vliegenthart, A. (2009). Enlarging the varieties of capitalism. The emergence of dependent market economies in East Central Europe. *World Polit.*, 61, 670-702.
- O'Connell, P. J. (2002). Does enterprise-sponsored training aggravate or alleviate existing inequalities? Evidence from Ireland. Schömann, K., O'Connell, P. J. (eds.) *Education, Training and Employment Dynamics*. Edward Elgar, Cheltenham, 285-302.
- O'Connell, P. J., Jungblut, J.-M. (2008). What do we know about training at work? Mayer, K. U., Solga, H. (eds.) *Skill Formation: Interdisciplinary and Cross-National Perspectives*. Cambridge University Press, Cambridge, 109-125.
- OECD (2003). *Beyond Rhetoric: Adult Learning Policies and Practice*. OECD, Paris.
- Raffe, D. (2008). The concept of transition system. *J. Educ. Work*, 21, 277-296.

- Roosmaa, E.-L., Saar, E. (2010). Participating in non-formal learning: patterns of Inequality in EU-15 and the New EU-8 Member Countries. *J. Educ. Work*, 23, 179-206.
- Roosmaa, E.-L., Saar, E. (2012) Participation in non-formal learning in EU-15 and EU-8 countries: demand and supply side factors. *Int. J. Lifelong Educ.*, 31, 477-501.
- Rubenson, K. (2006). The Nordic model of lifelong learning. *Compare*, 36, 327-341.
- Ryan, P. (2002). Lifelong learning: potential and constraints with special reference to policies in the United Kingdom and Europe. Working Paper 15. In Focus. Programme on Skills, Knowledge and Employability. ILO, Geneva.
- Saar, E., Helemäe, J. (2008). Estonia on the backdrop of the European Union states: country-specific institutional context and lifelong learning. *Studies for Learning Society*, 1, 7-16.
- Saar, E., Ure, O. B. (2013). Lifelong learning systems: overview and extension of different typologies. Saar, E., Ure, O. B., Holford, J. (eds.) *Lifelong Learning in Europe: National Patterns and Challenges*. Edward Elgar Publishing, 46-81.
- Saar, E., Ure, O. B., Desjardins, R. (2013). The role of diverse institutions in framing adult learning systems. *Eur. J. Educ.*, 48, 213-232.
- Streeck, W. (2009). *Re-Forming Capitalism: Institutional Change in the German Political Economy*. Oxford University Press, Oxford.
- Streeck, W. (2010). *E Pluribus Unum? Varieties and Commonalities of Capitalism*. MPIfG Discussion Paper 10/12. Max Planck Institute for the Study of Societies, Cologne.
- Streeck, W. (2011). *Skills and Politics: General and Specific*, MPIfG Discussion Paper 11/ 1. Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung, Köln.
- Strietska-Ilina, O. (2001). Research on vocational education and training at the crossroads of transition in Central and Eastern Europe. Descy, P., Tessaring, M. (eds.) *Training in Europe. Second Report on Vocational Training Research in Europe 2000: Background Report*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 209-311. (Cedefop Reference series; 3).
- Trampusch, C., Eichenberger, P. (2012). Skills and industrial relations in coordinated market economies – continuing vocational training in Denmark, the Netherlands, Austria and Switzerland. *Br. J. Ind. Relat.*, (ilmumas).
- Wolbers, M. H. J. (2005). Initial and further education: Substitutes or complements? Differences in continuing education and training over the life-course of European workers. *Rev. Educ.*, 51, 459-478.

## RIIGI TEADUSPREEMIADE KOMISJONI KOOSSEIS

Kinnitatud Vabariigi Valitsuse korraldusega 03.10.2013

### ESIMEES

Richard Villems akadeemik, Eesti Teaduste Akadeemia president

### LIIKMED

Jaak Järv akadeemik, Tartu Ülikooli professor  
Valter Lang akadeemik, Tartu Ülikooli professor  
Ülo Langel Stockholmi Ülikooli professor  
Irja Lutsar Tartu Ülikooli professor  
Lauri Mälksoo Tartu Ülikooli professor  
Anu Mänd Eesti Maaülikooli professor  
Ergo Nõmmiste akadeemik, Tartu Ülikooli professor  
Anu Realo Eesti Teaduste Akadeemia uurija-professor  
Martin Zobel akadeemik, Tartu Ülikooli professor  
Tõnis Timmusk Tallinna Tehnikaülikooli professor  
Enn Tõugu akadeemik, TTÜ Küberneetika Instituudi juhtivteadur  
Jaan Undusk akadeemik, Underi ja Tuglase Kirjanduskeskuse direktor  
Rein Vaikmäe TTÜ Geoloogia Instituudi professor  
Urmas Varblane akadeemik, Tartu Ülikooli professor  
Andres Õpik Tallinna Tehnikaülikooli professor

# EESTI VABARIIGI TEADUSPREEMIAD

2014

TALLINN, 2014