

# EESTI VABARIIGI TEADUSPREEMIAD

2010

TALLINN, 2010

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 24.02.2010 tehtud fotosid



Enne pidulikku hetke Akadeemia maja saalis ...

## SISUKORD

SAATESÖNA .....	6
<i>Marika Mikelsaar</i> teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest .....	8
<i>Arvo Ots</i> teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest .....	30
<i>Hannes Tammet</i> teaduspreemia täppisteaduste alal uurimuste tsükli “Atmosfääri aerosooli ja aeroioonide tekkeprotsesside ja evolutsiooni uurimine, aeroioonide liikuvusspektromeetria meetodite ja aparatuuri arendamine” eest .....	52
<i>Maris Laan</i> teaduspreemia keemia ja molekulaarbioloogia alal uurimuste tsükli “Inimese polügeenseid komplekstunnuseid reguleerivad genoomilõigud” eest .....	68
<i>Rein Kuusik</i> (kollektiivi juht) <i>Andres Trikkel, Tiit Kaljuvee</i> teaduspreemia tehnikateaduste alal tööde tsükli “Uurimusi happeliste gaaside emissiooni piiramiseks energeetikas” eest	86
<i>Irja Lutsar</i> teaduspreemia arstiteaduse alal uurimuste tsükli	

“Infektsioonide käsitus omandatud immuunpuudulikkusega isikutel” eest .....	110
<i>Hannes Kollist</i> (kollektiivi juht)	
<i>Heino Moldau, Triin Vahisalu</i>	
teaduspreemia geo- ja bioteaduste alal uurimuste tsükli “Taimede stressitaluvus” eest TAIMEDE OSOONITALUVUSEST ÕHULÕHEDE REGULATSIOONI- MEHCHANISMIDENI .....	122
<i>Tõnu Püssa</i>	
teaduspreemia põllumajandusteaduste alal uurimuste tsükli “Taimsed toidulisandid ja nende antioksüdantne toime loomsetes toitudes” ja monograafia “Principles of Food Toxicology” eest .....	136
<i>Anu Realo</i>	
teaduspreemia sotsiaalteaduste alal uurimuste tsükli “Isiksus ja stereotüübid kultuuridevahelises perspektiivis” .....	152
<i>Irina Belobrovtseva, Svetlana Kuljus</i>	
teaduspreemia humanitaarteaduste alal monograafiate “Mihhail Bulgakovi romaani “Meister ja Margarita”. Kommentaarid”; “Roman M. Bulgakova “Master i Margarita”. Kommentarij” Tallinn, 2006; “Roman M. Bulgakova “Master i Margarita”. Kommentarij” Moskva, 2007 eest .....	168
Vabariigi teaduspreemiate komisjoni koosseis .....	181



24. veebruar 2010, Akadeemia maja saalis  
Esireas (paremalt): Andrus Ansip, Ene Ergma,  
Richard Villems, Laine Jänes, Tõnis Lukas

## SAATESÕNA

Läinud aasta lõpul, siis kui meie ülikoolide ja teiste teadusasutuste nõukogud ning akadeemikud vaagisid, keda esitada teaduspreemiate kandidaatideks, andis Soome Akadeemia (Soome tähenduses “teadusfond”) välja järjekordse analüüsi oma riigi teaduse kohta pealkirjaga “The State and Quality of Scientific Research in Finland 2009”. Kuigi tegemist on ligi 300 lk paksuse raamatuga, mida nad annavad välja kord kolme aasta jooksul, ning peale muu sisaldub seal kümneid tabeleid ja diagramme, kus võrreldakse Soome teadust teiste maade teadusega, valdavalt Jaapani, USA, UK, Saksamaa ja Rootsi omaga, sisaldavad mõned (tihti Brüsseli materjale reprodutseerivad) tulpdiaagrammid ka Eestit.

Leheküljel 64 ongi üks niisugune diagramm, mis iseloomustab 31 riigi teadlaste osaluse aktiivsust (tuhande teadlaste kohta) Euroopa Liidu teadus- ja arendustegevuse erinevates programmides. Eesti asub seal eestpoolt kolmandal kohal, Soome tagant seitsmendal. Kuidas seletada? Vahest on Soomes nii palju raha, et ei ole stiimulit konkureerimiseks? Võib-olla. Kuid seitsme tipmise *per capita* enim aktiivse hulka kuuluvad ka Belgia, Holland, Šveits ja Iisrael. Seega päris lihtsad seletused ei sobi, seda enam, et vahe Eesti ja Soome vahel on pea kolmekordne.

Mida see tegelikult ka ei tähendaks, on päris selge, et teaduspoliitika suunamisel – ja praegu ongi käimas tõsine töö TAKSi uue versiooni ning selle alusel väljaantavate õigusaktide kallal – võime me vähem mõelda kvantiteedile ja püüda teha nii, et iga uuendus tehtaks veendumuses, et nii luuakse tingimused kvaliteedi edasiseks tõusuks. Sest selles osas on meil veel pikk tee tasemeni, et end võrrelda nende riikidega, kellega saab end võrrelda Soome.

Teaduspreemiad katavad väikest, kuid seda enam olulist osa teadusest, sest vaadates vähegi pikemat perioodi, peegeldub neis üllatavalt hästi see, mida me võime pidada kvaliteediks Eesti teaduses. Käesolev kogumik on neljateistkümnes väljaanne selles seerias.

*Richard Villems*

Riigi teaduspreemiate komisjoni esimees

*Teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest*



*Marika Mikelsaar*



Sündinud 12.11.1938 Tallinnas

1957 Tallinna 20. keskkool, kuldmedal  
1963 Tartu Ülikooli arstiteaduskond, raviarst  
1969 meditsiinikandidaat, Tartu Ülikool  
1993 meditsiinidoktor, Tartu ülikool

Alates 1963 Tartu Ülikoolis: stažeerimine, aspirantuur, nooremteadur, vanemteadur; Maarjamõisa kliinikute mikrobioloogia labori juhataja, professor, mikrobioloogia instituudi juhataja

2004–2010 TÜ emeriitprofessor ja mikrobioloogia instituudi erakorraline professor meditsiinilises biotehnoloogias; alates 2010 TÜ emeriitprofessor ja mikrobioloogia instituudi erakorraline juhtivteadur

Juhendanud 11 doktoritööd meditsiinilises mikrobioloogias

1994 aasta teaduspreemia arstiteaduse alal uuringute eest: “Vastsündinute tervise reguleerimine mikrofloora kaudu” (kollektiivi juht)  
2002 aasta teaduspreemia arstiteaduse alal uuringute: “Inimese normaalne mikrofloora ja olulisemad bakteriaalsed infektsioonid Eestis” eest  
2003 Tartu Ülikooli suur medal  
2007 Euroopa Liidu naisleidurite ja -innovaatorite võrgustiku EUWIIN auhind, Berliin (probiotiline bakter *Lactobacillus fermentum* ME-3)  
2008 Valgetähe III klassi teenetemärk  
2008 Ülemaailmse naisleidurite ja -innovaatorite assotsiatsiooni kuldmedal, Korea, Sõul (probiotiline bakter *Lactobacillus plantarum* TENSIA)

Avaldanud üle 140 teaduspublikatsiooni, kolme patendi autor

2010. aastal autasustas Vabariigi valitsus mind pikaajalise tulemusliku töö eest meditsiinilise mikrobioloogia valdkonnas. Ma ise pean oma kõige olulisemaks saavutuseks selle arstiteadusliku eriala jätkusuutliku arengu kindlustamist Eestis. See väljendub nii Eesti arstide koolitamises mikrobioloogia ja infektsioonhaiguste tundjateks kui ka kliinilise mikrobioloogia spetsialistide ettevalmistamises. Eriliselt tahaksin rõhutada akadeemilise koolkonna kujundamist, mille liikmed on edukalt tegutsemas väga erinevates meditsiinilise mikrobioloogia valdkondades nii Tartu Ülikooli mikrobioloogia instituudis, TÜ kliinikumis kui välismaa laborites.

## LAPSEPÕLV, NOORUS JA PÕHIMÕTTED

Minu elu värvikirev mosaiik on kulgenud kahel sajandil. Esimene kild oli sündimine Eesti Vabariigi parimatel aastatel gümnaasiumiharidusega postiametniku ja kaugesõidu laevakapteni perekonda. Õnne anti sellele perele pärast minu sündi veel vaid 9 kuuks, siis läks isa merele, piirid sulgusid ja me ei näinud teda enam kunagi. Ta hukkus 1954. aastal Vaikse ookeani Alaska lahes. Sümbolsest jäädvustasin tema nime Egon-Sven Jürgenson koos vanakapten Aleksander Jürgensoni nimega hauasambale Haapsalu vanal kalmistul. Vanakapten ei leppinud kunagi selle faktiga, et ma polnud Peeter. Tegelikult olengi üsna visa ja kartmatu maade-avastaja, keda just raskused mobiliseerivad.

Teise killu moodustab sõjaaeg Tallinnas. Mäletan märtsi pommitamist 1944. Pommide kukkumise lühikesel vaheajal jooksime emaga Kunderi tänavalt Postivalitsuse maja (Kreutzwaldi 12) kivist keldritesse, ümberringi põles, kohutav suits lämmatas. Minu ilusad kodutänavad olid varemetes, nägin sõja hävitustööd.

Kolmandaks killuks oli põgenemine emaga Läände 1944. a augustis – isa otsima. Pärast kaht aastat vintsutusi sõjaaegsel-järgsel Saksamaal deporteeriti meid idatsoonist loomavagunites tagasi Nõukogude Eestisse. Berliinist sain mälestusteks kõrged süntumedad varemeis või akendeta majad ja kohutava haisu – suits, kivitolm, püssirohi, lagunev elusaine. Kui 1970ndatel aastatel, pärast konverentsi sattusin pimedas Berliinis Spree äärde, tekitas mu aju uuesti sõjaaegse kaostunde. Positiivne moment – sain selgeks saksa keele. Eestis kättesaadavast meditsiinilisest ja mikrobioloogilisest kirjandusest oli minu ülikooliaastail enamik saksakeelne.

Neljas kild moodustub Tallinna 14. Mittetäielikust Keskkoolist Allika tänaval, kus töötasid veel ema ja tädi õpetajad, kes ei küsinud ega teatanud “kuhu vaja” vaevaliselt eesti keelt rääkivast lapsest. Kahel korral olime emaga tänu headele inimestele imekombel pääsenud küüditamisest, aga onu Helmut Räästas, rahvusmeeskonnas palju kordi Eestit esindanud jalgpallur, viidi 1946. aastal oma töökohalt teadmatusse kahe püssimehe vahel. Kodus olid kolm naist – 60 rublase palgaga Sidevalitsuses töötav tädi Leontine Küüt, 13 rubla pensioni saav vanaema Anna Räästas ja invaliidist ema Elfriede Jürgenson. Emal oli umbes 50 fotost koosnev pakike, mida ta sirvis iga päev ja jutustas oma õnnelikust elust Eesti Vabariigis. Ema oli minule Per Gynti ootava Solveigi võrdkuju. Õppisin hästi, suhtlesin ja sõbrunesin meelsasti, kuid teadsin varakult, mida tohib kellega ja kus rääkida. Karkudel vanaema kuulas innukalt raadiot ja kommenteeris elu ja poliitikat, haridust oli tal 3 klassi, selja taga tema enda ja vanaisa Madis Räästase 1905. a ja 1918. a revolutsiooniline võitlus, vanaisa väljasaatmine Eesti Vabariigist ametiühingute kongressi delegaadina, kes suri Petrogradis 1920, kiristu ümber kiri: “Elagu III Internatsionaal”. Vanaema kasvas ja koolitas üksi oma 5 last, kelle järglaseks olin vaid mina. 1940ndateks aastateks olid tema revolutsioonilised mõttemallid ümber kujunenud sügavaks vihaks ja põlguseks nõukogude korra ja kommunistide vastu.

Pioneeriks sunniti astuma kogu klass, aga komsomoli ei suutnud Tallinna 20. Keskkoolis mind enam miski vägi suruda. Leidsin mõttekaaslasi, kellega koos kujundasime oma ideaalid, lugedes Kivikase “Nimed marmortahvil” ja kättesaadud pagulaskirjandust. 16-aastaselt kirjutasin oma Päevikusse töötuse mitte mingi hinna eest reeta oma Eestimaad. Olen seda töötust pidanud, hoidudes eemale igasugusest parteilisest liinist ja sellega seotud karjäärast.

Raamatud olid meie pere maailma laienduseks ja lohutuseks. Olin üksik lugemislaps, kelle eluhoiakuid mõjutasid kuulsad mõtlejad ja fabuleerijad – kirjanikud. Sisukat lugemismaterjali leidsin Tallinnas Gogoli nimelise raamatukogu erilise kirbelõhnaga kartoteegi kaste sirvides ja sõprade sõjatules säilinud kodudest. Raamatud olid nõukogude ajal odavad, meile osteti Nobeli preemia laureaate sari, mis minu raamatukapis on aukohal tänagi. Varakult lugesin läbi A. Carrelli “Tundmatu inimese”, mis huvitavalt peegeldas inimkeha talitlusi ja neid saladusi, mida peaks meditsiiniuuringutega selgitama. Lemmikraamatuks kujunes Sinclair Lewise romaan “Martin Arrowsmith”, mille aluseks on Kanada-Prantsusmaa teadlase, mikroobiviiruste e bakteriofaagide avastaja (Felix d’Herelle) elu- ja käekäik. Raamatus avanes väga põnev laboratoorium, kus igapäevased katsed tõid midagi erilist ja uut, mis sundis teadlasi juurdlema, otsima seletusi teaduskirjandusest ja jälle uutest eksperimentidest. Soov midagi sarnast kogeda määraski minu tee nähtamatute, avastamist ootavate mikroobide juurde. Meditsiiniüliõpilasena leidsin 1960. aastate Tartu Riikliku Ülikooli mikrobioloogia kateedrist Martin Arrowsmithi taolised teadlased, kes mind mikrobioloogiks kujundasid.

Minu edasise elu ja huvide oluliseks mõjutajaks alates 1960ndatest aastatest sai bioloogist kalateadlase Neeme ja Laine Mikelsaare perekond. Nende nelja poja Raik-Hiio, Aavo-Valduri, Henn-Risto ja Ustav-Esko ja nende abikaasade Ruthi, Peeli ja Sirje jaoks oli loodus- ja arstiteadus keskpunktiks. Paljude tuliste diskussioonide eest pidupäevadel ja suvepuhkuste ajal Võrtsjärve Limnoloogijaamas olen neile väga tänulik. Abikaasa Raik on suur teadusfanaatik, teadmistemaailma korrastada püüdev entusiast, kes on mind alati moraalselt toetanud. Ka meie naissoost järglased Margit Sutrop ja Eva Piirimäe koos abikaasadega on akadeemilise suundumusega, nüüd juba Pangodi mail juurutamas uurivat, hindavat, maailmaparandavat vaimu. Bioloogi haridusega poeg Hannes aitab edukalt korrastada meie igapäevast elu.

#### MEDITSIINILINE MIKROBIOLOOGIA KUI ARENGUPOTENTSIAALIGA ERIALA

Minu 50 teadustöö aasta jooksul on meditsiinilist mikrobioloogiat alati iseloomustanud suur arengupotentsiaal. Ka praegu pole, hoolimata meditsiini edusammudest, viimase 10 aastaga vähenenud inimeste suremus infektsioonhaigustesse, millest olulise osa moodustavad ülemiste hingamisteede viirusinfektsioonid, soolenakkused, tuberkuloos, AIDS ja malaaria. Antibiootikum-

resistentsete tekitajate põhjustatud mitmesugused haigla- ja olmeinfektsioonid ründavad kõrgelt tsiviliseeritud ühiskondi. Kaasaegses kliinilises mikrobioloogias on oluline rakendada molekulaarbioloogiliste, biokeemiliste ja immunoloogiliste vahendite täit arsenalit diagnoosi täpsustamiseks ja kiirendamiseks, et rakendada haigete tõhusat ravi ja profülaktikat. Mõneti isegi üllatavalt on taas päevakorrale kerkinud seerumravi uuenenud võimalused, kuigi nüüd peaks see toimuma täpsema mikrobioloogilise diagnoosi põhjal ja biotehnoloogiliselt saadud antikehadega.

Erakordse ulatusega on inimest asustavate nn normaalsete mikroobide maailm – nii kvalitatiivses kui kvantitatiivses mõttes. Mikroobirakke on 10 korda rohkem kui inimkehas endas esineb rakke, kuigi see suur hulk moodustab vaid 2 kg *ca* 70 kg kohta. Kuni XX sajandi alguseni arvati sooles elutsevat *ca* 500 erinevat mikroobiliiki, möödunud sajandi keskpaigast, tänu molekulaarsete meetodite kasutuselevõtule, küündib nende arvukus 1000-st kuni 2000-ni. Soolestiku mikroobikooslusi kujutatakse alati jäämäena, mille nähtav osa (kindlaks tehtud liigid) moodustab vaid kuni 10% koguarvust. Nii lähedal inimesele ja ikka nii tundmatu ja huvitav areaal!

Inimese mikrofloora osas saadakse uute läbimurdetehnoloogiatega üsna täpseid andmeid mikrobioomist, eristades seda inimese enda genoomist, kuid suhteliselt vähe on teada oma mikroobide mõjust inimese rakkudele ja kudedele. Hiljuti näitasid USA teadlased professor Gordoni laborist, et mikroobid osalevad otseselt inimese geenide ekspressioonis. See võimaldaks edaspidi uurida, kuidas mikrobioomis olev info avaldub ümberkirjutamisel RNA-le (transkriptoomika), ribosoomil valkude sünteesile (proteoomika) ja metaboliitide tekkele kehavedelikes (metabooloomika). Nimetatud toimete selgitamine pro- ja anti-inflammatoorsete tsütokiinide tekkest, valkude, lipiidide ja süsivesikute ainevahetusest pakuks võimalusi suunata nii organismi füsioloogilisi funktsioone (tervis, kasvuage, vananemine) kui reguleerida mitmete haiguste patogeneesi.

Teadusuuringute tarvis on vajalik jätkata inimese oma ja patogeensete bakteritüvede kollektsoonide loomist. Pikemas perspektiivis aitavad need kindlustada inimese heaolu üha tehiskummas maailmas. Mikrobioloogia instituudi bakterikultuuride kollektsoonile (üle 1000 mikroobitüve) panime aluse Eesti-Rootsi laste allergiauuringute käigus. Mõnda aega rahastati seda tegevust Haridus- ja Teadusministeeriumi poolt riiklike vahenditega. Praeguseks on see tugi meie jaoks kadunud, ilmselt on olemas Eestile olulisemaid kollektsoone ...

## TEADUSTÖÖ PERIOODID

Minu teadustöös saab eristada nelja olulisemat perioodi:

- teadmiste kogumine seedekulgla laktobatsillidest, fakultatiivsetest ja range-anaeroobidest ja ökoloogiliste seaduspärasuste selgitamine;
- kliinilise mikrobioloogia alased uuringud Eesti olulisematest bakteriaalsetest infektsioonidest ja nende antibiootikumtundlikkusest;

- vastsündinute mikrofloora kujunemise ja allergia tekke vaheliste seoste selgitamine (kahest viimatinimetatust olen pikemalt kirjutanud 2002. a Eesti TA kogumikus “Eesti vabariigi teaduspreemiad” lk. 54-63);
- mikrofloora mõju täiskasvanute ja eakate inimeste ainevahetusele (viimase 10 aasta töö).

#### INIMESE SEEDETRAKTI MIKROFLOORA UURINGUD

Uuringud algasid 1960ndatel aastatel TRÜ mikrobioloogia kateedris stažeerimisel ja aspirantuuris, noorem- ja vanemteaduri ametikohtadel TÜ ÜMPI mikroobiökoloogia laboris, mille juhatajaks oli meditsiinikandidaat Helga Lenzner ja teaduslikuks juhiks professor Akivo Lenzner. See 25-aastane periood minu teadustöös kulges Vanemuise tn 46 majas professor Karl Schlossmanni loodud laboris. Tänavu K. Schlossmanni 125. sünniaastapäeva pidustustel märkisin, et olen praegusel momendil see inimene, kes on näinud neid inimesi, kes nägid Schlossmanni. Kõrged ruumid ja laiad aknad, kaunis kivi-parkett, eriline mikroobide lõhn – bakterite ainevahetuse komponentidest ja nende värvimiseks kasutatavatest kemikaalidest. Suur tuba täis usinaid töömehelasi, kelle keskel troonisid meie kolm austusväärset dotsenti, neist kaks – Selma Laanes ja Eugen Tallmeister – veel Schlossmanni õpilased ja tema meelsuse kandjad (vt foto 1). Nii õnnestumistes kui äpardustes hõljus meie ümber Schlossmanni vaim ja tema põhimõtted, et meditsiiniline mikrobioloogia peab tegelema nii mikrobioloogia alusprobleemide, infektsioonide diagnostika edendamise kui erinevate praktiliste rakendustega. See oli huvist kantud ausa teaduse vaim. Katsete tulemused laboris olid üldise diskussiooni objektiks, sageli peatusid minu töölaua juures eelpool nimetatud dotsendid – näidake, mis teil siin söötmes kasvab või mida mikrooskoobis näete. Alati abivalmis, oma kodust teaduskirjandust juurde toomas kangastub mu ees dotsent Tallmeister, pidulauas aga prantsuskeelsete fraasidega põimitud luuleloomingut ette lugemas, koridoris õhtuti kätel kõndi demonstreerimas, pikki üksildasi suusaretki harrastamas – innukas teadlane, armas ja eluvõõras Õpetaja. Dotsent Selma Laanes oli noorele vajalikult range Koolitaja. Kateedris tööle asudes pidime kohe hakkama juhendama meditsiiniõpilaste praktikume. Sageli olin praktikumis paaris dotsent Laanesega. Kartsin väga nii teda kui venekeelset praktikumi ja valmistusin hoolega. Kord nägin oma kergenduseks, et isegi temal oli venekeelne tekst kõik ette valmis kirjutatud. Üle 45 aasta luges ta arstidele mikrobioloogiat, alati korrektselt riides, soengu ja maniküüriga ning värske *Journal Bacteriology* kabinetis töölaual. Ajakirja saatsid talle kursuse- ja seltsikaaslased välismaalt. Kui 1988. aastal taastati Eesti Naisüliõpilaste Selts, pakkus ta mulle, et võiksime nüüd “sina” rääkida. Uskuge, ma ei suutnud, austus oli nii sügav. Kolmas dotsent Endel Türi (S. Laanese õpilane) kujunes minu heaks sõbraks, kelle arstlikku silmaringi, uute teadusfaktide äratundmise ja konteksti paigutamise võimet ma õppisin hindama ühiste eksperimentide ja diskussioonide käigus koos tema farmatseudist abikaasa vanemteadur Mall Türiaga.



Foto 1.

Mikrobioloogia kateedri õppejõud 1973.

Esireas (vasakult): Eugen Tallmeister, Selma Laanes, Akivo Lenzner, Marika Mikelsaar, Endel Türi, Mai Väljaots. Tagareas keskel Jaak Uibu.

Olin professor A. Lenzneri esimene õpilane, kellega ta algusaastail väga palju arutas mikroobiökoloogia teadusprobleeme. Need diskussioonid harisid mind väga. Lenzner istus Moskva raamatukogudes minu kõrval vormeliga: “Ei saa ju teisiti, peab kursis olema...”. Mulle olid need Lenini ja Meditsiini raamatukogu tunnid pidupäevaks, kus avanes välismaa teadlaste töösuund ja mõtte-maailm. Kirjutasin täis sadu perfokaarte ja Tartus muudkui lehitsesin neid, kujundades oma süsteemi ja kavandades edasiste katsete plaane.

Poliitiline tellimus suunas NSVL mikrobioloogiateadust kosmose avarustesse. Inimesega koos elutsevad mikroobid muutusid oluliseks, oli vaja tunda nii nende kaitsvat kui ohtlikku potentsiaali. Paljudeks aastateks sai professor Lenzneri juhitud kateedri koostööpartneriks Medikobioloogiliste Probleemide Uurimise Instituut Moskvast. Kuna tegelesime unikaalse temaatikaga, saime fi-  
nantse ja varustust. Kuu enne järjekordset kosmoselendu selgitasime kosmo-  
nautide paari (lendaja ja varumees) laktofloora iseärasusi, panime reisile  
valmis nende oma kasulikke baktereid [Lenzner jt, 1973, 1984]. Huvitav oli

näha emotsionaalse stressi toimet mikroobidele. Kui mikrofloorast kadusid laktobatsillid, asendudes streptokokkidega, võis oodata raadiost õõnsa häälega Levitani teadet järjekordse kosmonaudi avarustesse lähetamisest. Tänaeni pole aga kahjuks teada, missugused organismi virgatsained seda suurt nihet esile kutsuvad. Väärt teema noortele olimestressi uurimiseks!

Teadus edenes prof Lenzneri juhitud kollektiivis, kirjeldasime mitmeid antagonistlikult aktiivseid laktobatsillide tüvesid, saime kolm NSVL autoritunnistust. Ühe minu kandidaaditöö käigus isoleeritud *Lactobacillus plantarum* 8-RA-3 tüve (hea patogeeni vastane võitleja) viis professor Lenzner Gorki ja Permi teadusinstituutidesse, kus see arendati nn kodumaiseks probiootikuks, mida tänaseni toodetakse Venemaal tuhandetes tonnides.

TEADUSMÕTE. Kui ma alustasin oma teadustööd professor Lenzneri lennuka hüpoteesi alusel rooja laktobatsillidega, et kasutada neid indikaatormikroobidena maovähi puhul, siis küllalt ruttu avardasin oma töösuunda mao ala- ja ülihappesusega, mao reseksiooni järgsete patsientide, noorte ja eakate tervete isikute mikrofloora eripära ja püsikkuse selgitamisele oma kandidaaditöös [Mikelsaar, 1969]. Järgnevalt tekkisid head koostöösuhted ÜMPI teadlaste (A. Tamm, J. Parik, U. Siigur) ja mitmete klinitsistidega (dotsendid Juhan Sarv, Heidi-Ingrid Maaros, Silvia Russak). Laktobatsillide kõrval asusin määrama seedekulglas 13 erinevasse mikroobiperekonda kuuluvaid baktereid [Mikelsaar jt, 1972]. Minu teaduslik tegevus selles vallas oli eeskätt kirjeldava iseloomuga – mikroobide koosluste iseärasused soolevalendikus ja limaskestlal ning muutused erinevate seedetrakti haiguste puhul [Mikelsaar jt, 1984]. Kirjeldasin erinevaid tasandeid seedekulgla mikrobiökoloogias: I tasand – bakterite omavahelised kvantitatiivsed ja kvalitatiivsed suhted teatud mikroobikooslustes; II tasand – koosluste interaktsioon, mis kujunenud erinevate seedetrakti piirkondade limaskestlal ja soolevalendikus; III tasand – rooja mikrofloora kui kõikide eelnevate tasandite summaarne peegeldaja [Mikelsaar, 1987; üldistav monograafia peatükk Mikelsaar, Mändar, 1993]. Ligi 25 aastaga töötasin tervetel ja haigetel ning eksperimentaalsete katseloomade abil (hiirtel, rottidel, vasikatel, põrsastel) välja rea mikroobikoosluste kirjeldamise meetodeid, millest esialgselt venekeelsena planeeritud doktoritöös lõin oma süsteemi mikroobide ökoloogilise seisundi hindamiseks [Mikelsaar jt, 1990; Mikelsaar, doktoritöö 1992]. See terviklik metoodiline lähenemine seedekulgla mikroobidele on tänaseks edasi arendatud Reet ja Hugo Mändari poolt spetsiaalseks arvutitarkvaraks. Doktoritöö õnnestus kaitsta Tartu Ülikoolis 1993. aastal juba Eesti Vabariigis. Välisoponent professor S. G. Gorbach USAst märkis, et minu doktoritöö olevat üks paremaid ja terviklikumaid ülevaateid inimese seedekulglat asustavate mikroobikoosluste normist ja nihetest haiguste korral.

Sellel perioodil publitseerisin 26, sh 8 rahvusvahelist teadusartiklit. Esinesin sageli suuliste ettekannetega konverentsidel, peamiselt NSV Liidus. Õnneks toimusid alates 1970ndate aastate lõpust Saksa DVs regulaarsed mikrobiöko-

loogia konverentsid, kus kohtusime Lääne teadlastega. Kuigi mitmed kutsusid mind õppima ja töötama oma laborisse, ei saanud ma selleks luba. Soovile saada Ülemaailmse Meditsiiniliste Mikroobiökoloogide Seltsi SOMED liikmeks, vastati TÕS keeldumisega: “Mingi kahtlase postkasti numbriga asutus!” Muuseas, 2009. aastal valiti mind väga suure häälteenamusega nimetatud maailmaseltsi SOMED presidendiks. Minu teadusliku populaarsuse kasv väliskonverentsidel kutsus aga esile suure konflikti, kus käiku läksid laim ja valed. Sügavas šokis küsisin nõu Eesti Komiteest Enn Tartolt, kes ainsa võimalusena soovitas kiiret lahkumist senise juhtimise alt.

#### KLIIINILISE MIKROBIOLOOGIA PERIOOD

1990ndate aastate alguses sain Maarjamõisa haigla kliinilise mikrobioloogia labori juhatajaks, töötades edasi ÜMPI mikroobide ökoloogia labori nn kliinilises grupis. Mind toetasid ÜMPI direktor Laur Karu, Lastehaigla juhataja Irja Lutsar ja Maarjamõisa juht Urmo Kõöbi. Olen tänulik, et dr Helga Lenzner andis meie neljalisele grupile (mina, noored kolleegid Reet Mändar ja Epp Sepp ning laborant) kaasa mikrobioloogiliseks teadustööks vajaliku elementaarse varustuse. Kaasavaraks sain ka ühe eespool mainitud *L. plantarum* 8-RA-3 tüve ja oma tervete täiskasvanute ja vanade isikute, kaksikute ja põrsaste uuringutest kogutud unikaalsed laktobatsillid. Varsti juhtus aga Maarjamõisa laboris seletamatu külmkapi õnnetus: kui viibisin ühel seminaril, oli laborant vahepeal KÕIK viiele riulile kastidesse kogutud bakterikultuurid lihtsalt ära visanud. Kadusid võimalused võrrelda erinevatel perioodidel prevaaleerinud baktereid. Lahkuda tuli ka tal endal.

Õnneks avanesid riigipiirid ja tekkis võimalus töötada mitmetes Põhjamaade laboratooriumides, kus kujunesid huvitavad teaduskontaktid väljapaistvate teadlastega. Sellesse aega jäävad ka esimesed mikrofloora kvantitatiivsed uuringud tuntud GG bakteri (USA teadlased Goldin ja Gorbach) ehk *Lactobacillus rhamnosus* Gefilusega Valio OÜ tellimusel Tampere ülikooli laborites Soomes. Hindamatu oli professor Seppo Salminen Helsingi/Turu ülikoolist abi meie teadustulemuste analüüsimisel ja publitseerimisel. Koostööst ilmsel GG bakteri stabiliseeriv toime soole mikroobikooslustele, mitte ainult laktobatsillide hulga suurendamine [Sepp jt, 1993].

Seda lühikest, kuid intensiivset aega iseloomustab ka Maarjamõisa haigla mikrobioloogilise ja infektsiooniteenistuse põhjalik moderniseerimine ning samas väga meeldiv ühistunne kõigi haiglas tegutsevate meedikutega. Loodud süsteem sai märksa paindlikum, kolleegisõbralikum ja tõhusam kui varasem sanitaar-epidemioloogiliste jaamade stiil. Hiljem loengutes olen erinevate teemade illustreerimiseks üliõpilastele näiteid valinud just sellest ajast. Kolleegidega kaasautorluses kirjutatud kliinilise mikrobioloogia käsiraamat [Mikelsaar, Mändar, 1998] ning meditsiinilise mikrobioloogia õpikud I ja II [Mikelsaar, Karki, 1998, 2000] ning kordustrukid [Mikelsaar jt, 2006; Lutsar jt, 2007] on samuti võitnud sellest tööperioodist.



Maarjamõisa laborist valisid arstiteaduskonna ja ülikooli nõukogu mind 1993. aastal pärast doktoritöö kaitsmist TÜ meditsiinilise mikrobioloogia professoriks. Eesti Vabariigi aeg oli alanud ka meditsiinis, kuigi mitmed raskused püüsid. Eesti teadust väisanud evalveerimiskomisjon üritas meie uurimissuunda sulgeda, kuid välisprofessorite (Tore Midtvedt Karolinska ülikoolist ja Torkel Wadström Lundi ülikoolist) protesti tõttu Rootsisis jäi meie teema püsima. Paari aasta pärast autasustati just selle teema raames meid esimest korda EV teaduspreemiaga.

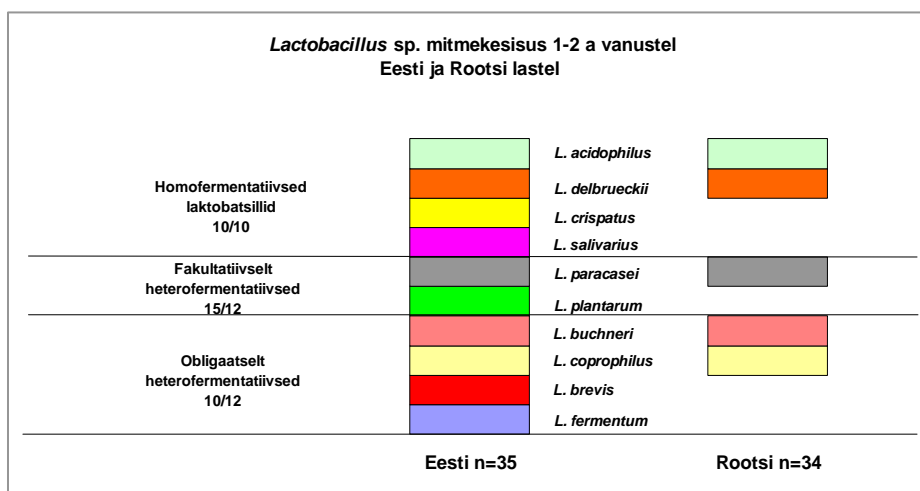
#### VASTSÜNDINU MIKROFLOORA KUJUNEMINE JA SEOS ALLERGIAGA

Selle faasi algust tähistab koostöö Tartu Ülikooli Lastekliiniku arstide Anne Ormissoni, Heili Varendi, Irja Lutsari, laborijuhataja Urmas Siiguri, mikrobioloogide Epp Sepa ja Reet Mändariga [Mändar, Mikelsaar, 1996]. Selgitasime Soome päritoluga toitesegude ja GG probiootikumi mõju enneaegsete ning vastsündinute seedetrakti mikrofloorale (1994. a meditsiini teaduspreemia). Siit arenes koostöö professor Bengt Björksténiga Linköping/Karolinska ülikoolidest, kes koos Lastehaigla arstide Kaja Julge ja Maire Vasaraga tõstatas huvitava küsimuse: kas Rootsi kõrgem hügieenitase võrreldes 1990ndate Eestiga on üheks võimalikuks allergia (valesti reageerimise) põhjuseks. Asusime uurima inimese enda mikroobide osatähtsust selles protsessis. Epp Sepp ja eelpool nimetatud klinitsistid kaitsesid sel teemaatil oma doktoritöid [Sepp jt, 1997; Björkstén jt, 1999]. Koostööst lääne partneritega paranesid ka rahalised võimalused kallite ja töömahukate mikrobiökoloogiliste uuringute jaoks.

TEADUSMÕTE. Pean seda faasi olulisimaks oma teaduslikus tegevuses, mis on ka kõige paremini maailmas tuntud ja tsiteeritud. Nende uuringute tulemustest olen kirjutanud põhjalikke ülevaateid monograafiate seerias LACTIC ACID BACTERIA [Mikelsaar jt, 1998, 2004], kus olen püüdnud välja tuua üldisi põhimõtteid seedetrakti normaalsete mikroobikoosluste kujunemisest. Need ei kujune juhuslikult, vaid omapärasel interaktsioonis vastsündinu geneetilisel määratud rakuretseptorite, ema ja ümbritseva keskkonna mikroobide vahel. Inimeste mikrofloora on väga spetsiifiline, selle saab laps sündides kaasa emalt, esimestel elutundidel lisanduvad mikroobid meid ümbritsevast keskkonnast. Kuigi igal olendil kujuneb oma isikupärane liigi ja tüvespetsiifiline (*species*, *strain*) mikroobikooslus, on see teatud kehapiirkondades (mikroobiperekondade *genus* mõistes) üldjoontes sarnane kõigile inimestele. Infektsioonide toime ja antibiootikumraviga kahjustub loomulik mikrofloora, kahjulikud bakterid või seened võivad võimust võtta. Õnneks taastuvad oma kooslused pärast ravikuuri, kuid aeglaselt. Probiootikute, inimese mikrofloorast pärinevate kasulike funktsionaalsete omadustega mikroobitüvede manustamine kiirendab seda protsessi, kuigi taastuvad ikka just omad mikroobid. Seega ei ole võimalik ka kasulikke baktereid sisaldavat toitu süües oma mikrofloorat täielikult ümber programmeerida – võõrad bakterid ei jää organismi pidama üle kahe nädala.

Mikroobid on need, kes valivad endale pesakoha. Nii näitasin, et ühemunaraku kaksikutel on seedetrakti mikrofloora praktiliselt ühesugune ja püsiv isegi siis, kui nad elavad pikka aega teineteisest lahus. Seevastu pikka aega koos elavatel abielupaaridel on mikrofloora ikkagi päris erinev. Kümmeaastat hiljem tõestas sedasama molekulaarsete meetoditega Hollandi teadlane E. Zoetendahl. Teiseks kirjeldasin, et inimesele optimaalse maosooltrakti mikroobikoosluste häirumise tunnusteks on seede- ja imendumishäired, mis peegelduvad kõhuvaevustes, kõhulahtisuses, väljaheite ebaloomulikus lõhnas ja värvis. Kolmandaks näitasin, et lapse mikroobikoosluste kujunemine algab väga varases sünnitusperioodis [Mändar jt, 2001]. Senini tõestamata on minu mõte, et kujunemine algab varemgi – ema bakterite translokatsioonist loote amnionivedelikku juba raseduse käigus.

Püstitasime hüpoteesi allergia (valesti reageerimise) tekkest tsiviliseeritud ühiskondades mikroobide hulga ja variatsiooni vähenemise (*microbial deprivation*) tõttu mikrofloora kujunemise ajal [Björkstén jt, 2001; Mikelsaar jt, 2001]. Industriaalse ühiskonna rootsi lapsed olid koloniseeritud poole väiksema arvu erinevate laktobatsillide liikidega kui eesti omad 1995. aastal (joonis 1). Varases eluperioodis on avatud immunoloogiline aken tolerantsuse tekkeks mitmete edaspidises elus inimesega kokkupuutuvate võõrühendite suhtes. Tolerantne inimene ei reageeri näiteks oma keharakkudele, toidu komponentidele ega õietolmule. Mikrofloora liigirikkus ja sellega kaasnev metaboolne aktiivsus on väga suur. Kui bakterite mitmekesisus on piiratud, jääb kujuneva immuunsüsteemi loomulik stimulatsioon ühekülgseks ja ebapiisavaks, mille tagajärjel tekivad hilisemad allergilised reaktsioonid geneetiliselt



Joonis 1. Eesti-Rootsi 1–2-aastaste laste seedekulgla laktobatsillide erinev liigirikkus 1995. aastal [Mikelsaar jt, 2002].

predisponeeritud isikuil. Meie toit, kui üks mikroobirikkuse allikas, on tugevasti muutunud 1990ndatest aastatest alates (üle Euroopa ühesugused komertsiaalsed juuretisbakterid hapendatud toodetes, konserveerivad ained jne). Kahjuks näitab ka allergia Eestis sagenemist. Kuidas see kõik täpselt toimub, ootab tõenäoliselt teadlaste järgmiste põlvkondade uusi lähenemisi.

Lisaks neile eelpool toodud suurema mahu ja ulatusega valdkondadele olen koos kolleegidega pühendanud arvukaid uurimusi Eestis levivate oluliste kliiniliste infektsioonide eripära selgitamisele. Eesti kliiniline mikrobioloogia vajab 1990ndatel hädasti edasiarendamist. Näitasime molekulaarse diagnostikaga, mida doktorant Annika Krüüner õppis Karolinska instituudis Sven Hoffneri juures, et antimikroobse ravi foonil ei muutu inimesel haigust põhjustav antibiootikumitundlik *Mycobacterium tuberculosis*' e tüvi mitte ise multiresistentseks, vaid toimub superinfektsioon maailmas ja ka Eestisse jõudnud multiresistentse Beijing tüvega [Krüüner jt, 2002]. Päästisime Eesti arstid WHO poolsest ebapiisava ravi süüdistusest ning rakendus uus multiresistentse tuberkuloosiga ravil olevate patsientide isoleerimistaktika. Neile ehitati Kose iso-



Foto 2.

Akadeemiline järglaskond 2008. Foto: Peeter Laurits.

Esireas (vasakult): Priit Kasenõmm, Helena Andreson, Krista Lõivukene, Reet Mändar, Pirje Hütt, Epp Songisepp, Tõnis Karki. Tagareas (vasakult): Kai Truusalu, Epp Sepp, Jelena Štšepetova, Imbi Smidt, Siiri Kõljalg. Puuduvad Annika Krüüner (Sambia), Heidi Annuk-Hynes (Iirimaa), Paul Naaber (Norra).

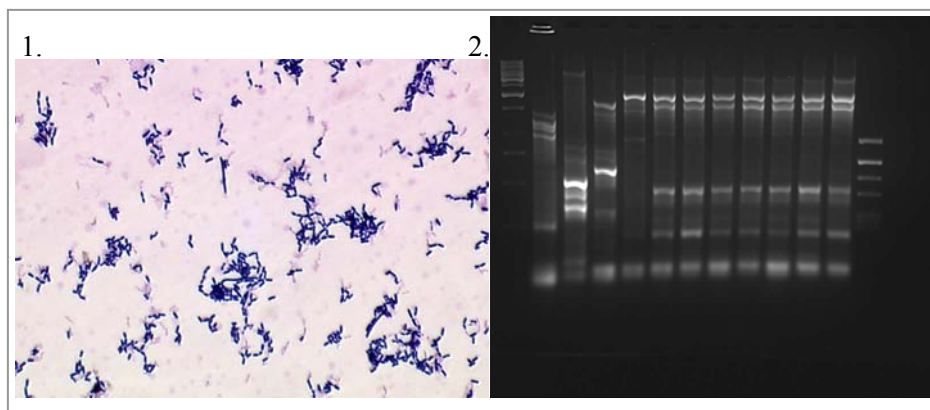
latsioonihaiгла. Antibiootikumraviga seotud raskekujulise *Clostridium difficile* pseudomembranoosse koliidi (suremus kuni 40%) puhul pakkusime võimaluse mikroobiökoloogia mõjutamiseks laktobatsillide abil [Naaber, Mikelsaar, 2004]. Väärrib märkimist, et praegu töötame samal teemal 7.RMP projektis koos mitmete erinevate maade ülikoolidega, kus üritame nn topelt kaitset, transformeerides antagonistlikult aktiivseid laktobatsille nimetatud mikroobi vastaste antikehade kandjateks [Marcotte jt, 2006]. Kindlasti väärivad märkimist uuringud eesti elanikel haavandtõbe ja selle komplikatsioone esilekutsuvas *Helicobacter pylori*'st professor Heidi-Ingrid Maarooši ja professor Ants Peetsalu grupi toel [Lõivukene jt, 2000; Sillakivi jt, 2001; Andreson jt, 2002]. Leidsime, et Eestis elavatel etnilistel eestlastel põhjustavad peptilist haavandit venelastest erineva geenimustriga *H. pylori* tüved, kusjuures eesti tüved sarnanevad rohkem Aasia omadele, vene omad aga Euroopa vastavatele tüvedele. Kas eestlased jõudsid siia ikkagi ida kaudu? Kas eestlastele ja venelastele oleks vaja erinevaid vaktsiine? Kõik need avastused eeldasid traditsiooniliste paradigmade murdmist, mis vist ongi teaduse ja doktoritööde tegemise peamiseks ülesandeks.

Tegin koostööd ka entusiastist professor Mart Kulliga kõrva-nina-kurguhaigustes, kus doktorant Priit Kasenõmme töövõime ja põhjalikkus selgitasid tonsillektoomia mikrobioloogilised ja immunoloogilised tõendus põhised näidustused [Kasenõmm jt, 2005]. Mitmed teisedki tublid noored uurijad pälvisid doktorikraadi ja leitud "kivikesed" sobitusid arstiteaduse mosaiiki, nagu intensiivravi haigetel oportunistlike bakterite *Acinetobacter baumannii* kolonisatsiooni ja antibiootikumresistentsust molekulaarbioloogiliste vahenditega koos professor Mart Ustaviga uurinud Siiri Kõljala töö [Kõljalg jt, 1999]. Tuleb märkida, et meditsiinilises mikrobioloogias tõi just molekulaarbioloogiliste meetodite kasutuselevõtt kaasa suure hüppe teadmistes. Täna sel päeval võime oma instituudi ja Biomeedikumi metoodilist potentsiaali pidada üsna täiuslikuks, mis võimaldab läbi viia erinevaid rahvusvahelisi uurimisprojekte. Molekulaarsete uuringute spetsialistina töötab meil nüüd magistrakraadiga keemik Jelena Štšepetova, kelle doktoritöö valmib lähiajal [Štšepetova jt, 2007]. Erinevate maade teadlastega koos oleme osalenud nii 5., 6. kui 7. Euroopa Liidu raamprogrammis. Meie uued andmed mikroobide persisterimise seostest antibiootikum sensitivsusega ja ravi stimuleerimisest probiootikutega [Karki jt, 2001; Hütt jt, 2006; Truusalu jt, 2008] ootavad veel dissertatsiooniks vormistamist. Palju senileitust ootab aga veel muud – juurutamist igapäevases meditsiinis.

Sellel perioodil olen publitseerinud üle sajakonna CC artikli, mille seast 60 artikli rahvusvaheline tuntus on kõrge (tsiteeritavus 1318; ISI *Web of Science*, november, 2009). Korduvalt esinesin kutsutud lektorina konverentsidel ja juhatasin maailma kongressi sektsioone, kaastoimetan teadusajakirja *BMC* seeriaid ja retsenseerin erialaseid artikleid mitmete teadusajakirjade jaoks. 2002. aastal pälvisin teistkordselt EV meditsiini teaduspreemia.

#### INIMESE MIKROOBIDE MÕJU PEREMEHE AINEVAHETUSELE

Seda uut ja äärmiselt huvitavat valdkonda oleme arendanud koostöös meditsiinilise biokeemia professori Mihkel Zilmeriga. Konkreetsemalt on huvi pakkunud mikroobide ja nende koosluste mõju inimorganismi ainevahetuse antioksidatiivsetele aspektidele ja laktobatsillide metaboolsele potentsiaalile [Mikelsaar, Zilmer, 2009]. TÜ Mikrobioloogia ja Biokeemia instituutide koostöös avastatud bakter (joonis 2) *Lactobacillus fermentum* ME-3 (DSM14241) väldib peale suukaudset manustamist inimese vereseerumis tekkida võivat oksidatiivset stressi.



Joonis 2.

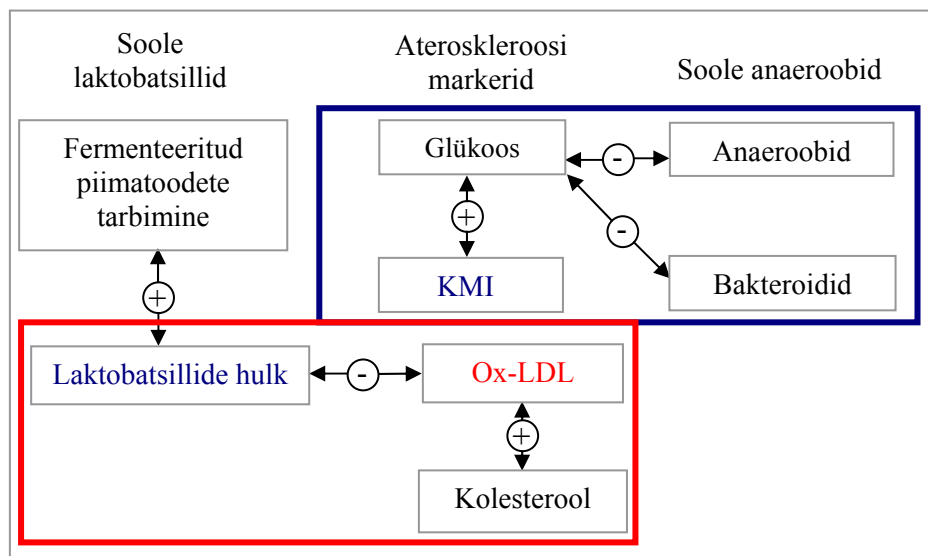
*Lactobacillus fermentum* ME-3 sisemine ilu. Foto: P. Hütt ja E. Songisepp.

1. Valgusmikroskoopia, värvitud Grami järgi, suurendus x 1000.

2. ME-3 molekulaarsed sõrmejäljed (AP-PCR, read 6-12).

Hiljuti õnnestus meil näidata [Mikelsaar jt, 2010], et eakate inimestel on võimalik langetada ateroskleroosi riski juhul, kui nad tarvitavad regulaarselt probiootilisi fermenteeritud piimatooteid (jogurteid, keefiri, juustusid). Nimelt suureneb sel juhul vastavalt I. Metsnikovi 1907. a ideele tõesti üldine laktobatsillide hulk soolkanalis, selle hulga tõus aga on negatiivses korrelatsioonis ateroogeensuse ühe olulisema markeri – oksüdeeritud madala tihedusega lipiidide (LDL) sisaldusega vereseerumis (joonis 3).

Inimese mikroobide uurimisel on palju olnud juhuse ja õnne päralt. Juhuseks peab aga vaim valmis olema! Näiteks *Lactobacillus fermentum* ME-3 bakteri avastasime 1995. aastal juhuslikult ühe väikese tüdruku soolestikust Eesti-Rootsi allergiauuringute käigus [Mikelsaar jt, 2001]. *L. fermentum* kui suure metaboolse potentsiaaliga liiki kirjeldas esmakordselt eelmise sajandi alguses Beijerinck 1901. Selle liigi ühe mikroobitüve kaksiktoimet – antimikroobne (entero- ja uropatogeenide vastane) ja antioksidatiivne mõju, oleme tõestanud paljudes artiklites *in vitro*, eksperimentaalsetel katseloomadel ja vabatahtlikel tehtud uuringute põhjal [Kullisaar jt, 2002, 2003]. Doktorandid Heidi Annuk ja



Joonis 3.

Soole laktobatsillide ja anaeroobide seos eakate inimeste ainevahetuse ja ateroskleroosi markeritega [Mikelsaar jt, 2010].

⊕ ⊖ – positiivne/negatiivne korrelatsioon Spearmani järgi, KMI – kehamassiindeks kg/cm<sup>2</sup>.

Epp Songisepp kaitsesid ME-3 funktsionaalsetest omadustest oma doktoritööd [Annuk jt, 2003; Songisepp jt, 2004, 2005]. Uurimistöös on osalenud kokku ligi 30 teadlast (vt TA 2002 lk 58–59). Selliste omadustega *Lactobacillus fermentum* liiki kuuluv mikroobitüvi ME-3 on esimene mikroobne looduslik antioksidant [Eesti patent, 2006; Venemaa patent, 2006; USA patent, 2007]. Vereseerumis langetab ME-3 tarvitamine ox-LDL taset, suurendab LDL partikli oksüresistentsust, vähendab dieenkonjugaatide sisaldust LDL molekulis, suurendab redutseeritud glutatiooni sisaldust ja totaalset antioksidatiivset aktiivsust seerumi nii lipiidides kui vesifraktsioonis.

Antioksidante kui inimese ainevahetust reguleerivad aineid tuntakse viimasel kümnel aastal oluliste haiguste patogeneesi reguleerivate faktoritena, mis osalevad ateroskleroosi kujunemises, südame-veresoonkonna haiguste, aju veresoonkonna häirete, allergia tekkemehhanismis jne. Idee laktobatsillidel antioksidantsust uurida pärines Hollandist, kus MONA firma saatis meile testimiseks *Lactobacillus acidophilus* tüvesid. Kuna TÜ biokeemikud olid publitseerinud Eesti Arstis oma huvitavaid uurimusi antioksidantsusest (ka eestikeelsed, kolleegide informeerivad artiklid on olulised), palusin neid koostööle. Hollandi firma kollektsioonist märkimisväärseid tüvesid ei leitud, küll aga leidsime endi omast. Pikk ligi 12-aastane tee tuli läbi käia leitud bakteritüve pro-

biootikuks tunnistamisel (omaduste funktsionaalsus, ohutus, efektiivsus), mis toimusid Eesti Tehnoloogia Agentuuri granti tõhusal toel. AS TERE on tooteid igati meelepäraseks disaininud, meie rahvas neid hästi vastu võtnud. Uusi ja huvitavaid toimeid leiame bakteril aga pidevalt juurde [Hütt jt, 2009]. Praegu on trükki suunatud kaks uudset toimeaspekti valgustavat käsikirja (Truusalu jt ning Kullisaar jt, ilmumisel).

Viimane funktsionaalne toit, mis meie uurimistöö tulemusel poelettidele jõudis, on probiootilist *Lactobacillus plantarum* Tensia tüve [Songisepp jt, patenditaotlus 2009] sisaldav Südamejuust™, mis reguleerib vererõhku ja parandab sellega südame-veresoonkonna tööd. Peab tunnistama, et ka selle avastuseni jõudsimel puhtalt juhuse tõttu. Teadsime, et Tensia on nn tugev võitleja mitmete haigustekitajatega. Seetõttu soovisime teda kasutada pehmetes juustudes listerioositekitajate hävitamiseks. Listerioos on infektsioon, mis ohustab eelkõige rasedaid, vastsündinuid, vanureid ja nõrga immuunsüsteemiga inimesi, avaldades kõrge palaviku ja peavalu, iivelduse ja kõhulahtisusena, äärmisel juhul sepsisena. Katseklaasi eksperimendid olid väga edukad, probiootilise bakteri esimesed loomkatsed ja katsetus 12 vabatahtlikuga kinnitasid Tensia ohutust toitu lisamiseks. Kui aga nakatasime hiiri listeeriaga ning proovisime seda uue mikroobitüve ja tema abil valmistatud juustuga alla suruda, luhtus katse täielikult ja kõik hiired surid. Samaaegselt toimunud ohutuskatses tervete vabatahtlikega leidsime, et Tensia juustu tarvitatud vabatahtlikel vähenes vererõhk. Püstitasime erinevaid hüpoteese, milliseid vererõhule mõjuvaid aineid võiks see laktobatsill toota. Biokeemikud, eesotsas Kalle Kilkiga leidsid täiesti ootamatult, et TENSIA tekitab lämmastikmonooksiidi (NO). Selle gaasilise ühendi lühiaegne toime aitab kaasa veresoonte silelihaste lõõgastamisele. Samuti toodab bakter olulist regulaatorit putrestsiini. Tarvitades Südamejuustu kolme nädala jooksul vähemalt 50 g päevas, soodustab see vererõhku langetades südamegevust. Esimestest katsetustest valmis juustuni läks ME-3-ga võrreldes oluliselt vähem aega – ainult 4 aastat. Tänapäevaks oleme selle OÜ E-Piimas juurutatud probiootilise juustu toimet vererõhule kinnitanud nii noortel kui vanadel, haarates kliinilisse katsetusse koos TÜK endoteeli kabineti arstide ja Tervislike Piimatoodete Biotehnoloogia TAK töötajatega ligi paarsada vabatahtlikku isikut (tulemused publitseerimisel).

Maailmas toimub suur võidujooks tervist parandava toimega mikroobide leidmiseks. Paraku ei ole ka tõeliselt kasuliku bakteri mõnda toiduainesse lisamine ja selle turule toomine vähemalt Eestis lihtne, kuigi on olemas innovatsiooni ja leiutamist soodustavad riiklikud programmid. Küsimus on ikkagi riskivalmiste, uuendusmeelsete ettevõtete vähesuses ja vaba kapitali puudumises. Olen õnnelik, et iga teadlase unistus – midagi anda rahvale – on mul Tartu Ülikoolis võimalik olnud. Õnnelik olen ka naisena, et oleme abikaasaga tänapäevaks saanud 3+10 armast järglast.

Vaidleksin vastu pikaajalise tulemusliku teadus- ja elutöö preemia laureaadile Erast Parmastole (TA kogumik, 2002). Tsitaat: “Mida keegi oma elus tunnus-

tust pälvivat ära teeb, see sõltub pisut geenidest, tublisti juhusest, kõvasti töökusest, eelkõige aga teda ümbritsevatest inimestest.”

Paljude teadlaste jälgimisel olen mõistnud, et tehtu tulemuslikkus sõltub siiski geenidest, mis määravad inimliku TARKUSE: mälu, õppimis-, analüüsi- ja sünteesivõime; AVATUD MEELTEST: uudishimu, tahe otsida ja oskus kahelda; ENERGIAST : tervise, töö- ja võitlusvõime; EMPAATIAST: noorte inimkoosluste moodustamine. Juhus määras mul korduvalt küll konkreetse teejupi, õpetajad ja koostöökaaslased, aga geenid määrasid selle, et juhuste avastuslikule teele astusin. Suur tänu minu elu- ja töötee kaaslastele, keda püüdsin oma ülevaates tunnustada.

#### KIRJANDUS:

Andreson, H., Lõivukene, K., Sillakivi, T., Maaros, H.-I., Ustav, M., Peetsalu, A., Mikelsaar, M. (2002). Association of *cagA* and *vacA* genotypes of *Helicobacter pylori* with gastric diseases in Estonia. *J. Clin. Microbiol.*, 40, 298-300.

Annuk, H., Shchepetova, J., Kullisaar, T., Songisepp, E., Zilmer, M., Mikelsaar, M. (2003). Characterization of intestinal lactobacilli as putative probiotic candidates. *J. Appl. Microbiol.*, 94, 403-412.

Björkstén, B., Naaber, P., Sepp, E., Mikelsaar, M. (1999). The intestinal microflora in allergic Estonian and Swedish 2-year-old children. *Clin. Exp. Allergy*, 29, 342-346.

Björkstén, B., Sepp, E., Julge, K., Voor, T., Mikelsaar, M. (2001). Allergy development and the intestinal microflora during the first year of life. *J. Allergy Clin. Immunol.*, 108, 516-520.

Eesti patent, 2006 = Mikroorganismi tüvi *L.fermentum* ME-3 kui uudne antimikroobne ja antioksidantne probiootikum; Autorid: M. Mikelsaar, M. Zilmer, T. Kullisaar, H. Annuk, E. Songisepp; 15. veebruar 2006. Eesti patent EE 04580

Hütt, P., Andreson, H., Kullisaar, T., Vihalemm, T., Unt, E., Kals, J., Kampus, P., Zilmer, M., Mikelsaar, M. (2009). Effects of a synbiotic product on blood antioxidative activity in subjects colonized with *Helicobacter pylori*. *Lett. Appl. Microbiol.*, 48, 6, 797-800.

Hütt, P., Shchepetova, J., Lõivukene, K., Kullisaar, T., Mikelsaar, M. (2006). Antagonistic activity of probiotic lactobacilli and bifidobacteria against enteric and uropathogens. *J. Appl. Microbiol.*, 100, 1324-1332.

Karki, T., Trusalu, K., Vainumäe, I., Mikelsaar, M. (2001). Antibiotic susceptibility patterns of community- and hospital-acquired *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* in Estonia. *Scand. J. Infect. Dis.*, 33, 333-338.



- Kasennomm, P., Piirsoo, A., Kull, M., Kull, M., Mikelsaar, M. (2005). Selection of indicators for tonsillectomy in adults with recurrent tonsillitis. *BMC Ear Nose Throat Disord.*, 5, 1-8.
- Krüüner, A., Pehme, L., Ghebremichael, S., Koivula, T., Hoffner, S. E., Mikelsaar, M. (2002). Use of molecular techniques to distinguish between treatment failure and exogenous reinfection with *Mycobacterium tuberculosis*. *Clin. Infect. Dis.*, 35, 146-155.
- Kullisaar, T., Songisepp, E., Mikelsaar, M., Zilmer, K., Vihalemm, T., Zilmer, M. (2003). Antioxidative probiotic fermented goats' milk decreases oxidative stress-mediated atherogenicity in human subjects. *Br. J. Nutr.*, 90, 449-456.
- Kullisaar, T., Zilmer, M., Mikelsaar, M., Vihalemm, T., Annuk, H., Kairane, C., Kilk, A. (2002). Two antioxidative lactobacilli strains as promising probiotics. *Int. J. Food Microbiol.*, 72, 215-224.
- Kõljalg, S., Sults, I., Raukas, E., Truu, J., Ustav, M., Mikelsaar, M. (1999). Distribution of *Acinetobacter baumannii* in a neurointensive care unit. *Scand. J. Infect. Dis.*, 31, 145-150.
- Lenzner jt, 1973 = Ленцнер А. А., Шилов В. М., Лизько Н. Н., Микельсаар М. Э. Исследование видового состава лактобацилл кишечника в условиях длительного пребывания человека в замкнутом пространстве. *Космическая биология и медицина*, 3, 76-80.
- Lenzner jt, 1984 = Lencner, A. A, Lencner, Ch. P, Mikelsaar, M. E., Tjuri, M. E., Toom, M. A., Väljaots, M. E., Silov, V. M., Lizko, N. N., Legenkov, V. I., Reznikov, I. M. Die quantitative Zusammensetzung der Lactoflora des Verdauungstrakts vor und nach kosmischen Flügen unterschiedlicher Dauer. *Die Nahrung*, 6-7, 607-613.
- Lutsar, I., Mikelsaar, M., Karki, T. (2007). *Meditiiniline mikrobioloogia. Bakterioloogia ja mükoloogia, II osa. Teine, täiend. tr. TÜ Kirjastus, Tartu.*
- Lõivukene, K., Kolk, H., Maaros, H.-I., Kasennõmm, P., Aro, H., Ustav, M., Mikelsaar, M. (2000). Metronidazole and clarithromycin susceptibility and the subtypes of vacA of *Helicobacter pylori* isolates in Estonia. *Scand. J. Infect. Dis.*, 32, 59-62.
- Marcotte, H., Köll-Klais, P., Hultberg, A., Zhao, Y., Gmür, R., Mändar, R., Mikelsaar, M., Hammarström, L. (2006). Expression of singlechain antibody against RgpA protease of *Porphyromonas gingivalis* in *Lactobacillus*. *J. Applied Microbiol.*, 100, 256-263.
- Mikelsaar, M. (1969). Lactobacilli in the fecal microflora by some non-infectious diseases of GI tract. PhD dissertation, Tartu. (in Russian).
- Mikelsaar, M. (1992). Evaluation of the gastrointestinal microbial ecosystem in health and disease. *Dissertationes Medicinae Universitatis Tartuensis*. Tartu.

- Mikelsaar jt, 1972 = Микельсаар М. Э., Ленцнер А. А., Голянова Л. А. Методика определения количественного состава микрофлоры кала. Лабор. дело, I, 41-45.
- Mikelsaar jt, 1990 = Микельсаар М. Э., Сийгур У. Х., Ленцнер А. А. Оценка количественного состава микрофлоры фекалий. Лабор. дело, 3, 62-66.
- Mikelsaar, M., Annuk, H., Stsepetova, J., Mändar, R., Sepp, E., Björkstén, B. (2002). Intestinal lactobacilli of Estonian and Swedish children. *Micr. Ecol. Health Dis.*, 14, 75-80.
- Mikelsaar, M., Karki, T. (1998). *Meditiiniline mikrobioloogia I osa*. TÜ Kirjastus, Tartu.
- Mikelsaar, M., Karki, T. (2000). *Meditiiniline mikrobioloogia II osa*. TÜ Kirjastus, Tartu.
- Mikelsaar, M., Karki, T., Lutsar, I., Mändar, R. (2006). *Meditiiniline mikrobioloogia I osa*. Teine, täiend. tr. TÜ Kirjastus, Tartu.
- Mikelsaar, M., Kullisaar, T., Zilmer, M. (2001). Antagonistic and antioxidative activity of lactobacilli and survival in oxidative milieu. *Am. J. Clin. Nutr.*, 73, 2, 495S-495S.
- Mikelsaar, M., Mändar, R. (1993). Development of individual lactic acid microflora in the human microbial ecosystem. Salminen, S., von Wright, A. (Eds.). *Lactic Acid Bacteria. Food Science & Technology*, Vol. 58. Marcel Dekker Ltd, New York, 237-293.
- Mikelsaar, M., Mändar, R. (toim). (1998). *Kliinilise mikrobioloogia käsiraamat*. Medicina, Tallinn.
- Mikelsaar, M., Mändar, R., Sepp, E. (1998). Lactic acid microflora in the human microbial ecosystem and its development. Salminen, S., von Wright, A. (Eds.). *Lactic Acid Bacteria. Food Science and Technology*, Vol. 63. Marcel Dekker Ltd, New York, 279-342.
- Mikelsaar, M., Mändar, R., Sepp, E., Annuk, H. (2004). Human lactic acid microflora and its role in the welfare of the host. Salminen, S., von Wright, A. (Eds.). *Lactic Acid Bacteria. Ouwehand*. Marcel Dekker Ltd, New York, 453-506.
- Mikelsaar, M., Türi, M., Lencner, H., Kolts, K., Kirch, R., Lencner, A. (1987). Interrelations between mucosal and luminal microflora of gastrointestinal tract. *Die Nahrung*, 31, 5-6, 449-456.
- Mikelsaar, M. E., Väljaots, M. E., Lenzner, A. A. (1984). Anaerobe Inhalts- und Wandmikroflora des Magen-Darm-Kanals. *Die Nahrung*, 23, 6/7, 727-733.
- Mikelsaar, M., Stsepetova, J., Hütt, P., Kolk, H., Sepp, E., Lõivukene, K., Zilmer, K., Zilmer, M. (2010). *Lactobacillus* sp. is associated with some cellular and metabolic characteristics of blood in elderly people.

Anaerobe, doi.10.1016/j.anaerobe.2010.03.001 (in press).

Mikelsaar, M., Zilmer, M. (2009). *Lactobacillus fermentum* ME-3 - an antimicrobial and antioxidative probiotic. *Microb. Ecol. Health Dis.*, 1, 1-27.

Mändar, R., Lõivukene, K., Ehrenberg, A., Smidt, I., Raukas E., Kask, V., Mikelsaar, M. (2001). Amniotic fluid microflora in asymptomatic women at midgestation. *Scand. J. Infect. Dis.*, 33, 60-62.

Mändar, R., Mikelsaar, M. (1996). Transmission of mother's microflora to the newborn at birth. *Biol. Neonate*, 69, 30-35.

Naaber, P., Mikelsaar, M. (2004). Interactions between lactobacilli and antibiotic-associated diarrhea. *Adv. Appl. Microbiol.*, 54, 231-260.

Sepp, E., Julge, K., Vasar, M., Naaber, P., Björkstén, B., Mikelsaar, M. (1997). Intestinal microflora of Estonian and Swedish infants. *Acta Paediatrica*, 86, 956-961.

Sepp, E., Mikelsaar, M., Salminen, S. (1993). Impact of *Lactobacillus casei* strain GG administration on the faecal microflora of newborns. *Microb. Ecol. Health Dis.*, 6, 309-314.

Sillakivi, T., Aro, H., Ustav, M., Peetsalu, M., Peetsalu, A., Mikelsaar, M. (2001). Diversity of *Helicobacter pylori* genotypes among Estonian and Russian patients with perforated peptic ulcer, living in South Estonia. *FEMS Microbiol. Lett.*, 195, 29-33.

Songisepp jt, patenditaotlus 2009 = Isolated microorganism strain *Lactobacillus plantarum* Tensia DSM 21380 as antimicrobial and antihypertensive probiotic, food product and composition comprising said microorganism and use of said microorganism for preparation of antihypertensive medicine and method for suppressing pathogens and nonstarter lactobacilli in food product; Autorid: E. Songisepp, M. Mikelsaar, M. Rätsep, M. Zilmer, P. Hütt, M. Utt, K. Zilmer, J. Üksti, S. Kõljalg; 12.05. 2009 International patent application PCT/EE2009/000005, WO2009138091.

([http://ep.espacenet.com/numberSearch?locale=en\\_EP](http://ep.espacenet.com/numberSearch?locale=en_EP))

Songisepp, E., Kals, J., Kullisaar, T., Mändar, R., Hütt, P., Zilmer, M., Mikelsaar, M. (2005). Evaluation of the functional efficacy of an antioxidative probiotic in healthy volunteers. *Nutr. J.*, 4, 22, 141-146.

Songisepp, E., Kullisaar, T., Hütt, P., Elias, P., Brilene, T., Zilmer, M., Mikelsaar, M. (2004). A new probiotic cheese with antioxidative and antimicrobial activity. *J. Dairy Sci.*, 87, 2017-2023.

Stsepetova, J., Sepp, E., Julge, K., Vaughan, E., Mikelsaar, M., de Vos, W. M. (2007). Molecularly assessed shifts of *Bifidobacterium* spp. and less diverse microbial communities are characteristic of 5-year-old allergic children. *FEMS Immunol. Med. Microbiol.*, 51, 260-269.

Truusalu, K., Mikelsaar, R. H., Naaber, P., Karki, T., Kullisaar, T., Zilmer, M., Mikelsaar, M. (2008). Eradication of *Salmonella* Typhimurium infection in a murine model of typhoid fever with the combination of probiotic *Lactobacillus fermentum* ME-3 and ofloxacin. BMC Microbiol., 8, 132-137.

USA patent, 2007 = Strain of microorganism *Lactobacillus fermentum* ME-3 as novel antimicrobial and antioxidative probiotic; Autorid: M. Mikelsaar, M. Zilmer, T. Kullisaar, H. Annuk, E. Songisepp; 17. juuli 2007. USA patent nr US7244424.

Vene patent, 2006 = Пробиотик; Autorid: M. Mikelsaar, M. Zilmer, T. Kullisaar, H. Annuk, E. Songisepp; 27. september 2006. Vene Föderatsiooni patent nr RU 2284354.

*Teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest*



*Arvo Ots*

Sündinud 26.06.1931 Pärnus

1950 Tallinna Reaalkool  
1955 Tallinna Tehnikaülikool, soojusenergeetika insener  
1958 tehnikakandidaat, Tallinna Tehnikaülikool  
1962 dotsendi kutse  
1968 tehnikadoktor, Eesti Teaduste Akadeemia  
1969 professori kutse  
1983 Eesti Teaduste Akadeemia liige

1955-1958 Eesti Teaduste Akadeemia Energeetika Instituudi aspirant, nooremteadur; alates 1960. aastast Tallinna Tehnikaülikooli dotsent, vanemteadur, soojusenergeetika kateedri juhataja ning soojustehnika instituudi direktor, professor, alates 2003 erakorraline vanemteadur, emeriitprofessor

1970 Eesti NSV teaduspreemia  
1980 Eesti NSV teaduspreemia  
1981 Eesti NSV teeneline teadlane  
1996 Soome Tehnikateaduste Akadeemia välisliige  
2001 Eesti Teaduste Akadeemia medal  
2002 Eesti Vabariigi Valgetähe IV klassi teenetemärk  
2003 Tallinna Tehnikaülikooli teenetemedal "Mente et Manu"  
2005 Eesti Inseneride Liidu aunimetus "Aasta insener 2005"  
2005 USA Mehaanikainseneride Assotsiatsiooni (ASME) liige

Juhendanud 3 doktori- ja 18 kandidaadiväitekirja ning 2 PhD väitekirja

Avaldanud 4 õpikut ülikoolidele (neist 2 koos kaasautoritega), 5 teadusmonograafiat (neist üks koos kaasautoritega), osalenud kahe käsiraamatu koostamisel. Avaldanud üle 350 teaduspublikatsiooni, omab 18 autoritunnistust leiutistele

## NOORUSAEG JA ÕPINGUAASTAD

Olen üles kasvanud kooliõpetaja kolmelapselises peres Viljandimaal Oiu külas, kus minu isa oli algkooli juhataja. Kool oli ümbritsetud taludest. Ka kooli juurde kuulus põllu- ja heinamaa ning kõik vajalik põlluharimiseks ja loomapidamiseks.

Minu isa August Ots oli pärit Suure-Jaani lähedalt taluniku perekonnast, tal oli õpetaja kutse (lõpetas Tallinn Õpetajate Seminari), jäi kadunuks Teises maailmasõjas. Ema Eugenie Ots (neiuna Pöder) oli pärit Võrumaalt sepa perekonnast. Enne sõda oli kodune, hiljem töötas lasteaias kasvatajana. Suri 1968.a.

Olen vanim laps. Mul on õde Viivu ja vend Agu. Õde on elukutselt õpetaja, vennal on inseneriharidus ja ta on tehnikakandidaat.

Minu abikaasa Uinu (sünd Saar) on elukutselt teraviljatehnoloog. Meie peres on kaks last. Tütar Reet on hariduselt raamatupidaja. Tal on kolm last – Sven, Signe ja Marika. Svenil on poeg Kevin ja tütar Lisette. Signel on tütred Anett-Marii ja Marleen. Poeg Märt on soojusenergeetika insener. Tal on tütred Birgitta ja Elisabet.

Minu koolitee saigi alguse Oiu algkoolist ning jätkus Viljandi III ja Viljandi II Keskkoolis. Keskkooli sain Tallinna II Keskkoolis ehk praeguses Reaalkoolis.

Pärast keskkooli omandamist, paremal juhul teatud aeg enne seda tekib paratamatu küsimus: missugust eriala omandada? Minul selles osas mingeid erialadevahelisi “kõikumisi” ei olnud. Minu eesmärk on olnud saada inseneriks või kui võimed selleni ei ulatu, siis omandada vähemalt tehnika ja masinatega seotud eriala. Sellise veendumuse on mulle andnud minu emapoolne vanaisa - Lõuna-Eesti üks tuntumaid seppi ja mehaaniku, kelle seppapajas olid abiks seitse selli, ja ka minu enda ülisuur huvi masinate vastu. Selle huvi rahuldamiseks olid maal ülihead võimalused. Igas talus peksti vilja, milleks toodi kohale viljapeksumasin ja selleks tööks vajalik jõumasin. Juhtus nii, et eri taludes oli rehepeksumasin rihmülekanega ühendatud kas lokomotiivi, selleks kohandatud sisepelemismootori või traktoriga.

Eriti meeldisid mulle jõumasinad oma keerukate liikuvate mehhanismidega, kuid mitte vähem tähtis ei olnud ka mootorite erikõlaline müra. Samuti sai võimalikult üksikasjadeni järele uuritud see, mis on rehepeksumasina sees. Tehnika huvi suurendasid ka koos isaga veskil käimised. Veskid töötasid diiselmootoritel või tuule jõul. Samuti olin isaga tihti kaasas, kui teda oli kutsutud mõne naabri juurde raadiot korrastama või patareisid vahetama. Mäletan patareidel töötavat elektrimootorit, mille isa mulle tegi, ja telefone, millega sai sidet pidada ühest toast teise. Tihti võttis naabertalumeses ka mind traktoriga põldu kündma või äestama. Samuti mäletan oma vanemate jutustusi inseneridest kui TTÜs õppinud tarkadest tehnikat valdavatest isiksustest. (Siit alates TTÜ märgib nii Tallinna Polütehnilist Instituuti kui ka Tallinna Tehnikaülikooli).

Selles ei olnud kahtlust, et pärast keskkooli lõpetamist astun edasi õppima TTÜ mehaanikateaduskonda. Valik oli peamiselt masinaehitusliku ja soojus- tehnilise eriala vahel. Valiku tegemiseks lugesin erialade kohta avaldatud materjale. Suureks abiks oli TTÜ-d tutvustav kogumik. Lõpliku otsuse kitsamate erialade vahel määras siiski minu suur huvi jõuseadmete vastu. Sooritanud eksamid, võeti mind TTÜ mehaanikateaduskonna üliõpilaseks ja määrati stipendium. Viimane oli mulle eriti tähtis, kuna meie perekonna sissetulek ei oleks mul lubanud ilma välise abita toime tulla.

Arvan, et minu teadlaseks kujunemisel on olnud oluline tähtsus mitte ainult kõrgharidus kui selline, vaid ka ülikooli õppejõud, kes kujundasid minust inseneri. Seetõttu tahan meenutada mälestuskilde oma õpingutest ja õppejõududest, kes ise valdasid oma eriala ülihästi ja olid üliõpilaste suhtes siiski ka parajalt nõudlikud.

Tol ajal ei olnud pidulikke õppetöö alguse aktuseid. Meie teaduskonna üliõpilased kutsuti mõni päev pärast õppetöö algust füüsika auditooriumi, kus dekaan Eugen Soonvald rääkis õppetöö korraldusest.

Kõrgema matemaatika ja teoreetilise mehaanika õppejõud olid Arnold Humal, Ants Särev ja Boriss Tiikma. Olgu märgitud, et minu õpingute ajal tehti kõik arvutused arvutuslükatit kasutades ja see oli inseneri üks olulisematest kaaslastest, mida tuli kogu aeg kaasas kanda. Tunti normaalmõõtu ja lühikest arvutuslükatit. Lühike arvutuslükati oli tavaliselt igal inseneril ja ka tehnikaala üliõpilasel taskus. Ka esimesed matemaatika tunnid olid pühendatud arvutuslükati ehitusele ja kasutusvõtete selgitamisele. Küllaltki oluline oli leida õige komaakoht. Arnold Humala juhendamisel valmisid üliõpilastel arvutuslükati kasutustehnika ja arvutuste täpsuse kohta ka mitmed uurimused, mida esitati üliõpilastööde konverentsidel.

Teoreetiline mehaanika ja matemaatika on üksteisega väga tihedalt läbipõimunud teadusharud, mistõttu neid õpetavad sageli ühed ja samad õppejõud. Nii oli ka see TTÜ-s. Teoreetilise mehaanika ülesannete lahendamine süvendas ja kinnitas kindlasti ka matemaatikavaldkonna teadmisi, seda just diferentsiaalvõrrandite koostamise ja lahendamise osas. See oli väga suur abi ja eeldus, et käsitleda soojustehnika valdkonna teoreetilisi probleeme.

Kujutava geomeetria ja tehnilise joonestamise õppejõud olid Ott Rünk, Hans Taal ja Mai Kaska. Kujutav geomeetria on tehniliste jooniste kujundamise alus, mis võimaldab ruumis paiknevaid objekte kujutada projektsioonidena tasapinnal. Kujutavat geomeetriat peetakse üliõpilaste hulgas üheks raskemaks, head kujutusvõimet nõudvaks aineks. Ei ole juhus, et kujutava geomeetria ülesannete lahendamisel oli üliõpilastel sageli kaasas kas suur kartul või kaalikas. Sellest lõigati välja mõne keerukama kujuga keha või üksteisega liitunud kehad, et saada neist ruumiline ettekujutus edasiseks edastamiseks tasapinnale.

Küllaltki ulatuslik kursus oli füüsika selle juurde kuuluvate laboratoorsete töodega. Füüsikat luges Albrecht Altma, praktikume juhendasid Johannes Meitre ja Heino Oru. Tuleb märkida, et füüsika küllaltki ulatuslik kursus sisaldas vähemalt 60–70 % ulatuses osasid, mida õpetatakse mitmetes muudeski ainetes (teoreetiline mehaanika, elektrotehnika, termodünaamika, hüdraulika jt). Kuid siiski – olles eelnevalt kuulunud füüsika kursust, oli muidugi lihtsam erialaaineid omandada.

Matemaatika, teoreetilise mehaanika, kujutava geomeetria ja teiste ainete kõrval on soojustehnika inseneri koolitamisel suure tähtsusega masinate ja mehhanismide teooria, masinaelemendid ja tugevusõpetus. Neid aineid õpetasid vastavalt Heino Lepikson, Erich Riives, Konstantin Ollik ja Otto Roots. Eraldi tahaks mainida Leo Tepaksi kõrgetasemelisi hüdro- ja gaasidünaamika loenguid ning Harri Tibari huvitavaid praktiliste tööde tunde.



Soojustehnikaga seotud aineid ei olnud eriti palju, kuid kursused olid väga mahukad. Vaatamata kitsamatele suunitlustele toetub soojustehnika kolmele alusambale: termodünaamika, soojusülekanne ning hüdro- ja gaasimehaanika. Termodünaamikat ja soojusülekanne õpetasid Jaan Ivand ja Ilmar Mikk. Kõige ulatuslikum ja paljusid semestreid läbiv aine oli Ilmar Öpiku ainuisikuliselt õpetatud katelseadmete kursus. Katelseadmete kursus koosnes mitmest üksikust aineist, mis lõimused paljude arvutuste kujul katla projektis väljendunud joonisteks. Ilmar Öpiku soojustehnikaseadmete projekteerimisalaseid kogemusi oli kindlasti mõjutanud tema varajasem tegevus tööstuses. Üldse oli õppetöö suund katelseadmete süvendõpe. Põhjus oli ilmselt põlevkivi põletavate elektrijaamade ehitamine ja vastavad perspektiivid Eestis.

Muidugi ei jäänud katelseadmete kursusel kõrvale ka põlevkivi põletamise probleemid. Siit sai alguse ka minu suur huvi katelde ja põlevkivi põletustehnika vastu. Katelseade on objekt, kuhu “jooksevad kokku”, põimuvad üksteisega läbi ja integreeruvad mitmed teadusharud, näiteks termodünaamika, soojusülekanne, hüdro-ja aerodünaamika, tugevusõpetus, materjaliõpetus, ainete purustustehnika, gaasipuhastus jmt.

Teine ulatuslikum aine oli Peeter Mureli turbiinmasinate kursus.

Veel tahaks meenutada Voldemar Truumäge, kes luges soojustehniliste mõõtmiste ja soojuselektrijaamadega seotud aineid.

Õpitu kinnistumises oli tähtis osa kursusetöödel ja -projektidel. Projekti sisuks oli tavaliselt mõne seadme arvutus koos sellest lähtuvate joonistega. Projekte tuli teha nii üldtehnilistes kui ka eriala käsitlevates ainetes.

Auditoorse õppuse kõrval pean oluliseks ka osalust tööstuspraktikas. Praktikaid oli kolmel korral. Kuna praktika oli küllaltki pikk, kuus kuni kaheksa nädalat, siis toimus see enamasti kahes osas. Eriti tähtsateks praktikakohtadeks peeti põlevkivil töötavaid elektrijaamu. Sellest tulenevalt olid minu praktikapaigad Tallinna, Kohtla-Järve ja Ahtme elektrijaamad. Peale selle viibisin veel praktikal Leningradi ja Riia soojuselektrijaamades. Üks praktikakoht oli ka soojuselektrijaamu projekteeriv asutus Lvovis. Ülikoolipoolse praktika juhendaja kõrval oli kindlasti ka tehase poolne nõustaja. Praktika vältel liikusid õpperühmast moodustatud väikesed grupid pidevalt tööstusettevõtte tsehhide ja osakondade vahel. Praktikasse mahtusid veel mitmete elektrijaamade lühiajalised külastused. Reeglina praktikantidele töötasu ei makstud.

Praktika ei koosnenud ainult üksikute tööloikude tundmaõppimisest. Igal üliõpilasel tuli täita ka individuaalülesanne. Selleks oli mõne seadme või soojuselektrijaama lülide üksikasjalikum kirjeldus või midagi muud sarnast. Praktika lõppedes tuli koostada ühine praktikaaruanne, lisaks üsna üksikasjalik individuaalülesande aruanne. Hea tava olid iga-aastased sügisesed praktikakonverentsid, kus üliõpilased tutvustasid praktikal omandatud tähelepanekuid ja kogemusi. Praktika andis eelkõige hea visuaalse ettekujutuse soojusjõuseadme elementide mõõtmetest ja mastaapidest (akadeemilise õppetöö käigus sead-

meid ju ei näe), nende omavahelistest sidemetest, reguleerimisest ja paljudest teistest küsimustest.

Teadustööga hakkasin tegelema juba üliõpilasena. Kohtla-Järvel ja Ahtme põlevkivielektrijaamades hakkasid ilmema esimesed tõsised probleemid katelde töös. Need olid elektrijaamad, kus põletati esmakordselt tolmpõlevkivi. Algselt olid katlad mõeldud kivisöe põletamiseks. Katelde käigukogemused näitasid, et nad on suutelised töötama projekteeritust palju madalamal koormusel. Sellistest probleemidest tekkiski vajadus käivitada põlevkivi põletamise uuringud. Nende eestvedaja oli Ilmar Öpik. Minu tollane uurimisteema oli kiirgussoojusülekanne põlevkivi tolmpõletuskolde. Samasuunalised uuringud jätkusid ka pärast ülikooli lõpetamist nii TA Energeetika Instituudis kui TTÜs. Uuriti küsimust, miks ummistuvad katla küttepinnad sageli tuhasadestistega. Osutus, et üks põhjus oli katla koldest väljuva põlemisgaasi liiga kõrge temperatuur. Tööstuspraktikal tuvastasid Kohtla-Järve soojuselektrijaama mõõtmised, et põlevkivikatla koldest väljuva põlemisgaasi temperatuur on projekti kivisöe kateldele kehtiva meetodi kohaselt arvatud alustemperatuurist 120-150 °C kõrgem. Põhjuseks osutus katla kolde küttepindadele moodustuva tuhakihi termiline takistus. Minu töö eesmärk oligi mõõta katla koldest väljuvat temperatuuri ja, kasutades kiirgussoojusülekanne arvutusmeetodeid, määrata küttepindadel paikneva tuhakihi termiline takistus. Töö tulemused äratasid tähelepanu ning kirjastati TTÜ toimetistes. TTÜs toimusid ka igakevadised Üliõpilaste Teadusliku Ühingu (ÜTÜ) teaduskonverentsid, kus esitati üliõpilaste uurimistöid. On asjakohane märkida, et kuulajaskonnaks ei olnud mitte ainult oma ülikooli üliõpilased ja õppejõud, vaid huvilisi tuli ka tööstusettevõtetest. Olen esinenud mitmel sellistel teaduskonverentsil, mitte ainult oma ülikoolis, vaid ka väljaspool Eestit.

Minu diplomitööks oli aurukatla projekt 600 MW-ise võimsusega põlevkivielektrijaamale. Diplomitöö toetus nii mõneski osas üliõpilasaastatel tehtud uuringutele. Kaitsesin diplomitöö 13.06.1955. Mulle omistati insener-soojusenergeetiku kutse ja ülikooli kaadriosakonnas anti ilma igasuguse pidulikku-seta kätte diplom kiitusega. Sellega lõppes insenerikutseks valmistumine ja vajalike teadmiste hankimine. Võisin siseneda teadusega seotud tulevikku.

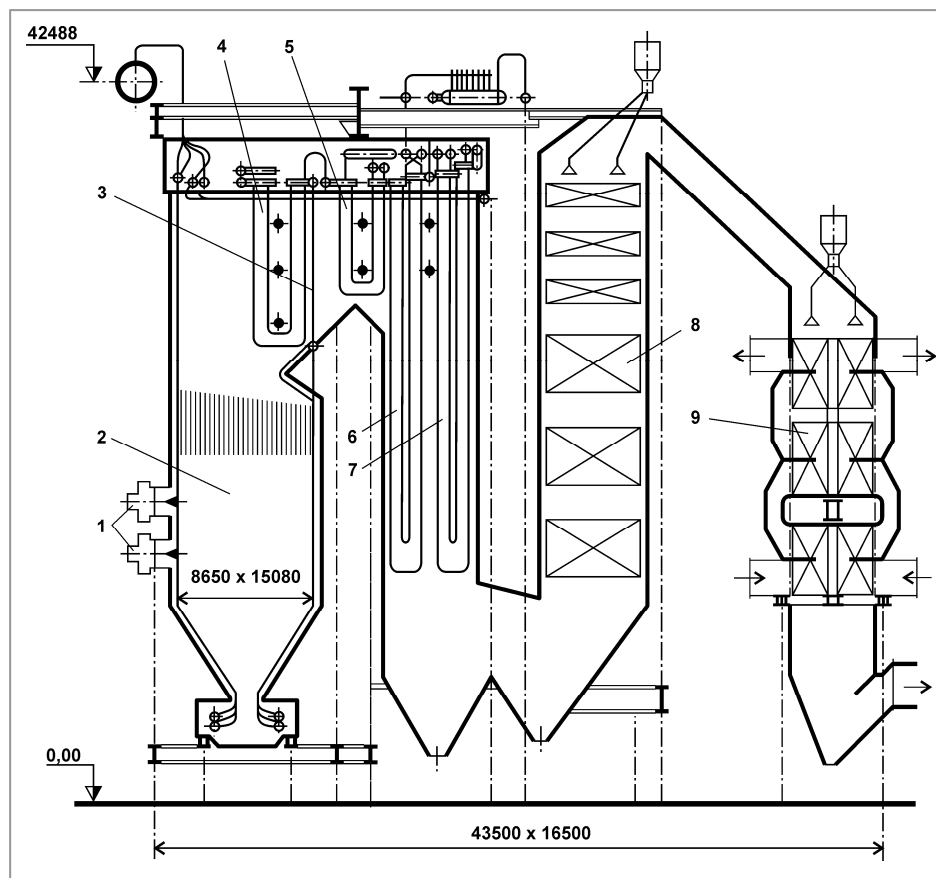
## PÕLEVKIVI PÕLETUSTEHNİKATEST

Aastateni 1920–1925 oli Eestis kütusena esikohal puit, mis kattis enam kui 90% vajadusest. Sisseveetav kivisüsi oli kütusetarbes teisel kohal. Esialgu kasutati põlevkivi veduri küttekolletes, seejärel hakati seda üha rohkem põletama ka tööstuskateldes, vaatamata korstnast väljuvale “paksule suitsule”. Kasutati peamiselt toleaegsele standardile vastavat tükkpõlevkivi tükisuurusega 40 mm ja harilikult põletati seda tavalisel puitkütusele ettenähtud plaanrestil.

Tähtis etapp põlevkivienergeetika ajaloos oli Tallinna elektrijaama üleviimine põlevkiviküttele 1924. aastal. Kasutusel oli põlevkivi kihtpõletustehnika. Seda

aastat võibki lugeda põlevkivienergeetika algusaastaks elektrienergia genereerimise tähenduses. 1933. aastal oli Tallinna elektrijaama võimsus 22 MW. Seejärel ehitati Põhja-Eestisse veel mitu põlevkivielektrijaama – Püssi (3,7 MW), Kohtla (3,7 MW), Kunda (2,3 MW), Kiviõli (0,8 MW). Põlevkivi kasutatavate elektrijaamade koguvõimsus oli Teise maailmasõja eel 32,5 MW.

Tollastes elektrijaamades põletati peent põlevkivi (tükisuurus kuni 25 mm). Põlevkivi põletamiseks oli välja töötatud õnnestunud konstruktsiooniga töökandlad Krulli-Lomšakovi ja Franz-Krulli tüüpi liikuvlülidega kaldrestid. Põlevkivi kui lendosarikka kütuse restil põletamise põhiprobleem on tagada nn tahmavaba põletamine. See probleem lahendati edukalt: koldekambrile anti sobiv kuju ja rakendati sellele vastavat õhuande süsteemi.

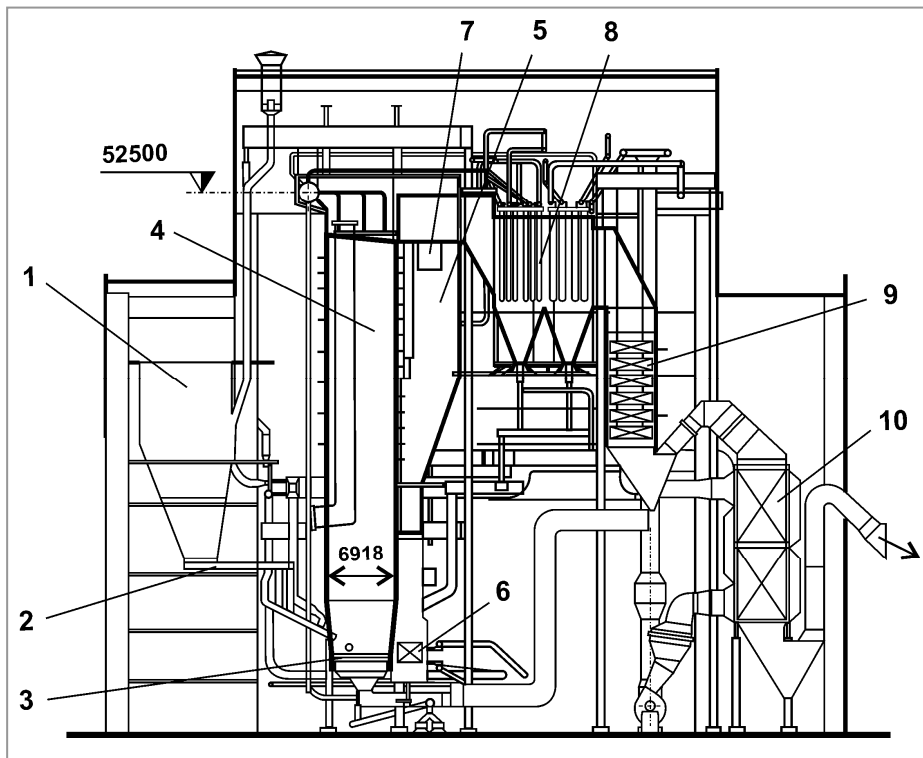


Tolmpõlevkivi katel.

1 – põletid, 2 – kolle, 3 – festoon, 4 – koldesirmid, 5 – vahesirmid, 6 – primaarauru ülekuumendi, 7 – sekundaarauru ülekuumendi, 8 – ökonomaiser, 9 – õhu eelsoojendi.

Põlevkivi kihtpõletustehnika märgatav areng kestis kuni möödunud sajandi kuuekümnendate aastateni. Siis algas põlevkivi tolmpõletustehnika evitamine ja kihtkoldes põletamine hakkas järk-järgult tähtsust kaotama. Esimesed katsed põletada tolmustatud põlevkivi tehti juba 1920. aastatel Eesti Raudtee veduritel ja Tallinna elektrijaamas, kuid edutult – katlatorud saastusid ja ummistusid kiiresti.

Esimesed elektrijaamad, kus põletati tolmpõlevkivi, olid Kohtla-Järve elektrijaam (anti käiku 1949, elektriline võimsus 48 MW) ja elektrijaam Ahtmes (käivitati 1951, elektriline võimsus 72,5 MW). Nende katelde käituskogemused näitasid, et nad on võimelised töötama vaid projekteeritust märksa madalamal koormusel, sest kiirgus- ja konvektiivküttepinnad saastusid intensiivselt tuhaga ja põhjustasid ökonomaiseri torude kiire korrosioon-abrasiivne kulumise. Nende katelde käitus tõi esmakordselt esile põlevkivi tolmpõletuskatla küttepinna saastumise, kõrgetemperatuurse korrosiooni, kulumise, tuhasaastest puhastamise ja soojusülekanne spetsiifilised probleemid.



Tsirkuleeriva keevkihiga põlevkivikatel.

1 – põlevkivi punker, 2 – kütuse sөөtja, 3 – rest, 4 – koldekamber, 5 – separatsioonikamber, 6 – keevkihtsoojusvaheti, 7 – separaator, 8 – aurülekuumendi, 9 – ökonomaiser, 10 – õhu eelsoojendi.

Selgus, et kivisöe põletamiseks ette nähtud katlad ei ole suutelised rahuldavalt töötama tolmustatud põlevkivil, sest põlevkivil on üpris omalaadne keeruka koostisega mineraalne ja orgaaniline osa. Esilekerkinud probleemide teaduslik-tehniline lahendamine ei olnud elektrijaamadele jõukohane, selleks tuli kaasata teadlasi ja luua uusi teadusühendusi.

Üheks selliseks uurimistöde keskuseks kujunes toleaeagne TTÜ soojusenergeetika kateeder ja 1960. aastal loodud Tööstusliku Soojusenergeetika Uurimislaboratoorium. Nende alusel moodustati hiljem TTÜ soojustehnika instituut. Teadusuuringute tulemuste järjepidev rakendamine võimaldas järk-järgult tõsta keskrõhukatelde käitusvõimsust, mõista põlevkivikateldes toimuvat ja rajada põlevkivikatelde projekteerimise lähtealused.

Põlevkivienergeetika uue arenguetapi alguseks tuleb lugeda 1959. aasta, mille lõpus anti Balti elektrijaamas käiku põlevkivi esimesed tolmküttel töötavad kõrgrõhu (rõhk katlas kas 100 MPa või 140 MPa) katelagregaadid. Jaama lõppvõimsuseks kujunes 1624 MW.

Järgnevalt anti 1969. aastal käiku Eesti Elektrijaama esimene energiablokk. Jaama koguvõimsuseks kujunes 1610 MW. Nii Eesti kui ka Balti elektrijaamas asendati ühe 200 MW võimsusega energiabloki tolmküttekatlad 2004. aastal tsirkuleeriva keevkihtkatlaga ning kummagi energiabloki võimsust tõsteti 215MW-ni.

## ASPIRANTUUR JA TÖÖ ENERGEETIKA INSTITUUDIS

Minu esimene töökoht pärast ülikooli lõpetamist oli nooremteadur Eesti TA Energeetika Instituudis. Ametlikult määras ülikooli lõpetajate suunamiskomisjon mind inseneriks Kiviõli Põlevkivikombinaati, kuid sain sealt ümbersuunamise loa. Nooremteadurina töötasin ainult veidi üle kahe kuu ning pärast eksamite sooritamist võeti mind Energeetika Instituudi aspirandiks. Minu juhendajaks sai Hans Truu ning pärast tema surma 1957. aastal Leningradi Polütehnilise Instituudi professor Nikolai Djoškin. Kandidaadiväitekirja kaitseisin novembris 1958 TTÜs.

Kandidaaditöö teemaks valisin tolmpõlevkivi põlemiskarakteristikute uurimise. See jätkas üliõpilasena alustatud põlevkivi tolmkütte koldeid käsitlevat temaatikat. Valmis 100 kW soojusliku võimsusega tolmpõlevkivi põlemise uurimist võimaldav katseseade. Seade andis hea võimaluse põlevkivi põlemise dünaamika uurimiseks ja protsessi modelleerimiseks. Uurimistöö käigus saadi esmakordselt teada tolmpõlevkivi üksikute etappide kestvused ja neid mõjutavad tegurid. Selgus, et elektrijaamades põletatav tolmustatud põlevkivi on suhteliselt peenike ja sel on koldes kütuse täielikuks põlemiseks küllaldane varu. Töö tulemused andsid vajaliku lähtekoha põlevkivi jahvatuspeensuse valikuks. Samuti võimaldasid tulemused esmakordselt hinnata põlevkivist termilisel lagunemisel eralduvate lendosade põlemiskineetilisi konstante. Nende täpsemad väärtused selgusid hilisema uurimistöö käigus. Töö sisaldas ka teo-

reetilise kallakuga osa, mis käsitles polüfraktsioonse koksistunud tolmpõlevkivi difusioonset põlemist.

Rööpselt kandidaaditööga valmis mul ka teoreetiline uurimus püsimahuliselt põlevate kütuseosakeste liikumise kohta põlemisgaasis. Töö toetus püsimahuliselt põlevate osakeste massimuutuse matemaatilisele käsitlusele. Uurimus põhines osakese suhtelise- ja hõljumiskiiruse (kiirus mille omandab osake seisundis, kus on tasakaalus gravitatsiooni- ja aerodünaamiline takistusjõud) arvutustel.

Pärast kandidaaditöö kaitsmist jätkasin tööd Energeetika Instituudis nooremateadurina. Toetudes katseseadmle ja ka selleks otstarbeks ehitatud nn külmal aerodünaamilisel mudelil saadud tulemustele, tegelesin tolmpõlevkivi leegi stabiliseerimise küsimustega.

Mind valiti Tallinna Tehnikaülikooli soojusenergeetika kateedri dotsendiks asumisega tööle 1.09.1960. Tehnikaülikoolis avanesid mul võimalused osaleda seal äsja avatud Tööstusliku Soojusenergeetika Uurimislaboratooriumi töös. Valmis doktoritöö “Füüsikalised-keemilised protsessid põlevkivi tolmpõletuses”, mis jätkas otseselt kandidaadiväitekirja. Kui kandidaadiväitekirja käsitles ainult tolmpõlevkivi põlemisprotsessi uurimist, siis doktoriväitekirja oli hoopis suurema ulatusega, hõlmates põlemise laiahaardelisemat käsitlust, samuti põlevkivi mineraalosa käitumist põlemisel, kolde ekraanküttepindade tuhasadestistega kattumise mehhanismi ja dünaamikat ning kiirgussoojusülekanne koldes. Doktoriväitekirja kaitsesin Eesti Teaduste Akadeemias 1968. aastal.

\* \* \*

Järgnevalt esitan minu poolt uuritud põlevkivi põletustehnika probleemide loetelu ning nende uurimise mõningad refereeringud. Uuringute tulemused on avaldatud neljas alltoodud monograafias. Nendes leiduvad viited kirjastatud töödele ja minu kaastöötajatele. See väldib avaldatud artiklite pika nimekirja esitamist kirjutise lõpus. Olen ülimalt tänulik oma kaastöötajatele, kes osalesid uurimistöodes ja andsid sellega suure panuse põlevkivienergeetika arengusse.

Отс А. А. (1977). Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и Канско-Ачинских углей. Энергия. Москва, 1977, 312 с.

Отс А. А. (1987). Коррозия и износ поверхностей нагрева котлов. Энергоатомиздат, Москва, 272 с.

Ots, A. (2004). Põlevkivi põletustehnika. Tallinn, 768 lk.

Ots, A. (2006). Oil shale fuel combustion. Tallinn, 833 p.

## PÕLEVKIVI OMADUSED

Põlevkivi kuulub sapropeelkütuste liiki. Põlevkivi tekke lähteaineks on olnud ainuraksed organismid, vees elanud vetikad ja teised sarnased organismid. Olemuselt on Eesti põlevkivi (edaspidi kasutan mõistet PÕLEVKIVI, lähtudes

ainuüksi Eesti põlevkivi omadustest) karbonaatse ja terrigeense koostisega orgaanilist ainet ehk kerogeeni sisaldav settekivim. Seetõttu erineb põlevkivi kui kütuse koostis laialt kasutatavast kivisöest, mis on huumuskütus. Põlevkivi orgaaniline osa sisaldab peale põhikomponendi – süsiniku – veel hulgaliselt vesinikku ja hapnikku. Põlevkivis napib lämmastikku, kuid selle eripära on kloor orgaanilises aines.

Kuni 1950. aastateni oli põlevkivi omadusi uuritud lähtudes tähtsusest õli- ja gaasitootmise toormena. Põlevkivi kui energeetilise kütuse omaduste üksikasjalikumaid uuringuid alustati TTÜ soojusenergeetika kateedris möödunud sajandi viiekümnendate aastate lõpul. Põlevkivi kui kütus on väga suure mineraalosa sisaldusega, mis väljendub põlemisel moodustuva tuha ning karbonaatmineraalide lagunemisel eralduva süsihappegaasi suures hulgas.

Lähtuvalt põlemis- ja teistest protsessidest katelseadmes, on põlevkivi sobilik vaadelda kui ainet, millel on kolm komponenti – orgaaniline (kerogeen), terrigeenne ja karbonaatne. Igal sellisel komponendil on ligilähedaselt püsiv koostis, kuid tarbija kasutatavas põlevkivis võib mainitud komponentide suhe olla erinev. Lisaks nendele kolmele komponendile sisaldab põlevkivi ka niiskust. Elektrijaamades põletatava põlevkivi tarbimisaine alumine kütteväärtus on tavaliselt vahemikus 8,3-8,6 MJ/kg.

Kütuse koostise arvutus tugineb sageli laboratoorsele tuha hulgale, millele põlevkivi puhul lisandub karbonaatne süsihappegaas. Kuid põlevkivi puhul ei võrdu laboratoorse tuha ja karbonaatse süsihappegaasi summa tuhastamisprotsessis toimuvate muudatuste tõttu mineraalosa kogusega, mistõttu ei ole täpne ka selle summa kaudu määratud põlevaine sisaldus põlevkivis. Hälbe põhjus on selles, et kütuse proovi tuhastamisel moodustuv lubi ühineb keemiliselt väävli ja hapnikuga ning sulfiidse väävli põlemisel tekib rauaoksiid. Hälbe suurus sõltub nende reaktsioonide ulatusest ning selle kindlakstegemiseks uuriti üksikasjalikult suure hulga põlevkiviproovi laboratoorset tuhastusprotsessi põlevkivi koostise ja kütteväärtuse laias vahemikus. Tuletati lähtuvalt tehnilise analüüsi andmetest valemid põlevkivi koostise ja põlemissaaduste koguste määramiseks.

## KÜTTEVÄÄRTUS

Kütuse kütteväärtuse määramisel eraldub valdav osa soojust orgaanilise aine põlemisest, kuid põlevkivi korral mõjutavad seda oluliselt ka mineraalosas põlemisprotsessi jooksul toimuvad endo- ja eksotermilised reaktsioonid. Põlevkivi põlemisel mineraalosas toimuvate nähtuste tagajärjel eralduvat soojust mõjutavad enim mineraalaine hulk põlevkivis ja põlemistingimused ehk põlevkivi põletustehnika.

Kütuse põlemisel eralduva soojushulga tuvastamise lähtealus on enamasti selle kindlates tingimustes eksperimentaalselt määratud väärtus, milleks sagedamini on kütuseproovi pommkalorimeetris põlemisel vabanev soojushulk ehk kütteväärtus pommkalorimeetris. Sellisel moel saadud kütteväärtus ei võrdu põlev-

kivi põlemisel koldes vabaneva soojushulgaga. Põhjus on põlemisprotsesside erinevuses pommkalorimeetris ja reaalses koldes. Seetõttu on vaja teada, mille tõttu, millises ulatuses ja milliste mõjuritega on määratud pommkalorimeetris vabaneva soojushulga erinevus koldes põlevkivi põlemisel eralduvast soojushulgast. Neid olemuslikke põhjuseid, millega kaasnevad soojusefektid, on mitu: püriitse väavli põlemine, karbonaatmineraalide termiline lagunemine, kaltsiumoksiidi sulfatiseerumine, uusmineraalide teke (uusmineraalid on keemilised ühendid, mis moodustuvad algineraalidest kütuse põlemisel) jt. Eksperimentaalselt uuriti põlevkivi proovi pommkalorimeetris põlemise üksikuid soojusefekte. Tulemus näitas, et nende algebriline summa moodustab 4-6% põlevkivi kütteväärtusest pommkalorimeetris. Tuletati arvutusvalemid soojusefektidest arvutamiseks lähtuvalt põlevkivi tehnilisest koostisest.

Uuriti ka põlevkivi mineraalosaga seotud soojuse eraldumist tööstuskatla kolletes. Olenevalt põlevkivi põletustehnikast võib selline soojushulk ulatuda kuni 6%-ni põlemisel vabanevast soojushulgast koldes.

## PÕLEVKIVI JA TUHA GRANULOMEETRIA

Kütuse põletamisel on oluline teada lähtekütuse ja moodustuva tuha granulomeetrilist koostist. Samuti on oluline teada kütuse granulomeetrilise koostise ajalist muutust põlemisprotsessi käigus. Uuringute alus on olnud põlevkivi erinevad proovid kaevandustest, purustitest ja veskitest. Põlevkivi tolmuosakeste separatsiooni on uuritud just selleks otstarbeks ehitatud multiotstarbelisel laboratoorsel põlevkivi peenendus- ja jahvatusseadmel.

Uuringud on näidanud, et peenendatud põlevkivi ja selle põlemisel moodustuva tuha granulomeetrilist koostist saab hästi kirjeldada Kolmogorovi logaritm-normaaljaotusseaduse kaudu. Seejuures enim kasutatakse massjaotust (sõelale jäänud või sõela läbinud osakeste osamass) väljendavaid seoseid osakeste läbimõõdust. Kindla fraktsioonkoostisega süsteemi iseloomustab kaks konstanti – osakeste mediaanmõõde ja ühtlusnäitaja. Mediaanmõõde, mida sageli rakendatakse ka süsteemi kui terviku kohta, jagab selle kaheks võrdseks osaks: ühes pooles on mediaanmõõtmest suuremad osakesed, teises väiksemad.

Nagu peenendatud põlevkivi tervikuna, nii alluvad ka selle üksikud komponendid hästi logaritm-normaaljaotusseadusele. Põlevkivi karbonaatosa on ülekaalus jämedamates fraktsioonides, liiv-saviosa kontsentreerub aga peenimasse osakesesse, orgaanilise osa peenenduskarakteristik on nende vahepeal.

Teekonnal lademest eraldumisest maardlas kuni katlasse minekuni teeb põlevkivi granulomeetriline koostis läbi mitmed muutused: tootmisprotsessist kaevandamisest (kihtide lõhenemine, purustamine, sorteerimine, rikastamine) ja ettevalmistusel põletamiseks (purustamine, jahvatamine). On iseloomulik, et põlevkivi granulomeetrilist koostist iseloomustav ühtlusnäitaja sellisel teekonnal suureneb.



Samuti saab logaritm-normaaljaotusseaduse kaudu hästi väljendada nii põlevkivi põlemisel moodustuva tuha granulomeetria kui ka üksikutes katlakäikudes ja tuhapüüdurites väljasadestunud tuha osa karakteristikuid.

## PÕLEMINE

Klassikalises tähenduses piirdub põlemise käsitlus kütuse orgaanilise aine hapnikuga ühinemisreaktsioonide käsitlusega. Olemuselt on kütuse põlemine ajas kulgev dünaamiline protsess. Oluline on kütuse põlemiskiirus ja -kestus. Põlevkivi põlemistehniline omapära on erakordselt lendosarikas orgaaniline aine (lendosa sisaldus 85–90%) ja lendaine eraldumisel moodustuv tuharikas koks (põlevaine tihedus koksistunud osakeses on 0,08–0,12 g/cm<sup>3</sup>). Põlevkivist eralduva lendosa põlemise kineetikat on uuritud selleks ehitatud katseseadmehel, mis võimaldab isothermses tingimustes ja erineva hapniku kontsentratsiooni juures määrata lendosa põlemise kestuse ning lendosa põlemise kineetilised konstandid. Samuti on lendosa põlemist uuritud tööstuskatelde kolletes ja suuremastaapsetel katseseadmetel.

Lendosal on oluline roll kütuse süttimisel ja põlemise stabiliseerimisel. Kütuse osakese termiline lagunemise kulg oleneb osakese kuumenemiskiirusest, mis omakorda sõltub osakese mõõtmetest. Väikesed osakesed (100–200 µm) kuumenevad kiiresti. Seetõttu küllastab eralduv lendaine keskkonna osakese ümber ja seguneb intensiivselt osakest ümbritseva hapnikuga. Moodustuv segu süttib ja põleb vastavalt põlemiskineetika seadustele, olenedes seejuures temperatuurist ja hapniku osarõhust. Suuremad osakesed käituvad väikestest erinevalt: kuumenevad aeglasemalt ning ka termiline lagunemine on aeglasem, mistõttu süttimine ja põlemine toimub osakest ümbritsevas piirkihis. Põlemiskiiruse määrab sellisel juhul orgaanilise osa lagunemisintensiivsus. Erinevate mõõtmetega osakeste süsteemis kattuvad lendosa ja koksi põlemine teatud aja vältel. See tuleneb osakeste mõõtmete mõjust kuumenemiskiirusele ja lendosa eraldumise intensiivsusele.

Vaatamata põlevkivi lendosa rikkusele, kulub lendosa põlemisele tolmpõlevkivi leegis mitte rohkem kui 15–20 % kütuse põlemise kogujast.

Suure tuharikkuse tõttu on põlevkivi koksi põlemise eripära koksiosakeste püsimahuline põlemine: osakese maht põlemisprotsessi jooksul ei muutu. Ülitugevat mõju koksistunud osakese põlemisrežiimile avaldavad temperatuur ja osakese mõõtmed. Koksistunud põlevkivi põlemist erinevates temperatuuri piirkondades püsival temperatuuril ja hapniku osarõhul on uuritud selleks otstarbeks ehitatud laboratoorsel katseseadmehel.

Põlevkivi koksi põlemisel kineetilises (madaltemperatuurises) põlemispiirkonnas jaguneb põlevaine tihedus üle kogu osakese ühtlaselt. Osakesesisese hapniku kontsentratsiooni gradient puudub ja hapnikule on avatud vaba juurdepääs suvalisse punkti osakese sisemuses. Põlemine allub kineetika võrrandile, kusjuures tuleb arvestada osakese poorsuse ajalast muutust, mis on omakorda

funktsioon põlevaine hetketihedusest osakeses. Mahtpõlemiskiirus ei sõltu osakese mõõtmetest, kuid aeglustub põlemise käigus osakese pooride suuruse muutuse tõttu.

Põlemisel sisemises difusioones (kõrgtemperatuurises) põlemispiirkonnas moodustub osakese sisemusse tuhakooriga ümbritsetud põlevaine algtihedusega südamik. Põlemiskiiruse määravad tuhakooriga difusioonitakistus ja takistus hapniku voolusele keskkonnast osakese välispinnale. Põlemisel moodustuva osakest ümbritseva tuhakooriga difusioontakistus sõltub põlevaine algtihedusest osakeses.

Komplitseeritumaks osutub juhtum, kus põlemist mõjutavad nii reaktsiooni kineetika kui ka osakesesisene hapnikudifusioon. Sellisel juhul kujuneb välja ajas muutuv osakesesisene hapniku kontsentratsiooniväli ja põlevaine jaotus. Protsessi saab kirjeldada diferentsiaalvõrrandite süsteemina ning lahendada numbriliselt.

Kuna katla koldesse suunatav kütus kujutab polüfraktsioonset süsteemi, siis põlevad erimõõtmelised kütuse osakesed erinevates põlemispiirkondades. Osakeste eri põlemispiirkondadesse jagunemise määrab osakeste jaotusseadus. Lähtuvalt üksikosakese põlemise seaduspärasusest ja jaotusseadusest on arvutuslikult määratud koksistunud osakestest koosneva süsteemi põlemise aja-funktsioon. Sama meetodika võimaldab uurida ka põlemist mõjutavate parameetrite, nagu temperatuur, liigõhutegur, osakeste granulomeetriline jaotus jt, mõju polüfraktsioonse osakeste süsteemi põlemiskiirusele ja -kestusele.

#### MINERAALOSA KÄITUMINE PÕLEMISEL

Tänapäevane põlemise käsitlus katlatehnikas ei piirdu üksnes kütuse orgaanilise osa hapnikuga ühinemisega, vaid hõlmab ka selle mineraalosas toimuvad protsessid, kuna just nendest saavad alguse paljud katlas esinevad nähtused, nagu küttepindade kattumine tuhasadestisega ja selle mõju soojusülekandele, katlametalli kõrgtemperatuurne korrosioon ning kulumine jt. Mineraalidega toimuvad ajas kulgevad protsessid samaaegselt orgaanilise osa põlemisega. Nende protsesside lõpptulemusel moodustub antud välistingimustele vastav suhteliselt stabiilsete omadustega tuhk, mis koos põlemisgaasiga läbib kolde järel paiknevad küttepinnad.

Kütuse mineraalosas toimuvate protsesside kiirus ja ulatus sõltub mitmest parameetrist ja tegurist, millest olulisemad on temperatuur, keskkonna koostis (hapniku, vääveldioksiidi jt ühendite osarõhk, mittetäielikult põlenud gaasiliste komponentide olemasolu jne), tuhaosakeste granulomeetriline jaotus ning omavahelise kontakti tõenäosus, aeg jt. Tähtsaim nendest on seejuures temperatuur, mis sõltub paljuski kütuse põletustehnoloogiast (tolmpõletus, keevkihtpõletus jt).

Põlevkivis leiduvate mineraalide käitumist põlemisel ja protsessi dünaamikat on uuritud selleks otstarbeks ehitatud suuremastaapses 2 MW soojusliku võim-

susega katsekoldes. Seade paiknes Kohtla-Järve elektrijaamas ja oli gaasipoolses osas ühendatud tööstuskatlagaga. Sellel seadmel uuriti peamiselt karbonaatmineraalide, väävli ja leelismetallidega toimuvaid muundumisi põlevkivi põlemise käigus, samuti kolde ekraanpindade saastumise dünaamikat.

Uurimise käigus tuvastati põlevkivis sisalduvate karbonaatmineraalide termilise lagunemise, vaba lubja ja uusmineraalide moodustumise ajaline kulg erinevate režiimparameetrite korral. Üks aktiivsemaist tuhakomponentidest põlevkivi katla küttepinna saastumise (peamiselt sulfaatiderikka sadestise) seisukohalt on põlemise käigus moodustuv kaltsiumoksiid, mis esineb tuhas kas vabal kujul või seotuna uusmineraalidega. Teatud osa karbonaatmineraale võib aga jääda hoopiski lagunemata. Vaba ja seotud CaO suhe sõltub enim temperatuurist koldes, mis on suurel määral seotud põlevkivi põletustehnikaga. Põlevkivi tolmpõletusel (kõrgeim temperatuur kuni 1450 °C, teatud juhul veelgi kõrgem), on ülekaalus uusmineraalidega seotud lubi. Põlevkivi madalatemperatuurisel põlemisel keevkihtkoldes (750–900 °C) jääb aga enamik kaltsiumoksiidi vabasse vormi või algmineraalidesse. Kaltsiumoksiidi aktiivsus siduda põlemisgaasi vääveldioksiidiga oleneb lubja esinemisvormist tuhas. Vaba lubja aktiivsus on seejuures kõige suurem.

Vaba lubi võib karbonaatmineraalidest moodustuda vaid siis, kui süsihappegaasi osarõhk põlemisgaasis ei ületa kaltsiumkarbonaadi dissotsiatsiooni tasakaalurõhku. See tingimus on täidetud põlevkivi põletamisel atmosfääri rõhul. Põlevkivi ülerõhul põletamisel (rõhk koldes > 1,2 MPa), karbonaatmineraalid ei dissotsieeru ja CaO jääb sinna seotud kujul. Süsihappegaasi väljatõrjumine karbonaatmineraalidest on võimalik ka CaO ühinemisreaktsioonide kaudu, näiteks ühinemisel vääveldioksiidiga. Põlevkivi ülerõhul esinevate probleemide uurimiseks on TTÜ soojustehnika instituudil vastav katseseade.

Katla küttepinna (eriti koldekraani) saastumisele avaldab olulist mõju põlevkivi põlemisel esinev markasiitse väävli põlemisdünaamika. Uurimistulemused näitasid, et markasiitse väävli oksüdeerumine toimub märgatavalt aeglasemalt kui orgaanilise süsiniku põlemine. See loob head tingimused madala sulamistemperatuuriga raua ühendite kandumiseks kolde ekraanpinnale ja rauarikka sadestise moodustumiseks. Põlemistemperatuuri kõrval avaldab markasiitse väävli põlemiskiirusele eriti suur mõju ka hapniku osarõhk põlemisgaasis ehk põlemisprotsessi liigõhutegur. Hapniku madal kontsentratsioon soodustab madala sulamistemperatuuriga mittetäielikult oksüdeerunud rauaühendite teket, soodustades rauarikka sadestise moodustumist küttepinnale.

Põlevkivi kui leelismetallide-, peamiselt kaaliumirikka, kütuse põletamisel on oluline nende ühendite lendumine põlemise käigus. Leelismetallide aurud on keemiliselt väga aktiivsed ning moodustavad koldes küttepinnale kergesti kondenseeruvaid ühendeid, mis intensiivistavad saastumist ja kiirendavad küttepinna torude kõrgetemperatuurset korrosiooni. Uurimistöö käigus määrati leelismetallide, peamiselt kaaliumi, lenduvuse dünaamika põlevkivi liiv-saviosa mineraalidest. Hapniku kontsentratsiooni alanemine suurendab leelismetallide

lenduvuse intensiivsust ja nende aurude osarõhku põlemisgaasis. Viimane tõstab leelismetalli aurude kastepunkti.

#### ÕHUKESKKONDA SAASTAVATE ÜHENDITE TEKE

Õhku saastavate ühendite teke ja emissioon on tugevalt seotud kütuse omaduste ja põlemise režiimiga. Põlevkivi põletamisel saastavad õhukeskkonda kõige rohkem vääveldioksiid, lämmastikoksiidid ja tahked heitmed. Õhukeskkonda paisatavatest kasvuhoonegaasidest on tähtsaim süsinikdioksiid. Gaasiliste heitmete kontsentratsioon põlevkivi põlemisgaasis sõltub suuresti põletustehnikast. Sellest seisukohast on põlevkivi põletustehnika tsirkuleerivas keevkihis märgatavalt efektiivsem kui tolmpõletustehnika. Õhku saastavate ühendite tekke seisukohalt on põlevkivi omapäraks suhteliselt väike lämmastiku hulk orgaanilises aines, märkimisväärne orgaanilise ja markasiitse väävli sisaldus, moolsuhte Ca/S suur väärtus, orgaanilise kloori olemasolu ja karbonaatmineraalide ohtus.

Õhu keskkonda saastavate ühendite teket põlevkivi põletamisel on uuritud mitmel selleks ehitatud laboratoorsel seadmel, samuti elektrijaamade kateldel.

Vääveldioksiidi emissioon põlevkivi põlemisel on otseselt seotud CaO käitumisega. Kaltsiumi ja väävli moolsuhe Ca/S põlevkivis on suur (8–10), mis peaks tagama madala vääveldioksiidi kontsentratsiooni põlemisgaasis. Põlevkivi põlemisel koldes jääb osa karbonaatmineraalide kaltsiumoksiidist algsesse kujusse, osa läheb vabasse vormi ja osa ühineb liiv-saviosa mineraalidega. Väävli aktiivselt siduv komponent on vaba lubi, teatud määral ka karbonaatmineraalid ise. Uusmineraalide väävlisidumisvõime on madal. Aktiivse CaO hulk tuhas sõltub põlevkivi põletustehnikast. Põlevkivi kõrgtemperatuurisel tolmpõletamisel on aktiivse lubja osatähtsus väike suure uusmineraalide koguse tõttu, tuhk seob 70–85% väävlist ning katlast väljumisel on põlemisgaasis vääveldioksiidi hulgal, mis ületab lubatu. Põlevkivi madaltemperatuurisel keevkihtpõletusel moodustub uusmineraale vähesel hulgal ning väävli sidumisaste tuhaga on väga kõrge.

Lämmastikoksiidid tekivad kütuse põlemisprotsessis õhu ja kütuse lämmastikust. Põhiosa lämmastikoksiide tekib põlevkivi põletamisel kütuse lämmastikust. Võrreldes paljude muude kütustega põlevkivi põlemisgaasis ei ole lämmastikoksiidide kontsentratsioon kõrge. Siiski ületab lämmastikuoksiidide emissioon kõrgtemperatuurisel tolmpõletusel mõningal määral lubatud väärtuse, kuid keevkihis põletusel jääb lubatust väiksemaks. Lämmastikoksiidide hulka põlemisgaasis on põlevkivi põlemise algfaasis võimalik mõjutada hapniku kontsentratsiooni kaudu.

Nagu öeldud, sisaldab põlevkivi orgaaniline aine ka kloori, millest kütuse termilisel lagunemisel tekib kloorvesinik. Osa kloorvesinikku seotakse katla gaasikäikudes tuhaga, kuid teatud hulk paisatakse koos põlemisgaasiga ka õhufääri.

Kütuse põlemisel tekkivad olulisemad kasvuhoonegaasid on süsinikdioksiid ja dilämmastikoksiid. Põlevkivi põletamisel moodustub süsinikdioksiid orgaanilisest süsinikust ja karbonaatmineraalide süsihappegaasist nende termilisel lagunemisel. Karbonaatmineraalidest tuleva süsihappegaasi hulk oleneb aga karbonaatmineraalide koguhulgast põlevkivis ja nende lagunemise ulatusest koldes. Karbonaatmineraalid lagunevad põlevkivi tolmpõletusel peaaegu täielikult, keevkihtpõletuse korral jääb karbonaatide lagunemisaste vahemikku 0,6–0,8. Sõltumata põletustehnikast dilämmastikdioksiid põlevkivi põlemisgaasis praktiliselt puudub.

#### KATLA KÜTTEPINDADE SAASTUMINE

Aurukatla küttepinna saastumine ehk kattumine tuhasadestisega on füüsikalise-keemiliste protsesside kombinatsioon. Saastumise uurimine taotleb kahte eesmärki: protsessi olemuse selgitamine ehk mehhanism ja katla küttepindadele ladestunud saastekihi mõju soojusülekandele. Põlevkivikatelde küttepindade saastumine on sageli olnud energiaploki võimsust piirav tegur. Seetõttu on põlevkivi katla küttepindadele moodustuva tuhasadestise tekke uurimine olnud TTÜ Soojustehnika instituudi üks tähtsamaid uurimissuundi. Uuringuid on teostatud paljudel põlevkivikateldel, kasutades kas otseseid mõõtmisi või selleks otstarbeks konstrueeritud mõõteseadmeid. Samal eesmärgil on mitmele katlale paigaldatud lisagaasikäike või ainult uurimistöödeks ette nähtud erikonstruktsioonilisi küttepindu ja seadmeid. Pikaajalise uurimistöö tulemusel on välja selgitatud eri tüüpi sadestiste tekkemehhanismid ning esitatud nende matemaatilised kirjeldused. Need tulemid võimaldavad määrata saastumist mõjutavate tegurite mõju sadestise kasvu kiirusele ning on aluseks katelde küttepindade kujundamisele ja paigutusele.

Saastumise olemus seisneb selles, et gaasilisest keskkonnast kanduvad tuhaosakesed katla küttepinnale, lisaks kondenseeruvad aurufaasis olevad komponendid. Tuhasadestiste tekkeprotsessi mõjutavad oluliselt tuhaosakeste teraline jaotus, põlemisgaasi kiirus ja koostis, sealhulgas vääveldioksiidi ja hapniku osarõhk gaasis.

Kuna põlemisgaasi temperatuur, aga ka kiirus ja teised parameetrid piki katla gaaskäiku ei ole püsivad, siis ei ole ka küttepinna saastumistingimused gaasikäigu ulatuses ühed ja samad. On osutunud otstarbekaks jagada tuhasadestised põlevkivikatlas kolme rühma: puistesadestis, seotud sadestis ja seotud-šlakk-sadestis.

Põlevkivikatla küttepinnale moodustuva tuhasadestise koostis erineb enamasti märgatavalt küttepinda uhtuva tuha koostisest. Põhjus on selles, et tuhaosakesed sadestuvad torudele valikuliselt, tekkinud sadestise kihis kulgevad põlemisgaasi mõjul keemilised reaktsioonid ning toimub osakeste omavaheline paakumine. Seetõttu kattub küttepind olenevalt tingimustest sadestistega, mis erinevad struktuurilt, keemilis-mineraloogiliselt koostiselt, tugevusest ja soojusfüüsikalistelt omadustelt.

Puistesadestises seovad tuhaosakesi omavahel molekulidevahelised mehaanilised jõud. Seda tüüpi sadestis stabiliseerub teatud aja möödudes. Puistesadestisi võib kohata põlevkivikatla konvektiivküttepinna torudel piirkonnas, kus põlemisgaasi temperatuur ei ületa 400–500 °C.

Seotud tuhasadestise tekkemehhanism on keerukam. Olulised on keemilised reaktsioonid sadestises endas, tähtis on ka keemiline side sadestise ja küttepinna metalli vahel. Põlevkivi kui kaltsiumi-, kaaliumi- ja väävlirikka kütuse põletamisel moodustub peamiselt sulfaatselt seotud sadestis. Selle tekke algpõhjus on toru pinnale kandunud kaltsiumoksiidi sisaldavate osakeste reageerimine põlemisgaasi vääveldioksiidi ja hapnikuga ning gaasifaasis kaaliumsulfaadi otsene kondenseerumine küttepinnale. Kuid kaltsiumsulfaat ei teki mitte ainult vabast lubjast, vaid sulfatiseeruda võivad ka kaltsiumoksiidi alusel koldes tekkinud uusmineraalid.

Seotud-šlakksadestis tekib siis, kui pinnale kanduvad üheaegselt osakesed nii tahkes faasis kui ka pehmenenud ja sulas olekus. Sadestises toimivad kihti tugevdavad osakeste ja gaasilise keskkonna vahelised reaktsioonid. Seotud-šlakksadestis moodustub konvektiivküttepinnale põlemisgaasi kõrge temperatuuriga alas ning on tüüpiline kolde ekraanpindadel leegi kõrge kiirgusintensiivsusega kohtades. Seotud-šlakksadestise tunnus on harilikult kõrgendatud rauasisaldus.

Seotud ja seotud-šlakksadestise teket mõjutavad nii mehaanilised kui ka keemilised protsessid. Erinevalt stabiliseeruvast puistesadestisest ei peatu seotud ja seotud-šlakksadestise kasv ajas, vaid jätkub tõkestamatult.

#### KÜTTEPINNA TUHASAASEST PUHASTAMINE

Enamik põlevkivikatla küttepindu töötab olukorras, kus tuhasadestis kasvab tõkestamatult. Tõkestamaks sadestise kasvu ja stabiliseerimaks soojusülekanne, põlevkivikatel tuleb seadistada puhastussüsteemidega. Tuntakse mitmeid erinevatel põhimõtetel töötavaid puhastussüsteeme. Neid kõiki iseloomustab kindla perioodiga tsükliline tegevus. Igas sellise tsüklis mõjub sadestise kihile seda eemaldav jõud. Kuid puhastustsüklis esinev jõud ei eemalda mitte ainult sadestist, vaid võib küttepinna metalli tsükliliselt kahjustada. Põhi-eesmärk on võimalikult täielik tuhasadestise eemaldamine, mõjudes seejuures võimalikult vähe küttepinna metallile. TTÜ soojustehnika instituudis on üksikasjalikult uuritud puhastustsüklis nii sadestise kihile kui ka küttepinna metallile mõjuvaid jõude erinevate puhastussüsteemide rakendamisel. Samuti on välja töötatud ja juurutatud mitmed uued katla küttepinna puhastusmeetodid.

Põlevkivikatla küttepinna puhastamiseks on kasutusel mitmed erinevad süsteemid. Levinumad on vesipuhastus, aurpuhastus, torude kõrgsageduslik vibreerimine, madalsageduslik raputamine, löökpuhastus ja omavahel kombineeritud süsteemid. Puhastusjõust ja selle rakendamise sagedusest sõltub oluliselt katla küttepinna saastumise dünaamika, soojusvastuvõtt ning küttepinna metalli tööiga.

## SOOJUSÜLEKANNE

Soojusülekanne põlemisgaasilt kuumutatavale keskkonnale katla koldes ja konvektiivküttepindadel sõltub pinda katva tuhasaaste soojusfüüsikalistest omadustest. Tuhasadestis pidurdab soojusülekannet. Küttepinda katva tuhasadestise mõju soojusülekannde väljendub sadestisekihi termilises takistuses ja sadestise välispinna kiirgusomaduste kaudu. Soojusülekannet põlevkivi kateldes on ulatuslikult uurinud TTÜ soojustehnika instituut, kasutades mitmeid selleks otstarbeks konstrueeritud ja valmistatud teisaldatavaid mõtsonde, statsionaarselt katla küttepindadesse paigaldatud soojusvoo ja temperatuuri mõõtmise elemente jm. Samuti on palju uuritud soojusülekannde probleeme elektrijaamade katelde küttepindadel.

Soojusülekanne koldes on peamiselt kiirguslik. Konvektiivse soojusülekannde osatähtsus on tagasihoidlik, sest põlemisgaasi kiirus on väike. Soojusülekannde leegilt koldeekraanile määravad kolm olulist suurust: tuhasadestise termiline takistus, sadestise pinna kiirgusomadused ja temperatuuri gradient ehk leegi mitteisotermisus seinäärses termilises piirkihis.

Küttepinda katva sadestise mõju soojusülekannde sõltub selle kihi paksusest ja soojusjuhtivustegurist. Nende suhe määrab tuhasadestise termilise takistuse. Viimane sõltub suuresti sadestise tüübist, väga oluline on seejuures sadestise poorsus.

Seotud või seotud-šlack sadestis katla küttepinnal kasvab tõkestamatult. Sadestise kihi pidev kasv suurendab ka selle termilist takistust, mistõttu soojusülekanne katla küttepinnas on olemuselt mittestatsionaarne. Sadestise kõrvaldamine puhastusüksis põhjustab sadestisekihi termilise takistuse muutuse.

Kolde ekraanpinda läbiva soojusvoo potentsiaali määrab kolderuumist lähtuva kiirgusvoo intensiivsus leeki ümbritsevatele ekraanpindadele. Termilist piirkihti läbides nõrgeneb kiirgusvoog ekraanpinna suunas. Termilise piirkihi takistavat mõju soojusülekannde saab väljendada selle termilise takistusena, mille väärtus on võrreldavas suurusjärgus ekraanpinda katva tuhasadestise omaga. Piirkihi termiline takistus ning selle mõju soojusülekannde sõltub oluliselt koldesisesest massivahetusest, mille omakorda määrab kolde aerodünaamika (kolde geomeetiline kuju, põletite paigutus jne).

Kiirgusenergia bilanss koldes sõltub ka soojust vastuvõtva pinna kiirguse neeldumisvõimest, mis on keha pealispinna füüsikaline omadus ja sõltub omakorda soojusvahetuspinna sadestise koostisest ja struktuurist. Pikemat aega kolde ekraanpinnal püsinud stabiilse koostisega sadestise kiirguse neeldumisvõime on üldiselt kõrge. Teatud tingimustel võib ekraanpinnale leelismetallide ühendite kondenseerumisel moodustuv õhukesel sadestisel siiski olla väga madal kiirgusülekanne pärssiv neeldumistegur.

Soojus levib konvektiivküttepinnas nii konvektsiooni kui kiirguse teel. Konvektiivse ja kiirgusülekannde suhte kujunemisel on oluline põlemisgaasi tem-

peratuur ja kiirgavate mahtude suurus. Tuhasadestise kiht konvektiivküttepinnal mõjutab soojusülekanne peamiselt termilise takistuse kaudu. Kiirgussoojuseülekanne seisukohalt on oluline ka sadestise kiirguse neeldumisvõime.

Nagu mainitud, on soojusülekanne seotud ja seotud-šlakksadestise tekkepiirkonnas saastekihi pideva kasvu tõttu mittestatsionaarne, kusjuures küttepinna soojusvastuvõtu ajaliskulgu mõjutab oluliselt saaste eemaldumise efektiivsus küttepinna puhastustsüklis. Sel juhul ei eemaldu teatavasti mitte kogu tsükli vahelisel ajal küttepinnale ladestunud sadestis, vaid ainult osa. Seetõttu ei vähene küttepinna soojusvastuvõtt mitte ainult sadestise termilise takistuse tõusu tõttu puhastustsüklite vahelisel perioodil, vaid samaaegselt mõjutab seda ka pinnale jääva sadestise kihi termilise takistuse kasv.

## KÜTTEPINNA METALLI KÕRGTEMPERATUURNE KORROSION JA KULUMINE

Metalli korrosioon on selle oksüdatsioon ümbruskeskonna toimel. Tavaliselt esineb see kas vaba või seotud hapniku toimel. Küttepinna metalli korrosiooni intensiivsus ja ajaline kulg määravad lõppkokkuvõttes katla küttepinna metalli kulumise ulatuse ja tööea. Tuntakse katla metalli madal- ja kõrgtemperatuurset korrosiooni. Madaltemperatuurne korrosioon esineb siis, kui pinnale tekib väävelhape või vee kile. Pinna temperatuur ei ületa sel juhul tavaliselt 100 °C. Metalli kõrgtemperatuurne korrosioon esineb kõrgemal temperatuuril ning võib muutuda märgatavaks metalli temperatuuril üle 350–400 °C. Järgnevalt ainult kõrgtemperatuurset korrosioonist ja sellega seotud küttepinna kulumisest.

Põlevkivi katelde metalli korrosiooni on põhjalikult uuritud TTÜ soojustehnika instituudis. Selleks on ehitatud mitmed laboratoorsed seadmed korrosiooniprotsessi kineetiliste konstantide saamiseks ning mitmeid teisaldatavaid ja statsionaarseid seadmeid uuringute teostamiseks elektrijaamade kateldel.

Katla küttepinna metalli kõrgtemperatuurset korrosiooni intensiivsus sõltub korrodeeruva terase liigist, metalli temperatuurist, küttepinnale ladestuva tuhasadestise omadustest ja ümbruskeskonna, täpsemalt põlemisgaasi, koostisest. Oluline on ka ajategur.

Põlevkivi katelde küttepinna metalli korrosiooni kiirendavaks teguriks on pinda katvates sadestistes sisalduv kloor. Juba 0,15%-line kloori hulk sadestistes suurendab mitmekordselt metalli korrosioonikiirust. Kloor esineb sadestistes peamiselt kaaliumkloriidina, mis kondenseerub põlemisgaasist küttepinna torudele. Tuleb märkida, et kloori hulk tolmküttekattas tuhasadestises ajapikku väheneb, põlemisgaasis sisalduv vääveldioksiid tõrjub selle välja ning tekib korrosiooniliselt vähem aktiivne kaaliumsulfaat. Kloori vähenemine ajas nõrgendab sadestise korrosioonilist aktiivsust. Klooriühendite mõju on eriti tugev suure kroomisisaldusega terastele, vähenedes nikli sisalduse suurenemisel.



Küttepinna metalli korrosioonimehhanism põlevkivi tolm- ja keevkihis põletusel on erinev. Põhjus on selles, et madala temperatuuri tõttu on põlevkivi kaaliumiühendite lenduvus liiv-saviosa mineraalidest keevkihi põletusel tagasihoidlik ning kaaliumkloriidi tekke võimalus väike. Korrosiooniliselt aktiivsed kloori ühendid tekivad keevkihtpõletusel vahetult küttepinnal peamiselt kaltsiumi ühinemisel kloorvesinikuga. Vääveldioksiidi ülimaldala sisalduse tõttu põlemisgaasis puudub aga kloori intensiivse väljatõrjumise võimalus ning kloori kontsentratsioon aja jooksul sadestises tõuseb. Ühes sellega suureneb sadestise korrosiooniline aktiivsus

Korrosiooniprotsessi tulemusel kattub metalli pind oksiidikihiga. Oksiidikihi teke metalli pinnale aeglustab korrosiooni korrosiooniaktiivsete komponentide pääsu pidurdumise ehk oksiidikihi difusioonitakistuse tõttu. Mida tihedam on metalli pinda kattev ja sellega seonduv oksiidikiht, seda aeglasem on korrosioon. Seega oksiidikihi ajalise paksenemisega korrosioonikiirus väheneb. Korrosioonikiiruse sõltuvus metalli temperatuurist allub hästi Arrheniuse seadusele.

Nagu öeldud, loob oksiidikiht metalli poole suunduvatele korrosiooniaktiivsetele ühenditele difusioonitakistuse. Seega kiirendavad oksiidikihi vigastused ja muud kihi difusioonitakistust vähendavad tegevused metalli korrosiooni (kulumist). Metalli kulumise kiirenemist oksiidikihi tsüklilise purunemise tõttu tuntakse kui metalli korrosioon-erosiivset kulumist. Selline näide on katla küttepinna torude kulumine olukorras, kus pindu perioodiliselt tuhasadestisest puhastatakse ja seejuures kahjustatakse oksiidikihti metalli pinnal.

Jõud, mis oksiidikihti ühes või teises puhastussüsteemis tsükliliselt mõjutab, ei ole olemuselt üks ja seesama. Näiteks auru- või õhujoaga puhastamisel mõjub küttepinnale peamiselt joa dünaamiline jõud, veejoaga puhastamisel on olulisemad jahutamisel oksiidikihis tekkivad termilised pinged. Küttepinna vibratsioon- ja löökpuhastusel toimib oksiidikihile kiirendusjõud. Oksiidikihi difusioonitakistuse vähenemist puhastustsüklis iseloomustab oksiidikihi purunemisaste.



Toetudes katla küttepinna korrosioon-erosioon-kulumise olemusele, on välja töötatud matemaatiline mudel ja meetod küttepinna metalli kulumiskiiruse ja tööea arvutamiseks.

Selline on olnud minu elutöö põlevkivienergeetika valdkonnas. Mul on hea meel, kui sellest on olnud kasu Eesti teadusele ja Eesti riigile.

*Teaduspreemia täppisteaduste alal uurimuste tsükli  
"Atmosfääri aerosooli ja aeroioonide tekkeprotsesside ja evolutsiooni  
uurimine, aeroioonide liikuvusspektromeetria meetodite ja aparatuuri  
arendamine" eest*



*Hannes Tammet*

Sündinud 05.08.1937 Tallinnas

- 1954 Märjamaa Keskkool  
1959 Tartu Ülikool, füüsika  
1964 füüsika-matemaatikakandidaat, Tartu Ülikool  
1979 füüsika-matemaatikadoktor, Geofüüsika Peaobservatoorium (Leningrad)
- 1956–1959 Tartu Ülikooli laborant või samaväärse ametikoha täitja  
1959–1967 Tartu Ülikooli füüsikakateedri assistent, aspirant, vanemõpetaja  
1967–1983 Tallinna Pedagoogilise Instituudi füüsikakateedri dotsent, vanemteadur, professor  
1983–2002 Tartu Ülikooli laboratooriumi juhataja, peateadur, professor  
2002– Tartu Ülikooli emeriitprofessor ja erakorraline vanemteadur  
1995–1996 Minnesota Ülikooli külalisteadur (Fulbrighti stipendium)  
1998–1999 Uppsala Ülikooli külalisprofessor (Visby grant)
- 1967 Eesti NSV teaduspreemia aeroioonide uurimuste alal autorite kollektiivi liikmena
- Rahvusvahelise atmosfäärielektrikomisjoni auliige
- Avaldanud 200 teadusartiklit ja 9 monograafiat ning käsiraamatut

## SISSEJUHATUS

Aeroioonid on üldsusele tuntud eelkõige aeroionisaatoriteks nimetatud aparatuuride reklaamide järgi, mille taga on tootjate ja edasimüüjate kommertshuvid. Aastakümneid tagasi populaarne uurimisteema aeroioonide oletatavast otsesest bioloogilisest mõjust [vt Charry, Kavet, 1987] on usaldusväärsete tulemuste puudumisel unustusse jäänud. Ometi on huvi aeroioonide vastu teaduses viimasel ajal tõusnud, põhjuseks aeroioonide osa atmosfääriõhus mikrotasandil toimuvates protsessides. Seda mõistmata pole võimalik aru saada pilvkatte kujunemisest ja inimtegevuse mõjust Maakera kliimale.

Füüsiku jaoks tähistab termin “ioon” tavaliselt puuduva elektroniga aatomit. Kui Michael Faraday kreeka sõna *ιον* 1834. aastal füüsikasse tõi, tähistas ta sellega elektriväljas liikuvat ja laengut kandvat osakest üldse. Aeroioon on õhu elektrijuhtivust põhjustav laetud osake, mis koosneb pea alati paljudest molekulidest. Õhu loodusliku elektrijuhtivuse avastas 90 aastat enne termini “ioon” kasutusele võtmist Eestist pärit füüsik Georg Wilhelm Richmann, kes töötas Peterburis. Eestis alustas õhu elektrijuhtivuse uurimist 1937 aastal Anatoli Mitt [Mitt, 1946] ja atmosfäärifüüsikas nimetatakse õhu looduslikku elektrijuhtivust põhjustavaid aeroioone sageli pikema nimega atmosfääri ioonideks.

Lühiülevaate atmosfääri ioonidest võib leida artiklitest [Tamm, 1998; Harrison, Tamm, 2008]. Juhtme eritakistust iseloomustatakse tehnikas 1 mm<sup>2</sup> ristlõikega 1 m pikkuse juhtme takistusega. Vase jaoks on see *ca* 0,017 oomi, maapinnalähedase atmosfääriõhu jaoks aga 10<sup>20</sup> oomi. Ometigi tasakaalustab aeroioonide juhtivusvool Maa atmosfääris äikeste poolt genereeritud 1000–2000 amprise maapinnalt ionosfääri kantud elektrivoolu. Nii viisi on aeroioonid globaalse atmosfääri elektri ahela jaoks oluline tegur ja uurimisobjekt.

Maapinnalähedases õhus tekib *ca* 50% aeroioonidest radooni ja radooni tütar-elementide lagunemisega kaasneva radioaktiivse kiirguse toimele. Selle tõttu on aeroioonide hulk õhu radoonisaldusega tugevalt korreleeritud. Algses ionsatsiooniaktis tekkinud elektron ja positiivneioon ühinevad juba esimese mikrosekundi jooksul gaasimolekulidega ja esimese millisekundi jooksul liitub algse molekulaarse iooniga veel vee ja õhu lisandgaaside molekuli. Nii viisi moodustunud ja kuni mõnekümnest molekulist koosneva klasteriooni eluiga on paar minutit [Tamm jt, 2006]. Selle aja jooksul jõuab ta endasse haarata ka selliste õhu lisandgaaside molekule, mille kontsentratsioon on alla 1 ppb. Väiksem osa klasterioonidest hävib positiivse ja negatiivse aeroiooni kohtumisel toimivas rekombinatsiooniaktis, enamasti klasterioone aga kohtub enne seda mõne õhus hõljuva aerosooliosakesega ja ühineb sellega. Kui aerosooliosake on algselt neutraalne, siis kohtumise tulemusena tekib laetud osake. Kuni 100 nanomeetrise läbimõõduga laetud osakeste liikumine on oluliselt mõjutatud elektriväljadest. Sellised osakesed on samuti aeroioonid ja neid võib nimetada aerosoolioonideks. Aerosoolioonide õhutakistus on suur ja nende osa õhu elektrijuhtivuses on teisejärguline.

Aeroiooni massi otsest massispektromeetrilist mõõtmist raskendab vajadus aeroioon normaalõhuga õhust vaakumisse viia. Selleks võimalised aparatuurid on kallid ning aeroiooni koostise võimalik muutumine vaakumisse paisuvas õhujoas jätab kahtluse, et mõõdetud objekt ei ole identne atmosfääriõhus olnud aeroiooniga. Teavet aeroioonide suuruse kohta saadakse tavaliselt mõõtes nende elektrilist liikuvust, mis tähendab triivi keskmist kiirust ühikulises elektriväljas. Klasterioonide liikuvus on kuni 3 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>, aerosoolioonide liikuvus võib olla kuni 10000 korda väiksem. Liikuvuse järgi saab hinnata ka aeroiooni läbimõõtu. Aparatuurid, mis sorteerivad aeroioone liikuvuse järgi, nimetatakse liikuvusanalüsaatoriteks ehk liikuvusspektromeetriteks.

Aeroioonid pörkuvad õhus leiduvate gaaside molekulidega tuhandeid kordi mikrosekundis. Põrgeteahelas toimub palju keemilisi reaktsioone ja millisekundites mõõdetava vanusega aeroioonide liikuvusspektromeetrial on rakendusliku analüütilises keemias [Eiceman, Karpas, 2005]. Millisekundiliste aeroioonide kontsentratsioon ja nende poolt kantav elektrivool võib olla suur ning selle mõõtmine lihtne. Kontsentratsioon kahaneb pöördvõrdeliselt aeroioonide eluea ruuduga. Järgnevas on tähelepanu suunatud atmosfääriõhus looduslikul teel tekkinud aeroioonidele, mille eluiga on kümnetes ja sadades sekundites ning kontsentratsioon väga väike.

## AEROIOONID, ATMOSFÄÄRIAEROSOOI JA KLIIMA

Aerosooliteaduses uuritavate osakeste läbimõõdu alammäär on mõõtmismeetodite arenedes järk-järgult langenud ja tänapäeval käsitletakse ka klasterioone kui atmosfääriaerosooli osa. Hörrak jt [2000] uurisid komponentanalüüsi meetodit kasutades suuremahulise vaatlusmaterjali baasil aeroioonide erinevate suurusgruppide omavahelist korreleeruvust. Jämedas jaotuses liigitati aeroioonid kolme suurde gruppi, mille puhul korrelatsioon on tugevalt positiivne grupi sees ning puudub või on negatiivne kahe grupi vahel. Eralduspiirid on 1,6 nm (liikuvus  $0,5 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) ja 7,5 nm (liikuvus  $0,03 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ). See on päris heas kooskõlas aeroioonide varasema intuiitse klassifikatsiooniga [Israël, 1970] kergeteks, keskmisteks ja rasketeks aeroioonideks. Eralduspiir 1,6 nm langeb kokku aeroioon-molekul põrgete iseloomu muutumise piiriga. Väiksemate aeroioonide sisemiste energianivoode vahed on soojusliikumise energiast suuremad ning põrked on elastsed. Suuremad aeroioonid assimileerivad soojusenergiat ning põrked on mitteelastsed [Tammet, 1995].

Maa keskmise temperatuuri muutumist põhjustavad nii atmosfääri paisatavad kasvuhoonegaasid kui ka pilvkatte muutused. Pilvede mõju soojusvahetusele oleneb nende struktuurist. Ühest ja samast veehulgast võib saada palju peente tilkadega valgeid pilvi või ühe suure äikesepilve, millest võib sadada nii põlde kosutavat vihma kui saaki hävitavat rahet. Inimtegevus võib mõjutada pilvede struktuuri ja selle kaudu Maa kliimat enamgi kui kasvuhoonegaase õhku paisates. Atmosfääriaerosooli osakestel ja nende hulgas ka aeroioonidel on pilvede arengus oluline osa. Juba 19. sajandil tõestas lord Kelvin, et mida väiksem on tilk, seda raskem on auru kondenseerumine ja kiirem tilga aurumine. Kui tilga läbimõõt oleks sajandik mikromeetrit, siis peaks ta silmapilkselt aurustuma ka küllastunud niiskusega õhus. Näis, et uute pilvetilkade tekkimine ja kasvamine alates selgest õhust pole üldse võimalik. Paradoksi esialgne lahendus leiti ruttu: õhk sisaldab alati mõne sajandikmikromeetri läbimõõduga tahkeid osakesi, mida hakati nimetama kondensatsioonituumadeks. Uued pilvetilgad tekitavad kondensatsioonituumadel. Kui õhus on palju kondensatsioonituumi, siis saame teatud hulgas veeaurust palju pisikesi tilku, mis jäävad õhku hõljuma. Kui kondensatsioonituumi on vähe, siis saab samast hulgas veeaurust vähe suuri tilku, mis käituvad hoopis teistviisi. Niiviisi juhivad kondensatsioonituumad pilvede ja sademete arengut ning selle kaudu maakera kliimat.

Kondensatsioonituumade avastamine ei ole Kelvini paradoksi täielik lahendus, vaid ainult lahenduse edasilükkamine. Pilved ja vihm sadestavad õhus leiduvad kondensatsioonituumad atmosfäärist ruttu välja ja nüüd peab küsima, kuidas tekivad uued kondensatsioonituumad? Vastust otsitakse juba enam kui sada aastat. Inglise füüsik C. T. R Wilson leidis Nobeli preemiaga pärjatud töös, et veeauru väga suure üleküllastuse puhul võivad kondensatsioonituumadena käituda ka tavalised klasterioonid, mille tekkemehhanism on lihtne ja arusaadav. Paraku ei tule aga looduslikus õhus piisavalt kõrget üleküllastust kunagi ette ja vee kondenseerumiseks on tarvis klasterioonist kümneid korda

suurema läbimõõduga osakesi. Molekulaarklastri kasvamist takistab aga ikka seesama eelnimetatud Kelvini efekt.

Kondensatsioonituumade tekkimise ehk nukleatsiooni uurimine on kujunenud atmosfäärifüüsika iseseisvaks haruks, mille üheks juhtivaks keskuseks on Helsingi ülikooli füüsikaosakond. Eestis alustati juba kaheksakümnendate aastate keskel aeroioonide liikuvusjaotuse pidevat seiret paljukanaliliste liikuvusspektromeetrite [Tamm jt, 1987] abil Pärnumaal asuvas Tahkuse Õhuseirejaamas. Seal avastati 1–2 nm läbimõõduga aeroioonide tekkepuhangud [Tamm jt, 1988], mille füüsikalise-keemiline olemus on sama kui viimastel aastatel atmosfääriaerosooliuringute tähelepanu keskmesse tõusnud nukleatsioonipuhangutel. Helsingi-Tartu koostöös saadud tulemused näitavad, et intensiivne nukleatsioon toimub tavaliselt mõnetunniliste puhangutena. Tekkivate osakeste arengu mehhanism ühe ja kolme nanomeetri vahel on aga uurijatele väljakutseks tänaseni. Üha ilmsem on, et selles mängivad oma osa elektrilaengud. Aeroioonidest kondensatsioonituumade tekkimist nimetatakseioon-indutseeritud nukleatsiooniks. Kui ioon-indutseeritud nukleatsiooni osatähtsus atmosfääris osutub piisavalt suureks, siis tähendab see, et aeroioonid võivad oluliselt mõjutada maakera kliimat. Õhu ionisatsioon on aga tundlik nii inimtegevuse kui kosmosest tulevate mõjutuste suhtes.

Inimtegevuse tulemustest mõjutavad atmosfääriõhu ionisatsiooni pinnase töötlemisega kaasnevad loodusliku radooni emissiooni muutused ning tuumaelektrijaamades ja jäätme-käitlustehastes vabanev radioaktiivne gaas Krüpton-85. Looduslikest teguritest mõjutab ionisatsiooni, seda eriti suurematel kõrgustel, kosmosest tulev ioniseeriv kiirgus, mis varieerub ajas olenevalt Päikese pinna seisundist. Taani teadlaste H. Svensmark'i ja E. Friis-Christensen'i 1997. aastal ilmunud artikkel [Svensmark, Friis-Christensen, 1997] vallandas ägeda teadusliku diskussiooni teemal: kuidas Päikese pinna seisund võib mõjutada atmosfääri ionisatsiooni kaudu Maakera pilvkatet ja kliimat. Diskussioon jätkub ja on jõudnud ka populaarteaduslikku kirjandusse [Svensmark, Calder, 2007]. Atmosfäärifüüsikud pole aga seni üksmeelele jõudnud, kuivõrd Svensmarki hüpotees väärrib tunnustamist või kriitikat [Ram jt, 2009; Bondo jt, 2010; Kulmala jt, 2010].

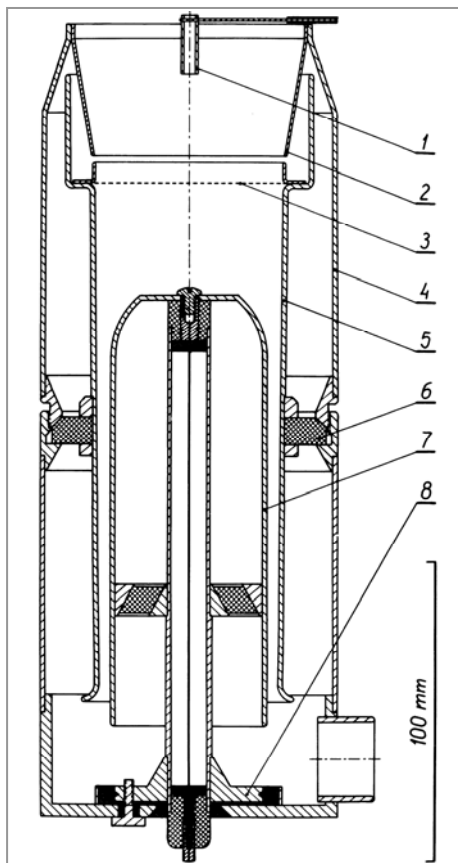
## LIKUVUSSPEKTROMEETRIA MEETODID

Analüütilises keemias kasutatakse millisekundites mõõdetava vanusega klasterioonide uurimiseks enamasti lennuajaspektromeetreid. Selline aparaat sisaldab homogeense elektrivälja ja seisva kandevgaasiga kambrit. Ioonid juhitakse läbi elektriliselt lukustatava ja avatava võre-kombinatsiooni impulsina kambri ühte otsa. Tugevas elektriväljas triivides jõuavad erineva liikuvusega ioonid kambri teises otsas asuvale kollektorelektroodile erinevatel aegadel ning ajas muutuvat voolutugevust registreerides saab määrata ioonide jaotuse liikuvuse järgi.

Katsed kasutada lennuajaspektromeetreid looduslike aeroioonide uurimiseks atmosfääris ei ole andnud häid tulemusi. Lennuajaspektromeetrite tundlikkus langeb koos aeroioonide eluea ruuduga ja selleks, et saada atmosfäärimõõtmisteks piisavat signaali, peaks triivikambri suurust mõõtma meetrites. Klasterioonide mõõtmine on tingimisi võimalik, aerosoolioonide korral aga osutub lennuajaspektromeetria hoopis sobimatuks.

Atmosfääri looduslike aeroioonide uurimiseks kasutatakse aspiratsiooni- ehk läbivoolumeetodit. Lihtsaimad aspiratsioonimeetodil töötavad riistad on integraalsed õhu elektrijuhtivuse mõõtjad ja aeroioonide loendurid, mida nimetatakse vahel ka Gerdieni riistadeks. Põhjaliku ülevaate võib leida raamatutest [Israël, 1970; Tammet, 1970]. Raamatust [Tammet, 1970] kopeeritud joonisel 1 on esitatud Tartu konstrueeritud integraalse aeroioonide loenduri mõõtekondensaatori ristlõige. Samasuguse või väga sarnase mõõtekondensaatoriga loendureid on valmistatud ligi kaheksajale uurimisasutusele endises Nõukogude Liidus ja idabloki maades [Matisen jt, 1992].

Mõõtekondensaator ise on telg-sümmeetriline. Väline korpus (4) varjestab sisemisi elektroode elektriliste häirete eest. Õhk imetakse kondensaatorisse läbi koonilise varjestuslehtri (2) ülalt. Edasi voolab õhk läbi mõõtekondensaatori sisemist elektrivälja piirava metallvõrgu (3) aeroioonide kollektori ülesannet täitvasse kergelt koonilisse väliskattesse (5). Aeroioonide sadestamiseks antakse sisekattele (7) pinge, mille polaarsust saab muuta ja mida saab reguleerida väärtuseni kuni 780 V. Pinget ja õhuvoolu kiirust reguleerides seatakse sobivaks piirliikuvus, millest kõrgema liikuvusega ioonid 100% sadestatakse. Madalama liikuvusega aeroioone sadestatakse osaliselt ja võrdeliselt nende liikuvusega. Piirliikuvuse reguleeritavus  $0,0001 - 8 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  võimaldab integraalse loenduri abil uurida ka aeroioonide liikuvusjaotust, seda aga ainult väga jämedas jaotuses. Kitsa liikuvusfraktsiooni kontsentratsiooni määramiseks peaks integraalse kon-

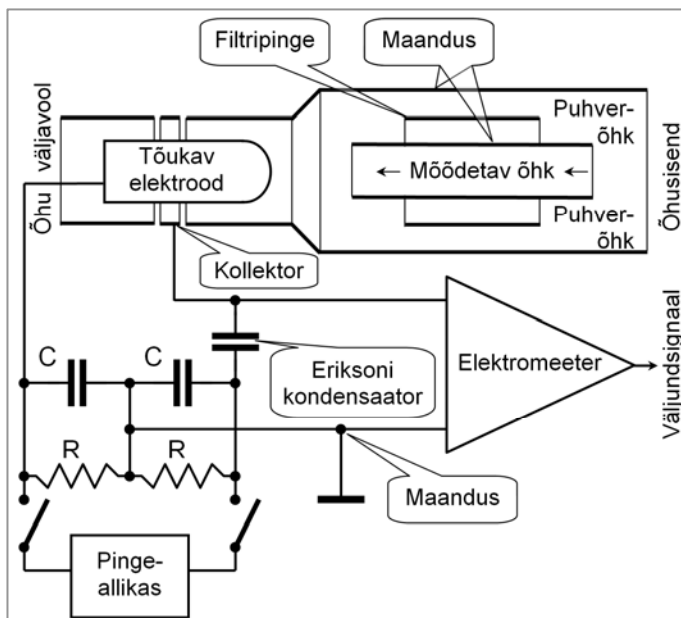


Joonis 1. Integraalse aeroioonide loenduri silindrilise mõõtekondensaatori ristlõige.

densaatori volt-ampertunnusjoonest arvutama diferentse. Aeroioonide kontsentratsioon aga varieerub ajas kiiresti ja diferentside mõõtemääramused on lubamatult suured.

Liikuvusjaotuse uurimiseks kasutatakse diferentsiaalseid aspiratsioonkondensaatoreid. Aerosooliuuringutes on üldkasutatav teist järku diferentsiaalne mõõtekondensaator, mida tähistatakse sageli tähekombinatsiooniga DMA (*Differential Mobility Analyzer*). Terminid “integraalne”, “esimest järku diferentsiaalne” ja “teist järku diferentsiaalne” võeti kasutusele artiklis [Tammet, 1960] ja nad kujunesid hiljem üldkasutatavaks tänu artiklile [Hoppel, 1981].

DMA põhimõtet selgitaval joonisel 2 on esitatud esimese pideva skaneerimisega liikuvusspektromeetri [Tammet jt, 1977] skeem. Suurem osa õhuvoolust läbib puhverõhu filtrit, kus aeroioonid eemaldatakse elektrivälja abil.



Joonis 2. Teist järku telg-sümmeetrilise diferentsiaalse mõõtekondensaatoriga aeroioonide spektromeetri UT-7509 põhimõtteskeem.

Mõõdetav õhk siseneb läbi elektrivälja varjestava keskmise toru mõõtekondensaatorisse, kus tõukava elektroodi poolt tekitatud elektrivälja kallutab valitud liikuvusega aeroioone nii, et suure liikuvusega aeroioonid sadestuvad juba enne kollektorit ja väikese liikuvusega aeroioonid läbivad mõõtekondensaatori tõukava elektroodi pinna lähedalt üldse sadestumata. Elektromeetriga ühendatud kollektorile sadestuvad täielikult ainult valitud aeroioonid, mille liikuvust nimetatakse ülekandefunktsiooni ehk aparadifunktsiooni keskliikuvuseks. Keskliikuvus sõltub tõukava elektroodi kallutavast pingest. Ühe kollektoriga DMA puhul on liikuvusjaotuse mõõtmiseks tarvis teha hulk üksikmõõtmisi ülekandefunktsiooni keskliikuvuse erinevate väärtuste juures. Seda protsessi nimetatakse skaneerimiseks. Kirjeldatavas spektromeetris laetakse



kondensaatorid C algselt kõrge pingeni. Siis avatakse lülid ja lastakse kallutatavat pinget muutuda kondensaatorite eksponentsiaalse tühjenemise käigus. Mõõtmist häirib pinge muutumisel kollektorile elektrostaatiliselt indutseeritud vool, mis ületab suurelt aeroioonide voolu. Vaadeldud riistas on lahenduseks Eriksoni [1921] meetod indutseeritud voolu kompenseerimiseks sildlülituse abil. Spektromeeter UT-7509 on tänaseni kasutusel ja sellega on saadud rida tulemusi õhu lisandgaaside mõjust aeroioonide liikuvusjaotusele [Parts, Luts, 2004].

Atmosfääriuringute puhul on aspiratsioon-spektromeetrite arendamisel üheks põhiülesandeks tundlikkuse ja lahutusvõime parandamine. Üks võimalus on kasutada ühes DMA-s mitut kollektorit. Esimest Tartus ehitatud mitmekanalist liikuvusspektromeetrit kirjeldatakse artiklis [Tamm et al., 1973]. Tahkuse Õhu-seirejaamas kasutatav kolmest mitmekanalilisest spektromeetrist koosnev süsteem [Tamm et al., 1987; Hörrak, 2001] oli pikka aega maailmas kõige täiuslikum ja produktiivsem aeroioonide uurimise seade ja see ka täna kasutusel. Kaasajal kõige täiuslikum mitmekanaliline liikuvusspektromeeter NAIS [Mirme et al., 2007] on kujunenud atmosfääriaerosooli nukleatsiooniuuringute Helsingi koolkonna üheks põhiinstrumendiks [Kulmala, Tamm et al., 2007]. Selle aparaadiga tehakse pidevaid mõõtmisi Soomes, Rootsis ja Eestis ning mõõtmiskampaaniaid on korraldatud ka 3,5 km kõrgusel Šveitsi Alpides, Atlandi ookeanil, Antarktises ja Austraalias.

#### SKANEERIV LIIKUVUSSPEKTROMEETER SIGMA

Skaneeriv spektromeeter jääb mitmekanalilisele alla informatsiooni kogumise kiirusele, on aga lihtsam ja ühtaegu vaba kahest mitmekanalilise spektromeetri puudusest. Üks nendest on kaliibrimise tülikus, sest iga kanal vajab eraldi kontrollmõõtmist ja mitmekanalilise spektromeetri kaliibrimiseks on tarvis ter- vet standardaeroioonide süsteemi [Asmi et al., 2009]. Skaneeriva spektromeetri kaliibrimiseks piisab aga ühest standardaeroioonide allikast. Selle tõttu kasutatakse mitmekanaliliste spektromeetrite kontrollkaliibrimisel skaneerivat spektromeetrit kui referentsriista [Asmi et al., 2009]. Teiseks on mitmekanalise spektromeetri korral raske kindlaks teha, kas mingi lokaalne iseärasus registreeritud spektris on füüsikalist päritolu või on see spektromeetri üksikkanali rikke tulemus. Skaneerivas spektromeetris mõõdetakse kogu liikuvusspekter ühe ja sama elektromeetri abil ja analoogilist probleemi ei teki.

Spektromeetri SIGMA (*Symmetric Inclined Grid Mobility Analyzer*) eelkäijateks on IGMA (*Inclined Grid Mobility Analyzer*) [Tamm et al., 2003] ja BSMA (*Balanced Scanning Mobility Analyzer*) [Tamm et al., 2006]. Kõigi kolme liikuvuspiirkond on ühtviisi  $0,032\text{--}3,2\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ja osakeste diameetrite piirkond  $0,4\text{--}7,5\text{ nm}$ . IGMA on esimene aeroioonide spektromeeter, milles realiseeriti Loscertalesi [1998] kaldväljameetod. Seda aparati kasutatakse atmosfääriaerosooli nukleatsiooni uurimiseks Minnesota Ülikoolis [Lida et al., 2006]. IGMA puhul kogutakse liikuvuse järgi eraldatud aeroioonid autonoomses elektrifilt-

ris, mis on kallutavast väljast varjestatud. BSMAAs kogutakse aeroioone aga otse kallutava elektrivälja toimel samuti kui joonisel 2 kujutatud spektromeetris. Kaasnev elektrostaatiliselt indutseeritud häiresignaal kompenseeritakse kahest mõõtekondensaatorist koosneva Komarovi mahtuvussilla abil [Komarov jt, 1961]. BSMA pikaajalise kasutamise kogemused Soomes Hyytiäläs ja Eestis Tartus näitavad, et kõrge niiskuse korral on mahtuvussilla ebastabiilsusest tulenevad juhuslikud mõõtmisvead häirivad. Sellepärast kasutatakse SIGMAAs varjestatud kollektorfiltrid, nagu ka IGMA puhul.

Spektromeetri projekteerimisel kasutati numbrilist mudelit, mis lahendas Laplace ülesande Jacobi-Seideli meetodi abil 0,1 mm sammuga võrgul. Järgnevalt arvutati aeroioonide trajektoorid ning vood ja lõpptulemusena aparaadifunktsioon, mis näitab monomobiilsete aeroioonide kollektorivoolu sõltuvust kallutavate elektrootide pingetest. Numbriline mudel võimaldab elektrootide asendeid suvaliselt muuta ja arvutikatsete tulemusena leiti põhimõtteliselt uudne võimalus koguda nii positiivseid kui negatiivseid aeroioone üheaegselt ühest ja samast õhujoast. See välistab tavakohase kahe õhusisendi korral erinevatest sissetõmbeavadest põhjustatud võimaliku vea.

Joonisel 3 näidatud tasaparalleelsetest plaatidest koosneva mõõtekondensaatori pikkus on 36 cm ja kõrgus risti joonisega 24 cm. Õhk siseneb läbi ühemillimeetriteliste avadega võre, mis takistab putukate ja ebemete pääsu mõõtekondensaatorisse. Suur õhukulu (ca 34 liitrit sekundis) minimeerib aeroioonide proovivõtmist häiriva välise elektrivälja toime. Mitmekanaliste spektromeetritega võrreldes on paljukordselt suurema õhukulu olulisem põhjus aga vajadus koguda piisaval hulgal aeroioone aparaadis, milles on vaid kaks elektromeetrit.

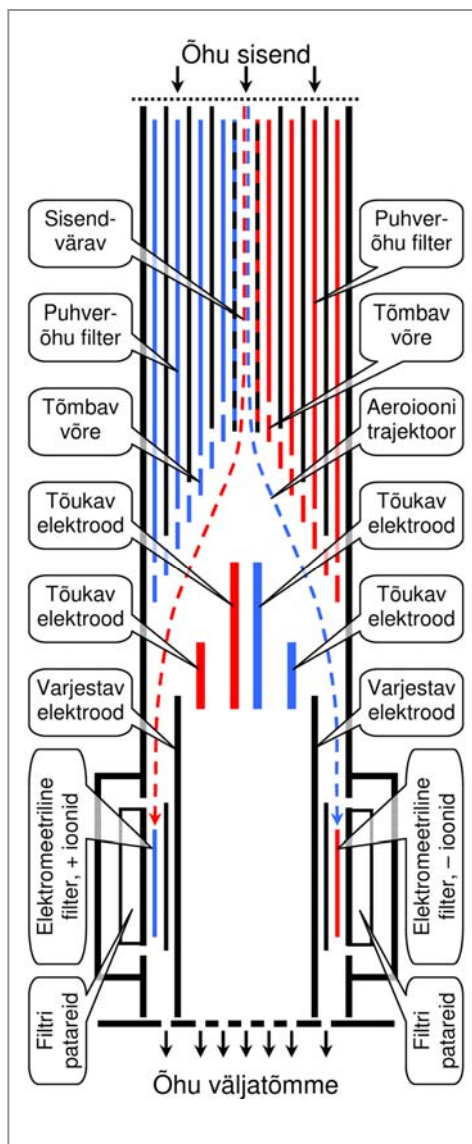
Sisendvõre läbinud õhk satub paljudest plaatidest koosnevasse eelfiltrisse. Eelfiltri keskmist sektsiooni saab külgsuunas pingestades või maandades elektriliselt lukustada või avada. Enamus õhust läbib pingestatud plaatidega puhverõhu filtreid, mis sadestavad välja ka suure osa mõõtmispiirkonnast madalama liikuvusega aeroioone. Tulemusena mõõdavad elektromeetritelised kollektorfiltrid värvat läbinud ja elektrootide poolt filtrisse kallutatud kitsas vahemikus asuva liikuvusega aeroioonide hulka.

Esimeses kaldväljaga spektromeetris IGMA olid nii tõukav kui tõmbav elektroot valmistatud perforatsiooniga metall-lehtedest. Katsed näitasid, et kaldasendis perforatsiooniga läbinud õhuvool on tugevalt moonutatud ja aeroioonide liikumist ei õnnestu piisavalt täpselt numbriliselt modelleerida. SIGMA tõmbav võre on aga ribikonstruktsiooniga ega moonuta õhuvoolu. Tõukavate elektrootide asendid optimeeriti arvutimudeli abil. Elektromeetritega ühendatud kollektorfiltritesse kallutatud aeroioonid sadestatakse filtri sisemises elektriväljas. Kollektorelektroot pingestatakse filtri külge kinnitatud 240 V patarei abil. Teades voolutugevuse sõltuvust tõmbava võre ja tõukavate elektrootide vahelisest kallutavast pingest, saab arvutada aeroioonide jaotuse liikuvuse järgi. Lisaks on spektromeeter varustatud ka temperatuuri- ja õhurõhu anduritega

ning nende andurite näite kasutades arvutatakse liikuvusjaotuse järgi ka aeroioonide diameetrijaotus.

Kallutuselektroodide pinge allikaks on 6 kV väljundiga isoleeritud pingemuundur, mille toidet saab juhtarvuti abil sisse ja välja lülitada. Pingemuunduri väljundisse on lülitatud kondensaatorid ja täppistakistid nii, et pärast toite väljalülitamist hakkab pinge eksponentsiaalselt kahanema ajateguriga 3,8 sekundit. 20-sekundiline periood on piisav selleks, et pingestada kallutuselektroodid, registreerida kondensaatorite tühjenemise käigus 100 korda sekundis nii kallutuspinged kui elektromeetrite näidud, ning lõpuks töödelda ja salvestada kogutud andmed. Mõõtmisprotsessis tehakse regulaarselt (tavaliselt iga kolmas skaneerimine) ka suletud sisendväravaga mõõtmisi. See võimaldab hiljem arvutuslikult elimineerida vigu, mille põhjuseks on mõninga hulga madala liikuvusega aeroioonide pääsemine kollektorisse läbi puhverõhu filtri ning kallutuspinge muutumisel elektrostaatiliselt indutseeritud häiresignaal.

Pikaajalised katsetused näitasid, et standardsete 5-minutiliste mõõtmistsüklite puhul on aeroioonide liikuvusfraktsioonide juhusliku vea standardhälve ka halbade välistingimuste (uduvihm ja kõrge niiskus) korral  $ca 1 \text{ cm}^{-3}$ , mis on ligi suurusjärgu parem kui seni kasutusel olnud skaneeriva spektromeetri BSMA puhul.

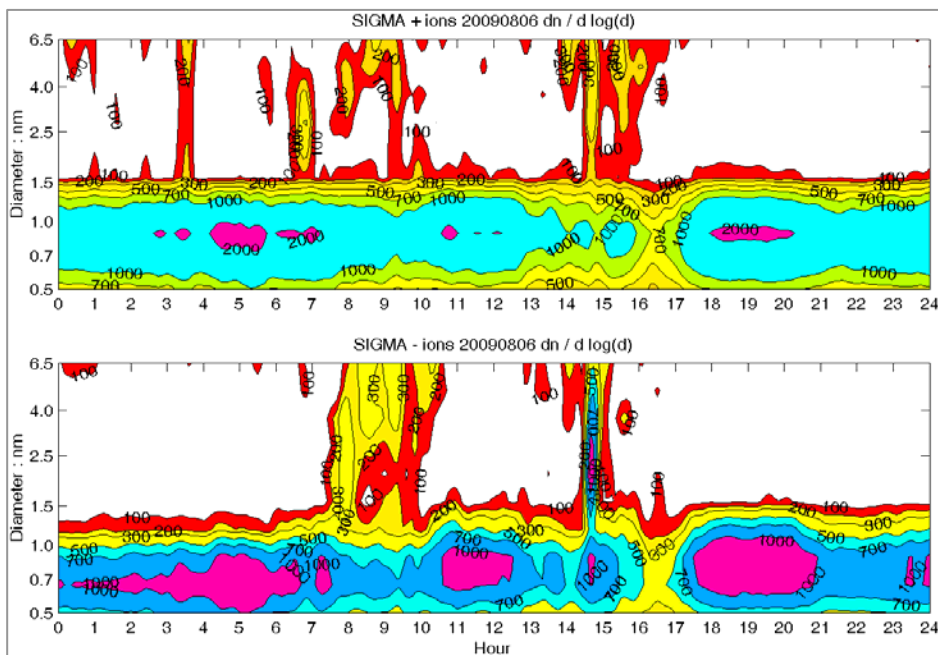


Joonis 3. SIGMA mõõtekondensaatori lõige ülaltvaates.

Positiivsed elektroodid on kujutatud punase, negatiivsed elektroodid sinise ja nullilähedase potentsiaaliga elektroodid musta värviga. Vahelduva värviga värvaelektroodid võivad olla neutraalsed (värav avatud) või pingestatud (värav suletud).

## MÕÕTMISNÄIDE

Joonisel 4 on kujutatud aeroioonide mõõtmejaotuse evolutsiooni looduslikus õhus ühe ööpäeva jooksul ja joonis 5 esitab samu mõõtmistulemusi valitud viietunnilises ajavahemikus üksikasjalikumalt. Diagrammi isojoontel näidatud arvud on aeroioonide kontsentratsiooni jaotusfunktsiooni väärtused osakeste läbimõõdu kümnendlogaritmiga järgi. Jaotusfunktsiooni väärtusi mingil ajamendil näitab vastava vertikaali värvijaotus.



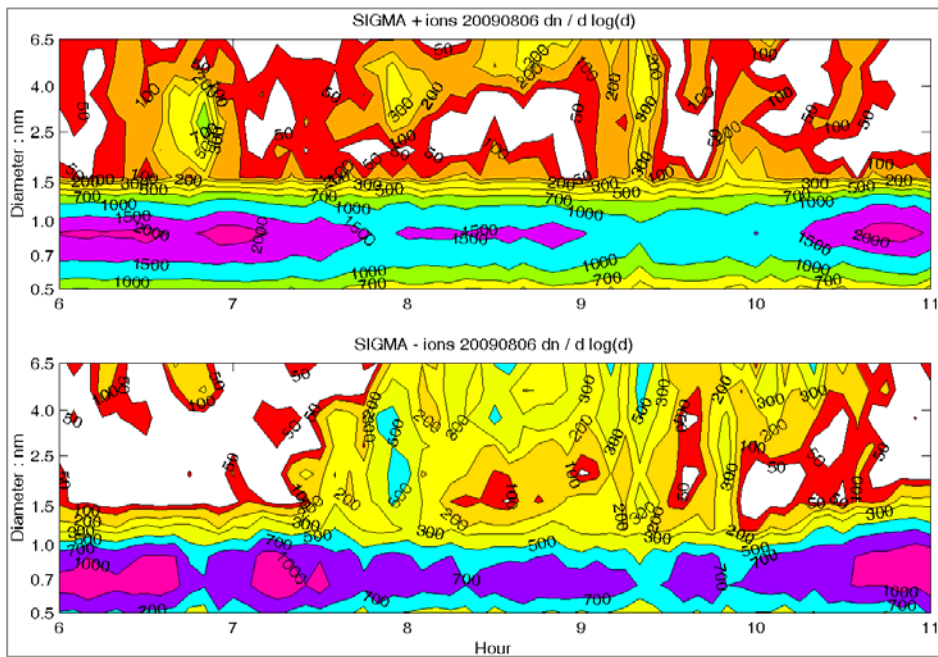
Joonis 4.

Aeroioonide mõõtmejaotuse evolutsioon 6. augustil 2009. a vaatluskohas 58°05'39" N & 26°43'09" E.

Ülemine diagramm näitab positiivsete ja alumine negatiivsete osakeste diameetrite jaotust.

Kõige silmatorkavam protsess on iseloomulik nukleatsioonipuhang ajavahemikus 7.30 kuni 10.30. Võib tähele panna, et negatiivseid 2–5 nm läbimõõduga osakesi tekkis selles puhangus positiivsetega võrreldes oluliselt rohkem. Neutraalseid osakesi liikuvusspektromeeter ei näita. Kui osakesed oleks sündides neutraalsed, siis peaks klasterioonidega põrkudes tekkima enam-vähem samavõrra nii negatiivselt kui positiivselt laetud nanomeetrosakesi. Negatiivsete osakeste suur ülekaal vihjab ebasümmeetriliseleioon-indutseeritud nukleatsioonile, mille puhul osakesed teevad negatiivsete klasterioonide kasvamisest üle kriitilise 1,5 nm piiri. Aja jooksul kasvamine jätkub,

mõned osakesed neutraliseeruvad ja mõned võivad ka ümber laaduda. Diagrammil näha olev “samm” on veidi paremale kaldu (vt joonis 5), põhjuseks tekkivate nanomeeterosakeste jätkuv kasvamine. Kasvu kiiruseks näib olevat tublisti üle kümne nanomeetri tunnis, mis on veidi üle tavakeskmise.



Joonis 5.

Üksikasjalikum väljavõte joonisel 4 kujutatud aeroioonide mõõtmejaotuse evolutsiooni diagrammist.

Teise silmatorkava protsessi (ajavahemik 14.20–15.00) põhjuseks oli hoovihm. Maapinnale langevate veetiljade laialipritsimine tekitab valdavalt negatiivseid nanomeeterioone. Balloelektriliseks efektiks nimetatud nähtust tuntakse ja uuritakse juba üle saja aasta, kuid selle füüsikalisest olemusest pole ikka päriselt aru saadud. Vee pritsimine ei tekita klasterioone, vaid otse nanomeeterosakesi. Uuemate katsetulemuste [Tammet jt, 2009] järgi osutuvad 2–3 nm läbimõõduga osakesed eriliselt stabiilseteks, mis näib olevat vastuolus Kelvini teooriaga. Ühe hüpoteesi kohaselt tekitab balloelektriline efekt aga erilisi 2,5 nm läbimõõduga stabiilseid superklastreid, milles vee molekulid korrastuvad nagu ikosaedriline kristall [Chaplin, 1999].

Joonisel 4 on näha veel kaks huvitavat ja teineteisest oluliselt erinevat protsessi kell 3.30 ja kell 6.45, mille puhul tekivad ainult positiivsed nanomeeterosakesed. Nende protsesside seletamine ei ole tänasele teadusele veel jõukohane.

## TÄNUAVALDUSED

Autor tänab kõiki kolleege, kelle kaastöö oli tulemuste saavutamisel oluline. Eriline tänu kuulub Jaan Salmile, Eduard Tammele ja Urmas Hörrakule ning Helsingi Ülikooli aerosooliuuringute juhile Markku Kulmalale. Uurimistööd toetasid TKN sihtprogramm SF0180043s08 ja ETF grant 8342.

## KIRJANDUS

Asmi, E., Sipilä, M., Manninen, H. E., Vanhanen, J., Lehtipalo, K., Gagné, S., Neitola, K., Mirme, A., Mirme, S., Tamm, E., Uin, J., Komsaare, K., Attoui, M., Kulmala, M. (2009). Results of the first air ion spectrometer calibration and intercomparison workshop. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 141-154.

Bondo, T., Enghoff, M. B., Svensmark, H. (2010). Model of optical response of marine aerosols to Forbush decreases. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 2765-2776.

Chaplin, M. F. (1999). A proposal for the structuring of water. *Biophys. Chem.*, 83, 211-221.

Charry, J. M., Kavet, R. I. (1987). *Air ions: physical and biological aspects*. CRC Press, Boca Raton, FL.

Eiceman, G. A., Karpas, Z. (2005). *Ion Mobility Spectrometry*. CRC Press, Boca Raton, FL.

Erikson, H. A. (1921). The change of mobility of the positive ion with age. *Phys. Rev.*, 18, 100-101.

Harrison, R. G., Tammet, H. (2008). Ions in the terrestrial atmosphere and other solar system atmospheres. *Space Sci. Rev.*, 137, 107-118

Hoppel, W. A. (1981). The use of differential mobility analyzers of second order in determining the aerosol size distribution. *J. Aerosol Sci.*, 12, 55-57.

Hörrak, U. (2001). *Air ion mobility spectrum at a rural area*. Dissertationes Geophysicales Universitatis Tartuensis, 15. Tartu Univ. Press, Tartu.

Hörrak, U., Iher, H., Luts, A., Salm, J., Tammet, H. (1994). Mobility spectrum of air ions at Tahkuse Observatory. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 99, 10697-10700.

Hörrak, U., Salm, J., Tammet, H. (2000). Statistical characterization of air ion mobility spectra at Tahkuse Observatory: Classification of air ions. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 105, 9291-9302.

Iida, K., Stolzenburg, M., McMurry, P., Dunn, M. J., Smith, J. N., Eisele, F., Keady, P. (2006). Contribution of ion-induced nucleation to new particle formation: Methodology and its application to atmospheric observations in Boulder, Colorado. *J. Geophys. Res.*, 111, D23201.

Israël, H. (1970). *Atmospheric electricity*, vol. I. Israel Program for Sci. Transl. & NSF, Jerusalem.

- Komarov, N. N., Kuzmenko, M. D., Seredkin A. A. (1961). Counter of atmospheric ions. *Izv. AN SSSR, Ser. Geofiz.*, 1875-1881.
- Kulmala, M., Riipinen, I., Nieminen, T., Hulkkonen, M., Sogacheva, L., Manninen, H. E., Paasonen, P., Petäjä, T., Dal Maso, M., Aalto, P. P., Viljanen, A., Usoskin, I., Vainio, R., Mirme, S., Mirme, A., Minikin, A., Petzold, A., Hörak, U., Plaß-Dülmer, C., Birmili, W., Kerminen, V.-M. (2010). Atmospheric data over a solar cycle: no connection between galactic cosmic rays and new particle formation. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 1885-1898.
- Kulmala, M., Tammet, H. (2007). Finnish-Estonian air ion and aerosol workshops. *Boreal Environ. Res.*, 12, 237-245.
- Loscertales, I. G. (1998). Drift differential mobility analyzer. *J. Aerosol Sci.*, 29, 1117-1139.
- Matisen, R., Miller, F., Tammet, H., Salm, J. (1992). Air ion counters and spectrometers designed in Tartu University. *Acta Comm. Univ. Tartu*, 947, 60-67.
- Mirme, A., Tamm, E., Mordas, G., Vana, M., Uin, J., Mirme, S., Bernotas, T., Laakso, L., Hirsikko, A., Kulmala, M. (2007). A wide-range multi-channel Air Ion Spectrometer. *Boreal Environ. Res.*, 12, 247-264.
- Mitt, A. (1946). Molioonide tiheduse kõikumine atmosfääris Tartus 1937. a. *Acta Comm. Univ. Tartu, Füüsika ja keemia*, 2, 3-42.
- Parts, T.-E., Luts, A. (2004). Observed and simulated effects of certain pollutants on small air ion spectra: I. Positive ions. *Atmos. Environ.*, 38, 1283-1289.
- Ram, M., Stolz, M. R., Tinsley, B. A. (2009). The terrestrial cosmic ray flux: Its importance for climate. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, 90, 44, 397-398.
- Reinet, J. (1958). Atmosfääri ionisatsiooni muutustest Tartus aastase perioodi vältel. *Acta Comm. Univ. Tartu*, 59, 71-107.
- Svensmark, H., Calder, N. (2007). *The Chilling Stars: A New Theory of the Climate Change*. Icon Books, Cambridge.
- Svensmark, H., Friis-Christensen, E. (1997). Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage-a missing link in solar-climate relationships. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 59, 1225-1232.
- Tammet, H. (1970). *The Aspiration Method for the Determination of Atmospheric Ion-Spectra*. Israel Program for Sci. Transl. & NSF, Jerusalem.
- Tammet, H. (1995). Size and mobility of nanometer particles, clusters and ions. *J. Aerosol Sci.*, 26, 459-475.
- Tammet, H. (1998). Air ions. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 79th edition, CRC Press, Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo, Sect. 14, 32-34.

- Tammet, H. (2003). Method of inclined velocities in the air ion mobility analysis. Proc. of the 12th Int. Conf. on Atmospheric Electricity, Vol. 1, Versailles, 399-402.
- Tammet, H. (2006). Continuous scanning of the mobility and size distribution of charged clusters and nanometer particles in atmospheric air and the Balanced Scanning Mobility Analyzer BSMA. Atmos. Res., 82, 523-535.
- Tammet, H., Hörrak, U., Kulmala, M. (2009). Negatively charged nanoparticles produced by splashing of water. Atmos. Chem. Phys., 9, 357-367.
- Tammet H., Hörrak U., Laakso L., Kulmala M. (2006). Factors of air ion balance in a coniferous forest according to measurements in Hyytiälä, Finland. Atmos. Chem. Phys., 6, 3377-3390.
- Tammet, H., Salm, J., Iher, H. (1988). Observation of condensation on small air ions in the atmosphere. Atmospheric Aerosols and Nucleation. Lecture Notes in Physics, Springer-Verlag, Vienna, 309, 239-240,
- Tammet, H. F. (1960). Contribution to theory of aspiration counters of air ions. Izv. Acad. Nauk ser. geofiz., 1263–1270. (in Russian).
- Tammet, H. F. (1975). Dependence of the spectrum of small ion mobilities on the trace admixtures in air. Acta Comm. Univ. Tartu, 348, 3-15. (in Russian).
- Tammet, H. F., Hilpus, A. O., Salm, J. J., Üts, E. J. (1977). An air ion spectrometer for the detection of some admixtures in air. Acta Comm. Univ. Tartu, 409, 84-88. (in Russian).
- Tammet, H. F., Jakobson, A. F., Salm, J. J. (1973). Multi-channel automatic air ion spectrometer. Acta Comm. Univ. Tartu, 320, 48-75. (in Russian).
- Tammet, H. F., Miller, F. G., Tamm, E. I., Bernotas, T. P., Mirme, A. A., Salm, J. J. (1987). Instrumentation and methods for mobility spectrometry of small air ions. Acta Comm. Univ. Tartu, 755, 18-28. (in Russian).



*Teaduspreemia keemia ja molekulaarbioloogia alal uurimuste tsükli  
"Inimese polügeenseid kompleksstunnuseid reguleerivad genoomilõigud"  
eest*



*Maris Laan*

Sündinud 21.02 1968 Tallinnas

1986 Tallinna 7. keskkool

1992 Tartu Ülikool, bioloogia

1995 filosoofialitsensiaat (PhLic), geneetika, Helsingi Ülikool

1997 PhD, geneetika, Helsingi Ülikool

1996–1998 külalisteadur ja järel doktor, Ludwig-Maximilians-Universität München, Saksamaa

1999–2000 teadur, Marine Biological Laboratories (MBL), Woods Hole, USA

Alates 2002 Tartu Ülikooli Molekulaar- ja Rakubioloogia Instituudi teadur, vanemteadur, biotehnoloogia erakorraline professor, inimese molekulaargeenetika professor

Avaldanud 42 teaduspublikatsiooni

## UURIMISTÖÖ TAUSTAST

Inimese geneetikute tähelepanu on viimase kümne aasta jooksul nihkunud monogeensete haiguste (ühe geeni ühest mutatsioonist põhjustatud haigused) uurimiselt komplekstunnuste ja -haiguste geneetilise tausta selgitamisele. Ees-  
tis on levinuim monogeenne haigus tsüstiline fibroos, mida põhjustavad mutatsioonid *CTFR* geenis (1/4500 vastsündinust; [Klaassen jt, 1998]). Tegelikult on peaaegu kõik füsioloogilised, anatoomilised, käitumuslikud jne omadused komplekstunnused ning suurem osa meid kimbutavatest tõvedest kompleks-  
haigused.

KOMPLEKSTUNNUSTE JA -HAIGUSTE AVALDUMINE SÕLTUB PÄRILIKKUSE “KOKKUMÄNGUST” VÄLISTE MUUTUJATEGA, NAGU INIMESE ELUSTIIL (toitu-  
mis- ja liikumisharjumused, suitsetamine jne) ning KESKKONNA TEGURID (nakkused, stress jne). Näidetena komplekstunnustest on inimese antropomeet-  
rilised omadused, nagu pikkus, naha- ja juuksevärv, vererõhk ja vereseerumi lipiidide/hormoonide tase, aga ka isiksuseomadused. Üldlevinud komplekshai-  
guste näiteks on kasvajakasv, südameveresoonekonna ja neuroloogilised haigused, allergiad, viljatus.

Teadlaskonnas ja ka ühiskonnas on jätkuv diskussioon teemal, millised on PÄRILIKKUSE JA VÄLISTE MUUTUJATE SUHTELISED ROLLID komplekstunnuste ja -haiguste avaldumisel.

PÄRILIKKUST defineerime kui seda osa fenotüüpselt varieeruvusest populatsioonis, mille määrab geneetiline varieeruvus. Mõnede tunnuste puhul, nagu pikkuskasv või naha ja juuste pigmentatsioon, on ilmselgelt ülekaalus pärilik komponent. Aga paljude tunnuste ning haiguste puhul on geneetilist faktorit üheselt raske määrata. Tegelikult on olukord keerulisem kui trajektoori geenkeskkond omavaheline koosmõju, sest iga komplekstunnuse avaldumine tuleb paljude geenide variantide 'komplektist', mida inimene on vanematelt pärinud. Sealjuures on igal konkreetsetel geenivariandil eraldi seisvalt väike mõju (tabel 1). Komplekstunnuseid ja -haiguste pärilikkust iseloomustab POLÜGEENSUS (st defineeritud mitmete geenide poolt), GENEETILINE HETEROGEENSUS (st mõjutatud paljude erinevate DNA variantide poolt), geeni(de) variantide omavaheline INTERAKTSIOON ning ka seos EPIGENEETILISTE modifikatsioonidega. Viimaste puhul ei mõjuta geeni avaldumise ja toime spektrit mitte varieeruvused DNA järjestuse baasil, vaid kromatiini üldisemad omadused selles genoomses piirkonnas. Komplekshaiguste puhul on geneetika uuringuid raskendavateks asjaoludeks veel haiguste avaldumine hilises eas ning heterogeensed sümptomid ja kulg.

Tabel 1.

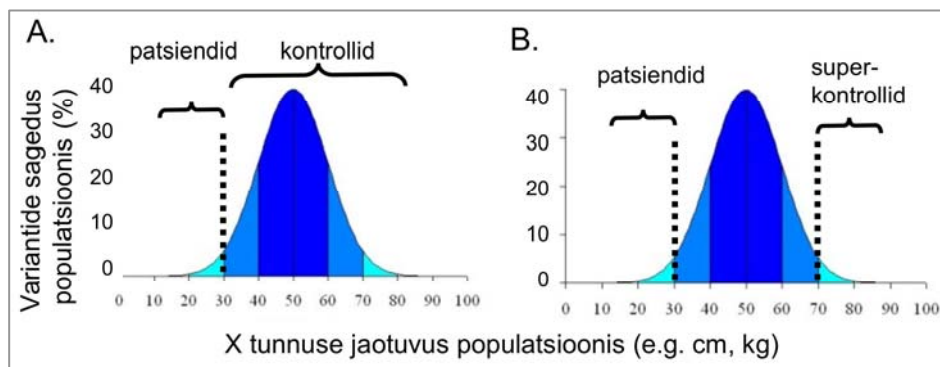
Näiteid komplekshaiguste geenivariantide kaardistamise edukusest [Manolio jt, 2009].

Haigus	Tuvastatud geenide arv	Osakaal pärilikkusest, mida tuvastatud geenid ja variandid seletavad
silma kollatähni degenerereerumine eakatel	5	50%
Crohn'i haigus	32	20%
süsteemne erütematoosne luupus	6	15%
tüüp 2 diabeet	18	6%
HDL kolesterooli tase	7	5,2%
pikkuskasv	40	5%
varajane müokardi infarkt	9	2,8%
glükoosi baastase vereseerumis	4	1,5%

Erinevalt monogeensetest tunnustest, mille puhul üks konkreetne geenivariant määrab kõigil selle kandjatel mingi kindla tunnuse, on polügeensed tunnused kvantitatiivsed. Tuntud monogeensete tunnuste näiteks on sinisilmsus (*OCA2* geenivariant) ja kääbuskasvu eri juhud (mutatsioonid kasvuhormooni geenis *GHI* või fibroblasti kasvufaktori retseptori 3 geenis *FGFR3*). Kvantitatiivse geneetika nurgakiviks sai 1918 a sir Ronald A. Fisher'i poolt avaldatud artikkel "The correlation between relatives on the supposition of Mendelian inheritance" [Sugulaste vaheline sarnasus Mendeli pärilikkuse mudeli alusel].

Fisher näitas, et kvantitatiivse komplekstunnuse jaotuvust saab seletada Mendeli seadustega, kui pärilikkuse mudelis võtta arvesse, et tunnust mõjutavad mitu geeni korraga. Mendeli katsetest oli järeldunud, et kahe võrdse alleeliga geen annab populatsioonis kolm võimalikku genotüüpi, mis esinevad alleelide liitva efekti korral kolme fenotüübi (tunnuse) variandina ning dominantsuse korral kahe variandina. Fisher täiendas seda mudelit, näidates, et kahe geeni kombinatsioon (mudel: võrdsed alleelid, liituv efekt) on aga esindatud populatsioonis juba 9 võimaliku genotüübi ja 5 fenotüübi variandiga. Mitmete geenide variantide kombinatsioonide jaotuvus populatsioonis läheneb pideva tunnuse normaaljaotusele, mille mõlemat serva iseloomustavad populatsioonis harva esinevad genotüüpide kombinatsioonid. Iga üksiku geenivariandi mõju määramine tunnuse jaotuvusele on suur väljakutse.

Inimese kvantitatiivse ehk siis pideva jaotusega tunnuse geneetilise komponendi uurimisel on võimalikud mitu alternatiivset lähenemist. Esimene võimalus on suruda polügeenne tunnus või komplekshaigus traditsioonilise juht-kontroll uuringu raamidesse (joonis 1a). Selle lähenemise miinuseks on uuringu statistilise võimsuse alanemine, sest nn kontrollgruppi jääb alati neid, kes tegelikult on potentsiaalsed patsiendid (näiteks noorte kasutamine 'kontroll-grupis' kuigi enamik komplekshaigusi avaldub alles keskeas või hiljem). Teine võimalus on võrrelda indiviide, kelle fenotüüp asub tunnuse jaotuvuse äärmuslikes servades (joonis 1b). Näiteks võrrelda geenivariantide jaotuvust raske kliinilise hüpertensiooniga patsientide ja väga madala vererõhuga kontrollide vahel. Aga need populatsiooni äärmused võivad kanda harva esinevaid genotüüpide kombinatsioone ja tuvastatud geenid ei mõjutagi antud tunnust üldpopulatsioonis. Ja kolmas, kõige suurema statistilise võimsusega lähenemi-



Joonis 1.

Kaks alternatiivset juht-kontroll uuringu disaini geenivariantide differentseeritud jaotuvuse uurimiseks komplekshaigusega patsientide (või mingit kindlat ekstreemset tunnust kandvate indiviidide) ja kontrollide vahel. Uuringus defineeritud tunnuste alusel määratakse patsientide grupp ja võrreldakse (A) üldpopulatsiooniga või (B) nn super-kontrollidega, kes asuvad tunnuse jaotuse teiseses servas.

ne on kasutada iga indiviidi detailseid andmeid ning testida, kuidas seostuvad geenivariantide ning tunnuse jaotuvus uuritavas kogumalimis.

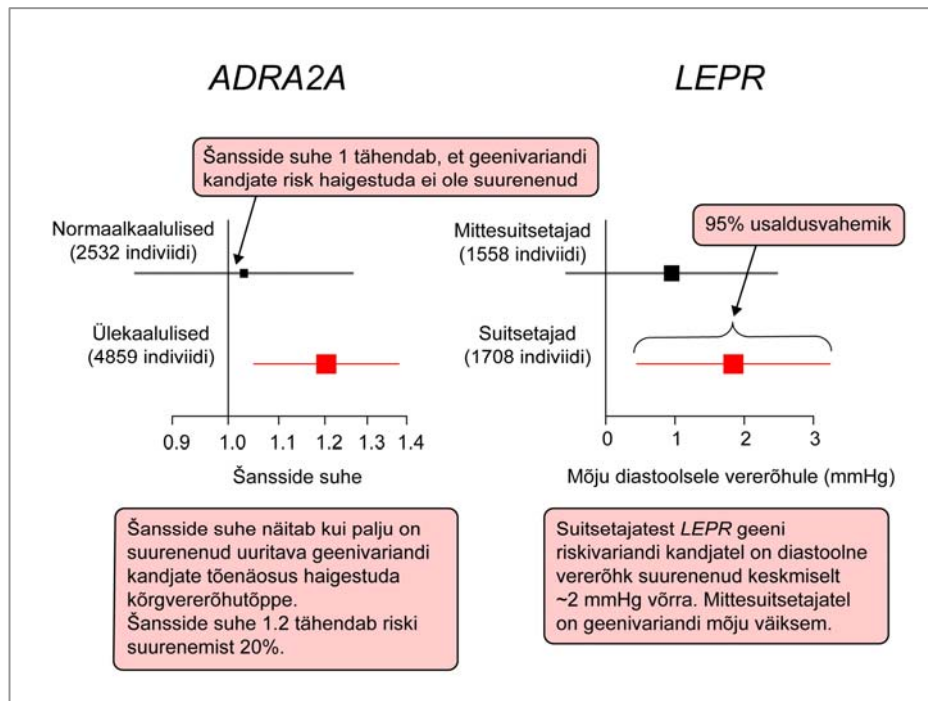
## UURIMISTÖÖ TULEMUSTEST

Järgnevalt käsitlem kahte inimese komplekstunnuseid uurivat alateemat, millesse on meie uurimisrühm viimase 5 aasta jooksul panustanud.

### KOMPLEKSTUNNUSTE GENEETILISE KOMPONENDI KAARDISTAMINE: VERERÕHU REGULATSIOONIS OSALEVAD GEENID JA GENOOMIVARIANDID

Essentsiaalse hüpertensioonina (EH) käsitletakse organismi seisundit, kus peamiseks tunnuseks on arteriaalse vererõhu püsivalt üle normi esinemine (süstoolne vererõhk, SVR >140 ja /või diastoolne vererõhk, DVR >90 mmHg). EH esinemissagedus maailmas on 20–30% [Kearney jt, 2005]. Kuigi kõrge vererõhk ise ei põhjusta tavaliselt haigetele märkimisväärseid komplikatsioone, on see sagedasemaks riskifaktoriks hilisematele südame-veresoonkonna haigustele (nt südameelihaste infarkt, ajurabandus) ning võib viia neerukahjustusteni. Kaksikute ning perekonna-põhiste analüüside andmed näitavad, et 15–40% indiviidide vahelisest vererõhu varieeruvusest on pärilik. Vererõhu taseme geneetilise komponendi uuringud on olnud väljakutse, sest vererõhku reguleerivad mitmed geenid ühiselt, koosmõjul inimese elustiili ja soo-spetsiifilise ainevahetuse ning füsioloogilise seisundiga (joonis 2; [Söber jt, 2009; Padmanabhan jt, 2010]). Teema on aga aktuaalne, sest avastatud vererõhku mõjutavate geenide kodeeritavad molekulid võivad saada potentsiaalseteks sihtmärkideks uutele hüpertensiooni ravimitele ning selle kaudu tõsta suure grupi keskealiste ja eakate inimeste elukvaliteeti.

Traditsiooniliselt on EH-ga seotud genoomilõikude tuvastamiseks kasutatud kolme põhilist lähenemist: (1) päriliku raskekujulise hüpertensiooniga perekondade uuringuid aheldusanalüüsi meetodil, (2) inimese vererõhu regulatsiooni füsioloogia põhjal defineeritud nn kandidaatgeenide variantide assotsiatsiooniuuringuid ja (3) loomudelitel kasutamine, milleks on hüpertensiooni uuringute jaoks aretatud spetsiifilised kõrge vererõhuga rotiliinid [Cowley, 2006; Delles jt, 2010]. Edukaim on siiani olnud monogeensete (Mendeli seaduste alusel päranduvate) hüpo- ja hüpertensiooni vormide kaardistamine, mida põhjustavad erinevad suure efektiga mutatsioonid 15 geenis, mis on valdavalt seotud neerude funktsiooniga hoida organismi vee ja soolade tasakaalu [Lifton jt, 2001]. Kuigi need mutatsioonid seletavad vaid 1% kõigist hüpertensiooni juhtumitest, on avastatud geenid sihtmärkideks ka kompleksse EH uurimisel. Näideteks on *WNK1* ja *WNK4* geenid, mis on seotud neeru elektrolüütide homeostaasi kontrollimisega [Newhouse jt, 2009]. Keerulisem on aga anda hinnangut perekondade ja õdede-vendade materjalide baasil läbi viidud kompleksse raskekujulise EH aheldusanalüüside tulemustele, mis on kaardistanud >100 hüpertensiooniga seotud genoomi piirkonna [Cowley, 2006; Delles jt, 2010].



Joonis 2.

Geenivariantide ja inimese elustiili koostõju vererõhu taseme määramisel: kõrgvererõhktõbi avaldus geeni *ADRA2A* uuritava DNA-variandi puhul ainult ülekaalulistel patsientidel ja geeni *LEPR* analüüsitava geenivariandi puhul kõrgenes diastoolne vererõhk ainult suitsetajatel [Sõber jt, 2009]. Pildi autor: Siim Sõber.

Inimese genoomi järjestuse määramine kümme aastat tagasi, uute genotüüpiseerimise meetodite areng ja kommertsiaalsete kiipide kättesaadavus rajasid tee komplekstunnuste ja -haiguste hüpoteesivabale kaardistamistele üle kogu genoomi. Tänapäevaks on kogu genoomi assotsiatsiooniuringud (*genome-wide association*, GWA) tuvastanud >250 inimese genoomi lõiku, mis on usaldusväärset ja replitseeritavalt seostatud erinevate komplekstunnuste ja/või -haigustega [Frazer jt, 2009]. Mõnede tunnuste puhul, nagu pikkuskasv ja vereseerumi biomarkerite (näiteks lipiidid) tase, aga ka tüüp 2 diabeedi, pärgarterite sündroomi, Crohn'i haiguse esinemine, on see uudne lähenemine olnud väga edukas. Vererõhu päriliku komponendiga seotud geenivariantide kaardistamine on aga osutunud üle ootuste keeruliseks ja siiani on publitseeritud ainult mõned uurimused [Mohlke jt, 2008].

Kogu genoomi haaravad ja sadu tuhandeid geenimarkereid testivad GWA-uringud, mis on olnud edukad uute 'vererõhugeenide' tuvastamisel, on kasutanud kahte alternatiivset strateegiat. Üheks lähenemiseks on olnud analüüsi läbiviimine homogeense geneetilise taustaga populatsioonis ning uuritavate

grupi 'puhastamine' jättes välja näiteks vererõhuravimeid saavad invidiidid, diabeedi ja neeruhaiged patsiendid (kellel on sekundaarne hüpertensioon), rasvtõvega invidiidid (ülekaal kui vererõhku mõjutav faktor) jne. Teine lähenemine on olnud uuritavate grupi maksimaalne suurendamine määran, mil see peaks ületama fenotüübilise (ehk siis valimi kogumise strateegiast tingitud) ja populatsioonilise heterogeensuse efekti. Esimese lähenemisega tuvastati näiteks neerus toimiv serine/threonine kinaasi geen *STK39*, mis oli seotud vererõhuga amishite suletud religioosses kogukonnas (rajatud Pennsylvania's 18. sajandil) [Wang jt, 2009]. Teist lähenemist kasutasid kaks suurt uurimisrühmade konsortsiumi, Global Bogen (34 433 uuritavat invidiidi) ja CHARGE (29 136 uuritavat invidiidi) [Newton-Chen jt, 2009; Levy jt, 2009]. Mõlemad tuvastasid küll 8 uut vererõhku mõjutavat geenivarianti, aga nendest kahe uuringu vahel kattuvaid oli vaid kaks (geenid *CYP17A1*, *SH2B3*)! Aasia päritoluga invidiidide baasil läbi viidud uuringul leiti ainult üks geenivariant (geen *ATP2B1*), mis on seotud vererõhuga ka Euroopa päritolu invidiididel [Cho jt, 2009].

Meie uurimisrühmas läbi viidud GWA-uuring kasutas esimest uuringustrateegiat (joonis 3a). Esimeses etapis teostasime vererõhu GWA uuringu 500 000 geenimarkeriga, kasutades populatsioonipõhist homogeenset KORA S3 valimit (Lõuna-Saksamaa) KORA 500K konsortsiumi raames (koordinaatorid professorid T. Meitinger ja H.-E. Wichmann, München). Leidsime >100 geenomset polümorfismi, millel esines tugev statistiline seos ( $P < 5 \times 10^{-5}$ ) vererõhuga. Vererõhu regulatsiooniga seotud uued geenimarkerid valiti välja kordusanalüüsiks, et kinnitada tõesed seosed ja elimineerida vale-positiivsed tulemused. Korduskatsed teostati sama populatsiooni sõltumatu valimiga (KORA S4) ja ka kahes teises populatsioonis (eestlased, HYPEST; inglased, BRIGHT). Mitmeetapiline uuring päädis potentsiaalse vererõhu regulatsiooni mõjutava geeni *CDH13* tuvastamisega [Org jt, 2009].

### Joonis 3.

Üle kogu geenoomi läbiviidud uuringul uue vererõhu regulatsioonis osaleva geeni *CDH13* tuvastamine:

(A) uuringu disain ja

(B) statistiline assotsiatsiooni analüüs *CDH13* geenomilõigu DNA-variantide seosest vererõhu väärtustega KORA S3 ja replikatsiooni valimites. *CDH13* geeni produkt T-kadheriin on seotud veresoonte loomega (angiogenees), veresoonte sisepinnal ateroskleroosi tekkega ja südamelihaskude toimega. Geenil on laialdane toime ja selle DNA-variante on seostatud lisaks südameveresoontekonna haigustele ka näiteks kasvajatega. Joonis kujundatud artikli Elin Org ja kaasautorid [Org jt, 2009] põhjal.

## A. Uue 'vererõhugeeni' *CDH13* tuvastamine: uuringu disain

Etapp 1: kogu inimese genoomi katva **395912 geenimarkeri** testimine seoses vererõhu näitajatega saksa populatsioonis (KORA S3 kohort)



Etapp 2: Replikatsioonikatse sama populatsiooni teises valimis (KORA S4)  
Testiti etapis 1 positiivse tulemusega **77 geenimarkerit (54 genomilõigus)**

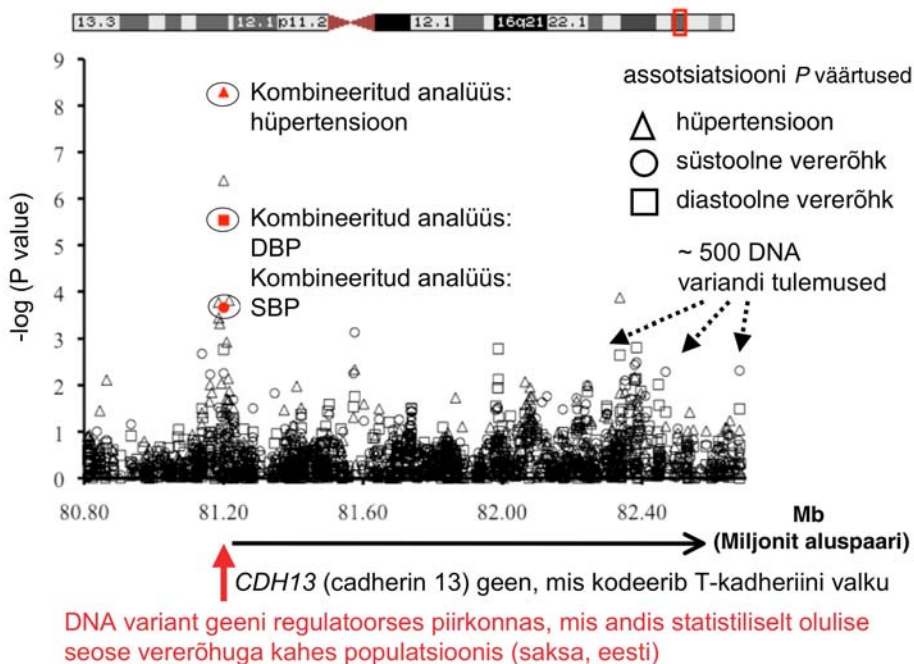


Etapp 3: Replikatsioonikatse teistes Euroopa populatsioonides (Eesti, HYPEST valim; Suurbritannia, BRIGHT valim)  
Testiti etapis 2 positiivse tulemusega **9 geenimarkerit (6 genomilõigus)**



Etapp 4: Kombineeritud meta-analüüs etappidele 1+2+3 (**Joonis 3B**)  
**Ühe** geenimarkeri (***CDH13* geen**) statistiliselt usaldusväärne assotsiatsioon vererõhuga saksa ja eesti valimites, inglastel sama seost toetav trend

## B. *CDH13* geen (kromosoomil 16), mis on seotud vererõhuga





*CDH13* kodeerib rakkude adhesioonis osalevat glükoproteiini T-kadheriini, mis on ekspresseeritud põhiliselt aju ja südame-veresoonkonna rakkudes ning osaleb veresoonte seina remodelleerimises ja angiogeneesis [Ivanov jt, 2001; Takeuchi jt, 2000; Resink jt, 2009]. T-kadheriini toimet seostatakse peamiselt kolme füsioloogilise protsessiga: (i) südame-veresoonkonna funktsioon – kui adiponektiini ja LDL retseptor; seostatud lisaks vererõhule ka pärgarterite sündroomiga ja seerumi adiponektiini tasemega; (ii) aju funktsiooni mõjutaja – kui närvirakkude kasvu regulator; *CDH13* variante on seostatud nii tähelepanu puudulikkuse häirega kui alkoholi sõltuvusega ning (iii) vähkkasvajate teke – *CDH13* genoomilõigu hüpermetülatiooni näiteks rinnavähi korral [Sato jt, 1998; Brock jt, 2008]. Detailsed viited alguuringutele T-kadheriini seoste kohta erinevate fenotüüpidega leiab artiklites [Sato jt, 1998; Ivanov jt, 2001; Takeuchi jt, 2000; Resink jt, 2009; Kyung-Won Hong jt, 2010].

Senini läbiviidud suuremahulised uuringud võimaldavad teha järgmisi järeldusi inimese vererõhu regulatsiooni päriliku komponendi kohta:

- (1) Kuigi pärilikkuse osakaaluks inimese vererõhu määramisel on hinnatud isegi kuni 60%, on tegemist tunnusega, mille varieeruvust mõjutavad sajad väikese efektiga geenivariandid.
- (2) Kuna senini publitseeritud GWA meetodil tuvastatud uued 'vererõhugeenid' valdavalt uuringute vahel ei kattu, siis võib arvata, et olulist rolli tulemustele on avaldanud nii populatsiooni-spetsiifiliste geenivariantide esinemine (sh alleelne heterogeensus ühes geenis [Kyung-Won Hong jt, 2010]), kasutatud valimite ülesehituse erinevus ja fenotüübiliste tunnuste kvaliteet (tegemist on ju dünaamilise komplekstunnusega) kui konkreetne uurimistö disain.
- (3) Tuvastatud geenivariandid seletavad ainult väikese osa vererõhu pärilikkusest. Kusagil meie genoomis on veel tuvastamata geneetilised või epigeneetilised komponendid, mida on hiljuti defineeritud 'missing heritability' [Manolio jt, 2009].
- (4) Kuigi vererõhuga seotud geenivariantide efektid on väikesed, ei anna see meile infot tuvastatud geeni rolli kohta vererõhu määramisel või selle kodeeritava molekuli sobivuse kohta ravim-märklauaks.
- (5) Ükski tuvastatud uus vererõhu tasemega seostatud geenivariant ei asetse genoomilõigus, mida saaks nimetada 'vererõhu-spetsiifiline geen'. Enamik neist geenidest on laiema toimega ja seostatud mitmete kompleks-tunnuste ja -haigustega.
- (6) Kuna inimese sool, harjumustel, elustiilil ja -etapil on oluline roll vererõhu taseme kujundamisel, on oluline järgnevad süvauuringud viia läbi näiteks norm- ja ülekaaluliste seas, suitsetajate ja mittedsuitsetajate seas, vanema ja noorema põlvkonna seas.

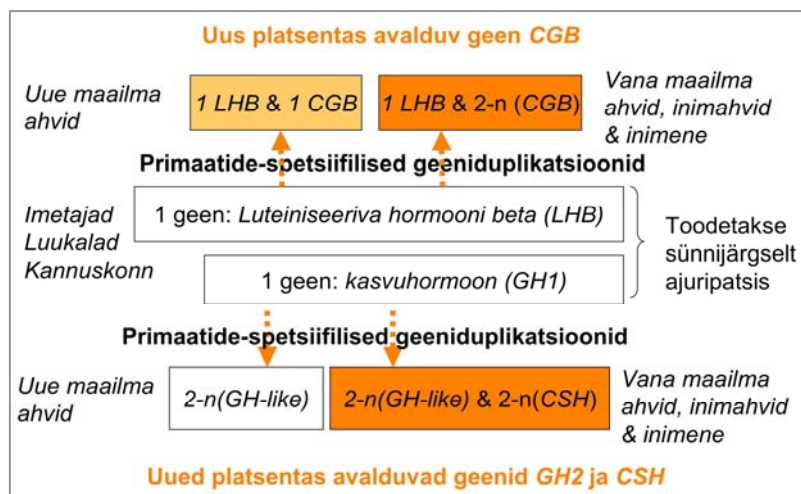
KOMPLEKSTUNNUSEID REGULEERIVATE GENOOMILÕIKUDE DÜNAAMIKA:  
VILJAKUSEGA SEOTUD GEENIDE DUPLITSEERUMINE PRIMAATIDE LIINIL JA  
KIIRENDATUD EVOLUTSIOON

Suur hulk inimese geene on nn “noored” geenid, mis on tekkinud viimase 35 miljoni aasta jooksul primaatide (ahvid ja inimene) liinil toimunud GEENIDUPLIKATSIOONI sündmuste tagajärjel. Geeniduplikatsiooni sündmust võib vaadelda kui esivanemliku genoomilõigu ‘copy-paste’ mehhanismiga paljundamist. Uute duplikaatgeenide suhtes on puhastava loodusliku valiku toime tavapärasest nõrgem, sest geenikoopiaid on mitu. Samas on lisandunud geenikoopiaid ‘materjaliks’ mutageneesile ning seeläbi uute funktsioonide tekkeks [Ohno, 1970]. Sarnaselt aju- ja immuunfunktsiooniga seotud geenidele on primaatide liinil duplitseerunud ja tugeva positiivse valiku all mitmed nii naise- kui mehepoolse viljakusega seotud geenid. Mitu geenikoopiat annab võimaluse evolutsioonilisteks “eksperimentideks”. Positiivse valiku toimet kinnitavad need, mis annavad reproduktiivse eelise. Viljakusega seotud geenide evolutsioon on võimaldanud uut tüüpi platsenta tekke: kõigil inimahvidel on hemokoriaalne platsenta, mille puhul on platsentaarkude vahetus kontaktis ema vereringega, võimaldades platsenta ja loote poolt sünteesitud molekulidel kergesti liikuda ema vereringesse ja vastupidi. Enamikel imetajatel on esivanemlik epiteliokoriaalne platsenta, mille puhul on ainete transport raskendatud. Paralleelselt platsenta struktuursete muudatustega on duplikatsioonide teel tekkinud uued platsentas avalduvad geenid. Kaks näidet primaatide liinil tekkinud uutest genoomilõikudest on *Gonadotropiini Beta subühiku (CGB)* ja *Kasvuhormooni/Platsenta laktogeeni (GH/CSH)* geenid (joonis 4). Raseduse alguse võtmehormooni koorionigonadotropiini (HCG) kodeerivate *CGB* geenide ‘allikaks’ on evolutsiooniliselt konserveerunud Luteiniseeriva hormooni beta (*LHB*) geeni duplikatsioon. Loote kasvu ja arengut ning ema metabolismi reguleerivad platsenta kasvuhormooni ja laktogeeni geenid on esivanemliku ajuripatsi kasvuhormooni geeni *GHI* duplikaadid. Läbiviidud uuringud nende geeniperekonna mudelil võimaldavad teha järgmisi üldistusi inimese genoomi dünaamika kontekstis:

- (1) Duplikaatgeene iseloomustab kiirenenud evolutsioon ja liikidevaheline lahknemine. Selle näiteks on inimese ja šimpansi genoomis toimunud paralleelsed LIIGI-SPETSIIFILISED DUPLIKATSIOONID *LHB/CGB* genoomilõigus, mille tulemusena on neis geenide arv erinev: inimesel 1 *LHB* ja 6 *CGB* geeni, šimpansil 1 *LHB* ja 5 *CGB* geeni [Hallast jt, 2008].
- (2) Üheks olulisemaks duplitseerunud piirkondade evolutsiooni mõjutavaks faktoriks on liigisisene GEENIKONVERSIOON (GK), mis toimub meioosis homologse rekombinatsiooni käigus sarnaste DNA järjestustega (sh geenikoopiaid) genoomilõikude vahel. GK protsess võimaldab asendada ühe DNA lõigu teise homologilise variandiga, mis soodustab polümorfismide

levitamist geenikoopiate vahel, geneetilise varieeruvuse tõstmist, duplikaatgeenide sarnastamist jne [Hallast jt, 2005; Sedman jt, 2008].

- (3) Enamik paljudest DNA variantidest mitme koopiaga *CGB* geenides on neutraalse või minimaalse mõjuga summaarsele HCG tasemele ja loote implantatsiooni protsessile [Rull, Laan, 2005]. Samasse geeniperekonda kuuluva ühe-koopilise *FSHB* puhul piisab aga ühest DNA-asendusest geeni reguleerivas alas, et mõjutada vereseerumis ringleva Folliikuleid-Stimuleeriva hormooni (FSH) kontsentratsiooni. Tuvastatud polümorfismi minoorse alleeli kandjatel on lisaks 25–50% madalamale FSH tasemele ka teisi kõrvalekaldeid (väiksem munandimaht; kõrgem soodumus viljatusele; joonis 5) [Grigороva jt, 2008, 2010].
- (4) Platsenta geenide duplitseerumine võib olla evolutsiooniliseks 'kaitsemehhanismiks', aitamaks hoida kompensatoorse ekspressiooni kaudu vajalikku hormoonide taset ja raseduse säilimist tingimustes, mil ema immuunsüsteem on suunatud aktiivsele tõukereatsioonile. *LHB/CGB* kui *GH/CSH* genoomilõikude regulatsiooni koordineerimise kinnitab üksikute geenide avaldumise taseme kõrge korreleeritus [Rull jt, 2008; Männik jt, 2010].



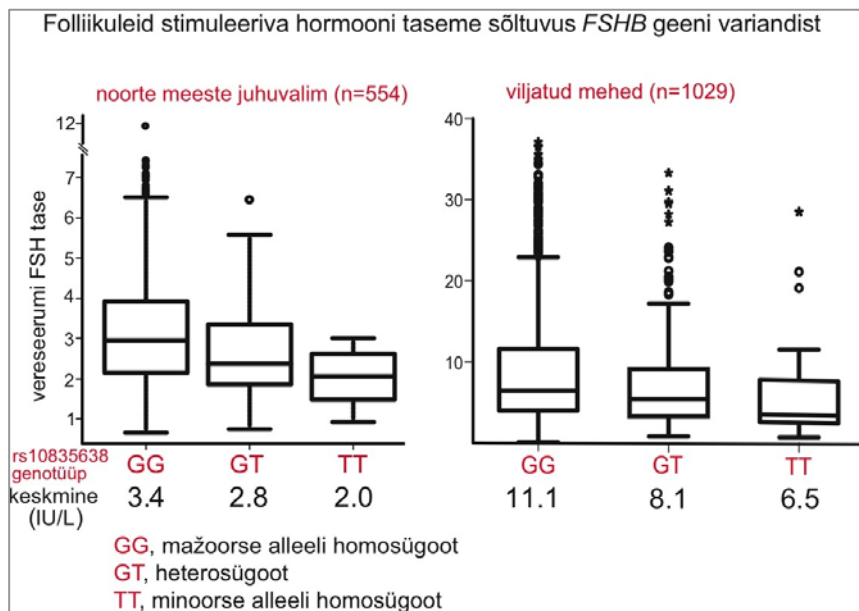
Joonis 4.

Kaks primaatide liinil (inimene ja ahvid) duplitseerunud, raseduse ja loote arenguga seotud genoomilõiku. (I) *Luteiniseeriva hormooni (LH)* ja *koorioni gonadotropiini (HCG) beta* geeniperekond: LH osaleb sekundaarsete sootunnuste, sugurakkude küpsemise ja viljakuse regulatsioonis; HCG reguleerib raseduse normaalset kulgu. (II) *Kasvuhormooni (GH)* ja *koorioni somato-mammotropiini (CSH)* geeniperekond: Ajuripatsi kasvuhormooni (GH1) stimuleerib sünnijärgset kasvu ja ainevahetust; platsenta kasvuhormoonid (GH2, CSH1, CSH2) mõjutavad loote kasvu, ema ja loote vahelist glükoosi transporti.

- (5) Funktsionaalselt lähedased reproduktsiooni ja uue põlvkonna taastootmist mõjutavad ühe-koopialised ja duplikaatgeenid evolutsioneeruvad erineva stsenaariumiga, hoolimata sarnasest evolutsioonilisest survest füsioloogiliselt seotud protsesside suhtes. Geenievolutsiooni põhiliseks 'dirigendiks' on iga genoomilõigu struktuurist lähetuv dünaamika potentsiaal [Hallast, Laan, 2009; Nagirna ja jt, 2010].

#### PLATSENTA GEENID JA SÜDAME-VERESOOKONNA HAIGUSED: MIS ÜHIST?

Lisaks pärilike ja elustiili faktorite koostoimele komplekstunnuste ja -haiguste avaldumisel on pälvimas üha suuremat tähelepanu üsasisesse arengu roll inimese metabolismi programmeerimisel. Alates nn 'Barker'i' hüpoteesi [Barker jt, 1989ab, 2002; Hales jt, 1991] publitseerimisest 1980ndatel aastatel, on ilmunud kümneid epidemioloogilisi töid, mis näitavad täiskasvanuea tervise seost lootea kasvu ja arengu tingimustega. Väikese sünnikaaluga inivididel on suurem risk haigestuda südame-veresoonkonna ja neeruhaigustesse, tüüp 2 dia-



Joonis 5.

Esimene tuvastatud inimese DNA variant, mis on otseses seoses Folliikuleid Stimuleeriva Hormooni (FSH) tasemega vereseerumis meestel. Geenivariant (G/T) asub *FSHB* geeni regulaatoralas, -211 DNA aluspaari geeni algusest. T-alleeli kandjatel heterosügootidel (GT) ja homosügootidel (TT) on progresseeruvalt madalam FSH tase kui GG-genotüübi kandjatel. Madala kaasasündinud FSH tasemega seotud geenivariant on rikastunud viljatute eesti meeste seas [Grigorova jt, 2008, 2010]. Võib tuleeda sellest, et FSH mõju algab juba looteas, kui ta osaleb poisslaste testiste arengus, täiskasvanutel reguleerib spermatogeneesi. Joonise autor: Marina Grigorova.

beeti, kõrgvererõhutõvesse [Barker jt, 1989ab, 2002; Hales jt, 1991; Davies jt, 2006; Frankel jt, 1996; Zandi-Nejad jt, 2006; Hershkovitz jt 2007; Harder jt, 2007; Hovi jt, 2007]. Kuigi traditsiooniliselt seostatakse madalat sünnikaalu ema toitumusega, raseduseaegsete terviseprobleemidega (nakkused, gestatsioonidiabeet) või loote keskkonna tingimustega (oksüdatiivne stress, glükokortikoidide mõju), on suures osas uurimata valdkonnaks pärilike faktorite mõju trajektoiril: geen, geenivariant => mõju loote kasvule ja metabolismile => mõju täiskasvanuea metabolismile ja tervisele. Ehk hüpotees: areneva organismi üsasisesse metabolismi ja kasvu programmeerimisel osalev genoomilõik, mis ei pruugi olla enam aktiivne täiskasvanueas (näiteks platsenta geenid), võib siiski mõjutada riski haigestuda elu jooksul mitmetesse haigustesse.

Kandidaatideks on geenid, mis toetavad platsenta funktsiooni efektiivsust, loote metabolismi programmeerimist, loote vastupanuvõimet ja kohanemist keskkonna tingimustega (nt ema suitsetamine, nakkushaigused). Teiseks võib komplekshaigustega seotud geenivariantide avaldumist täiskasvanueas mõjutada ka vastava genoomilõigu *in utero* sätestatud epigeneetiline profiil ning ka keskkonnafaktorite toime epigenoomi programmeerimisele (nt ema alkoholi tarbimine, suitsetamine) [Gluckman jt, 2009; Breton jt, 2009; Kaminen-Ahola jt, 2010].

Platsentas toimivate geenide mõju teine suund on trajektoiril loode => ema metabolism. Enamik naisi sünnitab elu jooksul üks või mitu last. On võimalik, et raseduse ajal reprogrammeeritakse püsivalt mingi osa ema metabolismist platsenta geenide produktide toimetel.

Näitena on platsenta kasvuhormoon (geen *GH2*), mida kodeerib platsenta (ehk lapse genoom), aga mis ringleb põhiliselt ema vereseerumis, surudes raseduse lõpupoole maha ema enda ajuripatsi kasvuhormooni (geen *GH1*) produktsiooni [Lacroix jt, 2002]. Uurimata on aga, millised platsenta geenid ja nende variandid avaldavad pikaajalist mõju raseda ja sünnitanud naise metabolismile ja soodumusele komplekshaigustele. Ühe näitena seosest platsenta funktsiooni ja komplekshaiguste vahel on preeklampsia, inimese-spetsiifiline sündroom, mis esineb 3–8% rasedustest. Preeklampsia on raseduseaegne äkiline vererõhu tõus ja neerude töö häirimine, millega kaasnevad pikaajalised muutused hüübimis-, põletiku-, endoteelmarkerite tasakaalus. Need omakorda soodustavad edasises elus kõrgvererõhutõve ja muude südame-versoonkonna haiguste avaldumist [Bellamy jt 2007; Kaaja jt, 2005]. Inimese-spetsiifilist preeklampsia sündroomi on seostatud platsenta struktuuri ja funktsiooni evolutsiooniga, mis võimaldab agressiivsemat trofoblasti invasiooni, täitmaks areneva inimloote aju vajadust hapniku ja toitainete järele. Kui varustus platsentas on häiritud, siis käivitub preeklampsia näol bioloogiline kaitse ning loote arengu kaitsmise 'hinnaks' on ema tervisele ohtlik seisund.

## EDASIVAADE

Kümmekond aastat on olnud geneetikute käsituses järjestatud inimese ja teiste liikide genoomid, biotehnoloogilised kiibid, automaat-sekvenaatorid ja teised meetodid laiapõhjaliseks süstemaatiliseks genoomi uurimiseks, uued statistilised võimalused suuremahuliste liigisiseste ja liikidevaheliste genoomiandmete analüüsimiseks. Need lähenemisviisid on olnud valdavalt kahedimensionaalsed, seose geen-tunnus või geenivariant-haigus uurimiseks. Olemasolevad meetodid võimaldavad seletada vaid väikese osa komplekstunnuste ja -haiguste pärilikkusest. Mosaiigi kokkupanekuks peaks lisanduma pildile uued dimensioonid, nagu epigeneetiline komponent ja selle dünaamika (ehk muutused ajas), geenivariantide koostoime viisid, üsasise programmeerimise roll, emalote vastamõjud, keskkonna otsene ja kaudne mõju geenivariantide avaldamisele, komplekstunnuste ja -haigustega seotud genoomilõikude evolutsioonilise dünaamika selgitamine jne. Põnev töpõld ootab ees!

Autor tänab kõiki noore töörühma praegusi ja endisi liikmeid, kusjuures eriti oluline panus rühma kujunemisel ja selle uurimisteede edukusel on olnud Elin Org'il, Pille Hallast'il, Kristiina Rull'il ja Siim Sõber'il.

## KIRJANDUS

Barker, D. J. P., Eriksson, J. G., Forsén, T., Osmond, C. (2002). Fetal origins of adult disease: strength of effects and biological basis. *Int. J. Epidemiol.*, 31, 1235-1239.

Barker, D. J. P., Osmond, C., Winter, P. D., Margetts, B., Simmonds, S. J. (1989a). Weight in infancy and death from ischaemic heart disease. *Lancet*, 2, 577-580.

Barker, D. J., Osmond, C., Golding, J., Kuh, D., Wadsworth, M. E. (1989b). Growth *in utero*, blood pressure in childhood and adult life, and mortality from cardiovascular disease. *BMJ*, 298, 564-567.

Bellamy, L., Casas, J. P., Hingorani, A. D., Williams, D. J. (2007). Pre-eclampsia and risk of cardiovascular disease and cancer in later life: systematic review and meta-analysis. *BMJ*, 335, 7627, 974.

Breton, C. V., Byun, H.-M., Wenten, M., Pan, F., Yang, A., Gilliland, F. D. (2009). Prenatal tobacco smoke exposure affects alobal and gene-specific DNA methylation. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, doi:10.1164/rccm.200901-0135OC.

Brock, M. V., Hooker, C. M., Ota-Machida, E., Han, Y., Guo, M., et al. (2008). DNA methylation markers and early recurrence in stage I lung cancer. *N. Engl. J. Med.*, 358, 1118-1128.

- Cho, Y. S., Go, M. J., Kim, Y. J., Heo, J. Y., Oh, J. H., et al. (2009). A large-scale genome-wide association study of Asian populations uncovers genetic factors influencing eight quantitative traits. *Nat. Genet.*, 41, 527-534.
- Cowley, A. W. jr. (2006). The genetic dissection of essential hypertension. *Nat. Rev. Genet.*, 7, 829-840.
- Davies, A. A., Davey Smith, G., May, M. T., Ben-Shlomo, Y. (2006). Association between birth weight and blood pressure is robust, amplifies with age, and may be underestimated. *Hypertension*, 48, 431-436.
- Delles, C., McBride, M. W., Graham, D., Padmanabhan, S., Dominiczak, A. (2010). Genetics of hypertension: from experimental animals to humans. *Biochim. Biophys. Acta*, doi:10.1016/j.bbadis.2009.12.00
- Frankel, S., Elwood, P., Sweetnam, P., Yarnell, J., Smith, G. D. (1996). Birth-weight, body-mass index in middle age, and incident coronary heart disease. *Lancet*, 348, 1478-1480.
- Frazer, K. A., Murray, S. S., Schork, N. J., Topol, E. J. (2009). Human genetic variation and its contribution to complex traits. *Nat. Rev. Genet.*, 10, 241-251.
- Gluckman, P. D., Hanson, M. A., Buklijas, T., Low, F. M., Beedle, A. S. (2009). Epigenetic mechanisms that underpin metabolic and cardiovascular diseases. *Nat. Rev. Endocrinol.*, 5, 401-408.
- Grigorova, M., Punab, M., Ausmees, K., Laan, M. (2008). *FSHB* promoter polymorphism within evolutionary conserved element is associated with serum FSH level in men. *Hum. Reprod.*, 23, 9, 2160-2166.
- Grigorova, M., Punab, M., Poolamets, O., Kelgo, P., Ausmees, K., Korrovits, P., Vihlajev, V., Laan, M. (2010). Increased prevalence of the 211 T allele of follicle stimulating hormone (FSH) subunit promoter polymorphism and lower serum FSH in infertile men. *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, 95, 1, 100-108.
- Hales, C. N., Barker, D. J., Clark, P. M., Cox, L. J., Fall, C., Osmond, C., Winter, P. D. (1991). Fetal and infant growth and impaired glucose tolerance at age 64. *BMJ*, 303, 1019-1022.
- Hallast, P., Laan, M. (2009). Evolution of the chorionic gonadotropin beta genes in primates. *Encyclopedia of Life Science (ELS)*, John Wiley & Sons, Ltd: Chichester, 1-12. doi: 10.1002/9780470015902.a0021966
- Hallast, P., Nagirnaja, L., Margus, T., Laan, M. (2005). Segmental duplications and gene conversion: Human luteinizing hormone/ chorionic gonadotropin Beta gene cluster. *Genome Res.*, 15, 1535-1546.
- Hallast, P., Saarela, J., Palotie, A., Laan, M. (2008). High divergence in primate-specific duplicated regions: Human and chimpanzee *Chorionic Gonadotropin Beta* genes. *BMC Evol. Biol.*, 8, 195, 1-14.

- Harder, T., Rodekamp, E., Schellong, K., Dudenhausen, J. W., Plagemann, A. (2007). Birth weight and subsequent risk of type 2 diabetes: a meta-analysis. *Am. J. Epidemiol.*, 165, 8, 849-857.
- Hershkovitz, D., Burbea, Z., Skorecki, K., Brenner, B. M. (2007). Fetal programming of adult kidney disease: cellular and molecular mechanisms. *Clin. J. Am. Soc. Nephrol.*, 2, 334-342.
- Hovi, P., Andersson, S., Eriksson, J. G., Järvenpää, A.-L., Strang-Karlsson, S., Mäkitie, O., Kajantie, E. (2007). Glucose regulation in young adults with very low birth weight. *N. Engl. J. Med.*, 356, 2053-2063.
- Kearney, P. M., Whelton, M., Reynolds, K., Muntner, P., Whelton, P. K., He, J. (2005). Global burden of hypertension: analysis of worldwide data. *Lancet*, 365, 217-223.
- Ivanov, D., Philippova, M., Antropova, J., Gubaeva, F., Iljinskaya, O. , et al. (2001). Expression of cell adhesion molecule T-cadherin in the human vasculature. *Histochem. Cell Biol.*, 115, 231-242.
- Kaaja, R., Kinnunen, T., Luoto, R. (2005). Regional differences in the prevalence of pre-eclampsia in relation to the risk factors for coronary artery disease in women in Finland. *Eur. Heart J.*, 26, 44-50.
- Kaminen-Ahola, N., Ahola, A., Maga, M., Mallitt, K.-A., Fahey, P., et al. (2010). Maternal ethanol consumption alters the epigenotype and the phenotype of offspring in a mouse model. *PLoS Genet*, 6, 1, e1000811.
- Klaassen, T., Teder, M., Viikmaa, M., Metspalu, A. (1998). Neonatal screening for the cystic fibrosis main mutation delta F508 in Estonia. *J. Med. Screen*, 5, 1, 16-19.
- Kyung-Won Hong, K.-W., Org, E., Go, M. J., Eyheramendy, S., Jin, H. S., et al. (2010). Analysis in Korean and Amish Subjects confirms the association between *CDH13* and blood pressure traits identified in Europeans. (käsikiri saadetud avaldamisele)
- Lacroix, M. C., Guibourdenche, J., Frendo, J. L., Muller, F., Evain-Brion, D. (2002). Human placental growth hormone: a review. *Placenta*, 23, Suppl. A, S87-S94.
- Levy, D., Ehret, G. B., Rice, K., Verwoert, G. C., Launer, L. J., et al. (2009). Genome-wide association study of blood pressure and hypertension. *Nat. Genet.*, 41, 677-687.
- Lifton, R. P., Gharavi, A. G., Geller, D. S. (2001). Molecular mechanisms of human hypertension. *Cell*, 104, 545-556.
- Manolio, T. A., Collins, F. S., Cox, N. J., Goldstein, D. B., Hindorff, L. A., et al. (2009). Finding the missing heritability of complex diseases. *Nature*, 461, 8, 747-753.



- Mohlke, K. L., Boehnke, M., Abecasis, G. R. (2008). Metabolic and cardiovascular traits: an abundance of recently identified common genetic variants. *Hum. Mol. Genet.*, 17, R102-R108.
- Männik, J., Vaas, P., Rull, K., Teesalu, P., Rebane, T., Laan, M. (2010). Differential expression profile of growth hormone/chorionic somatomammotropin genes in placenta of small- and large-for-gestational-age newborns. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* (Epub ahead of print)
- Nagirnaja, L., Rull, K., Uusküla, L., Hallast, P., Grigorova, M., Laan, M. (2010). Genomics and genetics of gonadotropin beta subunit genes: unique *FSHB* and duplicated *LHB/CGB* loci. *Mol. Cell Endocrinol.* (invited review)
- Newhouse, S., Farrall, M., Wallace, C., Hoti, M., Burke, B., et al. (2009). Polymorphisms in the WNK1 gene are associated with blood pressure variation and urinary potassium excretion. *PLoS ONE*, 4, 4, e5003, 1-14.
- Newton-Chen, C., Johnson, T., Gateva, V., Tobin, M. D., Bochud, M., et al. (2009). Genome-wide association study identifies eight loci associated with blood pressure. *Nat. Genet.*, 41, 666-676.
- Ohno, S. (1970). *Evolution by gene duplication*. Springer, New York.
- Org, E., Eyheramendy, S., Juhanson, P., Gieger, C., Lichtner, P., et al. (2009). Genome-wide scan identifies *CDH13* as a novel susceptibility locus contributing to blood pressure determination in two European populations. *Hum. Mol. Genet.*, 18, 2288-2296.
- Padmanabhan, S., Menni, C., Lee, W. K., Laing, S., Brambilla P., et al. (2010). The effects of sex and method of blood pressure measurement on genetic associations with blood pressure in the PAMELA study. *J. Hypertens.*, 28, 3, 465-477.
- Resink, T. J., Philippova, M., Joshi, M. B., Kyriakakis, E., Erne, P. (2009) Cadherins and cardiovascular disease. *Swiss Med. Wkly*, 139, 122-134.
- Rull, K., Laan, M. (2005). Expression of beta-subunit of human chorionic gonadotropin genes during the normal and failed pregnancy. *Hum. Reprod.*, 20, 12, 3360-3368.
- Rull, K., Nagirnaja, L., Ulander, V.-M., Kelgo, P., Margus, T., Kaare, M., Aittonmäki, K., Laan, M. (2008). Chorionic Gonadotropin Beta gene variants are associated with recurrent miscarriage in two European populations. *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, 93, 12, 4697-4706.
- Sato, M., Mori, Y., Sakurada, A., Fujimura, S., Horii, A. (1998). The H-cadherin (*CDH13*) gene is inactivated in human lung cancer. *Hum. Genet.*, 103, 96-101.
- Sedman, L., Padhukasahasram, B., Kelgo, P., Laan, M. (2008). Complex signatures of locus-specific selective pressures and gene conversion on *Human*

*Growth Hormone/Chorionic Somatomammotropin Genes*. Hum. Mutat., 29, 10, 1181-1193.

Söber, S., Org, E., Kepp, K., Juhanson, P., Eyheramendy, S., et al. (2009). Targeting 160 candidate genes for blood pressure regulation with a genome-wide genotyping array. PLoS ONE, 4, 6, e6034, 1-13.

Zandi-Nejad, K., Luyckx, V. A., Brenner, B. M. (2006). Adult hypertension and kidney disease: The role of fetal programming. Hypertension, 47, 502–508.

Takeuchi, T., Misaki, A., Liang, S. B., Tachibana, A., Hayashi, N., et al. (2000). Expression of T-cadherin (CDH13, H-Cadherin) in human brain and its characteristics as a negative growth regulator of epidermal growth factor in neuroblastoma cells. J. Neurochem., 74, 1489-1497.

Wang, Y., O’Connell, J. R., McArdle, P. F., Wade, J. B., Dorff, S. E., et al. (2009). From the Cover: Whole-genome association study identifies STK39 as a hypertension susceptibility gene. Proc. Natl. Acad. Sci. U S A, 106, 226-231.

*Teaduspreemia tehnikateaduste alal tööde tsükli  
“Uurimusi happeliste gaaside emissiooni piiramiseks energetikas” eest*



*Rein Kuusik* (kollektiivi juht, keskel)

Sündinud 19.10.1941 Väljaotsa külas Jõgevamaal

1959 Jõgeva Keskkool

1964 Tallinna Tehnikaülikool, keemiainsener-tehnoloog

1971 tehnikakandidaat, Valgevene Keemilise Tehnoloogia Instituut

Alates 1965. aastast Tallinna Tehnikaülikoolis vaneminsener, teadur, vanemteadur (1975), juhtivateadur (2005), mineraalväetiste problemlaboratoriumi juhataja (1965–1990), anorgaanilise tehnoloogia labori juhataja (1991–1992), keemiainstituudi direktor (1992–1997), anorgaaniliste materjalide teaduslaboratoriumi juhataja (2004)

Enesetäiendused: 1965–1985 Moskva, Leningradi ja Minski polütehnilised instituudid ning keemiatööstuse uurimis- ja projekteerimisinstituudid; 1970 Donetsk Musta Metallurgia Instituut; 1981 Helsingi Tehnoloogiaülikool, 2001 Bulgaaria Teaduste Akadeemia, 2002–2009 Kopenhaagenis, Göteborgis, Leuvenis, Trondheimis, Helsingis, Turus ning Lappeenrannas paiknevad tehnikaülikoolid

1975 Eesti NSV teaduspreemia

Avaldanud üle 130 teaduspublikatsiooni

## *Andres Trikkel* (paremal)

Sündinud 18.07.1959 Tallinnas

1977 Tallinna 21. Keskkool  
1982 Tallinna Tehnikaülikool, keemiatehnoloogiainsener  
1992 MSc, Tallinna Tehnikaülikool  
2001 PhD, Tallinna Tehnikaülikool

Alates 1982. aastast Tallinna Tehnikaülikoolis insener, nooremteadur, teadur, assistent, lektor, dotsent. 2006. aastast TTÜ anorgaaniliste materjalide teaduslaboratooriumi vanemteadur ja füüsikalise keemia õppetooli professor

IGIP liige, täiendanud ennast Turus Åbo Akademia Ülikoolis, Helsinki Tehnoloogiaülikoolis, Göteborgis, Trondheimis, Kentucky Ülikoolis Lexingtonis

Avaldanud üle 50 teaduspublikatsiooni

## *Tiit Kaljuvee* (vasakul)

Sündinud 28.04.1945 Tallinnas

1965 Tallinna 42. Keskkool  
1970 Tallinna Tehnikaülikool, keemiatehnoloogiainsener  
1982 keemiakandidaat, Moskva Keemilise Tehnoloogia Instituut

Alates 1973 aastast Tallinna Tehnikaülikoolis insener, assistent, vanemteadur

Avaldanud üle 80 teaduspublikatsiooni

### UURIMISTSÜKLI TAUST

Säästlik loodusressursi kasutus ning keskkonnahoid on esmatähtsad märksõnad tänapäeva maailma majandus- ning teaduspoliitikas. Energiatootmine, millega kaasnevad suuremahuliste tahkheitmete teke ning kahjulikud emissioonid atmosfääri, on selle teesi lihtsaim kinnitus. Just energiatootmisele on omane happeliste gaaside (CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> jt) emissioon atmosfääri, millega kaasnevad olulised keskkonnaprotsessid, nagu happelised vihmad, globaalne soojenemine jm. See on põhjuseks, miks nende valdkondadega seotud alus- ja rakendusuringutele pööratakse maailmas suurt tähelepanu, luues sihtprogramme ja koostöövõrgustikke riikide, Euroopa Liidu ja maailma tasemel, koondades suuri vaimseid jõude ning finantsvahendeid.

Eesti maavaradest on suurima aastase kaevandamismahuga karbonaatsed kivimid ja põlevkivi. Esimeste põhiline rakendusala on ehitus, vähemal määral kasutatakse neid ka tehnoloogilise toormena. Põlevkivi katab 63–65% ulatuses

vabariigi primaarenergia vajaduse soojuse ja elektri tootmisel, olles lähteaineks ka põlevkiviõli tootmisel ning keemiasaaduste valmistamisel. Mõlemad põlevkivi kasutusala on jäätmerikkad – neid iseloomustab suuremahulise tahkheitme – tuha või poolkoksi teke koos happeliste gaaside emissiooniga atmosfääri suunatavate suitsugaaside koosseisus. Nimetatud heitmeid kasutatakse piiratult ning nad tuleb ladustada, millega kaasnevad märgatavad kulutused keskkonnanahoiule. Teisalt, käesoleva töödetsükli autoritel on varasem laialdane kogemus mitmesuguste termiliste heterogeensete protsesside uurimisel ja tööstuslikul katsetamisel, alates looduslike fosfaatide fluorärastamisest ning termilisest ja termokeemilisest rikastamisest kuni keemiatööstuse suurheitme – fosfokipsi termilise lagundamiseni lubja saamisega ning vääveldioksiidi tekkega järgneva väävelhappe regenereerimiseks. Nende kogemuste rakendamine olulist tähtsust omavate küsimuste lahendamiseks Eesti tingimustes oli loomulik areng. Nii kujunes autorite ja nende kolleegide üheks oluliseks uurimissuunaks põlevkivienergeetikale iseloomuliku happeliste gaaside emissiooni vähendamise võimaluste selgitamine, vaadeldes võimalike sorbentidena nii Eesti looduslikke (lubjakivid, dolomiidid) kui tehnilisi (põlevkivituhad, poolkoks) lubimaterjale-tööstusheitmeid mitmete gaas-vedel-tahke heterogeensete protsesside tingimustes.

## TÖÖD VÄÄVELDIOKSIIDI OSAS

### TÄHISED

Peamiseks happeliste vihmade tekitajaks on SO<sub>2</sub>, mis pärineb suures osas (EEA-32 riikide grupis 62%) energiatootmisest [European Environment Agency]. Kui lisada siia muud põletamisega seotud tööstusprotsessid, siis isegi 87%. Samas on viimasel kahel aastakümnel SO<sub>2</sub> emissioon pidevalt vähenenud – aastatel 1990–2005 66% (EEA-32). Eesmärk (NEC direktiiv) [Directive..., 2001] oli vähendada seda aastaks 2010 69% võrreldes baasaastaga 1990 (EU-27 riikidele etteantud piiriks seati 8297 kt). Eestile esitatud kohustused nägid ette vähendada SO<sub>2</sub> emissiooni 63%, tegelik vähenemine aastatel 1990–2005 oli 72% (pärast baasaastat toimus energiatootmise oluline vähenemine). Kuid ka Eestis kehtestatud normatiivid näevad ette SO<sub>2</sub> sisalduse edasise (tehnoloogilise) vähendamise. Vastavalt “Välisõhu kaitse seadusele” [EV Välisõhu kaitse seadus, 2004] on alates 1. jaanuarist 2010. a Eesti paiksetest ja liikuvatest saasteallikatest välisõhku eralduva SO<sub>2</sub> heidete summaarne piirkogus 100 kt kalendriaastas [EV Valitsuse määrus nr. 229, 2004], mis vastab NEC direktiivile. Kui enne 2003 käiku lastud tahket kütust kasutavate suurte põletusseadmete korral lubatakse lahkuvates gaasides sõltuvalt soojusvõimsusest SO<sub>2</sub> sisaldust kuni 2000 mg/Nm<sup>3</sup>, siis hiljem käiku lastud seadmetes soojusvõimsusega üle 100 MW<sup>th</sup> vaid kuni 200 mg/Nm<sup>3</sup> [EV Valitsuse määrus nr. 112, 2004]. Ka Eesti Energia kui peamise elektritootja süsteemis on kahanemine märgatav. EE SO<sub>2</sub> heitmed 2003/04 olid 75,3 kt; 2007/08 70,3 kt [Eesti Energia aastaraamat ..., 2008]. Vähenemine on tingitud eeskätt uuele keevkihtpõletustehnoloogiale üleminekust. Edasiseks vähendamiseks plaani-

takse aastaks 2012, kui rakenduvad Narvas asuvatele energiablokkidele senisest karmimad SO<sub>2</sub> piirangud, käiku lasta ka uued SO<sub>2</sub> püüdmissaadmed.

#### SO<sub>2</sub> EMISSIOONI KONTROLI VÕIMALUSED ENERGEETIKAS

Väävlisaaste kontrolliks energeetikas on kolm teed:

- kütuse eelnev puhastamine väävliühenditest;
- põletusprotsessi organiseerimine selliselt, et tekkiv SO<sub>2</sub> seotaks kütuse mineraalosaga või spetsiaalselt põlemiskoldesse suunatavate lisanditega;
- suitsugaaside puhastamine kahjulikest lisanditest enne nende suunamist atmosfääri.

Viimasel juhul kasutusel olevad menetlused jaotatakse märg- poolkuiv- ja kuivmeetoditeks.

Esimesed märgpuhastusseadmed võeti kasutusele juba seitsmekümnendatel aastatel. Protsessis kasutatakse lubja/lubjakivi suspensioone, millest heitgaasid läbi juhitakse. Peamisteks probleemideks on ummistused reaktsioonides tekki-va kipsi tõttu. Protsessi efektiivsus ulatub üle 90%, kuid kasutusele saab selle võtta lisaseadmete mahukuse tõttu siiski pigem uutes ehitamisel olevates elektrijaamades.

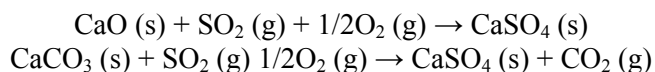
Poolkuivad meetodid baseeruvad lubimaterjalide sissepuhkel SO<sub>2</sub> püüdmissooni koos vähesel veega. Sorbentide ülekulu on 30–40%, SO<sub>2</sub> püüdmise efektiivsus 85–90%. Probleemaatiline on selles protsessis tekkivate tahkete produktide CaSO<sub>3</sub>·CaSO<sub>4</sub> utiliseerimine.

Kuivprotsessid, milles juhitakse heitgaasidesse või viiakse koldesse tahket kui-va sorbenti, pole küll nii efektiivsed, kuid võimalus kasutada neid vanemates elektrijaamades, kus puudub ruum lisaseadmetele, on huvipakkuv. Probleemideks on siin sorbentide paakumine, nende ebahühtlane jagunemine ja sellest tingitud ebapiisav kontakt gaasifaasiga. Olulise tähtsuse omandab sissepuhke-kohta valik nii optimaalse temperatuurijaotuse kui ühtlase segunemise saavutamiseks.

Kõik need meetodid eeldavad spetsiaalsete sorbentide (Ca, Fe, Zn, Cu, Ni oksiidid või soolad, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, keevkihtpõletamisel ka CaSiO<sub>2</sub>, BaTiO<sub>2</sub> ning leelis- või leelismuldmetallide oksiidid ja karbonaadid) kasutamist, mis toob kaasa kulutuste kasvu. Kulutuste kärpimiseks oleks otstarbekas kasutada looduslikke materjale (lubjakivi, dolomiit) või tööstusjääke (tuhad, mis sisaldavad Ca ja Mg okside).

#### LUBJAKIVID JA DOLOMIIDID SO<sub>2</sub> SORBENTIDENA

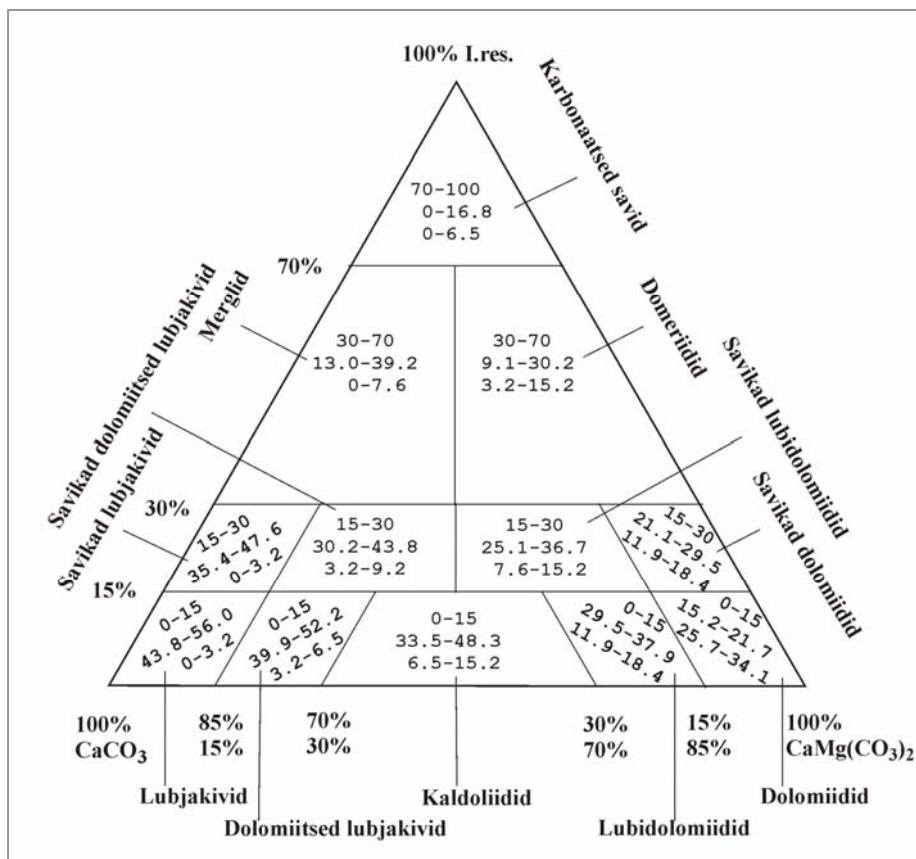
Lubjakivide ja dolomiitide sorbeerimisvõime põhineb karbonaatide lagunemisel tekkiva CaO ja osaliselt ka MgO reaktsioonil vääveldioksiidiga [Kaljuvee jt, 2005]. Kõrgematel rõhkudel reageerib kaltsiumkarbonaat ka otse vääveldioksiidiga. Summaarset protsessi kirjeldavad järgmised reaktsioonivõrrandid:



Arvutused näitavad, et Ca ja Mg oksiidide täieliku reageerimise puhul seob 100 g kaltsiiti 64 g SO<sub>2</sub>, 100 g dolomiiti aga 69,4 g SO<sub>2</sub>. Sellest järeldub, et kui lubjakivi ja dolomiidi kasutamist on võrdsed, võib dolomiiti pidada SO<sub>2</sub> sorbeerimiseks sobivamaks reagentiks. Teiselt poolt on aga leitud, et dolomiidi lagunemisel tekkinud MgO ei võta kõrgematel temperatuuridel SO<sub>2</sub> sidumise protsessist osa. Seepärast tuleb küsimus ühe või teise materjali sobivuse osas otsustada individuaalselt.

Karbonaatsete kivimite liigitamiseks on esitatud mitmeid klassifikatsioone. Lihtne ja otstarbekas on T. Kiipli esitatud klassifikatsioon (joonis 1), mis põhineb karbonaatsete kivimite CaO, MgO ja lahustumatu jäägi sisaldusel ning hõlmab vaid 12 erimit [Kiipli, 1984].

T. Kiipli andmetel on 12 paekivi erimist Eestimaal levinumad järgmised: lubjakivid 40%, savikad lubjakivid 14%, dolomiidid 12%, dolomiitsed lubjakivid



Joonis 1. Lubimaterjalide liigitus. Numbrid väljades iseloomustavad vastavalt soolhappes lahustumatu jäägi, CaO ja MgO sisalduse piire (%).

8% ja merglid 7% ulatuses. Meie uurimistöodes kasutati paljusid proove, mis hõlmasid nii dolomiite, kaltsiite, dolomiitseid lubjakive kui lubidolomiite ning kaldoliite. Valiti nii puhtaid kui suure lisanditeisisaldusega ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) savikaid ning merglilisi proove, samuti erineva geoloogilise vanuse ja kristallstruktuuriga proove, mis hõlmaksid kõigi eesti põhiliste leiukohtade kivimeid, sealhulgas nii tehnoloogilist tooret, ehitus- ja viimistlusmaterjaliks kasutatavaid kui mõningaid kaevandusjääke.

Kasutatud proovide (joonis 2) iseloomustamiseks sorbentidena kasutati mitmesuguseid näitajaid – sidumismahukus (mg seotud  $\text{SO}_2$  100 mg algmaterjali kohta), sidumiskiirus, konversiooniaste (eeldusel, et kogu  $\text{CaO}$  osaleb sidumises ja produktiks on  $\text{CaSO}_4$ ). Katsetulemuste matemaatilise töötlemise käigus toodi välja sidumisprotsessi kineetilised parameetrid. Karbonaatide lagunemise ja  $\text{SO}_2$  sidumise uurimiseks kasutati termogravimeetrilist analüüsi, nii lähtematerjale kui produkte uuriti skaneeriva elektronmikroskoopia, röntgendifraktsioonanalüüsi, kõrgrõhu porosimeetria, elementanalüüsi jm meetoditega.

Uuritud Eesti lubjakivide omadusi:		
$\text{CaCO}_3$	66,5 - 98,4%	
$\text{MgCO}_3$	0,31 - 18,4%	
L.j.	0,27 - 14,4%	
$\text{R}_2\text{O}_3$	0,15 - 10,9%	
Eripind	0,60 - 13,2 $\text{m}^2/\text{g}$	
<i>L.j. - soolhappes lahustumatu jääk</i>		Lubjakivi lähteproov ja dekarboniseeritud proov

Joonis 2.

Kasutatud lubjakiviproovide üldised karakteristikud.

Uuritud karbonaatsete materjalide eripind karbonaatide lagunemise käigus valdavalt kasvab. Eripinna kasv on sõltuv  $\text{R}_2\text{O}_3$  ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) sisaldusest ning on seda suurem, mida väiksem on  $\text{R}_2\text{O}_3$  sisaldus. Sulfatiseerimisprotsessi käigus sorbendiosakeste poorsus väheneb, aga poorid täielikult ei sulgu. Määrati erinevate materjalide sidumisparameetrid ning avati protsesside mehhanism. Elementanalüüsiga tehti kindlaks, et seotud väevli sisalduse jaotus kogu osakese mahus mõõduka temperatuuri ja sidumise kestuse juures oli üht-lane, mis viitab olulise produktikihi difusioonitakistuse puudumisele vähemalt sidumise algfaasis [Trikkel, 2001]. Temperatuuri tõstmine viib poorsuse olulise vähene-miseni, mistõttu peaks kõrgemal temperatuuril dekarboniseeritud osakeste puhul olema  $\text{SO}_2$  tungimine osakese sisemusse raskendatud ja reaktsioon toimuma põhiosas vaid osakeste pinnal. Üleminek keemilise reaktsiooni kui limiteeriva staadiumi piirkonnast difusiooni piirkonda toimub sel juhul oluliselt madalamatel konversiooniastmetel.  $\text{SO}_2$  seoti peamiselt anhüdriidi või  $\gamma\text{-CaSO}_4$  vormis.  $\text{CaSO}_3$  ja  $\text{CaS}$  leidumine sulfatiseerimisproduktides on vähe



tõenäoline. Mg-ühendite osalus  $\text{SO}_2$  sidumisprotsessis kasvab pärast seda, kui dekarboniseerimisel tekkiv vaba  $\text{CaO}$  on suures osas seotud. Põhilise ühendina tekkis sel juhul kaksiksulfaat  $\text{CaMg}_3(\text{SO}_4)_4$  [Kaljuvee jt, 2005].

Matemaatilisel on dekarboniseerimisprotsess rahuldava täpsusega kirjeldatav pooride juhusliku jaotuse mudeliga, mille põhjal arvutatavad efektiivsed parameetrid võimaldavad erinevaid materjale omavahel võrrelda. Sulfatiseerimisprotsessi matemaatilise kirjelduse aluseks on reageerimata kahaneva sfääri mudel, mida täiendati konversiooniõltuva efektiivse difusiooni sisseviimisega. Mudeli põhjal määrati sidumise kineetilised parameetrid ning difusioonikonsandid [Trikkel jt, 2000].

Kokkuvõtteks võib öelda, et valdav osa arvele võetud Eesti karbonaatsetest kivimitest on kõrge või arvestatava reaktsioonivõimega  $\text{SO}_2$  suhtes ning sobivad kasutamiseks suitsugaaside puhastamiseks kuivpuhastusmenetluse tingimustes. Konkreetse materjali valik ning otstarbekus sõltuvad peamiselt kasutatavast tehnilisest lahendusest (kõrgtemperatuuriline põletusprotsess, klassikaline või retsirkuleeriv keevkiht jne) ning püstitatud eesmärgist.

#### Mg-ÜHENDITE OSALUS VÄÄVELDIOKSIIDI SIDUMISEL

Kuigi dolomiidid leiavad rakendamist heitgaaside puhastamisel vääveldioksiidist, johtub see igal konkreetsel juhul pigem tema kättesaadavusest (hinnast) ning  $\text{SO}_2$  sorbendina arvestatakse reeglina vaid dolomiidi koostises olevat kaltsiitset osa. Kuna andmeid Mg-ühendite võimaliku osaluse kohta vääveldioksiidi sidumisel tahkesse faasi oli suhteliselt vähe ning need olid vastukäivad, siis, leidmaks kinnitust Mg-ühendite osalusele vääveldioksiidi sidumisel tahkesse faasi, viidi eksperimendid läbi laias temperatuuripiirkonnas ( $400\text{--}900^\circ\text{C}$ ) erinevatel  $\text{SO}_2$  osarõhkudel segus õhk- $\text{SO}_2$  [Kaljuvee jt, 2004a, 2005]. Sealjuures kaasati erinevaid lubimaterjale:  $\text{MgO}$  ja  $\text{CaO}$  baasil koostatud mudel-segud, erinevate leiukohtade dolomiidi ja lubjakivi proovid, Eesti põlevkivi tolmpõletamisel moodustunud nn kõrgtemperatuurilised tuhad ( $1200\text{--}1400^\circ\text{C}$ ), Eesti põlevkivi põletamisel tsirkuleeriva kihiga katseseadmehel ning tema poolkoksi põletamisel hõljuva kihiga katseseadmehel  $800\text{--}850^\circ\text{C}$  juures moodustunud tuhad (madalatemperatuurilised tuhad). Samuti uuriti vääveldioksiidi sidumise iseärasusi tahkesse faasi vahetult Eesti põlevkivi ja tema poolkoksi termooksüdatsiooni käigus ning termooksüdatsioonil tekkinud tuhade täiendaval sulfatiseerimisel.

Tehti kindlaks, et Mg-ühendeid sisaldavate looduslike lubimaterjalide ning küttuste põletamisel tekkivate tuhade sulfatiseerumisproduktides esineb madalatemperatuurilises piirkonnas lisaks anhüdriidile  $\text{CaMg}$ -kaksiksulfaat  $\text{CaMg}_3(\text{SO}_4)_4$ , viimasest märgatavalt vähem või jälgedena ka  $\beta\text{-MgSO}_4$ . Temperatuur  $500^\circ\text{C}$  on  $\text{CaMg}$ -kaksiksulfaadi tekkeks ja püsimiseks juba piisav ning tema teke kogutud röntgendifraktsioonanalüüsi andmetel toimub üle  $\text{CaSO}_4$  ning  $\text{MgSO}_4$  tekke.

Seega Mg-ühendeid sisaldavate lubimaterjalide (esmajoones dolomiidid, aga ka dolomiitsed lubjakivid ning põlevkivituhad) kasutamisel heit(suitsu-)gaaside puhastamisel vääveldioksiidist on otstarbekas arvestada põhiprotsessi tehnoloogilisi parameetreid (esmajoones temperatuuri) kogu tehnoloogilise trakti ulatuses, et maksimaalselt ära kasutada lubimaterjalides sisalduvate magneesiumühendite SO<sub>2</sub>-sidumispotentsiaali. Esmajoones tähendab see õige koha valikut lubimaterjalide sisestamiseks süsteemi ehk optimaalseid temperatuuritingimusi (700–800°C) CaMg-kaksisulfaadi tekkeks ja püsimiseks. Iseenesest toimub see küllaltki laias temperatuuripiirkonnas (500–900°C), kuid madalamatel temperatuuridel (ka reaktsioonidel β-MgSO<sub>4</sub> tekkega) jäävad reaktsiooniirused tagasihoidlikuks, kõrgematel temperatuuridel aga on CaMg-kaksisulfaat ebastabiilne.

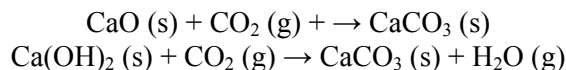
#### VÄÄVELDIOKSIIDILT SÜSINIKDIOKSIIDILE

Vastavalt sellel, kuidas on tõusnud tähelepanu keskmesse kasvuhuoneefekt ja globaalne soojenemine, on teadlaste tähelepanu järjest suuremal määral pöördunud süsinikdioksiidi emissiooni vähendamisele. Kuna SO<sub>2</sub> emissiooni vähendamise meetodeid on tänaseks laialt uuritud ja sellega saadakse ka üsna hästi hakkama – direktiividega määratud piiridesse ei mahu ilmselt vaid mõned Euroopa riigid (näiteks Türgi, Makedoonia ja Kreeka), siis paljud uurimisgrupid lülitusid paralleelselt tegelema teise happelise gaasi CO<sub>2</sub> probleemidega. Nii meiegi.

Kõrvuti SO<sub>2</sub> sidumisega on hakatud lubjakivisid käsitlema ka kui võimalikke CO<sub>2</sub> kandjaid tsüklilises sidumis-dekarboniseerimisprotsessis [Abanades jt, 2009; Manovic, Anthony, 2008]. Lubjakivi dekarboniseeritakse ja tekib vaba lubi. Madalamal temperatuuril seob CaO heitgaasidest CO<sub>2</sub>, seejuures tekkinud osaliselt karboniseeritud lubi suunatakse teise seadmesse, kus tekkinud karbonaadid lagunevad. Nii on võimalik saada kontsentreeritud CO<sub>2</sub> voog, mida on lihtsam puhastada ja ladustada. Selles liinis on uurimistööd lubjakividega ka meie laboris jätkumas.

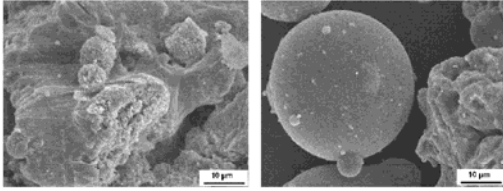
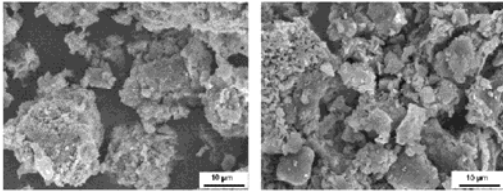
#### PÕLEVKIVITUHAD SO<sub>2</sub> JA CO<sub>2</sub> SORBENDINA KUIVSIIDUMISPROTSESSIDES

Eesti eripäraks on energeetikatööstuses tekkivad põlevkivituhad (joonis 3), mis sisaldavad vabasid Ca ja Mg okside, tuhkade seismisel ja hüdrotranspordil tekkinud hüdroksiide ning lagunemata karbonaate ja võiksid samuti omada happeliste gaaside sidumise võimet vastavalt eespool toodud ning järgnevale reaktsioonivõrranditele:

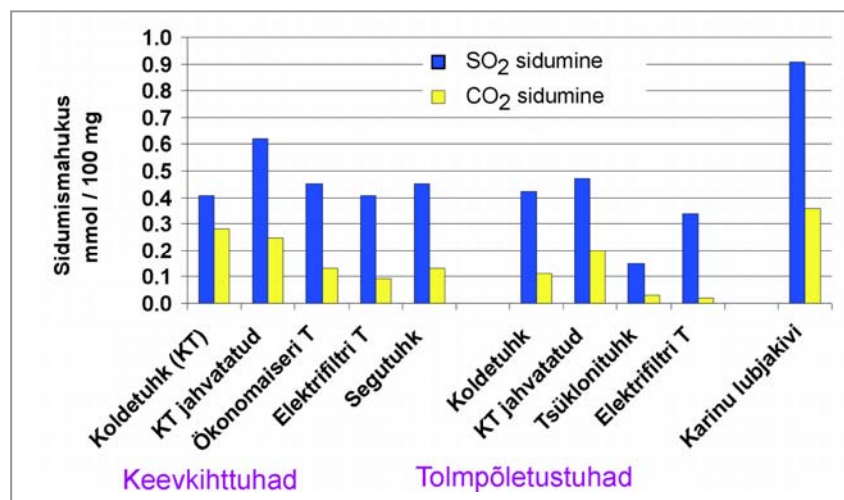


Nii SO<sub>2</sub> kui CO<sub>2</sub> kuivsidumisprotsesse oleme uurinud laias temperatuuride jm tingimuste vahemikus, kasutatud on erinevate põletamistehnoloogiate käigus kogutud tuhaproove (tolmpõletustehnoloogia – TP ja keevkihttehnoloogia – KK) ning tuhaproove erinevatest seadmetest (kolle, tsüklonid, elektrifiltrid jt) [Kaljuvee jt, 2007b; Kuusik jt, 2005ab; Triikkel jt, 2001]. Seetõttu on ülevaate

andmine sidumisprotsesside eripärast, kineetikast ja sidumismehhanismidest piiratud mahu tõttu keeruline. Sidumisparameetrite üldistavaks võrdluseks on joonisel 4 esitatud valik erinevaid tuhkasid, sidumisprotsess mõlema gaasiga on läbi viidud temperatuuril 700°C, katse kestus 30 minutit. Võrdluseks toodud lubjakivi puhul on CO<sub>2</sub> süsteemis tegemist tsüklilise sidumisega.

<p>Tolmpõletustuhkade omadusi:</p> <p>CaO 27 - 54%</p> <p>CaO<sup>vaba</sup> 5,9 - 25%</p> <p>CO<sub>2</sub> 0,70 - 2,8%</p> <p>Eripind 0,36 - 1,8 m<sup>2</sup>/g</p>	 <p>Tolmpõletustuha iseloomulikud SEM fotod</p>
<p>Keevkihttuhkade omadusi:</p> <p>CaO 28 - 49%</p> <p>CaO<sup>vaba</sup> 2,1 - 19%</p> <p>CO<sub>2</sub> 1,2 - 15%</p> <p>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 1,7 - 7,7%</p> <p>Eripind 2,1 - 8,7 m<sup>2</sup>/g</p>	 <p>Keevkihttuha iseloomulikud SEM fotod</p>

Joonis 3.  
Kasutatud põlevkivituhkade üldised karakteristikud.



Joonis 4.  
Erinevate lubimaterjalide SO<sub>2</sub> ja CO<sub>2</sub> sidumismahukused (mmol gaasi 100 mg algproovi kohta) temperatuuril 700°C. p(SO<sub>2</sub>) = 0,25 atm, p(CO<sub>2</sub>) = 0,15 atm.

Läbivalt jäid laia valiku tuhkade puhul temperatuuril 700°C sidumismahkuse väärtused vahemikku 1,3–12,5 mg (0,03–0,28 mmol) CO<sub>2</sub> ja 10–30 mg (0,16–0,47 mmol) SO<sub>2</sub> 100 mg tuha lähteproovi kohta. KK tuhad näitasid CO<sub>2</sub> süsteemis kõrgemaid CaO konversiooniastmete väärtusi (19–74%) kui TP tuhad (9–52%). Leiti, et CO<sub>2</sub> sidumismahukused sõltusid peamiselt vaba CaO sisaldusest tuhas. SO<sub>2</sub> süsteemis arutati konversiooniaste mõlema oksiidi kohta (CaO ja MgO) ning nende väärtused jäid KK ja TP tuhkade korral vastavalt vahemikku 50–91% ja 21–28%. Tuhkade sidumisomadusi on püütud parandada erinevate aktiveerimismeetoditega (jahvatamine, hüdratiseerimine jt), nii on saadud SO<sub>2</sub> süsteemis lubjakividega võrreldavaid tulemusi [Kaljuvee jt, 1997, 2007b]. CO<sub>2</sub> sidumine põlevkivituhkadega kuivprotsessis jääb siiski tagasihoidlikuks, protsessile avaldab sekundaarsete tahke faasi reaktsioonide tõttu negatiivset mõju nii jahvatamine kui protsessi temperatuuri tõstmine [Triikkel jt, 2010].

Sidumisprotsesside kineetika analüüs näitas, et mõlemad sidumisprotsessid on enamiku tuhkade korral tervikuna limiteeritud gaasi difusiooniga tahkes sorben-diosakeses (3-dimensiooniline difusioon, sfääriline sümmeetria). Samas on paljudel juhtudel eristatav ka lühike keemilise reaktsiooni kineetika poolt limiteeritud algstaadium (esimest järku kineetika, juhuslik reaktsioonitsentrite teke). Tervikprotsessi aktivatsioonienergiad jäid KK tuhkadele temperatuuripiirkonnas 500–700°C CO<sub>2</sub> süsteemis vahemikku 48–82 kJ mol<sup>-1</sup>; SO<sub>2</sub> süsteemis 43–107 kJ mol<sup>-1</sup>. Kiiruskonstantide väärtused 700°C juures jäid vahemikku 10<sup>-3</sup>–10<sup>-4</sup> min<sup>-1</sup>. Temperatuuri tõstmine üldjuhul vähendas kiiruskonstantide väärtusi mõlema gaasi puhul, efekt oli oluliselt suurem CO<sub>2</sub> süsteemis ja suurema lisanditesisaldusega tuhkade puhul. Proovide eelnev jahvatamine aga vähendas kiiruskonstantide väärtusi CO<sub>2</sub> süsteemis, kuid suurendas SO<sub>2</sub> süsteemis. Neid nähtusi on selgitatud viidatud artiklites [Kuusik jt, 2005b; Triikkel jt, 2010]. Kui võrrelda dekarboniseeritud lubjakividega, siis on nende SO<sub>2</sub> sidumisreaktsiooni kiiruskonstantide väärtused oluliselt suuremad, jäädes suurusjärku 10<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup> ja sidumisreaktsiooni saab enamiku lubjakivide puhul kirjeldada esimest järku kineetika võrranditega.

Kokkuvõttes võib öelda, et põlevkivituhad sobivad teatud rakendustes happeliste gaaside kuivsidumiseks. KK tuhkade sidumisomadused on võrreldes TP tuhkadega paremad mõlema gaasi süsteemis, kuid nad jäävad siiski maha lubjakivide sidumisomadustest. Tuhkade eelnev töötlus mõjutab sidumisparameetreid, samuti protsessi mistahes staadiumi temperatuur. See mõju on oluliselt suurem CO<sub>2</sub> sidumisprotsessile.

#### TÖÖSTUSKATSED

##### VÄÄVELDIOKSIIDI EMISSIOONI VÄHENDAMISEKS TOLMPÕLETUSKATLAS

Tööstuskatsed suitsugaasidest täiendava koguse SO<sub>2</sub> sidumiseks kuivpuhastusmeetodil viidi läbi varasemal perioodil (1998. a) ühes Balti Elektriijaama töötavas boileris (põlevkivi kulu 60 t h<sup>-1</sup>, auru toodang 150 t h<sup>-1</sup>), sisestades boi-

lerisse tagasi eelnevalt tööstuslikus kuulveskis jahvatatud tsüklontuhka. Tsüklontuha sisestuspunkt boilerisse (20 m kõrgusel boileri põhjast, kus suitsugaaside temperatuur on vahemikus 850–900°C) oli valitud, arvestades aerodünaamikat ning temperatuuriprofiili kütuse põletuskambris, aga samuti katsetulemusi SO<sub>2</sub> sidumise simulatsioonil CaO-ga. Katsete käigus vähenes SO<sub>2</sub> kontsentratsioon gaasifaasis olenevalt retsüklisse suunatud tuha kogusest (21–32% kogu tekkivast tuhast, vaba CaO/S moolsuhe vahemikus 1,6–2,8) 17–34% ehk SO<sub>2</sub> sidumisaste kasvas 57%-lt 72%-ni [Kuusik jt, 1999]. Tuha sisestuspunkti nihutamisel temperatuuripiirkonda üle 950°C kaasnes sisestatava sorbendi (tuha) inaktiveerumine sulamisnähtude tekke tulemusena. Sealjuures on kõrgendatud temperatuuridel oodata ka sulfaatide lagunemist, millega kaasneks SO<sub>2</sub> re-emissioon. Sisestades katlasse segus põlevkiviga eelnevalt kuivatatud heitvete sadestusbasseini muda (SBM, vahekord 6:1), vähenes SO<sub>2</sub> emissioon gaasifaasi 40–50% võrra ning üldine SO<sub>2</sub> sidumisaste kasvas 68%-lt 85%-ni [Kuusik jt, 1999].

Seega tõestasid tööstuskatsed mõningate tuhaliikide ja SBM sobilikkust kasutamiseks retsüklis, et vähendada SO<sub>2</sub> emissiooni gaasifaasi põlevkivi tolm-põletamisel Narva elektrijaamades.

#### POOLKOKS VÄÄVLISIDUMISES

Põlevkivi termilisel töötlemisel vertikaalsetes retortides nn Kiviteri tehnoloogia (Kiviter protsess) kohaselt tekib 1 tonni toorkivi kohta enam kui 0,8 tonni tahket tootmisjääki – poolkoksi niiskusesisaldusega 25–30%. Seni on tuhamägedesse ladustatud ligi 100 miljonit tonni poolkoksi ning praeguste tootmismahdade juures lisandub seda aastas üle miljoni tonni juurde. Kasutatavat tehnoloogiat iseloomustab asjaolu, et suur osa põlevkivi orgaanilisest süsinikust jääb kasutuna poolkoksi (viimastel aastatel on siin olukord paranenud). Kahjulikke lisandeid (veeslahustuvaid fenoole, sulfiide, polütsüklilisi aroomaatseid süsivesinikke) sisaldav poolkoks suurendab piirkonna saastekoormust.

Mitmete töödega, sealhulgas autorite osavõtul, on osutatud poolkoksi põletamise otstarbekusele ja tingimustele (KK-tehnoloogia, põlevkivi või kivisöe lisandid jm) nii tema energeetilise jääkväärtuse ärakasutamise kui ka tekkiva tuha suurema keskkonnaohutuse kontekstis [Prikk, Arro, 1997; Martins jt, 1997; Kuusik jt, 2004a]. Võtnud arvesse poolkoksi mineraalosa nn lubjarikkust, näitasid autorid poolkoksi efektiivsust väävliühendite sidujana tema põletamisel segus väävlirikaste kivisütega.

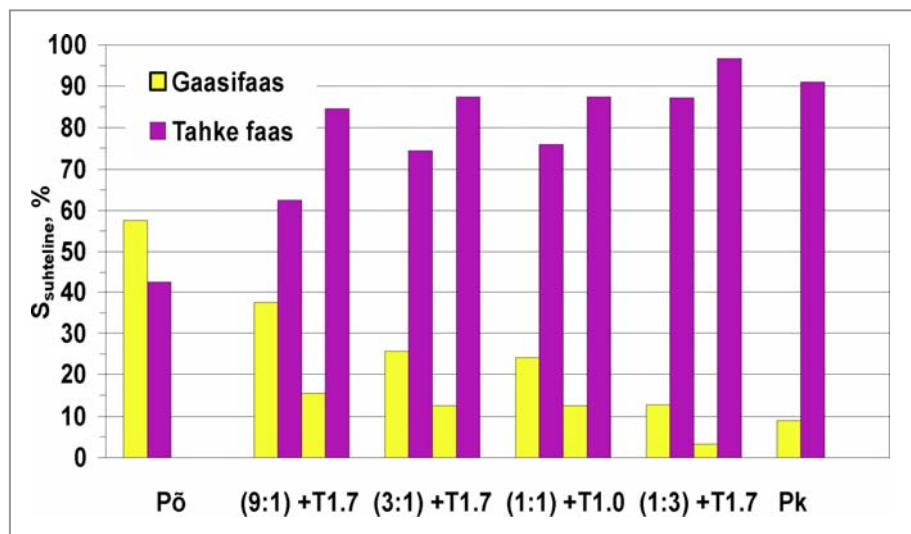
#### VÄÄVLIÜHENDITE TRANSFORMATSIOONID

##### POOLKOKSI JA FOSSILKÜTUSTE TERMOOKSÜDATSIOONIL

Tööd viidi läbi dünaamilise temperatuuritõusu tingimustes atmosfääriõhu voolus, kasutades kombineeritud termogravimeetrist-gaastitrimetrist või termogravimeetrist-FTIR-spektraalanalüüsi aparatuuri, mis võimaldavad jälgida gaasifaasi emiteerunud ühendite dünaamikat, nende omavahelisi seoseid ning

kvantitatiivselt määrata termooksüdatsioonil tekkinud ning gaasifaasi emiteerunud väveldioksiidi koguseid [Kaljuvee, Kuusik, 1999; Kaljuvee jt, 2003ab]. Tahkjäägi analüüs võimaldas selgitada mineraalosas toimunud muutusi.

Näidati põlevkivi mineraalses osas toimuvate muutuste olulisus väävliühendite sidumisel. Neist olulisim on karbonaatide lagunemine, mille tulemusena lenduv väävel seotakse osaliselt kas CaS või CaSO<sub>4</sub>-na. Osa sulfiidest väävlist, mis tekib püriidi lagunemisel, on poolkooksis FeS-na. Kuna Kiviter-protsessis tekkinud poolkoks laaditakse välja märgmeetodil, siis karbonaatide osalisel lagunemisel tekkinud CaO kustub ja tekib Ca(OH)<sub>2</sub>, mis hakkab lagunema temperatuuridel üle 400°C. Seega sisaldab poolkoks ühendeid, mis on võimelised termooksüdatsioonil tekkivat väveldioksiidi tõhusalt siduma juba temperatuuri madalamas piirkonnas (<400–450°C). Kõrgematel temperatuuridel aga seotakse SO<sub>2</sub> tahkese faasi karbonaatide täiendaval lagunemisel tekkiva vaba CaO poolt. See teadmine lubas järeldada, et ringleva keevkihiga põletustehnoloogia kasutamine segude poolkoks-põlevkivi korral, mida iseloomustab kõrge mineraalosa juuresolek protsessis, loob eeldused energia saamiseks keskkonda happeliste gaasidega peaaegu kahjustamata (joonis 5). Uuringud mitmete fossiilkütuste kasutamisega näitasid, et see järeldus kehtib ka erinevate leiukohtade põlevkivide ja põlevkivi ning poolkoksi segude kohta väävli rikaste kivisütega [Kaljuvee jt, 2004b, 2006, 2007a].



Joonis 5.

Väävli jagunemine gaasifaasi ja tahke faasi vahel põlevkivi (Põ), poolkoksi (Pk) ja nende erinevates massivahekordades tuhalisandita või tuhalisandiga (+T) segude (CaO<sup>vaba</sup>/S moolsuhe segus 1,0 või 1,7) termooksüdatsioonil.

## CO<sub>2</sub> MINERALISEERIMINE PÕLEVKIVIENERGEETIKAS

### ÜLDIST

Maaailma üldsuses on võetud omaks arusaam, et nn “kasvuhooneefekt” ja sellega kaasnev kliima soojenemine on tingitud inimtegevusest – intensiivsest tööstuslikust arengust, millega käib kaasas gaasiliste heitmete emissioon atmosfääri [Climate ..., 2007]. CO<sub>2</sub> kontsentratsioon atmosfääris on tõusnud industrialiseerimiseelselt tasemelt 280 ppm näiduni 384 ppm aastal 2007, sealjuures alates 2000. a on aastase kasvu kiirus olnud 2 ppm. On ka teistsuguseid seisukohti, millest valdav tees on kliimamuutuste looduslik tsükliilisus [Eerme, 2005].

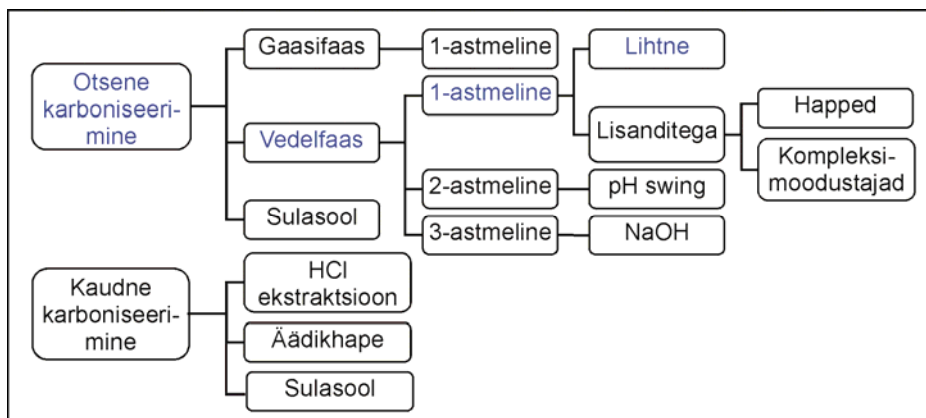
Senini valdavalt fossiilsete kütuste kasutamisel tuginev energiatootmine on peamine kasvuhoonegaasi CO<sub>2</sub> emiteerija atmosfääri. CO<sub>2</sub> sisaldus atmosfääris tõuseb kiirenevalt. Hinnatakse, et juba enne aastat 2100 on õhu CO<sub>2</sub><sup>(g)</sup>-sisaldus 0,06%, mis võib viia Maakera keskmise temperatuuri tõusmiseni optimistlike prognooside alusel 2,5°C võrra, pessimistlikud prognoosid pakuvad välja isegi 6°C [Global ..., 2000]. Sellealaseid uuemaid uurimistulemusi vahetatakse, arutatakse ja analüüsitakse intensiivselt maailma ja Euroopa Liidu erinevatel tasanditel, mitmesugustel veebilehtedel (nt <http://www.zero-emissionplatform.eu>, <http://www.gi.ee/co2net-east/jt>) ja rahvusvahelistel seeriakonverentsidel, näiteks *Greenhouse Gas Control Technologies* (viimane, GHGT-9 toimus 2008 Washingtonis, järgmine peetakse 2010 septembris Amsterdamis) jm. Rahvusvahelisel tasandil on sõlmitud mitmeid riikidevahelisi kokkuleppeid (näiteks Kyoto protokoll 1997), millega ka Eesti Vabariik on ühinenud. CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamiseks on vastu võetud mitmed strateegilised otsused, seadusandlikud aktid ning programmid, näiteks Eesti Rahvuslik Keskkonnastrateegia, Kasvuhoonegaaside Vähendamise Programm aastaiks 2003–2012 [Kasvuhoonegaaside ...]. Üldine suund on energiakasutuse efektiivsuse tõstmine ning taastuvenergia allikate laiem kasutamine.

CO<sub>2</sub> sisaldust atmosfääris saab stabiliseerida kas loodusliku/bioloogilise CO<sub>2</sub> sidumise suurendamisega või CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamisega. Viimane on saavutatav:

- (a) mittefossiilsete energiaallikate kasutamisega soojuse ja elektri tootmisel,
- (b) fossiilsete kütuste kasutamise vähendamisega või
- (c) laialdasema süsiniku sidumise ning ladustamise (siin ja edaspidi ingliskeelne lühendina CCS – *Carbon Capture and Storage*) tehnoloogiate rakendamiseiga [Lyngfelt, 2001; Huijgen, Comans, 2005; Sipilä jt, 2008].

Viimasel juhul on sidumisetapi sisuks CO<sub>2</sub> eraldamine teistest gaasidest. Fossiilsetel kütustel põhinevas energiatootmises on selleks kolm põhimõttelist lahenduskeemi – põletamisjärgne ning põletamiseelne eraldamine ja nn hapnikupõletamise (*oxy-fuel*) tehnoloogia. CO<sub>2</sub> eraldamine on seni küllalt energiamahukas (kütuse erikulu tõus energiaühiku kohta on ca 11-40%), erimaksumus kivisöel või gaasil töötavates elektrijaamades 15–75 USD/t CO<sub>2</sub> [IPPC ..., 2005].

Eesti energiatootmises on põhiliseks toormeks ka lähitulevikus veel põlevkivi. Tingituna viimase koostise eripärast (eelkõige kõrge lubjakivi-dolomiidi sisaldus mineraalosas) kaasneb tema põletamisega võrreldes muude energiakandjatega kõrgem CO<sub>2</sub> eriheide atmosfääri (29,1 t C/TJ võrreldes 25,8 ja 15,2 t C/TJ vastavalt kivisöe ja loodusliku gaasi puhul), millest kuni 20% moodustub nimetatud karbonaatide termolagunemisel ning leeliselise tuha teke. Olukorras, kus CO<sub>2</sub> emiteerivas tootmises tekib samaaegselt teda teatud tingimustes siduvat ja seetõttu CO<sub>2</sub> sorbendina vaadeldavat tuhka (esmakordselt juhtisid sellele tähelepanu J.-M. Punning ja A. Karindi) [Punning, Karindi, 1996] on loogiline süsteemi käsitleda ülaltoodud variandi (c) ühe alamvariandi valguses. Tulemuseks on nii CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamine tema sidumise tõttu mittelahustuvate karbonaatidena (sellest nimetus: CO<sub>2</sub> mineraliseerimine) kui ka leeliselise tuha osaline või täielik neutraliseerimine. CO<sub>2</sub> mineraliseerimise idee püstitati esmakordselt 1990. aastal [Seifritz, 1990] ning selle mõte oli kiirendada looduslike porsumisprotsesse tööstuslikult vastuvõetava tasemeni. Protsessi paljudest variantidest tegelesid autorid lihtsaima ja ilmselt odavaima rakendamisega (joonis 6).



Joonis 6.  
Peamised mineraliseerimisprotsessid [Uibu jt, 2009].

EELDUSED SUITSUGAASIDES SISALDUVA CO<sub>2</sub> SIDUMISEKS PÕLEVKIVITUHAGA. Termodünaamiliste arvutustega näidati ning katsetega kinnitati, et mitmed tuha komponendid on reaktsioonivõimelised CO<sub>2</sub> suhtes ja seda nii gaas-tahke kui ka gaas-tahke-vesi süsteemides [Kuusik jt, 2002a]. Peamisteks neist on vabad Ca-Mg-oksiidid ja viimaste hüdratatsiooniproductid (tekivad tuha kokkupuutel vee või õhuniiskusega). Näiteks vaba lubi reageerib kiiresti õhus sisalduva süsihappegaasiga [Oates, 1998; Uibu jt, 2008a]. Mitmete töödega on näidatud põlevkivituha kui CO<sub>2</sub> sorbendi positiivse eripärana, et küllalt intensiivne on, võrreldes looduslike mineraalidega, sekundaarsete põlemisprotsessis tekkinud Ca-Mg-silikaatide (näiteks beliit Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, pseudovollastoniit CaSiO<sub>3</sub>, mervi-



niit  $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ , jt), nn. klinkermineraalide reaktsioon  $\text{CO}_2$ -ga ja seda nimelt vesisuspensioonis [Uibu jt, 2009; Kuusik jt, 2002b, 2005a]. Viimase asjaolu valguses on teiseks oluliseks eelduseks  $\text{CO}_2$  lahustuvus vees süsihappe tekkega ning viimase dissotsiatsioon sõltuvalt lahuse pH väärtusest. Lahustuva  $\text{CO}_2$  kogus/kontsentratsioon lahuses nagu ka lahustumise kiirus on võrdeline tema osarõhuga gaasifaasis, mis suitsugaaside korral on võrreldes atmosfäärisisaldusega kõrge (12–15%).

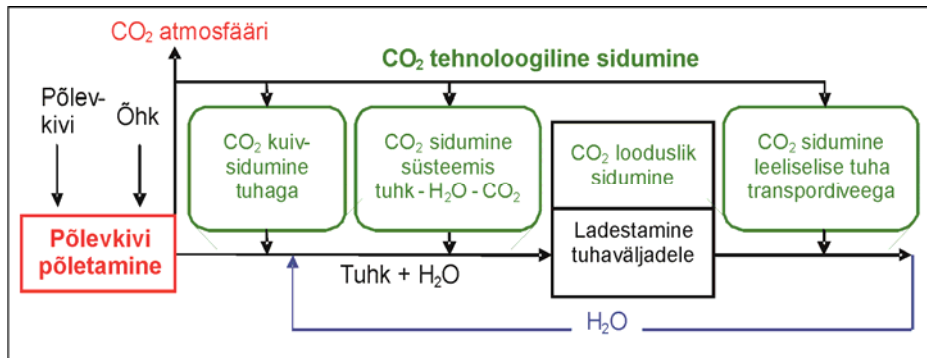
#### TUHA HÜDROERALDAMINE JA MÄRGLADUSTAMINE KUI SÜSTEEM $\text{CO}_2$ SIDUMISEKS

Eesti põlevkivienergeetikas realiseeritud tuha märgeraldamise ja -ladustamise skeemi järgi toimub looduslik  $\text{CO}_2$  sidumine tuhaväljal Ca-ioonidega küllastatud ringlusveega, mistõttu kogu kompleks on vaadeldav  $\text{CO}_2$  siduva süsteemina. Looduslik sidumine on aeglane protsess [Uibu jt, 2008a; Kuusik jt, 2001], kuid ta ulatus on autorite poolt selgelt tõestatud ning Eesti Vabariigi Keskkonnaministeeriumi poolt on vastav parandus lülitatud õhku heidetava  $\text{CO}_2$  mahtude arvutamise metoodikasse [EV Keskkonnaministri ..., 2004]. Käesolevas uuringute tsükli näidati võimalused ja protsessid  $\text{CO}_2$  kui happelise gaasi ning tuha leeliseliste komponentide vaheliste reaktsioonide kiirendamiseks keemilis-tehnoloogiliste meetoditega põlevkivituha sidumispotentsiaali täielikuks ärakasutamiseks (joonis 7) [Uibu, Kuusik, 2007; Uibu, 2008]. Sealjuures oleks  $\text{CO}_2$  allikaks suitsugaas (12-15%  $\text{CO}_2$ ), leeliselisteks voogudeks aga tuha vesisuspensioon ja/või süsteemis ringlev leeliseline transpordivesi. Lisaks analüüsiti tuhavälja  $\text{CO}_2$  sidumispotentsiaali [Uibu jt, 2008a; Kuusik jt, 2001] ning kuivsidumisprotsessi võimalusi (vt ülalpool). Hinnati ka tuha vaba lubja sisalduse vähendamisega kaasnevaid muutusi tema sideainelistes omadustes [Uibu jt, 2008a].

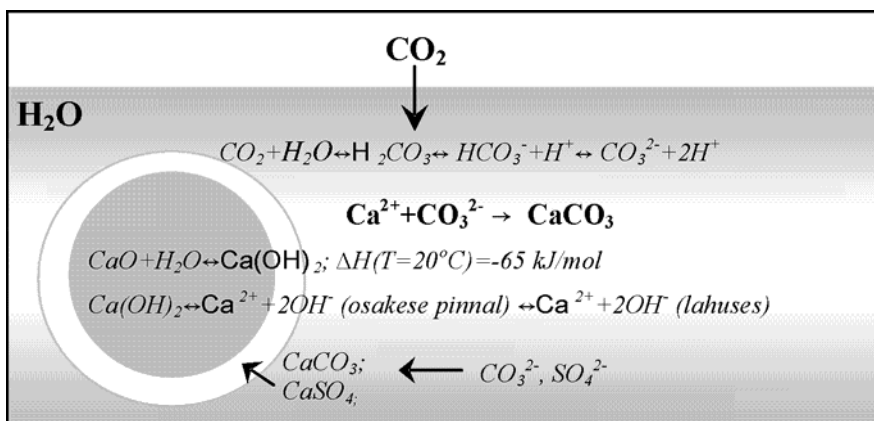
#### TUHA VESISUSPENSIOONI KARBONISEERIMINE SUITSUGAASIGA

Tuha vesisuspensiooni karboniseerimiseks suitsugaasiga on tarvilik mitmete astmete samaaegne toimumine (joonis 8). Protsessi seaduspärasused selgitati uuringutega perioodilises ja pidevtoimega reaktorites.

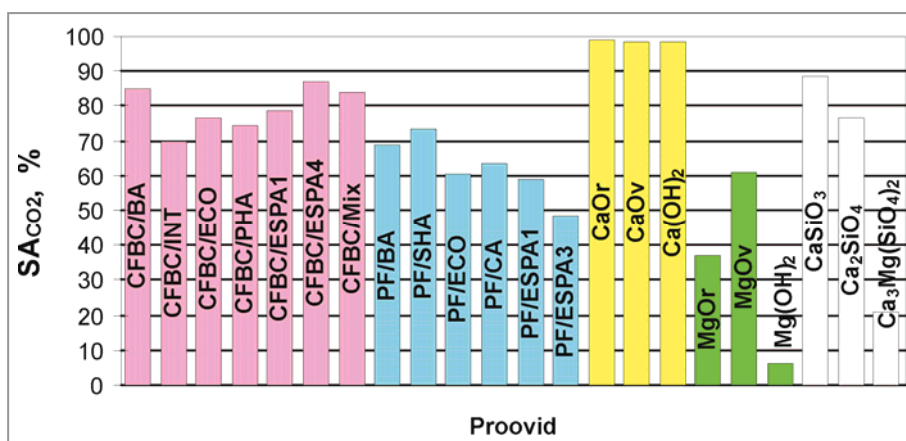
Selgitati tuhaerimite ning rea mudelainete reaktsioonivõime süsinikdioksiidiga perioodilistes mudeltingimustes (joonis 9). Näidati, et oodatult on enimaktiivsed tuha komponendid  $\text{CO}_2$  suhtes CaO ja  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , aga ka sekundaarsed kaltsiumsilikaadid.  $\text{CaSiO}_3$  ja  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  näitasid neis n-õ pehmetes tingimustes (atmosfäärirõhk ja temperatuur 30–50°C) head reaktsioonivõimet, erinedes selles osas looduslikest silikaatidest positiivselt. Katsetingimustes oli keevkihttuhkade (CFBC)  $\text{CO}_2$  sidumisaste 70–85% ja tolmpõletustuhkade (PF) oma 50-70% teoreetilisest Ca- ja Mg-ühendite põhiseest sidumismahukusest (ehk 110–145% vaba lubja põhiseest sidumismahukusest). Töötati välja ja kontrolliti eksperimentaalselt tingimused, mille juures õnnestub  $\text{CO}_2$  sidujana mobiliseerida ka nimetatud silikaatidesse seotud kaltsium ning esitati vastav patendi taotlus [Meetod ..., 2009].



Joonis 7. CO<sub>2</sub> mineraliseerimisvõimalused tuha märgkõrvaldamise ja -ladestamise korral.



Joonis 8. Lubja transformatsioonid põlevkivituhha märgkarboniseerimisel.

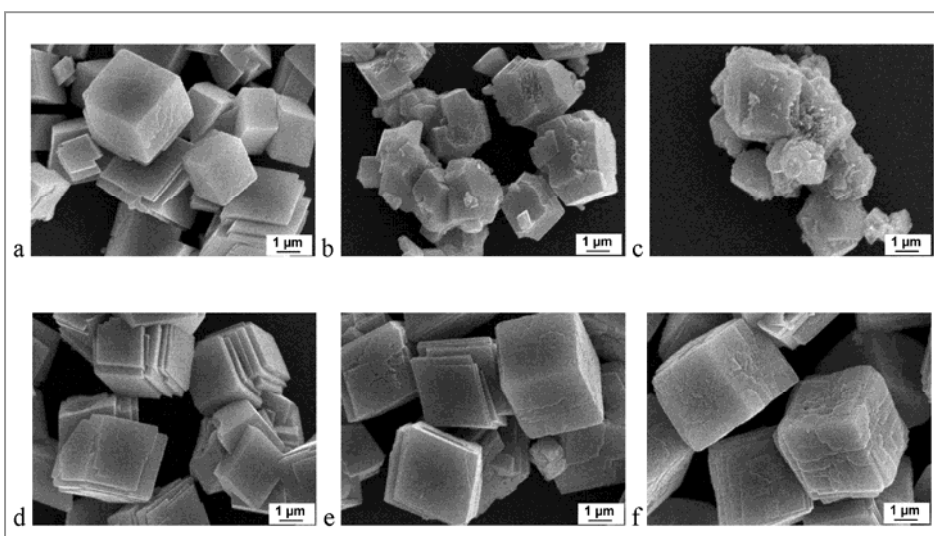


Joonis 9. Erinevate tuhaliikide ning nende koostisosade CO<sub>2</sub> sidumisvõime (SA<sub>CO<sub>2</sub></sub> %) vesisuspensioonis mudeltingimustes.

Erinevates põletustingimustes tekkivad tuhad erinevad oma reaktsioonivõimelt CO<sub>2</sub> suhtes vesikeskkonnas oluliselt. Tingituna madalamast vaba lubja sisaldusest on keevkihttuhkade poolt seotav CO<sub>2</sub> kogus väiksem (75–100 kg CO<sub>2</sub> ühe tonni tuha kohta). Samas realiseeritakse tema sidumismahukus pea täielikult suurema poorsuse tõttu. Tolmpõletustuhkade korral on see number 110–170 kg, kuid väiksema poorsuse ning pooride väiksema diameetri tõttu blokeeruvad nad, eriti kõrgema soolsusega ringlusvee korral, kergemini reaktsiooniproduktidega ja Ca-ioonide difusioon vedelfaasi takerdub ning protsess aeglustub või seiskub [Uibu, Kuusik, 2009]. Seetõttu jäi pidevkatsetes seadme koormuse 2,6 kg/h korral lubjasisaldus CFBC- ja PF-tuhkade korral ringlusvee kasutamisel vastavalt 0,6–0,8% ja 1,1–2,9% tasemele.

#### RINGLUSVEE TÖÖTLEMINE SUITSUGAASIGA

Tuha hüdroeraldamise süsteemis ringleb miljonites kuupmeetrites leeliselist (pH ~ 12–13) vett, mis on küllastunud Ca-ioonidega (800–1200 mg/L). Selle CO<sub>2</sub> sidumise potentsiaal on märkimisväärne [Uibu jt, 2008b, 2009; Uibu, Kuusik, 2007]. On töötatud välja meetod leeliselise ringlusvee intensiivseks neutraliseerimiseks suitsugaasis sisalduva CO<sub>2</sub>-ga, saades seejuures kasulikku kõrvalprodukti – sadestatud kaltsiumkarbonaati (SKK, joonis 10).



Joonis 10.

SKK proovid, mis on formeerunud erinevates tingimustes dispergaator-tüüpi reaktoris.

Viimane on kasulik kõrvalsaadus, kasutatav täiteainena mitmesugustes komposiitides. Uus protsess lühendab reaktsiooni läbiviimiseks vajalikku aega, võimaldab protsessi läbi viia väikesegabariidilises aparatuuris ning kindlustab kõrge intensiivsuse – eritootlikkuse (võrreldes barbotaaž- või absorberkolonni-

dega) on aparatuuri mahuühiku kohta kuni 50 korda kõrgem [Meetod ..., 2006]. Samuti analüüsiti suitsugaasi muude happeliste komponentide SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ja HCl juuresoleku mõju ning järeldati, et oma vähesuse tõttu nad leeliselise ringlusvee CO<sub>2</sub>-ga neutraliseerimise protsessi praktiliselt ei mõjuta. Eksperimenditsüklil SO<sub>2</sub> mõju hindamiseks leeliselise ringlusvee neutraliseerimisel suitsugaasidega kinnitas eelöeldut. Fikseeriti karboniseerimisprotsessi käigus aset leidvad muutused vedelfaasi väävliühendite, eelkõige sulfaatiooni sisalduses. Hinnati mõningad leeliselise ringlusvee suuremahulise käitlemise tehnilised näitajad ning koostati soovitud protsessi kontrolliks pilootseadmel.

#### CO<sub>2</sub> LOODUSLIK TAGASISIDUMINE TUHAVÄLJAL

CO<sub>2</sub> looduslikku tagasisidumist atmosfääriõhust tuhaga on uuritud mitmes etapis, hilisemad tulemused on saadud tolmpõletus- ja keevkihttuhkade ning nende segude kasutamise erinevatel aastaegadel [Uibu jt, 2008a; Kuusik jt, 2001]. Selgitati sidumisprotsessis toimuvad muutused [Kuusik jt, 2004b; Liira jt, 2008]. Näidati, et sidumise eelduseks on tuha mõõdukas niiskussisaldus ning hea kontakt (suur kontaktpind) õhuga. Leiti, et mõlema tuhaliigi ja nende segu puhul seotakse CO<sub>2</sub> intensiivselt mõne sentimeetri ulatuses, sügavamal on sidumine tagasihoidlik. Siiski, kokku seotakse tuhaväljadel 50–60 tuhat t CO<sub>2</sub> aastas. See kogus on kergesti kahekordistatav tuhavälja pealispinna perioodilise kobestamisega. Tuhapulbi valmistamise tehnoloogia CO<sub>2</sub> looduslikku sidumist tuhkadesse ei mõjuta.

#### VÕIMALIKUD CO<sub>2</sub> SIDUMISMAHUD

Laboritööde kokkuvõtteks on selge, et looduslikult seotakse praegu tuhaväljadel 2,3–3,0% tekkivast CO<sub>2</sub>-st ning ringlusvee neutraliseerimisega saab seda tõsta 5%-ni. Tõhusaim viis on tuhapulbi sügav karboniseerimine, mille tulemusena õnnestub siduda 10–12 ja 60–75% CO<sub>2</sub> vastavalt tema summaarsest ja mineraalsest tekkest. Seotava CO<sub>2</sub> üldkogus võib ulatuda 160–230 tuhande tonnini 1 miljoni tonni tuha kohta, praeguste tootmismahude juures 1–1,2 miljoni tonnini aastas [Uibu jt, 2009].

#### PÕLETUSPROTSESS KEEMILISE HAPNIKUVAHENDUSEGA (CLC)

Hinnatud töödekompleksi üheks osaks oli ka panus, mis anti ühisprojekti raames mitme ülikooli, uurimisinstituudi (Chalmersi ja Viini Tehnikaülikoolid, CSIC-Saragosa) ning tuntud firmaga (Alstom, Shell, WITO) uudse põletusprotsessi arendusse perioodil 2006–2008 [Matisson jt, 2009; Kuusik jt, 2009; Linderholm jt, ilmumas]. Selles protsessis viiakse põlemiseks vajalik hapnik õhust kütuseni tahke hapnikukandjaga, mis retsirkuleerib nn õhureaktori (metalliline kandja oksüdeerub) ja kütusereaktori (siin toimub põlemine, milleks vajaliku hapniku loovutab õhureaktorist tulev metallioksiid) vahel. Protsessi tulemusena sisaldab kütusereaktorist väljuv suitsugaas vaid veeauru ja süsihappegaasi. Esimese kondenseerimise järel on CO<sub>2</sub> valmis veeldamiseks ja ladustamiseks, st ta ei emiteeru atmosfääri.

## TÖÖDE RAKENDUSI

Tulemusi on kasutatud

- Keskkonnaministeeriumi poolt CO<sub>2</sub> emissioonimahtude arvutusmetoodika korrigeerimisel ning ühe alusmaterjalina taotluse koostamisel Euroopa Liidu vastavale komisjonile, tunnustamaks parima võimaliku tehnoloogiana praegu kasutatavat põlevkivituha hüdrotranspordi ja märgladustamise süsteemi. Taotlus aktsepteeriti ning uute tehnoloogiate kasutamise vajaduse äralangemine võimaldas riigil ilma keskkonnaseisundit kahjustamata kokku hoida investeeringuid sadade miljonite kroonide ulatuses;
- AS Eesti Energia poolt ühe alusmaterjalina projektipakkumise koostamisel oma ettevõtte CO<sub>2</sub> emissiooniküsimuste komplekseks rahvusvaheliseks hindamiseks, samuti ühe alusinfona pakkumiskonkursi tingimuste koostamisel DeSO<sub>x</sub>-protsessi lahenduste saamiseks ja rakendamiseks tolm põletuskateldel. Süsteemi tuhk-SO<sub>2</sub> reaktsioonide parameetrite teadmine ja kasutamine võimaldas loobuda suitsugaaside väävlipuhastuse süsteemis kaubalubja kasutamisest, mis oluliselt alandab protsessi maksumust. Lisaks võimaldab efektiivse ja odava väävlipuhastuse rakendamine hoid tolm põletuskatlad jätkuvalt eksploatatsioonis ka pärast aastat 2012. Tarneleping on sõlmitud;
- Koostöös Eesti Energia Narva Elektri jaamad AS-ga, mille tulemusel koostati ja esitati taotlused uute CO<sub>2</sub> sidumisprotsesside tehniliste lahenduste autorikaitseks. Taotlused on menetluses;
- Piloosadme režiimide valikuks CLC-võrgustiku partnerite juures.

## KOKKUVÕTE

Kirjeldatud töödega loodi võrdlev alusteave ning süsteemne kuvand Eesti lubjakividest, dolomiitidest, poolkoksist ning põlevkivituhkadest kui happeliste gaaside sorbentidest. Uudse tulemusena selgitati SO<sub>2</sub> ja CO<sub>2</sub> heterogeensete gaas-tahke sidumisprotsesside kulgemise ja pidurdumise kemism/mehhanism, rakendati ja täiustati SO<sub>2</sub> sidumise protsessi matemaatiline mudel. Seejuures tõestati materjalides sisalduvate Mg-ühendite osalemine SO<sub>2</sub> sidumisel tahkesse faasi ning avati poolkoksi SO<sub>2</sub> emissiooni vähendava efekti olemus tema koospõletamisel S-rikaste kütustega (näiteks kivisöega), samuti tema S- ja Cl-ühendite emissiooni pärssiva toime kemism. Töötati välja kontseptsioon kasvuhoonegaasi CO<sub>2</sub> emissiooni piiramiseks Eesti põlevkivienergeetikas keemilis-tehnoloogiliste meetoditega, kasutades CO<sub>2</sub> mineraliseerimiseks suitsugaasidest samas protsessis tekkivat põlevkivituhka, vaadeldes tuha hüdroeraldamise ja märgladustamise realiseeritud tehnilist lahendust süsihappegaasi siduva süsteemina. Tõestati, et erinevalt looduslikest mineraalidest on lisaks vabale lubjale põlevkivituhkade vesisuspensioonis CO<sub>2</sub> mineraliseerimiseks kasutatav ka märgatav osa tuhas sisalduvast sekundaarsetesse silikaatidesse seotud kaltsiumi-magneesiumi kogusest. Hinnati oodatavad tulemused, töötati välja kahe uue tehnilise lahenduse teoreetilised alused, koostati tehnoloogilised

soovitused protsesside kontrolliks pilootseadme mastaabis. Aidati kaasa mitme tähtsa tehnilise lahenduse leidmisele, mis aitavad kindlustada riigi energiasüsteemi varustuskindlust ja leevendada keskkonnaprobleeme. Selgitati põhimõtteliselt uues, kontsentreeritud CO<sub>2</sub> heitgaaside vooga põletusprotsessis (inglise keeles *Chemical Looping Combustion – CLC-process*) kasutatava hapnikukandja termopüsivuse muutuse olemus/põhjused ning piirid.

Kirjeldatud tööd on teostatud Tallinna Tehnikaülikooli anorgaaniliste materjalide teaduslaboris ning nende edukuse tagatis on olnud kogu grupi väga suur panus, nii loomingulises (eelkõige Mai Uibu) kui teostuslikus (Helle Ehala, Helgi Veskimäe, Marve Einard, Endel Kalnapenk jt) võtmes. Emeriitprofessor akadeemik Mihkel Veiderma konstruktiivne ja heasoovlik kriitika on olnud edasiviiv ning toetav. Tähelepanuväärselt tihe on olnud koostöö kolleegidega paljudest ülikooli teistest struktuuriüksustest – Tõnu Pihu, Andres Siirde, Ants Martins, Valdek Mikli, Urve Kallavus, Mihkel Koel, Alla Shogenova, aga ka teistest partnerülikoolidest (Kalle Kirsimäe Tartust, Anders Lyngfelt Göteborgist, Ron Zevenhoven Turust, Carl-Johan Fogelholm ja Sebastian Teir Helsingist, Gintaras Denafas Kaunasest) ning firmadest kodu- (Mati Uus, Olev Parts, Arvo Tordik jt AS-st Narva Elektri jaamad) ning välismaal (Shell, Alstom, WITO, CSIC jt). Loetelu pole ammendav. Autorite siiras tänu kõigile!

#### KIRJANDUS

Abanades, J. C., Alonso, M., Rodríguez, N., et al. (2009). Capturing CO<sub>2</sub> from combustion flue gases with a carbonation calcination loop. Experimental results and process development. *Energy Procedia*, 1, 1, 1147-1154.

Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary of Policymakers. (2007). IPCC Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Approved at the 10th session of working group I of the IPCC, Paris, February 2007.

Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on National Emission Ceilings (NEC) for Certain Atmospheric Pollutants. (2001). OJ L 309, 27.11.2001, 22.

Eerme, K. Kliimaheitluste vaherahu aeg. (2005). Veismann, U., Veskimäe, R. (koost.) *Universum valguses ja vihmas*. Tallinn, 280-287.

Eesti Energia aastaraamat 2007/08. (2008). Eesti Energia, Tallinn.

European Environment Agency. National emissions reported to the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP Convention). <http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice/metadetails.asp?id=1013>.

EV Keskkonnaministri 16. juuli 2004. a määrus nr 94. (2004). RTL, 101, 1625.

EV Valitsuse määrus nr. 112. (2004). Saasteainete heitkoguste piirväärtused suurtest põletusseadmetest väljuvate gaaside mahuühiku kohta. RTL, 122, 1891.

EV Valitsuse määrus nr. 299. (2004). Paiksetest ja liikuvatest saasteallikatest eralduvate vääveldioksiidi, lämmastikoksiidide, lenduvate orgaaniliste ühendite ja ammoniaagi heidete summaarsed piirkogused ja nende saavutamise tähtajad. RTI, 68, 472.

EV Välisõhu kaitse seadus. (2004). RTI, 43, 298.

Global Warming. Hotting up in The Hauge. (2002). *The Economist*, 18, 101-104.

Huijgen, W. J. J., Comans, R. N. J. (2005). Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation. Report No 2005/11, ECN-C-022.

IPCC Special Report on Carbon Capture and Storage (2005). Intergovernmental Panel of Climate Change: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2005, 443.

Kaljuvee, T., Edro, E., Kuusik, R. (2007a). Formation of volatile organic compounds at thermooxidation of solid fossil fuels. *Oil Shale*, 24, 2, 117-133.

Kaljuvee, T., Kuusik, R. (1999). Emission of sulphur dioxide during thermal treatment of fossil fuels. *J. Therm. Anal. Cal.*, 56, 1243-1251.

Kaljuvee, T., Kuusik, R., Trikkel, A. (2003a) SO<sub>2</sub> binding into the solid phase during thermooxidation of blends based on Estonian oil shale semicoke. *J. Therm. Anal. Cal.*, 72, 393-404.

Kaljuvee, T., Kuusik, R., Trikkel, A., Maljukova, N. (2003b). Behaviour of sulphur compounds at combustion of oil shale semicoke. *Oil Shale*, 20, 2, 113-125.

Kaljuvee, T., Kuusik, R., Uibu, M. (2004a). Behaviour of magnesium compounds at sulphation of lime-containing sorbents. Proc. of VI Int. Symp. and Exhib. on Environmental Contamination in Central and Eastern Europe and the Commonwealth of Independent States, Prague, Czech Republic, 1-4 Sept. 2003. Tallahassee, Florida State University. (CD-ROM)

Kaljuvee, T., Pelt, J., Radin, M. (2004b). TG-FTIR study of gaseous compounds evolved at thermooxidation of oil shale. *J. Therm. Anal. Cal.*, 78 (Special Issue), 399-414.

Kaljuvee, T., Radin, M., Astahhov, D., Pelovski, Y. (2006). Evolved gas analysis at thermal treatment of some solid fossil fuels. *J. Therm. Anal. Cal.*, 84, 59-66.

Kaljuvee, T., Toom, M., Trikkel, A., et al. (2007b). Reactivity of oil shale ashes in the binding of SO<sub>2</sub>. *J. Therm. Anal. Cal.*, 88, 1, 51-58.

Kaljuvee, T., Trikkel, A., Kuusik, R. (1997). Reactivity of oil shale ashes towards sulfur dioxide. 1. Activation of high-temperature ashes. *Oil Shale*, 14, 3, 393-408.

Kaljuvee, T., Trikkel, A., Kuusik, R., et al. (2005). The role of MgO in the binding of SO<sub>2</sub> by lime-containing materials. *J. Therm. Anal. Cal.*, 80, 3, 591-597.

Kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamise riiklik programm aastateks 2003–2012. <http://www.keskkonnainfo.ee/failid/kliimaveeb/20a.pdf>.

Kiipli, T. (1984). Väikese lisandite sisaldusega lubjakivide ja dolomiitide genees ja levik Eestis. Dissertatsioon. Eesti Teaduste Akadeemia Geoloogia Instituut. KAK, NSVL.

Kuusik, R., Kaljuvee, T., Trikkel, A., Rundougin, Y., Alfimov, G., Jegorov, D., Maarend, J. (1999). Flue gas desulphurization at oil shale fired plants. Proc. of the Fourth Int. Symp. and Exhibition on Environmental Contamination in Central and Eastern Europe, Warsaw, Poland, Sept. 15-17, 1998. Tallahassee, USA: Florida State University, 272. (CD-ROM)

Kuusik, R., Martins, A., Pihu, T., Pesur, A., Kaljuvee, T., Prikk, A., Trikkel, A., Arro, H. (2004a). Fluidised bed combustion of oil shale retorting solid waste. *Oil Shale*, 21, 3, 237-248.

Kuusik, R., Paat A., Veskimäe H., Uibu M. (2004b). Transformations in oil shale ash at wet deposition. *Oil Shale*, 21, 1, 27-42.

Kuusik, R., Trikkel, A., Lyngfelt, A., Mattisson, T. (2009). High temperature behavior of NiO-based oxygen carriers for Chemical Looping Combustion. *Energy Procedia*, 1, 3885-3892.

Kuusik, R., Törn, L., Trikkel, A., Uibu, M. (2002a). Carbon dioxide binding in the heterogeneous systems formed at combustion of oil shale. 2. Integrations of system components – thermodynamic analysis. *Oil Shale*, 19, 2, 143-160.

Kuusik, R., Uibu, M., Kirsimäe, K. (2005a). Characterization of oil shale ashes formed at industrial-scale CFBC boilers. *Oil Shale*, 22, 4, 407-419.

Kuusik, R., Uibu, M., Toom, M., et al. (2005b). Sulphation and carbonization of oil shale CFBC ashes in heterogeneous systems. *Oil Shale*, 22, 4, 421-434.

Kuusik, R., Veskimäe, H., Kaljuvee, T., Parts, O. (2001). Carbon dioxide binding in the heterogeneous systems formed by combustion of oil shale. 1. Carbon dioxide binding at oil shale ash deposits. *Oil Shale*, 18, 2, 109-122.

Kuusik, R., Veskimäe, H., Uibu, M. (2002b). Carbon dioxide binding in the heterogeneous systems formed by combustion of oil shale. 3. Transformations in the system suspension of ash – flue gases. *Oil Shale*, 19, 3, 277-288.

Liira, M., Kirsimäe, K., Kuusik, R., Mõtsep, R. (2008). Transformation of calcareous oil-shale circulating fluidized-bed combustion boiler ashes under wet conditions. *Fuel*, 88, 4, 712-718.

Linderholm C., Lyngfelt A., Trikkel A., Kuusik R., Jerndal E., Mattisson T. (ilmumas). Chemical looping combustion with natural gas using spray-dried NiO-based oxygen carriers. Thomas, D. C., Benson, S. M. (Eds.). Chapter XX in book „Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geological Formations. Vol. 3.



- Lyngfelt, A. (2001). An introduction to CO<sub>2</sub> capture and storage. Second Nordic Minisymposium on Carbon Dioxide Capture and Storage. 26. Oct. 2001, Göteborg, Sweden.
- Manovic, V., Anthony, E. J. (2008). Sequential SO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> capture enhanced by steam reactivation of a CaO-based sorbent. *Fuel*, 87, 8-9, 1564-1573.
- Martins, A., Pesur, A., Kallaste, E. (1997). Co-combustion of oil shale semi-coke and oil shale mixtures in fluidized bed. ESF Grant No. 2210 Report. Tallinn, 44.
- Matisson, T., Adanez, J., Proell, T., Kuusik, R., Beal, C., Assink, J., Snijkers, F., Lyngfelt, A. (2009). Chemical-looping combustio CO<sub>2</sub> ready gas power. *Energy Procedia: The 9th Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-9)*, 16-20 November 2008, Washington DC. Elsevier, 1557-1564.
- Meetod aluselise reovee neutraliseerimiseks suitsugaasis sisalduva süsinikdioksiidiga. (2006). Omanik: Tallinna Tehnikaülikool, AS Narva Elektri-jaamad; Autorid: Rein Kuusik, Mati Uus, Mai Uibu, Gennadi Stroganov, Olev Parts, Andres Triikkel, Valeriy Pepoyan, Aleksander Terentiev, Endel Kalnapenk; Prioriteedinumber: EE200600041; Prioriteedikuupäev: 22.12.2006.
- Meetod CO<sub>2</sub> kõrvaldamiseks suitsugaasidest kaltsiumühendeid sisaldavate tööstusheitmete toimel. (2009). Autorid: Rein Kuusik, Mai Uibu, Mati Uus, Olga Velts, Andres Triikkel, Rain Veinjärv; Prioriteedinumber: P200900040; Prioriteedikuupäev: 08.06.2009.
- Oates, J. A. H. (1998). *Lime and Limestone: Chemistry and Technology, Production and Use*. Weinheim etc.: Wiley - VCH, USA.
- Prikk, A., Arro, H. (1997). Circulating fluidized bed combustion – the technology exact for Estonian oil shale. *Oil Shale*, 14, 3S, 209-214.
- Punning, J.-M., Karindi, A. (1996). Composition of Estonian atmosphere Estonia in System of Global Climate Change. *Institute of Ecology. Publications*, 4, 26-34.
- Seifritz W. (1990). CO<sub>2</sub> disposal by means of silicates. *Nature*, 345-486.
- Sipilä, J., Teir, S., Zevenhoven, R. (2008). Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation. Literature review update 2005-2007. Report VT 2008-1.
- Triikkel, A. (2001). *Estonian Calcareous Rocks and Oil Shale Ash as Sorbents for SO<sub>2</sub>*. Dept. of Chemistry. TUT Press, Tallinn.
- Triikkel, A., Keelmann, M., Kaljuvee, T., et al. (2010). CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> uptake by oil shale ashes: Effect of pre-treatment on kinetics. *J. Therm. Anal. Cal.*, 99, 3, 763-769.
- Triikkel, A., Zevenhoven, R., Kuusik, R. (2000). Modelling SO<sub>2</sub> capture by Estonian limestones and dolomites. *Proc. Estonian Acad. Sci. Chemistry*, 49, 1, 53-70.

- Uibu M. (2008). Abatement of CO<sub>2</sub> emissions in Estonian oil shale-based power production. Theses of Tallinn University of Technology. Tallinn Technical University Press. Tallinn.
- Uibu, M., Kuusik, R. (2007). Concept for CO<sub>2</sub> mineralization by oil shale waste ash in Estonian power production. The 3rd Int. Green Energy Conf., June 17-21 2007, Västerås, Sweden, 2007, 1075 - 1085.
- Uibu, M., Kuusik, R., (2009). Mineral trapping of CO<sub>2</sub> via oil shale ash aqueous carbonation: rate controlling mechanism and development of the continuous flow reactor system. *Oil Shale*, 26, 1, 40- 58.
- Uibu, M., Kuusik R., Veskimäe H. (2008a). Seasonal binding of atmospheric CO<sub>2</sub> by oil shale ash. *Oil Shale*, 25, 2, 254-266.
- Uibu, M., Uus, M., Kuusik, R. (2009). CO<sub>2</sub> mineral sequestration by oil shale wastes from Estonian power production. *J. Environ. Manage.*, 90, 1253-1260.
- Uibu, M., Velts, O., Triikkel, A., Kuusik, R. (2008b). Reduction of CO<sub>2</sub> emissions by carbonation of alkaline wastewater. Sixteenth Int. Conf. on Modelling, Monitoring and Management of Air Pollution. 22-24. Sept. 2008, Skiathos, Greece. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 116, 311-320.
- Velts, O., Uibu, M., Rudjak, I., Kallas, J., Kuusik, R. (2009). Utilization of oil shale ash to prepare PCC: leachability dynamics and equilibrium in the ash-water system. *Energy Procedia*, 1, 4843-4850.

*Teaduspreemia arstiteaduse alal uurimuste tsükli  
“Infektsioonide käsitus omandatud immuunpuudulikkusega isikutel”  
eest*



*Irja Lutsar*

Sündinud 20.07.1954

1972 Röpina Keskkool  
1978 Tartu Ülikool, arstiteaduskonna pediatríaosakond  
1978–1979 pediatríline internatuur Tallinna I Lastehaiglas  
1995 PhD, arstiteadus, Tartu Ülikool  
1995–1998 järeldoktorantuur laste nakkushaigustes, Southwestern Medical School, Dallas, Texas, USA  
  
1979–1982 Võru Rajooni Kesksaigla pediatér  
1982–1992 Tartu Linna Kliinilise Lastehaigla pearsti asetáitja, nakkuskorpuse juhataja  
1999–2003 kliinilise projekti juht, Pfizer Ltd., *Global Research and Development*, UK  
2003–2004 pediatrílise programmi juht, Pfizer Ltd., Sandwich, UK  
Alates 2004 Tartu Ülikooli mikrobioloogia instituudi juhataja, professor  
Avaldanud 73 teaduspublikatsiooni

Tánu antibiootikumide avastamisele ja vaktsiinide laialdasele kasutuselevõtule muutus XX sajandil oluliselt infektsioonhaiguste prognoos – haigused, mis eelnevalt sageli surmaga lõppesid (nt difteeria, kopsupõletik, ajukelmepõletik jne) muutusid nüüd ravitavateks ning mõned neist kadusid täielikult või nende esinemine muutus üliharvaks. Samas aga on just meditsiini ja mõnel määral ka üldise sotsiaalse tausta areng ja paranemine toonud kaasa uued probleemid. Nii on kahekümne esimese sajandi kõrgtehnoloogilise meditsiini üheks väga oluliseks probleemiks muutumas järjest suurenev immuunsüsteemi häirega isikute hulk. Selle põhjuseks on ühelt poolt esilekerkinud infektsioonhaigused – näiteks inimese immunodefítsiitsuse viiruse (HIV) muutumine inimpatogeenseks 1930ndatel aastatel. Teisalt on viimastel aastatel toimunud murrangulised arengud mitmetes meditsiini valdkondades; on leitud uusi ravimeid (nt palhaloomuliste kasvajaté raviks) ning kasutusele võetud komplitseeritud ravimeetodeid (nt organite siirdamine). See kõik on viinud eelpool toodud haiguste elulemuse olulisele paranemisele, kuid agressiivse ravi hinnaks on organismi oma immuunsuse mahasurumine. Samuti on kaasaegsete sünnitusabi ja vast-sündinute intensiivravi meetodite areng suurendanud väga sügavalt enneaegsete vast-sündinute (sünnikaaluga alla 1000g ja gestatsioonivanusega alla 28 nädala) hulka ja nende prognoosi [Toome jt, 2009].

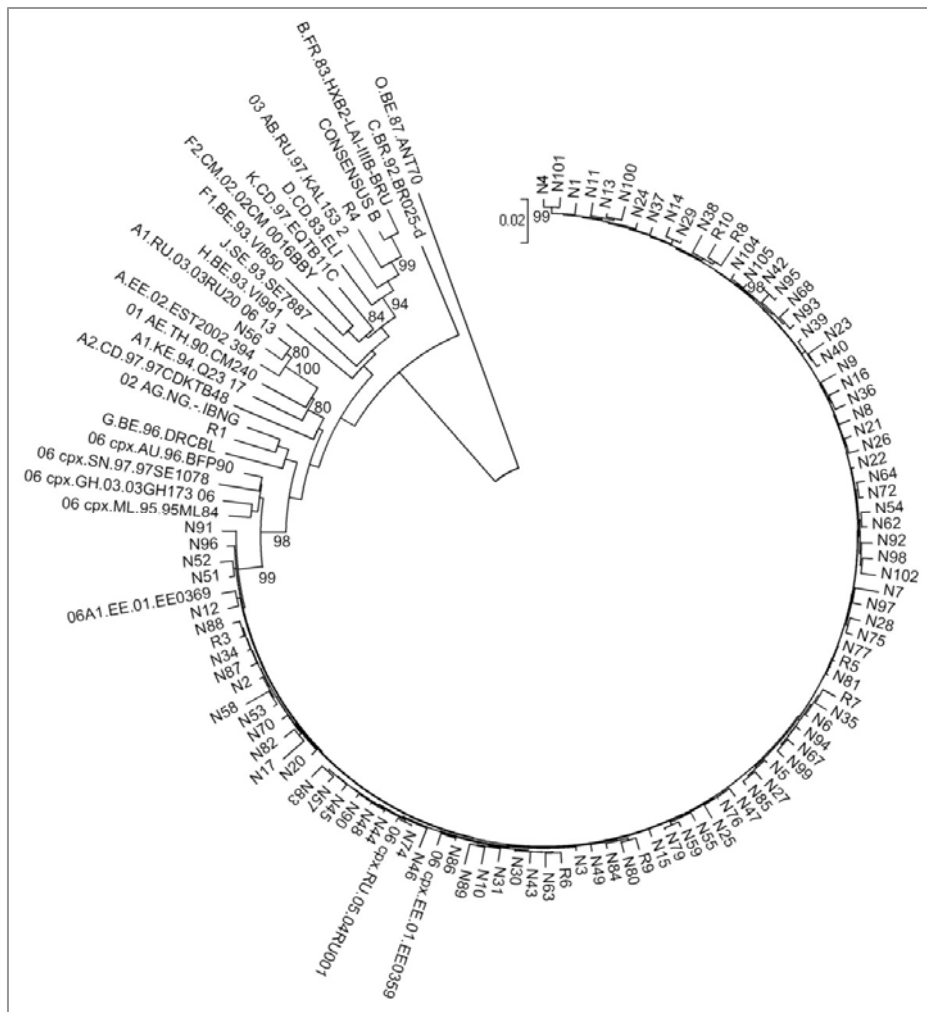
Ülaltoodust lähtuvalt on minu viimaste aastate uuringute eesmärkideks olnud (1) kirjeldada Eestis ringleva HIV ja peremeesorganismi vahelisi suhteid, sealhulgas viiruse resistentsust retroviirusvastaste ravimite suhtes ja (2) uurida antibiootikumide farmakokineetikat ja taluvust ning optimeerida vastsündinu varase sepsise ravirežiimi.

#### HIV INFEKTSIOON OMANDATUD IMMUUNPUUDULIKKUSE PÕHJUSENA

HIV replikatsioonile on iseloomulik rohke vigade hulk, mis omakorda tingib viiruse suure mitmekesisuse. Selle ilmeks näiteks on olukord, et maailma eri piirkondades ringlevad viirused on väga erineva geneetilise struktuuriga [Nowak jt, 2002]. Eestis HIV epideemiat põhjustanud viiruse omapära ja unikaalsust kirjeldati esmakordselt 2004 aastal, mil selgus, et erinevalt meid ümbritsevatest riikidest ringleb siin valdavalt HIVi tsirkuleeriv rekombinantne vorm CRF06\_cpx, mida lisaks Eestile oli sel ajal leitud vaid Ida-Aafrikast [Adojaan jt, 2005; Zetterberg jt, 2004]. Missuguseid teid mööda viirus Eestisse sattus pole siiani täpselt teada. Meie jätkasime HIV molekulaarepidemioloogilisi uuringuid 2005. aastal, püüdes välja selgitada kui stabiilne on Eestis ringlevate viiruste kooslus ja missugune on nende tundlikkus retroviirusvastaste ravimite suhtes. Uuringud toimusid valdavalt HIV kontsentreeritud epideemia epitsentris Ida-Virumaal, lisaks hõlmasime uuritavaid ka Tartu vanglast, kuna suur osa HIV-positiivsetest vangidest pärines ka epideemia epitsentri piirkonnast. Iseloomulikult Eesti HIV-positiivsete populatsioonile olid uuritavad valdavalt vanuses alla 30 aasta, vene keelt kõnelevad, meessoost ja süstivad narkomaanid [Ruutel, Uuskula, 2006; Platt jt, 2006]. Uuringud näitasid esiteks, et Eestis ringlev HIV populatsioon on äärmiselt monofüleetiline (joonis 1) ja teiseks, et ligikaudu 10 aastat pärast epideemia puhkemist on endiselt enam kui 90% HIV positiivsetest isikutest nakatunud kas esialgselt ringlema hakanud CRF06\_cpx viirusega või selle viiruse järgmise põlvkonna rekombinandi CRF06A-ga [Avi jt, 2009]. Seega, vaatamata HIV-I suurele muutlikkusele on Eesti viiruse populatsioon alates 2000. aastast püsinud suhteliselt muutumatu. See leid viitab asjaolule, et Eesti HIV epideemiat hoiab üleval viiruse Eesti-sisene edasikandumine ja mitte uute viiruste import teistest piirkondadest.

Järgnevalt huvitas meid Eestis ringleva rekombinantse viiruse tundlikkus retroviirusvastaste ravimite suhtes. Kuigi HI-viiruse geneetilist struktuuri ja ravimresistentsete mutatsioonide teket on Lääne-Euroopas ja Ameerika Ühendriikides (nn vanades HIV epideemia maades) mitmeid aastaid uuritud, on siiani minimaalselt andmeid ravimresistentsuse kohta nn “uue HIV infektsiooni epideemia” maadest (valdavalt endise Nõukogude Liidu aladelt) [Wensing jt, 2005]. Oma uuringutes määrasime antiretroviirusvastaste ravimite resistentsusele viitavate mutatsioonide ja looduslike polümorfismide esinemist HIV genoomi pöördtranskriptaasi ja integraasi piirkonnas. Uuritavateks oli enam kui

200 HIV-positiivset ravi mittesaanud isikut. Uuringud viidi läbi aastatel 2005–2007 ja nende käigus ei tuvastanud me ei pöördtranskriptaasi ega integraasi piirkonnas ühtegi ravimresistentsusele viitavat mutatsiooni [Avi jt, 2009, 2010b]. Siiski esines mõlemas piirkonnas rohkelt looduslikke polümorfisme, mis on küll väga omased rekombinantsetele viirustele, kuid mille kliinilist tähtsust peaksid selgitama meie edasised uuringud. Aastal 2008 uurisime kõiki jaanuarist kuni aprillini HIV diagnoosiga esimest korda arsti poole pöördunud haigeid ja hindasime ravimresistentsusmutatsioonide esinemist.



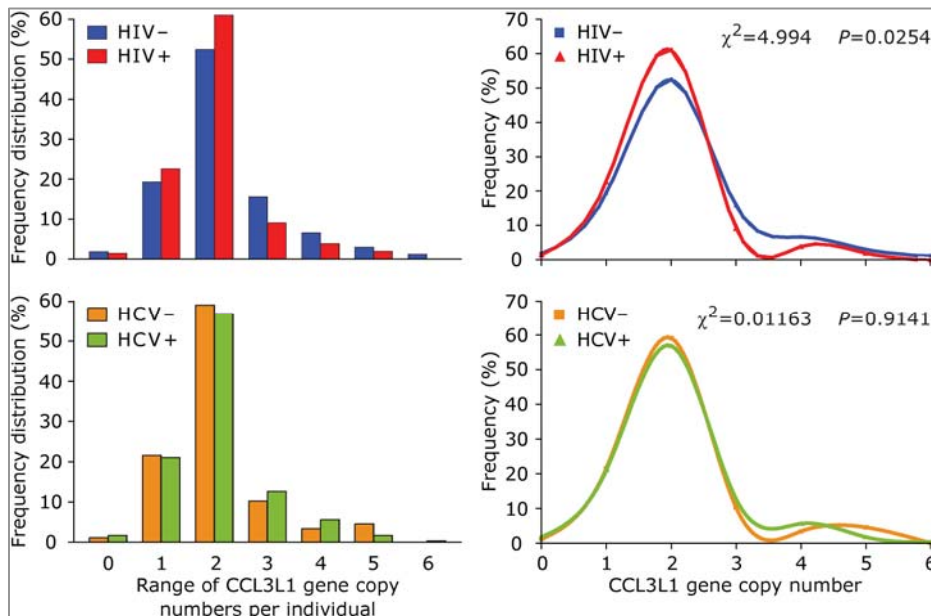
Joonis 1. Eestis ringlevate HI-viiruste integraasi piirkonna fülogeneetiline puu. Eestis ringlevad viirused on tähistatud N tähega.

Selles uuringus leiti nimetatud mutatsioone 5,5% uuritavatest [Avi jt, 2010a], mis viitab asjaolule, et vaatamata tänapäeval kasutusel olevale kombineeritud retroviirusvastasele ravile ei ole resistentsuse teket ravi foonil võimalik vältida. HIV ravim-resistentsuse uuringutel on lisaks teaduslikule ja epidemioloogilisele väärtusele ka oluline tähtsus igapäevasele meditsiinile Eestis. Tänu just nendele uuringutele töötati välja ja juurutati praktikasse Eesti viirustele sobivad testid, mis omakorda peaks parandama HIV haigete ravi tulemusi.

Üheks võtmeküsimuseks mõistmaks HIV infektsiooni patogeneesi on aru saada viiruse ja peremeesorganismivahelistest suhetest. Teisi sõnu leida vastus küsimusele, miks mõned inimesed haigestuvad ja teised ei haigestu HIV infektsiooni ja miks mõnedel tekib haiguse progressioon väga kiiresti ja teistel kulgeb haigus aastaid latentsena. Eelnevad uuringud on selgelt näidanud, et olulist rolli selles protsessis etendab kemokiini retseptor CCR5, mis on üks peamisi ko-retseptoreid HIV sisenemisel peremeesorganismi immuunrakudesse [Berger jt, 1999; Kaslow jt, 2005; Lederman, Sieg, 2007]. CC ligand 3 like-1 (CCL3L1), CCL3, CCL4, CCL4L1 ja CCL5 on CCR5 retseptori peamised ligandid ja *in vitro* on näidatud, et nad pööravad viiruse sisenemist CD4+ T-rakkudesse ning mõjutavad seega haiguse patogeneesi immuunvastuse moduleerimise kaudu [Berger jt, 1999; Lederman, Sieg, 2007]. Euroopa päritolu inimeste on *CCL3L1* geeni koopiaarvu mediaaniks 2, varieerudes 1-st 6-ni. Aafrika päritolu isikud omavad aga kõrgemat koopiaarvu [Gonzalez jt, 2005; Townson jt, 2002]. Madalat *CCL3L1* koopiaarvu on seostatud vähenenud kemokiinide taseme ja CCR5 ekspresseerivate CD4+ rakkude tõusuga. Geneetilised uuringud on leidnud, et madal *CCL3L1* koopiaarv on seotud suurenenud HIV riskiga nii sugulisel teel või perinataalselt nakatunud haigetel, sõltumata geneetiliselt päritolust [Gonzalez jt, 2005; Townson jt, 2002; Shostakovich-Koretskaya jt, 2009]. Samas on aga teada, et nakatumise risk viiruse otsesel sattumisel vereringesse (peamine nakatumise tee süstivate narkomaanidel) on oluliselt suurem ning võib oletada, et sellisel juhul geneetiliste faktorite osa on märgatavalt väiksem [Martin jt, 2004]. Uurimaks kas *CCL3L1* koopiaarvu ja HIV-i nakatumise vaheline seos kehtib ka kõrge nakatumisriskiga grupis, viisime läbi uuringu Eesti süstivate narkomaanide hulgas. Uuringusse oli hõlmatud 374 kaukaasia päritolu süstivat narkomaani, kellest 76%, 56% ja 15% olid nakatunud vastavalt HCV, HIV või HBV-ga. Umbes kolmandik (33/374) olid HIV/HCV positiivsed, 1% (4/374) HIV/HBV positiivsed ja 12% (44/374) HIV/HCV/HBV positiivsed. 7% (27/374) olid HIV-positiivsed (HIV+), aga HCV ja HBV-negatiivsed (HCV-/HBV-) ning 27% (100/374) HCV+, aga HIV-/HBV-. Ülejäänud 66 isikut kas ei olnud nakatunud ühegi neist kolmest viirusest (53/374) või omasid teisi kombinatsioone.

Uuringutulemused näitasid, et ka süstivate narkomaanide hulgas oli suurem *CCL3L1* geenikoopiaarv seotud resistentsusega HIV-infektsiooni nakatumise suhtes (joonis 2). Lisaks olid *CCL3L1* koopiaarvu ja HIV staatuse vahelised seosed sõltumatud narkootikumide süstimise kestusest ja HCV/HBV infek-

sioonist. Vastupidiselt HIV infektsiooni nakatumisele ei mõjutanud *CCL3L1* koopiaarv nakatumise riski C-hepatiiti [Huik jt, 2010]. Need tulemused kinnitavad veelkord inimese geenide olulist rolli HIV infektsiooni nakatumisel.



Joonis 2.

*CCL3L1* koopiaarvu esinemine vastavalt HIV või HCV serostaatusele süstivate narkomaanide populatsioonis. Histogrammid ja *cubic-spline* sageduskurvid näitavad *CCL3L1* koopiaarvu esinemissagedust HIV-positiivsetel ja -negatiivsetel (ülemised graafikud) ning HCV-positiivsetel ja -negatiivsetel (alumised graafikud) isikutel.

## VASTSÜNDINU SEPSIS – INFEKTSIOON AJUTISE IMMUNPUUDULIKKUSE KORRAL

Teiseks oluliseks uurimisteenaks on olnud infektsioonide käsitlemine vastsündinutel. Vastsündinud, ennekõike sügavalt enneaegsed, on oma olemuselt nagu HIV positiivsed isikudki immuunpuudulikud, mistõttu nende risk haigestuda oportunistlike mikroorganismide poolt põhjustatud infektsioonidesse on kõrge. Samas on alles viimastel aastatel osutatud tähelepanu asjaolule, et selles populatsioonis ravimite kasutamine ei põhine mitte teaduslikel uuringutel, nagu täiskasvanutel, vaid pigem ekspertide arvamusel ja empiirilisel kogemusel. Niisuguse ravimkasutuse kõrvalnähuks võib olla kas ravimite ebaefektiivsus madalate ravimi kontsentratsioonide tõttu või talumatus üledoseerimise tagajärjel. Seetõttu oli meie uuringute peaesmärgiks penitsilliini kui laialt kasutatava antibiootikumi farmakokineetika, efektiivsuse ja taluvuse hindamine vastsündinu sepsise korral.



#### PENITSILLIINI FARMAKOKINEETILISED UURINGUD

On üldtunnustatud, et enneaegsetel vastsündinutel on tänu enamuse organsüsteemide ebaküpsusele ravimite, sealhulgas antibiootikumide, imendumine, jaotumine ja eritumine oluliselt erinev ajalistest vastsündinutest, suurematest lastest ja täiskasvanutest, ja seega on tõenäoline, et ravimeid tuleb selles eaperioodis manustada erinevalt vanuse rühmadest sõltuvalt [Kearns jt, 2003; Lutsar, Metsvaht, 2010]. Seetõttu tegime enne efektiivsuse uuringu alustamist kindlaks bensüülpenitsilliini farmakokineetika sügavalt enneaegsetel vastsündinutel (sünnikaal <28 nädala) [Metsvaht jt, 2007]. Uuringusse hõlmasime kokku 20 alla 72 tunni vanust vastsündinut, kelle sünnikaal oli <1200g. Bensüülpenitsilliini manustati kas 50 000 IU/kg või 25 000 IU/kg kaks korda päevas. Kõigilt uuritavatel koguti vereanalüüsid penitsilliini kontsentratsiooni määramiseks ning iga haige jaoks arvutati välja farmakokineetilised parameetrid, nagu ravimi maksimaalne kontsentratsioon ( $C_{max}$ ), poolväärtusaeg, kliirens ja kontsentratsiooniaja kõvera alune pindala. Tulemused näitasid, et sügavalt enneaegsetel vastsündinutel penitsilliini annusega 50 000 IU/kg saavutatud  $C_{max}$  (mediaan 146 mg/L; kvartiilid 109–157 mg/L;  $C_{min}$  7; 5–13 mg/L) ületasid oluliselt täiskasvanute väärtusi tavapärase dooside järgselt. Minimaalse kontsentratsiooni mediaan kahe annuse vahelisel ajavahemikul oli enam kui 100 korda kõrgem B-grupi streptokokkide minimaalsest inhibeerivast kontsentratsioonist. Seetõttu vähendati teises grupis penitsilliini annust poole võrra (25 000 IU/kg). Selle tulemusena vähenes proportsionaalselt nii  $C_{max}$  kui  $C_{min}$  ja kontsentratsiooni-aja kõvera alune pindala. Samas jäi plasmakontsentratsioon kõigil uuritavatel kogu annustamise intervalli (12 tunni) vältel kõrgemaks B-grupi streptokokkide (kõige sagedasem vastsündinute varase sepsise tekitaja) minimaalsest inhibeerivast kontsentratsioonist. Penitsilliini poolväärtusaeg enneaegsetel vastsündinutel oli oluliselt pikem kui ajalistel vastsündinutel ja täiskasvanutel (tabel 1). Penitsilliini kliirens korreleerus kreatiniini kliirensiga, viidates, et vastsündinutel on penitsilliini peamiseks eritumise mehhanismiks glomerulaarfiltratsioon ja mitte tubulaarne sekretsioon nagu täiskasvanutel [Metsvaht jt, 2007].

Eelnevast uuringust järeldasime, et täiskasvanutega sarnase efekti saavutamiseks piisab enneaegsetel lastel penitsilliini annusest 25 000 IU/kg, manustatuna kaks korda päevas. Järgnevalt teostasime uuringu, mille eesmärgiks oli võrrelda penitsilliini ja ampitsilliini efektiivsust vastsündinu varase sepsise empiirilises ravis [Metsvaht jt, 2010]. Prospektiivne, klaster-randomiseeritud, antibiootikumiravi vahetusega uuring viidi läbi Eesti mõlemas laste intensiivravi osakonnas (Tartu Ülikooli Kliinikum ja Tallinna Lastehaigla) ning hõlmas ühtekokku 283 vastsündinut, kellest 142 said ampitsilliini ja 141 penitsilliini (mõlemad kombinatsioonis gentamütsiiniga).

Uuring planeeriti ekvivalentsus-uuringuna, kus ravirežiimide erinevus ei tohtinud ületada  $\pm 10\%$ . Uuritavaid antibiootikume manustati vähemalt 3 päeva, kuid mitte üle 10 päeva.

Tabel 1

## Penitsilliini farmakokinetilised vastsündinutel ja täiskasvanutel

Annus	T1/2	Cmax
Sügavalt enneaegne vastsündinu		
30 mg/kg	3,8 h	145,5 mcg/ml
15 mg/kg	4,6 h	58,9 mcg/ml
Ajaline vastsündinu		
15 mg/kg	3,4 h	22,0 mcg/ml
Täiskasvanu		
600 mg/dosi	0,5 h	45 mcg/ml

T1/2 – poolväärtusaeg

Cmax – maksimaalne kontsentratsioon

Ravimikombinatsioonide kliinilist efektiivsust hinnati kombineeritud lõpptulemi – 72 tunni jooksul toimunud antibiootikumravi vahetuse ja/või esimese seitsme elupäeva surevuse – alusel. Teisese lõpptulemina hinnati intensiivravi, kopsude mehhaanilise ventilatsiooni, vasoaktiivse ravi ja antibakteriaalse ravi kestust, hilise vastsündinu sepsise esinemissagedust ja tekitajate struktuuri ning vastsündinutel esinevate tüsistuste, nagu vastsündinute krooniline kopsuhaigus, nekrootiline enterokoliit, raske aju vatsakestesise verevalum ja enneaegsete retinopaatia esinemissagedust. Lisaks võrreldi mõlema antibiootikumrežiimi mõju sooletrakti mikrofloora kujunemisele. Statistilises analüüsis kasutati hierarhilisi mudeleid, mis olid tasakaalustatud uuringukeskuse ja -perioodi suhtes. Eraldi viidi läbi äärmiselt madala sünnikaaluga (<1001 g) vastsündinute alagrupi analüüs. Uuring kestis ühtekokku 1,5 aastat.

Efektiivsuse uuringu tulemused näitasid, et esmase lõpptulemi suhtes osutusid mõlemad ravirežiimid võrdseks (ravi ebaõnnestumine esines 20/142 ampitsilliini ja 20/141 penitsilliini grupis; OR 1,01; 95% CI 0,52–1,97) ning samuti mõlema komponendi (antibakteriaalse ravi vahetuse vajadus 10/142 ja 10/141; OR 1,02; 95% CI 0,40–2,59; varane neonataalne surm 11/142 vs 14/141; OR 0,76; 95% CI 0,33–1,75 ampitsilliini ja penitsilliini grupis, vastavalt) esinemissageduse osas. Bakterioloogiliselt tõestatud varast sepsist esines 6-l juhul ampitsilliini ja 8-l penitsilliini grupis. Haigustekitajate tundlikkus ravirežiimide suhtes oli parem ampitsilliini grupis – 6/8 isoleeritud mikroobitüvest olid tundlikud vähemalt ühele ravirežiimi komponendile vs 3/8 penitsilliini grupis (OR 0,080; 95% CI 0,0095–0,67). Erinevuse põhjuseks olid penitsilliini grupis

isoleeritud koagulaasnegatiivsed stafülokokid ( $n = 4$ ) ja *Candida albicans* ( $n = 1$ ). Hiliste vastsündinute sepsise esinemissagedus oli mõlemas grupis sarnane (vastavalt 33/142 vs 42/141 ampitsilliini ja penitsilliini grupis), kuid haigus-tekitaajatest esines *S. epidermidis*'e põhjustatud sepsist sagedamini penitsilliini grupis (vastavalt 2,7 vs 7,6 juhtu 1000 haigepäeva kohta ampitsilliini ja penitsilliini grupis; RR 0,32; 95% CI 0,19–0,55). Samuti kasutati täiendavat antibakteriaalset ravi ampitsilliini grupis harvemini kui penitsilliini grupis (43/142 vs 63/141; OR 0,63; 95% CI; 0,55–0,71).

Ka äärmiselt madala sünnikaaluga enneaegsetel vastsündinutel esines kombineeritud esmast lõpptulemit võrdse sagedusega mõlema ravirežiimi puhul (10/36 ampitsilliini vs 10/39 penitsilliini grupis; OR 1,01; 95% CI 0,52–1,97). Bakterioloogiliselt tõestatud varast vastsündinu sepsist esines oluliselt sagedamini penitsilliini grupis (0/36 vs 6/39; OR 0,1; 95% CI 0,01–0,6). Samuti oli viimases oluliselt kõrgem enne 26ndat rasedusnädalat sündinud enneaegsete vastsündinute surevus (6/24 vs 13/21 vastavalt ampitsilliini ja penitsilliini grupis; OR 0,2; 95% CI 0,05–0,7). Rasket nekrootilist enterokoliiti ja enneaegsete retinopaatiat esines sagedamini ampitsilliini grupis, kuid erinevused kadusid, kui arvesse võeti suuremat surevust penitsilliini grupis [Metsvaht jt, 2010]. Mõlema antibiootikumi mõju sooletrakti esmasele koloniseerumisele gram-negatiivsete enterobakterite, sealhulgas ampitsilliiniresistentsete tüvedega, oli sarnane, kuid erinevused esinesid gram-positiivsete mikroobide osas. Nii olid ampitsilliinravi saavad patsiendid harvem koloniseerunud enterokokkide (OR 0,5; 95% CI 0,3–0,83) ja *Staphylococcus aureusega* (OR 0,5; 95% CI 0,3–0,83) kui penitsilliinravi saanud haiged [Parm jt, 2010]. Samuti oli sügavalt enneaegsetel vastsündinutel antibiootikumide mõju sooletrakti kolonisatsioonile erinev – ampitsilliinravil olnud lapsed olid sagedamini koloniseerunud *Klebsiella pneumoniae*'ga (OR 3,10; 95% CI 1,12–8,58) sealhulgas ampitsilliin resistentsete tüvedega (OR 3,66; 95% CI 1,28–10,44) ja *S. hominis*'ga (OR 9,25; 95% CI 1,90–45,03) kui penitsilliinravi saanud patsiendid.

Mitmese logistilise regressioonanalüüsil leiti, et antibakteriaalse ravi ebaõnnestumise riskifaktoriteks esimese 24 elutunni jooksul on vasoaktiivse ravi vajadus, leukotsüütide üldarv  $<5000 \times 10^9 /L$  või üle  $20\,000 \times 10^9 /L$ , ebaküpsete neutrofiilsete leukotsüütide suhe nende üldarvusse  $>0,2$  ja trombotsüütide üldarv  $<100\,000 \times 10^9 /L$ . 72 elutunni vanuses ennustas antibakteriaalse ravi ebaõnnestumist kõige täpsemalt vasoaktiivse ravi vajadus, trombotsüütide üldarv  $<100\,000 \times 10^9 /L$ , C-reaktiivse valgu kontsentratsiooni suurenemine ja hüpoalbumineemia. Edasi konstrueeriti klassifikatsiooni ja regressiooni puud, mille alusel olid olulisimateks antibakteriaalse ravi ebaõnnestumise riskifaktoriteks esimese 24 elutunni jooksul hüpoglükeemia  $\leq 2,55$  mmol/L koos C-reaktiivse valgu kontsentratsiooniga  $>1,35$  mg/L; normoglükeemilistel vastsündinutel oli kõrge risk seotud sünnikaaluga  $\leq 678$  g või suurema sünnikaalu korral gestatsioonivanusega  $\leq 27$  rasedusnädala või leukotsüütide üldarvuga  $\leq 8,25 \times 10^9 /L$  koos trombotsüütide arvuga  $\leq 143 \times 10^9 /L$ . Esimese 72 elutunni

jooksul osutud olulisemateks antibakteriaalse ravi ebaõnnestumise riskifaktoriteks trombotsütopeenia  $\leq 94,5 \times 10^9/L$  koos vasoaktiivse ravi vajadusega ja leukotsüütide arv  $< 3,5 \times 10^9/L$  või  $> 39,8 \times 10^9/L$  samaaegse hüpoglükeemia  $\leq 1,65$  mmol/l esinemisega [Metsvaht jt, 2009]. Võrreldes mitmese logistilise regressiooniga võimaldasid klassifikatsiooni ja regressiooni puudel põhinevad algoritmid ennustada antibakteriaalse ravi ebaõnnestumist suurema tundlikkusega 24 tunni ja suurema spetsiifilisusega 72 tunni vanuses.

Kokkuvõtteks võib öelda, et mitmete aastate jooksul paljude teadlaste ja arstide osavõtul läbi viidud uuringud on lisanud olulist teavet antimikroobsete ravimite farmakokineetilistest omadustest, taluvusest ja efektiivsusest vastsündinutel. See omakorda on võimaldanud välja töötada optimaalseimad raviskeemid, mis praeguseks on ka juba kasutusel igapäevameditsiinis. Samuti on need uuringud laiendanud meie teadmisi nii uuritud ravimite kineetikast kui ka nendega samasse klassidesse kuuluvate ravimite omadustest just immuundefitsiitusega haigetel.

Uuringud HIV positiivsetel isikutel on kirjeldanud HIV infektsiooni molekulaarset epidemioloogiat Eestis ning andnud lisateadmisi inimesepoolsetest faktoritest, mis mõjutavad HIV infektsiooni nakatumist ja võimalik, et ka haiguste progressiooni. Kõik see võiks ühel päeval lõplikult realiseeruda kõrge efektiivsusega ravi ja profülaktika meetmete (nt vaktsiini) väljatöötamises.

#### KIRJANDUS

Adojaan, M., Kivisild, T., Mannik, A., Krispin, T., Ustina, V., Zilmer, K., Liebert, E., Jaroslavtsev, N., Priimagi, L., Tefanova, V., et al. (2005). Predominance of a rare type of HIV-1 in Estonia. *J. Acquir. Immune. Defic. Syndr.*, 39, 598-605.

Avi, R., Huik, K., Pauskar, M., Ustina, V., Karki, T., Krispin, T., Ainsalu, K., Paap, P., Schmidt, J., Nikitina, N., Lutsar, I. (2010a). Transmitted drug resistance in treatment naive human immunodeficiency virus - 1 CRF06\_cpx infected patients in Estonia. *Scand. J. Infect. Dis.*, 2010, (submitted).

Avi, R., Huik, K., Sadam, M., Karki, T., Krispin, T., Ainsalu, K., Paap, P., Schmidt, J., Nikitina, N., Lutsar, I. (2009). Absence of genotypic drug resistance and presence of several naturally occurring polymorphisms of human immunodeficiency virus-1 CRF06\_cpx in treatment-naive patients in Estonia. *J. Med. Virol.*, 81, 953-958.

Avi, R., Huik, K., Sadam, M., Karki, T., Krispin, T., Ainsalu, K., Paap, P., Schmidt, J., Nikitina, N., Lutsar, I. (2010b). Characterization of integrase region polymorphisms in HIV-1 CRF06\_cpx viruses in treatment naive patients in Estonia. *AIDS Res. Hum. Retroviruses*, (in press).

Berger, E. A., Murphy, P. M., Farber, J. M. (1999). Chemokine receptors as HIV-1 coreceptors: roles in viral entry, tropism, and disease. *Annu. Rev. Immunol.*, 17, 657-700.

- Gonzalez, E., Kulkarni, H., Bolivar, H., Mangano, A., Sanchez, R., Catano, G., Nibbs, R. J., Freedman, B. I., Quinones, M. P., Bamshad, M. J., et al. (2005). The influence of CCL3L1 gene-containing segmental duplications on HIV-1/AIDS susceptibility. *Science*, 307, 1434-1440.
- Huik, K., Sadam, M., Karki, T., Avi, R., Krispin, T., Paap, P., Ruutel, K., Uuskula, A., Talu, A., Abel-Ollo, K., et al. (2010). CCL3L1 copy number is a strong genetic determinant of HIV seropositivity in Caucasian intravenous drug users. *J. Infect. Dis.*, 730-739.
- Kaslow, R. A., Dorak, T., Tang, J. J. (2005). Influence of host genetic variation on susceptibility to HIV type 1 infection. *J. Infect. Dis.*, 191 Suppl. 1, S68-S77.
- Kearns, G. L., Abdel-Rahman, S. M., Alander, S. W., Blowey, D. L., Leeder, J. S., Kauffman, R. E. (2003). Developmental pharmacology-drug disposition, action, and therapy in infants and children. *N. Engl. J. Med.*, 349, 1157-1167.
- Lederman, M. M., Sieg, S. F. (2007). CCR5 and its ligands: a new axis of evil? *Nat. Immunol.*, 8, 1283-1285.
- Lutsar, I., Metsvaht, T. (2010). Understanding pharmacokinetics/pharmacodynamics in managing neonatal sepsis. *Curr. Opin. Infect. Dis.*, 23, 201-207.
- Martin, M. P., Lederman, M. M., Hutcheson, H. B., Goedert, J. J., Nelson, G. W., van Kooyk, Y., Detels, R., Buchbinder, S., Hoots, K., Vlahov, D., et al. (2004). Association of DC-SIGN promoter polymorphism with increased risk for parenteral, but not mucosal, acquisition of human immunodeficiency virus type 1 infection. *J. Virol.*, 78, 14053-14056.
- Metsvaht, T., Ilmoja, M. L., Parm, U., Maipuu, L., Merila, M., Lutsar, I. (2010). Comparison of ampicillin plus gentamicin vs. penicillin plus gentamicin in empiric treatment of neonates at risk of early onset sepsis. *Acta Paediatr.*, 99, 665-672.
- Metsvaht, T., Oselin, K., Ilmoja, M. L., Anier, K., Lutsar, I. (2007). Pharmacokinetics of penicillin G in very-low-birth-weight neonates. *Antimicrob. Agents Chemother.*, 51, 1995-2000.
- Metsvaht, T., Pisarev, H., Ilmoja, M. L., Parm, U., Maipuu, L., Merila, M., Muursepp, P., Lutsar, I. (2009). Clinical parameters predicting failure of empirical antibacterial therapy in early onset neonatal sepsis, identified by classification and regression tree analysis. *BMC Pediatr.*, 9, 72.
- Nowak, P., Karlsson, A. C., Naver, L., Bohlin, A. B., Piasek, A., Sonnerborg, A. (2002). The selection and evolution of viral quasispecies in HIV-1 infected children. *HIV Med.*, 3, 1-11.
- Parm, Ü. M. T., Sepp, E., Ilmoja, M. L., Pisarev, H., Pauskar, M., Lutsar, I. (2010). Impact of empiric antibiotic regimen on bowel colonization in

neonates with suspected early onset sepsis. *Eur. J. Clin. Microbiol. Infect. Dis.*, (in press).

Platt, L., Bobrova, N., Rhodes, T., Uuskula, A., Parry, J. V., Ruutel, K., Talu, A., Abel, K., Rajaleid, K., Judd, A. (2006). High HIV prevalence among injecting drug users in Estonia: implications for understanding the risk environment. *Aids*, 20, 2120-2123.

Ruutel, K., Uuskula, A. (2006). HIV epidemic in Estonia in the third decade of the AIDS era. *Scand. J. Infect. Dis.*, 2006, 38, 181-186.

Shostakovich-Koretskaya, L., Catano, G., Chykarenko, Z. A., He, W., Gornalusse, G., Mummidi, S., Sanchez, R., Dolan, M. J., Ahuja, S. S., Clark, R. A., et al. (2009). Combinatorial content of CCL3L and CCL4L gene copy numbers influence HIV-AIDS susceptibility in Ukrainian children. *Aids*, 23, 679-688.

Zetterberg, V., Ustina, V., Liitsola, K., Zilmer, K., Kalikova, N., Sevastianova, K., Brummer-Korvenkontio, H., Leinikki, P., Salminen, M. O. (2004). Two viral strains and a possible novel recombinant are responsible for the explosive injecting drug use-associated HIV type 1 epidemic in Estonia. *AIDS Res. Hum. Retroviruses*, 20, 1148-1156.

Toome, L. V. H., Andresson, P., Ilmoja, M. L., Kallas, E., Saik, P., Kool, P., Ormisson, A. (2009). Väga enneaegsete vastündinute ravitulem Eestis. *Eesti Arst*, 88, 12-20.

Townson, J. R., Barcellos, L. F., Nibbs, R. J. (2002). Gene copy number regulates the production of the human chemokine CCL3-L1. *Eur. J. Immunol.*, 32, 3016-3026.

Wensing, A. M., van de Vijver, D. A., Angarano, G., Asjo, B., Balotta, C., Boreri, E., Camacho, R., Chaix, M. L., Costagliola, D., De Luca, A., et al. (2005). Prevalence of drug-resistant HIV-1 variants in untreated individuals in Europe: implications for clinical management. *J. Infect. Dis.*, 192, 958-966.

*Teaduspreemia geo- ja bioteaduste alal uurimuste tsükli  
"Taimede stressitaluvus" eest*



*Hannes Kollist* (kollektiivi juht, esimene paremalt)

Sündinud 30.11.1970 Tartus

1989 Tallinna Liivalaia Gümnaasium

1994 Tartu Ülikool, keemia

1997 MSc, taimefüsioloogia, Tartu Ülikool

2001 PhD, taimefüsioloogia, Tartu Ülikool

1993–1996 Tartu Herbert Masingu kooli keemia ja geograafia õpetaja

1995–1996 Risø Riiklikus Laboratooriumis külalisteatur, Roskilde, Taani

1999–2001 (periooditi) Soome Metsauringute Instituudis külalisteatur, Suomenjoki, Soome

2002 CNR Agro-keskkonna ja Metsabioloogia Instituut, Rooma, Itaalia, järeldoktorant

2002–2007 Helsingi Ülikool, Soome, järeldoktorant

Alates 2007 Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudi taimebioloogia vanemteatur

Avaldanud 21 teaduspublikatsiooni

## *Heino Moldau* (esimene vasakult)

Sündinud 23.12.1934 Püssis

1954 Kiviõli I Keskkool

1959 Tartu Ülikool, füüsika

1966 füüsika-matemaatikakandidaat, geofüüsika, Tartu Ülikool

1986 bioloogiadoktor, taimefüsioloogia, Moskva K. J. Timirjazevi nim  
Taimefüsioloogia Instituut

1959–1973 Eesti Teaduste Akadeemia Füüsika ja Astronoomia Instituudi in-  
sener, nooremteadur, aspirant, vanemteadur

1973–1992 TA Astronoomia ja Atmosfäärifüüsika Instituudi vanemteadur

1992–2004 Tartu Ülikooli Molekulaar- ja Rakubioloogia Instituudi dotsent,  
teadur

2005–2006 TÜ Botaanika ja Ökoloogia Instituudi teadur

Alates 2006 TÜ Tehnoloogiainstituudi vanemteadur

Avaldanud 70 teaduspublikatsiooni

## *Triin Vahisalu* (keskel)

Sündinud 4.10.1978 Tallinnas

1997 Tallinna Mustamäe Gümnaasium

2004 Tartu Ülikool, bioloogia, biofüüsika ja biokeemia

2005 MSc, botaanika ja ökoloogia, Tartu Ülikool

2005 doktorantuur, Tartu Ülikool

2006 doktorantuur, Helsingi Ülikool

2004–2005 Helsingi Ülikoolis külalisteadur, Soome

2007 CNR Agro-keskkonna ja Metsabioloogia Instituudi külalisteadur,  
Rooma, Itaalia

Alates 2006 Helsingi Ülikooli teadur

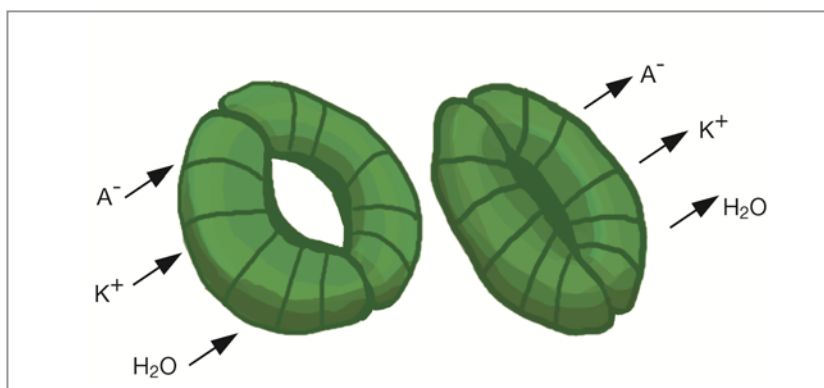
Avaldanud 3 teaduspublikatsiooni



## TAIMEDE OSOONITALUVUSEST ÕHULÕHEDE REGULATSIOONIMEHCHANISMIDENI

### TAUST

Selleks, et tugevneva konkurentsi tingimustes rohkem päikeseenergiat püüda, levisid taimed evolutsiooni käigus ürgookeanist maismaale. Fotosünteesivad rakud paigutusid õhukeste kihtidena, mis vee aurustumise takistamiseks kattusid vett mitteläbilaskva kilega. Tekkinud moodustistes, mida nüüd nimetame lehtedeks, toimub veeauru ja süsihappegaasi vahetus atmosfääriga läbi õhulõhede – mikroskoopiliste avade lehtede pinnal paarikaupa asuvate sulgrakkude vahel. Sulgrakkude omapäraks on asümmeetriline ehitus: nende vastakuti asetsevad seinad on paksemad, mistõttu vee sisseimamisel rakud kõverduvad ja nende vahele tekib ovaalse kujuga õhulõhe (joonis 1). Võõkujulised paksendid sulgraku seinas välispinnal vähendavad raku paisumist radiaalsuunas, suurendades sellega õhulõhe laienemise kiirust vee sisseimamisel. Avatud õhulõhede pindala moodustab ainult 1–2% lehe pinnast.



Joonis 1.

Avatud (vasakul) ja suletud (paremal) õhulõhe. Nooled näitavad anioonide ( $A^-$ ), kationide ( $K^+$ ) ja vee ( $H_2O$ ) liikumise suunda sulgrakkude paisumisel ja kahanemisel.

Erinevalt loomadest puudub taimedel võimalus keskkonnatingimuste halvenedes pageda, oma asukohta muuta. Seetõttu on taimede jaoks äärmiselt oluline ümbritsevas keskkonnas toimuvatele muutustele kiiresti ja adekvaatselt reageerida. Üks taimede kaitsereaktsioone keskkonnatingimuste halvenemisel on õhulõhede sulgumine, mis vähendab vee kadu, aga ka saasteainete või patogeenide pääsu lehtedesse.

Veeauru ja süsihappegaasi liikumine läbi õhulõhede allub lihtsale gaaside difusiooni seadusele. Seevastu sulgrakkudes endis toimib keeruline raku energiaravustusest, biofüüsikalistest ja -keemilistest näitajatest sõltuv pumpade ja kanalite süsteem ainete kiireks transportimiseks läbi membraanide. Kui sulg-

rakkude välismembraanis asuvad sensorvalgud fikseerivad tingimuste halvemise, käivituvad mitmed signaaliahelasid vett siduvate ionide (peamiselt kloor, malaat ja kaalium) kanalite avanemiseks ning ioonid ja vesi hakkavad sulgrakkudest välja voolama. Sulgrakkude kõverus väheneb ja nendevaheline õhulõhe sulgub.

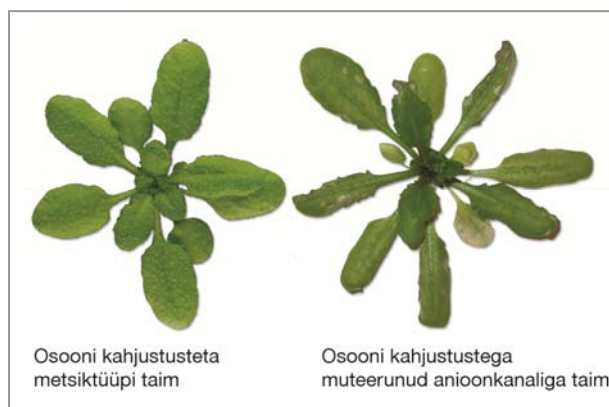
Sellise üldpildini jõuti üha uuenevaid meetodikaid kasutades viimase paarikümne aastaga. Alganus tuli elektrofüsioloogidelt, kes mikroelektroode ja farmakoloogilisi meetodeid kasutades määrasid sulgrakkude põhiliste ioonkanalite juhtivuste sõltuvused membraanpotentsiaalidest. Geneetika progress, eelkõige *Arabidopsis thaliana* Heynh. (e.k. harilik müürlook) genoomi sekveneerimine aastatuhandevahetuseks ja edusammud erinevate mutantide sihipärasel loomisel, võimaldasid identifitseerida mitmete kanalite valgud molekulaartasemel. Üksikmolekulide elektronmikroskoopia areng viis nende valgude molekulaarse struktuuri määramiseni. See võimaldas modelleerida valgude konformatsiooniliste muutuste mõju kanalite ioonjuhtivusele. Kõige kaugemale jõuti sulgrakkude kaaliumkanalite identifitseerimisel.

Hoolimata uurijate ammuks üksteest, et sulgrakkude plasmamembraani anioonkanalid avanevad õhulõhede sulgumisel isegi varem kui kaaliumkanalid [Keller jt, 1989; Shroeder jt, 1989], ei õnnestunud neid kanaleid molekulaarselt identifitseerida. Siit algab Tartu teadlaste osaluslugu anioonkanali tuvastamisel.

#### TAIME OSOONIKAHJUSTUSTEST MÜÜRLOOGA GAASIVAHETUSENI

Juba kolm aastakümnet tagasi oli teada kaks erinevalt uurimistasemeilt pärinevat fakti. Esiteks, tugev oksüdeerija, hapniku triatomaarne allotroop – osoon ( $O_3$ ) – tekitab vedelikes mitmeid erineva oksüdatsioonipotentsiaaliga hapniku aktiivühendeid (i.k.) *Reactive Oxygen Species* – ROS), nagu hüdroksüülradikaal, superoksiidradikaal, vesinikperoksiid. Teiseks, antropogeense tekketaustaga  $O_3$  kontsentratsiooni kasv troposfääri allosas põhjustab paljude metsaja põllukultuuride lehtedel üha rohkem pöördumatuid kahjustusi (joonis 2).

Joonis 2.  
Rikutud anioonkanaliga müürlooga taim on osoonitundlik. Pildil on 25-päevased taimed pärast 6-tunnist osoneerimist  $300 \text{ nl l}^{-1}$  osooniga.

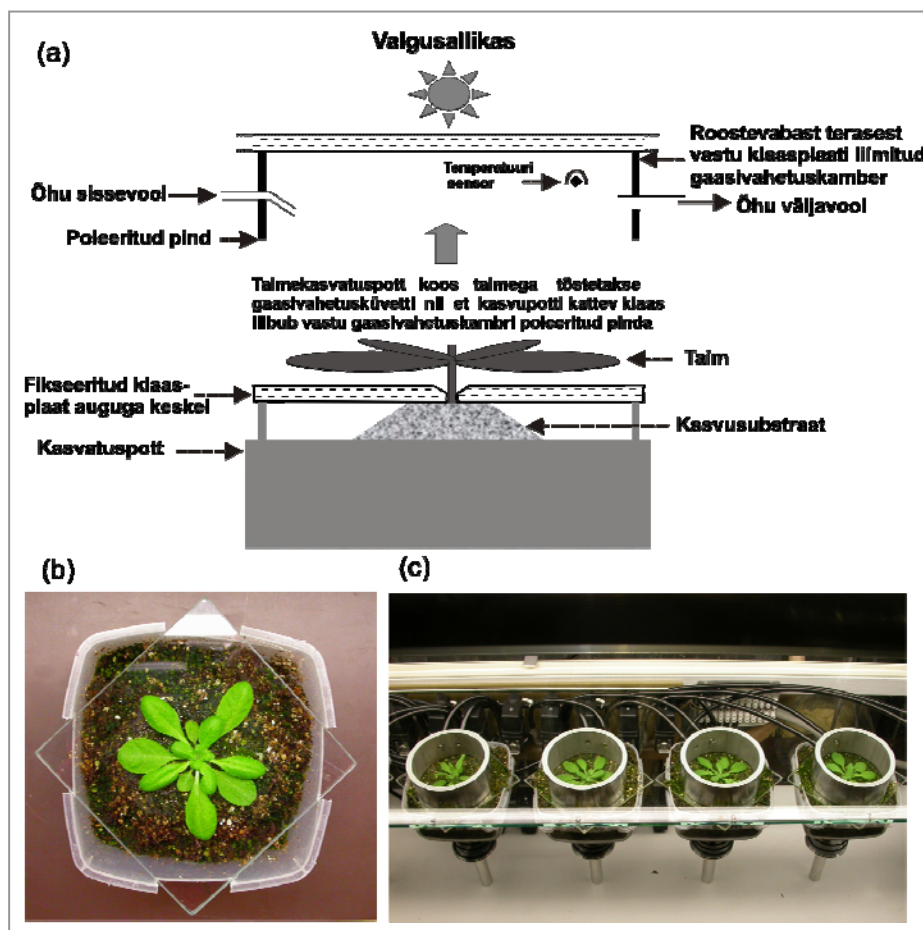


Järgnes märkimisväärne rahavoog vastavate uuringute tarbeks. Selle tulemusel hinnati O<sub>3</sub> kontsentratsiooni tõusust tingitud kahjumiks ainuüksi USA põllumajanduses umbes 50 miljardit dollarit aastas.

Naastes 1988 a lühivisiidilt USA Delaware metsauurimise laborist, tõi toonase Astrofüüsika ja Atmosfäärifüüsika Instituudi staažikas fotosünteesiuurija akadeemik Agu Laisk kingitusena kaasa selle suure kahjumi määramisel osalenud O<sub>3</sub> analüsaatori. Tulemust ei pidanud kaua ootama. Juba aasta pärast ilmus tartlaste uurimus, kus originaalse korraldusega katses näidati, et O<sub>3</sub> pääseb lehtedesse läbi õhulõhede ja neeldub rakkude seintes ja plasmamembraanis väga kiiresti [Laisk jt, 1989]. Järgneva 15 aasta jooksul ilmus tartlastelt sel teemal veel tosikond tööd, kus mõõdeti õhulõhede sulgumist O<sub>3</sub> mõjul [Moldau jt, 1990; Kollist jt, 2000], hinnati ROSi komponentide tekkimist raku seinas O<sub>3</sub> toimel [Moldau, 1999], näidati askorbiinhape (C-vitamiini) osa ROSide ja O<sub>3</sub> kahjutuks tegemisel [Moldau, 1998; Kollist jt, 2001; Moldau, Bichele, 2002]. Sajandivahetuseks oli selge, et kahjustuste tekitamise kõrval on ROSidel oluline osa ka rakusiseste signaalide ülekandes stressisensoritelt täiturmehhanismideni.

Eesmärgiga omandada kogemusi taime molekulaarbioloogia ja geneetika valas, asus Hannes Kollist 2002. aastal järel doktorina tööle Helsingi Ülikooli Biotehnoloogia Instituudis professor Jaakko Kangasjärvi rühmas, millest oli kujunemas O<sub>3</sub> poolt käivitatud protsesside molekulaarsete mehhanismide uurimise alal tunnustatud teadusgrupp. Nad olid veenvalt näidanud [Kangasjärvi jt, 1994], et O<sub>3</sub> poolt taimedes käivitatud protsessid on väga sarnased patogeenide toimel käivituvate protsessidega. Grupp oli hiljuti kirjeldanud O<sub>3</sub>-tundliku *Arabidopsis thaliana* mutandi *rcd1* (*radical induced cell death1*) ja näidanud, et O<sub>3</sub> poolt käivitatud rakusurma levimine on superoksiidradikaalist sõltuv ja protsessi hoiab käigus etüleeni tootmine ning pidurdab jasmoonhape [Overmyer jt, 2000]. Müürlooga osoonitundlike mutantidega töötades märkas H. Kollist, et andmeid nende õhulõhede avatuse kohta praktiliselt pole kuna puudub aparaat müürlooga võrdlemise väikeste lehtede gaasivahetuse mõõtmiseks osoneerimise jooksul. Levinud aparaat õhulõhede avatuse hindamiseks on poromeeter – riist, mis mõõdab pooride hetkesuurust. Juba esimesed katsetused Tartust Olevi Kullilt laenatud AP4 poromeetriga, mida Helsingis hellitlevalt “poromittariks” kutsuma hakati, olid paljulubavad. Selgus, et *rcd1* õhulõhed on pidevalt enam avatud ja sulguvad O<sub>3</sub> toimel aeglasemalt kui metsikutüüpi taimedel. Järelikult mutandi O<sub>3</sub>-tundlikkus on vähemalt osaliselt põhjustatud suuremast O<sub>3</sub> voost lehe sisse ja RCD1 valgul on seos õhulõhede avatuse regulatsiooniga [Ahlfors jt, 2004]. Lisaks näidati 2000. a veenvalt, et õhulõhede sulgumisel võtmerolli mängiv hormoon, abstsiihape (ABA) indutseerib sulgrakkudes ROSide tootmist [Pei jt, 2000]. See viitas võimalusele, et ka O<sub>3</sub> käivitab sulgrakkudes ROSidest sõltuva signaaliraja ja erinevate müürlooga mutantide osoneerimine võib kujuneda heaks vahendiks õhulõhede sulgumisel osalevate geenide/valkude tuvastamisel. AP4 poromeeter osutus küll usaldus-

väärseks tööriistaks, kuid ei võimaldanud jälgida õhulõhede avatust osoneerimise jooksul. Sobiv gasomeetriline aparaat konstrueeriti professor Agu Laisa laboris, kus on aastatepikkune kogemus erinevate fotosünteesi ja õhulõhede käitumise jälgimiseks vajaminevate riistade konstrueerimisel. Peamiseks konstruktoriks kujunes dr Bahtijor Rasulov, kel oli müürlooga taimedega varasem kogemus. Ettevõtmise majanduslikku poolt toetas professor Olevi Kull. Seadme eripära seisneb selles, et müürlooga taimi kasvatatakse läbi kasvuspotele fikseeritud lihvitud klaasplaadi augu, mis eraldab taime maapealse osa kasvusubstraadist ja juurtest (joonis 3a, b). Mõõteküveti asetatuna moodustab klaasplaat küveti sulgeva põhja. Selle võttega välistatakse taime mehaaniline mõjutamine küveti sisestamisel. Aparatuuris on kaheksa identset küveti (joonis 3c), seega saab üheaegselt jälgida kaheksa müürlooga taime leheroseti



Joonis 3.

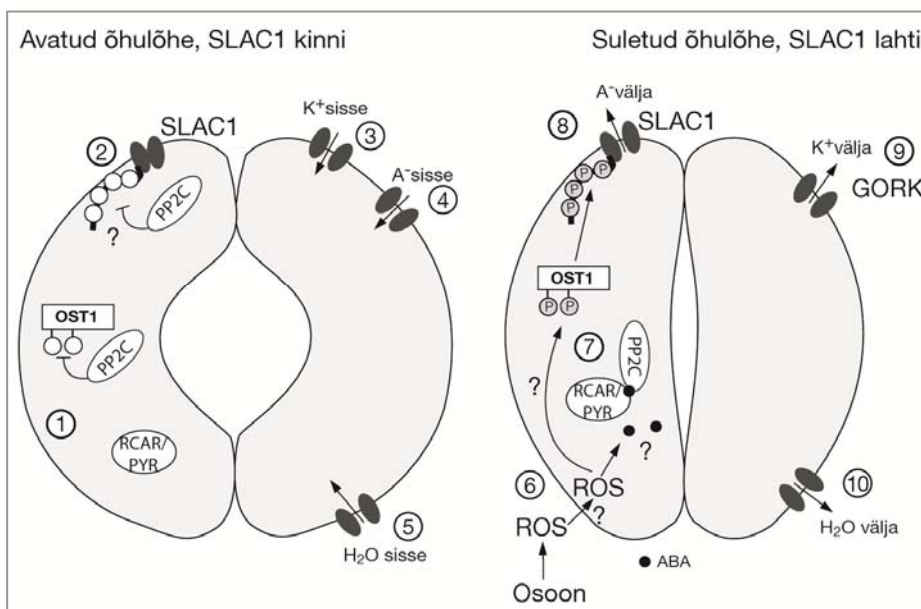
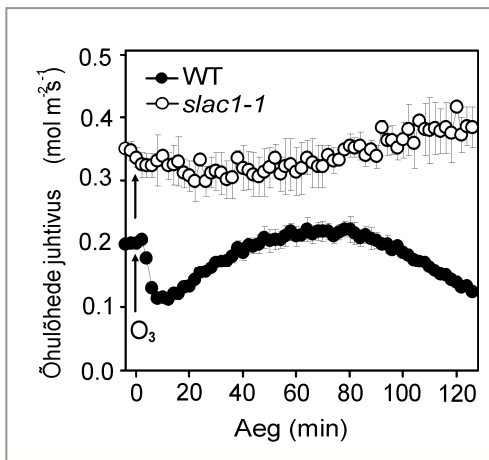
Taimede kiireid õhulõhede reaktsioone võimaldava gaasivahetussüsteemi küveti ja taimede mõõteküveti sisestamise skeem (a). Müürlooga 25-päevane taim kasvamas läbi kasvupotele asetatud klaasi keskel oleva augu (b). Neli mõõteküveti kaheksast (c).

gaasivahetust, mis annab informatsiooni nii lehte siseneva O<sub>3</sub> doosi, fotosünteesi kiiruse kui ka õhulõhede avatuse kohta. Aparatuuri teeb eriti unikaalseks võimalus seada igas küvetis erinev O<sub>3</sub> kontsentratsioon, mis tähendab, et on võimalik osoneerida erineva õhulõhede avatusega taimi nii, et lehte sisenev O<sub>3</sub> voog on kõigil ühesugune. Lisaks on seade kiiretoimeline – juba kaks minutit pärast osoneerimise algust on õhulõhede avatuse muutus mõõdetav.

Uue aparatuuriga asusid tööle Triin Vahisalu (end. Kollist) ja Heino Moldau, eesmärgiks uurida müürlooga mutantide õhulõhede avatuse ja O<sub>3</sub>-tundlikkuse vahelist seost. Katsed andsid üsna pea väga huvitavaid tulemusi ja tekitasid osalejates sõna otseses mõttes teaduslikku hasarti. Nimelt selgus, et juba võrdlemisi madalad O<sub>3</sub> kontsentratsioonid käivitavad õhulõhede sulgumise 3–4 min jooksul. Seejärel õhulõhed taasavanevad ka osoneerimise jätkamisel, millele ligi 90 min pärast järgneb uus, kuid juba pidev sulgumine (joonis 4). Peagi selgus, et algne kiire reaktsioon puudub tuntud mutandil *abi2-1* [Kollist jt, 2007]. ABA-tundetud mutandid *abi1-1* ja *abi2-1* on ilmselt ühed vanimad mutandid, mis isoleeriti müürlooga geneetika pioneeri Maarten Koornneefi poolt juba 1982. a [Koornneef jt, 1982]. Ka see, et tegu on dominant negatiivsete mutatsioonidega 2C tüüpi fosfataasides ABI1 ja ABI2, on teada juba enam kui kümme aastat [Leung jt, 1997]. Kuid mil moel nimetatud mutatsioonid *abi1-1* (*abi1<sup>G180D</sup>*) ja *abi2-1* (*abi2<sup>G168D</sup>*) blokeerivad ABA signaali, selgus alles möödunud aastal [Ma jt, 2009; Park jt, 2009]. Osutus, et normaalolekus on nimetatud fosfataasid aktiivsed ja blokeerivad läbi defosforüleerimise ABA signaaliraja aktivaatorkinaase, nt OST1 (Open STomata 1). ABA kontsentratsiooni kasvades seondub hormoon PYR/PYL/RCAR retseptorvalguga ja muudab selle konformatsiooni, põhjustades 2C tüüpi fosfataaside (PP2C) ja ABA retseptorvalgu vahelise kompleksi tekkimise [Ma jt, 2009]. Kompleksi teke blokeerib fosfataaside aktiivsuse ja võimaldab ABA signaaliraja aktivaatorkinaaside aktivatsiooni (vaata ka joonis 5).

Eriti huvitavaks muutusid Tartu katsed siis kui selgus, et kiire osoonitoimeline õhulõhede sulgumine puudub täielikult ka ühel Kangasjärvi O<sub>3</sub>-tundlikul mutandil, mida siis veel nimetati *rcd3*-ks. Töö pälvis kohe ka rahvusvahelist tähelepanu, nimelt esines Triin Vahisalu suulise ettekandega müürlooga uurijate kongressil USA-s (*16th International Conference on Arabidopsis Research*, Madison, USA, 15.–19.06.05), kus ta osales Kristjan Jaagu stipendiumi toel. Peagi selgus, et *rcd3* mutandi õhulõhed on pidevalt enam avatud ja ei sulgu isegi lehe taimelt eemaldamisel. Vältimaks närbumist, käivitub taimelehe ärälõikamisel kiiresti õhulõhede sulgumine, mida saab väga lihtsalt hinnata lehe kaalu kahanemiskiiruse alusel. Õhulõhede regulatsioonihäiretega mutandid, nagu *abi1-1*, *abi2-1* ja *ost1*, eristuvad metsiktüüpi taimedest ligi kaks korda suurema kaalukaotuse poolest. Selgus, et *rcd3* mutandil oli sama fenotüüp. Otsustasime nimetatud fenotüüpi kasutada ka retsessiivse *rcd3* mutatsiooni kaardistamiseks. Selleks ristasime Col-0-ökotüübi põhise *rcd3* teise müürlooga ökotüübi – Landsberg *erecta*-ga (*Ler*). Saadud ristandite F2 populatsiooni ligi

Joonis 4.  
Müürlooga metsiktüüpi (WT) ja rikutud anioonkanaliga (*slac1-1*) taimede õhulõhede juhtivuse muutus pärast leheroseti osoneerimise algust (250 nl l<sup>-1</sup>) noolega tähistatud hetkel.



Joonis 5.  
Anioonkanali regulatsiooni ja õhulõhede sulgumise skemaatiline mudel osooni toimel. Avatud õhulõhede puhul on sulgrakkudes PP2C tüüpi fosfataasid aktiivsed ja inaktiveerivad proteiinkinaasi OST1 (1) ja anioonide väljavoolukanali SLAC1 (2), mille tulemusel SLAC1 on kinni. Kaaliumi (3) ja anioonide (4) sissevoolu kanalid seevastu on avatud ja vesi liigub sulgrakkudesse (5). Osoneerimisel käivitub sulgrakkudes hapniku aktiivühendite (ROS) tootmine (6), mis viib PP2C tüüpi fosfataaside inaktivatsioonini, mis toimub kas läbi abstsiihappe (ABA) retseptorvalgu ja PP2C vahelise kompleksi tekkimise või otse. See võimaldab OST1 aktiveerumise läbi autofosforüleerumise (7). OST1 fosforüleerib SLAC1 N-terminaalse saba, SLAC1 avaneb ja anioonid pääsevad sulgrakust välja (8). See toob kaasa sulgraku plasmamembraani depolarisatsiooni, mis aktiveerib K<sup>+</sup> väljavoolu kanali (GORK) (9) ja vesi liigub sulgrakkudest välja (10).

3000 taimelt korjasime lehti ja mõõtsime kaalukadu ajas. Nii saime ligi 800 indiviidi, mille genoom oli segu Col-0 ja *Ler* genoomidest, kuid mis sisaldasid *rcd3* mutatsiooni mõlemas alleelis. Kasutades saadud indiviide ja *Ler* ja Col-0 genoomide omavahelisel erinevusel baseeruvaid markereid, õnnestus *rcd3* mutatsioon lokaliseerida I kromosoomi tippu, vahemikku, kus oli 32 geeni. Sellise arvu geenide sekveneerimine olnuks tol ajal kulukas ja, mis peamine, võtnuks palju aega. Lahenduse pakkus juhus. Nimelt pidas Hannes Kollist 2006. a Keystone'i konverentsil (*Plant Responses to Abiotic Stress*, 8.–12.04.2006, Copper Mountain, Colorado, USA) O<sub>3</sub> poolt indutseeritud kiire õhulõhede sulgumise ja *rcd3* mutandi teemal suulise ettekande. Seda juhtus kuulama ka üks sulgrakkude molekulaarsete mehhanismide uurimise tippspetsialiste professor Julian Schroeder San Diego Ülikoolist. Talle jättis meie töö hea mulje ja ta tuli pärast ettekannet koostööd pakkuma. Schroederi grupp oli kasutanud müürlaaga kogu genoomi hõlmavat Affymetrix mikrokiipi ja teinud kindlaks, millised geenid on õhulõhede spetsiifilised. Selgus, et 32-st kahtlusalusest geenist vaid ühe, At1g12480, ekspressioon oli õhulõhespetsiifiline ja et *rcd3* mutantides oli punktmutatsioon, mis põhjustas nimetatud geeni poolt kodeeritavas valgus seriin 456 asendumise fenüülalaniiniga. Lisakinnitust andsid ka At1g12480 geeni T-DNA liinid, millel esinesid samad O<sub>3</sub> ja kaalukao fenotüübid.

#### GAASIVAHETUSEST VALKUDENI: SÕBRALIK VÕIDUJOOKS JAAPANLASTEGA

Aminohappelise järjestuse alusel oli geen At1g12480 märgitud kui 10 transmembraanse domääniga oletatav malaadi transporter. Edasised eksperimendid näitasid, et *rcd3* mutantide õhulõhed ei reageerinud praktiliselt ühelegi mõjuri-le (O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, pimedus, õhuniiskus, ABA, lämmastikmonooksiid, vesinikperoksiid, Ca<sup>2+</sup>), mis metsiktüüpi taimedes õhulõhede kiire sulgumise käivitavad. Lisaks näitasime, et RCD3 paikneb peamiselt sulgrakkude plasmamembraanis. Schroederi laboris eraldati *rcd3* mutantidelt sulgrakkude protoplastid ja uuriti nende elektrilisi omadusi. Selgus, et mutantidelt eraldatud protoplastidel ei aktiveeru Ca<sup>2+</sup> ja ABA toimel anioonkanalid.

Kuna oli juba üsna kindel, et RCD3 valgu puhul on tegu sulgrakkude kauaotsitud anioonkanaliga, suurenes oluliselt kõigi entusiasm selle valguga edasi tegeleda. Mõistsime, et kui suudame võimalikult vähe lahtisi otsi jätva artikli kirjutada, on võimalik selle avaldamine mõnes tippajakirjas. Samas oli teada, et anioonkanalit otsivad mitmed laborid ja seega võib meil konkurente olla. 2006. a sügisel toimus Ameerika Taimebioloogide Seltsi (*American Society of Plant Biology*, ASPB) õhulõhede regulatsioonile keskenduv konverents (*The biology of Transpiration: From Guard Cells to Globe*, 10–14.10.2006, Snowbird Mountain Resort, Utah, USA). Triin Vahisalu pälvis nimetatud konverentsil osalemiseks ASPB stipendiumi ja talle anti suuline ettekanne. Arutledes, kas ja kui palju peaksime oma uudsetest andmetest rääkima, leidsime, et kuna oleme antud valdkonnas pigem algajad, kasutame “julge hundi rind on rasvane” strateegiat ja kanname kõik peamised tulemused ekspertidele ette, lootes, et tõsiseltvõetavad konkurendid ilmuvad pärast ettekannet ise välja.

Täpselt nii läkski. Mõne aja pärast võttis meiega ühendust professor Koh Iba Jaapanist. Selgus, et CO<sub>2</sub>-le mitte reageerivaid mutante otsides olid nad leidnud liini, milles oli samuti mutatsioon *RCD3* geenis. Ka jaapanlased olid eksperimentidega kaunis kaugele jõudnud ja kõik näis kinnitavat, et meie peamised järeldused on samad. Seetõttu leppisime kokku, et teeme küll koostööd, kuid töötame üksteisest sõltumatult ja tulemusi omavahel ei vaheta. Leppisime vaid kokku täpse aja, mil oma käsikirjad ühise kaaskirjaga samasse ajakirja saadame. Eeldusel, et mõlemad jõuavad samadele järeldustele, tõuseb mõlema töö väärtus ja usaldusväarsus, sest samade tulemusteni on jõutud üksteisest täiesti sõltumatult. Sellist tegevusviisi nimetatakse “back-to-back” publitseerimiseks ja vastavaid artiklipaare ilmub tippajakirjades, *Nature*’s ja *Science*’is, kaunis sageli. Niisiis leppisime professor Ibagaga kokku, et saadame artiklid ajakirja *Science* toimetusse 15.06.2007. Meie kurvastuseks tuli *Science*’i toimetusest kuu aja pärast ilma sisuliste kommentaarideta lakooniline vastus – meie tööst ei olda huvitatud. Ilmselt aitas meid nüüd see, et olime jätkuvalt oma tööst vaimustunud ja seetõttu otsustasime artikli saata 15.08.2007 teise tippajakirja – *Nature* toimetusse. Seekord tuli teade, et töö läheb retsenseerimisele, juba 5 tunni möödudes. Võrdlemisi positiivselt meelestatud, kuid siiski mitmeid lisaeksperimente nõudvad retsensioonid saabusid kuu aja pärast. Peamiselt sooviti lisakinnitust elektrofüsioloogilistele eksperimentidele, mis näitaksid, et *RCD3* puhul on tõesti tegu sulgrakkude plasmamembraani anioonkanali või selle komponendiga. Eksperimendid olid edukad ja käsikiri saadeti taas jaapanlastega üheaegselt *Nature* toimetusse 22.11.2007. Detsembri alguses muutus olukord mõnevõrra ärevaks, kuna selgus, et veel üks Jaapani uurimisgrupp on sama geeni jälil ja vastav artikkel on juba *Plant and Cell Physiology* toimetuse poolt avaldamiseks vastu võetud [Saji jt, 2008]. Tegu on küll märkimisväärselt tagasihoidlikuma ajakirjaga, kuid meile oli selge, et juhul kui nende töö ilmub enne meie käsikirja vastuvõtmist, kahaneb meie töö uudsus oluliselt. Suur oli meie kergendus kui 12.12.2007 saabus *Nature* toimetusest teade, et meie ja professor Iba grupi tööd on vastu võetud [Vahisalu jt, 2008; Negi jt, 2008]. Kolm päeva hiljem, 15.12.2007 ilmus Saji jt [2008] artikli elektrooniline versioon. Toimetuse ettepanekul leida valgule kooskõlastatud nimi, leppisime jaapanlastega kokku, et nimetame valgule SLAC1-ks (SLow Anion Channel 1), sest sellist lühendit oli sulgrakkude anioonset juhtivust uurides korduvalt varem kasutatud [Raschke jt, 2003]. Mõlemad artiklid ilmusid ajakirja *Nature* 2008.a. 27. märtsi numbris.

#### REGULATOORSETE AMIINOHAPETE PÜÜGILE ANIOONKANALIS

Edasi seadsime endile eesmärgiks uurida, kuidas toimub SLAC1 kanali regulatsioon. Varasemalt oli näidatud, et anioonkanalite aktivatsiooni pidurdab proteiinkinaaside aktiivsuse allasurumine [Schmidt jt, 1995]. Kuid sulgrakkudes leidub erinevaid kinaase ja teisi regulaatorvalke palju. Eesmärgiga selgitada, millised neist osoonitoimelisel õhulõhede sulgumisel rolli mängivad, uurisime kokku enam kui 80 erinevat müürlooga mutanti [Vahisalu jt, 2010].



Selgus, et kiire osoonitoimeline õhulõhede sulgumine puudub lisaks ABI1 ja ABI2 fosfataaside dominant negatiivsetele mutantidele ka taimeliinides, kus puudub proteiin kinaas OST1. See viitas võimalusele, et OST1 võib olla SLAC1 vahetu regulaator. Selle tõestamiseks kasutasime erinevaid meetodikaid. Esiteks uurisime kas SLAC1 ja OST1 valgud omavahel interakteeruvad. Saime positiivse tulemuse nii pärmi kaksikhübriidtestis kui ka *in vivo* BiFC (*Bimolecular Fluorescence Complementation*) meetodil. Koostöös Mart Loog'i proteiinkinaaside laboriga näitasime, et OST1 fosforüleerib SLAC1 N-terminuses vähemalt 4 seriini. Lisaks õnnestus meil TILLING (*Targeted Induced Local Lesions IN Genome*) meetodikat kasutades saada taimeliin (*slac1-7*), kus üks nimetatud seriinidest (S120) oli muteeritud fenüülalaniiniks. *slac1-7* õhulõhed ei reageerinud O<sub>3</sub>-le [Vahisalu jt, 2010] ega CO<sub>2</sub>-le. Seega on meil õnnestunud näidata SLAC1 regulatsiooni viimast etappi võrdlemisi detailselt (joonis 5). Jätkuvalt on aga lahtine, kuidas toimub OST1 aktivatsioon O<sub>3</sub> puhul. Viimase aasta tööd näitavad PP2C fosfataaside ja ABA retseptorite rolli OST1 aktivatsioonis ABA toimel [Ma jt, 2009], kuid kas samad protsessid toimivad ka teiste õhulõhede sulgumist põhjustavate stiimulite toimel, ei ole veel selge.

#### LÕPETUSEKS

Selles, et meil õnnestus panustada sulgrakkude kauaotsitud anioonkanali leidmisse, näidata selle regulatsiooni molekulaarset mehhanismi ja olulisust taimede kiirel reageerimisel stressile, on saatus meile armuline olnud. Ilmselt on siin kaasa aidanud ka meie ja kogu Tartu taimebioloogia koolkonna interdistsiplinaarne füüsikat, geneetikat ja molekulaarbioloogiat rakendav lähenemine ning see, et selmet püüda kõik ise ära teha, oleme olnud avatud rahvusvahelisele koostööle. Kuidas jätkata?

Sulgrakkude kaalium- ja anioonkanalite järel ootavad molekulaarset identifitseerimist arvukad kaltsiumkanalid. Lisaks, oleme küll näidanud anioonkanali vahetut aktivatsiooni, kuid arusaam sellest, kuidas jõuab signaal sulgraku plasmamembraanist OST1 aktivatsioonini, on alles väga pinnapealne. Ühe võimalusena toimub see läbi ABA retseptorvalkude, mis suruvad maha PP2C fosfataaside aktiivsuse. Ei ole välistatud, et ROSide toimel aktiveerub mõni teine, praegu veel tundmatu, signaalirada (joonis 5). Laboris on hetkel uurimisel kolm uut müürlooga mutanti, mille õhulõhede regulatsioon on tugevalt häiritud. Käimas on ka katsed kloroplasti kaltsiumsensoriga. Ka siin ei saa me läbi operatiivse rahvusvahelise ja siseriikliku sünergiat võimendava koostööta. Lahtiseid niidiotsi on veel palju, loodame, et meil õnnestub mõni neist kokku sõlmida.

#### KIRJANDUS

Ahlfors, R., Lång, S., Overmyer, K., Jaspers, P., Brosché, M., Tauriainen, A., Kollist, H., Tuominen, H., Belles-Boix, E., Piippo, M., Inzé, D., Palva, E.T., Kangasjärvi, J. (2004). *Arabidopsis thaliana* radical induced cell death 1

belongs to the WWE protein-protein interaction-domain protein family and modulates abscisic acid, ethylene and methyl jasmonate responses. *Plant Cell*, 16, 1925-1937.

Kangasjärvi, J., Talvinen, J., Utriainen, M., Karjalainen, R. (1994). Plant defence systems induced by ozone. *Plant Cell Environ.*, 17, 783-794.

Keller, U. B., Hedrich, R., Raschke, K. (1989). Voltage dependent anion channels in the plasma membrane of guard cells. *Nature*, 341, 450-452.

Kollist, H., Moldau, H., Mortensen, L., Rasmussen, S. K., Jorgensen, L. B. (2000). Ozone flux to plasmalemma in barley and wheat is controlled rather by stomata than by direct reaction of ozone with apoplastic ascorbate. *J. Plant Physiol.*, 156, 645-651.

Kollist, H., Moldau, H., Oksanen, E., Vapaavuori, E. (2001). Ascorbate transport from the apoplast to the symplast in intact leaves. *Physiol. Plant.*, 113, 377-383.

Kollist, T., Moldau, H., Rasulov, B., Oja, V., Rämme, H., Hüve, K., Jaspers, P., Kangasjärvi, J., Kollist, H. (2007). A novel device detects a rapid ozone-induced transient stomatal closure in intact *Arabidopsis* and its absence in *abi2* mutant. *Physiol. Plant.*, 129, 796-803.

Koornneef, M., Jorna, M. L., Brinkhorst-van der Swan, D. L. C., Karssen, C. M. (1982). The isolation of abscisic acid (ABA) deficient mutants by selection of induced revertants in non-germinating gibberellin sensitive lines of *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. *Theor. Appl. Genet.*, 61, 385-393.

Laisk, A., Kull, O., Moldau H. (1989). Ozone concentration in leaf intercellular air spaces is close to zero. *Plant Physiol.*, 90, 1163-1167.

Leung, J., Merlot, S., Giraudat, J. (1997). The *Arabidopsis* abscisic acid insensitive 2 (*ABI2*) and *ABI1* genes encode homologous protein phosphatases 2C involved in abscisic acid signal transduction. *Plant Cell*, 9, 759-771.

Ma, Y., Szostkiewicz, I., Korte, A., Moes, D., Yang, Y., Christmann, A., Grill, E. (2009). Regulators of PP2C phosphatase activity function as abscisic acid sensors. *Science*, 324, 1064-1068.

Moldau, H. (1998). Hierarchy of ozone scavenging reactions in the plant cell wall. *Physiol. Plant.*, 104, 617-622.

Moldau, H. (1999). Ozone detoxification in the mesophyll cell wall during simulated oxidative burst. *Free Radic. Res.*, 31, 19-24.

Moldau, H., Bichele, I. (2002). Plasmalemma protection by the apoplast as assessed from above-zero ozone concentrations in leaf intercellular air spaces. *Planta*, 214, 484-487.

Moldau, H., Söber, J., Söber, A. (1990). Differential sensitivity of stomata and mesophyll to sudden exposure of bean shoots to ozone. *Photosynthetica*, 24, 446-458.

- Negi, J., Matsuda, O., Nagasawa, T., Oba, Y., Takahashi, H., Kawai-Yamada, M., Uchimiya, H., Hashimoto, M., Iba, K. (2008). CO<sub>2</sub> regulator SLAC1 and its homologues are essential for anion homeostasis in plant cells. *Nature*, 452, 483-486.
- Overmyer, K., Tuominen, H., Kettunen, R., Betz, C., Lanngebartels, C., Sander mann, H., Kangasjärvi, J. (2000). The ozone-sensitive *Arabidopsis rcd1* mutant reveals opposite roles for ethylene and jasmonate signaling pathways in regulating superoxide-dependent cell death. *Plant Cell*, 12, 1849-1862.
- Park, S. Y., Fung, P., et al. (2009). Abscisic acid inhibits type 2C protein phosphatases via the PYR/PYL family of START proteins. *Science*, 324, 1068-1071.
- Pei, Z.-M., Murata, Y., Benning, G., Thomine, S., Klüsener, B., Allen, G. J., Grill, E., Schroeder, J. I. (2000). Calcium channels activated by hydrogen peroxide mediate abscisic acid signalling in guard cells. *Nature*, 406, 731-734.
- Raschke, K., Shabahang, M., Wolf, R. (2003). The slow and the quick anion conductance in whole guard cells: their voltage-dependent alternation, and the modulation of their activities by abscisic acid and CO<sub>2</sub>. *Planta*, 217, 639-650.
- Saji, S., Bathula, S., Kubo, A., Tamaoki, M., Kanna, M., Aono, M., Nakajima, N., Nakaji, T., Takeda, T., Asayama, M., Saji, H. (2008). Disruption of a gene encoding C4-dicarboxylate transporter-like protein increases ozone sensitivity through deregulation of the stomatal response in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell Physiol.*, 49, 2-10.
- Schmidt, C., Schelle, I., Liao, Y. J., Schroeder, J. I. (1995). Strong regulation of slow anion channels and abscisic acid signaling in guard cells by phosphorylation and dephosphorylation events. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 92, 9535-9539.
- Schroeder, J. I., Hagiwara, S. (1989). Cytosolic calcium regulates ion channels in the plasma membrane of *Vicia faba* guard cells. *Nature*, 338, 427-430.
- Vahisalu, T., Kollist, H., Wang, Y. F., Nishimura, N., Chan W., Valerio, G., Lamminmäki, A., Brosche, M., Moldau, H., Desikan, R., Schroeder, J. I., Kangasjärvi J. (2008). SLAC1 is required for plant guard cell S-type anion channel function in stomatal signalling. *Nature*, 452, 487-491.
- Vahisalu, T., Puzõrjova, I., Brosché, M., Valk, E., Lepiku, M., Moldau, H., Pechter, P., Wang Y-S., Lindgren, O., Salojärvi, J., Loog, M., Kangasjärvi, J., Kollist, H. (2010). Ozone-triggered rapid stomatal response involves production of reactive oxygen species and is controlled by SLAC1 and OST1. *Plant J.*, 62, 442-453.

*Teaduspreemia põllumajandusteaduste alal uurimuste tsükli  
"Taimsed toidulisandid ja nende antioksüdantne toime loomsetes toitudes"  
ja monograafia "Principles of Food Toxicology" eest*



*Tõnu Püssa*

Sündinud 27. 09.1946 Tõraveres

1964 M. Härma Gümnaasium

1969 Tartu Ülikool, orgaaniline keemia

1973 keemiakandidaat, orgaaniline keemia

1972–1996 Tartu Ülikooli vanemteadur, assistent, vanemõpetaja, dotsent

1991–1992 Soome Punase Risti Verekeskuse tootearenduse osakonna külalisuurija

Alates 1996 Eesti Maaülikooli keskkonnakaitse instituudi ja veterinaarmeditsiini ja loomakasvatuse instituudi laborijuhataja, keemik-analüütik, vanemteadur, toksikoloogia dotsent ja professor

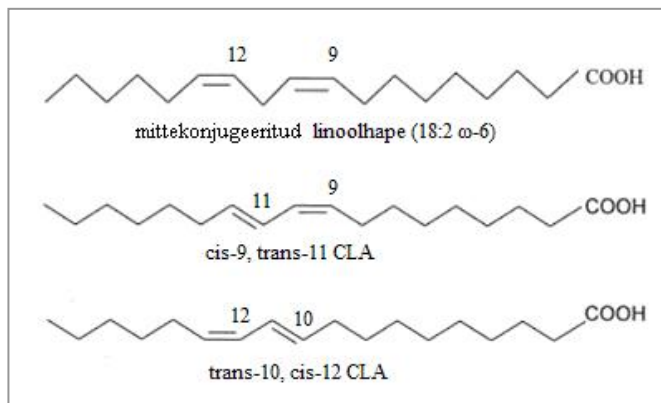
Avaldanud ligikaudu 40 teaduspublikatsiooni, kaks õpikut ja ühe monograafia

## POLÜKÜLLASTAMATA RASVHAPETE OKSÜDATSIOON

Tänapäeva toidukeemias on oluliseks ja põnevaks uurimisteenaks funktsionaalsete toidulisandite ja toidu klassikaliste komponentide ning lisandite ja organismi vahelised interaktsioonid, millel baseerub uudsete toidulisandite tervisttugevdav toime. Üheks kahjulikumaks toidu valmistamisel ja säilitamisel toimuvaks reaktsioonide rühmaks, mida oleks vaja toidulisandite abil pidurdada, on küllastamata rasvhapete oksüdatsioon e rasvade rääsumine. Selle protsessi tulemusel moodustuvad üle mitmete primaarsete oksügeneeritud vaheproduktide e oksülipiinide halvalõhnlised ning mürgised aldehüüdid ja ketoonid kui oksüdatsiooni sekundaarsed produktid.

Oksüdatsioon on keemiline protsess, mille käigus oksüdeeritava aine molekul loovutab elektrone oksüdeerija molekulile. Oksüdatsioonireaktsioonil tekivad väga sageli vabad radikaalid, mis initsieerivad elusrakke hävitavaid ahelreaktsioone.

Kuigi oksüdeerumisvõimelised on nii vabad kui triglütseriidi molekuli seotud küllastamata rasvhapped, on põhilisteks oksüdeerujateks siiski vabad polüküllastamata rasvhapped e PUFAd (*polyunsaturated fatty acids*). Tänu oma suhteliselt suurele sisaldusele erinevates toitudes on oksüdeeritavaks PUFAs ennekõike *cis*, *cis*-9,12-oktadekadienhape e mittekonjugeeritud linoalhappe (joonis 1).



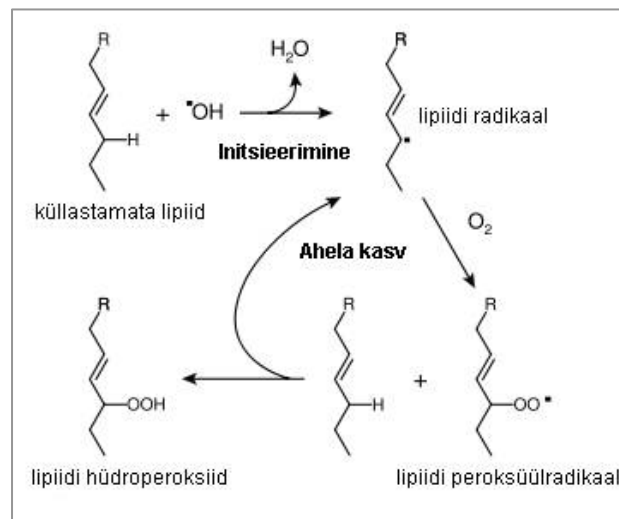
Joonis 1. Mittekonjugeeritud linoolhappe ja antioksidantsete omadustega konjugeeritud linoolhapped (CLA).

Selle protsessi põhimehhanismid on järgmised:

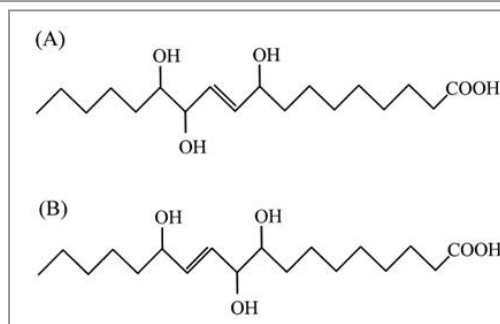
1. Keemiline oksüdatsioon reaktsioonivõimeliste hapnikuradikaalide (ROS = *reactive oxygen radicals*) toimel. Sellisel ahelmehhanismiga autooksidatsioonil tekivad kõigepealt rasvhapete hüdroperoksiidid (joonis 2), milleks linoolhappe korral on ekvivalentsetes kogustes 9-OOH ja 13-OOH. Need isomeerid võivad esialgselt *cis-trans* vormist üle minna *trans-trans* vormi, millega kaasneb hüdroperoksiidrühma ümberpaiknemine molekuli asendist C9 asendisse C13 ja vastupidi, kusjuures molekulis säilib konjugeeritud dieenne struktuur. Singletse hapniku sidumisega dieenrühmale võivad tekkida ka tsüklilised peroksiidid. Edasisel oksüdeerumisel annavad tekkinud neli hüdroperoksiidi peroksiide, oksü- ja epoksürasvhappeid ning muid oksüdatsiooni primaarseidprodukte e oksülipiine. Radikaalmehhanismiga oksüdatsiooni katalüüsivad muutuva valentsiga metallide ioonid, näiteks Fe. Protsessi on võimalik pidurdada nii radikaali neelajate kui ka metallioonide kelateerijatega.
2. Ensüümikatalüüsitud oksüdatsioon lipoksügenaaside (LOX), tsüklooksügenaaside (COX), tsütokroom P450 monooksügenaasi kompleksi (CYP) jt ensüümide osavõtul. Nagu radikaalmehhanismiga oksüdatsioonil, tekivad ka siin kõigepealt lipiidide hüdroperoksiidid, mis seejärel lagunevad erinevateks oksülipiinideks kuni trihüdroksü-oktadetseenhapeteni (THOD) [Kim jt, 2002] (joonis 3). Hüdroperoksiidide lagunemine vajab lipiidi radi-kaali tekitamiseks kahevalentseid metallioone, nagu  $\text{Cu}^{2+}$  või  $\text{Fe}^{2+}$ . Raud-ioonid on lisaks vajalikud ka lipoksügenaaside aktiivses tsentris.

Vabade rasvhapete oksüdatsioon on eriti kiire näiteks neis toitudes, mille valmistamisel toimub rakkude purunemine. Selle käigus aktiveeruvad hüdro-lüütilised ensüümid nagu fosfolipaas A2, mis vabastavad rasvhapped membraani fosfolipiidi molekuli glütserooli osa asendist 2 [Spiteller jt, 2001]. Suur osa vabanenud rasvhapetest on polüküllastamata linool- ja arahidoonhapped.

Vabas vormis on nad eriti tundlikud nii radikaalmehhanismiga kui ka ensümaatilisele oksüdatsioonile. Sellistele rakukahjustustele järgnevaid peroksidatsiooniprotsesse on palju uuritud nii loomsetes kui ka taimsetes süsteemides [Spiteller, 2001], seda nii mehhanismide, dünaamika, produktide ja inhibeerimise seisukohalt, osa kohta haiguste tekkes ning bioloogilises signalisatsioon. Mingeid analoogilisi uurimisi polnud seni tehtud lihatoodete kohta. Erilises ohus on siin just purustatud rakkudega tooted, millel on valmistamisel intensiivne kokkupuude õhuga ning mille rasvasisaldus on suhteliselt kõrge – näiteks mehaaniliselt konditustatud lihamassid (*mechanically deboned meat* - MDM), vähemal määral ka hakklihad. MDMis on lisaks veel ka tavalise lihaga võrreldes kõrgendatud hemoproteiinide kontsentratsioon, mis luukoest pärinevate  $Ca^{2+}$  ionide juuresolekul võivad toimida kvaasi-lipoksügenaasidena, kiirendades omakorda PUFAde peroksidiooni [Iwase jt, 1998]. Konjugeeritud linoolhappe (CLA) oksüdatsiooni võivad kiirendada ka teised metalliioonid, nagu  $Fe^{3+}$  või  $Cu^{2+}$  [Kim jt, 2002]. Olulised on oksüdatsiooniprotsessid ka liha marineerimisel, kui happe poolt pehmendatavas lihas rakkumembraanide koosseisus olevad küllastamata rasvhapped paremini eksponeeruvad õhuhapniku reaktsioonivõimelistele radikaalidele.



Joonis 2. Küllastamata lipiidi radikaalmehhanismiga oksüdeerimise algetapp.

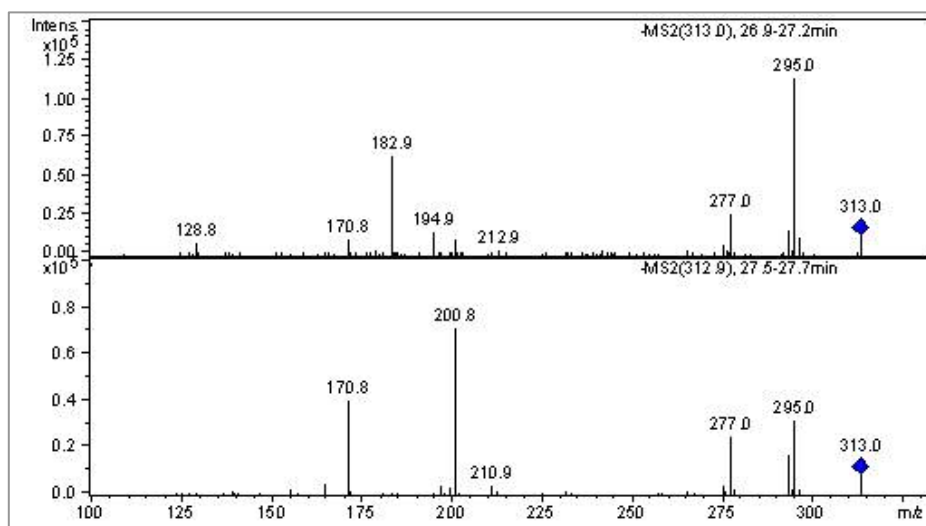


Joonis 3. Trihüdrosü-oktadetsenhappped 9,12,13-THOD (A) ja 9,10,13-THOD (B).

Rasvhapete mitmeetapilise peroksüdatsiooni lõppproduktideks on kas vähemküllastatud või täielikult küllastatud kuni kolme hüdroksüülrühmaga oksügeenitud rasvhapped e oksülipiinid. Tekkivate oksülipiinide näideteks on hüdroksüoktadetsenahapped (HODE), dihüdroksühapped, aga ka trihüdroksüoktadetsenahapete perekond THOD (joonis 3).

Meie uurimisrühm on kõrgefektiivse vedelikkromatograafia-mass-spektrometria (LC-MS/MS) abil välja selgitanud põhilised linoolhappe oksüdeerumise primaarsed produktid lihatoodetes. [Püssa jt, 2009]. Oleme leidnud, et parimaks PUFAd oksüdatsiooni markeriks (indikaatoriks) lihas on trihüdroksühapped (THOD) (joonis 3), mille sisaldused lihas tõusevad oksüdeerumisel oluliselt kõrgemale kui teiste oksülipiinide omad. Teatud konkurentsi pakuvad vaid hüdroksü-oktadekadieenahapped (HODE), mida on varem pakutud analoogiliseks markeriks [Spiteller, Spiteller, 1997].

Enamasti pole rääsunud rasvade ebatervislikkust seni seotud ühegi konkreetse primaarse oksüdatsiooniproduktiga. Vähesteks eranditeks on 9,10-dihüdroksü-12-oktadetsenhape (9,10-DiHOME,  $[M-H]^- = 313$ ), mis on tuntud ka kui leukotoksiin diool (LTX-diool). Teiste oluliste oksüdatsiooniproduktide hulgas oleme kindlaks teinud potentsiaalselt toksiliste oksülipiinide (leukotoksiindioolide, *LTX-diols*) sisaldumise erinevates lihatoodetes, eeskätt MDMs ning nende sisalduse olulise kasvu lihatoote säilitamisel ilma antioksüdantide lisamiseta [Püssa jt, 2009]. Ühendi struktuuri tõestasime tema MS<sup>2</sup> fragmentatsioonispektri võrdlemisel nii kirjanduses toodud [Newman jt, 2002] kui vastava kaubandusliku aine fragmentatsioonispektritega (joonis 4).



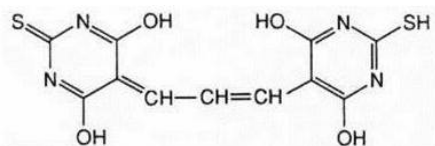
Joonis 4. LTX-diooli ja tema isomeeri iso-LTX-diooli negatiivse molekulaarse iooni ( $m/z = 313$ ) fragmenteerimisspektrid MDM-i metanooliekstraktis.



Organismis eneses tekkivate ehk endogeensete LTX-dioolide akuutset toksilisust on küllaltki hästi iseloomustatud [Zheng jt, 2001]. Samuti on näidatud, et eksogeensed LTX-dioolid toimivad aditiivselt emaste rottide endokriinsete häirijatena [Markaverich jt, 2007]. Joogiveega manustatud LTX-diooli kontsentratsioon 2 ppm, mis annab ööpäevaseks doosiks umbes 1 mg LTX-dioole kg kehakaalu kohta, blokeeris 30 päevase manustamise jooksul täielikult emaste rottide seksuaalse käitumise ning munasarja tsüklilisuse. Madalaima suukaudse täheldatava kahjuliku toimega doosi (*lowest observed adverse effect level* – LOAEL) põhjustas rottidel joogivesi, milles LTX-dioolide summaarne kontsentratsioon oli vahemikus 0,2–0,5 ppm [Markaverich jt, 2007]. LTX-dioolidel on täheldatud ka mitogeensust ning nad stimuleerisid inimese rinnavähi rakkude proliferatsiooni *in vitro* [Markaverich jt, 2005]. Meie säilituskatsetes tõusis LTX-dioolide summaarne sisaldus MDM-des umbes 20 ppm-ni, mis näiteks 100 grammi MDM tarbimisel inimese poolt ööpäevas vastab ligikaudu doosile 0,03 mg LTX-dioole/ kg kehakaalu kohta. Selline doos võib juba põhjustada teatavat muret ohutuse kohta inimesele. Lisaks võivad mõned teised PUFAde oksüdeerumisel tekkivad oksülipiinid sünergistiliselt suurendada LTX-dioolide toksilisust. Plaanis on edaspidi põhjalikult uurida ka LTX-dioolide sisaldust ja selle dünaamikat teistes peenestatud lihatoodetes ja segudes.

Lisaks lihatoodetele oleme oksülipiinid kaardistanud ja arvestatavad kogused toksilisi LTX-dioole avastanud nisuterades [Levandi jt, 2009], eriti kliides ning erinevates marjades, eriti rasvarikastes astelpaju marjades.

Oksüdeeritud e rääsunud rasvade ebameeldiv lõhn on üldtuntud, nende ebatervislikkusest ollakse teadlikud ka juba aastakümneid [Gotoh jt, 2006]. Teada on ka, et nii spetsiifiline lõhn kui ka mürgisus on seotud sekundaarsete oksüdatsiooniproduktide, lenduvate aldehüüdide ja ketoonidega, mis tekivad radikaalreaktsioonide tulemusena oksülipiinidest. Mitmed sekundaarsed oksüdatsiooniproduktid, eeskätt maloonaldehüüd, on ka mutageensete omadustega. Lipiidide peroksüdatsiooni taseme hindamiseks nii eluskudedes, näiteks vereplasmas kui ka lihas, on juba aastaid kasutusel nn TBARS (*thiobarbituric acid reactive substances*) meetod. Thiobarbituurhappega reageerivadki põhiliselt rasvhapete oksüdatsiooni sekundaarsed produktid – aldehüüdid, ketoonid, aga ka lipiidide hüdroperoksiidid ja mõned muud ühendid. Ühe molekuli maloonaldehüüdi ja kahe molekuli thiobarbituurhappe vahel tekib kompleks



, mille kontsentratsiooni saab määrata nii spektrofotomeetri kui ka spektrofluorimeetriga.

Kuna TBARS meetod pole päris spetsiifiline rasvhapete oksüdatsiooniproduktide suhtes, uurime praegu võimalusi tema asendamiseks summaarse oksülipiinide hulga määramisega.

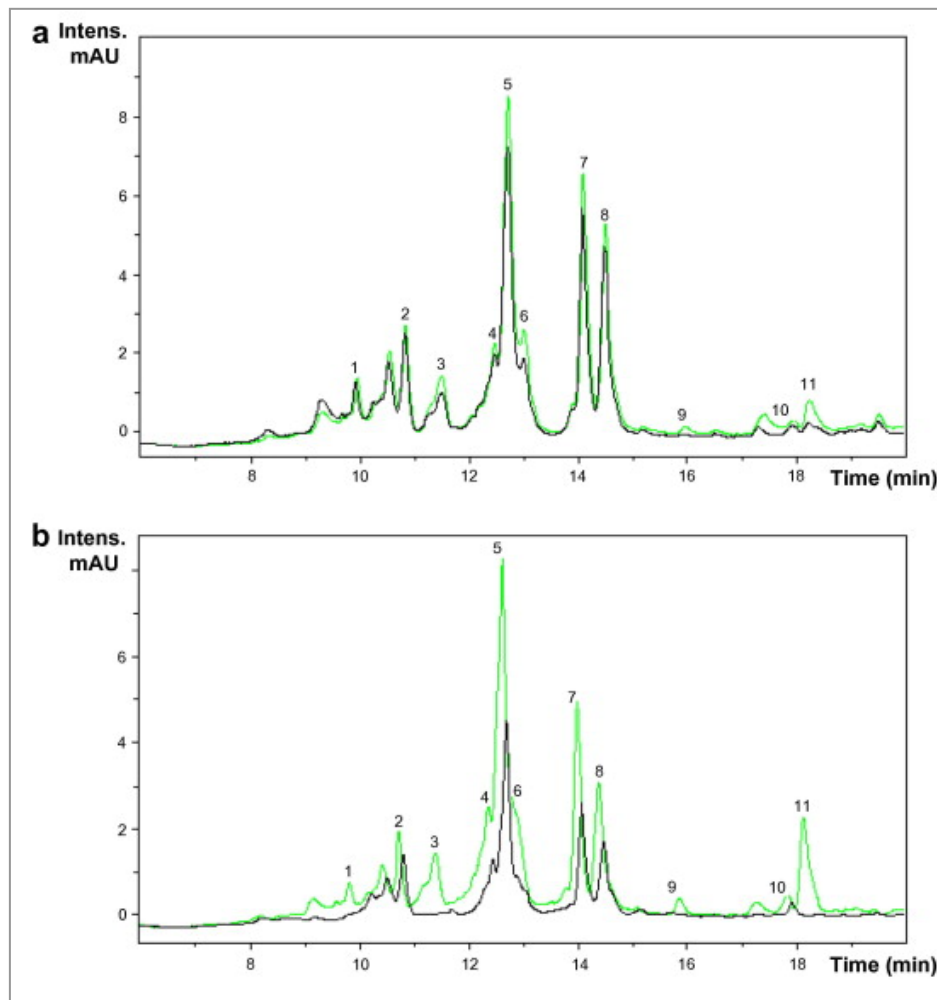
## RASVHAPETE OKSÜDATSIOONI PIDURDAMINE. TAIMSED ANTIOKSÜDANDID

Antioksidandid on ained, mis pidurdavad või väldivad teiste molekulide oksüdatsiooni. Kuigi rasvhapete oksüdatsiooni reaktsioonid on olulised elusorganismidele, võivad nad viia ka organismide hävimiseni. Loodus on taime- ja loomarakkudele loonud kompleksed erinevat tüüpi antioksidantidest koosnevad kaitsesüsteemid, mis koosnevad madalmolekulaarsetest antioksidantidest, nagu glutatioon ning vitamiinid C ja E, ning ensüümidest, nagu katalaas ja superoksiidismutaas. Liiga madalad antioksidantide tasemed või antioksidantsete ensüümide pärssimine võib viia organismi või raku oksüdatiivse stressini, millega kaasnevad rakkude talitlushäired või koguni hävimine.

Nagu juba eelpool mainitud, on oksüdatsioonireaktsioonid enamasti ahelmehhanismiga. Antioksidandid on võimelised lõpetama oksüdatiivseid ahelreaktsioone, kas sidudes vabardikaalseid vaheühendeid või oksüdeerudes ise uueks aga stabiilsemaks vähemreaktiivseks radikaaliks. Antioksidandid on seega sageli taandavate omadustega. Antioksidante kasutatakse laialdaselt toidulisandite koosseisus kahel põhjusel. Esiteks, pidurdades polüküllastamata rasvhapete, aga sealt edasi ka valkude oksüdatsiooniprotsesse, pikendavad nad toitude säilimisaega. Teiseks lootuses, et neil on sööjale tervist säilitav toime ning vastutoime sellistele tõbedele, nagu pahaloomulised kasvavad või südame-veresoonkonna haigused. Kui esimene toime on üldiselt hästi tõestatud, siis teiseaga on lugu keerulisem [Bjelakovic jt, 2007].

Selleks, et bioloogiliselt aktiivne molekul saaks omada rakule toimet, peab ta selleni jõudma. Toiduga manustatavad ained peavad kõigepealt imenduma seedetraktist ja jõudma üldisesse vereringesse. Suurust, mis iseloomustab ainete imendumise efektiivsust, nimetatakse biosaadavuseks, mis võib olla vahemikus 0–1. Paljude oluliste ainete biosaadavus on aga mitmetel põhjustel nullilähedane. Polüküllastamata rasvhapete oksüdatsiooni toitudes on võimalik pidurdada polüfenoolirikaste taimsete materjalide lisamisega. Selle kohta on teaduskirjanduses palju artikleid, kuid tegemata tööd on veel piisavalt. Meie uurimisrühm on näidanud, et rasvhapete oksüdatsiooni saab oluliselt pidurdada taimsete antioksidantide lisamisega lihatoodetele. Oleme põhiliselt uurinud kahte süsteemi. Esimene neist on MDM ja astelpaju (*Hippophae rhamnoides*) marja pulber [Püssa jt, 2007].

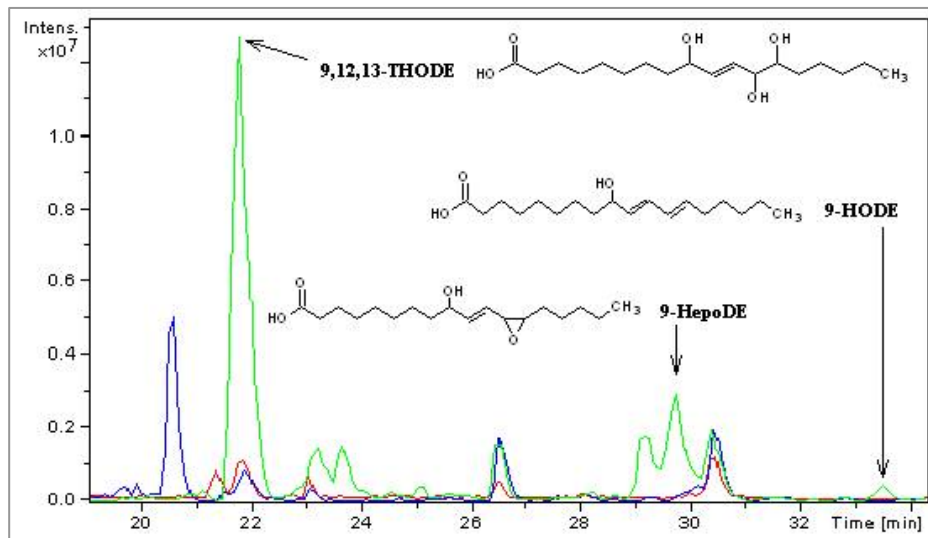
Jooniselt 5 on näha, et enamik aineid, milleks on polüfenoolid, on, vaatamata MDM kõrgele oksüdatsioonivõimele, säilitanud suure osa oma esialgsest sisaldusest. Teatud osa on siiski kulunud radikaalide sidumiseks. Parimad antioksidandid on kvartsetiini derivaadid nr 1, 3 ja 5 ning isoramnetiini derivaat nr 11, mille sisaldused on langenud praktiliselt nullini.



Joonis 5.

Toore kana (a) ja kalkuni (b) MDM-de HPLC–UV kromatogrammid 2%-lise astel-pajapulbri lisandiga esimesel (roheline joon) ja kuuendal (tume joon) säilituspäeval temperatuuril +6 °C. Numbritega 1–11 tähistatud ained on polüfenoolide hulka kuuluvate flavonoolide kvartsetiini, isarametiini ja kemferooli erinevad glükosiidid.

Teiseks meie poolt enam uuritud süsteemiks on liha marineerimine erinevate marjapulbrite või -püreede juuresolekul. Joonisel 6 on kujutatud kolm marineeritud sealiha massikromatogrammi marineerimisel Eesti metsmustika (*Vaccinium myrtillus*) marjajahu keskkonnas.



Joonis 6.

Mass-selektiivsed marineeritud lihade metanooliekstraktide kromatogrammid – sealiha, marineeritud 7 päeva sidrunhappega (roheline joon) ning sidrunhappe + mustikatega (sinine joon) ja sidrunhappega päeval 0 (punane joon). THOD, HODE ja HepoDE on linoolhappe primaarsete oksüdatsiooniproduktide e oksülipiinide nimelühendid, mille kõrval on ühendi veidi lihtsustatud keemiline valem. Punane kromatogramm läheb tunduvalt madalamalt kui roheline, mis näitab mustika antioksidantide oksülipiinide teket pidurdavat toimet.

## AINETE SEGUDE JA INDIVIDUAALSETE AINETE ANTIOKSÜDANTSUSE MÄÄRAMINE

Ainete antioksidantsuse määramiseks on erinevaid meetodeid.

Traditsiooniliselt määratakse ainete segu summaarne antioksidantsus spektrofotomeetriliselt, kasutades mingi stabiilse vaba radikaali nagu näiteks 2,2-difenüül-1-pikrüülhüdrasüül (DPPH) või 2,2-asiinobis-(3-etüülbensotiasoliin-6-sulfoonhape) (ABTS) sidumist. [Huang jt, 2005; Prior jt, 2005]. Kasutusel on veel teisigi analoogilisi meetodeid. Meetodid on lihtsad, kuid võimaldavad määrata vaid summaarset antioksidantsust, mistõttu iga individuaalse ühendi osa selles parameetris jääb välja selgitamata.

Taimsete polüfenoolide antioksidantsuse uurimiseks on kasutatud ka vedelik-kromatograafiat (HPLC) ja kapillaarelektroforeesi, eriti koos mass-selektiivse detekteerimisega. Erinevate ainete antioksidantsusi on võimalik võrrelda näiteks LC-MS abil, jälgides ainete piikide kadumist aktiivsete radikaalide lisamisel. Enamasti tehakse seda HPLC ühendamise kolonni järgse radikaali lisamisega. Selliste radikaalidena on enamasti kasutusel jälle DPPH ja ABTS,

sest neid on käsitleda lihtsam kui teisi reaktsioonivõimelisi hapniku osakesi [Shui jt, 2005; Bartasiute jt, 2007].

Meie eesmärgiks oli koostöös Tallinna Tehnikaülikooli matemaatika-loodusteaduskonna keemiasstituudiga välja töötada teist tüüpi lihtne vedelikkromatograafiline (LC-DAD-ESI/MS<sup>2</sup>) ja kapillaarelektroforeetiline *on-line* konkurentsmeetod eri ainete antioksidantsuste võrdlevaks määramiseks segust, kusjuures kolonnijärgsete reaktsioonide asemel võtsime kasutusele segude kolonnieelse reaktsiooni stabiilse radikaaliga, milleks põhiliselt oli DPPH, aga ka Fentoni reaktsiooni abil genereeritud hüdroksüülradikaal. Selleks lasti antioksidantide segul reageerida konkureerivalt radikaali erinevate kontsentratsioonidega lahustega, millele järgnes lõpuni reageerinud segude lahutamine komponentideks kas kõrgefektiivse vedelikkromatograafia (HPLC) kolonnis või kapillaarelektroforeesi kapillaaris. UV ja MS-detekteerimisega kvantiteeriti kõikide segude olulised ühendid ja leiti iga jaoks DPPH kontsentratsioon (EC<sub>50</sub>), mille juures antud komponendi sisaldus oli võrreldes algseguga DPPHga ärareageerimise tõttu vähenenud kaks korda. Katsed viidi läbi nii taimsete ekstraktide kui ka vastavate standardainete segudega. Näidiskromatogramm standardainete seguga on toodud joonisel 7.

Järgnevas tabelis on toodud näidisenäena sama standardainete segu EC<sub>50</sub> väärtused. Mida väiksem on EC<sub>50</sub>, seda parem antioksidant antud aine on.

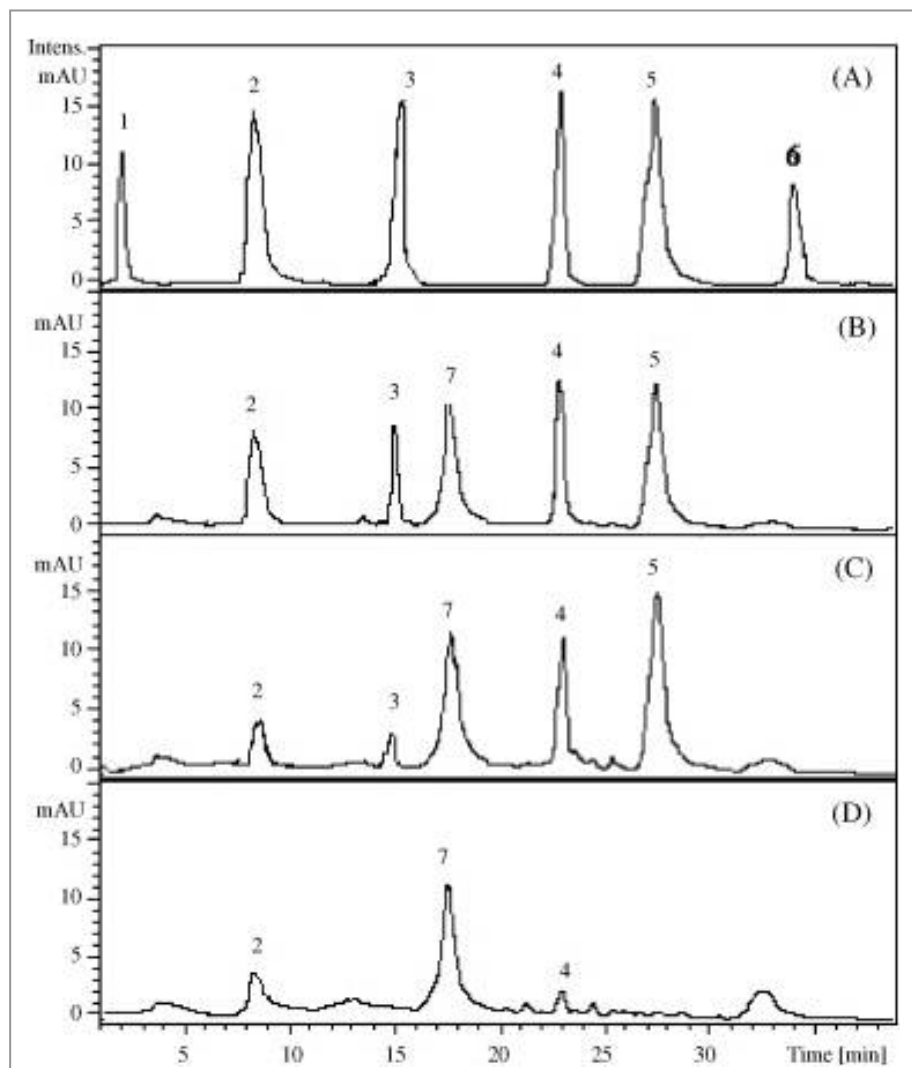
Keemiline ühend	EC <sub>50</sub> (mM DPPH)		
	LC-MS <sup>2</sup>	LC-UV/Vis (280 nm)	CE-DAD
gallushape	0,3 ± 0,09	0,3 ± 0,08	0,25 ± 0,07
astringiin			0,3 ± 0,05
kohvhape	10,0 ± 2,0	-	10 ± 0,3
klorogeenhape	0,25 ± 0,07	0,25 ± 0,07	0,2 ± 0,19
kvertsetiini rutinosiid (rutiin)	1,5 ± 0,40	1,5 ± 0,5	1,0 ± 0,3
<i>trans</i> -resveratrol	0,5 ± 0,15	0,6 ± 0,18	0,2 ± 0,08
kvertsetiin	0,25 ± 0,07	0,3 ± 0,09	0,25 ± 0,09

Parimate looduslike antioksidantsüsteemide otsinguil oleme läbi uurinud terve rea Eestis kasvavaid (kasvatavaid) taimi, mille hulgas on olulisel kohal aedrabarberi juur ja lehevares [Püssa jt, 2008b], tomat [Helmja jt, 2008], samuti mitmed maitsetaimed. Töö nende koostise ja komponentide võrdleva antioksidantsuse uurimise alal jätkub.

Aedrabarberi (*Rheum rhaponticum*) juur, mida varem peeti meditsiinilise rabarberi (*Rheum palmatum*) jt rabarberite omaga võrreldes meditsiinis ebahuvitavaks, sisaldab terve buketi omavahel lähedase struktuuriga polüfenoole – hüdroksüstilbeene (vt joonis 8), millest tuntuim on *trans*-resveratrol (nn

prantsuse paradoksi ja punase veini antioksüdantne imeaine) ja tema glükosiidid [Raal jt, 2008].

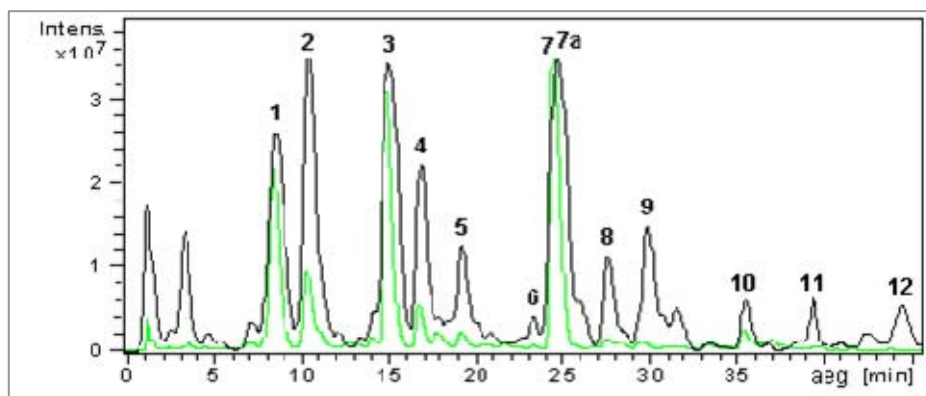
Teataval määral erineva hüdrofoobsusega hüdroksüstilbeenide koostoime võiks olla eriti mõjus sellistes heterogeenses süsteemides nagu toit. Koostöös Tartu Ülikooli Farmaatsia ja Farmakoloogia instituutide teadlastega oleme



Joonis 7.

Polüfenoolide kadumine segust stabiilse DPPH radikaali järjest suurenevate kontsentratsioonidega 0 mM (A), 0,5 mM (B), 1,0 mM (C) and 2,0 mM (D) reageerimise tulemusena iseloomustavad UV-kromatogrammid (280 nm). Piigid: 1 – gallushape; 2 – klorogeenhape; 3 – astringiin; 4 – rutiin 5 – *trans*-resveratrol; 6 – kvartsetiin; 7 – kvartsetiini oksüdatsiooni ja metoksüleerimise produktid.

avaldanud uurimistulemused, milles näidatakse rabarberi juure polüfenoolide pidurdavat mõju etanoolimürgistuse arengule katseloomade maksas, kusuures esmakordselt tõestatakse polüfenoolide efekti mehhanismina rasvhapete oksüdatsiooni ja konkreetsete oksüliipinide tekke pidurdamisel maksas [Raal jt, 2008].



Joonis 8.

Aedrabarberi juure metanooliekstrakti massikromatogramm (MS-BPC – tume) ja UV<sub>306 nm</sub> (hele joon) kromatogramm. Piigid tähistavad järgmisi samastatud stilbene või antrakinoone või torakrüsoone: 1 – pitseatannooli glükosiid-1; 2 – pitseatannooli glükosiide-2 + resveratrooli glükosiid-1; 3 – pitseatannooli glükosiid-3; 4 – rapontiin-1; 5 – resveratrooli galloüülglükosiid; 6 – rapontigeniini galloüülglükosiid; 7 – desoksürapontiin; 7a – torakrüsooni glükosiid; 8 – emodiini glükosiid + krüsofanooli glükosiid; 9 – desoksürapontigeniini galloüülglükosiid; 10 – resveratrooli dimeer-1; 11 – resveratrooli dimeer-2; 12 – emodiin. Pitseatannool, resveratrool ja tema dimeerid, rapontigeniin ja desoksürapontigeniin kuuluvad hüdroksüstilbeenide, krüsofanool ja emodiin hüdroksüantrakinoonide ning torakrüsoon hüdroksünaftaleenide hulka.

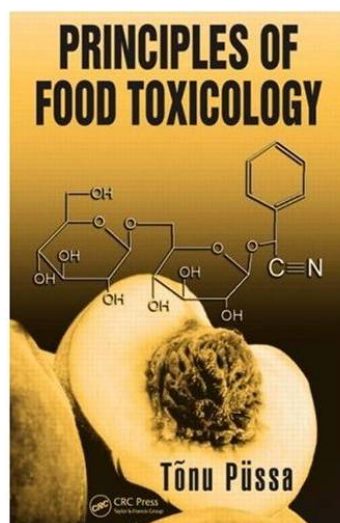
\*\*\*

T. Püssa on koostanud ja avaldanud monograafia „Principles of Food Toxicology“ – CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2008, ISBN-13: 978-0-8493-8090-7, 344 p.

USA Toksikoloogiaühingu lühiarvamus raamatu kohta on järgmine:

(<http://www.toxicology.org/ai/misc/mediaintrest.asp>)

*Skillfully combining theory and applications, this text introduces toxicology principles at the molecular, cell and organ levels, the author uses detailed, yet accessible information, to emphasize the biochemical mechanisms of toxic effects and toxic response. The book also*



*provides systemic characterization of the most important food-borne toxicants*

- *Combines general principles of toxicology with the characterization of food-borne toxicants*
- *Explains the biochemistry and chemistry required for thorough understanding of toxicological principles*
- *Provides explanations of the mechanisms of toxic effects and medicinal consequences*
- *Features a comprehensive catalog of all of the most important food-borne toxicants*
- *Drawing from the author's more than 30 years experience in research and teaching biochemistry and toxicology, Principles of Toxicology provides a complete look at the mechanisms and sources of toxicity found in our food.*

#### KIRJANDUS:

Bartasiute, A., Westerink, B. H. C., Verpoorte, E., Niederlander, H. A. G. (2007). Improving the in vitro predictability of an on-line HPLC stable free radical decoloration assay for antioxidant activity in methanol-buffer medium. *Free Radic. Biol. Med.*, 42, 413-423.

Bjelakovic, G., Nikolova, D., Gloud, L. L., Simonetti, R. G., Gluud, C. (2007). Mortality in randomized trials of antioxidant supplements for primary and secondary prevention: systematic review and meta-analysis. *JAMA*, 297, 842-857.

Gotoh, N., Watanabe, H., Osato, R., Inagaki, K., Iwasawa, A., Wada, S. (2006). Novel approach on the risk assessment of oxidized fats and oils for perspectives of food safety and quality. I. Oxidized fats and oils induces neurotoxicity relating pica behavior and hypoactivity. *Food Chem. Toxicol.*, 44, 493-498.

Gotoh, N., Watanabe, H., Osato, R., Iwasawa, A., Inagaki, K., Wada, S. (2005). New sight on the possibility of the neurotoxic behaviour affected by the oxidized compounds in fats and oils. *J. Oleo Sci.*, 54, 397-405.

Greene, J. F., Newman, J. W., Williamson, K. C., Hammock, B. D. (2000). Toxicity of epoxy fatty acids and related compounds to cells expressing human soluble epoxide hydrolase. *Chem. Res. Toxicol.*, 13, 217-226.

Helmja, K., Vaher, M., Püssa, T., Kaljurand, M. (2009). Analysis of the stable radical scavenging capability of artificial polyphenol mixtures and plant extracts by capillary electrophoresis and liquid-chromatography-diode array detection-tandem mass spectrometry. *J. Chromatogr. A*, 1216, 2417-2423.

Helmja, K., Vaher, M., Püssa, T., Raudsepp, P., Kaljurand, M. (2008). The separation of the phenolic compounds and evaluation of the free radical scavenging capability of tomato (*Solanum lycopersicon*) skin by HPLC-MS/MS and capillary electrophoresis. *Electrophoresis*, 29, 3980-3988.



- Huang, D., Ou, B., Prior, R. L. (2005). The chemistry behind antioxidant capacity assays. *J. Agric. Food Chem.*, 53, 1841-1856.
- Iwase, H., Takatori, T., Sakurada, K., Nagao, M., Niijima, H., Matsuda, Y., Kobayashi, M. (1998). Calcium is required for quasi-lipoxygenase activity of hemoproteins. *Free Rad. Biol. Med.*, 25, 943-952.
- Kim, H., Jang, Y.-S., Hou, C. T. (2002). Effect of metal ions on the production of isomeric 9,10,13 (9,12,13)-trihydroxy-11*E* (10*E*)-octadecenoic acid from linoleic acid by *Pseudomonas aeruginosa* PR3. *Enzym. Microb. Tech.*, 30, 752-757.
- Levandi, T., Püssa, T., Vaher, M., Toomik, P., Kaljurand, M. (2009). Oxidation products of free polyunsaturated fatty acids in wheat varieties. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, 111, 715-722.
- Markaverich, B. M., Alejandro, M., Thompson, T., Mani, S., Reyna, A., Portillo, W., Sharp, J., Turk, J., Crowley, J. R. (2007). Tetrahydrofurandiols (THF-diols), leukotoxin diols (LTX-diols), and endocrine disruption in rats. *Environ. Health Perspect.*, 115, 702-708.
- Markaverich, B. M., Crowley, J. R., Alejandro, M. A., Shoulars, K., Casajuna, N., Mani, S., Reyna, A., Sharp, J. (2005). Leukotoxin diols from ground corncob bedding disrupt estrous cyclicity in rats and stimulate MCF-7 breast cancer cell proliferation. *Environ. Health Perspect.*, 113, 1698-1704.
- Newman, J. W., Watanabe, T., Hammock, B. D. (2002). The simultaneous quantification of cytochrome P450 dependent linoleate and arachidonate metabolites in urine by HPLC-MS/MS. *J. Lipid Res.* 43, 1563-1578.
- Oliw, E. H., Garscha, U., Nilsson, T., Cristea, M. (2006). Payne rearrangement during analysis of linoleic and  $\alpha$ -linolenic acids by normal phase liquid chromatography with tandem mass spectrometry. *Analyt. Biochem.*, 354, 111-126.
- Prior, R. L., Wu, X., Schaich, K. (2006). Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *J. Agriculture. Food Chem.*, 53, 4290-4302.
- Püssa, T., Pällin, R., Raudsepp, P., Soidla, R., Rei, M. (2008a). Inhibition of lipid oxidation and dynamics of polyphenol content in mechanically deboned meat supplemented with sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) berry residues. *Food Chem.*, 107, 714-721.
- Püssa, T., Raudsepp, P., Kuzina, K., Raal, A. (2008b). Polyphenolic composition of roots and petioles of *Rheum rhaponticum* L. *Phytochem. Anal.*, 20, 98-103.
- Püssa, T., Raudsepp, P., Toomik, P., Pällin, R., Mäeorg, U., Kuusik, S., Soidla, R., Rei, M. (2009). A study of oxidation products of free polyunsaturated fatty acids in mechanically deboned meat. *J. Food Compos. Anal.*, 22, 307-314.

- Raal, A., Pokk, P., Arend, A., Aunapuu, M., Jõgi, J., Õkva, K., Püssa, T. (2008). *trans*-resveratrol alone and hydroxystilbenes of rhubarb (*Rheum rha-ponticum* L.) root reduce liver damage induced by chronic ethanol administration: a comparative study in mice. *Phytotherap. Res.*, 23, 525-532.
- Shui, G., Leong, L. P., Wong, S.P. (2005). Rapid screening and characterization of antioxidants of *Cosmos caudatus* using liquid chromatography coupled with mass spectrometry. *J. Chromatography, B*, 827, 127-138.
- Spiteller, G. (2001). Peroxidation of linoleic acid and its relation to aging and age dependent diseases. *Mech. Ageing Dev.*, 122, 617-657.
- Spiteller, P., Kern, W., Reiner, J., Spiteller, G. (2001). Aldehydic lipid peroxidation products derived from linoleic acids. *BBA*, 1531, 188-208.
- Spiteller, P., Spiteller, G. (1997). 9-hydroxy-10,12-octadienoic acid (9-HODE) and 13-hydroxy-9,11-octadecadienoic acid (13-HODE): excellent markers for lipid peroxidation. *Chem. Phys. Lipids*, 89, 131-139.
- Zheng, J., Plopper, C.G., Lakritz, J., Storms, D.H., Hammock, B.D. (2001). Leukotoxin-diol. A putative toxic mediator involved in acute respiratory distress syndrome. *Am. J. Respir. Cell Mol. Biol.*, 25, 434-438.

*Teaduspreemia sotsiaalteaduste alal uurimuste tsükli  
"Isiksus ja stereotüübid kultuuridevahelises perspektiivis" eest*



*Anu Realo*

Sündinud 15.02.1971 Viljandis

1989 Carl Robert Jakobsoni nimeline Viljandi 1. Keskkool

1993 Tartu Ülikool, sotsioloogia eriala

1995 MSc, psühholoogia, Tartu Ülikool

1999 PhD, psühholoogia, Tartu Ülikool

2000–2002 järeldoktorantuur, Leuveni Ülikool, Belgia

Alates 1999 Tartu Ülikooli psühholoogia instituudi dotsent, vanemteadur

Töötanud külalisuurijana Åbo Akademi's Soomes, Islandi Ülikoolis, Lausanne'i Ülikoolis Šveitsis ning uurimisinstituutides *Swedish Collegium for Advanced Study in the Social Sciences* (Rootsi) ja *The Netherlands Institute for Advanced Study in the Humanities and Social Sciences* (Holland)

Avaldanud 55 teadusartiklit eelretsenseeritavates ajakirjades ja kogumikes

Käesolevas artiklis annan põgusa ülevaate mõnedest uurimisteemadest isiksuse ja võrdlevate kultuuri-uuringute valdkonnas, millega olen viimaste aastate jooksul lähemalt tegelema.

#### ISIKSUS JA ISIKSUSE SEADUMUSED

Isiksuse kirjeldamiseks keeles on olemas tuhandeid sõnu. Paljud neist kannavad sarnast tähendust: näiteks ärev, närviline, murelik, kergesti ärrituv, vihane, masendunud, kurb ja pessimistlik sobivad kõik ühe olulise isiksuse seadumuse, neurootilisuse kirjeldamiseks. Samas, vaatamata isiksust kirjeldavate sõnade suurele arvule, kasutab inimene neid nii, nagu oleks tegemist märkimisväärselt väiksema sõltumatute teemade või kategooriate hulgaga. Viimase kahekümne viie aasta jooksul läbi viidud uurimistöö näitab, et isiksuse kirjeldamiseks on kõige optimaalsem kasutada viit mõõdet ehk dimensiooni, mis kehtivad iseenda või teise inimeste iseloomustamiseks ühtviisi nii Euroopas, Põhja-Ameerikas kui Aafrikas ja Aasias [McCrae, Costa, 1997; McCrae, John, 1992; McCrae, Terracciano, 2005b].

Need viis peamist isiksuse seadumust on järgmised:

1. NEUROOTILISUS on seadumus tunda negatiivseid emotsioone (hirm, kurbus, süü, viha jne) ja olla ebakindel pinget tekitavates olukordades;
2. EKSTRAVERTSUS on seadumus kogeda eelkõige positiivseid emotsioone. Ekstravert eelistab rahvarohkeid kogunemisi, on aktiivne, enesekindel ja jutukas.
3. AVATUS KOGEMUSELE on seadumus, mis paneb inimese huvi tundma ümbritseva maailma ja oma siseelu vastu ning muudab ta vastuvõtlikuks uutele ideedele ja kogemustele.
4. SOTSIAALSUS on üldine valmisolek usaldada teisi inimesi, olla omakaspüüdmatu, abivalmis, sõbralik ja leplik.
5. MEELEKINDLUS on seadumus kontrollida oma soove ja impulsse. Meelekindel inimene planeerib hoolikalt oma tegevust ette, on tahtekindel ja sihipärane.

Levinud definitsiooni kohaselt mõistetakse isiksuse all suhteliselt püsivat mõtlemise, tundmuste ja käitumistendentside kogumit, mis üht inimest teisest eristab [Allik, McCrae, 2002]. Nii on igal inimesel isiksus, mis iseloomustab seda, kui suurel määral mingi tendents on avaldunud. Isiksuse seadumus on inimese püsiv kalduvus sarnastes olukordades teatud kindlal viisil mõelda, tunda ja teutseda. Näiteks ekstravertne inimene käib sageli rahvarohketel kogunemistel, neurootik on tihti mures oma tervise pärast ja meelekindel inimene jääb haruharva kohtumistele hiljaks.

Kaasaegsed isiksuse teooriad tuginevad kahele olulisele eeldusele. Esiteks, isiksuse seadumused on ajas püsivad [Allik jt, 2004; Terracciano jt, 2010]. Ilmselt on suurem osa inimesi nõus "teooriaga", et inimese käitumine sõltub eelkõige olukorrast: karm ja jäärpäine ülemus võib olla kodus vagur naise tuhvialune. Samas näib enamik inimesi nõustuvat ka vastupidise vaatega, et inimese iseloomu omadused eriti palju ei muutu moodustades tema "tõelise olemuse". Teisisõnu, inimesed erinevad üksteisest teatud püsivate kalduvuste poolest, mis tulevad ilmsiks kas kõigis või paljudes sarnastes olukordades. Inimene, kes muretseb üleliia oma tervise pärast, muretseb enamasti ka teistes ärevust tekitavates olukordades, näiteks siis, kui peab pidama avaliku kõne või valmistuma raskeks eksamik. Seega on stabiilsus, püsivus üks nendest olulistest omadustest, mis eristab isiksuse seadumusi inimese teistest, ajutisematest seisunditest näiteks nagu meeleolu. Isiksuse seadumused on ka eluea jooksul väga püsivad; muutused, mis kaasnevad vanuse kasvuga on suhteliselt väikesed ja maailma erinevates paikades väga sarnased [Costa jt, 2000; McCrae jt, 2004; McCrae, Terracciano, 2005b]. Hiljutises uurimuses näitasime, et sarnaselt isiksuse seadumustele, on ka ealised muutused inimeste enesehinnangus, mis on üks emotsionaalsuse stabiilsuse näitaja, võrdlemisi tagasihoidlikud [Pullmann jt, 2009]. Huvitaval kombel on eri kultuurides hämmastavalt sarnased ka inimeste arvamused selle kohta, millised muutused ini-

meste füüsilises, kognitiivses ja sotsioemotsionaalses funktsioneerimises vananemisega kaasnevad [Löckenhoff jt, 2009].

Teine oluline eeldus ütleb, et isiksuse seadumused mõjutavad inimese elukäiku. Inimesed, kes oma isiksuse seadumustelt on teistest meelekindlamad ja kohusetundlikumad, peaksid eelduste kohaselt ka vastavalt käituma: sellised inimesed täidavad ülesanded etteantud tähtajaks, nad jõuavad kokkusaamistele õigeaks ajaks, nende töölaud ja sahtlid on piinlikus korras [Gosling jt, 2002]. Samuti peavad nad kinni tervislikest eluviisidest, mille tulemusel elavad nad kauem [Bogg, Roberts, 2004; Kern, Friedman, 2008]. Nii võime väita, et isiksus on tõesti oluline: teades inimese isiksuse seadumusi, võime ette ennustada inimese elukäiku või olulisi valikuid, mida ta elu jooksul teeb [Ozer, Benet-Martinez, 2006].

Kas meeste ja naiste isiksuse seadumused erinevad? 2008. aastal ajakirjas *Journal of Personality and Social Psychology* ilmunud artikkel käsitles naiste ja meeste isiksuseomaduste erinevusi eri kultuurides [Schmitt jt, 2008]. Varasemad uurimused on üllatuslikult leidnud [Costa jt, 2001; McCrae, 2002], et soolised erinevused isiksuse omadustes on suuremad jõukamates, tervemates ja egalitaarsemates kultuurides, kus naistel on meestega võrdsemad võimalused. Käesolevas artiklis näitasime, et taoline intuitsioonile vastukäiv tulemus leidis kinnitust 55 kultuurist pärit andmetel ( $N = 17637$ ). Nagu varasemalt leitud, olid naiste skoorid neurootilisuse, ekstravertsuse, sotsiaalsuse ja meelekindluse skaaladel kõrgemad kui meestel. Isiksuse seadumuste soolisi erinevusi erinevates kultuurides aitas aga kõige paremini ette ennustada kõrge inimarengu tase, see on siis pikk oodatav eluiga ja hea tervislik seisund; võrdne ligipääs teadmistele ja haridusele ja majanduslik jõukus. Sooliste erinevuste kultuuriline variatiivsus oli tingitud ennekõike muutustest meeste isiksuse seadumustes. Selle paradoksaalse tulemuse, mida refereeris ka ajaleht *The New York Times*, seletuseks pakkusime välja teooria, mille kohaselt majanduslik kitsikus ja poliitilised piirangud suruvad alla loomupärased soolised erinevused isiksuse omadustes, mis vallanduvad ja muutuvad suuremaks koos ühiskonna hariduse kasvu, tervise paranemise ja majandusliku jõukusega [Schmitt jt, 2008].

Kui isiksuse seadumused on ajas suhteliselt püsivad, kaasneb vananemisega siiski teatav kognitiivsete võimete langus. Hiljutised avastused näitavad, et näiteks halveneb vanuse kasvades inimeste suutlikkus ära tunda negatiivseid emotsioone. See ei ole pelgalt teaduslik, vaid ka ühiskondlik probleem: suur ja kasvav osa üleüldiselt vananevast rahvastikust on ebatäpne emotsionaalsete märkide ja vihjete analüüsimisel ning interpreteerimisel. Meie uurimisrühma poolt läbi viidud uurimuses õnnestus näidata, et vanusega seotud langus emotsiooniväljenduste äratundmisel nii pildis kui kõnes kehtib vaid teatud spetsiifiliste negatiivsete emotsioonide, vastavalt viha ja kurbuse, äratundmisel. Nende kahe emotsiooniväljenduse äratundmine halveneb juba alates 30. eluaastast ning langustrend jätkub kogu eluea jooksul [Mill jt, 2009].

## RAHVUSLIK ISELOOM

On laialt levinud nali, et “Taevas on koht, kus politseinikud on inglased, kokad on prantslased, armastajad on itaallased, mehhaanikud on sakslased ja kõike korraldavad šveitslased. Põrgu on aga koht, kus politseinikud on sakslased, kokad on inglased, mehhaanikud on prantslased, armastajad on šveitslased ja kõike korraldavad itaallased.” Kas see on ikka vaid nali või puudutab hoopiski neile rahvastele olemuslikult omaseid jooni?

Selliseid uskumusi, mis puudutavad mõne rahvuse või kultuuri liikmetele omaseid ühiseid jooni või isiksuse omadusi, nimetatakse rahvusliku iseloomu stereotüüpideks [Terracciano jt, 2005]. Näiteks arvatakse, et lõuna pool elavad inimesed on emotsionaalsemad ja äkilisema loomuga kui põhja pool elavad inimesed, seda nii ühe kultuuri sees (nt Põhja-Itaalia vs Lõuna-Itaalia) kui erinevate kultuuride võrdluses (nt Eesti vs Kreeka). Ühe võimaliku seletusena on välja pakutud kliima. Nagu kirjutas prantsuse valgustaja ja filosoof Charles de Montesquieu (1689–1755) juba 18. sajandi keskel, mõjutavad kliimaatilised tingimused olulisel määral nii inimese loomust kui ühiskonda tervikuna: väga sooja kliimaga maades elavad inimesed on (liiga) kuumaverelised, samal ajal kui külmas kliimas elavad inimesed on jäised ja kanged. Montesquieu teooria näib ka eestlaste rahvusliku iseloomu kirjeldamiseks lihtsalt suurepäraselt sobivat: eestlased on “nagu kiht jääd” kirjeldavad paljud siin lühemat või pikemat aega veetnud teistest rahvustest inimesed [Valk, Realo, 2004].

Esimene esinduslik teaduslik uurimus, mis käsitles isiksuse seadumuste geograafiat, ilmus 2004. aastal [Allik, McCrae, 2004]. Selles uurimuses, milles osales vastajaid ligi 40 riigist, ei leitud mingit seost maa keskmise temperatuuri, laiuskraadi ja isiksuse omaduste vahel! Seega, ehkki eestlasi peetakse sageli suletuteks, külmadeks, reserveerituteks ja omaette hoidvateks, ei erine me nende isiksuse seadumuste poolest märkimisväärselt ei kreeklastest ega hispaanlastest [McCrae, Terracciano, 2005a].

Põhja pool elavate rahvaste jäisus ja sõnaahtrus on pigem sajandite jooksul kultiveeritud käitumis- ja suhtlusnorm ega väljenda sugugi nende inimeste tegelikke isiksuse omadusi. Nagu ütlevad Eesti vanasõnad – “Enne mõtle, siis ütle; Rääkimine hõbe, vaikimine kuld; Pea pool suud kinni; Ära hõiska enne õhtut; Lolli ~ Narri tuntakse suurest naerust; Pill tuleb pika ilu peale; Eks naer tule ikka nautes kodu” (<http://www.folklore.ee/~kriku/lex/loeng6.htm>) –, ei ole sellest midagi head loota, kui oled rõõmus, õnnelik ja jutukas! Lõunapoolsete rahvaste suurem agressiivsus ja impulsiivsus peegeldab aga omakorda nende kultuuris levinud norme ja tõekspidamisi: nii Ameerika Ühendriikide lõunaosariike kui ka paljusid Lõuna-Euroopa maid iseloomustab n-ö “aukultuur” (*culture of honor*), mille keskseks teemaks on pidev valmisolek kaitsta oma au ja reputatsiooni karmuse ja vägivaldiga abil [Nisbett, Cohen, 1996].

Viimase aastakümne uurimused psühholoogias näitavad, et rahvusliku iseloomu stereotüübid kujunevad paljude erinevate tegurite koosmõjus. Kui ajakirjas *Science* ilmunud töö [Terracciano jt, 2005], milles osales ka meie uurimisrühm, jõudis ootamatule tulemusele, et rahvuslikud stereotüübid ei kajasta rahva tegelikke isiksuse omadusi, siis kuues Venemaaga piirnevas riigis läbi viidud rahvusvahelises uurimuses õnnestus meil esmakordselt näidata, et kui isiksuse seadumuste ja stereotüüpide mõõtmiseks kasutada üht ja sama mõõtvahendit, peegeldavad rahvusliku iseloomu stereotüübid teatud määral selles kultuuris elavate inimeste isiksuse seadumusi [Realo jt, 2009]. Sama tulemus leidis hiljem kinnitust suuremahulises Vene isiksuse ja rahvusliku iseloomu uurimuses (*Russian Character and Personality Survey*), mis hõlmas 34 piirkonda Vene Föderatsioonis ja milles osales kokku 10672 üliõpilast 40 Venemaa kõrgkoolist [Allik jt, 2010a]. Sama uurimuse tulemuste põhjal muuhulgas näitasime, et vaatamata korduvatele väidetele vene iseloomu eripärast ei erine etniliste venelaste isiksuse kirjeldused rahvusvahelisest keskmisest, mis saadi varasemalt 49 riigi tulemuste keskmistamise teel [Allik jt, 2009].

Stereotüüpide allikad võivad olla eri maades erinevad. 2007. aastal ajakirjas *European Journal of Personality* ilmunud artiklis [McCrae jt, 2007] demonstreerisime stereotüüpide ja tegelike isiksuse seadumuste lahknevust Põhja- ja Lõuna-Itaalia näitel, aga samuti uurisime rahvusliku iseloomu stereotüüpide võimalikku seost temperatuuri, rikkuse ning erinevate kultuuridimensioonidega (sh individualism ja kollektivism). Meie uurimus kinnitas hüpoteesi, et soojemates kliimades elavad inimesed iseloomustavad ennast "soojemate" interpersonaalsete omadustega ning külmemates kliimades elavad inimesed peavad ennast kompetentsemaks ning meelegindlamaks. Kultuuridimensioonid, mis on isiksuse omadustega näidanud selgeid ja hästi interpreteeritavaid seoseid, olid rahvusliku iseloomu stereotüüpidega tagasihoidlikult seotud. Selge seos esines vaid Ingleharti [Inglehart, 1997; Inglehart, Baker, 2000] ratsionaalsus/sekulaarsus-traditsionaalsus väärtusmõõtmega: maades, kus domineerivad ratsionaalsed-sekulaarsed väärtused, peavad inimesed ennast introvertsemaks ja kohusetundlikumaks.

Lisaks üldistele seaduspärasustele on terve rida tegureid, mis võivad stereotüüpide kujunemist mõjutada. Näiteks väikeriikide rahvuslik stereotüüp kujuneb selle stereotüübi alusel, mis väikeriikidel tekib oma suurriigist domineeriva naabri kohta [Realo jt, 2009]. Just nagu kanadalased vastandavad ennast ameeriklastele [Terracciano jt, 2005], näevad eestlased ja soomlased ennast peegelpildis venelastele [Realo jt, 2009]. Nii võib öelda, et eestlased peavad ennast vaikseks ja tagasihoidlikuks eelkõige seetõttu, et nende arvates on venelased jutukad ja pealetükkivad. Venemaa isiksuse ja rahvusliku iseloomu uurimuses selgitasime omakorda välja mehhanismi, mis on aluseks vene rahvusliku iseloomu stereotüübile: tüüpilisele venelasele omistatakse positiivseid omadusi, mis teevad ta emotsionaalselt stabiilsemaks, kehtestavamaks ja avatu-



tumaks võrreldes enamuse teiste maailma rahvastega [Allik jt, 2010a]. Samas, kui võrrelda kirjanike ja filosoofide loodud portreed tüüpilisest venelasest tegelike isiksuse hinnangutega, tuleb ilmsiks, et ettekujutlused salapärasest vene hingest ei oma mingit faktilist alust [Allik jt, 2010b]. Eelpool nimetatud uurimustes näitasime ka seda, et võrreldes enesekohaste hinnangutega, peetakse oma rahva tüüpilist esindajat enam neurootiliseks ja introvertseks. See mõnes mõttes tähendab, et inimesed tajuvad ennast positiivsemas valguses kui teisi. Samas kummutavad meie tulemused sotsiaalpsühholoogide seas laialt levinud uskumuse, mille kohaselt inimesed tajuvad enda rahvust positiivsemalt kui teisi rahvusi [Brewer, 2007; Tajfel, Turner, 1979]. Paljudel juhtudel inimeste nägemus oma rahva tüüpilisest esindajast on palju kriitilisem kui see, mida nad oma naabritest arvavad [Realo jt, 2009].

### MIS ON ÖNN?

Aastatuhandete jooksul on filosoofid arutlenud selle üle, mis on HEA ELU ja mida on inimestel vaja selleks, et olla õnnelik – on selleks nauding, tunnustus, rikkus või hea tervis? Tegelikuses on paratamatult ikkagi nii, et erinevate inimeste jaoks tähendab “hea elu” erinevaid asju. Mõne inimese jaoks on esmatähtis maine varandus, teise jaoks ühiskondlik tunnustus, kolmanda jaoks aga hoopiski vaimne tasakaal ja hingerahu. Ehk teisisõnu, “head elu” ei ole võimalik kindlate kriteeriumide järgi defineerida, “hea elu” määratlus tekib iga üksiku inimese peas eraldi – elu on hea, kui inimene ise arvab, et ta hästi elab. See ei välista muidugi seda, et suur hulk inimesi ei võiks mõelda ühtemoodi. Selline “head elu” subjektiivne määratlus on väga demokraatlik ja annab igale inimesele õiguse ja võimaluse ise otsustada, kas tema elu on õnnelik ja väärtuslik või mitte [Realo, 2009].

Eeltoodud arutelust tulenevalt määratlevadki psühholoogid õnnelikkust ja “head elu” subjektiivse heaolu kaudu, millena käsitletakse emotsionaalseid ja kognitiivseid hinnanguid, mida inimesed oma elule annavad, ehk teisisõnu kõike seda, mida tavakasutuses õnneks või eluga rahuloluks nimetatakse [Diener jt, 2003]. Nagu näitavad Euroopa Sotsiaaluuringu kolmanda uurimisvoor (www.europeansocialsurvey.org) (2006) andmed (enam kui 35 000 vastajat 20-lt maalt), on inimeste hinnangud oma üldisele eluga rahulolule ja nende õnnelikkuse määr tõesti omavahel väga lähedalt seotud,  $r = .70$  ( $p < .00001$ ): kui üksikud erandid välja arvata, siis need inimesed, kes väidavad, et nad on eluga rahul, peavad ennast ka õnnelikuks.

Subjektiivsel heaolul on kaks olulist komponenti: tunnetuslik ehk kognitiivne komponent [Andrews, Withey, 1976] sisaldab inimeste hinnangut sellele, kui võrd nad oma eluga või spetsiifiliste eluvaldkondadega, nagu näiteks abielu, töö, materiaalne olukord, üldiselt rahul on või kui võrd tähendus-rikast ning eesmärgipärast elu nad elavad. Emotsionaalne ehk afektiivne komponent [Bradburn, 1969; Lucas jt, 1996] viitab aga inimeste kalduvusele kogeda sagedamini positiivseid ja harvemini negatiivseid emotsioone. Ehk siis

inimestel on kõrge subjektiivne heaolu, kui nad on oma eluga rahul ja kogevad rohkem positiivseid emotsioone kui negatiivseid emotsioone.

Uurimuses, mille tulemused ilmusid 2008. aastal psühholoogia kõige mõjukamas ajakirjas *Journal of Personality and Social Psychology*, püüdsime välja selgitada, kuidas kogetud positiivsete ja negatiivsete emotsioonide sagedus on seotud eluga rahulolu hinnangutega erinevates kultuurides [Kuppens jt, 2008]. Uurimuses osales 8557 vastajat 46 erinevalt maalt. Tulemused näitasid, et kõigi kultuuride puhul on rohke positiivsete emotsioonide kogemine eluga rahulolu tugevamalt seotud kui negatiivsete emotsioonide puudumine. Samal ajal vahendasid neid seoseid olulisel määral kultuurimõõtmel individualism-kollektivism [Hofstede, 1980, 2001] ja ellujäämine-eneseväljendus [Inglehart, 1997; Inglehart, Baker, 2000]. Individualistlikemates maades oli negatiivsete emotsioonide kogemise ja eluga rahulolu vahel tugevam negatiivne seos kui kollektivistlikes maades, samal ajal kui positiivne emotsionaalne kogemus oli eluga rahulolu hinnangutega tugevamalt seotud nendes maades, kus inimestel domineerivad pigem eneseväljenduse kui ellujäämisega seotud väärtused. See näitavad antud uurimuse tulemused, et “hea elu” emotsionaalne tähendus kultuuriti varieerub ning sõltub kultuuris valitsevatest väärtushinnangutest. Nii Eestis kui ka teistes postkommunistlikes maades, kus jätkuvalt rõhutatakse ellujäämisega seotud väärtusi [Inglehart, Baker, 2000] – vähene usaldus teiste inimeste suhtes, madal tolerantsus, kasiin poliitiline aktiivsus, keskkonnateadlikkus ja isiklik algatus –, ei ole positiivsete emotsioonide osakaal eluga rahulolu hinnangutes väga oluline. Inimeste õnneks ja rahuloluks piisab sellest, kui asjad on “normaalselt”, ei lähe väga halvasti. Neis maades (sh Skandinaavia-maad ning paljud Euroopa riigid) aga, kus inimesed, vastupidiselt ellujäämisele, rõhutavad eneseväljendusega seotud väärtusi (kõrge usaldus, tolerantsus, poliitiline ja sotsiaalne aktiivsus jne), on vaja palju positiivseid emotsioone, positiivset stimulatsiooni, selleks et inimesed oleksid oma eluga rahul [Kuppens jt, 2008].

Kas noored inimesed on õnnelikumad kui vanad inimesed? Läbilõikeuurimused on andnud vastakaid tulemusi: mõnedes uurimustes ei ole leitud mingit seost vanuse ja õnne vahel [Diener, Suh, 1998], Rootsis aastatel 1998–2000 läbi viidud esindusliku uurimuse kohaselt tõusis inimeste rahulolu ja õnnetunne vanuse kasvuga märkimisväärselt [Hansson jt, 2005]. Samas näiteks Eestis 2006. aastal läbi viidud Euroopa Sotsiaaluuringu 3. vooru andmete põhjal on seos leitud olevat oluliselt negatiivne: kui kuni 20-aastaste Eesti elanike seas on oma eluga rahul või väga rahul ligikaudu 87% vastajatest, siis 61–70-aastaste vastajate seas on eluga rahulolevaid inimesi vaid 52% [Realo, 2009]. Hiljutises mõjukas uuringus [Blanchflower, Oswald, 2008] näidati, et vanuse ja eluga rahulolu vaheline seos on hoopiski U-kujuline: noorte inimeste kõrge eluga rahulolu maandub “keskeakriisis” 40ndate eluaastate keskpäiku, kuid hakkab pärast seda taaskord tõusma. Kas vanuse ja eluga rahulolu seos võib kultuuriti erineda? Sellele küsimusele otsisime vastust uuringus, milles käsit-

lesime eluga rahulolu trajektoori üle eluea 26 aasta pikkuse perioodi jooksul (1982–2008) neljas riigis – Eestis, Soomes, Lätis ja Rootsis, kasutades rahvuslikult esinduslikke valimeid vanuses 15 kuni 99 eluaastat ( $N = 39420$ ) [Dobewall, Realo, 2010]. Tulemused näitasid, et Eestis ja Lätis olid noored inimesed eluga märgatavalt enam rahul kui keskeas ja vanemad inimesed. Samal ajal Rootsis ja Soomes puudus eluga rahulolu ja vanuse vahel vähimigi seos. Pärast erinevate sotsiaaldemograafiliste tegurite arvessevõtmist esines U-kujuline seos vanuse ja eluga rahulolu vahel kõigis neljas riigis. Nii võib väita, et eluga rahulolu ja vanuse seose uurimisel tuleb ühelt poolt arvesse võtta kultuurilised-sotsiaalsed tegurid, teiselt poolt aga inimese elukäiku ja sotsiaaldemograafilist staatust iseloomustavad näitajad, nagu näiteks abielustaatus, haridus, sissetulek ja töökoha olemasolu [Dobewall, Realo, 2010].

### SOTSIAALNE KAPITAL JA INDIVIDUALISM

Mõistepaar individualism-kollektivism on viimase paarikümne aasta jooksul kujunenud ülipopulaarseks teemaks kultuure võrdlevas psühholoogias, mille abil sageli kultuuridevahelisi erinevusi ja sarnasusi püütakse seletada. Kuigi individualismi-kollektivismi käsitlevate uurimuste rohkuse tõttu hakati juba 1980ndaid aastaid nimetama “individualismi-kollektivismi dekaadiks kultuuridevahelises psühholoogias” (Kagitçibasi, 1994, lk 52), ei näita huvi nende kahe konstrukti vastu mingit kahanemise märki. Samal ajal on mitmed olulised võtmeküsimused selles valdkonnas jäänud seni vastusetu. Kuidas konstrukte defineerida? Millised on individualismi ja kollektivismi alavormid? Kuidas on need alavormid omavahel seotud? Kuidas neid konstrukte mõõta? Kas teatud isiksuse omadused soodustavad kollektivistlike hoiakute kujunemist? Minu ja kolleegide varasem uurimistöö on andnud vastuse mitmetele neist küsimustest [Allik, Realo, 1997, 2004; Gelfand, Realo, 1999; Kants, Realo, 1999; Realo, 1988, 2003; Realo, Allik, 1999; Realo jt, 1997, 2002, 2004; Realo, Goodwin, 2003; Realo, Luik, 2002].

Mitmed viimase aja uurimused on käsitlenud individualismi-kollektivismi seost sotsiaalse kapitaliga. Sotsiaalse kapitali mõiste on olnud tõusev täht sotsiaal- ja käitumisteadustes. Seda on käsitlenud teadlased nii sotsioloogias kui poliitika- ja majandusteaduses, leidmaks vastust küsimusele: mis paneb inimesed teatud kogukonnas ühiselt tegutsema? Kui algselt nähti sotsiaalset kapitali ennekõike üksikindiviidi kirjeldava omadusena [Bourdieu, 1985; Coleman, 1988], siis hilisemad käsitlused võtsid sotsiaalse kapitali mõiste kasutusele iseloomustamaks terveid kogukondi ning rahvuseid [Portes, 2000]. Tõelise tuule tiibadesse sai sotsiaalse kapitali uurimine aga pärast Robert Putnami raamatu “Üksinda keeglisaalis” (*Bowling alone*) [Putnam, 2000] ilmumist, milles autor kirjeldab värvikalt sotsiaalse kapitali langustrendi ja sellega kaasnevat sotsiaalseid probleeme Ameerika Ühendriikides. Putnami sõnul on sotsiaalse kapitali põhituumaks inimestevahelised sotsiaalsed võrgustikud, mis tuginevad

usaldusele ja vastastikusele koostööle ning seeläbi edendavad koostööd ühiste hüvede ja vastastikuse kasu saamise eesmärgil.

Kuidas on omavahel seotud individualism ja sotsiaalne kapital? Vastupidiselt levinud arvamusele on meie uurimustöö näidanud, et individualism ei hävita inimestevahelist usaldust ning tugevaid sotsiaalseid suhteid, vaid pigem soodustab neid [Allik, Realo, 2004; Realo, Allik, 2009; Realo jt, 2008]. Individualistlikes maades, kus inimesed rõhutavad iseseisvust, isiklikke saavutusi ja vastutust ning vabadust oma tegude üle ise otsustada, on inimestel rohkem ka sotsiaalset kapitali ehk vastastikusel usaldusel ja koostööl tuginevaid sotsiaalseid võrgustikke [Allik, Realo, 2004; Realo, Allik, 2009]. Samal ajal neis ühiskondades, kus usaldus piirneb lähiperekonna või klanniga, on inimestel vähe sotsiaalset kapitali: inimesed üldiselt ei usalda üksteist, nad ei osale vabatahtlike organisatsioonide töös ega tunne vastutust ja kohustust ühiskonna ees. Sotsiaalse kapitali määr suureneb sedavõrd, kuivõrd suureneb usalduse raadius, hõlmamaks suuremat hulka inimesi ja sotsiaalseid võrgustikke, milles kehtivad vastastikuse usalduse ja koostöö normid [Realo jt, 2008].

## KOKKUVÕTTEKS

Viimase paari aasta tööd on keskendunud mitme olulise psühholoogilise probleemi lahendamisele: Miks mehe ja naise isiksuse seadumused muutuvad üha erinevamaks? Kuidas kujunevad rahvusliku iseloomu streotüübid? Mis on õnn? Kas individualistlikumaks muutumisega hakkab sotsiaalne kapital kahanema? Kõik need küsimused tunduvad olevat olulised, kuna ilmub üha rohkem uurimistöid, mis neid üritab lahendada. Kuid vastused nendele küsimustele ei huvita mitte üksnes psühholooge, sotsiolooge või politolooge. Ühe sagedamini jõuavad teadusajakirjas ilmunud artiklite tulemused, mis neid küsimusi lahkavad, ka laia meediasse, nagu *New York Times* või nädalakiri *Time* ja sealtkaudu mõnikord ka Eesti Päevalehte või Postimehesse. Hinnates ilmunud tööde mõju teiste uurijate mõtlemisele, on meeldiv tõdeda, et mitmed minu ja kolleegide poolt välja pakutud lahendused on laiemat tähelepanu pälvinud. Seni kõige ulatuslikumat rahvuslikke stereotüüpe käsitlevat uurimust, mis ilmus ajakirjas *Science* [Terracciano jt, 2005], on 16. märtsi 2010. aasta seisuga 55 korral viidatud. Andmebaasi *Essential Science Indicators* andmetel kuulub artikkel, mis seletab, miks mees ei võiks olla nagu naine [Schmitt jt, 2008] psühhiaatria ja psühholoogia valdkonna 1% enim tsiteeritud tööde hulka (nende ridade kirjutamise hetkeks on seda tööd juba 26 korral viidatud). Nende ja teiste vastukajade põhjal tundub, et on olnud midagi olulist öelda, mis aitab neid põnevaid küsimusi lahendada.

## KIRJANDUS

Allik, J., Laidra, K., Realo, A., Pullmann, H. (2004). Personality development from 12 to 18 years of age: Changes in mean levels and structure of traits. *Eur. J. Pers.*, 18, 6, 445-462.

- Allik, J., McCrae, R. R. (2002). A Five-Factor Theory perspective. McCrae, R. R., Allik, J. (Eds.). *The Five-Factor Model of Personality Across Cultures*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 303-321.
- Allik, J., McCrae, R. R. (2004). Toward a geography of personality traits: Patterns of profiles across 36 cultures. *J. Cross Cult. Psychol.*, 35, 1, 13-28.
- Allik, J., Mõttus, R., Realo, A. (2010a). Does national character reflect mean personality traits when both are measured by the same instrument? *J. Res. Pers.*, 44, 1, 62-69.
- Allik, J., Mõttus, R., Realo, A., Pullmann, H., Trifonova, A., McCrae, R. R., 56 Members of the Russian Character and Personality Survey (2010b). Personality profiles and the "Russian Soul": Literary and scholarly views evaluated. *J. Cross Cult. Psychol.* (in press)
- Allik, J., Realo, A. (1997). Psychological and cultural mechanisms of suicide. *Trames*, 1, 306-321.
- Allik, J., Realo, A. (2004). Individualism-collectivism and social capital. *J. Cross Cult. Psychol.*, 35, 1, 29-49.
- Allik, J., Realo, A., Mõttus, R., Pullmann, H., Trifonova, A., McCrae, R. R., 56 Members of the Russian Character and Personality Survey (2009). Personality traits of Russians from the observer's perspective. *Eur. J. Pers.*, 23, 567-588.
- Andrews, F. M., Withey, S. B. (1976). *Social Indicators of Well-Being*. Plenum, New York.
- Blanchflower, D. G., Oswald, A. J. (2008). Is well-being U-shaped over the life cycle? *Soc. Sci. Med.*, 66, 1733-1749.
- Bogg, T., Roberts, B. W. (2004). Conscientiousness and health behaviors: A meta-analysis. *Psychol. Bull.*, 130, 887-919.
- Bourdieu, P. (1985). The forms of capital. Richardson, J. G. (Ed.). *Handbook of Theory and Research for the Sociology of Education*. Greenwood Press, New York, 241-258.
- Bradburn, N. M. (1969). *The Structure of Psychological Well-Being*. Aldine, Chicago.
- Brewer, M. B. (2007). The importance of being we: Human nature and inter-group relations. *Am. Psychol.*, 62, 728-738.
- Coleman, J. S. (1988). Social capital in the creation of human capital. *Am. J. Sociol.*, 94, S95-S120.
- Costa, P. T., McCrae, R. R., Martin, T. A., Oryol, V. E., Senin, I. G., Rukavishnikov, A. A., Shimonaka, Y., Nakazato, K., Gondo, Y., Takayama, M., Allik, J., Kallasmaa, T., Realo, A. (2000). Personality development from adolescence through adulthood: Further cross-cultural comparisons of age diffe-

- rences. Molfese, V. J. M. D. (Ed.). *Temperament and Personality Development Across the Life Span*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, 235-252.
- Costa, P. T., Terracciano, A., McCrae, R. R. (2001). Gender differences in personality traits across cultures: Robust and surprising findings. *J. Pers. Soc. Psychol.*, 81, 322-331.
- Diener, E., Oishi, S., Lucas, R. E. (2003). Personality, culture, and subjective well-being: Emotional and cognitive evaluations of life. *Annu. Rev. Psychol.*, 54, 403-425.
- Diener, E., Suh, E. M. (1998). Subjective well-being and age: an international analysis. *Annu. Rev. Gerontol. Geriatr.*, 17, 304-324.
- Dobewall, H., Realo, A. (2010). Life-satisfaction across life span in four countries: A Comparison of Estonia, Finland, Latvia, and Sweden. (unpublished manuscript submitted for publication)
- Gelfand, M. J., Realo, A. (1999). Individualism-collectivism and accountability in intergroup negotiations. *J. Appl. Psychol.*, 84, 5, 721-736.
- Gosling, S. D., Ko, S. J., Mannarelli, T., Morris, M. E. (2002). A room with a cue: Judgments of personality based on offices and bedrooms. *J. Pers. Soc. Psychol.*, 82, 379-398.
- Hansson, A., Hillerås, P., Forsell, Y. (2005). Well-being in an adult Swedish population. *Social Indicators Research: An International and Interdisciplinary Journal for Quality-of-Life Measurement*, 74, 313-325.
- Hofstede, G. (1980). *Culture's Consequences: International Differences in Work-Related Values*. Sage, Beverly Hills, CA.
- Hofstede, G. (2001). *Culture's Consequences: Comparing Values, Behaviors, Institutions and Organizations Across Nations*. 2nd ed. Sage, Beverly Hills, CA.
- Inglehart, R. (1997). *Modernization and Postmodernization: Cultural, Economic, and Political Change in 43 Societies*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Inglehart, R., Baker, W. E. (2000). Modernization, cultural change, and the persistence of traditional values. *Am. Soc. Rev.*, 65, 19-51.
- Kants, L., Realo, A. (1999). Meta-level collectivism in Estonia and Finland. *Trames*, 3, 3-18.
- Kern, M. L., Friedman, H. S. (2008). Do conscientious individuals live longer? A quantitative review. *Health Psychol.*, 27, 505-512.
- Kuppens, P., Realo, A., Diener, E. (2008). The role of positive and negative emotions in life satisfaction judgment across nations. *J. Pers. Soc. Psychol.*, 95, 1, 66-75.

- Lucas, R. E., Diener, E., Suh, E. (1996). Discriminant validity of well-being measures. *J. Pers. Soc. Psychol.*, 71, 616-628.
- Löckenhoff, C. E., De Fruyt, F., Terracciano, A., McCrae, R. R., De Bolle, M., Costa, P. T., Jr., Aguilar-Vafaie, M. E., Ahn, C., Ahn, H., Alcalay, L., Allik, J., Avdeyeva, T. V., Barbaranelli, C., Benet-Martinez, V., Blatny, M., Bratko, D., Cain, T. R., Crawford, J. T., Lima, M. P., Fickova, E., Gheorghiu, M., Halberstadt, J., Hrebickova, M., Jussim, L., Klinkosz, W., Knezević, G., de Figueiroa, N. L., Martin, T. A., Marusić, I., Mastor, K. A., Miramontez, D. R., Nakazato, K., Nansubuga, F., Pramila, V. S., Realo, A., Rolland, J. P., Rossier, J., Schmidt, V., Sekowski, A., Shakespeare-Finch, J., Shimonaka, Y., Simonetti, F., Siuta, J., Smith, P. B., Szmigielska, B., Wang, L., Yamaguchi, M., Yik, M. (2009). Perceptions of aging across 26 cultures and their culture-level associates. *Psychol. Aging*, 24, 4, 941-954.
- McCrae, R. R. (2002). NEO-PI-R data from 36 cultures: Further intercultural comparisons. Allik, J. (Ed.). *The Five-Factor Model of Personality Across Cultures*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 105-125.
- McCrae, R. R., Costa, P. T. (1997). Personality trait structure as a human universal. *Am. Psychologist*, 52, 5, 509-516.
- McCrae, R. R., Costa, P. T., Hrebickova, M., Urbanek, T., Martin, T. A., Oryol, V. E., et al. (2004). Age differences in personality traits across cultures: Self-report and observer perspectives. *Eur. J. Pers.*, 18, 2, 143-157.
- McCrae, R. R., John, O. P. (1992). An introduction to the 5-factor model and its applications. *J. Personality*, 60, 2, 175-215.
- McCrae, R. R., Terracciano, A. (2005a). Personality profiles of cultures: Aggregate personality traits. *J. Pers. Soc. Psychol.*, 89, 3, 407-425.
- McCrae, R. R., Terracciano, A. (2005b). Universal features of personality traits from the observer's perspective: Data from 50 cultures. *J. Pers. Soc. Psychol.*, 88, 3, 547-561.
- McCrae, R. R., Terracciano, A., Realo, A., Allik, J. (2007). Climatic warmth and national wealth: Some culture-level determinants of national character stereotypes. *Eur. J. Pers.*, 21, 8, 953-976.
- Mill, A., Allik, J., Realo, A., Valk, R. (2009). Age-related differences in emotion recognition ability: A cross-sectional study. *Emotion*, 9, 5, 619-630.
- Nisbett, R. E., Cohen, D. (1996). *Culture of Honor: The Psychology of Violence in the South: The Psychology of Violence in the South*. Westview Press, Boulder, CO.
- Ozer, D. J., Benet-Martinez, V. (2006). Personality and the prediction of consequential outcomes. *Annu. Rev. Psychol.*, 57, 401-421.
- Portes, A. (2000). The two meanings of social capital. *Sociological Forum*, 15, 1-12.

- Pullmann, H., Allik, J., Realo, A. (2009). Global self-esteem across the life span: A cross-sectional comparison between representative and self-selected Internet samples. *Exp. Aging Res.*, 35, 1, 20-44.
- Putnam, R. D. (2000). *Bowling Alone: The Collapse and Revival of American Community*. Simon and Schuster, New York, NJ.
- Realo, A. (1988). Collectivism in an individualist culture: The case of Estonia. *Trames*, 2, 19-39.
- Realo, A. (2003). Comparison of public and academic discourses: Estonian individualism and collectivism revisited. *Culture & Psychology*, 9, 1, 47-77.
- Realo, A. (2009). Happiness and satisfaction with life. Lauristin, M. (Ed.). *Estonian Human Development Report 2008*. Eesti Koostöö Kogu, Tallinn, 63-67.
- Realo, A., Allik, J. (1999). A cross-cultural study of collectivism: A comparison of American, Estonian, and Russian students. *J. Soc. Psychol.*, 139, 2, 133-142.
- Realo, A., Allik, J. (2009). On the relationship between social capital and individualism-collectivism. *Soc. Pers. Psychol. Compass*, 3, 1-16.
- Realo, A., Allik, J., Greenfield, B. (2008). Radius of trust: Social capital in relation to familism and institutional collectivism. *J. Cross Cult. Psychol.*, 39, 4, 447-462.
- Realo, A., Allik, J., Lönnqvist, J. E., Verkasalo, M., Kwiatkowska, A., Kõõts, L., et al. (2009). Mechanisms of the national character stereotype: How people in six neighbouring countries of Russia describe themselves and the typical Russian. *Eur. J. Pers.*, 23, 3, 229-249.
- Realo, A., Allik, J., Vadi, M. (1997). The hierarchical structure of collectivism. *J. Res. Pers.*, 31, 1, 93-116.
- Realo, A., Goodwin, R. (2003). Family-related allocentrism and HIV risk behavior in Central and Eastern Europe. *J. Cross Cult. Psychol.*, 34, 6, 690-701.
- Realo, A., Koido, K., Ceulemans, E., Allik, J. (2002). Three components of individualism. *Eur. J. Pers.*, 16, 3, 163-184.
- Realo, A., Kästik, L., Allik, J. (2004). The relationships between collectivist attitudes and elementary forms of human relations: Evidence from Estonia. *J. Soc. Pers. Relat.*, 21, 6, 779-794.
- Realo, A., Luik, M. (2002). On the relationship between collectivism and empathy in the context of personality traits. *Trames*, 6, 218-233.
- Schmitt, D. P., Realo, A., Voracek, M., Allik, J. (2008). Why can't a man be more like a woman? Sex differences in big five personality traits across 55 cultures. *J. Pers. Soc. Psychol.*, 94, 1, 168-182.



Tajfel, H., Turner, J. C. (1979). An integrative theory of intergroup conflict. Worchel, W. G. A. S. (Ed.). *The Social Psychology of Intergroup Relations*. Brooks/Cole: Pacific Grove, CA, 33-48.

Terracciano, A., Abdel-Khalek, A. M., Ádám, N., Adamovová, L., Ahn, C.-K., Ahn, H.-N., Alansari, B. M., Alcalay, L., Allik, J., Angleitner, A., Avia, A., Ayearst, L. E., Barbaranelli, C., Beer, A., Borg-Cunnen, M. A., Bratko, D., Brunner-Sciarrà, M., Budzinski, L., Camart, N., Dahourou, D., De Fruyt, F., de Lima, M. P., del Pilar, G. E. H., Diener, E., Falzon, R., Fernando, K., Ficková, E., Fischer, R., Flores-Mendoza, C., Ghayur, M. A., Gülgöz, S., Hagburg, B., Halberstadt, J., Halim, M. S., Hrebícková, M., Humrichouse, J., Jensen, H. H., Jovic, D. D., Jónsson, F. H., Khoury, B., Klinkosz, W., Knežević, G., Lauri, M. A., Leibovich, N., Martin, T. A., Marušić, I., Mastor, K. A., Matsumoto, D., McRorie, M., Meshcheriakov, B., Mortensen, E. L., Munyae, M., Nagy, J., Nakazato, K., Nansubuga, F., Oishi, S., Ojedokun, A. O., Ostendorf, F., Paulhus, D. L., Pelevin, S., Petot, J.-M., Podobnik, N., Porrata, J. L., Prämila, V. S., Prentice, G., Realo, A., Reátegui, N., Rolland, J.-P., Rossier, J., Ruch, W., Rus, V. S., Sánchez-Bernardos, M. L., Schmidt, V., Scicula-Calleja, S., Sekowski, A., Shakespeare-Finch, J., Shimonaka, Y., Simonetti, F., Sineshaw, T., Siuta, J., Smith, P. B., Trapnell, P. D., Trobst, K. K., Wang, L., Yik, M., Zupancic, A., McCrae, R. R. (2005). National character in 49 cultures: Perceived and assessed personality traits. *Science*, 310, 96-100.

Terracciano, A., McCrae, R. R., Costa, P. T. (2010). Intra-individual change in personality stability and age. *J. Res. Pers.*, 44, 1, 31-37.

Valk, A., Realo, A. (2004). Eesti ja eestlased teiste rahvuste peeglis. Tartu Ülikooli Kirjastus, Tartu.

*Teaduspreemia humanitaarteaduste alal monograafiate*  
*“Mihhail Bulgakovi romaani “Meister ja Margarita”. Kommentaarid”;*  
*“Roman M. Bulgakova “Master i Margarita”. Kommentarij” Tallinn, 2006;*  
*“Roman M. Bulgakova “Master i Margarita”. Kommentarij” Moskva, 2007*  
*eest*



*Irina Belobrovtseva*

Sündinud 1.04.1946 Riias

1963 Tallinna 5. Keskkool

1968 Tartu Ülikool, vene filoloogia

1990 filoloogiakandidaat, Moskva Pedagoogiline Instituut

1997 PhD, Tartu Ülikool

1970–1975 Tallinna Pedagoogilise Instituudi vanemõpetaja

1976–1979 Semipalatinski Pedagoogilise Instituudi vanemõpetaja

1979–1986 TA Majanduse Instituudi tõlk

Alates 1986 Tallinna Ülikooli vanemõpetaja, dotsent, professor, prodekaan,  
osakonnajuhataja, õppetooli juhataja

Avaldanud üle 160 teaduspublikatsiooni



## *Svetlana Kuljus*

Sündinud 4.12.1946 Kostroma linnas Venemaal

1965 Tallinna 45. keskkool

1972 Tartu Ülikool, ajaloo-filoloogiateaduskond

1978–1982 aspirantuur, Tartu Ülikool

1982 filoloogiakandidaat, Tartu Ülikool

1998 PhD, Tartu Ülikool

Alates 1972 Tallinna Ülikooli vanemõpetaja, dotsent, vanemteadur

Avaldanud üle 130 teaduspublikatsiooni

Kirjandusteose kommentaarid on iseäralik ja nõudlik žanr. Kaasaegses humanitaarteaduses kutsub kommentaari määratlus esile enam küsimusi kui vastuseid. Kommentaari pole piisav määratleda mingi teksti seletusena. Selle ülesandeks on anda tähelepanelikule lugejale vastus võimalikult suurele hulga küsimustele, mis tal võivad tekkida.

Mõistagi peab kommentaar olema interdistsiplinaarne. Selles kasutatakse lingvistilisi, kirjandusteaduslikke, semiootilisi, ajaloolisi, tekstoloogilisi uurimismeetodeid. Samas ei ole teksti kommenteerimisel ühtseid reegleid ja seaduspärasusi. Kommenteeriv lugemine on subjektiivne ning vaid üks võimalikest variantidest. Kommenteerija toob tekstis esile väljapoole keelt ja kirjandust, aga ka kultuuri jäävad tähendused. Kommentaari mikrotasandil seletab ta lehekülgede kaupa nimesid, toponüüme, erinevaid reaaliaid, seletab lahti tekstis esinevaid varjatud kirjanduslikke vaidlusi, poliitilisi allusioone jne. Makrotasandil tähendab see ajastu retoorika lahtimõtestamist. Jutt käib ka üldisemast analüütilisest ülesehitusest, mis demonstreerib antud teksti ja ühe või teise kultuuriruumi aspekti sisemisi seoseid.

Kommentaar sõltub otseselt ka kommenteeritava teksti tüübist. Selles mõttes on Mihhail Bulgakovi romaan “Meister ja Margarita”(MM) vägagi eripärane tekst. See on tekst, millest kirjutatud uurimuste maht ületab tuhandeid kordi teose enda mahu. Seni on romaani kommenteeritud lehekülgede kaupa peamiselt seoses järjekordse kordustrüki avaldamisega. Seejuures need selgitused ja märkused pole olnud täielikud, sageli dubleerisid nad üksteist ega andnud ettekujutust teksti organiseerimise konstruktiivsetest põhimõtetest.

## ROMAANI LOOMISLUGU

Esialgelt pidi Bulgakovi teos olema “romaan saatanast”, millest annavad tunnistust ka mustandites loetletud teose võimalikud pealkirjad (“Must maag”, “Kabjaga konsultant”, “Suur kantsler”, “Siin ma olengi” <lause, mida öeldes astub Mefistofeles ooperis Fausti ette>, “Sulega kübar”, “Must teoloog”, “Pimedusevürst” jt). Seda kinnitab ka Bulgakov ise 28. märtsi 1930. aasta kirjas NSV Liidu valitsusele, kus ta nimetab seda teost “saatanast kirjutatud romaaniks”, mille mustandi ta on ära põletanud.

Töö kõige varasemast perioodist on säilinud kaks vihikut hävitatud romaani mustandteksti. Bulgakov on neist lehed välja rebinud nii, et osa tekstist (väheoluline) on alles jäänud, nagu ka katkendid kolmanda vihiku lehekülgedest. Neid on võimalik dateerida aastatega 1928–1929. Säilinud on ka kaks mustandvisanditega vihikut aastaist 1929–1931. Esimest neist peetakse osaks romaani esimesest redaktsioonist.

Bulgakovi pikaajaline töö (1928–1940) romaani kirjutamisel kajastub teksti mitmes redaktsioonis, mis on kohati märgatavalt erinevad. Jeršalaimi-süžee oli kirjanikul selge juba esimeses redaktsioonis, hilisemate redaktsioonide erinevused on pigem vormistuslikku laadi. Meistrit ega Margaritat esimeses ja teises

redaktsioonis veel polnudki. Kirjanik alustas uuesti tööd romaani kallal 1932. a ning määratles kohe esimesel leheküljel teose žanri – “Fantastiline romaan”.

Kuid tõeliselt jätkus töö alles 1933. a juulis, kui ta viibis koos J. Bulgakovaga Leningradis. Selle tõenduseks on 2. augusti 1933 kiri V. Veressajevile: “Minusse on aga asunud kuri vaim. Juba Leningradis ja nüüd siin, oma toabrikutes lämbudes, määrin ma lehekülje lehekülje järel paberit, pannes uuesti kirja oma kolm aastat tagasi hävitatud romaani”.

Romaani selles redaktsioonis, mis ei olnud veel saanud oma kanoonilist pealkirja, esinevad juba mõlemad peategelased – Margarita ja poeet, keda nimetatakse ka Faustiks. Kuid peategelane ei sarnane selles variandis veel “kolmekordselt romantilise meistriga”, ka Margarita ei ole veel nii romantiline. Peatükis, mis kannab tema nime, mõtleb naispeategelane hommikul ärgates, et tuleb oma armsamast lahti öelda, vastasel korral “minu elu hääbub”: “Oh ei,” soostas Margarita, “ma ei ole vastik, ma olen kõigest jõuetu. Seepärast hakkam salamis vihkama kogu maailma, petan kõiki, kuid lõpetan oma elu nautides”. Sabatile lendav naine lööb puruks valgusfoori Arbati tänaval, tema pärast läheb tänaval löömaks. Margaritat kirjeldades ei hoiata Bulgakov kokku iseloomulikke keelevahendeid, mis peavad toonitama kurja, agressiivset algat naist.

Pärast mõningast vaheaega asub Bulgakov jälle romaani kallale 1934. a oktoobris. Ta otsekui loitsiks romaani kallal, nähes ette selle erilist osa oma elus. Ühes vihikus on kuupäevast “30. X 34” paremal kirjutatud: “Lõpetada enne, kui saabub surm!”, viimasele sõnale on joon alla tõmmatud.

1936. a juulis lõpeb romaani järjekordne redaktsioon esimest korda sõnaga “lõpp”, kuigi sel ei olnud ikka veel kindlat pealkirja. Bulgakov nimetas seda lihtsalt “Romaaniks”. Alles 1937 novembris, kui otsustada J. Bulgakova päevikusissekande järgi, sai teos oma lõpliku pealkirja. 1938 suvel, pärast romaani ümberlöömist kirjutusmasinal, mis tugevasti muutis käsikirja ilmet, kirjutas Bulgakov abikaasale, kes puhkas koos pojaga Lebedjanis: ““Mis edasi saab?” Sa küsid? Ma ei tea. Arvatavasti paned sa romaani sekretäri laekasse või kappi, kus lebavad minu tapetud näidendid, ja meenutad seda mõnikord”.

Edasisi parandusi hakkas Bulgakov dikteerima siis, kui tunnetas, et “Meister ja Margarita” on tõepoolest “loojanguromaan”, nagu ta oli seda varem nimetanud. Viimast korda töötas kirjanik käsikirjaga 13. veebruaril 1940 (ta suri 10. märtsil).

#### “MATERJALID ROMAANI TARVIS”

Sellist nimetust kannab vihik, millesse Bulgakov kirjutas raamatutest välja need andmed, mida tal oli vaja Jeesus Kristuse loo taasloomiseks. Eelkõige lubavad need kindlaks teha allikad, mida ta kasutas töös Jeršalaimi-süžee kirjutamisel. Need olid E. Renani “Jeesuse elu” ja “Antikristus”, F. Farrari “Jeesuse Kristuse elu”, A. Drewsi “Müüt Kristusest”, D. Straussi “Jeesuse elu” ja H. Barbusse'i “Jeesus”. Hulgaliselt on andmeid ammutatud Brockhausi ja Ef-

roni entsüklopeedilisest sõnastikust, G. Grettsi “Juutide ajaloost kõige vanemast ajast kuni tänapäevani”. Peale selle luges Bulgakov Josephus Flaviust ja Tacitust, G. A. Mülleri raamatut “Pontius Pilatus, der fünfte Prokurator von Judäa und Richter Jesus von Nasareth (Stuttgart, 1888), N. Makkaveiski “Issanda Jeesuse Kristuse kannatuste loo arheoloogiat”. Religiooni ajaloo alal oli talle abivahendiks G. Boissier’ raamat “Rooma religioon Augustusest kuni Antoniuseni” (1878) ja mitmed teised teosed. Selleks, et võimalikult täpselt kujutada kirjeldatava aja Juudamaad, kasutas Bulgakov avaldatud päevikuid, reisikirju jm.

“Materjalide” vihikus on nt Kolgata mäe joonis ja kirjeldus (“Kolgata – Golgotha – Calvaria – Hukkamisaik – Gilgeiles-Golal, Pealae ase, Kolju, Jeršalaimist loodes. Arvestagem, et 10 staadioni kaugusel Jeršalaimist. Staadion! 200 staadioni = 36 kilomeetrit”); “kujuteldava Jeršalaimi” skeem; keisrite eluajad ja nendega kõrvutatud Horatiuse ja Vergiliuse eluajad.

Koostada allikate ammendav loetelu, isegi nendest, mille jälgi võib “Materjalides” leida, on vaevalt küll võimalik, eriti kui võtta arvesse, et Bulgakovi rikkalikust raamatukogust on säilinud ainult üksikud raamatud ja ajakirjanumbrid.

#### PIIBEL “MEISTRIS JA MARGARITAS”

Kiievi I Gümnaasiumi säilinud koondaruannetest on näha, et usuõpetusele kuulus gümnasist Mihhail Bulgakovi elus eriline koht: see oli ainus õppeaine, milles tulevases kirjanikul oli aastahinne alati väga hea.

Romaanist “MM” rääkides seostatakse kõik piibli assotsiatsioonid tavaliselt Uue Testamendiga, sest autor on jätnud teksti pinnale palju märke ja juhtniite, mis seostavad romaani evangeeliumide mütoloogiaga, ka Bulgakovi teos ise suunab lugejat vääramatult Uue Testamendi tekstide juurde. Kuid kaheldamatult on “MM-is” ka Vana Testamendi jälgi, neid on küll võrreldamatult vähem kui viiteid evangeeliumidele ja nad ei ole tekstis nii märgatavad.

Vana Testamendi juurde juhatab nt Abadonna kuju, keda nimetatakse Johannes Ilmutuses ja Iiobi raamatus ning kes on seotud surma ja hukkumisega, aga ka maokujuliste harudega küünlajalg, mis assotsieerub saatana vanatestamentliku kujutamiseks.

Kasutades ära evangeeliumide kihti, töötades põlvkondade mälu “ülessojendatud” sektoris, hülgab Bulgakov aeg-ajalt sündmuste evangeeliumidejärgse esituse ja loob omamoodi apokrüüfi, meistri evangeeliumi. Ülesanne, mille Bulgakov lahendab pöördumisega nii tundliku teema poole, lähtub ühelt poolt arvestusest aktualiseerida lugeja teadvuses kogu Uue Testamendiga seotud ideede ja kunstiliste lahenduste kompleksi ning teiselt poolt luua sellel foonil uue aja ristilöömise lugu, mis leiab aset kirjanikule kaasaegses Moskvas.

Kirjaniku valitud romaani peategelase nimi Ješua on iseäralik ja kujutab endast foneetilist tõlget aramea keelest. See on evangeeliumide kanoonilisest tekstist

eemaldumise esimene märk. Evangeeliumide tekstidega ümberkäimise Bulgakovi universaalne põhimõte on selles, et kirjanik säilitas püsivalt kahetise lähenemise neile: evangeeliume lükatakse ümber ja ka kinnitatakse samaaegselt. Paljudest niisuguse ambivalenttsuse näidetest võiks nimetada andmeid Ješua sünni kohta, kes teiste inimeste sõnadele toetudes kinnitab, et tema isa oli süürlane. See on nii ja päriselt ei ole ka, sest selle väite tõesust kontrollida on võimatu: “Mulle on räägitud, et mu isa oli süürlane...”.

Piiblikihistustest eemaldumine on ka see, et Ješual on ainult üks õpilane ja mitte 12 jüngrit nagu Jeesus Kristusel. Teisiti on kujutatud hukkamist, mille ajal Bulgakovi tegelane on üksi, Jeesus Kristust aga saatsid õpilased ja nutvad naised. Koguni Ješua koht ristidel on teine – ta on risti löödud mitte keskmisele ristile kahe röövli vahel, vaid servmisele, kolmandale ristile jmt.

Sageli distantseerub Bulgakov evangeeliumide reaalist rõhutatult, lülitades neid romaani ja samas lükates ümber kui ebatõeseid, nagu ta teeb näiteks ülekuulamise stseenis. Pilatus sisuliselt jutustab ümber evangeeliumide versiooni selle kohta, kuidas Jeesus Kristus ratsutas rahvahulga tervitushüüete saatel eesli seljas Jeruusalemma sisse, kuid Ješua on sellest jutust hämmelduses ja vastandab sellele oma seletuse, rääkides “kuidas see tegelikult oli”.

Bulgakov lõi Ješua Ha-Notsri kui tavalise inimese kuju. Alles romaani lõpus, kui kohtuvad Woland ja Leevi Matteus, selgub, et Ješua on kõikvõimas ja tema asupaigaks on valgus, mis on kooskõlas õigeusu kaanoniga. Ješua kuju arendades jättis Bulgakov talle alles järjest vähem iseloomujooni, mis tõestaksid selgelt tema üleloomulikku olemust. Neid asendavad vaid kaudsed tõendid, kusjuures nende olemuse teeb segaseks sarnasus sellega, mis võis realselt aset leida, see tähendab, et igal sellisel tõestusel on kahetine iseloom. Nii võib sammaste vahele lennanud pääsukest pidada täiesti igapäevaseks nähtuseks, kui ei teata, et ristiusus on see lind üks Jeesus Kristuse kehastusi.

Bulgakovi suhtumist religiooni ei saa nimetada üheselt selgeks. Noorusaja ateismist, millest räägib kirjaniku õde N. Zemskaja, kuni tema surmaeelsele keeldumisele kiriklikust matusest ei saa tõmmata kaugeltki sirget joont. Juba 1922. a tunnistas ta päevikus: “Ma lehitsesin praegu “Viimast mohikaanlast”, mille ma hiljuti olin oma raamatukokku ostnud. Kui paeluv on see vana sentimentaalne Cooper! Davidi kuju, kes kogu aeg laulab psalme, viiski minu mõtet Jumalale. Võib-olla ei ole teda tugevatele ja julgetele vaja, kuid sellistel nagu mina on temale mõeldes kergem elada. Minu tervisehädad on üha tõsisemad ja kiiresti neist jagu ei saa. Ma olen päris liimist lahti. See võib segada mu tööd, seepärast ma seda kardangi, seepärast ma loodangi Jumala peale.”

## ROMAANI ÜLESEHITUS

“MM” kompositsioon on tingitud Bulgakovi otsusest ehitada teos üles kui “tekst tekstis”, “romaan romaanis”. Meistri romaani muistses Jeršalaimis aset leidnud sündmustest raamib “Moskva-süžee” ning annab nii sellele erilise

kompositsioonilise koha “tekst tekstis”. Kui järjekindlalt jälgida redaktsioonide kaupa Bulgakovi tööd “MM-i” kallal, siis võib näha niisuguse kompositsioonilise lahendusega seotud keerukusi. Varasemates redaktsioonides, kui kirjaniku kavatsustes ei olnud veel kohta meistri kujule, oli romaani jutustajaks Pimedusevürst (kes esineb redaktsioonides erinevate nimede all – Antesser, Azazello, Veliar Veliarovitš). Kõik tema räägitu täidab saatana evangeeliumi funktsiooni, tema ise aga on Ješua suhtes alluvas positsioonis ja täidab viimase tahet.

Viimases redaktsioonis Jeršalaimi-peatükid on jagatud kolmeks looks, kusjuures esimest esitab Woland, teine on antud Ivan Bezdomnõile endelise unenäo kujul ja kolmandat loeb meistri käsikirjast Margarita. Jutustaja roll on antud juhul eriti tähtis: Wolandi esituses antud Jeršalaimi-peatükkide lahkne-mist Jeesus Kristuse hukkamise loost võib vabalt seletada saatana vembuna; sama raske on vaieldamatult uskuma jääda psühhiaatrikliiniku patsiendi juttu, kuid trükiversioonis püüdis Bulgakov muuta jutustuse võimalikult veenvaks. Just seepärast loovad kõik kolm allikat – Woland, too kõrgem jõud, mis saadab unenäo hukkamisest Ivan Bezdomnõile, ja meistri käsikiri – ühtse orgaanilise terviku, mis, nagu väidetakse tekstis, on kooskõlas reaalselt aset leidnud sündmustega.

Niinimetatud muistsete peatükkide lülitamine jutustuse põhiteksti kolmes kohas nõudis erilist kompositsioonilist võtet neis punktides, kus “mindi sisse” “kujuteldavasse” (Bulgakovi määratlus) Jeršalaimi ja sealt “välja tuldi”. “MM-is” on selleks võtteks kõrvutiasetsevate “muistsete” ja kaasaegsete peatükkide lõpu ja alguse ühtelangemine. Nii kandub tegevus üle kristliku loo algusest kirjanikule kaasaegsesse Moskvasse ja vastupidi. 1. peatüki üleminekul 2. peatükiks juhatavad Wolandi sõnad “...ratsaväelase lohiseval sammul, valge, vereva palistusega mantel õlgadel...” sisse teksti lülitatud romaani esimese osa, need kordavad Jeršalaimi-süžee alguslauset. Seesama juhtub ka 2. ja 3. peatüki vahetumisel, kui tegevus kandub tagasi Moskvasse – Jeršalaimi-süžees aega tähistav remark “Kell oli umbes kümme hommikul” antakse “MM-is” üle Wolandile: ““Jah, kell oli umbes kümme hommikul, lugupeetud Ivan Nikolajevitš,” ütles professor”.

Sama kordub 15. ja 16. peatüki piiril. Ainsaks erandiks on 16. peatüki lõpp – järgmine peatükk algab looga asjaoludest, mis leidsid aset “järgmisel päeval pärast neetud etendust” Varieteeteatris. Jutustuse käigust ja rütmist kõrvalekaldumist, nende ilmset nihet ja murrangut võib tõlgendada kui 16. peatüki semantika teksti stilistika mõjutamist: Ješua surm lõhub kujunenud tekstisüsteemi, sõna-sõnalt “aeg liigestest on lahti”. Hiljem see taastub ning peatüki lõpu ja alguse ühtelangemist võib näha 24. ja 25. peatüki vahetumisel jne

Kompositsiooni “tekst tekstis” valis Bulgakov just selleks, et rõhutada ajaloo kõige olulisema ja vääramatu sündmuse korduvust: süütu inimese hukkamõistmine, endale õiguse omistamine võtta talt elu, mis tahes kahetsuse hiljaksjäämine ja mõte vastutusekoormast iga oma teo eest. Romaani kaks süžeeini –



Moskva ja Jeršalaimi oma – reastuvad paralleelsetena, mõlemas neis on reetmise ohvriks süütu inimene, neid ei liida ainult peatükkide üleminekud, vaid jutustus on pidevalt üles ehitatud nagu kaja, detailid peegelduvad vastu kuni otsese võrdluseni välja. Kliinikus esimest korda Stravinskit nähes mõtleb Bezdomnõi: “Nagu Pontius Pilatus!”; Margarita süüdistab ennast, et ta jäi hiljaks “nagu õnnetu Leevi Matteus” ja võrdleb Jeršalaimi äikest halva ilmaga Moskvas; ühe sellise võrdluse teeb jutustaja Moskva-süžees valuutapoe stseenis: “Teravaks ihutud noaga, mis oli väga Leevi Matteuse varastatud noa moodi”. Kuid ka need paralleelid, mis ei ole otseselt välja toodud, loovad pidevalt korduvate kujundite, sündmuste ja faktide semantilise välja.

### ROMAANI LÕPETATUSE PROBLEEM

On teada, et kiirelt progresseeruva haiguse tõttu ei viinud Bulgakov romaani viimistlemist lõpule. Mitmekihilise parandamise ja viimistlematuse jälgi on näha paljudes väikestes vastuolulistes detailides. Nii on 2. peatükis kirjas sündmuste toimumise kaks aega – keskpäev ja kell kümme hommikul. Wolandi vasakut ja paremat silma kirjeldatakse romaani alguses ning ballile eelnevas stseenis vastupidiselt: alguses on parem silm must ja vasak roheline; enne balli hiilgas parema silma põhjas “kullakarva tuluke” ning vasak silm “oli tühi ja must”. Ješua kodulinna nimetatakse ülekuulamisstseenis Gamalaks, aga 26. peatükis En-Saridiks. Kõige teravamalt torkab silma meistri ja Margarita surma kujutamise kahesus: naispeategelase surma realistlik motiveering tema villas südamerabandusse ja meistri surm kliinikus on vastuolus epiloogis esitatuga, kus on öeldud, et Wolandi kaaslased röövivad nad.

See on tinginud uurijate kaks kontseptsiooni: üks lähtub sellest, et romaani viimistlematuses peitub kunstiline võte, vastavalt teisele ei suutnud Bulgakov enda jaoks otsustada (läbi mõelda) mõningaid põhimõttelisi küsimusi. Nii või teisiti, aga vasturääkivustest hoolimata tajutakse “MM-i” teksti kui tervikut, milles on avaldunud autori kavatsused.

### ROMAANI LÕPP

See, et “MM-i” erinevates redaktsioonides on meistri saatuse finaali isesugune, annab tunnistust sellest, kui tähtis oli Bulgakovile selle lahendamine ja kui tihedalt see on seotud Pilatusele andestamise stseeniga. Varasemates redaktsioonides Pilatusele andeksandmise vormeli lausub Woland. Lõplikus variandis on meistri roll sealpoolses ruumis aktiivne ja koguni juhtiv: ainult tema võib lõpetada romaani ja viia niimoodi Rooma asehalduri saatuse lõpule.

Need muudatused tunnistavad, et lootusetult haige Bulgakov, keda võlus surmajärgse eksisteerimise idee, omistas tohutu suurt tähtsust mittemaisele ellu ülemineku hetkele. Pontius Pilatusega sealpoolses maailmas kohtumise episood on selle ülemineku vääramatu tingimus. Ilma selleta kaotaks muistsete sündmuste tõelise käigu ära aimanud meistri romaan oma kristliku alge – andestamise. Väljaspool oma maise olemasolu piire saab meister võimaluse

see teoks teha. Kõrgemad jõud oleksid nagu ootele tardunud ega otsusta Pilatuse saatust, tunnistades seega Sõna maagilist jõudu ja õigusi. Võib-olla on just selles stseenis ennetatud peategelaste saatuse muutumist: hoolimata sellest, et Woland ennustab igaveseks ajaks varjupaika jäämist, näeb Bezdomnõi oma painavas unenäos, kuidas Margarita läheb “koos oma kaaslasega Kuu poole”, see tähendab “valgusesse”, Ješua *locus*’esse.

Viies lõpule paljude tegelaste saatuse, osutub epilooq peategelaste suhtes võltslõpuks. See ei ole romaani lõpp, vaid teada andmine, mis toimus Moskvast pärast meistri ja Margarita kadumist. Nii omandab epilooqi domineeriv kujund – lõpmatu ringkäik – sotsiaalse ja metafoorilise mõtte: selle abil luuakse “lugu maailmast, mis on isegi seda teadmata hukkunud” (B. Gasparov).

### TEKSTI ORGANISEERIMISE KONSTRUKTIIVSED PÕHIMÕTTED

Üks “MM-i” saladusi on seotud sellega, et romaan on valmis vastama uurijate peaaegu et mis tahes hüpoteesile. Selles on nähtud eksistentsialismi põhimõtteid, seda on sobitatud sümbolismi ja postsümbolismi esteetikasse, selle filosoofilisteks läteteks on nimetatud Kanti, Vl. Solovjovi, Kierkegaardi töid, sellest on leitud erinevate religioossete doktriinide – zoroastrismi, bogomiilide õpetuse, maniluse (manihheismi), albilaste õpetuse jms – komponente.

Bulgakovi “loojanguromaanis” ilmneb eredalt ülesehituse kaleidoskoopiline põhimõte ehk peeglite süsteem, “mis lõpmatu arv kordi üksteises peegelduvad”, kus “ükski kujund ei ole lõplik, kõik pilgutavad vastastikku silma ja loovad seega puhta näilisuse” (Ortega y Gasset). Nii see kui ka teine arhitektoonika põhimõte on seletatav maailma eshatoloogilise mudeliga, mis on kogu Bulgakovi loomingu aluseks. Ta on lagunemise, katastroofi kirjanik: tema maailm purunes, endine kultuur lagunes koost ning uues tegelikkuses valis Bulgakov endale kildude kokkukorjaja osa, millest ta püüdis kokku panna mingi terviku. Talle oli ülimalt omane tunnetada kultuuri kui sellise alge erilist tähtsust, mis toetas aegade seost, põlvkondade järjepidevust ja kõlbeliste väärtuste skaala püsivust.

“MM-i” tavatu populaarsus uurijate seas on paljuski seletatav sellega, et romaanis kasutatakse arhetüüpseid vorme, millel on arvukalt mitmeplaanilisi konnotatsioone hea ja kurja, salajase ja avaliku, profaanse ja pühendunud isiksuse probleemidega. Selles on esitatud kultuuris juurdunud müüte ning autor on nende alusel loonud omaenda müüte.

Romaani lugemisel loomulikult tekkivale küsimusele, miks on “MM-i” teksti ühendavaks kanvaaks valitud mängulisus, võiks vastata järgmiselt. Bulgakovil liitub totaalne mängulisuse põhimõte mitte vähem tähtsa põhimõttega, mis on väärt üksikasjalikumalt kirjeldamist: “ümberlukkamise” mäng loob romaani universaalse kahetisuse põhimõtte. See on läbi viidud teksti kõikidel tasanditel. Kompositsiooni tasandil (romaan romaanis ehk “tekst tekstis”); kahe maailma tasandil (reaalne ja transtsendentne maailm); kahe eri ruumis ja ajas oleva

maailma olemasolu tasandil (Moskva ja Jeršalaim); autorluse probleemi tasandil (meister kui Jeršalaimi teksti autor ja jutustaja / Moskva-süžeeleini jutustaja) jmt.

Millisel romaani tasandil me nende põhimõtete toimet ka ei vaatleks, tekitavad nad alati variatiivsuse efekti:

- ideoloogilises plaanis võib autori sellist positsiooni tõlgendada kui ühetimõtlemise eitamist teisitimõtlemise (või pluralismi) kasuks;
- religioossete veendumuste plaanis kui isiksuse õigust uskumusele, mis ei pea tingimata ühte langema kiriku dogmadega;
- filosoofilises plaanis kerkib kesksele kohale autori enda maailmapilt, Bulgakovi eriline kosmos, milles on selle osade vastastikune hierarhiline asukoht läbi mõeldud järgmiste opositsiooniliste seikade raames: maine elu – sealpoolsus, surm – surematas, kusjuures mõlemal poolusel on keerukas ja vastastikusel toimes olevate sümbolite süsteem.

Need teksti organiseerimise põhimõtted on “MM-is” realiseeritud kõikjal. Nad on samastatavad “isikuvabaduse” mõttelise kompleksiga, mis eeldab selle vabaduse teostamiseks valikuvõimalust mis tahes situatsioonis.

#### KULTUURILISED JA AJALOOLISED KOODID

Romaani uurijad ja lugejad leiavad arvukalt teosega seotud saladusi ning täheleavad selles kõige erinevamaid mõistatusi. “MM-i” esoteeriline kõla on selgesti tajutav ja see on teadlasi innustanud tegema katseid kõike varjatut, kuid romaanis käegakatsutavalt olemasolevat seletada.

“Salapäras” on kõige sagedamini püütud seletada religioosse plaani projektsioonidega, valdavaks on seejuures osutunud fokuseerimine ristiusu müüdile. Alguses läksid teadlased seda teed, et võrdlesid teost evangeeliumide süžeeaga. Ajapikku laiienes “MM-i” allikate ring, sellese lülitati Nikodeemuse, Filippuse ja Tooma evangeelium, mitmed apokrüüfilised pärimused jm. Sealjuures ei põlanud Bulgakov ära ka “signaale”, mis olid seotud teiste konfessioonide, uskumuste ning religioossete müstiliste süsteemidega ning kasutas meelsasti ära kogu võimaluste spektri, mida pakkus maailmakultuur.

Kuid ei Bulgakovi loomingus tervikuna ega ka romaanis “MM” ei ole ükski religioosne müstiline doktriin realiseeritud puhtal kujul, katse siduda romaani jäigalt mingi ühe traditsiooniga viib paratamatult välja teksti vaesestamiseni.

Õeldu käib ka “MM-i” esoteeriliste projektsioonide kohta: kõik reaalsed, situatsioonid ja kujundid kuuluvad üheaegselt mitmete assotsiatiivsete ahelate koosseisu, suhestudes samal ajal kultuuri erinevate kihistustega. Ükski teksti lülitatud esoteeriline kujund ei jää isoleerituks ning ei ole tavaliselt esitatud eraldi seisvate üksikdetailidena, vaid tervete kujundlike kihistustena. Kui ei võeta arvesse seda, mis Bulgakovit kultuuris ja ajaloo eriti huvitas, siis on võimatu luua tema loomingule tõepäraselt kontseptsiooni, mõtestada neid globaalseid metamorfoose, mida see looming teeb läbi 1930. aastatel, mil “MM-i” algne

balansseerimine “satiirilise” ja “fantastilise” romaani vahel lõppes esialgse kavatsuse olulise transformeerumise ja autori üldise strateegia muutumisega.

Antud kommentaari autorid peavad vajalikuks välja selgitada Bulgakovile kõige olulisemaid kultuurikoode, nende ühtsesse kunstilisse kanvaasse sulandumise eripära ning nende rolli mõtestamist uute tähenduste genereerimisel.

Totaalne mängimine kultuuripärandiga on üks Bulgakovi loomemeetodi kõige olulisemaid tunnuseid, mida võib illustreerida sellise spetsiifilise materjali najal nagu okultsed teadused. Kirjaniku arhiiv, variandid ja redaktsioonid kindavad nimedest, mis on seotud “salateadustega”. Nii nimede valik kui ka nende teosesse lülitamine annavad tunnistust, et kirjanik otsis teid, kuidas konstrueerida esoteeriliste projektsioonidega teksti.

#### MAAGIA

On ilmne, et romaan kujutab endast kirevat mosaiiki, mis on kokku pandud nii maagilise teadmise arvukatest kildudest (alates maagilistest esemetest, märkidest ja ebausust ning lõpetades ennustuste, loitsude, imelise paranemise aktide ja muude tseremooniatega) kui ka üles ehitatud mitme kultuurajaloolise koodi elementide ja esoteeriliste teadmiste sfääridega mängimisele. Sealjuures on “maagilise” valdkond maagia, alkeemia ja vabamüürluse kolmainsuse üks komponentidest.

Arhailise sotsiaalkultuuri mudeli – maagia – kasutamine andis kirjanikule kolossaalsed kunstilise modelleerimise võimalused. Kunstilise mõtte seisukohalt kõige olulisematel hetkedel aga surus autor maagiatega jutustuse sügavustesse, tegi selle märkamatuks, dešifreerimist nõudvaks.

Ettevalmistusmaterjalid tunnistavad suurt tähelepanu keskaja vastu, millele oli iseloomulik maagiline mõtlemine ja huvi lävimise vastu maailma varjatud jõududega. Maagia ja selle rituaalid olid lihtinimese igapäevaelu nähtused, nende teadvuses sulasid kristlik ja maagiline maailmapilt ühte. Bulgakovi tähelepanu objektiks olid demonoloogia ja sellega seotud maagilised kultused. Teda paelus ajastu, mil rändrüütlid ja hulkurid levitasid Euroopa maades esoteeriliste teadmiste elemente.

Sama tähenduslik on nõidumise kõige tähtsama dogma esinemine “MM-is” – saatanaga lepingu sõlmimise akt. Lõpuks on siin ka “pahempoolse” maagia – “musta missa” kõige tähtsama tava elemente. “Musta missa” teemat esindab nt 1920.–1930. aastatel moodsa pühadust teotava fokstrofi “Halleluuja” nimetamine.

#### ROMAANI ALKEEMIA KONNOTATSIOONID

Üldiselt võib hermetismi, looja suletuse alkeemilist ideed, rakendada peaaegu et iga kunstniku loomingu suhtes, kuid Bulgakovi puhul ei saa seda lähenemist pidada juhuslikuks. Andes autobiograafilisele peategelasele alkeemikust hingede looja jooned, lähendas Bulgakov “loomise” protsessi ennast alkeemilisele tegevusele.

Alkeemia konnotatsioonid näivad olevat juhuslikud, kuid nad moodustavad romaani tervikliku süsteemi, alates väikestest detailidest ja lõpetades kõikehõlmava loomingu kontseptsiooniga. Alkeemia võtmes võib tõlgendada ka romaani pealkirja selle rõhutatud naiseliku ja meheliku kahepoolses ühtsuses, nimetu ja mütoloogilist nime kandva tegelasega (vrd tuntud alkeemilise teose pealkirjaga – “Margarita philosophica”, 1503). Erinevad ja ühtsed, ühe ja sellesama M-tähga algavad tegelaste nimed võimaldavad seostada seda kahesoolise “tarkade kiviga”, mis kujutab endast meheliku ja naiseliku alge liitumist.

Huvi alkeemia vastu avaldub ka romaani tarvis kogutud materjalides, mis annavad tunnistust, et alkeemia ja müstika tasandid olid Bulgakovi teadvuses lahutamatu seotud. Alkeemia kultuuri olemuse moodustavatest ideedest mängib Bulgakov meistri-süžees läbi idee Jumalaga võrdsest kunstnikust.

Ja viimaseks. Alkeemikute kõige tähtsamat probleemi, kuidas parandada inimkonda, lahendasid nad kahel moel. Esimene tee oli väärismetalli valmistamine. Teine tee oli unistus inimese täiustamisest. Eeldati, et täiustumise algus on mõeldamatu ilma õpetajata, sest tõde antakse “asjassepühendatult” edasi “profaanile”, kes on läbi teinud esmase puhastumise. Kõigi tunnuste järgi on meistri sellise õpetaja omadused: ta on nii erak kui ka kõrgema astme ravitseja. 13. peatükis toimubki luuletaja “ravimine” vestluse ja sisenduse abil. Ivan Bezdomnõi, keda nimetatakse sõnaselgelt õpilaseks, alles astub teele, millel meister oli saavutanud Vaimualkeemia osaduse astme ja võime juhtida loodust (vt kalju purunemise stseeni meistri hääle mõjul). Bulgakovil on see väheste äravalitute tee.

Kahtlemata huvitasid Bulgakovit uues ühiskonnas toimunud muudatuste mitmesugused vormid, selle ühiskonna sünni ise meenutas grandioosse ulatusega katset (vrd revolutsioonijärgse pealinna “alkeemilist” kirjeldust: “Moskva on pada: selles keedetakse uut elu” – följeton “Kuldne sajand”).

Bulgakov mõistis, et Oktoober tähendas globaalset pööret, mis puudutab elu kõiki sfääre. Orienteerumine absoluutselt “uuele” elu-olule oli oma põhialustes “alkeemiline”. Eksperimenti hiigelsuur kolb osutus terve riigi suuruseks ning selles toimuvad protsessid laienesid kogu maailmale. “Alkeemiline” protsess oli tulemuslik: loodi *homo soveticus*’t, omamoodi homunkulust.

#### ROMAANI “MASSOONLIK” KIHISTUS

Uurijad on korduvalt väljendanud mõtet, et romaanil on “massoonlikke” varjundeid, mainides detaile, mis on seotud massoonidega (salapärasus, meistri mütsike, kolmnurk). On olnud ka skeptilisi repliike.

Bulgakovi suhtumine vabamüürlusesse on rekonstrueeritav tema loomingu kaudu: kirjaniku jaoks oli see kultuurikood, mida ta esitas üldistatud kujul. Massoonlus võis talle huvi pakkuda kui suund, mille eesmärgiks oli inimese täiustamine ning selle alusel ühiskonna võimalik ümberkujundamine. Bulgakovile võisid imponeerida massoonide ideoloogia kõige tähtsamad ideed: elu

kõrgeima mõtte leidmine, kohuse primaarsus, armastus ja haritus, maailma riikutust ja inimese kõlbelise langemise määra tajunud ühingu liikmete moraalne toetamine.

“MM” nimetu kunstniku tinglik nimi – meister – on adekvaatne massoonide hierarhia erilise väärikusastmega – meistriga. Seda tekstis esiletoodud peategelase “massoonlikku” nime võib vaadelda kui signaali, et teosel on “massoonlik” kood. Teksti järjest suurem küllastamine “massoonlike” viidetega, nende kõrge kontsentratsioon üksikutes peatükkides seoses teiste leitmotiividega, loovad mulje, et see kultuurikood on teksti sisse viidud meelega, et luua teoses täiendavaid semantilisi välju. Massoonide traditsioonide vaimus võib vaadelda:

- “salapärasuse” õhkkonda, mis läbib kogu teost (vrd massoonide ühingute seisukohta, et on olemas erakordne saladus, mida teab äravalitute piiratud ring);
- meistri hierarhiline tee kui “vaimse redeli” kujund, Tõe otsingud; initsiatsioonid, mis osutavad peategelaste evolutsioonile (vrd sureva ja taas sündiva jumaluse mütologeemi);
- mitmed “massoonluse” kihti avardavad detailid.

On tähelepanuväärne, et peategelase “tõusu” algus mööda vaimset redelit on seotud tema pöördumisega Jeesus Kristuse ja Pilatuse teema poole, mis on üks inimkonna ajaloo keskseid episoodide.

Massoonide ettekujutustega langeb ühte ka möödaniku mõistmise viis ise: “Oh, kui täpselt ma seda aimasin!”, sest vastavalt massoonide doktriinile ei anna mõistus täielikku teadmist tõest. Võimalik on vaid ilmutus, inspireeritud aimamine, mis saab osaks vaid äravalitutele.

Romaani poeetika mõtestamine viib meid lähemale selle mõistmisele, kuidas tekkis ja arenes alternatiivne kirjandus totalitaarse diktaadi tingimustes, aitab piiritleda selle iseärasusi ja ellujäämise viise režiimi tingimustes, mis tappis loomingulist initsiatiivi. 1920.–1930. aastate poliitiline ja vaimne kliima sundis erinevaid sõnalisi vorme, žanreid ja nende elemente valides looma omaenda sümboleid-märke, et loominguvabadusest loobumata rääkida olulisest, eksistentsiaalsest: Surmast ja Surematusest, Tõest ja Valest, Heast ja Kurjast, Jumalast ja Saatanast, Kunstnikust ja Vabadusest.

## RIIGI TEADUSPREEMIADE KOMISJONI KOOSSEIS

Kinnitatud Vabariigi Valitsuse korraldusega 4.09.2008 nr 385

### ESIMEES

Richard Villems akadeemik, Eesti Teaduste Akadeemia president

### LIIKMED

Magnus Ilmjärv Tallinna Ülikooli Ajaloo Instituudi direktor  
Ülle Jaakma Eesti Maaülikooli professor  
Rein Küttner akadeemik, Tallinna Tehnikaülikooli professor  
Toomas Luman Eesti Kaubandus-Tööstuskoja juhatuse esimees  
Raul Malmstein Finantsinspektsiooni juhatuse esimees  
Enn Mellikov akadeemik, Tallinna Tehnikaülikooli professor  
Andres Metspalu Tartu Ülikooli professor  
Mart Mägi Chalmersi Tehnikaülikooli (Rootsi)  
emeritprofessor  
Eve Oja Tartu Ülikooli professor  
Tiiu Paas Tartu Ülikooli professor  
Tiit Paaver Eesti Maaülikooli professor  
Jaan Ross akadeemik, Eesti Muusika- ja Teatriakadeemia  
professor  
Peeter Saari akadeemik, Tartu Ülikooli professor  
Mart Saarma akadeemik, Helsingi Ülikooli Biotehnoloogia  
Instituudi direktor  
Nigulas Samel Tallinna Tehnikaülikooli professor  
Margit Sutrop Tartu Ülikooli professor  
Raimund-Johannes Ubar akadeemik, Tallinna Tehnikaülikooli professor  
Raivo Uibo akadeemik, Tartu Ülikooli professor

### Märkus

Valitsuse poolt kinnitatud liikmetest ei osalenud komisjoni töös Eve Oja (oli preemiakandidaat) ja osaliselt (elutöö preemia arutamisel ja otsustamisel) Margit Sutrop.