

# EESTI VABARIIGI TEADUSPREEMIAD

2003

TALLINN, 2003

Raamat sai ilmuda tänu

EESTI VABARIIGI HARIDUS- JA  
TEADUSMINISTEERIUMI  
toetusele

Jüri ENGELBRECHT (vastutav toimetaja)  
Riigi teaduspreemiate komisjoni esimees

Helle-Liis HELP, Galina VARLAMOVA

Kaante kujundamisel kasutati 2003. a teaduspreemiate laureaaside  
diplomi fotosid (Tõnu KRÜNVALD)

---

ISSN 1406-2321

© EESTI TEADUSTE AKADEEMIA

## SISUKORD

Saateks .....	5
<b><i>Sülm Kallas</i></b> Eesti Vabariigi peaministri tervitus teadus-, kultuuri- ja spordi- preemiate kätteandmisel 24.02.2003 .....	6
<b><i>Mailis Rand</i></b> Eesti Vabariigi haridus- ja teadusministri tervitus teadus-, kultuuri- ja spordipreemiate kätteandmisel 24.02.2003 .....	7
<b><i>Jüri Engelbrecht</i></b> Riigi teaduspreemiate komisjoni esimehe sõnavõtt teadus-, kultuuri- ja spordipreemiate kätteandmisel 24.02.2003 .....	8
<b><i>Jaan Einasto</i></b> teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest .....	12
<b><i>Ain-Elmar Kaasik</i></b> teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest .....	24
<b><i>Vladimír Hižnjakov</i></b> teaduspreemia täppisteaduste alal tööde tsükli “Mitmekvandiliste protsesside mittehäirituslik teooria” eest .....	34
<b><i>Tõnis Pehk</i></b> teaduspreemia keemia ja molekulaarbioloogia alal tööde tsükli eest kiraalsete molekulide tuumamagnetresonantsspektroskoopia alal .....	42
<b><i>Meelis Mihkla, Arvo Eek, Einar Meister, Heiki-Jaan Kaaley</i></b> teaduspreemia tehnikateaduste alal töö “Eesti keele tekst-kõne süntees” eest .....	52

<i>Andres Metspalu</i>	
teaduspreemia arstiteaduse alal genoomiuuringute eest . . . . .	60
<i>Juta Haberman, Aavo Miidel, Tiina Nõges, Ervin Pihu, Anto Raukas</i>	
teaduspreemia geo- ja bioteaduste alal Peipsi järve uuringuid käsitlevate monograafiate “Lake Peipsi. Geology”, “Peipsi”, “Lake Peipsi. Flora and Fauna” ja “Lake Peipsi. Meteorology, Hydrology, Hydrochemistry” eest . . . . .	64
<i>Riho Gross, Tiit Paaver</i>	
teaduspreemia põllumajandusteaduste alal tööde tsükli “Ohustatud ja kasvatatavate kalaliikide geneetiliste ressursside uuringud” eest. . . . .	76
<i>Urmas Varblane</i>	
teaduspreemia sotsiaalteaduste alal uuringute tsükli “Otseste välisinvesteeringute mõju siirderiikide majanduse konkurentsivõime tõstmisel” eest . . . . .	84
<i>Mari Must</i>	
teaduspreemia humanitaarteaduste alal monograafiate “Vene laensõnad eesti murretes” ja “Põhjaeesti keskmurre: häälikulisi ja morfoloogilisi peajooni” eest . . . . .	94

## SAATEKS

Vaadates riigi teaduspreemiate raamatuid, mille hulka käesoleva kogumiku näol lisandub juba seitsmes, võib tõsist rõõmu tunda. Pole see seeria küll ainus võimalus “end kirja panna” teaduse ajalooraaamatusse, kuid Eesti seisukohalt on see ülimalt oluline.

Iga raamat käesolevas seerias on isenäoline ja ometi on need raamatud mitmes mõttes sarnased. Nad räägivad teaduse järjepidevusest, tuumakatest tulemustest ja loova mõtte arengust. Nad räägivad teadusmõtte väärtustamisest ametliku tunnustuse- na riigivõimu poolt.

Juhatades sisse käesolevat raamatut, jään põnevu- sega ootama järgmisi.

*Jüri Engelbrecht*

*Síim Kallas*

Eesti Vabariigi peaminister

*Tervitus teadus-, kultuuri- ja spordipreemiade kätteandmisel 24.02.03*

Austatud Eesti Vabariigi teadus-, kultuuri- ja spordipreemiade laureaadid!  
Lugupeetud külalised.

Üks Eesti vabariigi aasta on jälle täis saanud. Vormiliselt kaheksakümne viies. See oli hea aasta. Oli hea rahvusvaheliste saavutuste poolest, oli hea majandusaasta. Oli saavutusterohke aasta ka Eesti kultuurile, teadusele ja spordile. Spordis on lausa nii, et just vabariigi aastapäeva vahetus läheduses on tulnud suurvõistluste medaleid, aga neid on jagunud ka kogu möödunud aasta peale.

Täna avaldab Eesti Vabariik oma suurimat lugupidamist teile, teadus- ja kultuuri- ning spordipreemiade saajad. See on valitsuse austusavaldus loojatele ja võitlejatele. Loominguliste võitudeni (ka sportlikud võidud on ju tänapäeval eelkõige loomingu võidud) jõudmine pole kunagi kerge. See eeldab nii tugevat vaimu kui tugevat tahet. See eeldab jõudu üle saada sellisel teel ikka ette tulevatest madalseisudest ja lüüasaamismeeleoludest, jagu saada kadedatest intriigidest. Loomulikult eeldab see pidevat loovust, uusi, kordumatuid ideid ja teadmisi ning oskusi neid ideid ellu rakendada.

Loovad isiksused, kes kirjutavad oma leheküljed teaduse, kultuuri ja spordi ajalukku, kes teevad väikese Eesti tuntuks laias maailmas, on meie rahvuslik rikkus. Mida teha selle rikkuse hoidmiseks ja rohkendamiseks?

Üks teema on muidugi raha. Kuigi võin täna rahuldustundega öelda, et 2003. aasta eelarves on näiteks teadusele eraldatud rohkem raha kui varem, jääb riigil ikka raha puudu. John Steinbeck on öelnud, et raha kas pole üldse või on teda väga vähe. Kolmandat võimalust polegi. Aga ühe olulise tähelepanekuna võin lisada, et ka vähese raha jaotamine pole lihtsam kui rahapuudusega võitlemine. Tavaliselt sekkub energiliselt keeruliste valikute tegemisse keskpärasus, kes oskab oma huvisid kaitsta enamasti palju tõhusamalt kui andekas loovus.

Meie probleemiks on ka kriitilise massi vähesus. Selleks, et edendada sporti, on vaja häid rahvusvahelisi võistlusi kodus ja head esinemist võõrsil. Ka kultuuris on rahvusvaheline koostöö ainsaks vahendiks kriitilise massi vähesusest üle saamiseks. Meie eesmärgiks on tippkultuurile ja spordile piisava infrastruktuuri loomine – näiteks kontserdimajad ja head võistluspaigad. Aga me ei suuda kunagi anda kõikidele eesti tippdirigentidele oma kõrgtasemel sümfooniaorkestreid. Sama loogika on ilmne ka teaduse puhul. Ühe kõige tähtsama eelistusena peab valitsus panustama teaduse ja tehnoloogia materiaalse baasi arendamisele. Siis on inimestel koht ja tingimused heaks töötegemiseks.

Austatud laureaadid! Te teate sama hästi kui mina, et loomine ei tohi katkeda hetkekski. Avaldan teile valitsuse nimel suurimat austust ja lugupidamist. Soovin, et teil jätkuks tahet ja ideid edasi minna. Soovin, et teil jätkuks piisavalt tugevat närvikava, et vastu seista sõjakale keskpärasusele ja eluraskustele. Palju õnne!

*Mailis Rand*

Eesti Vabariigi haridus- ja teadusminister

*Tervitus teadus-, kultuuri- ja spordipreemiade kätteandmisel 24.02.03*

Austatud laureaadiid, Peaminister, külalised!

Mul on suur heameel tervitada siin saalis käesoleva aasta teaduspreamiade laureaate.

See toimub ajal, kus teadus on jälle tõusmas maailma arengu tähtsaimaks komponendiks ja alustalaks. Me näeme seda juba praegu meid ümbritsevas igapäevases elus. Muudatused, mis on toimunud viimase kümne aasta jooksul, on hämmastavad. Kuid see on alles algus, on väga tõenäoline, et lähema veerandsaja aasta jooksul muutub meie elu rohkem kui möödunud aastatuhandel kokku ning meie ja meie lapsed elavad hoopis teistsuguses maailmas kui see, millega inimkond kunagi varem on kokku puutunud.

See seab ka Eesti teaduse ette uued ülesanded.

Vaadates tagasi teie tegevusele, võime tunda ennast kindlalt. Jah, eesti teadus suudab arengutega sammu pidada.

Me tunneme uhkust teie saavutuste üle ja anname endale aru teie saavutuste tähtsusest. Teadus on oma olemuselt globaalne, ja teie saavutused, mis on jäädvustatud maailma tipp-teaduse annaalidesse ja leidnud tee ka juhtivatesse ajakirjandusväljaannetesse, on olnud väärikaks Eesti riigi ja teaduse tutvustajaks maailmale.

Kuid teie tegevusel on suur tähtsus ka teaduse ja kultuuri arengu, ja eriti teaduse järelkasvu seisukohast Eestis. Noortel teadushuvilistel ja teadlaseks pürgivatel üliõpilastel on, kellest eeskujuga võtta, kelle järgi joonduda. Paljudel teist on ka oma koolkonna näol järelkasv, kes teie ideid edasi kannavad ja arendavad.

Muljetavaldav on olnud teie teadust populariseeriv tegevus. Tänapäeval, teaduse tähtsuse kasvades peab kogu ühiskond mõistma paremini teaduse rolli maailma arengutes. Teaduse esiletõstmine peab olema aktsepteeritav kogu ühiskonnale. Teaduse tormiline areng on tekitanud inimkonnas hirme ja kartusi uute võimaluste ja suundumuste ees. Need vajavad lahtiseletamist. Selles omandab teaduse saavutuste tutvustamine ka tädi Maalile erilise tähenduse.

Austatud laureaadiid!

Täna on teie elus tähtis päev. On põhjust tagasi vaadata ja edasi minna. Loodan, et see uudishimu, mis teid ükskord sundis teadlaseteed alustama, ei ole teis raugenud. Ning see uudishimu koos omandatud kogemustega viib teid uute loominguliste saavutusteni.

Soovin teile kõigile tervist, õnne ja edu edaspidises elus ja teadustöös!

## Jüri Engelbrecht

Eesti Riigi teaduspreemiate komisjoni esimees

### *Tervitus teadus-, kultuuri- ja spordipreemiate kätteandmisel 24.02.03*

Tänapäeva keerulises maailmas ei saa läbi ilma teadmisteta. Inimene, loodus, tehnoloogia – kõik need põimuvad ühte ning samas nõuab iga valdkond oma teadmiste hulka. “Teadmistepõhine Eesti” – nii on pealkirjastatud meie lähiaegade strateegia teadus- ja arendustegevuses. Selle dokumendi kaante vahel on ka napolisõnaline visioon Eestist, millest ehk tänasel päeval oluline mõte kõlab nõnda:

“Eesti on säilitanud oma näo, toetades teadust ja edendades rahvuslikke ja vaimseid väärtusi”.

Ja eks ole see ka üks põhjus, miks me täna siin saalis oleme – vaimsete väärtuste tunnustajatena teaduse, kultuuri ja spordipreemiate kätteandmisel. Me tunnustame inimesi, kes oma pühendumisega on teinud midagi erilist, mis jääb särama. Maailma tunnetamine, olgu selleks lõputud uute teadmiste otsingud, tunded maailma ja Eesti hinge uurides või inimkeha füüsiliste võimete piiride kompimine, on alati põnev. Mis on olulisem, kas anded, töötahe, tingimused, risk, seda me ei tea, nagu me ei tea vastuseid veel paljudele küsimustele. Nii on Hando Runnel küsinud “kas teab teadus, mis on headus” ja kindlasti vastame me sellele küsimusele igauks isemoodi.

Me räägime tihti ka ühiskonna vajadustest, mis sunnivad meid oma teadmisi täiendama. Kui selleks on vaja teadusuuringuid, siis on määravaks teadustase, sest mitte kõiki teadmisi koguvaid tegevusi ei saa nimetada teaduseks.

Otsiv vaim on teaduses vist see kõige olulisem mootor või ürgläte. Täna me pärjame Eesti teaduspreemiatega teadlasi, kelle saavutused on kaugelt kõlamas. Meie pragmaatilises maailmas pole sugugi vähem tähtis ka nende tulemuste kasutamine, olgu siis tunnetuslikult või otseselt.

Lubage mul alustada riigi teaduspreemiatega pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest – ehk nagu me neid tavapäraselt nimetame – elutöö eest.

Tähistaevas on köitnud inimeste meeli iidsetest aegadest. Alles viimasel aastasajal oleme aga õppinud universumist aru saama ja ikka rohkem paistab seal saladusi olema. Tartus ja Tõraveres on tähtede uurimine olnud au sees hulk aega. Nimed nagu Struve ja Ernst Öpik räägivad ise enda eest. Täna astub kohe meie ette mees, tänu kellele teab inimkond, mis on tumeaine, galaktikaketid, tühikud universumis ja universumi kärgstruktuur ehk regulaarvõrgustik. See kõik on sügav jälg maailma tunnetuses, mida me Tõraverre teadlaste sule läbi teada oleme saanud ja õpikute osaks muutunud. Elutöö preemia saab Jaan EINASTO.

Universumi juurest tuleme inimkeha juurde, mis pole mitte vähem keeruline. On ju inimteadvus see, mis homo sapiensi looduses eriliseks teeb. Peaaju uuringud on seetõttu erilise tähendusega ning selleski valdkonnas on meil pika-



ajalised traditsioonid, nimetagem vaid Ludvig Puuseppa. Täna sel päeval pärjame aga arsti-neuroloogi ja neurokirurgi, teadlast, õpetajat, kes on loonud Tartu Ülikoolis rahvusvaheliselt tunnustatud neuroloogide koolkonna, kes ise on tegelenud ajukahjustuste, närvihaigustega, teinud ise mitu tuhat operatsiooni ja kirjutanud sadu artikleid. Eesti arstiteadus võib olla uhke oma sellise särava tähe üle. Elutöö preemia saab Ain-Elmar KAASIK.

#### TÄPPISTEADUSED

Aine peenstruktuur peidab veel palju saladusi, kuid ikka rohkem leiavad peenstruktuuri omadused ka kasutamist. Eks ole ju peenstruktuur seotud kristallvõre struktuuriga ja selle omaduste teadmine võimaldab arvutada kiirgust, määrata keemiliste reaktsioonide mehhanisme, mis on oluline tuumafüüsikast ensümoloožiani. Oma viimase nelja aasta säravate tulemuste eest saab riigi teaduspreemia tööde tsükli “Mitmekvandiliste protsesside mittehäirituslik teooria” eest Vladimir HIŽNJAKOV.

#### KEEMIA JA MOLEKULAARBIOLOOGIA

Ka siin on tegemist aine peenstruktuuri iseloomustavate teadusuuringutega, mis käsitlevad kiraalseid molekule tuumamagnetresonantspektroskoopia abil. Nimetus “kiraalne” tähendab tegelikult “käeline” ehk kiraalsed molekulid on ühendid, mis erinevad oma konfiguratsioonilt nagu parema ja vasaku käe kindad. Nii peaks mõjuva ravimi molekul sobima vastava retseptoriga, muidu pole õigest koostisest sõltumata ravimil lihtsalt toimet. Nimetatud tööde tsükkel käsitleb kõrge täpsusega analüüsimeetodite loomist taoliste kiraalsete molekulide uurimiseks, mis on kindlasti väga suurt majanduslikku efekti kätkev protseduur. Riigi teaduspreemia keemia ja molekulaarbioloogia alal saab Tõnis PEHK.

#### TEHNIKATEADUSED

Tänavune riigi teaduspreemia tehnikateaduste vallas on hea näide, kuidas erinevad teadusvaldkonnad seotud on. Täna on tegemist tehnika ja humanitaaria sünergilise seosega – keeletehnoloogiaga. Nimelt on välja töötatud rakendusteks sobiv eestikeelse kõnesünteesi tarkvara, mille aluseks on eestikeelse kõne foneetilise- fonoloogilised uuringud. Selle uuringu tulemused avavad tee uute kommunikatsiooniteenuste kasutuselevõtuks ning on asendamatuks abivahendiks puuetega inimestele suhtlemisel arvutiga. Töö “Eesti keele tekst-kõne süntees” eest saavad tehnikateaduste alal riigi teaduspreemia Meelis MIHKLA, Arvo EEK, Einar MEISTER ja Heiki-Jaan KAALEP.

#### ARSTITEADUSED

Rääkides inimgenoomist, pole täna sel päeval enam tegemist teoreetiliste uuringutega. Teaduspreemiaga pärjatud uurimus põhineb autori originaalsel ideel, mis võimaldab inimese kromosoomi üksikute “blokkide” järjestuse varieeruvust analüüsida. See annab võimalused keerulise geneetilise taustaga komplekssete haiguste diagnoosiks ja raviks. Genoomiuuringute rakenduste eest arstiteaduses saab riigi teaduspreemia Andres METSPALU.

#### GEO- JA BIOTEADUSED

Mis see muu on kui Eesti loodus. Me peame tundma Eestimaad, tema metsi, niite, soid, järvi ja rannikut. Me oskame väärtustada loodust, kuid me peame loodusest ka palju teadma. Üks meie looduse pärle on Peipsi järv – puhas vesi, liigirikas floora ja fauna, hea kalajärv, puhkeala ning, mis seal salata, – piir, mis meid ajalooliselt kaitsnud on. Meie teadlased on üllitanud neli monograa-

fiat, mis lubavad arvata, et Peipsi on Euroopa üheks kõige paremini uuritud suurjärveks – kolm ingliskeelset ja üks eestikeelne monograafia on selle tunnistuseks. Riigi teaduspreemia geo- ja bioteadustes saavad Juta HABERMAN, Avo MIIDEL, Tiina NÖGES, Ervin PIHU ja Anto RAUKAS.

#### PÕLLUMAJANDUSTEADUSED

Põllumajandus haarab palju valdkondi, nii põllukultuure, aiakultuure, loomakasvatust ja ka kalakasvatust. Eks sellega ole haaratud nii kaluri põld – meri kui ka siseveekogud. Karpkalad, lõhed ja paljud teised kalaliigid on väärtuslikuks lisandiks meie toidulauale. Preemiaga pärjatud teadlased on palju teinud, põhjendamaks kalaliikide geneetilise ressursi kasutamist. Mul on hea meel kuulutada riigi teaduspreemia vääriliseks tööde tsükli “Ohustatud ja kasvatavate kalaliikide geneetiliste ressursside uuringud” autorid Riho GROSS ja Tiit PAAVER.

#### SOTSIAALTEADUSED

Üheks väga oluliseks sotsiaalteaduste suunaks on majandusteadused. On ju äärmiselt oluline objektiivselt põhjendada muutusi meie majanduses ja leida muutuste seaduspärasused. Eesti on siirderiik, me oleme äärmiselt huvitatud majanduse konkurentsivõime tõstmisest. On meeldiv, et meil on selles teadusuunas lühikese aja jooksul kujunenud võimekad teadlased, kelle panust majandusteadusesse on hinnanud ka väliseksperdid. Täna esiletõstetav töö käsitleb välisinvesteeringute mõju konkurentsivõimele. Riigi teaduspreemia sotsiaalteaduste vallas saab Urmas VARBLANE.

#### HUMANITAARTEADUSED

Me rääkisime keelest juba tehnikateaduste preemia andmisel. Eesti keel on aga meie ühisvara, mille kõiki külgi, kõiki murdeid, nende kujunemist peame tundma. Keelest algas meie rahvuslik ärkamine, Jakob Hurt rõhutas keele tähtsust ja vaimu tähtsust. Meil on täna hea meel austada teenekat teadlast, kelle viimased mahukad uurimused toovad selgust põhja-eesti keskmurdest ja meie naabrite keele – vene keele laenusõnadest eesti murretes. Lisaks nendele on märkimist väärt ka terve murdetekstide sari, mis laureaadi osavõtul valminud on. Humanitaarteaduste vallas saab riigi teaduspreemia Mari MUST.

Lubage mul Riigi teaduspreemiate komisjoni poolt õnnitleda kõiki värsked teaduspreemia laureaate!

Ühtlasi tahan tänada komisjoni ja kõiki neid, kes komisjoni otsuste tegemisel abistasid – on ju teaduses iseloomulik, et ekspertide hinnangud olulised on!

*Teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest*



*Jaan  
Einasto*

Sündinud 23. veebruaril 1929 Tartus

1947	Tartu I Keskkool
1952	Tartu Ülikool, astronoom
1955	füüsika-matemaatikakandidaat
1972	füüsika-matemaatikadoktor
1981	Eesti Teaduste Akadeemia liige
1991	Euroopa Akadeemia liige
1992	professor
1994	Briti Kuningliku Astronoomia Seltsi liige
1998	Riigivapi II klassi teenetemärk
1998	Eesti Vabariigi teaduspreemia

Alates 1952. aastast Tartu Observatoorium: teadur, vanemteadur, astrofüüsika sektori juhataja; 1977. aastast galaktikate füüsika, seejärel kosmoloogia osakonna juhataja, 1998. aastast vanemteadur.

Avaldanud 250 teaduspublikatsiooni.

Sündisin Tartus kooliõpetaja perekonnas 23.02.1929. Mu isa oli geograafia õpetaja ja armastas aiatööd, samuti armastas ta koos perega ja kooliklassidega matkata. Nii kasvas ka minus loodusarmastus, mis süvenes vanemate suurest raamatukogust leitud kirjanduse lugemisel. Astronoomia hakkas mind köitma 1943. aastal isa kingitud Roopi Hallimäe raamatu "Astronoomilisi vaatlusi" lugemisel. Samal kevadel külastasin esmakordselt Tähetorni, kus kohtusin Roopi Hallimäega. Mu huvist astronoomia vastu sai teada füüsikaõpetaja Osvald Sullal. Ta oli professor Taavet Rootsmäe ammune kolleeg ja korraldas mu kohtumise Rootsmäega 1943. a. sügisel. Tähetornis algasid just loengud üldisest astronoomiast ja nii kutsus Rootsmäe mindki loengutele. Kuulajateks olid kaks tudengit ja mina – noor koolipoiss. Mõne aja pärast tudengid kadusid, küllap kutsuti Saksa armeesse, ning professor jätkas loenguid vaid minule. Tema esitus oli väga selge ja ilmekas, nii et sain kõigest aru. Kodus pidin küll end täiendama sfäärilises trigonomeetrias, mida oli vaja taevakoordinaatide mõistmiseks.

Nii kestis mu esimene ülikool 1944. aasta veebruarini. Siis pandi Tartu koolid kinni, et teha ruumi läheneva rinde vajadustele – koolid muudeti hospitalideks. Õpilased saadeti maale, mina läksin isapoolse vanaema tallu Otepää lähedal, kus olin karjapoisina olnud ka eelmised suved. Maal viibisin kogu sõjasuve koos noorema venna ja täditütardega, olime mitu nädalat sõjapaos, kui rinne just meie kohale peatuma jäi. Õnneks keegi perelistest viga ei saanud, kaotasime aga 2 hobust ja kogu lambakarja. Sügisel oli tegu vaid ühe hobusega vili kokku saada. Niitsime kogu saagi käsitsi, ja üheks koormavedajaks oli nudipäine lehm – sinna paigutatud koorem oli muidugi üsna väike. Igatahes sai kogu vili kokku ja ka peksumasinast läbi lastud talgutega, nagu vanasti. Vanaema Minna Eisenschmidt oli väga hea perenaine ja oskas oma lastes ja lapselastes töö- ja loodusarmastust kujundada, nii olen talle palju võlgu oma edaspidise saatuse kujundamisel.

Lõpetasin Tartu I keskkooli (mis kujunes endise poeglase ja Treffneri gümnaasiumide liitmisel) 1947. a. Jaanipäeval – isa ja ema pulmade 20ndal aastapäeval. Ülikoolis eraldi astronoomia haru polnud; õppisin Moskva Ülikooli astronoomia õppeplaani alusel koostatud individuaalse õppekava järgi koos matemaatika haru tudengitega. Üliõpilasi oli sel ajal üsna vähe ja osa loenguid oli koos vanemate kursustega. Nii tutvusin üks kursus minust eespool õppiva Liia Tiiduga, kellega avastasime palju ühiseid huve – kontsertide külastamine, suusatamine talvisel õppevaheajal ja matkad suvel. 10. märtsil 1951. aastal olid meie pulmad üsna tagasihoidlikult perekonna ringis.

Meie kursuse matemaatikud hoidsid väga kokku, kõigist kujunesid silmapaistvad õppejõud ja teadusmehed – Olaf Prinitš (kursusevanem ja koolimatemaatika õpetamise meetoodika arendaja Tartu Ülikoolis), Ivar Petersen (Tallinna Tehnikaülikooli õppejõud ja Küberneetika Instituudi kauaaegne asedirektor), Leo Võhandu (rakendusmatemaatika pioneer Eestis, Tartu Ülikooli ja Tallinna Tehnikaülikooli professor), Ülo Lumiste (Tartu Ülikooli geomeetria professor), Aleksei Tümanok (teoreetilise mehaanika õppejõud Tallinna Tehnikaülikoolis ja paljude leiutiste autor). Leksi (nagu me Alekseid kutsusime) eestvõttel võtsime järgnevatel aastatel koos abikaasade ja teiste matkahuvilistega ette pikki jalgrattamatku Eestis ja kaugemalgi (Karpaatias, Peipsi taga, Karjalas ja mujal). Nii Liia kui ka minu kursuse kokkutulekud on olnud koos peredega üsna regulaarsed.

Ülikoolis olid mu astronoomia õpetajateks professor Rootsmäe kõrval Grigori Kuzmin (sel ajal alles teadur, hiljem professor) ja professor Aksel Kipper, edaspidises teaduslikus töös oli mu eeskujuks eriti professor Ernst Öpik. Kohusin temaga esmakordselt Tähetornis 1943. aasta sügisel professor Rootsmäe kabinetis. Sõjakeerises lahkus Öpik Eestist, töötas mõnda aega Hamburgi Observatooriumis Bergedorfis ja hiljem elu lõpuni Armagh Observatooriumis Põhja-Iirimaal. Mul oli õnn kohtuda Öpikuga veel kahel korral – 1970. aastal Rahvusvahelise Astronoomia Liidu kongressil Inglismaal ja kümme aastal hiljem tema koduobservatooriumis Iirimaal. Temalt õppisin probleemide mitmekülgselt käsitlemist; eriti uute alles segaste probleemide lahendamisel on kasulik vaadelda nähtust erinevast küljest, arvestades võimaluse korral erinevaid ja sageli teisest valdkonnast pärit infot. See meetod viis Öpiku juba kahekümnendate aastate alguses Andromeeda udukogu kauguse määramisele ning seejärel tähtede energia allikate ja evolutsioonitee selgitamisele. Ülikooliaastatel täiendasin end Moskva Ülikooli juures asuvas Sternbergi nimelises Astronoomia Instituudis, kus töötasin professor Pavel Parenago käe all, samuti menetluspraktikal Abastumani Observatooriumis Gruusias professor Jevgeni Haradze juhendamisel.

Mu esimeseks teaduslikuks tööks oli 1945. aasta päikesevarjutuse vaatluste töötlemine. Olin seda varjutust ka ise vaadelnud omatehtud teleskoobiga koduõuel. Töötlemas asusin aga professor Kipperi juhtimisel Tähetornis tehtud fotomeetrilisi vaatlusi. Vaatluste juures kasutati sel ajal üsna moodsat fotoelektrilist meetodit. Töö käigus tuli suure täpsusega arvutada varjutuse ajaline käik, et leida varjutuse faas, vaatluste eesmärgiks oli nimelt heleduse jaotuse leidmine Päikese kettal. Arvutused tegin Tähetornis oleva mehaanilise arvutiga, mis võimaldas ka korrutamist (eri järku numbrite liitmise teel). Kui olin mitu kuud kestnud arvutustega valmis saanud, siis selgus, et faas ei klappinud. Analüüs näitas, et olin eksinud Tartu geograafiliste koordinaatidega, nimelt tuli valemis lugeda geograafiline pikkus ida suunas negatiivseks, olin jätnud selle arvestamata ja leidsin seega faasi punkti jaoks keset Atlandi Ookeani. Aega oli napiks jäänud ja uuesti kogu arvutust korrata enam ei jõudnud. Viimases hädas leidsin nipi, kuidas arvutuste keskosast jätkates sai tulemused leida õige geograafilise pikkuse jaoks. Teine probleem seoses töötlemisega oli vaatluste tegemise graafikus. Protokollist selgus, et varjutuse käigus jätsid vaatlejad osa lugemeid üles kirjutamata, sest need kulgesid ajas nii ilusti ja sujuvalt. Vaatlejad ei mõelnud sellele, et niimoodi lõigati ära võimalus vaatlusrea käigus tekkinud juhuslikke vigu tasandamisega vähendada. Lõpptulemuseks jõudsin järeldusele, et Tartus suhteliselt robustselt läbi viidud vaatlused ei võimaldanud täpsustada heleduse käiku Päikese kettal. See negatiivne tulemus mõjutas ilmselt mu edaspidist teaduslikku tegevust, olin muutunud üsna kriitiliseks meil tehtavate vaatluste teadusliku kaalu hindamisel. Päikesevarjutuse teemal pidasin oma esimese teadusliku ettekande Moskva planetaariumis astronoomiasõprade ühingu koosolekul 1949. aastal.

Rootsmäe, Kuzmini ja Parenago õhutusel asusin järgnevalt uurima tähepopulatsioonide kinemaatikat, tähtede evolutsiooniteekonna selgitamise eesmärgil. Sel ajal oli veel valdavaks hüpotees, mille järgi tähed alustavad oma arengut punaste hiidudena, muutuvad seejärel valgeteks hiidudeks ja liiguvad heleduse-temperatuuri diagrammil (mis kannab Herzprung-Russeli diagrammi nime) põhijadale, edaspidi jahtuvad tähed pikkamisi ja liiguvad piki põhijada alla

punaste kääbuste suunas. Õpik näitas juba 1938. aastal, et see teooria on ekslik, ning et tähed alustavad oma arengut pärast väga lühiajalist gravitatsioonilist kokkutõmbumist kohe põhijadal, kus nende kiirguse allikaks on vesiniku põlemine heeliumiks. See allikas kindlustab tähe peaaegu muutumatu heleduse miljarditeks aastateks. Kui vesinikutagavarad tähe tuuma ligidal on ammendatud, siis tõmbub tuum kokku ja täht muutub punaseks hiiuks. Sel perioodil on energia allikaks heeliumi põlemine raskemateks elementideks. Kui tuumaenergia tagavarad tähes on lõppenud, hakkab täht jahtuma ja tõmbub kokku, muutudes valgeks kääbuseks. Professor Rootsmäe alustas juba kolmekümnendatel aastatel tähtede kinemaatika uurimist, et sel täiesti sõltumatu teel kontrollida tähtede evolutsiooniteooriate paikapidavust. Tähepopulatsioonid säilitavad nimelt kauaks ajaks oma liikumise oleku, mistõttu populatsioonide kinemaatika alusel saab teha järeldusi tähtede evolutsiooni kohta. Uurisin oma töös põhijada alumise osa kinemaatikat. Töö tulemused näitasid, et selles piirkonnas on tähtede vanustel suur hajuvus, koos esinevad nii noored kui vanad tähed. Seda tulemust oli võimalik paremini seletada Õpiku teooria alusel. 1950ndatel aastatel jõudsid ka teised teoreetikud samade tulemusteni, nagu Õpik, ning uus tähtede evolutsiooni teooria leidis peagi üldise tunnustuse.

Ülikooli lõpetasin 1952. aastal ja asusin tööle Tartu Observatooriumis, mis sel ajal oli just üle viidud Eesti Teaduste Akadeemia alluvusse. Töötan siin tänini. Esialgu jätkasin tähtede kinemaatika uurimist, sel teemal valmis 1955. aastal kandidaaditöö, mille kaitsesin Alma Materi nõukogu saalis Jõulude paiku. Üheks usinaks kuulajaks ja küsimuste esitajaks oli muide Villem Ernits, kes mind austas ka aastaid hiljem doktoritöö kaitsmisel.

Sel ajal oli muutunud aktuaalseks uue observatooriumi rajamine väljapool Tartut. Oli vaja suurendada astronoomiat õppivate üliõpilaste arvu. Selleks avasime vastava osakonna matemaatika-loodusteaduskonnas. Selgus aga, et paljud astronoomiast huvitatud üliõpilased nägid selles teaduses eeskätt humanitaarset aspekti ja olid üsna nõrgad matemaatikas ja füüsikas, mistõttu vaid üksikud sellest lennust jõudsid teaduspõllule. Edaspidi valmistasime tudengeid ette peamiselt füüsika osakonna kaudu. On ju tänapäevane astronoomia eeskätt astrofüüsika. Et äratada füüsikatudengites huvi astronoomia vastu, kasutasime Ülikooli juurde loodud tehiskaaslaste vaatlusjaama. Sel teel said tudengid teatud ettekujutuse astronoomilistest vaatlustest, mis kulus edaspidi ära astrofüüsikalistel vaatlustel. Töötasin mõni aeg tehiskaaslaste vaatlusjaama juhatajana, hiljem sai jaama juhatajaks üks esimesi astronoomia haru lõpetajaid Märt Liigant. Selle töö käigus selgus ka vajadus eestikeelse astronoomia õpiku järele. Sel ajal polnud meil piisavalt kogemusi originaalse õpiku koostamiseks, seepärast tõlkisime meile sobivana tunduva venekeelse õpiku. Töö käigus avastasime selles aga palju puudusi, nii sai umbes pool õpikust uuesti kirjutatud, lähtudes Ülikooli esimeste kursuste vajadustest. Kahjuks polnud me ümbertegemisega piisavalt radikaalsed, nii jäid sisse mõned nõukogude stiilis peatükid, mida hiljem lugedes pidime piinlikkust tundma. See käis eriti kosmoloogia kohta, kus sel ajal nõukogude teaduses valitsesid üpris kummalised seisukohad. Sel ajal ei osanud me arvata, et vaid kümnekond aastat hiljem kujuneb Universumi kui terviku uurimine meie enda peamiseks tegevuseks.

Kuuekümnendate aastate alguses tuli otsustada, mida edasi teha. Olin just lõpetanud oma vahepealse tegevuse tehiskaaslaste vaatlusjaamas ja ülikoolis lektorina, ning pidin leidma uue teemaatika, sest tähtede kinemaatika edasine uuri-

mine ei paistnud olevat eriti perspektiivikas. Nüüd meenus mu varasem kogemus, kui olin just Observatooriumi tööle tulles aidanud Kuzmini Galaktika mudeli arvutamisel. Selle töö käigus olin leidnud galaktikate modelleerimise meetodikas nõrga koha, seega tundus olevat mõistlik edasi arendada galaktikate modelleerimise meetodikat. Esimeseks ülesandeks oli Galaktika parameetrite täpsustamine, sõltub ju parameetritest kogu edasine modelleerimise käik. Leidsin viisi, kuidas kõik Galaktika parameetrid siduda omavahel ühtseks süsteemiks, selles töös osales veel Aleksei Kutuzov ja hiljem Mihkel Jõeveer. Esitasime oma tulemused Galaktika parameetritest 1964. aastal toimunud Rahvusvahelise Astronoomia Liidu kongressil. Taotlesin ka ise USAs toimunud kongressist osavõttu, kuid ei saanud kompetentsetelt organitelt väljasõiduluba. Valmistasin ette vajalikud materjalid preprintidena ja palusin Nõukogude delegatsiooni üht liiget, Leningradi professorit Kirill Ogorodnikovi mu tulemused ette kanda. Ta sai sellega ilusti hakkama. Peale kongressi tegi üks kongressist osavõtnud astronoom, Hollandi päritolu ameeriklane Bart Bok reisi Moskvasse, kus ta Sternbergi Instituudis esines loenguga. Sain tema tulekust aegsasti teada ja sõitsin ka kuulama. Bok on tuntud Galaktika uurija ja pühendas oma ettekandes peatähelepanu kongressil esitatud uutele tulemustele. Mu meeldivaks üllatuseks valgustas ta pikalt ka meie uut parameetrite süsteemi. Nii algas aastaid kestnud tutvus. 1982. aasta sügisel oli mul õnn kohtuda Bart Bokiga tema kodus Arizonas, kus arutasime jällegi Galaktika uurimise aktuaalseid probleeme. Aga sellest allpool.

Parameetrite süsteemi väljatöötamisele järgnes Galaktika mudeli arvutus, esimene variant sellest valmis juba 1963. aastal. See oli esimene Galaktika mudel, kus tähepopulatsioonide olemasolu oli detailselt arvesse võetud. Mudeli peamiseks puuduseks oli populatsioonide ehitust iseloomustavate parameetrite ebakindlus. Ei saa me ju oma Galaktikat näha tervikuna, seest vaadatuna pole aga populatsioonide ulatus ja tiheduse käik kogu Galaktika ulatuses kuigi hästi määratav. Üheks võimaluseks selle raskuse ületamisel on teiste meie Galaktikaga sarnaste galaktikate uurimine. Nende puhul me saame populatsioone hästi vaadelda ja sel teel täpsustada meie Galaktika struktuuriparameetreid. Kõige sobivamaks lähedaseks välisgalaktikaks on meie naabergalaktika Andromeeda tähtkujus, astronoomilise tähistusega M31. Selle galaktika ehitust uuris omal ajal Öpik ja näitas esimesena maailmas, et see asub kaugel meie Galaktika taga, teiste sõnadega – spiraalsed udukogud (nagu neid tollal kutsuti) on iseisvad tähesüsteemid. Ka Kuzmin uuris Andromeeda galaktika ehitust ja arendas selle galaktika baasil välja galaktikate modelleerimise põhijooned, mida ma hiljem edasi arendasin. Modelleerimisel kasutasin ära nii spiraalsete kui ka elliptiliste galaktikate modelleerimisel kasutatud põhimõtteid, arvestades asjaolu, et spiraalgalaktikates leiduvad vanad tähepopulatsioonid on väga sarnased elliptiliste galaktikatega.

Kuuekümnendate aastate lõpuks valmis galaktikate modelleerimisele pühendatud tööde seeria ning meie Galaktika ja Andromeeda galaktika mudelid. Andromeeda puhul esines mudelis oluline vastuolu erinevat liiki vaatlusandmete vahel. Kui lähtuda selles galaktikas vaadeldud tähepopulatsioonide ehitusest (mis on hästi teada otseste fotomeetriliste vaatluste põhjal), siis peaks galaktika populatsioonide massi jaotuse alusel leitud galaktika kui terviku pöörlemiskiirus perifeersetes osades kiiresti kahanema. Siin võime kasutada analoogiat Päikesesüsteemiga, kus planeetide kiirused liikumisel Päikese üm-

ber kahanevad planeedi kauguse suurenemisel Päikesest. Andromeeda galaktika tähepopulatsioonide tihedus perifeersetes osades on väga väike, mistõttu selles piirkonnas mõjub galaktika sisemiste osade külgetõmme analoogiliselt Päikesüsteemiga, kus planeedid liiguvad Päikese kahaneva külgetõmbe tõttu suurematel kaugustel aeglasemalt. Tegelikud vaatlused näitasid, et Andromeeda pöörlemiskiirus on perifeersetes osades peaaegu konstantne. Seda vastuolu on võimalik seletada kahel viisil. Esimene võimalus on oletada, et kaugemates osades esineb radiaalseid liikumisi, mis moonutavad pöörlemiskiiruse käiku. Teine võimalus on oletada, et galaktika perifeerias leidub mingi tundmatu ulatuslik populatsioon, mille külgetõmme paneb tähed galaktika välisosades kiiremini liikuma.

Olime aastate jooksul üsna põhjalikult tundma õppinud erinevate tähepopulatsioonide ehitust. Lisaks kinemaatilistele ruumilise jaotuse andmetele tegin populatsioonide evolutsiooni arvutusi, mis tuginesid tähtede evolutsiooni tundmisel. Nende arvutuste abil leidsin populatsioonide heleduste, värvuste ja massi-heleduse suhte arengu ajas erineva keemilise koosseisuga populatsioonide jaoks. Kasutasin asjaolu, et vanad populatsioonid koosnevad üsna metallivaestest tähtedest, nende populatsioonide massi ja heleduse suhe on tunduvalt väiksem noorematest metallirikkamatest tähtedest koosnevate populatsioonide omast. Kõik andmed kokku seletasid üsna hästi galaktikate populatsioonide jaotuse ja füüsikalised parameetrid. Galaktikate perifeerias domineerib metallivaene halo, selle populatsiooni massi ja heleduse suhe on eriti väike. Seega peaks selle populatsiooni külgetõmme olema väiksem nooremate populatsioonide omast. Kui pöörlemiskiiruse konstantsuse seletamiseks kasutada mingi uue populatsiooni olemasolu, siis peaksid selle populatsiooni omadused olema radikaalselt erinevad kõigi seni tuntud populatsioonide omadustest. Erilist raskust valmistas veel asjaolu, et seniste andmete alusel on tähtede tekke intensiivsus võrdeline gaasi tiheduse ruuduga. Tähed tekivad kosmilisest gaasist selle jahtumise ja gravitatsioonilise koondumise teel, tihedamates piirkondades on jahtumine ja külgetõmme tugevamad. Teiselt poolt näitavad pöörlemisandmed, et hüpoteetiline populatsioon peab olema väga ulatuslik. Kui see populatsioon tekkis nagu teisedki populatsioonid gaasist, siis peaksid selle populatsiooni tähed tekkima gaasipilve maksimaalse kontraktsiooni ajal galaktika tsentri ligidal, sest vaid siin on gaasi tihedus piisavalt suur, seepärast tuleks tähed viia uuesti tsentrist kaugemale oma praegusele asukohale. Meie arvutuste kohaselt pole kuskilt võtta energiat hüpoteetilise populatsiooni paisutamiseks. Need raskused paistsid ületamatutena, kui lähtuda eeldusest, et tegemist on tähepopulatsiooniga. Niisiis oli meie esialgne järeldus, et aeglase pöörlemise põhjuseks peaks olema ebastandardne liikumine galaktika perifeerias.

Kui varem piirdusin käsitsi arvutamisega, siis galaktikate mudelite, eriti evolutsiooni arvutamisel jäid need võimalused liiga tagasihoidlikuks, nii üritasin kasutada elektronarvutite abi. Sel ajal oli Eesti Teaduste Akadeemia Kübernetika Instituudis olemas moodne arvuti, millega suhtlemine käis perfolintide, hiljem perfokaartide vahendusel. Seda arvutit kasutasime meiegi, suhtlemine arvutiga oli üsna kohmakas tegevus, mille hõlbustamiseks loodi Observatooriumi juurde arvutusbüroo, kus töötas ka mu abikaasa Liia. Tema abiga programmeerisime oma ülesanded, kord nädalas sõitis Observatooriumi buss Tallinna, võttis kaasa perfolintide või -kaartide paki ning tõi tagasi eelmisel nädalal saadetud paki töötlemise tulemused. See protsess kulges aeglaselt, nii mõ-



nelgi korral sõitsime abikaasaga ise Tallinna, kus öises vahetuses sai kiiremini ülesanded läbi lasta. Nii valmis ulatuslik tööde tsükkel, mille alusel kaitsesin 1972. aasta kevadel Tartu Ülikoolis oma doktoriväitekirja.

Saabusid uued andmed, mis visalt näitasid galaktikate pöörlemise aeglust, see-ga oli üha raskem jääda oma esialgse oletuse juurde. Tegin 1972. aasta suvel uued arvutused oletusel, et tegemist on senitundmatu populatsiooniga. Tõuke selleks andis observatooriumi noor kaastöötaja Enn Saar, kes soovitas loobuda hüpoteesist, et tegemist on tavalise tähepopulatsiooniga. Sel juhul kadusid raskused, mis olid seotud populatsiooni tekke seletamisega. Tulemused olid hämmastavad – selgus, et mõnede galaktikate puhul ületab tundmatu populatsiooni mass tuntud populatsioonide oma kuni kümnekordselt. Sellises seisus tuli mulle ettepanek esineda esimesel Euroopa astronoomide kongressil ette-kandega galaktikate mudelitest. Kongress toimus Ateenas 1972. a sügisel. Kandsin ette Tartus tehtud uurimuste tulemused. Peamiseks uueks momendiks oli tõsiasi tunnistamine, et on olemas kaks tumeda aine probleemi. Esimene on võimalik tumeda aine olemasolu galaktikate tasandi ligidal. Galaktika tiheduse Päikese ümbruses leidis esmakordselt Ernst Öpik juba 1915. aastal, hiljem uuris seda probleemi Grigori Kuzmin oma kandidaaditöös 1952. aastal, Kuzmini õpilased Heino Eelsalu ja Mihkel Jõeveer kordasid arvutusi erinevat vaatlusmaterjali ja meetodikat kasutades. Kõik Tartu astronoomide tööd kinnitasid, et Galaktika tihedus Päikese ümbruses on seletatav tavaliste tähtede külgetõmbega ning pole vajadust oletada mingi tumeda aine olemasolu. See oli ilmselt ka üheks põhjuseks mu esialgsele skeptilisele suhtumisele globaalse tumeda aine probleemi käsitlemisel. Erinevalt esimest liiki tumedast ainest, mis mõjutab tähtede liikumist vaid vertikaalses suunas, on teist liiki tumeda aine mõju hoopis suurem – ta paneb kogu galaktika kiiremini pöörlema. Seega peab teist liiki tumeda aine puhul olema tegemist hoopis ulatuslikuma populatsiooniga.

Ilmselt oli mu Ateena ettekanne esimene selleteemaline rahvusvaheline käsitlus. Siiski polnud sel ajal argumendid tumeda aine olemasolu tõestamiseks veel piisavad probleemi lõplikuks lahendamiseks. Jätkasin otsinguid uute tõendite leidmiseks. Peamiseks raskuseks oli asjaolu, et galaktikate pöörlemiskõverad polnud nii ulatuslikud, et kindlat vahet teha erinevate hüpoteeside vahel. 1974. aasta alguses tekkis mõte kasutada gravitatsioonivälja tugevuse testimiseks kaaslasgalaktikaid. Need liiguvad emagalaktika gravitatsiooniväljas ja peaksid ideaalselt sobima välja tugevuse määramiseks suurematel kaugustel tsentrist. Vastav test andis positiivse tulemuse – selgus, et praktiliselt kõik hiidgalaktikad on ümbritsetud massiivsete kroonidega, mille raadius ja mass ületab emagalaktika oma keskmiselt kümnekordselt. Vastavad tulemused kandsin ette Kaukaasias toimunud astrofüüsika talvekoolis ja saatsin avaldamiseks ajakirjale Nature. Mu kaasautoriteks selles töös olid Enn Saar ja Ants Kaasik.

Mõni kuu hiljem ilmus samal teemal analoogiline artikkel Princetoni astronoomide poolt, kes jõudsid samale tulemusele. Möödus veel pisut aega ning ilmus veel kolmaski töö, kus meie tulemused seati kahtluse alla. Peamiseks vastuargumendiks oli kahtlus, kas meie uurimises kasutatud kaaslasgalaktikad on ikka tõelised kaaslased või ainult juhuslikud möödujad. Näivate kaaslaste liikumise uurimine ei anna muidugi informatsiooni arvatava peagalaktika kohta, vaid iseloomustab keskmist galaktikate juhuslikku liikumist. Niisiis oli vaja leida tõendeid, et kaaslased kuuluvad tegelikult emagalaktika juurde ja

moodustavad püsiva koosluse. Selleks asusime kogu galaktikauurijate rühmaga koguma andmeid kääbusgalaktikate kohta. Peagi leidsime uusi tõendeid selle kohta, et kaaslased on ikka alalised. Nimelt selgus, et isoleeritud kääbusgalaktikaid peaaegu polegi ning et kaaslasgalaktikate morfoloogiline tüüp sõltub kaugusest emagalaktikast – ligemad kaaslased on elliptilised, kaugemad spiraalsed või korrapäratud. Oluline on asjaolu, et ligemad kaaslased ei sisalda gaasi, kaugemad on aga gaasirikkad. Seda erinevust seletasime galaktikakroonides tõenäoselt leiduva kuuma gaasi mõjuga, mis puhub ligematest kaaslastest gaasi välja. See oli teine oluline tõend tumedate halode olemasolust galaktikate ümber. Neid tõendeid kogunes aja jooksul veelgi. Siiski ei leidnud tumeda aine kontseptsioon lõplikku heakskiitu teoreetikute poolt enne kui selgus tumeda aine vajalikkus galaktikate evolutsioonis. Tume aine on vajalik tihedushäirituste kasvuks kuuma universumi perioodil. Kui tume aine koosneb mitte-barüonaine osakestest (näiteks neutriinodest või teistest tavalise ainega nõrgalt interakteeruvatest osakestest), siis tihedusvälja areng saab alata palju varem kui tavalise aine puhul. See on aga vajalik universumi struktuuri tekkeks: kui tumedat ainet poleks, oleksid tihedushäiritused kuuma perioodi lõpul nii väikesed, et universumi paisumise tõttu alles koonduma hakkavad struktuurid hajuvad kiiresti ning galaktikad ei jõuagi välja areneda.

Nii selgus aja jooksul, et tagasihoidlik galaktikate modelleerimine viis meid hoopis teise probleemi juurde – Maailma tekke ja arenguni. Sel ajal oli käibel 3 universumi arengu teooriat. Moskva juhtiva astrofüüsiku Jakov Zeldovichi teooria kohaselt on esimesed tekkivad struktuurid lamedad pannkoogitaolised moodustised, teise Moskva astronoomi Leonid Ozernoi arvates mängivad galaktikate tekkel olulist rolli kosmilised keerised, Princetoni astronoomi James Peeblese arvates tekivad galaktikad väikestest täheparvede taolistest moodustistest gravitatsioonilise kuhjumise tulemusena. Sel ajal polnud veel piisavalt vaatlusandmeid, mis kinnitaksid või lükkaksid ümber senised teooriad. Nii pöördus Zeldovich pärast mu ettekannet Kaukaasia talvekoolis Tartu astronoomide poole palvega kaasa aidata galaktikate tekkimise teooria täpsustamisel.

Esiailgu ei osanud me midagi mõistlikku öelda. Aga peatselt meenus varasem kogemus galaktikapopulatsioonide uurimisel – populatsioonid säilitavad kaua oma esialgse oleku. Sama peaks kehtima veelgi enam galaktikapopulatsioonide korral, on ju need palju suuremad ning nende areng on vastavalt aeglasem. Esimene tulemus oli meil juba käes, nimelt kääbusgalaktikate kuhjumine hiidgalaktikate ümber. Nüüd jätkasime juba teadlikult galaktikate paigutuse uurimist. Moskva teoreetikute poolt tehtud numbrilised arvutused näitasid, et tihedushäirituste arengu käigus tekivad ulatuslikud tühjad alad ning et aine koondub nende ümber kompaktsetesse tihenditesse, kogu struktuur meenutab mee-kärke.

Kogusime selleks ajaks galaktikate kataloogides leiduvad andmed ja püüdsime määrata galaktikate jaotust meid ümbritsevas ruumis. Valmistasime isegi plastmassist kerakestest ruumilise mudeli, selget pilti see aga ei pakkunud. Õige meetodilise nipi leidis Mihkel Jõeveer, kes kasutas galaktikate ja galaktikaparvede jaotuse näitlikul esitamisel polaardiagrammi. Selgus, et nii parved kui ka üksikgalaktikad koonduvad tihenditesse, millest mõned langevad kokku hästi tuntud galaktikate superparvedega. See edu tiivustas meid kõiki, nii asusime 1977. aasta alguses jaotuse detailsemale uurimisele suurema grupiga. Meie tulemused langesid üsna hästi kokku Zeldovichi poolt ennustatud jaotu-

sega. Selgus ka hulgaliselt detaile, mis kõik osutasid sellele, et galaktikate teke toimub suuremates süsteemides – superparvedes, mis omakorda koosnevad pikkadest galaktikate ja galaktikaparvede ahelatest.

Juba mõni aasta enne seda olime Zeldovichiga arutanud rahvusvahelise konverentsi kokkukutsumise võimalust. Sel ajal otsene kontakt Lääne ja Ida kosmoloogide vahel oli üsna nõrk, niisiis lootsime kontakti parandada. Rahvusvaheline Astronoomia Liit kiitis meie plaanid heaks ja 1977. aasta sügisel toimuski Tallinnas konverents teemal “Universumi makrostruktuur”. Selleks ajaks olid meil olulised tulemused käes. Superparvede ja tühikute olemasolu, samuti superparvede ketitaoline ehitus leidsid ka teiste esinejate poolt kinnituse, nii omandas termin Universumi makrostruktuur kindla tähenduse. Zeldovichi poolt ennustatud struktuuride olemasolu oli tema teooria kinnituseks. Hilisemad uurimised, kus ka meie andsime olulise panuse, näitasid siiski, et detailides lähevad Zeldovichi ennustused vaatlustest lahku. Zeldovichi teooria esialgses variandis oli tumeda aine kandjaks neutriinodest koosnev gaas. Kuna neutriinod liiguvad väga kiiresti, siis ei saa nendest koosnev tumeda aine moodustada galaktikate ümber tihendeid, kõige väiksemad tihendid peaksid olema galaktikaparvede suurusel. Uuemal ajal oletatakse, et neutriinode asemel on tumeda aine kandjaks mingid seni avastamata osakesed, mis liiguvad tunduvalt aeglasemalt kui neutriinod. See teeb galaktikate ümber olevate tumedate kroonide tekke võimalikuks. Sellise nn külma tumeda aine testimisel oli meie astronoomide grupp koos Adrian Melottiga USAst ja Moskva teoretikutega üks esimesi.

1980ndatel aastatel kasutasime mitmeid uusi statistilisi teste, et selgitada täpsemalt erinevat tüüpi struktuuride omadusi ja võrrelda teoreetilisi mudeleid vaatlustega. Selles töös osalesid käesolevate ridade autori, Enn Saare, Urmas Haua, Jaak Jaaniste, Mihkel Jõeveeru ja Erik Tago kõrval meie grupi nooremad liikmed Maret Einasto ja Mirt Gramann, samuti nüüd Kanadas töötavad Lev Kofman ja Dmitri Pogosjan. Tänapäeval on tumeda ainega seotud probleemid kosmoloogia üheks nurgakiviks, nagu ka tühikute ja ketikujuliste superparvede olemasolu. Meie rühma viimaste aastate uurimused on pühendatud superparvede ja tühikute detailsele uurimisele. Selles oleme kasutanud muu hulgas kõige uuemaid galaktikate katalooge, mille abil saame detailset struktuuri uurida kaugusteni umbes 500 miljonit parsekit (see on 1,5 miljardit valgusaastat). See on umbes kümnendik kogu universumi sügavusest. Sel teel saame jälgida universumi arengut, näeme ju kaugemal asuvaid objekte sellistena, nagu nad olid ajal, kui universumi vanus oli senisest märksa väiksem.

#### KIRJANDUS:

Atrio-Barandela, F., Einasto, J., Müller, V., Mucket, J.P., Starobinsky, A.A. 2001. Observational matter power spectrum and the height of the second acoustic peak. *Astrophys. J.*, 559, 1-8.

Chernin, A.D., Einasto, J., Saar, E. 1976. The role of diffuse matter in galactic coronas. *Astrophysics and Space Science*, 39, 53-64.

Einasto, J. 1974. Galactic models and stellar orbits. Mavridis, L.N. (ed.) *Proc. of the First European Astr. Meeting*. Vol. 2. Berlin-Heidelberg-New York : Springer, 291-325.

- Einasto, J., Einasto, M., Gottlöber, S., Müller, V., Saar, V., Starobinsky, A.A., Tago, E., Tucker, D., Andernach, H., Frisch, P. 1997. A 120-Mpc periodicity in the three-dimensional distribution of galaxy superclusters. *Nature*, 385, 139-141.
- Einasto, J., Einasto, M., Gramann, M. 1989. Structure and formation of superclusters IX. Self-similarity of voids. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, 238, 155-177.
- Einasto, J., Einasto, M., Tago, E., Müller, V., Knebe, A., Cen, R., Starobinsky, A.A., Atrio-Barandela, F. 1999. Steps toward the power spectrum of matter. II. The biasing correction with  $\sigma_8$  normalization. *Astrophys. J.*, 519, 456-468.
- Einasto, J., Einasto, M., Tago, E., Starobinsky, A.A., Atrio-Barandela, F., Müller, V., Knebe, A., Cen, R. 1999. Steps toward the power spectrum of matter. III. The primordial spectrum. *Astrophys. J.*, 519, 469-478.
- Einasto, J., Einasto, M., Tago, E., Starobinsky, A. A., Atrio-Barandela, F., Müller, V., Knebe, A., Frisch, P., Cen, R., Andernach, H., Tucker, D. 1999. Steps toward the power spectrum of matter. I. The mean spectrum of galaxies. *Astrophys. J.*, 519, 441-455.
- Einasto, J., Gramann, M. 1993. Transition scale to a homogeneous universe. *Astrophys. J.*, 407, 443-447.
- Einasto, J., Haud, U. 1989. A galactic model with massive corona I. *Method. Astr. Astrophys.*, 223, 89-94.
- Einasto, J., Haud, U., Jõeveer, M., Kaasik, A. 1976. The Magellanic stream and the mass of our Hypergalaxy. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, 177, 357-375.
- Einasto, J., Jõeveer, M., Saar, E. 1980a. Structure of superclusters and supercluster formation. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, 193, 353-376.
- Einasto, J., Jõeveer, M., Saar, E. 1980b. Superclusters and galaxy formation. *Nature*, 283, 47-51.
- Einasto, J., Kaasik, A., Saar, E. 1974. Dynamical evidence for massive coronas of galaxies. *Nature*, 250, 309-310.
- Einasto, J., Saar, E., Kaasik, A., Chernin, A.D. 1974. Missing mass around galaxies – morphological evidence. *Nature*, 252, 111-113.
- Einasto, J., Saar, E., Klypin, A.A. 1986. Structure and formation of superclusters V. Spatial correlation and voids. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, 219, 457-478.
- Einasto, M., Einasto, J., Tago, E., Müller, V., Andernach, H. 2001. Optical and X-Ray clusters as tracers of the supercluster-void network. I. Superclusters of Abell and X-Ray. *Clusters. Astron. J.*, 122, 2222-2242.
- Jõeveer, M., Einasto, J. 1978. Has the universe the cell structure? Longair, M.S., Einasto, J. (eds.) *The Large Scale Structure of the Universe*. Reidel, 241-252.
- Melott, A.L., Einasto, J., Saar, E., Suisalu, I., Klypin, A.A., Shandarin, S.F. 1983. Cluster analysis of the nonlinear evolution of large-scale structure in an axion/gravitino/photino-dominated universe. *Phys. Rev. Lett.*, 51, 935-938.

Saar, E., Einasto, J., Toomet, O., Starobinsky, A.A., Andernach, H., Einasto, M., Kasak, E., Tago, E. 2002. The supercluster-void network V. The regularity periodogram. *Astron. Astrophys.*, 393, 1-23.

Zeldovich, Ya.B., Einasto, J., Shandarin, S.F. 1982. Giant voids in the universe. *Nature*, 300, 407-413.

## Teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest



Ain-Elmar  
Kaasik

Sündinud 2. augustil 1934. a Tallinnas (Nõmmel)

- 1953 Tallinna X Keskkool (Nõmme Gümnaasium)
- 1959 Tartu Ülikooli arstiteaduskond
- 1967 meditsiinikandidaat, Tartu Ülikool
- 1972 meditsiinidoktor, Tartu Ülikool
- 1975 professor, neuroloogia ja neurokirurgia
- 1991 Uppsala Ülikooli audoktor (*dr.med.h.c.*)
- 1993 Eesti Teaduste Akadeemia liige
- 1994 Ameerika Neuroloogiaakadeemia korrespondentliige, 2002 – täisliige
- 2000 Euroopa Teaduste ja Kunstide Akadeemia liige
- 2000 (Briti) Kuningliku Meditsiiniseltsi liige
- 2002 Poola Arstiteaduse Akadeemia liige
- 1998 Valgetähe III klassi teenetemärk

Ludvig Puusepa nimelise Eesti Neuroloogide ja Neurokirurgide Seltsi liige (1961), Skandinaavia Neurokirurgide Seltsi korrespondentliige (1973), Euroopa Neuroloogiaseltside Föderatsiooni liige (1991–2000), Maailma Neuroloogiaföderatsiooni liige, Eesti rahvuslik delegaat (1991–2000), Balti Neuroloogiaseltside Assotsiatsiooni liige (1993), Balti Neurokirurgide Assotsiatsiooni auliige (2000).

Riiklik teaduspreemia (1972); Soome Neuroloogide Seltsi aukiri ja Ernst Homéni medal (1988); Ludvig Puusepa nimelise Eesti Neuroloogide ja Neurokirurgide Seltsi Ludvig Puusepa medal (1999); Tartu Ülikooli medal (1999); Tartu Ülikooli Osvald Schmiedebergi medal (2002).

Ametid: 1959–1964 arst raviastutustes. Alates 1964. aastast Tartu Ülikool: aspirant, assistent, dotsent (1972), professor (1975), neuroloogia- ja neurokirurgia kateedri juhataja (1984–1992), arstiteaduskonna dekaan (1984–1989), närvikliiniku juhataja (1992–1996), korraline neuroloogiaprofessor (1996–1999); emeriitprofessor (1999).

Ligi 450 publikatsiooni, sealhulgas üle 200 “täismahulise” teadusartikli, neist 80 rahvusvahelise levikuga, eelretsenseeritavaid artikleid avaldavates ajakirjades ning 10 monograafiat, õpikut või peatükki raamatutes.

*Kasvasin kodus, kus hinnati vaimseid väärtusi. Minu isa töötas kuni 1944. aasta sügiseni Tallinna Koolivalitsuses ja suhtles seetõttu omaaegsete haridusjuhtidega. Olin nelja-aastane kui suri mu ema, kuid isa teine abielu andis mulle kasuema, kes oli konservatooriumiharidusega pianist ja töötas klaveriõpetajana. Kasvades avastasin üha enam koduse raamatukogu rikkusi, millest mitmed on mu riivleis siiani. Olen kogu elu olnud “homo litterarius”, lugemisest teadmisi ammutav inimene – teised infokanalid mõjutavad mind vähem. Ilukirjanduse kõrval hakkasid mind varakult huvitama inimkonna ajalugu ja kultuuri käsitlevad teosed. Õppisin juba noorukina tundma klassikalist muusikat, mille populaarsemad teosed on mu lemmikud ka praegu. Kahtlemata oli suur eelis õppida Tallinna X Keskkoolis, mis siis kandis veel edasi Nõmme Gümnaasiumi traditsioone. Minu klassijuhataja Anna Laidoner tegi omaseks toona mitte just eriti populaarse vene keele ja kirjanduse, Hilja Pavelson ja Clarissa Parts olid veel “vana kooliga” inglise keele õpetajad, kelle rajatud alusele toetun siiani. Vaatamata kooliajal esiplaanil olnud humanitaarhuvidele saan siiani kasu Juhan Anderssoni poolt õpetatud füüsikast ja eriti – Evi Propst-Rooni keemiatundidest. Nõmme kool oli omal ajal Tallinna tugevamaid spordikoole ja saavutused koolinoorte spordis olid ihaldus- ja tunnustusväärased. Tänu sellele on tervisesport ja üldiselt tervislikud eluviisid mind saatnud siiani.*

Minu teadustegevuse alguses, nagu elus muuski, oli piisavalt juhuslikkust, mis kokkuvõttes on osutunud õnnelikuks valikuks. Kui ma 1953. aasta suve lõpul esitasin avalduse Tartu Riikliku Ülikooli õigusteaduskonda astumiseks, ei lubatud mind sisseastumiseksamitele ja seetõttu astusin arstiteaduskonda. Toona ei olnud arstide õppekavas mingit diplomieelset ega -järgset spetsialiseerumist, kuid seda sai teha õppetöö kõrval, kliinikutes volontäärina töötades. Juhtus nii, et teise kursusega tol ajal möödapääsmatutele sügiste põllutöödele siirdudes tuli meie rühmaga äsja ülikooli lõpetanud ja närvikliinikusse assistendiks määratud Arvo Tikk, kellest sai mu lähedasi sõpru. Hakkasin aegajalt esmalt koos temaga juba siis kliinikus käima, kui kliinilisi aineid veel ei õpetatud. 1958. aasta suvel puhkes Lõuna-Eestis poliomieliidiepidemia, mis

põhjustas arvukalt raskeid, hingamispuudulikkusega kulgevaid haigusjuhte. Arvo Tikust sai hingamishalvatusega haigete ravi organiseerijaid kliinikus ja minul oli VI kursuse üliõpilasena endasmõistetav võimalus lülituda vastrajatud respiratsioonitsentrumis sellesse töösse. Kogunenud unikaalse kliinilise materjali analüüsimine sai peatselt aluseks mu esimestele teadustöödele ning kinnitas veelgi huvi neuroloogia ja neurokirurgia vastu. Kahtlemata aitas sellele kaasa kliiniku juhi professor (siis veel dotsent) Ernst Raudami tuntus ja isiklik sarm. Epideemia vaibudes lülitusin juba kliiniku neurokirurgiaosakonna regulaarsesse töösse, kus minu esimeseks õpetajaks sai hilisem meditsiini-doktor Ruth Paimre.

20. sajandi keskel võeti raskelt haigete ravis üha enam kasutusele arstiabi nn agressiivseid võtteid, mis hõlmasid elutegevuseks vajalike vedelike ja toitesubstraatide pikaajalist parenteraalset manustamist (infusiooniteraapia), häiritud hingamisfunktsiooni abistamist või ajutist asendamist vastava aparatuuri abil jne. Kujunev nn intensiivravi (*intensive care*) tingis omakorda vajaduse jälgida täpselt haigete vedeliku-, elektrolüütide ja gaasivahetuse bilanssi ning hoida stabiilsena vere kemismi teisi komponente, eelkõige happe-leelistasakaalu. Peatselt ilmusid nende probleemide teadusliku analüüsi esimesed tulemused, mis said teedrajavaiks järgnevatele uuringutele. Viimaste eestvedajaks said noored uurijad ja praktikud. 1962. aastal pidas kuuenda kursuse üliõpilane, nüüd teenekas dotsent ja riigi teaduspreemiade laureaat Jüri Samariüel seeria seminare, käsitlemaks ameeriklase F. Moore'i paar aastat varem ilmunud kapitaalset teost kirurgiliste haigustega patsientide intensiivravist [Moore, 1959]. Mõned aastad varem oli taanlane H.C.A. Lassen avaldanud tähelepanuväärse analüüsi Kopenhaagenis 1952. aastal aset leidnud poliomieliidiepideemia ajal haigestunute hingamishalvatuste ravist, mille puhul kasutati nn intratrahheaalset printsiipi [Lassen, 1956]. Nende teostega tutvumine ja oma esialgse kogemuse analüüs tõid esile rea probleeme, mis vajasis süvendatud uurimist. Seetõttu kujunes närvikliinikus (tolleaegses neuroloogia ja neurokirurgia kateedris) 1960. aastatel uurimissuund, mis käsitles ainevahetuse süsteemseid ja lokaalseid muutusi peaaju mitmesuguste akuutsete kahjustuste korral. Ülevaade nende varasemate tööde tulemustest on eesti keeles varem ilmunud [Raudam jt, 1971]. Seetõttu jäävad siin refereerimata kolleegide Arvo Tiku, Rein Zuppingu, Matt Mägi ja Liivia Lutsu need uurimistulemused, mis olid saadud minu omadest varem või kujunesid paralleelses töös.

Kuigi mu teadustööde nimekirjas oli juba 15 publikatsiooni, algas mu sihipärane uurimistegevus siiski 1964. aasta sügisel, mil astusin neuroloogia ja neurokirurgia kateedri aspirantuuri ja minu juhendajaks sai professor (siis veel dotsent) Ernst Raudam. Olin selleks ajaks juba viis aastat arstina praktiseerinud, sellest kaks esimest väikeses rajoonihaiglas ja kolm viimast ülikoolikliinikus. Seega võinuks ma end, tänapäeva mõistes, residentuuri lõpetanuks lugeda. Õnneks sain kohe, 1964. aasta sügisel, võtta osa neljakuulisest täienduskursusest Moskvast N.N. Burdenko nimelises Neurokirurgia Instituudis. See võimaldas mul kogu vaba aja veeta Meditsiini Keskraamatukogus, mis oli tol ajal väheseid võimalusi maailma teadusliteratuuriga tutvumiseks. Leidsin, et 1927. aastal A. Myersoni poolt välja töötatud meetod peaaju venoosse vere proovi võtmiseks seesmise jugulaarveeni punktsiooni teel on hõlpsalt rakendatav ja patsienti mittetraumeeriv [Myerson jt, 1927]. See võimaldas mõõta ajukoos tarbitava hapniku ja ainevahetuses produtseeritava süsihappegaasi hul-



ka, arvutades peaaegu arteriovenoosseid diferentse hapniku ja süsihappegaasi suhtes ning hingamiskoeffitsenti (RQ). Nii sai alguse mu teadustööde kindlasti intensiivseim ja viljakaim periood, mis kestis ligi 30 aastat ja oli pühendatud PEAAJU AINEVAHETUSE (HAPPE-LEELISTASAKAAL, ENERGEETILISED NUKLEOTIIDID, GAASIVAHETUS) JA VERERINGE MUUTUSTELE AKUUT-SETE AJUKAHJUSTUSTE KORRAL.

Esialgses uurimistöös kasutasin töömahukat, kuid väga täpset van Slyke'i voluminomeetrilist mõõtmistehnikat, hiljem muutus ka meil kättesaadavaks hingamisgaaside osarõhkude ( $pO_2$ ,  $pCO_2$ ) ja happe-leelistasakaalu näitajate mõõtmine elektrokeemilisel meetodil.

Tulemused näitasid, et ajuverevoolu reduktsioon ja ajukoe hüpoksia on suhteliselt enam väljendunud ulatusliku ajukahjustusega haigetel, kusjuures ajukoe hapnikuvarustus on eriti tugevasti häiritud raskete teadvushäiretega patsientidel [Raudam jt, 1968; Kaasik, Zupping, 1969]. Sellele vaatamata täheldati eriti viimati mainitud haigete rühmas omapärasest mittevastavust verega ajju kantava ja tarbitava hapniku hulga vahel. Nimelt kahjustab hüpoksia ajukoe ainevahetusest osavõtvaid fermentsüsteeme sedavõrd, et rakud kaotavad võime hapnikku tarbida. Kui niisuguse ajupiirkonna verevool ennistub, näiteks pärast trombi lagunemist, kujuneb välja relatiivne hüpereemia ehk nn. Luksusperfusioon [Kaasik, 1968]. Viimatinimetatud mõiste (*luxury perfusion*) võttis kasutusele taani uurija N.A. Lassen, kes kasutas selle sündroomi kirjeldamisel ka minu esialgseid uurimistulemusi [Lassen, 1966].

Esialgsete uurimistööde käigus tekkinud kontaktid ja tekkima hakanud võimalused lubasid mul aastatel 1967–1968 ligi aasta vältel ja 1975. aastal taas kolm kuud töötada (tänapäeva mõistes *postdoc*'i staatuses) Rootsis Lundi Ülikooli Aju Uurimise Laboratooriumis professor Bo K. Siesjö juhendamisel. See äärmiselt intensiivne ja viljakas periood võimaldas selgitada mehhanisme, mis determineerivad peaaegu hüpoksilise kahjustuse raskuse. Kuivõrd töö oluliseks eesmärgiks oli äärmiselt labiilsete adeniin-nukleotiidide kontsentratsiooni muutuste uurimine, tuli esmalt töötada välja sobiv katsemudel, võimaldamaks eksperimendi tingimustes võimalikult täpselt fikseerida uuritavate metaboliitide *in vivo* kontsentratsioon [Granholm jt, 1968]. Seda mudelit kasutades selgus, et niihästi asfüksiast kui ka verevarustuse puudulikkusest tingitud ajukoe hüpoksia põhjustab ajurakkude peamise toitaine – glükoosi ainevahetuse nihke anaeroobses suunas. Glükolüüsi korral muutub tunduv osa ajju sattuvast glükoosist piimhappeks. Viimane difundeerub rakuvälisesse vedelikku, milles piimhappe lõpliku ionisatsiooni tagajärjel kujuneb tugev atsidoos. See leiab kajastuse liikvori laktatsidoosi kujunemises [Kaasik jt, 1970a; b]. Need andmed olid kooskõlas minu ja mu kolleegide poolt Tartus tehtud kliinilis-biokeemiliste uuringute tulemustega, mis näitasid et peaaegu akuutsete kahjustustega haigetel areneb liikvori metabolistlik atsidoos, mis on tingitud piimhappe ioniseerumisel vabanenud happe-ekvivalentidest. Liikvori laktatsidoos on eriti väljendunud raskete teadvushäiretega haigetel, kel happe-leelise tasakaalu häired pärast komatooset seisundit alati ei möödu [Kaasik, Zupping, 1969; Zupping jt, 1971].

Lundis läbiviidud loomkatsete tulemuste ja Tartus registreeritud kliinilis-biokeemiliste andmete kõrvutamise näitas, et nii piim- ja püruuvhappe kui ka nende rakuvälises vedelikus toimuva ionisatsiooni tagajärjel vabanevad vesini-

kioonid läbivad väga halvasti hematoentsefaalset barjääri, s.o ajukapillaaride ja -arterioolide endoteeli. Selle tagajärjel eemaldab vereringe vaid tühise osa rakkude hapnikuvaeguse korral moodustunud happe-ekvivalentidest. Samuti põhjustab ka transitoorne hüpoksia ekstratsellulaarse vedeliku ja liikvori kestva atsidoosi. Glükoosi aeroobse oksüdatsiooniga võrreldes on glükolüüsi energia- tootmine väike. Seetõttu ammendatakse kiiresti peamiste energiarikaste ühendite, nagu adenosiintrifosfaat ja kreatiinfosfaat, tagavarad rakkudes. Nende ühendite resünteerimine ei ole rakkude energiadefitsiidi korral enam võimalik ja nende hüdrolyüsil vabanevad vesinikioonid aitavad ajukoe atsidoosi omakorda intensiivistada [Siesjö jt, 1968].

Eksperimentaalsed tööd näitasid, et ajuarterioolid muudavad oma toonust ja kaliibrit neid ümbritseva ekstratsellulaarse vedeliku pH muutuste mõjul. Teiste sõnadega – ajuverevoolu mahtkiirus on ajukoe vesinikioonide kontsentratsiooni otsese kontrolli all. Andmetest nähtus, et atsidoosi juhtudel vastupanu ajuarterioolide perifeerias nõrgeneb ja alkaloosi juhtudel see tugevneb. Sama lubasid kinnitada ka kliinilis-biokeemiliste uuringute andmed. Näiteks selgus, et juhtudel, kus aju venoosse vere hapnikusisaldus suureneb ja hapniku osarõhk tõuseb normaalsest kõrgemale, viidates relatiivsele hüpereemiale ajukoes, on liikvori atsidoos märksa tugevam kui tavalise redutseeritud ajuverevooluga haigusjuhtudel [Kaasik, Zupping, 1969]. Siiski on ka minu osavõtul tehtud uuringud näidanud, et aju ekstratsellulaarse vedeliku pH ei ole ajuarterioolide toonuse ainus regulaator. Hilisemad eksperimendid on kinnitanud ka teiste uurijate järeldusi, et ajuvereringe regulatsioonis ei tohi eitada ka neurogeenset komponenti. Tekitades katseloomadele nn immobilisatsioonistressi, suureneb nende ajuverevoolu mahtkiirus ja hapnikutarbimus ligi kahekordseks, kusjuures selle fenomeni kõrvaldab nii beeta-adrenergiliste retseptorite farmakoloogiline blokeerimine kui neerupealise eelnev eemaldamine [Carlsson jt, 1977]. Tartus tehtud eksperimentaalsed uurimused näitasid, et aju süvastruktuuride stimulatsioon ja/või destruktioon muudab talamuse ja suuraju koore verevarustust esmalt neurogeensete mehhanismide kaudu ning metabolistlikud mõjutused ilmnevad mõnevõrra hiljem [Kaasik, Asser, 1987; Kaasik jt, 1988a; b]. 1987. aastal Philadelphias positron-emissioontomograafia abil tehtud uurimus näitas, et suuraju poolkerade isheemilised kolded põhjustavad püsivaid sekundaarseid metabolistlikke muutusi teistes ajuosades. Markeerides oksüdatsioonisubstraati <sup>18</sup>F-FDG-ga (fluorodeoksüglükoos) ilmnes, et basaaltuumi ja talamust haarav isheemiline kolle põhjustab kestva hüpometabolismi väikeaju vastaspoolkeras [Kushner jt, 1988]. Kuigi selle nähtuse põhjus ei ole selge, võib siingi oletada aju “sisemiste seoste” mõju.

Peaaju ainevahetuse ja vereringe muutuste uurimise tulemusel saadud teadmised on olnud olulised peaaju raskete akuutsete kahjustuste patogeneetiliste mehhanismide (nt koljusisese rõhu tõusu põhjustav peaaju turse) mõistmisel ja vastavate ravistrateegiate kujundamisel. Neis eksperimentaalsetes ja eriti kliinilis-biokeemilistes uurimustes osales ja neid jätkas mitu akadeemiliselt ja kliiniliselt kõrgelt tunnustatud neuroloogi ja neurokirurgi (professorid Arvo Tikk, Rein Zupping, Tiina Talvik, Toomas Asser; dotsendid Matt Mägi, Mai Roose, Sulev Haldre jt). Nimetatud uurijad pöörasid oma tähelepanu erinevatele haigusrühmadele ning arendasid oma meetodilise lähenemise. Nii näiteks võttis dotsent Mai Roose kasutusele rea ensüümide (laktaat-dehüdrogenaas, aspartaat-aminotransferaas, gamma-glutamüintransferaas jt.) määramise liikvo-

ris ja veres; dotsent Sulev Haldre arendas välja kreatiinkinaasi aju-isoensüümi liikvoris määramise tehnika, kasutades selleks immuunofermentanalüüsi, professor Tiina Talvik pööras tähelepanu hüpoksiias sündinud vastsündinutele jne. Kompleksse lähenemise tõttu osutusid selle perioodi uuringud igati edukateks. Nende tööde tulemusena kaitsiti 1970. aastatel 4 doktori- ja rida kandidaaditöid. Viimaseid valmis selles valdkonnas ka hiljem.

Siiski ammendus see teema 1980. aastatega ning minu hilisemad tööd on olnud KLIINILISE EPIDEMIOLOOGIA JA BIOSTATISTIKA VALDKONNAS. See on võimaldanud selgitada põhiliste neuroloogiliste haiguste esmasesinemuse ja levimuse iseärasusi Eestis, samuti krooniliselt haigete elukvaliteeti mõjutavaid tegureid ja asjaolusid. Nende uuringute tulemused on kõige otsesemalt kasutatavad rahvatervishoidu mõjutatavate meetmete kavandamisel ja rakendamisel. Real põhjustel ei võimalda rutiinne meditsiinistatistika seda hästi teha. Tööde tulemiks on teadmised tervisega seotud nähtuste ja nende tekkepõhjuste suhtes. Erinevalt varasematest aegadest tegeleb kaasaja kliiniline epidemioloogia (nimetatud ka moodsaks epidemioloogiaks) peamiselt mittenakkuslike haiguste leviku ja nn riskifaktorite analüüsiga. Epidemioloogia on aidanud päästa rohkem elusid kui teised, väliselt säravamad meditsiiniharud [Traynor, 2001]. Ühtlasi aitavad vastavad uuringud hinnata arstliku tegevuse efektiivsust vastaval populatsioonil ning võrrelda seda mujal kogutud andmetega.

Kesk- ja vanemas eas on peaaju akuutse kahjustuse peamiseks põhjustajaks insult. Aastail 1991–1993 läbi viidud populatsiooniuuring näitas, et Eestis oli eluesmane haigestumus ajuinsultiga suurem kui mitmes Euroopa, Ameerika ja Uus-Meremaa piirkonnas, aga väiksem kui Taanis ja Rootsis. Noorematel ja keskealistel on suuremaid haigestumuskordajaid täheldatud ainult Soomes ja Venemaal. Töö tulemused näitasid siiski, et võrreldes 20 aastat varem (1970–1973) tehtud epiduuringuga oli haigete 30-päeva suremus oluliselt vähenenud – 49%-lt 30%-le. Letaalsuse vähenemine oli kahtlemata seotud ka eelpoolkäsitletud uurimistöödest saadud teadmiste rakendamisega praktilises ravitöös. See võimaldas kujundada ratsionaalsema ravistrateegia, millesse kuulus haigete varane hospitaliseerimine, loobumine mitmest põhjendamata farmakoteraapia meetodist ja vara alustatud rehabilitatsioonimeetmed [Kõrv jt, 1996; 1998].

Kesk närvisüsteemi krooniliste haiguste hulgas omavad erilist kohta nn neurodegeneratiivsed haigused, mis põhjustavad invaliidistumist ja enneaegset surma. Seoses elanikkonna vananemisega on tööstusmaades neurodegeneratiivsete haiguste uurimine muutunud ülimalt prioriteetseks uurimissuunaks. Tartu tööühenduse poolt läbi viidud uuringud näitasid, et nn motoorneuroni haiguseks ühendatavate haigusvormide esmahaigestumus Tartus ja Lõuna-Eestis on keskmiselt 1,3 juhtu 100000 elaniku kohta. Seejuures esineb 60–64 aastaste meeste eagrupid kõrge haigestumus, ulatudes 8,3 juhuni 100000 elaniku kohta. Eestis on haigestumus kesk närvisüsteemi teise kroonilise haigusse – hulgiskleroosi (*Sclerosis multiplex*) kõrge ja Eesti kuulub haigestumise nn Fennoskandia fookusse. Analüüs näitas, et hulgiskleroosi levimus on eriti kõrge (55,3/100000) eestlastest põliselanike ning märksa madalam (26,6/100000) mitte-eestlastest hilisimmigrantide populatsioonis. Haigestumus motoorneuroni haigusse on vastupidine – immigrandid haigestuvad märksa sagedamini kui Eestis sündinud ja siin kogu aeg elanud isikud [Gross-Paju jt, 1998; 1999]. Need andmed on kooskõlas mujal tehtud uuringute tulemustega, mis viitavad seni veel vähe tuntud keskkonnafaktorite osale haiguste tekkes.

Krooniliselt haigete elukvaliteedi hindamisel kasutatakse kliinilise epidemioloogia ja biostatistika kõrval ka teatud sotsioloogilisi uurimismeetodeid. Epilepsiahaigete uurimine spetsiaalse QOLIE (*Quality of Life in Epilepsy*) uurimisvahendi abil tõi esile, et Eestis on epilepsiaga inimesed rohkem stigmatiseerunud kui stabiilselt arenenud riikides. Ka ravile väga hästi alluvate hoogudega isikute psühhosotsiaalne seisund sõltub nende töö- ja sotsiaalsetest suhetest ning nende poolt tunnetatud stigmast [Herodes jt, 2001].

Eeltoodud olid vaid mõned näited selle valdkonna uuringutest. Minu kõrval on neid edukalt arendanud professorid Toomas Asser ja Tiina Talvik ning dotsent Sulev Haldre. Praeguseks on rahvusvahelise levikuga eelretsenseeritavates ajakirjades ilmunud üle 30 publikatsiooni, mis käsitlevad peaju kasvujate, epilepsia, Parkinsoni tõve ja teiste kesknärvisüsteemi haiguste levikut ja haigete elukvaliteediga seotud probleeme. Tänu nendele töödele on Eestis kättesaadavad maksimaalselt asjatundlikult koostatud registrid, mis hõlmavad enamust neuroloogilisi haigusi. Vastavalt teame nii haigete arvu kui ka haiguste kulu iseärasusi. Need andmed on kasutatavad tervishoiu- ja arstiabiteenuste osutamiseks riigis.

Lisaks teadusliku uurimistöö kirjeldatud põhisuundadele olen aastate jooksul tegelema NÄRVIHAIGUSTE DIAGNOSTIKA JA RAVI, ERITI INTENSIIVRAVI PROBLEEMIDEGA. 1988. aastal sain autoritunnistuse leiutisele "Parkinsoni tõve ravimeetod", mis arendas edasi selle haiguse neurokirurgilise ravi tehnikat. Siiski ei kasutatud nendes töödes prospektjälgimise ning juhusliku valiku (randomiseerimise) põhimõtteid. Tegu oli pigem kogunenud kliinilise materjali retrospektiivse analüüsiga, hindamaks mingi kliinilise meetodi rakendamise (arendustegevuse) tulemuslikkust, võrreldes seda eriti varem mujal kogetud efektiivsusega. Seetõttu oli neil töödel pigem lühiajaline väärtus ja praeguseks võib neist enamust liigitada "teadusliku makulatuuri" hulka. Mõnevõrra olulisem oli selle kogemuse üldistamine, võrdlemine ja publitseerimine mitmes käsiraamatus, tegemaks need andmed kättesaadavaks laiale arstikonnale [Kaasik, Zupping, 1982; Kaasik, 1988; 1991]. Samal eesmärgil olen ajakirjas "Eesti Arst" ja selle eelkäijas avaldanud üle 30 ülevaateartikli, milles olen käsitlenud nii oma erialaga seotud üldisemat huvi pakkuvaid probleeme kui arstimise üldküsimumustega seonduvat.

Lõpetades seda küllaltki fragmentaalset ülevaadet, rõhutan, et aastakümnete jooksul on mu põhitegevus seondunud siiski arstimisega. Olen osalenud umbes 3000 neurokirurgilisel operatsioonil ja võtnud osa loendamatu haigusjuhtude käsitlemisest. Akadeemilise isikuna olen seda küll teadusliku lähenemisega sidunud, kuid põhitegevusena olen siiski saanud teadusele liiga vähe aega pühendada. Seda puudust on aidanud kompenseerida mu kolleegid ja õpilased, kellest vaid osa on selles ülevaates nimetatud. Minu juhendamisel on seni kaitstud 16 doktori- ja meditsiinikandidaadi väitekirja. Mitmed mu õpilased (professor Toomas Asser, med knd Jaan Eelmäe) on oma neurokirurgi kunstis jõudnud kaugemale kui olin mina oma parimail aastail ning sama võib peatselt öelda mu akadeemiliste järglaste suhtes teadusvaldkonnas.

## KIRJANDUS

- Carlsson, C., Hägerdal, M., Kaasik, A.E., Siesjö, B.K. 1977. A catecholamine-mediated increase in cerebral oxygen uptake during immobilisation stress in rats. *Brain Res.*, 119, 223-231.
- Granholm, L., Kaasik, A.E., Nilsson, L., Siesjö, B.K. 1968. The lactate/pyruvate ratios of cerebrospinal fluid in rats and cats related to the lactate/pyruvate, the ATP/ADP, and the phosphocreatine/creatine ratios of brain tissue. *Acta Physiol. Scand.*, 74, 398-409.
- Gross-Paju, K., Ööpik, M., Lüüs, S.M., Kalbe, I., Kaasik, A.E. 1999. The risk of motor neurone disease and multiple sclerosis is different in Estonians and Russians. Data from South Estonia. *Europ. J. Neurol.*, 6, 187-193.
- Gross-Paju, K., Ööpik, M., Lüüs, S.M., Kalbe, I., Puksa, L., Lepik, T., Kaasik, A.E. 1998. Motor neurone disease in South Estonia. Diagnosis and incidence rate. *Acta Neurol. Scand.*, 98, 22-28.
- Herodes, M., Õun, A., Haldre, S., Kaasik, A.E. 2001. Epilepsy in Estonia: a quality-of-life study. *Epilepsia*, 42, 1061-1073.
- Kaasik, A.E. 1988. Närvihäiguste farmakoteraapia. Allikmets, L. (koost.) Kliiniline farmakoloogia. Tallinn : Valgus, 409-450.
- Kaasik, A.E. 1968. Reduction of cerebral arteriovenous oxygen difference in terminal phase of cerebral haemorrhage. *Scand. J. Clin. & Lab. Invest., Suppl.* 102: X: D.
- Kaasik, A.E. 1991. Ägedad peaaajukahjustused. Talvik, R. (koost.) Reanimatoloogia. Tallinn : Valgus, 197-221.
- Kaasik, A.-E.A., Asser, T.K. 1987. Dinamika mestnogo mozgovogo krovotoka pri termodestruktsii zritel'nogo bugra u sobak. *Vopr. Neurokhir.*, 2, 47-50.
- Kaasik, A.E., Asser, T., Ulst, M.V. 1988a. Local blood flow in the thalamus and frontal cortex in alert and narcotized dogs. *Neurosci. Behav. Physiol.*, 18, 384-387.
- Kaasik, A.E., Nilsson, L., Siesjö, B.K. 1970a. The effect of asphyxia upon the lactate, pyruvate and bicarbonate concentrations of brain tissue and cisternal CSF, and upon tissue concentrations of phosphocreatine and adenine nucleotides in anesthetized rats. *Acta Physiol. Scand.*, 78, 433-447.
- Kaasik, A.E., Nilsson, L., Siesjö, B.K. 1970b. The effects of arterial hypotension upon the lactate, pyruvate and bicarbonate concentrations of brain tissue and cisternal CSF, and upon the tissue concentrations of phosphocreatine and adenine nucleotides in anesthetized rats. *Acta Physiol. Scand.*, 78, 448-458.
- Kaasik, A.-E.A., Tomberg, T.A., Schotter, A.V., Asser, T.K. 1988b. Vlijanie elektrostimuljatsii ili razrušenija zritel'nogo bugra na mozgovoje krovoobrašćenie. *Fiziol. Ž. im. I.M. Setšenova*, 74, 504-509.
- Kaasik, A.E., Zupping, R. 1969. Correlations between gas exchange and CSF acid-base status in patients with cerebral hemorrhage. *Brock, M., Fieschi, C.*

- Ingvar, D.H., Lassen, N.A., Schürmann, K. (eds.) Cerebral Blood Flow. Berlin-Heidelberg-New York : Springer, 129-131.
- Kaasik, A.E., Zupping, R. 1982. Peaaju veresoonte haigused. Tallinn : Valgus, 233 lk.
- Kushner, M., Kaasik, A.E., Nencini, P., Calcano-Perez, J.A., Alavi, A., Reivich, M. 1988. Contralateral cerebellar hypometabolism following cerebral infarction. An acute and follow-up study. *Neurology*, 38 (Suppl.1), 147.
- Kõrv, J., Roose, M., Kaasik, A.E. 1996. Changed incidence and case-fatality rates of first-ever stroke between 1970 and 1993 in Tartu, Estonia. *Stroke*, 27, 199-203.
- Kõrv, J., Roose, M., Kaasik, A.E. 1998. Stroke epidemiology. Bergen, D.C., Chopra, J.S., Silberberg, D., Barac, B. (eds.) *Progress in Neurology II*. Chapter 3. New Delhi : H. Lechner Churchill Livingstone Pvt Ltd., 17-29.
- Lassen, H.C.A. 1956. Management of Life-Threatening Poliomyelitis Copenhagen 1952-1956. Edinburgh and London, 282 pp.
- Lassen, N.A. 1966. The luxury-perfusion syndrome and its possible relation to acute metabolic acidosis localised within the brain. *Lancet*, 7473, 1113-1115.
- Moore, F. 1959. Metabolic Care of the Surgical Patient. Philadelphia: W.B. Saunders Co, 620 pp.
- Myerson, A., Halloran, R.D., Hirsch, L. 1927. Technique for obtaining blood from the internal jugular vein and carotid artery. *Arch. Neurol. Psychiat.*, 17, 807-808.
- Raudam, E., Kaasik, A.E., Zupping, R., Tikk, A., Mägi, M., Luts, L., Lendre, A. 1971. Ainevahetuse süsteemsed ja lokaalsed muutused peaaju akuutsete kahjustuste korral. *Nõuk. Eesti Tervishoid*, 1, 5-9.
- Raudam, E., Zupping, R., Kaasik, A.E. 1968. Disturbances of gas metabolism with occlusive cerebrovascular disease. Luyendijk, W. (ed.) *Progress in Brain Research*. Vol. 30. Cerebral Circulation. Amsterdam-London- New York : Elsevier, 113-119.
- Siesjö, B.K., Kaasik, A.E., Nilsson, L., Pontén, U. 1968. Biochemical basis of tissue acidosis. *Scand. J. Clin. & Lab. Invest.*, Suppl. 102, III, A.
- Traynor, B. 2001. Consenting adults. *J. Med. Screen.*, 8, 59-60.
- Zupping, R., Kaasik, A.E., Raudam, E. 1971. Cerebrospinal fluid metabolic acidosis and brain oxygen supply. Studies in patients with brain infarction. *Arch. Neurol.*, 25, 33-38.

*Teaduspreemia täppisteaduste alal tööde tsükli*  
"MITMEKVANDILISTE PROTSESSIDE  
MITTEHÄIRITUSLIK TEOORIA" eest



Vladimir  
Hížnjakov

Sündinud 25. mail 1938. aastal Novotšerkasskis Venemaal

- 1955 Tapa Keskkool
- 1960 Tartu Ülikool, teoreetiline füüsika
- 1966 füüsika-matemaatikakandidaat, Tartu Ülikool
- 1972 füüsika-matemaatikadoktor, Tartu Ülikool
- 1965 Eesti teaduspreemia
- 1977 Eesti Teaduste Akadeemia korrespondentliige
- 1981 kuuma lüminestsentsi avastuse riiklik registreerimine
- 1987 Eesti Teaduste Akadeemia tegevliige
- 1995 Eesti Füüsika Seltsi aastapreemia
- 2001 Eesti Vabariigi Valgetähe teenetemärk (III kl)

Aastatel 1960–1992 Eesti Teaduste Akadeemia Füüsika ja Astronoomia Instituudis (1973. aastast Füüsika Instituut): aspirant, nooremteadur, vanemteadur, peateadur; 1976–1992 kohakaasluse korras Tartu Ülikooli professor; 1992. aastast Tartu Ülikooli korraline professor; 1998. aastast Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi tahkiseteooria labori juhataja kt.

Kestvamad välislähetused: USAs külalisteadur California Ülikoolis (1973) ning külalisprofessor Arizona Ülikoolis (1982) ja Cornelli Ülikoolis (korduvalt); Jaapanis külalisteadur Tokyo Ülikoolis (1977); Saksamaal korduvalt külalisprofessor Ulmi ja Stuttgarti Ülikoolis ning Brandenburgi Tehnikaülikoolis.

Eesti Loodusuurijate Seltsi ja Eesti Füüsika Seltsi liige

Avaldanud üle 300 teaduspublikatsiooni.

## SISSEJUHATUSEKS NULLVÕNKUMISTEST

Maailm, milles me elame, koosneb suurest hulgast pidevalt liikuvaatest osakesetest. Kondenseeritud aines (tahkistes, klaasides, vedelikes) need osakesed võnuvad kogu aeg oma enam-vähem stabiilsete tasakaaluasendite ümber, interakteerudes naaberosakestega. Siinjuures on oluline, et kvantseaduste tõttu seda liikumist põhimõtteliselt ei ole võimalik täielikult välja lülitada – alati jäävad nn nullvõnkumised. Need võnkumised on olemas igal pool – kristallides, vedelikes, gaasides ja isegi vaakumis. Viimases sellepärast, et vaakumi seisund on tegelikult mitmete kvantväljade (näiteks elektromagnetvälja, aga ka leptonite, glüüonide, kvarkide ja teiste elementaarosakeste väljade) nullvõnkumiste seisund, mis vastab nn vaakumile ideaalsele nulltemperatuuril. Tegelikult nii aines kui vaakumis ei ole temperatuur kunagi täpselt null, kuigi gaasplasmas on nüüd saavutatud temperatuur  $10^{-9}$  K (sellele vastab  $10^{-46}$  korda väiksem soojusliikumise energia kui samas plasmas toatemperatuuril). Ka vaakum kosmoses ei ole täpselt nullseisundis. Suurest Paugust, mis viis meie Universumi tekkele umbes 15 miljardit aastat tagasi, on jäänud reliktkiirguse temperatuur 2,7 kraadi Kelvinit. See kosmose temperatuur väljendub näiteks selles, et igal pool kosmoses on olemas raadiolained millimeetrilises ja pikemalainelises diapasonis, kuigi nende intensiivsus on väga nõrk.

Praeguse kvantteooria järgi on väga paljude nähtuste taga nullvõnkumised. Isegi Suur Pauk on algkvantväljade nullseisundi ajalise sõltuvuse tagajärg. Veel üks näide kosmoloogiast on mustade aukude kvantaurustumine, kus protsessi määravaks on nullvõnkumised, mis on oluline kirjeldava uurimise seisukohalt. Nimelt 1974. aastal näitas Hawking [Hawking, 1974], et musta augu läheduses isegi nullvõnkumiste lained “kukuvad” musta auku kahefootonilise kvantkiirguse tulemusena, kusjuures “kukub” ainult üks footonitest, teine aga lendab välja. Selle tulemusena kiirgab must auk soojuskiirgust. Kiirguse temperatuur ja võimsus kasvavad ajas, samal ajal kui musta augu mass väheneb. Kiirgus on intensiivne ainult väikeste mustade aukude puhul (algmassiga vähem kui  $10^{15}$  grammi). Viimased aga kiirgavad nii tugevalt, et nende eksisteerimine lõpeb plahvatusega: viimases kümnendiksekundis vabaneb  $10^{23}$  J energiat, mis on ekvivalentne  $10^6$  megatonnise tuumapommi plahvatusega. Kuigi niisuguse plahvatuse tugevus on väga suur inimseisukohalt, on see plahvatus teiste kosmiliste plahvatustega võrreldes (näiteks, supernova plahvatusega) väga nõrk, mistõttu seda ei ole veel kindlalt identifitseeritud. Siinjuures tuleb märkida, et Hawkingi kiirgust võib modelleerida kvantoptikas laseri tugeva ülilühikese femtopulsi abil, mis tekitab murdumisnäitaja lineaarse muutumise ajas [Yablonovitch, 1987]. Niisuguse aegsõltuva murdumisnäitajaga aine modelleerib ülisuure kiirendusega liikuvat taustsüsteemi. See annab Hawkingi kiirguse taolise kahefootonilise kiirguse, kusjuures keskmine kiirgussagedus on antud murdumisnäitaja tuletisena ajast. Ka Suurt Pauku on võimalik modelleerida kvantopikas tugevate laserpulsside abil [Hizhnyakov, 1992].

Vaakumi nullvõnkumiste intensiivsus (täpsemalt öeldes – nende tihedus) on väga väike, kui mitte arvestada väga suuri sagedusi. Tahkistes on madalsageduspiirkonnas nende intensiivsus palju suurem. Näiteks sagedusdiapasonis, mis on kasutusel praegustes televiisorites, on kristalli võnkumiste nullenergia reeglina 15 suurusjärku suurem kui vastava sagedusega elektromagnetvälja nullenergia. Seepärast on nullenergiaga seotud protsessid tahkistes väga olu-



lised. Niisugused nähtused, nagu ülijuhtivus, vedela heeliumi ülivoolavus, metallide juhtivus, magnetism, foononvabad spektrijooned, on otseselt nullvõnkumiste kvantfüüsikalised tulemused.

Kuigi nullvõnkumiste tihedus tahkistes on üsna suur, mõjutavad nad tavaliselt üksikergastusi (elektrone, footoneid, foononeid, magnoneid) suhteliselt nõrgalt. See võimaldab vastavaid nähtusi kirjeldada kvantmehaanikas hästi väljatöötatud häiritusteooria abil. Kui aga tekib tugev ergastus, siis selle interaktsioon nullvõnkumistega ei ole enam nõrk ja häiritusteooria ei kehti. Seni ei olnud teada, kuidas sellist juhtu teoreetiliselt kirjeldada ja millised nähtused üldse võivad selles olukorras tekkida. Antud tööde tsükklis [Hizhnyakov, 1999; Hizhnyakov, Nevedrov, 1999; Hizhnyakov, Reineker, 1999a; Hizhnyakov, Reineker, 1999b; Nevedrov jt, 2001; Hizhnyakov, Kaasik, 2001; Hizhnyakov jt, 2002; Hizhnyakov, Kaasik, 2002; Hizhnyakov jt, 2002a; Hizhnyakov jt, 2002b] on vastav teooria loodud ning ennustatud rida huvitavaid uusi nähtusi. Väljatöötatud teooria kasutab mõningaid ideid musta augu kvantkiirguse teooriast ning originaalseid meetodeid [Hizhnyakov, 1999; Hizhnyakov, Kaasik, 2001; Hizhnyakov, Kaasik, 2002; Hizhnyakov jt, 2002a; Hizhnyakov, 1996; 1997], mis esmakordselt võimaldasid luua mittehäiritusliku mitmeosakeste kvantsiirete teooria. On juba tehtud ka esimesed eksperimendid Tartu Ülikooli Füüsika Instituudis, mis kinnitavad uue teooria põhijäreldusi [Hizhnyakov jt, 1999].

#### LOKAALSED VÕNKUMISED JA NENDE MITTELINEAARNE INTERAKTSIOON FOOONONITEGA

Tahkise osakeste liikumise ja seda mõjutavate jõudude teooria – kristallivõre dünaamika – sai alguse 1912. a ilmunud Borni, Karmani [Born, Karman, 1912] ja Debye [Debye, 1912] klassikalistes töödes, mis panid aluse kaasaegsele tahkise kvantteooriale. Kuna isegi kõige lihtsamate molekulide korral osaleb protsessis rohkem kui kolm osakest, siis on võimatu leida kvantmehaanika liikumisvõrrandi täpset lahendit. Seetõttu on kasutatud mitmeid mõistlikke lähendusi, nagu harmooniline ja adiabaatiline lähend. Mida väiksem on võnkumiste energia, seda paremini need lähendid töötavad.

Kui kristalli või molekuli osake on näiteks laseri abil tugevalt võnkuma ergastatud, siis see ergastus jääb paigale, vaatamata osakese vastastikmõjule naaberosakestega. Sellist kohalikku võnkumist kristallivõres nimetatakse võresiseseks lokaalseks võnkumiseks või iselokaliseeritud võnkesolitoniks. Lokaalsed võnkumised tekivad ka kohtades, kus esinevad põhikristalli aatomeist kergemad aatomid (lisandiaatomid või kergemad molekulid kristallis). Lokaalsed võnkumised on lokaliseeritud nii ruumis kui ka sageduse mõttes. Viimane tähendab, et nad ilmutavad ennast teravate piikide näol optilistes (neeldumis-, kiirgus-, hajumis-) spektrites. Lokaalsed võnkumised määravad kristallide soojusjuhtivuse madalal temperatuuril ning mõjutavad oluliselt metallide ja pooljuhtide elektrijuhtivust. Lokaalsed võnkumised määravad ka keemiliste reaktsioonide käiku lahustites. Aja jooksul lokaalne võnkumine relakseerub – võnkumise energia muundub kogu kristalli võnkumisteks (foononiteks) ja lõpuks tasakaaluliseks soojusenergiaks.

Lokaalse moodi võnkeenergial on kindlad, diskreetsed väärtused. Kvantüleminekul madalamale energiatasemele annab lokaalne võnkemood energiatega vahe

ära foononitele. Seega toimub lokaalse võnkemoodi relaksatsioon foononite tekkena. Relaksatsiooniprotsessi kiirus sõltub osakestevahelise vastastikmõju tugevusest ja sellest, millised foononid kristallis on olemas (kristalli foonon-spektrist). Foononi maksimaalne energia (foononspektri sageduse ülempiir) on alati lõplik, kuna on olemas minimaalne aatomite vahekaugus kristallis. Mõnedes süsteemides (nagu inertgaaside ja orgaaniliste ainete kristallid kergeste molekulide lisanditega) on võnkeenergia tasemete vahe 10 või rohkem korda suurem kui foononi maksimumenergia. See tähendab, et üks foonon ei saa minema viia kogu energiat, mis vabaneb lokaalse moodi siirdel ühe energia-taseme võrra allapoole – seega peab tekkima korraga kaks või enam foononit. Mitmefoononiliste protsesside kaudu toimubki siin lokaalse moodi võnke-energia relakseerumine. Analoogete protsessidega on tegemist ka elektronsii-rete korral, näiteks keemilistes reaktsioonides.

#### TÖÖDETSÜKLI TEMAATIKAST LÄHEMALT

Kvantsiirded kuuluvad kaasaegse kvantfüüsika põhiprotsesside hulka. Lokaalse moodi mitmefoononilised siirded toimuvad lokaalse moodi ja kristalli moodide anharmoonilise vastastikmõju tõttu. See vastastikmõju on mittelineaarne: ta sisaldab kolme või enama osakese koordinaate. Niisuguse interaktsiooniga seotud nähtusi ei ole seni õnnestunud täpselt kirjeldada. Seepärast kasutati ligikaudseid meetodeid, mis põhinevad häiritusteoorial. Madalamate võnke-nivoode relakseerumine on tavaliselt hästi kirjeldatav selle teooria abil, kuid tugevalt ergastatud lokaalsetel võnkumistel on mitmefoononilisi üleminekuid põhjustav vastastikmõju tugev ja häiritusarvutus ei tööta. Seetõttu ongi loodud teooria [Hizhnyakov, 1999], mis võimaldab arvutada foononite tekke kiirust ja selle põhjal relaksatsiooni kiirust. Kõne all olev kvantsiirete teooria on tekkinud interdistsiplinaarselt kui kvantoptika, kvantastrofüüsika ja kondenseeritud aine teooria mõningate ideede süntees ja edasine arendus. Kuigi mitmekvandiliste siirete teooriat arendatakse mitmes kohas (USA, Venemaa, Saksamaa jm), pole seni kuskil mujal mittehäirituslikku teooriat õnnestunud luua.

Uue teooria kehtivuspiirkond on oluliselt laiem kui seni eksisteeriva häiritusteooria oma – ta kehtib ka siis, kui interaktsioon, mis kutsub esile ülemineku, on isegi tugev. Ka erineb teorias kasutatav lähenemisviis oluliselt häiritusteooria omast. Viimases on primaarseks kirjeldusobjektiks alamsüsteem, milles toimub kvantsiire. Siin uuritakse foononite kvantvälja nullseisundit lokaalse moodi mittetatsionaarses olekus ning arvutatakse selle välja kvantide (foononite) tekkimise kiirus. See on mõneti analoogne Hawkingi teooriaga, milles arvutati musta augu mõju elektromagnetilise kvantvälja nullseisundile. Kvantsiirde kiirus saadakse kaudselt, kasutades jäävusseadusi. Vaatamata ülal-märkitud ühismomendile erineb loodud teooria musta augu kiirguse teooriast kas või juba sellepoolest, et viimane on nn poolklassikaline teooria (kirjeldab elektromagnetvälja kvantmehaaniliselt, aga musta auku klassikaliselt). Meie teooria on täielikult kvantteooria: mõlemad, nii foononeid kui ka lokaalset moodi, kirjeldatakse kvantmehaanika seaduste järgi. Täiesti erinevad on ka arvutusmeetodid: Hawking arvutab väljaoperaatorite transformatsiooni ajas, meil aga arvutatakse väljakvandi (foononi) korrelatsioonfunktsiooni asümptootikat suurte aegade korral.

Teooria üheks põhitulemuseks on uue nähtuse ennustamine: teatud kriitilise interaktsioonitugevuse korral toimub mitmekvandiliste üleminekute kiiruse hüppeline kasv. Näidati, et interaktsiooni kriitilise tugevuse juures mitmekvandiline üleminek saab plahvatuslaadse iseloomu: kvantide (foononite) genereerimise kiirus on võrreldav nende sagedusega. See järeldus sai hiljuti eksperimentaalse kinnituse Xe kristalli kuuma luminesentsi mõõtmisel [Hizhnyakov jt, 1999]: tuvastati  $Xe_2^*$  molekuli (nn iselokaliseerinud eksitoni) ülikiire kahe- ja kolmefoononiline relaksatsioon kõrgetelt võnkenivoodelt (täpsemalt, 22. võnkenivoo piirkonnast). Märkimisväärne, et kriitilise interaktsiooni olemasolu kvantsiiretes on täiesti uus fenomen.

Töodes [Hizhnyakov, Kaasik, 2001; Hizhnyakov jt, 2002a] on teooriat üldistatud suvalise arvu foononite samaaegsele tekkele lokaalse moodi kvant-siirdel. On näidatud, et seda protsessi võib iseloomustada keskmise väljaga, mis vastab anomaalsetele korrelatsioonidele. Märkimisväärne, et nimetatud korrelatsioone on siiani uuritud ainult statsionaarsetel olekul seoses ülijuhtivusega ning magnetismiga. On näidatud, et kriitiline käitumine interaktsiooniparameetri muutudes on üldine kõikide mitmekvandiliste protsesside korral.

Töös [Hizhnyakov, Kaasik, 2002] on uut teooriat üldistatud suvalistele kvant-üleminekutele. See võimaldas rakendada teooriat ka mitteadiabaatilistele elektronüleminekutele, kaasa arvatud elementaarsed protsessid keemilistes reaktsioonides. On ennustatud mitteadiabaatilise interaktsiooni kriitilise tugevuse olemasolu ning leitud, et kriitilise interaktsiooni piirkonnas võib protsessi temperatuurne sõltuvus oluliselt erineda tavalisest, mis on antud Arrheniuse seadusega. Saadud tulemused võivad osutada tähtsaks keemiliste reaktsioonide katalüüsi mehhanismide väljaselgitamisel.

Töodes [Nevedrov jt, 2001; Hizhnyakov jt, 2002] on teooriat kasutatud kristallivõre iselokaliseeritud võnkesolitonide foononkiirguse kirjeldamiseks. Iselokaliseeritud võnkesolitonide uurimine on uus moodne temaatika mittelineaarses võredünaamikas. Niisugune võnkumine on lokaliseerunud mingil kristalli aatomil ja tema lähinaabritel. Ta tekib ainult siis, kui võnkumine on tugev, kuna ainult siis on mittelineaarne interaktsioon, mis viib lokaliseerimisele, piisavalt tugev. Tavaliselt nimetatud võnkumised arvutatakse klassikalise teooria raames, kasutades võimsat arvutustehnikat. Kahjuks on need meetodid raskesti rakendatavad reaalsele (kolmemõõtmeliste) kristallidele väga suure arvutusmahu tõttu. Et ületada mainitud raskusi, on nimetatud töödes arendatud originaalne analüütiline meetod, mis lubab antud mittelineaarse probleemi lahendamise taandada lineaarse probleemi pöördülesande lahendamisele. Seda meetodit koos töödes [Hizhnyakov, 1999; Hizhnyakov jt, 1999] arendatud teooriaga on kasutatud nn pilusolitonide ja nende kahefoononilise kiirguse arvutamiseks leelishalogeenkristallides. Näidati, et solitonide eluiga on lõplik, kuigi suhteliselt pikk (kuni miljon võnkeperioodi), sõltudes oluliselt võnkesolitonide kristallograafilisest suunast.

Töodes [Hizhnyakov, Reineker, 1999b; Hizhnyakov jt, 2002b] on arendatud mitmefoononiliste üleminekute mittehäirituslikku teooriat tahkiste optiliste spektrite foononvabade joonte kirjeldamiseks. Esmakordselt on arvatud optilist defaseerimist tugevalt defektsetes kristallides, arvestades defektidest tingitud stohhastilise välja moduleerimist lisanditsentri võnkumiste poolt. See defaseerimise mehhanism on oluline madalatel temperatuuridel: ta tingib foonon-

vaba joone laiuse  $T^3$ -tüüpi temperatuurse sõltuvuse, mis on kooskõlas eksperimendiga. On kirjeldatud optilist defaseerimist ka niisugusel juhul, kui optilise tsentri alg- või lõppseisund on (ligikaudu) dünaamiliselt ebastabiilne. On näidatud, et ka sel juhul foononvaba joone laius sõltub temperatuurist  $T^3$ . Teooriat on rakendatud teemandi kristalli luminesentsile, kus niisugune foononvaba joone temperatuurne sõltuvus on leitud eksperimentaalselt [Hizhnyakov jt, 2002b].

Lõpuks tahaksin tänada kõiki kolleege, kellega koos olen need tööd teinud. Suur tänu!

#### KIRJANDUS

Born, M., von Karman, T. 1912. Über Schwingungen in Raumgitter. Physik. Z., 13, 297.

Debye, P. 1912. Zur Theorie der spezifischen Wärme. Ann. Phys. 39, 789.

Hawking, S.W. 1974. Black hole explosions. Nature (London), 243, 30.

Hizhnyakov, V. 1999. Multiphonon anharmonic decay of a quantum mode. Europhys. Lett., 45, 508-513.

Hizhnyakov, V. 1997. Multiphonon decay of strong mode in quantum lattice. Z. Phys. B 104, 675-679.

Hizhnyakov, V. 1992. Quantum emission of a medium with a time-dependent refractive index. Quantum Optics, 4, 277.

Hizhnyakov, V. 1996. Relaxation jumps of strong vibration. Phys. Rev. B53, 13981-13984.

Hizhnyakov, V., Kaasik, H. 2001. Nonperturbative theory of multiphonon anharmonic transitions. J. Chem. Phys., 114, 3127-3132.

Hizhnyakov, V., Kaasik, H. 2002. Temperature dependence of nonradiative transitions: A nonperturbative theory. J. Chem. Phys., 116, 9485-9491.

Hizhnyakov, V., Kaasik, H., Sildos, I. 2002b. Zero-phonon lines: The effect of strong softening of elastic springs in the excited state. Phys. Stat. Sol., 99, 644-653.

Hizhnyakov, V., Kaasik, H., Tehver, I. 2002a. High-order vibrational relaxation: a nonperturbative theory. Eur. Phys. J., B 28, 271-276.

Hizhnyakov, V., Kink, M., Selg, M., Kink, R., Maksimov, J. 1999. Maksimov, Step-wise multiphonon anharmonic decay of local modes: theory and experiment. Physica B, 263-264, 683.

Hizhnyakov, V., Nevedrov, D. 1999. Nonlinear quantum dynamics of local modes: perfect and disordered alkali halide crystals. Physica B, 263-264, 762-765.

Hizhnyakov, V., Nevedrov, D., Sievers, A.J. 2002. Quantum properties of gap modes. Physica B, 316-317, 132-135.

Hizhnyakov, V., Reineker, P. 1999a. Optical dephasing in defect-rich crystals. *J. Chem. Phys.*, 111, 8131-8135.

Hizhnyakov, V., Reineker, P. 1999b. Optical dephasing by fluctuations of long-range interactions in defect-rich crystals. *J. Lumin.*, 83-84, 351-355.

Nevedrov, D., Hizhnyakov, V., Sievers, A.J. 2001. Anharmonic gap modes in alkali halides. *Vibronic Interactions: Jahn-Teller Effect in Crystals and Molecules*, NATO Science Series:II: Math., Phys., Chem., 39, 343-347.

Yablonovitch, E. 1987. Accelerating reference frame for electromagnetic waves in a rapidly growing plasma: Unruh-Davies-Fulling-DeWitt radiation and the nonadiabatic Casimir effect. *Phys. Rev. Lett.*, 62, 1742.

*Teaduspreemia keemia ja molekulaarbioloogia alal toode tsukli eest*  
KIRAALSETE MOLEKULIDE TUUMAMAGNET-  
RESONANTSSPEKTROSKOPIA *alal*



*Tonis  
Pehk*

Sündinud 27.11.1939 Tõrvas

1958 Viljandi I Keskkool  
1963 Tallinna Tehnikaülikool, keemiainsener  
1969 keemiakandidaat, Tartu Ülikool  
1984 keemiadoktor, Moskva Keemilise Füüsika Instituut  
2001 Valgetähe III klassi teenetemärk

1962–1965 Eesti TA Keemia Instituudi nooremteadur, alates 1965. aastast Eesti TA Küberneetika Instituudi (kuni 1980) ja Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi nooremteadur, alates 1970 vanemteadur. Aastast 1996 Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi asedirektor, 1996–2001 Tallinna Tehnikaülikooli professor, Eesti Keemia Seltsi asepresident.

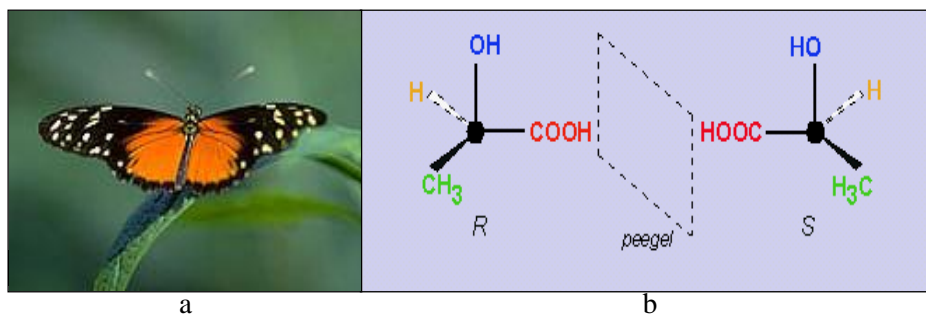
Eesti teaduspreemiad tuumamagnetresonantsspektroskoopia (1972) ja prostaglandiinide (1987) uuringute eest.

Avaldanud üle 300 teaduspublikatsiooni, Inglise-eesti-vene keemiasõnaraamatu (1998) ja Keemianomenklatuuri käsiraaamatu (2000) kaasautor.

## SUMMEETRIA JA KIRAALSUS

Sümmeetria on termin, mis siinkirjutaja arvates on asjatult leidnud kohti eesti keele võõrsõnade leksikonis. On ju igal koolijütsil, rääkimata täiskasvanutest, oma ettekujutus sümmeetriast. Sümmeetria on ühest küljest seotud täppisteadustega, aga samas leiab kasutamist kõige erinevatel elualadel, nagu maalikunstis, muusikas, arhitektuuris, spordis, käsitöös, botaanikas, tehnoloogilistes protsessides, krüpteerimises, börsimanipulatsioonides jne. Seetõttu on võimatu anda sümmeetria ühest definitsiooni. Nii on Oxfordi sõnaraamatu lühivariant sunnitud kasutama mitut formuleeringut, asetades esikohale mõneti laialivalguva väite sümmeetriast kui millestki ilusast, mis resulteerub õigetest proportsioonidest, kooskõlast, tasakaalust ja harmooniast. Lisaks on toodud formuleering sümmeetriast kui struktuurist mida saab jagada täpselt samasuurtteks samasugusteks alamstruktuurideks. Teine selgitus on tihedalt seotud sümmeetria mõistega, nagu seda kasutatakse teaduses. Siinkohal tuleb kindlasti esmaselt nimetada kristallograafiat kui teadust kristallidest, mille objektid annavad meile silmnähtava ettekujutuse erinevate võimalike sümmeetriaelementide kohta. Sümmeetriaelementideks on sümmeetriateljed, -tasapinnad ja -tsenter. Sümmeetria matemaatilise formalismiga tegeleb rühmateooria, liigitades erinevate sümmeetriatunnustega objektid omaette sümmeetriarühmadesse, võimaldades teha olulisi järeldusi füüsika ja keemia fundamentaalsete probleemide käsitlemisel, nagu näiteks kvantteoorias, relatiivsusteoorias, elementaarosakeste füüsikas, spektroskoopias ja muidugi kristallograafias. Matemaatiliselt on sümmeetria muidugi ideaalne, tegelikkuses sageli ebatäiuslik, kuid just see sümmeetria mitteperfektsus ergutab leidma sümmeetrilisi seoseid ning pakub esteetilist ja visuaalset naudingut (joonis 1a).

Sümmeetria käsitlemisel võivad olla objektideks muidugi ka molekulid, kusjuures täiesti sobilikuks lähendiks on enamikel juhtudel molekulide kujutamine idealiseeritud staatiliste struktuuridena, kus molekule moodustavad aatomid on omavahel seotud formaalselt fikseeritud keemiliste sidemetega, mille omavahelised nurgad on määratud konkreetse aatomi valentselektronide orientatsiooniga. Nii on benseeni ( $C_6H_6$ , kuuest süsiniku ja vesiniku aatomist võrdsetest C-C ja C-H sidemetest moodustatud ring) molekulis arvukalt sümmeetriatasapindu, sümmeetriatelgi ja ka inversioonitsenter. Taoline kõrgsümmeetriliste molekulide esinemine on pigem erandiks kui reegliks ning valdaval osal kõik-



Joonis 1. Kiraalsus makro-(a) ja molekulaarsel (b) tasandil.

võimalikest molekulidest on vähem sümmeetriaelemente või puuduvad nad üldse, olles asümmeetrilised. Asümmeetria on nii sümmeetria puudumine kui sümmeetria fundamentaalne alus. Sümmeetria analüüs võimaldab välja selgitada väikseima objekti, mis on asümmeetriline ja mille kordumisega saame sümmeetrilise objekti.

Sümmeetriaga tihedalt seotud mõisteks on kiraalsus. Kiraalsuse nimetus tuleb käe mõistest kreeka keeles, mistõttu eestikeelseks vasteks võiks olla käelisus ja seega saaks eesti keel rikastatud järjekordse homonüümiga. See asjaolu on põhiliseks argumendiks termini “kiraalsus” kasuks, mida paistavad tunnustavat meil viimastel aastatel välja antud sõnaraamatud. Sümmeetria ja kiraalsus on antagonistlikud mõisted, sest sümmeetria olemasolu välistab enamuses juhtudes kiraalsuse. Samas tuleb rõhutada, et kiraalsetes objektides võivad esineda sümmeetriatelgedele elemendid. Kiraalsuse definitsioon pärineb inglise füüsikult lord Kelvinilt aastast 1904, kes ühes oma kuulsatest Baltimore loengutest defineeris kiraalseks mistahes geomeetrilise kujundi või punktide rühma, kui kujundi peegeldust tasapinnalises peeglis ei õnnestu viia kokkukangevusse lähtekujundiga. Seda definitsiooni illustreerib joonis 1.

Nii ei õnnestu vasakut ja paremat kätt või liblika paremat ja vasakut tiiba viia kokkukangevusse. Samamoodi on kiraalsed vasaku ja parema käe kindad, mis sunnib üldjuhul kindakudujaid eraldi valmistama neid vasaku ja parema käe jaoks. Sõltuvalt konkreetsest kindapaarist võib leida tänapäeval siiski ka mittekiraalseid kindaid. Sellistel kinnastel on sümmetriatasapind, mis vabastab kindakandja vajadusest külmal hooajal korduvalt analüüsida nende kuuluvust paremale või vasakule käele.

Molekulid võivad olla, nagu kindadki, kiraalsed. Joonisel 1 on toodud 2-hüdroksüpropioonhappe kiraalsed vormid, mis on teineteise peegelpildid, mida ei õnnestu kokkukangevusse viia. Loomulikuks küsimuseks on siinkohas, kas molekulide kiraalsus mängib mingit rolli nende omadustes ja funktsionaalsuses. 2-hüdroksüpropioonhape on paremini tuntud piimhappe nime all, mida on kaudselt tajunud igaüks meist, kes on ennast füüsiliselt üle pingutanud või joonud haput piima. Esimesel juhul annab piimhappe endast tunda lihaste valikkuse all ning teisel juhul on sensoriks maitsmismeel. Kui eraldada piimhappe molekulid lihastest ja hapupiimast ning uurida saadud molekulide omadusi, siis selgub, et kõik nende füüsikalised omadused (erikaal, sulamistäpp, keemistemperatuur, põlemissoojus, murdumisnäitaja, spektroskoopilised omadused, lahustuvus tavalistes lahustites jne) on identsed. Kuid on siiski ka üks erinevus, mis avaldub viisis, kuidas muskli ja piima piimhapped interakteeruvad polariseeritud valgusega. Lihastest eraldatud piimhappe pöörab polariseeritud valguse tasapinda päripäeva ja hapupiima piimhappe samapalju vastupäeva. Põhjuseks on identsete aatomitega ja keemiliste sidemetega kahte tüüpi mittekokkukangevate peegelpiltidena piimhappe molekulide kiraalsus. Piimhappe isoleeris esimesena aastal 1780 piimast rootsi keemik C. Scheele, analoogse happe sai teine rootsi keemik J. Berzelius 1807. aastal musklitest. Saksa keemik J. Liebig näitas, et mõlemad ained on sama koostisega. Kulus üle poole sajandi ja siis õnnestus saksa keemikul J. Wislicenusel näidata 1873. aastal, et nendel ainetel on ühesugune struktuur. Samal ajal formuleerisid Van't Hoff ja Le Bel tänapäeva stereokeemia alused ning loogiliseks järelduseks oli seostada kaks piimhapet nende kiraalsusega. Paraku kulus veel ligi sajand, enne kui 1950.

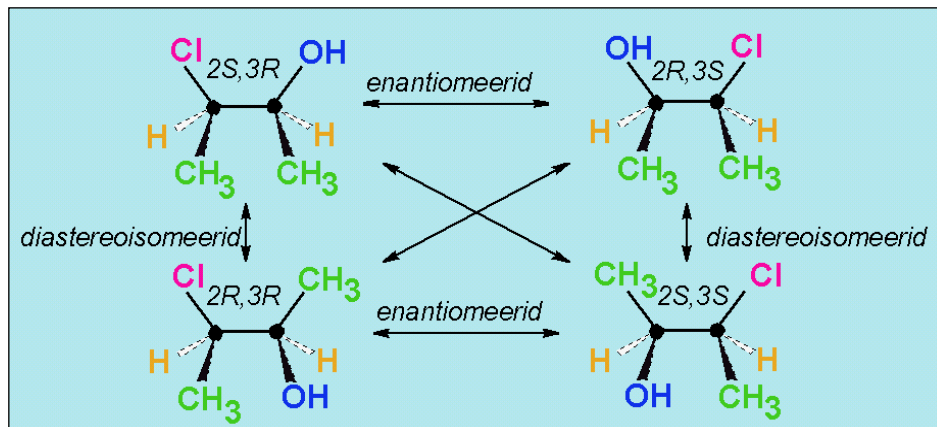


aastal õnnestus lõplikult kinnitada, et musklitest eraldatud piimhape vastab joonisel 1 *S*-ga ning piimast eraldatud piimhape *R*-ga tähistatud absoluutsele konfiguratsioonile. Individuaalseid kiraalseid isomeere nimetatakse enantiomeerideks ning käesoleval ajal üldtunnustatud Cahn-Ingold-Prelogi *R,S*-nomenklatuurireeglid võimaldavad struktuurvalemi põhjal üheselt fikseerida *R*- ja *S*-enantiomeeride keemiliste sidemete ruumilise paigutuse. Need reeglid kõrvaldasid suure segaduse absoluutse konfiguratsiooni tähistamisel, sest enne seda oli praktilises kasutuses mitmesuguseid vastuolusid sisaldavaid tähistusviise. Kahjuks ei saa polariseeritud valguse tasapinna pööramise märgi järgi otsustada absoluutse konfiguratsiooni üle. Kiraalsus on dihhotoomiline omadus, molekulide puhul on ainult kaks võimalust: kiraalsus on kas olemas või ta puudub. Tihti peale levinud arusaam pidada mõningaid molekule enamkiraalseteks kui teisi kas või polariseeritud valguse pöördnurga suuruse järgi pole õigustatud.

Piimhappe kiraalsus on seotud kiraalse tsentri olemasoluga, milleks on tüüpiliselt süsiniku aatom nelja erineva asendajaga. Antud juhul on seega piimhappel kaks stereoisomeeri, mis on enantiomeerideks. Sagedasti esineb molekulides arvukalt kiraalseid tsentreid, mis dramaatiliselt suurendavad võimalike stereoisomeeride arvu, sest võimalike isomeeride arv kahekordistub iga täiendava kiraalse tsentri lisandumisega ning on seega arvutatav seosest  $2^n$ , kus  $n$  tähistab kiraalsete tsentrite arvu. Tüüpiliseks näiteks võiks tuua kolesterooli molekulid, millede arv keskmises inimolendis on aukartustäratavalt suur (umbes  $3,7 \times 10^{23}$  molekuli, veerand kilo!). Kolesteroolis on 8 kiraalset tsentrit, seega 256 stereoisomeeri, kuid nendest ainult üks mängib olulist osa ainevahetusprotsessis. Mitme kiraalse tsentriga stereoisomeeride omavahelisi suhteid illustreerib joonis 2, kus on toodud kahe kiraalse tsentriga 3-kloor-2-butanooli neli stereoisomeeri. Lisaks enantiomeeride mõistele tuleb nüüd kasutusse võtta diastereoisomeeride mõiste. Diastereoisomeerid on need stereoisomeerid, mis pole enantiomeerid, s.o ei ole teineteise peegelpildid. Seega on meil 3-kloor-2-butanoolis 2 paari enantiomeere, ülejäänud stereoisomeeride paari-kaupa võrdlemine näitab, et tegemist on diastereoisomeeridega. Oluline erinevus diastereoisomeeride ja enantiomeeride vahel on esimeste erinevad füüsikalised konstandid, mis võimaldavad diastereoisomeere omavahel lahutada kristallisatsiooni, destillatsiooni, ekstraktsiooni ja teiste lahutusmeetodite abil.

Piimhappe ja kolesterooli näited veenavad meid, et molekulide kiraalsus omab suurt tähtsust bioloogias. Täiendavaid näiteid pole raske leida. On ju eluslooduse põhilised ehituskivid – aminohapped, suhkrud ja nukleiinhapped kõik kiraalsed molekulid, mille absoluutse konfiguratsiooni teadmine aitab meil mõista bioloogiliste reaktsioonide saladusi ning seeläbi suunata nende käiku meile soovitatavates suundades.

Seega tuleb igapäevases elus, uute ainete tootmisel ja eriti uurimistöös arvestada kiraalsete molekulide olemasoluga. Kui piimhapet kasutada kraanikausi puhastamiseks, siis pole oluline, kumba enantiomeeri kasutada ning reeglina on selleks tarbeks sobilik ratseemiline segu (enantiomeeride 1:1 segu), mille tööstuslik tootmine on puhta enantiomeeri omast mitmeid kordi odavam. Piimhappe kasutamisel ravimikompositsioonides tuleb juba konkreetselt arvestada, millist funktsiooni seal piimhape omab. Kiraalsete molekulide saamiseks on 3 allikat: 1) eraldamine looduslikest produktidest; 2) eraldamine sünteetiliselt saadud ratseemilistest segudest; 3) kiraalsete molekulide süntees. Viimane suund on



Joonis 2. Kahe kiraalse tsentriga 3-kloor-2-butanooli 4 stereoisomeeri.

tänapäeva sünteesikeemia põhieesmärgiks. 2001. aasta Nobeli keemiapremia laureaatideks tunnistati W. S. Knowles, B. Sharpless ja R. Noyori kiraalsete molekulide sünteesi uute meetodite väljaarendamise eest. Ettemääratud konfiguratsiooniga sünteetiliste polümeeride tootmine on võimaldanud luua unikaalsete omadustega uusi materjale. Tänapäeva farmaatsiatööstuse arengu kõige iseloomulikumaks jooneks on individuaalsete enantiomeeride tootmise kasv nende ratseemiliste segude tootmise vähendamise kaudu.

#### KIRAALSUSE MAARAMINE

Ülaltoodu peaks meid veenma vajaduses määrata looduslike ja sünteetiliste molekulide absoluutset konfiguratsiooni. Probleemile ei leitud pikka aega lahendust. Samas osutus võimalikuks korreleerida omavahel arvukate kiraalsete molekulide suhtelisi konfiguratsioone keemiliste transformatsioonide abil, arvestades tuntud reaktsioonimehhanisme. Silmapaistvaimaks uurijaks sel alal tuleks vast lugeda sakslast Emil Fischerit, kellel õnnestus süstemaatiliste suhkrute uuringute kaudu omavahel siduda paljude kiraalsete tsentrite omavahelised konfiguratsioonid, lähtudes monokiraalse glütseriinaldehüüdi molekulist. E. Fischer postuleeris, et polariseeritud valgust päripäeva pöörav isomeer võiks kuuluda tänapäeva nomenklatuuri mõttes *R*-enantiomeerile. Kahjuks ei õnnestunud tal näha oma väite kinnitust, mis saabus 4 aastat pärast E. Fischeri surma 1951. aastal J. Bijvoet poolt. J. Bijvoet määras röntgenkiirte anomaalse dispersiooni põhjal viinhappe absoluutse konfiguratsiooni ning sellega sai hoobilt paika pandud suure arvu kiraalsete molekulide absoluutne konfiguratsioon. Saadud tulemuse põhjal võiks paista, et pole midagi lihtsamat, kui kasutada röntgenstruktuuranalüüsi mis tahes kiraalse molekuli absoluutse konfiguratsiooni määramiseks. Tegelikult on asjalood märksa keerulisemad. J. Bijvoet poolt läbiviidud eksperiment nõudis ülimalt täpset mõõtmist ning eelduseks oli röntgenkiirte allikaks olevale elemendile (tsirkoonium) lähedase elemendi (möödeti viinhappe rubiidiumi soola) olemasolu uuritavas kristallis. Röntgenstruktuuranalüüsi põhilisteks uurimisobjektideks absoluutse konfiguratsiooni määramise alal on kujunenud diastereoisomeerid, kus molekuli ühe osa absoluutne konfiguratsioon on teada ning selle alusel saab fikseerida ülejäänud

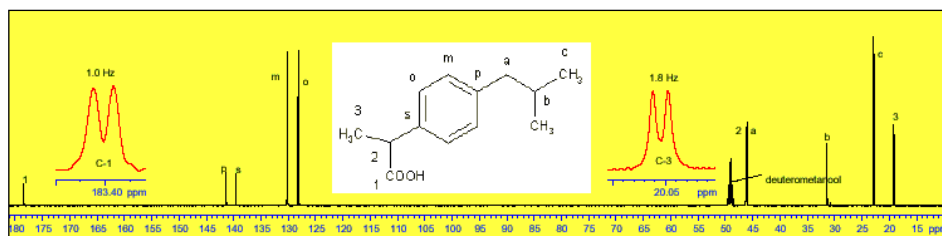
molekuli osa absoluutse konfiguratsiooni. Täiendavaks nõudeks röntgenstruktuuranalüüsi edukuseks on sobilike kristallide olemasolu, mida sageli on peaaegu võimatu saavutada.

Kiraalsuse määramise meetod polariseeritud valguse pöördnurga mõõtmise teel paistab olevat lihtne võimalus kiraalsete ainete puhtuse määramiseks. Ehkki meetod on laborites laialdaselt kasutatav, mõjutavad analüüsi tulemusi tühised kogused suure eripööranguga lisandit, ilmnevad mittelineaarsed efektid ning paljude enantiomeeride eripöörang on sedavõrd väike, et meetod muutub praktiliselt kasutamatuks. Meetod ei anna informatsiooni aine absoluutse konfiguratsiooni kohta, kui seda pole eelnevalt korrektselt määratud. Optilise rotatsiooni dispersiooni või tsirkulaarselt polariseeritud valguse dikroismi mõõtmised ning nende tulemuste kasutamine mitmesuguste empiiriliste korrelatsioonide kaudu on minetanud suures osas oma kunagise tähtsuse. Asjaolu, et kiraalse molekuli reageerimisel teise kiraalse molekuliga peavad reaktsioonitsentrid omavahel kokku sobima (tihti peale tuuakse võrdluseks luku lahtikeeramine, mida saab teha ainult sobiva võtmega) on leidnud viimasel ajal laialdast kasutamist kiraalsete molekulide analüütiliseks ja preparatiivseks eraldamiseks. Edusammud vedelikkromatograafias, gaasikromatograafias, kromatograafias superkriitilistes vedelikes ja kapillaarelektroforeesis kiraalsete molekulide kasutamise kaudu analüüsikeskkonnas on võimaldanud luua uusi meetodeid enantiomeeride eraldamiseks ning nende suhtelise kontsentratsiooni määramiseks. Samas ei anna nad informatsiooni uuritavate molekulide absoluutse konfiguratsiooni kohta.

#### TUUMAMAGNETRESONANTS JA KIRAALSED MOLEKULID

Kahtluseta võib väita, et tuumamagnetresonantsist (TMR) on kujunenud kõige informatiivsem mittedestruktiivse analüüsi meetod orgaaniliste ainete struktuuri ja dünaamika uurimisel. Orgaanilised ained moodustavad umbes 90% kogu *Chemical Abstracts* 20-miljonilisest andmebaasist. Tuumamagnetresonantspektroskoopia annab võimaluse keemilise nihke kaudu registreerida ja identifitseerida signaale tuumaspinni omavate elementide tuumadelt. Eelisolukorras on tuumad, millede spin on  $\frac{1}{2}$ , sest nende tuumade signaalide omaläisus on reeglina väiksem kui magnetvälja ebahomogeensusest tingitud joonte laienemine. Orgaanilistes molekulides on nendeks eelkõige vesiniku isotoobi  $^1\text{H}$ , süsiniku isotoobi  $^{13}\text{C}$  ja lämmastiku isotoobi  $^{15}\text{N}$  aatomid. TMR spektroskoopia abil on võimalik saada enamikele molekulide moodustavatele aatomite tuumadele keemilise nihke parameeter, mis on seotud tuuma ümbritsevate elektronide olekuga. Tuumaspinnide energianivoode erinevus sõltub kasutatava magnetvälja tugevusest ning on ka kõige soodsamatel juhtudel äärmiselt väike, mõni sajandik kalorit mooli kohta. Keemilistes nihetes õnnestub mõõta üliväikesi erinevusi, kuni  $10^{-10}$  kalorit mooli kohta. Hoolimata toodud numbri väiksusest on põhimõtteliselt enantiomeeride TMR spektrid ikkagi identsed ning esmapilgul paistab, et TMR spektroskoopia on kiraalsete molekulide uurimise seisukohalt sama võimetu kui kõik teised spektroskoopia (elektromagnetilise kiirguse ja molekulide vastasmõju) meetodid. Väljapääsu võti on toodud eelmises alajaotuses, kust selgus vajadus luua kiraalsetele molekulidele kiraalne keskkond, nagu loetletud kromatograafia näited, või püüda määrata enantiomeere diastereoisomeeria kaudu, nagu seda tehakse tüüpiliselt röntgenstruktuuranalüüsis.

TMR kasutamise variante kiraalsete molekulide määramiseks võiks alustada laialdaselt levinud ravimi – ibuprofeeni näitel. Kiraalne ibuprofeen (2-(4-isobutüülfenüül)-propioonhape) on asendamas vana hästituntud mittekiraalset aspiriini, kuid kuni viimase ajani müüakse ibuprofeeni kui ratseemilist segu. Samas on teada, et ravitoimega on ainult *S*-isomeer. Juhtivad ravimitootjad väidavad end ümber lülituvat kiraalse *S*-isomeeri ainutootmisele. Huvi pakuks, kas see uuendus on jõudnud juba Eesti apteekidesse. TMR eksperiment seisneb ibuprofeeni lahuse mõõtmises, kus lisaks ibuprofeenile on lisatud mingit kiraalset amiini. Kuna kiraalse amiini ja ibuprofeeni enantiomeeride assotsiatsioonikonstandid on põhimõtteliselt erinevad, siis on lootus näha mõnede ibuprofeeni kiraalsele tsentrile lähedaste aatomite TMR signaalide erinevust. Joonisel 3 on toodud Tallinna Farmaatsiatehase poolt turustatava ibuprofeeni  $^{13}\text{C}$  tuumade TMR spekter deuterometanooli lahuses.  $^{13}\text{C}$  TMR spektri interpreteerimist hõlbustab asjaolu, et igast sümmeetria põhjal mitteekvivalentsest süsiniku aatomist saame eraldi terava signaali. Joonisel on näidatud signaalide kuuluvus konkreetsetele ibuprofeeni molekuli süsiniku aatomitele, kuid selle spektri järgi pole võimalik otsustada ibuprofeeni enantio-meeride olemasolu üle lahuses, sest enantiomeeride signaalid langevad täpselt kokku. Pärast kiraalse *S*-1-(1-naftüül)etüülamiini lisamist nihkuvad ibuprofeeni signaalid sagedusteljel ning kiraalse tsentri lähedaste süsiniku aatomite C-1 ja C-3 signaalid lõhenevad kaheks võrdse intensiivsusega komponendiks, näidates et tegemist on ratseemilise ibuprofeeniga. See peaks Tallinna Farmaatsiatehase ibuprofeeni kasutatavaile peavalutajatele põhjustama täiendavat peavalu. Lohutuseks võib öelda, et mõningate seisukohtade järgi puhta *S*-ibuprofeeni kasutamine ei ole õigustatud, kuna ta nagunii makku jõudes soolhappe toimel kiiresti ratsemiseerub. Aga ka seda oletust saaks hõlpsasti TMR spektroskoopia abil kontrollida.



Joonis 3. Ibuprofeeni  $^{13}\text{C}$  tuumade TMR spekter deuterometanooli lahuses. Iga mitteekvivalentne süsiniku aatom annab terava signaali. Kogu spektri ulatus on 0,00017 % (170 ppm, 21 000 Hz)  $^{13}\text{C}$  tuumade keskmisest resonantsagedusest (125 MHz), üksikute joonte laius on alla 1Hz. Punaselt on näidatud C-1 ja C-3 signaalid pärast *S*-1-(1-naftüül)etüülamiini lisamist. Spekter näitab, et tegemist on ratseemilise ibuprofeeniga.

Populaarseteks reagentideks polaarsete enantiomeeride eristamiseks on nn kiraalsed keemilise nihke reagentid, mis koosnevad lantaniidide (euroopium, praseodüüm, üterbium) kompleksidest mitmesuguste kiraalsete polaarsete ühenditega. Taolise kompleksi lisamine uuritava polaarsete aine lahusele põh-

justab enantiomeersetel molekulidel erinevaid keemilise nihke muutusi, võimaldades selle läbi avastada ja määrata enantiomeeride suhtelisi kontsentratsioone. Kahjuks on taoliste reagentide kasutusvõimalused tänapäeva tugeva magnetväljaga TMR spektrometrites üsna piiratud dünaamilistest vahetusprotsessidest tingitud spektrijoonte laienemise tõttu.

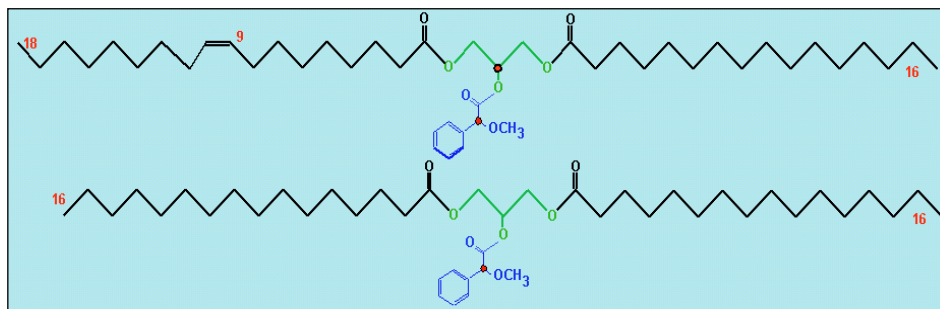
Ibuprofeenis on polaarne karboksüülrühm, mis assotsieerub mitmesuguste polaarsete kiraalsete ühenditega. Aga mida teha siis, kui meid huvitaval ainel puuduvad polaarsete rühmad? Näiteks võiks tuua kõige lihtsama kiraalse küllastatud süsivesiniku, mille kiraalsesse tsentrisse on seotud -H, -CH<sub>3</sub>, -C<sub>2</sub>H<sub>5</sub> ja -nC<sub>3</sub>H<sub>7</sub>. See süsivesinik on 3-metüülheksaan, kus enantiomeeride eripöörangute erinevus on kindlasti nullilähedane, kuid eristamine siiski TMR spektroskoopia abil võimalik. Abiks tulevad siin tsüklodekstriinid, põhjata kausi kujulised 6, 7 ja 8st glükoosi (kiraalsest!) ringist moodustunud makrotsükliid, mille omadused ja kasutusvõimalused vääriavad omaette ülevaadet. Tuleb välja, et isegi kiraalsed süsivesinikud külastavad lahuses tsüklodekstriinide kausse, kusjuures ilmneb enantiomeeride erinev käitumine tsüklodekstriinide koopa suhtes, mis avaldub TMR spektrites süsivesinike vastavate aatomite keemiliste nihete erinevustes.

Kolm ülaltoodud näidet enantiomeeride diferentseerimiseks TMR spektroskoopia abil võimaldavad määrata enantiomeeride olemasolu ja nende suhet uuritavas proovis, kuid reeglina ei võimalda määrata enantiomeeride absoluutset konfiguratsiooni. Absoluutse konfiguratsiooni määramiseks tuleb enantiomeeridest sünteesida diastereoisomeerid, kus lisatava molekuli konfiguratsioon on eelnevalt teada ning tuleb tagada tingimused, mis välistavad lisatava molekuli ratsemisatsiooni. Saadud diastereoisomeeride keemiliste nihete erinevus on tavaliselt suurem kui eelpoolkirjeldatud dünaamiliste eksperimentide puhul. Tagasi pöördudes ibuprofeeni juurde on kõige lihtsamaks diastereoisomeeride saamiseks ibuprofeeni esterdamine kiraalse alkoholiga. Kui valida selleks närimiskummis kasutatav mentool, milleks on ainult üks kaheksast võimalikust mentooli isomeerist, saame diastereoisomeeride segu. Selle segu kõik vastavad süsiniku aatomid peale *m*-aatomite (joonis 3) annavad eraldi signaalid, kusjuures maksimaalne signaalide eraldatus suureneb 1,8 hertsilt 48 hertsini. Ka mentoolist saame nüüd eranditult kõigist süsiniku aatomitest 2 komplekti signaale ning maksimaalne erinevus on siin veelgi suurem – 72 hertsit.

Eeldusel, et oleme võimelised identifitseerima diastereoisomeere, lahendub üheselt uurimise all oleva molekuli absoluutne konfiguratsioon. Kõige populaarsemateks diastereoisomeere moodustavateks agentideks on osutunud aromaatsed ringe sisaldavad reagentid, sest aromaatsete ringide kaugmõju efekt on suhteliselt lihtne ennustada lähtudes asjaolust, et aromaatsete ringide tasapinna kohal olevate aatomite varjestus suureneb. Meiepoolne panus põhineb pikaajalisel uurimistööl diastereoisomeeride TMR spektroskoopia alal, eriti <sup>13</sup>C TMR spektroskoopia kaudu. <sup>13</sup>C TMR kaasamine absoluutse konfiguratsiooni määramise võimaldab üheselt kahedimensionaalse Fourier teisenduse spektrite kaudu määrata ka kõigi <sup>1</sup>H tuumade keemilised nihked nende keerulistest spin-spin interaktsioonidest komplitseeritud spektritest [Pehk jt, 1993]. Tulemuseks on palju kordi suurem lähtebaas mitte ainult <sup>1</sup>H keemiliste nihete, vaid ka <sup>13</sup>C keemiliste nihete näol, mille kasutamise detailne kirjeldamine sõltub konkreetsest probleemist ning väljub käesoleva ülevaate raamidest. Siinkohal piirduks vaid ühe näitega rasvade kiraalsuse vallast. Kui

ajalukku siirduda, siis Nobeli keemialaureaadi P. Karreri orgaanilise keemia õpikus konstateeritakse, et hoolimata potentsiaalsest võimalusest pole õnnestunud looduslikes rasvades avastada optilist aktiivsust. Rasvad on glütserooli ning pika mittehargnenud ahelaga karboonhapete estrid (joonis 4), mille kiraalsus saab olla tingitud erinevatest rasvhapetest rasva molekulis. Nii on 1,3-dipalmitiin mittekiraalne, sest glütserooli ainukese potentsiaalselt kiraalse aatomiga on seotud 2 ühesugust happejääki. 1-palmitoüül-3-oleüülgütserool on seevastu põhimõtteliselt kiraalne, sest nüüd on glütserooli keskmise süsiniku aatomi küljes neli erinevat asendajat. Samas on lootusetu taolise rasva molekuli kiraalsust määrata eripöörangu järgi. TMR meetodi rakendamiseks esterdasime glütserooli C-2 hüdroksüüli kiraalse metoksümandelhappega. 1,3-dipalmitiini puhul saame seega ühe kiraalse tsentriga molekuli, mille 2 palmitiini ahelat muutuvad mittekvivalentseteks, andes mõlema ahela aatomitele põhimõtteliselt erinevad keemilised nihked. 1-palmitoüül-3-oleüülgütserooli esterdamisel saame diastereoisomeerid, ning ratseemilise lähtesegu puhul on meil nüüd molekulis kaks paari erinevaid rasvhappejääke, milledest kõige lihtsam on ära tunda oleiinhappe topeltsidemega seotud aatomid. Eksperiment näitab, et 12(!) sideme kaugusel glütserooli kiraalsest C-2 aatomist asuvate olefiinsete süsiniku aatomite keemilised nihked on mõõdetatavalt erinevad 0,000002 % võrra. Teoreetiline mudel võimaldab määrata, kumb rasva enantiomeer prevaleerib mõõdetavas segus.

Autori uuringud kiraalsete molekulide absoluutse konfiguratsiooni määramise alal on olnud seotud mitmete põhiliselt Eestis läbiviidud kiraalsete molekulide sünteesi ja eraldamisega seotud uurimisprojektidega. Siinkohal võiks loetleda asümmeetrilist oksüdatsiooni, kiraalsete ravimite ja steroidide sünteesi, ensümaatilisi reaktsioone ning prostaglandiinide alaseid uuringuid. Võib väita, et ilma TMR uuringuteta oleks loetletud projektide realiseerimine muutunud äärmiselt problemaatiliseks, samas on TMR spektroskoopia rakendamine nende projektide käigus võimaldanud välja selgitada uusi seaduspärasusi kiraalsete molekulide absoluutse konfiguratsiooni määramiseks TMR spektroskoopia kaudu.



Joonis 4. 1,3 -Dipalmitiini metoksümandelhappe ester (alumine struktuurvalem, happejääkidel mustad, glütseroolil rohelised sidemed ja aatomid) esineb kahe enantiomeerina, sest ainuke kiraalne tsester (punane) pärineb metoksümandelhapest; 1-palmitoüül-3-oleüülgütserooli metoksümandelhappe ester (ülemine struktuurvalem) esineb 2 diastereoisomeerina, millest kumbki annab 2 enantiomeeri.

## KIRJANDUS

Aav, R., Kanger, T., Pehk, T., Lopp, M. 2000. Synthesis of the AB-Ring of 9,11-secosterols. *Synlett*, 529-531.

Aav, R., Parve, O., Pehk, T., Claesson, A., Martin, I. 1999. Preparation of highly enantiopure stereoisomers of 1-(2,6-dimethylphenoxy)-2-aminopropane (mexiletine). *Tetrahedron: Asymmetry*, 10, 3033-3038.

Bobylova, A. A., Anfilogova, S. N., Belikova, N. A., Pehk, T., Anisimov, A. V. 1999. The addition of sulfur dichloride to bicyclo[2.2.1]hept-2-ene and to bicyclo[2.2.2]oct-2-ene. *Sulfur Letters*, 22, 51-55.

Jäälaid, R., Järving, I., Pehk, T., Parve, O., Lille, Ü. 2001. Short synthesis of novel 9,11-secosterols. *Natural Product Letters*, 15, 221-228.

Kanger, T., Kriis, K., Pehk, T., Müürisepp, A.-M., Lopp, M. 2002. Asymmetric synthesis of novel C<sub>2</sub>-symmetric bimorpholines. *Tetrahedron: Asymmetry*, 13, 857-865.

Paju, A., Kanger, T., Pehk, T., Lopp, M. 2000. Asymmetric oxydation of 1,2-cyclopentanediones. *Tetrahedron Letters*, 41, 6883-6887.

Paju, A., Kanger, T., Pehk, T., Müürisepp, A.-M., Lopp, M. 2002. Asymmetric Oxidation of 3-Alkyl-1,2-cyclopentanediones. Part I. 3-Hydroxylation of 3-Alkyl-1,2-cyclopentanediones. *Tetrahedron: Asymmetry*, 13, 2439-2448.

Paju, A., Kanger, T., Pehk, T., Müürisepp, A.-M., Lopp, M. 2002. Direct asymmetric  $\alpha$ -hydroxylation of 2-hydroxymethyl ketones. *Tetrahedron*, 58, 7321-7326.

Parve, O., Järving, I., Martin, I., Metsala, A., Vallikivi, I., Aidnik, M., Pehk, T., Samel, N. 1999. Lipase-catalysed acylation of prostanoids. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 1853-1858.

Pehk, T., Lippmaa, E., Lopp, M., Paju, A., Borer, B. C., Taylor, J. K. 1993. Determination of the absolute configuration of chiral secondary alcohols; new advances using <sup>13</sup>C and 2D-NMR spectroscopy. *Tetrahedron: Asymmetry*, 4, 1527-1532.

Valmsen, K., Järving, I., Boeglin, W. E., Varvas, K., Koljak, R., Pehk, T., Brash, A. R., Samel, N. 2001. The origin of 15R-prostaglandins in the Carribean coral *Plexaura homomalla*: molecular cloning and expression of a novel cyclooxygenase. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 98, 7700-7705.

Villo, L., Metsala, A., Parve, O., Pehk, T. 2002. Chemical versus enzymatic acetylation of  $\alpha$ -bromo- $\omega$ -hydroxyaldehydes: decyclization of hemiacetals by lipase. *Tetrahedron Letters*, 43, 3203-3207.

*Teaduspreemia tehnikateaduste alal töö*  
*“EESTI KEELE TEKST-KÕNE SÜNTEES” eest*



*Meelis Mihkla*

Sündinud 6.07.1955 Tallinnas  
1973 Tallinna Reaalkool  
1978 Tallinna Tehnikaülikool,  
    automatiseeritud  
    juhtimissüsteemid  
2001 MA, eesti keel, Tartu Ülikool  
1977–1980 Eesti TA Keele ja Kirjan-  
duse Instituudi vaneminsener.  
1981–1992 Küberneetika Instituudi  
Arvutustehnika Erikonstrueeri-  
misbüroo insener-programmeerija.  
Alates 1993 Eesti Keele Instituut:  
haldusdirektor, infotehnoloogia  
töörühmajuh, vanemteadur.  
Rahvusvahelise Foneetikateaduste  
Ühingu liige.  
Avaldanud üle 20 teaduspublikat-  
siooni.



*Arvo Eek*

Sündinud 13.10.1937 Pärnus  
1952 Eidapere 7-klassiline Kool  
1956 Viljandi Pedagoogiline Kool,  
    algkooliõpetaja  
1963 Tartu Ülikool, eesti filoloogia  
1971 filoloogiakandidaat, Eesti TA  
1994 filoloogiadoktor, Tartu Ülikool  
1966–1992 Eesti TA Keele ja Kirjan-  
duse Instituut: nooremteadur, labora-  
tooriumi juhataja, vanemteadur.  
1992–1994 Stockholmi Ülikooli  
külalisuurija foneetika alal.  
Alates 1994 Tallinna Tehnikaülikooli  
Küberneetika Instituudi vanemteadur.  
Rahvusvahelise Foneetikateaduste  
Ühingu liige  
Avaldanud üle 100 teaduspublikat-  
siooni.





### *Einar Meister*

Sündinud 10.10. 1957 Võrumaal  
Viitinas

1973 Viitina 8-klassiline Kool

1977 Tallinna Polütehnikum, elekt-  
roonika-automaatika

1982 Tallinna Tehnikaülikool,  
elektroonika

1998 tehnikateaduste magister, Tal-  
linna Tehnikaülikool

1982–1984 Eesti TA Küberneetika  
Instituudi vaneminsener.

1985–1987 Ajutise teaduslik-tehnili-  
se kollektiivi START teadur.

1988–1989 Eesti TA (nüüd TTÜ)  
Küberneetika Instituudi teadur, alates  
1990 laboratooriumi juhataja.

Rahvusvahelise Foneetikateaduste  
Ühingu liige.

Avaldanud üle 50 teaduspublikat-  
siooni.



### *Heiki-Jaan Kaaley*

Sündinud 19.05.1962 Tallinnas

1980 Tallinna 44. Keskkool

1985 Tartu Ülikool,  
majandusküberneetika

1992 MSc, informaatika, Tartu  
Ülikool

1999 PhD üldkeeleteadus, Tartu  
Ülikool

1985– Tartu Ülikool: teadur, labori  
juhataja, vanemteadur.

Avaldanud üle 20 teaduspublikat-  
siooni.

2002. a on Eesti keeletehnoloogia arengus märkimisväärne – eduka uurimis- ja arendustöö tulemusena on välja töötatud rakendusteks sobiv eestikeelse kõnesünteesi tarkvara. Saavutuse aluseks on eestikeelse kõne foneetilis-fonoloogiliste uuringute tulemuste ja teksti lingvistilise töötamise meetodite oskuslik integreerimine tänapäeva infotehnoloogiliste võimalustega. Eestikeelse kõnesünteesi tarkvara olemasolu avab tee uute kommunikatsiooniteenuste arendamiseks ja kasutuselevõtuks ning on asendamatuks abivahendiks puuetega inimestele suhtlemisel arvutiga.

#### MIKS ON SEE TULEMUS OLULINE?

Info- ja kommunikatsioonitehnoloogia kiire areng viimasel aastakümnel on olulisel määral muutnud meie elu- ning tööstiili – personaalarvuti, Internet ja mobiiltelefon on saanud meie igapäevasteks kommunikatsioonivahenditeks. Tehnoloogiaarendus liigub vaieldamatult arvutiga loomulikus keeles suhtlemise suunas ja *Star Treki* visiooni realiseerumine on suurte keelte (eelkõige inglise, saksa, prantsuse) puhul lähiaastate küsimus. Selline tehnoloogiline progress toob endaga kaasa keelilise diskrimineerimise – keeled, millel puudub vastav tehnoloogiline tugi, so. kõnesüntees ja -tuvastus, pole samaväärselt kasutatavad tuleviku infotehnoloogilises keskkonnas. Paratamatult tingib see keele järk-järgulise asendumise erinevates ühiskonnaelu valdkondades mingi teise, tugevama keelega. Sellist ohtu väiksematele keeltele ennustas 1992. a Euroopa Komisjoni XIII peadirektoraadi tellimisel valminud nn Danzini raport<sup>1</sup>; UNESCO andmetel häviv maailmas iga kuu keskmiselt kaks keelt<sup>2</sup>, hinnanguliselt on 100 aasta pärast maailmas kasutusel vaid 50–10%<sup>3</sup> täna eksisteerivast enam kui 6000 keelest.

Kui sada aastat tagasi oli keele säilimise tingimuseks kirjakeele tekkimine, siis nüüd on selleks saamas keele arvutitoe, st keeletehnoloogia olemasolu<sup>4</sup>.

Ka eesti keel kuuluks nende ohustatud keelte hulka, kui keeletehnoloogilist uurimis- ja arendustööd Eestis ei tehtaks.

Loodud kõnesünteesi tarkvara on eesti keele arvutitoe üheks oluliseks komponendiks.

#### EESTIKEELSE KÕNESÜNTEESI ARENG

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

1997. a alustati uuringuid difoonidel baseeruva kõnesüntesaatori väljatöötamiseks. DIFOONID on inimkõne segmendid, mis koosnevad kahest järjesti-

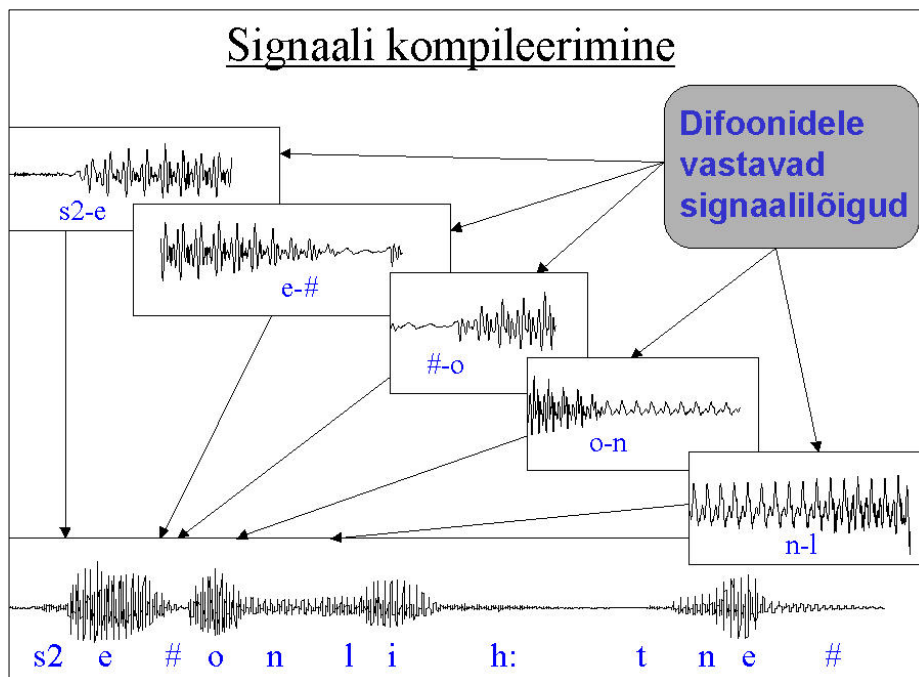
<sup>1</sup> Towards a European Language Infrastructure. Report by A. Danzin and the Strategic Planning Study Group for the Commission of European Communities (DG XIII). 31 March 1992.

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

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

<sup>4</sup> H. Õim 2001. Keeletehnoloogiast ja eesti keelest. – Keel ja Kirjandus 2001, nr 7, lk 499-501.

kusest häälikust – nende algus fikseeritakse esimese hääliku stabiilse osa keskel ja lõpp järgmise hääliku stabiilses osas. Seega sisaldavad difoonid loomulikke häälikutevahelisi üleminekuid, mis lihtsustab nende rittaühendamist ja kokkusobitamist (vt joonis 1). Difoonide andmebaasi loomisel on lähtunud eesti vokaalide [Eek, Meister, 1998] ja konsonantide [Eek, Meister, 1999a] akustilis-pertseptiivsetest omadustest ning eesti keele foneetilisest andmebaasist [Eek, Meister, 1999b] esitatud hääliku-, rõhu- ja prosoodilise süsteemi foneetilis-fonoloogilistest kirjeldustest. Eesti keele difoonide andmebaas hõlmab kõiki võimalikke häälikuühendeid: konsonant-vokaal, vokaal-konsonant, vokaal-vokaal, konsonant-konsonant, paus-vokaal, paus-konsonant, vokaal-paus, konsonant-paus – kokku umbes 2000 difooni [Mihkla jt, 1998].



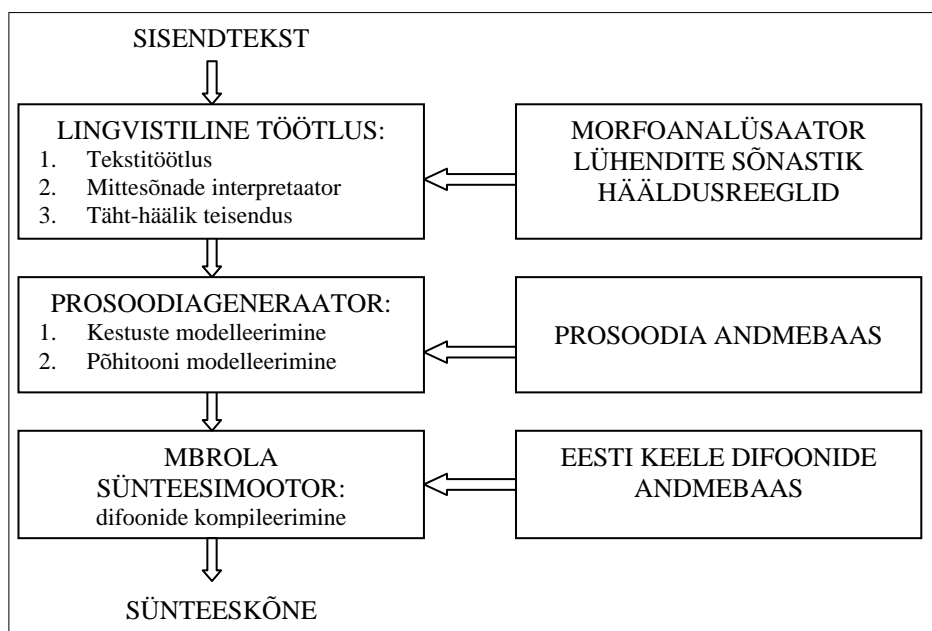
Joonis 1. Kõnesünteesil difoonide põhjal kõnelaine kompileerimine.

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

Kuid kõnesünteesiks ei piisa ainult difoonide andmebaasist ja MBROLA algoritmist. Vajalikud on veel kaks moodulit: sünteesitava teksti lingvistiline töötlus ja prosoodiageneraator.

Eestikeelse tekst-kõne süntesaatori [Mihkla jt, 1999a; 1999b] struktuur on esitatud joonisel 2.

LINGVISTILISE TÖÖTLUSE käigus teisendatakse ortograafiline tekst hääldustekstiks. Kuigi kirjutatud tekst on eestlasele kergesti hääldatav, valmistab see raskusi nii mitte-eestlasele kui ka arvutile, sest eesti kirjaviis ei ole täiesti fo-



Joonis 2. Eesti keelse tekst-kõne süntesaatori struktuurskeem.

foneetiline. Kirjapildis ei ole 2. ja 3. välde üldjuhul eristatavad, eristamata on palataliseeritud konsonandid palataliseerimata konsonantidest ja palju muud. Lisaks välte ja palatalisatsiooni märkimisele leitakse lingvistilise töötlemise käigus ka liitsõnapiirid, sõnarõhud ja silbipiirid – need on vajalikud prosoodiageneraatori tööks (joonis 3). Kirjalikes tekstides esineb ka suur hulk tähejärjendeid ja märke, mis enne süntesaatorile edastamist tuleb kas sõna- või tähthaaval lahti kirjutada. Lingvistilise töötlemise põhimooduliks on OÜ Filosoft poolt loodud eesti keele morfoloogiline analüsaator [Kaalep, Vaino, 2001].

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

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

## Lingvistiline töötlus

Sisendtekst:

See on lihtne, sisesta tekst ja käivita  
süntees.

Lingvistilise töötluse väljund:

s2e\_on lih:tne3\_slisesta tek:st\_j7a k{ivita  
syntee:s

Joonis 3. Teksti lingvistilise töötluse näide.

## Prosoodia modelleerimine

s2 80	t 60	
e 150 0 129 66 131 100 122	e 85 0 126 33 128 100 127	s 60
# 2	k: 160	y 70 0 110 100 109
o 75 0 122 66 127 100 126	s 65	n 65 0 109 100 108
n 100 0 126 100 119	t 220	t 100
l 60 0 119 100 124	# 100	e 80 0 114 66 117 100 115
i 85 0 124 33 127 100 124	j7 50 0 120 100 121	e: 165 0 115 100 102
h: 205	a 55 0 121 66 122 100 115	s 100
t 100	k 60	
n 55 0 107 100 103	{ 65 0 121 66 125 100 124	
e3 70 0 103 100 100	i 65 0 124 100 121	
# 300	v 60 0 121 100 117	
s1 80	i 80 0 117 100 113	
i 65 0 134 66 138 100 137	t 180	
s 60	a 70 0 103 100 100	
e 100 0 133 100 126		
s 65		
t 100		
a 70 0 115 100 110		

Automaatselt  
genereeritud  
prosoodilised  
parameetrid:  
**hääliku kestus**  
**põhitooni**  
**kontuur**

Joonis 4. Kõne prosoodilise struktuuri modelleerimine.

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

#### KES KÕNESÜNTEESI KASUTAVAD?

Eestikeelse kõnesünteesi tarkvara on tasuta vabalt kasutatav mitteäri- ja mittesõjalistel eesmärkidel. Seda on laialdaselt levitatud nägemispuuetega arvutikasutajate hulgas. Eesti Pimedate Liidu ja Põhja-Eesti Pimedate Ühingu kaudu on tasuta jagatud 100 sünteesitarkvaraga CD-ROMi, üle saja korra on seda allalaaditud Internetist (<http://www.phon.ioc.ee/synt>).

Eriti oluline on eestikeelse kõnesünteesi tarkvara kasutuselevõtt nägemispuuetega laste õpetamisel Tartu Emajõe Koolis, sest seni kasutusel olnud soomekeelne kõnesüntees võis negatiivselt mõjutada laste keelelist arengut.

#### TULEVASED RAKENDUSED

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

#### KAS EESTIKEELNE KÕNESÜNTEES ONGI NÜÜD VALMIS?

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

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

#### KOKKUVÕTTEKS

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

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

Eestikeelse kõnesünteesi tarkvara kasutavad laialdaselt Eesti nägemispuuetega inimesed.

#### KIRJANDUS:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Teaduspreemia arstiteaduse alal*  
**GENOOMIÜRINGUTE eest**



*Andres  
Metspalu*

Sündinud 11. märtsil 1951 Salla vallas Virumaal

1969 Rakke Keskkool  
1976 Tartu Ülikool, arstiteaduskond  
1979 bioloogiakandidaat, Ukraina TA Molekulaargeneetika Instituut  
1980 Eesti teaduspreemia  
1999–2000 WHO Lyoni Rahvusvahelises Vähiuurimiskeskuses (IARC) külalisteaduri auhind (Lyon, Prantsusmaa)  
2001 Eesti Punase Risti III klassi teenetemärk  
2002 Prantsusmaa teaduspreemia Prix de la Garantie Medicale et Chirurgicale

Euroopa Inimesegeneetika Ühingu (ESHG) Nõukogu liige, Ameerika Inimesegeneetika Ühingu (ASHG) liige jpt teaduslike ühingute ja nõukogude liige.

1976–1980 nooremteadur TÜ molekulaarbioloogia uurimisgrupis; 1981–1982 uurimistööl Columbia ja Yale Ülikoolis; 1982–1984 vanemteadur TÜ molekulaarbioloogia laboratooriumis; 1985–1992 TÜ ÜMPI geeni ja ekspressiooni laboratooriumi juhataja. 1986–1992 Eesti Biokeskuse teadusdirektor. Alates 1992. aastast Tartu Ülikooli professor, biotehnoloogia õppetooli juhataja. Aastatel 1993–1994 külalisprofessor Baylor'i Meditsiinikolledžis (Houston, USA).

Avaldanud üle 60 teaduspublikatsiooni.



Asudes kirjutama tutvustust nelja viimase aasta teadustööst inimese genoomi uurimisel, tekib paratamatult võrdlus suusavõistlusega, kus pärast pikka ringi metsas sõidab võistleja korraks staadionile, kus rahva silme all vaheaeg võetakse, et siis jälle metsa kaduda ja allesjäänud kilomeetrid teravas konkurentsis neelata. Need neli aastat, mis hindamist leiavad, toetuvad muidugi palju pikemale perioodile. Minul algas see 1970. aastal, kui mind teise kursuse arstitudengina kutsus enda juurde molekulaarbioloogia uurimisrühma toonane Tartu Riikliku Ülikooli arstiteaduskonna dotsent Artur Lind. Ajaloo huvides lisan, kolmanda aasta aspirant Richard Villems oli seal juba ees! Kuigi teatud hetkel tekitas arsti valge kitli lumm minus kõhklusi laboris alustatud tee suhtes, aitas edasi Arturi elutark lause, et üks kirurg rohkem või vähem ei tähenda Eestile midagi, aga üks arstiharidusega molekulaargeneetik on haruldus ka 25 aasta pärast.

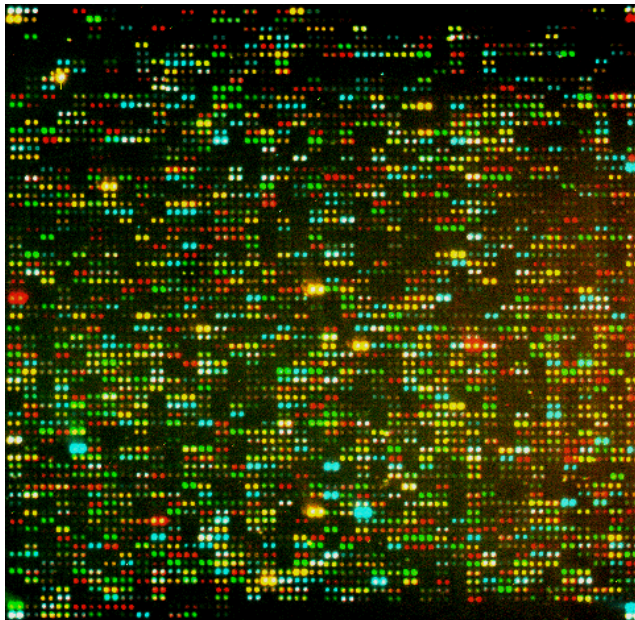
Aeg läks ruttu ja nüüd tagasi vaadates ongi need neli viimast aastat kõige produktiivsemad ja märgivad teatud järgu lõppu ja uue algust minu teadlaserajal.

Mida siin esile tuua? Et mõista, miks ma just valisin sellise teema (inimese genoom) ja projektid (geenianalüüsi tehnoloogia, mutatsioonid haigusgeenides, genoomi geneetiline analüüs), peab seda selgitama maailma geeniuringute taseme ja arengu kontekstis. Ülemaailmne inimese genoomi projekt oli andnud tohutult palju uut informatsiooni mitte ainult inimese genoomi, vaid ka terve rea teiste evolutsiooniliselt oluliste organismide kohta. Inimese genoomist oli leitud *ca* 1000 geeni, mis põhjustasid mõnda haigust, olgugi et harva ettetulevat. Minu arstihariduse taust kiskus mind alati meditsiiniliste teemade juurde, kuid alles nüüd tekkis võimalus geenitestide abil neid haigusi diagnoosida. Kuid USAs, Suurbritannias, Prantsusmaal või Hollandis tehtud mutatsiooni-analüüse ei saanud otse kanda üle eestlastele, sest eri populatsioonidel on mutatsioonide sagedus ja ka osaliselt nende spekter erinev. Seega tuli uurida mutatsioone neis geenides Eestis ja need tulemused omasid peale teadusliku uudsuse ka rakenduslikku väärtust, sest saadud informatsioon leidis kohe kasutamist Tartu Ülikooli Kliinikumi Ühendlaboratooriumis DNA testide näol. Klassikaline näide uue informatsiooni kohesest rakendamisest haigeveodis juures.

Mutatsiooni-analüüs viis meid õige ruttu uue probleemi ette. Nimelt on enamus inimese genee suhteliselt "suured", sisaldades 10–80 valku kodeerivat ala ehk eksonit. Igaüks neist võib sisaldada mutatsiooni, kuigi ühel patsiendil on neid enamasti ikkagi ainult üks. Peale selle on hukutavaid mutatsioone ka eksonitevahelistes alades (ehk intronites) ja reguleerivates alades, mis asuvad geeni ees ja taga. Inimesed töötasid ja mutatsioone leiti aina juurde. Näiteks tsüstilist fibroosi tekitavas geenis (CFTR) on leitud üle 1000 mutatsiooni. Olemasolevad meetodid olid sobivad mõne üksiku mutatsiooni analüüsiks korraga. Tihti tuli töös kasutada radioaktiivseid molekule, mis nõudis eriruume ja jääkide käitlemist. Oli vaja midagi muud, sellist meetodit, mis võimaldaks analüüsida tuhandeid mutatsioone korraga tuhandetes geenides. Sellisest otsesest vajadusest tulenevalt arendasime uue tehnoloogia nimega APEX. Tegemist on mikrokiibiga, kuhu saab kinnitada tuhandeid sünteetilise DNA molekule, mis paarduvad patsiendilt eraldatud DNAGA nii, et selle sünteetilise DNA pikendamisel ühe nukleotiidi võrra (kas A, C, G, või T) saame teada, kas patsiendi geenis on mutatsioon või mitte. See tehnoloogia osutus nii võimsaks, et

4 aastat tagasi loodud geeniettevõtte AS Asper ([www.asperbio.com](http://www.asperbio.com)) tegutseb tõusvas joones tänini. Tegemist on justkui õpiku näitega tehnoloogiasiidest.

APEXi tehnoloogia loomine mutatsioonianalüüsiks oli alles esimene samm. Selgus, et paljudel haigusjuhtudel on tegemist täiesti uute mutatsioonidega, mida selles perekonnas polnud veel ette tulnud ja selle leidmiseks on vajalik kõigi geenis olevate nukleotiidide järjestamine. Inimese genoom järjestati geel-elektroforeesil põhineva tehnoloogiaga, kus analüüsi aeg on pikk ja käsitööd palju. Mikrokiip lubab analüüsi aega tunduvalt lühendada, samal ajal suurendades tundlikkust ja läbilaskevõimet, mis kokkuvõttes tuleb ka oluliselt odavam. Tuumorivalgu p53 geeni järjestamine mikrokiibil tõestas, et see lubab mitte ainult tuntud geeni uuesti järjestada, vaid suudame ka leida tuumori biopsia materjalist vähki tekitava mutatsiooni, kui neid vähirakke on ainult 5% normaalsete rakkude taustal.



Sellel DNA mikrokiibil on kujutatud inimese 22. kromosoomi ühenukleotiidsete markerite analüüs – piltlikult öeldes on tegemist 22. kromosoomi “portreega”, mis on igal inimesel individuaalne. Selline analüüs võimaldab määrata, milline paljudest võimalikest geenivariantidest (haplotüüpidest) konkreetsel inimesel esineb. Geenivariandist omakorda sõltub, kas konkreetne ravim seda patsienti aitab või mitte.

Edasised arengud inimgenoomi uurimisel vihjasid võimalusele, et geneetiline informatsioon pärandub põlvest põlve suurte püsivate fragmentidena ehk haplotüübi blokkidena. Kuna selleks hetkeks (aasta 2000) oli ainult inimese kromosoom 22 täielikult järjestatud, siis koostöös Sangeri keskusega Inglismaal, mis on suurim genoomiuuringute keskus Euroopas, analüüsisime terve 22 kromosoomi ulatuses – 33 miljonit nukleotiidi – neid haplotüübi blokke mitmel eri rahval. Selgus väga huvitav ja fundamentaalne tõsiasi – blokkide piirid olid eri rahvastel samad ja blokkide pikkus kromosoomi lõikes erinev. See oli Eesti Geenivaramut silmas pidades erakordselt tähtis avastus, mis piltlikult näitas, et Eestis ja eestlase geeniuuringute andmete põhjal loodud geenitestid või uued ravimid toimivad kõikidele Euroopa päritolu inimestele.

Kokkuvõttes viisid need genoomi alusuuringud ja geenianalüüsi tehnoloogia loomine Geenivaramu projekti edukale stardile, mis omakorda loob täiesti uued võimalused inimese genoomi süvauuringuteks. Usun, et 10 aasta pärast saab rääkida juba nendest tulemustest.

#### KIRJANDUS

Dawson, E., Abecasis, G.R., Bumpstead, S., Chen, Y., Hunt, S., Beare, D.M., Pabial, J., Dibling, T., Tinsley, E., Kirby, S., Carter, D., Papaspyridonos, M., Livingstone, S., Ganske, R., Lõhmussaar, E., Zernant, J., Tõnisson, N., Remm, M., Mägi, R., Puurand, T., Vilo, J., Kurg, A., Rice, K., Deloukas, P., Mott, R., Metspalu, A., Bentley, D.R., Cardon, L.R., Dunham, I. 2002. A first-generation linkage disequilibrium map of human chromosome 22. *Nature*, 418, 544-548.

Kurg, A., Tõnisson, N., Georgiou, I., Shumaker, J., Tollett, J., Metspalu, A. 2000. Arrayed primer extension: Solid phase four-color DNA resequencing and mutation detection technology. *Genetic Testing*, 4(1), 1-7.

Remm, M., Metspalu, A. 2002. High-density genotyping and linked-isequilibrium in the human genome using chromosome 22 as a model. *Current Opinion in Chemical Biology*, 6, 24-30.

Tammur, J., Sibul, H., Ustav, E., Ustav, M., Metspalu, A. 2002. A bovine papillomavirus-1 based vector restores the function of the low-density lipoprotein receptor in the receptor-deficient CHO-IdIA7 cell line. *BMC Molecular Biology*, 3, 5.

Teder, M., Klaassen, T., Oitmaa, E., Kaasik, K., Metspalu, A. 2000. Distribution of the CFTR gene mutations in cystic fibrosis patients from Estonia. *J. of Medical Genetics*, 37 (<http://jmedgenet.com/cgi/content/full/37/8/e16>).

Tensing, K., Pata, I., Wittig, I., Wehnert, M., Metspalu, A. 1999. Genomic organization of the human Complex I13kDa subunit gene NDUFA5. *Cytogenetics and Cell Genetics*, 84, 125-127.

Tõnisson, N., Kurg, A., Kaasik, K., Lõhmussaar, E., Metspalu, A. 2000. Unravelling genetic data by arrayed primer extension. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, 38 (2), 165-177.

Tõnisson, N., Zernant, J., Kurg, A., Pavel, H., Slavin, G., Roomere, H., Meiel, A., Hainaut, P., Metspalu, A. 2002. Evaluating the arrayed primer extension resequencing assay of TP53 tumor suppressor gene. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 99, Issue 8, 5503-5508.

*Teaduspreemia aeo- ja bioteaduste alal Peipsi järve uurinuid käsitlevate monograafiate:*  
"LAKE PEIPSI. GEOLOGY"., "PEIPSI", "LAKE PEIPSI. FLORA AND FAUNA" ja "LAKE PEIPSI. METEOROLOGY, HYDROLOGY, HYDROCHEMISTRY" eest

*Juta Haberman* (teine vasakult)

Sündinud 06.07.1933 Pärnumaal,  
Koonga vallas  
1952 Pärnu Lydia Koidula nim  
Keskool  
1957 Tartu Ülikool, bioloog-zoo-  
loog  
1974 bioloogiakandidaat, Eesti  
Teaduste Akadeemia  
Alates 1963 Eesti Teaduste Aka-  
deemia (praegu EPMÜ) Zooloogia  
ja Botaanika Instituut: laborant,  
aspirant, nooremteadur, alates 1978  
vanemteadur.  
Avaldanud üle 100 teaduspublikat-  
siooni.

*Avo Miiðel* (neljas vasakult)

Sündinud 11.05.1933 Tallinnas  
1952 Tallinna Reaalkool  
1957 Tartu Ülikool,  
geoloogiainsener  
1968 geoloogia-mineraloogia-  
kandidaat, Eesti Teaduste  
Akadeemia  
Alates 1957 Eesti Teaduste Aka-  
deemia (praegu Tallinna Tehnika-  
ülikooli) Geoloogia Instituut: noo-  
remteadur, aspirant, vanemteadur,  
teadussekretär, juhtivteadur,  
praegu vanemteadur.  
Avaldanud üle 100 teaduspublikat-  
siooni.

*Tiiina Nõges* (kolmas vasakult)

Sündinud 24.05.1957 Viljandis  
1975 C. R. Jakobsoni nimeline Vil-  
jandi 1. Keskkool, matemaat-  
ika-füüsika eriklass  
1981 Tartu Ülikool, bioloog-mik-  
robioloog, *cum laude*  
1989 ökoloogiakandidaat, Moskva  
Loomade Evolutsioonilise  
Morfoloogia ja Ökoloogia  
Instituut  
Alates 1981 Eesti Teaduste Akadee-  
mia (praegu EPMÜ) Zooloogia ja Botaanika  
Instituut: insener, noo-remteadur,  
alates 1990 vanemtea-  
dur.  
Avaldanud üle 90 teaduspublikat-  
siooni.

*Ervín Pihu* (viies vasakult)

Sündinud 15.02.30 Võrumaal, Vars-  
tu vallas  
1949 Võru Keskkool  
1955 Tartu Riiklik Ülikool, bio-loog-  
zooloog, *cum laude*  
1961 bioloogiakandidaat, Eesti  
Teaduste Akadeemia  
2001 Valgetähe V klassi teenete-märk  
Alates 1955 Teaduste Akadeemia  
(praegu EPMÜ) Zooloogia ja Botaanika  
Instituut: aspirant, insener,  
nooremteadur, vanemteadur.  
Avaldanud üle 200 teadusliku ja po-  
pulaarteadusliku töö.



*Anto Raukas* (esimene vasakult)

Sündinud 17.02.1935 Tartus

- 1953 Tartu I Keskkool
- 1958 Tartu Ülikool, geoloogia, *cum laude*
- 1962 geoloogia-mineraloogiakandidaat
- 1973 geoloogia-mineraloogiadoktor
- 1977 Eesti Teaduste Akadeemia korrespondentliige
- 1980 professor
- 1980 Karl Ernst von Baeri preemia
- 1987 teeneline teadlane, Teaduste Akadeemia tegevliige
- 1991 ja 1996 Eesti Vabariigi teaduspreemia
- 1998 Valgetähe III klassi teenetemärk ja Eerik Kumari looduskaitsepreemia
- 1999 valiti Eesti XX sajandi saja suurkuju hulka

Aastast 1965 Teaduste Akadeemia (praegu TTÜ) Geoloogia Instituudi kvaternaargeoloogia sektori (osakonna) juhataja, aastast 1993 ka Eesti Mereakadeemia professor.

Avaldanud ligikaudu 2000 teaduslikku ja populaar-teaduslikku tööd.

Kui seda metsa ees ei oleks, kuuleks Peipsi järve kohinat. Nii kirjutab Juhan Liiv oma noorusmälestustes. Kohin jääb Peipsit saatma veel aastatuhandeteks, kuid kohinast hoopis tähtsam on see, et järve vesi jääks puhtaks ja kalagi järve elama. Võiks arvata, et Peipsi järv on küllalt suur, et inimtegevusele vastu seista. On ju temast pindalalt Euroopas üle vaid Laadoga, Äänisjärv ja Vänern. Kuid maailmas on temast suuremaid järvi 52 ja paljud neist lootusetult reostunud. Seega Peipsigi on haavatav ja möödunud aastakümnetel on tema kehasse ja hinge löödud raskeid haavu. Sellele on kaasa aidanud Pihkva, Tartu, Oudova ja teised linnad ning tugev põllumajandusreostus Velikaja, Emajõe, Rannapungerja ja teiste Peipsisse suubuvate jõgede kaudu, aga samuti Peipsile põhjakaare tuultega kantud Eesti ja Balti soojuselektrijaamade suits. Hirmu tekitab ka Peipsile lähenev põlevkivi kaevandamine, mis põhjavee kaudu järve mõjustab. Asja tüsistab see, et Peipsi järv pole päris meie oma. Suurem osa järvest kuulub Venemaale, kus valitsev vaesus ei luba järve korralikult hallata ega ka uurida.

### PEIPSI UUENEVAS EUROOPAS

Peipsi järv on suur väärtus, sest puhta vee osatähtsus maailmas aasta-aastalt suureneb. Peipsi vett ei vajata ainuüksi Narva hüdrojaama tööhoidmiseks ning Eesti ja Balti soojusjõujaama katelde jahutamiseks, vaid tal on oluline tähtsus ka Kirde-Eesti elanike joogiveena. See kohustab meid Peipsi loodulikku seisundit hoolikalt jälgima ja kaitsma. Madalaveelise Peipsi põhiprobleem on vee kvaliteet, mis nõukogude okupatsiooniaastatel oluliselt halvenes. Peipsi vett mõjutavad Eesti, Läti ja Venemaa, mis nõuab head riikidevahelist koostööd, et säilitada seda unikaalset veekogu puhtana. 1992. aastal taastasid Eesti ja Venemaa riigipiiri Peipsi järvel ja selle valgalal, mistõttu keskkonnaseirealane koostöö ja teaduslikud ühisuuringud katkesid. 20. augustil 1997 sõlmiti kooskõlas ÜRO Euroopa Majanduskomisjoni piiriveekogude konventsiooniga Eesti ja Venemaa valitsustevaheline piiriveekogude kaitse ja säästliku kasutamise kokkulepe ja 1998. a alustas tööd piiriveekogude ühiskomisjon, millega loodi juriidiline ja poliitiline alus heaks koostööks. Kahjuks on tulemused loodetust tagasihoidlikumad.

Ühinemine Euroopa Liiduga seab Eesti riigile ka Peipsi osas ilmselgeid lisakohustusi nii administratiivselt, loodushoiuliselt, majanduslikult kui sotsiaalselt. Peipsi on aastasadu olnud tähtsaks kultuurilahkmeks ja ta kujuneb Euroopa Liidu rangelt valvatavaks idapiiriks. Eesti Põllumajandusülikooli Zooloogia ja Botaanika Instituudi ning Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituudi poolt suunatud ja paljude vabariigi asutuste töötajate ühistöös valminud monograafiade seeria on teinud Peipsist Euroopa kõige paremini uuritud suurjärve. Teaduslikuks uurimiseks oli Peipsi oma liigirikka flora ja fauna poolest heaks mudelobjektiks laiaulatuslikumate fundamentaalteaduslike järelduste tegemiseks, eeskätt võrdluses maailma teiste suurte järvedega. Üheks jätkuks ongi suuresti sama kollektiivi poolt koostatud ja juba 2003. aastal ilmuv monograafia "Võrtsjärv".

### PEIPSI KALADEST JA TEISTEST SELGROOGSETEST

Bioloogilise tootlikkuse poolest on Peipsi teistest Euroopa suurjärvedest vaieldamatult kõige heldem. Eriti rikkalik on ta põhjaloomastik ehk zooben-

tos. Kalatootlikkusest (saagid tavaliselt 7000–10000 t ehk 20–28, parimatel aastatel kuni 31 kg/ha aastas) ületab Peipsi naabruses asuvaid suurjärvi Laadogat ja Äänisjärve koguni kümnekond korda. Sellest kalakogusest saadakse 45–50% Peipsi Eesti-poolses osas, ülejäänud kuulub idanaabrile. Peipsi peamised tönduskalad on tint, kelle aastasaak on olnud viimaseil kümnendeil ametlikel andmeil enamasti 1500–3000 t, koha (900–1300 t), ahven (800–1200 t), särg (500–800 t), latikas (400–800 t) ja haug (200–400 t). Teisejärgulised tönduskalad on siig (20–50 t) ja luts (30–50 t) [Pihu, Kangur, 2001].

Veel 15–20 aasta eest oli ka rääbis üks Peipsi tähtsamaid tönduskalu (saak 1987. aastal 3271 t), kuid järve kiirenev eutrofeerumine (vee rikastumine toiteainetega), kudemistingimuste halvenemine ja koha kui olulise vaenlase arvukuse tõus viisid rääbisevarud madalseisu, nende taastumist on vaevalt loota.

Teine oluline muutus Peipsi kalanduses, sedapuhku väga positiivne, oli kohavarude väljatulek kriitilisest olukorrast öitsenguseisundisse. Enne sõda ja sellele järgnenud kümnendil kuulus koha järves tähtsate tönduskalade hulka (saak reeglina 200–300 t aastas), ent seejärel sattusid tema varud tugeva mutnikupüügi tagajärjel ligi kolmeks kümnendiks ohtlikku madalseisu, saak langes ajuti kuni 8 tonnini aastas. Mutnik on mootorvintsiga tõmmatav peen-kala püügiks kohandatud lestanooda moodi püümis, kus noodatiibu asendavad mitmesaja meetri pikkused veoköied, mille külge on kalu peletava mudapilve tekitamiseks seotud võrguräbalad. Eesti kalateadlased (Zooloogia ja Botaanika Instituudist) tõestasid mutnikupüügi kahjulikkuse ja veensid selles lõpuks ka Venemaa kolleege. Ühisel jõul õnnestus 1974. aastast alates hakata seda järk-järgult piirama. Kui 1966. aastal töötas Peipsil 137 mutnikut (neist Eesti poolel 77), siis tosinkond aastat hiljem langes see arv 40ni (kummaski riigis 20). Kohamaimude kaitseks tõsteti ka mutnikupära võrgusilma suurust 10–12 mm-lt (möödetuna sõlmest sõlmeni) 20–40 mm-le. Töndusliku suremuse järsk langus avas kohale võimalused oma sigimispotentsiaali realiseerimiseks. Alates 1983. aastast hakkasid kohasaagid Peipsis kiiresti kasvama, saavutades mullu maksimumi (1924 t). Praegu on koha muutunud Peipsis üheks tähtsamaks tönduskalaks ja peamiseks eksportartikliks.

Koha öitsengule aitas tõhusalt kaasa ka Peipsi ise, omandades üha enam hea kohajärve tunnuseid. Neist on üks olulisemaid vee läbipaistvuse vähenemine. Kui aastail 1950–1970 oli vee läbipaistvuse näitaja (nn Secchi ketta näit) Peipsi põhjapoolses osas (nn Suurjärves) 1,8–5 m ja lõunapoolses Pihkva järves 0,4–2,6 m, siis viimasel kümnendil oli see vastavalt 1,2–1,7 ja 1–1,2 m. Sogasevõitu vähese läbipaistvusega vesi suurendab marjateradest koorunud õrnade kohavastsete ellujäämist, vähendades ultraviolettkiirguse kahjulikku mõju. Suuremad röövtoidulised kohad aga teavad hästi, et sogases vees on kergem kalu püüda: vee väike läbipaistvus soodustab neil saagile lähemale hiilimist.

Eesti kalauurijate initsiatiivil toimunud kalanduse ümberkorraldamine on tunduvalt tõstnud Peipsi kalatoodangu väärtust. Võttes algseisuks aastad 1981–1985 (mil koha arvukus alles hakkas tõusma), selgub, et viimase 17 aasta jooksul on Peipsi kalasaagi rahaline väärtus kasvanud praeguste kalahindade järgi arvestatult kokku vähemalt 230 mln krooni võrra, millest

Eestile tuleb 100 mln krooni ümber. See on teadlaste sihikindla tegevuse tulemus.

Peipsi on elupaigaks lindudele, kahepaiksetele, roomajatele ja imetajatele. Peipsi asub põhjapoolse päritoluga veelindude tähtsal Ida-Atlandi rändeteel, pakkudes soodsaid peatuspaiku ja ka pesitsemisvõimalusi paljudele linnuliikidele. Peipsi rannavöönd on väga oluline väikeluige, laululuige, rabakana, suur-laukhane ja sõtka sügisene peatumisala. Samuti on järv tähtis läbirändavatele lindudele, seda eriti sügisel. Veelindudest on arvukamad läbirändajad kaurid, tuttvart, aul, vaerad ja sõtkas [Luigujõe, Kuresoo, 2001].

N. Laanetu [1999, 2001] andmeil on Peipsi järves ja selle lähiumbruses arvukamad kahepaiksed tähnikesilik, kärnkonn, rohukonn, rabakonn ja rohelised konnad, roomajatest aga arusisalik ja rästik. Järvega seotud poolveelistest imetajatest on arvukas saarmas. Naarits on Ameerikast pärit sugulasliigi mingi röövtegevuse tagajärjel jäänud üpris harvaks. Mink on peaaegu täielikult hävitanud ka ondatra asurkonna nii Peipsi ümbruses kui ka kogu Eestis. 1950. aastail Eestisse taasasustatud kobras on muutunud üsna arvukaks. Mügri on Peipsi ümbruses tavaline, ent vesimutti kohtab siin harva.

#### MUUTUV VEETASE

Ago Jaani on selgitanud, et Peipsi veetasemetel on selge 22–33 aastane perioodilisus, mis võib olla seotud Päikese aktiivsuse muutumisega. See on võimaldanud prognoosida Peipsi veetaseme muutusi kuni aastani 2035. Suurt muret kohalikele elanikele valmistavad kevadised tulvaveed. Kõrgeima veetaseme juures (31,76 m) oli Peipsi pindala 4330 km<sup>2</sup> ja vee hulk järves 32,128 km<sup>3</sup>, madalaima veetaseme juures (28,83 m) vastavalt 3480 km<sup>2</sup> ja 20,98 km<sup>3</sup>. Seega muutub Peipsi pindala 850 km<sup>2</sup> ja vee hulk 11,15 km<sup>3</sup> ulatuses. Peamised üleujutatavad alad on Emajõe suudmeala (üle 200 km<sup>2</sup>) ja Lämmijärve idaosa (üle 130 km<sup>2</sup>). 1924. aasta suur üleujutus sundis Nina küla elanikele uue asulapaiga valiku ja randadele kaitsevööndite rajamise. Narva jõe väljavoolutingimuste parandamiseks likvideeriti jõe lähtes olnud liivamadalikud ja 1929. a alanud süvendustöödega rekonstrueeriti jõesängi ligikaudu 10 km ulatuses. 1940. a sündmuste tõttu töid ei lõpetatud ja sellest tulevalt on randade murrutus kohati praegugi tugev. Purustustele aitab kaasa Peipsil sageli esinev rüsi jää. Peipsi rannavööndis toimuvate muutuste jälgimiseks rajati 1981. a Geoloogia Instituudi poolt polügoonid Remnikul, Sillal ja Kurul, järgnevatel aastatel polügoonide hulka suurendati kogu Peipsi Eesti rannavööndis ning need lülitati riiklikku seirevõrku. Suurimad purustused toimuvad kõrge veeseisu ja tugevate lõunatuulte korral Peipsi põhjarannal. Aastail 1987–1992 taandus rannaastang Remnikul 6 ja Alajõel 4 meetrit.

Peipsi tsükliliselt korduvad madalseisud seavad ohtu järve kalavarud. Peipsi veetaseme reguleerimise otstarbekuse ja sellega seonduvate probleemide läbitöötamiseks moodustas Eesti Vabariigi Keskkonnaministeerium 1992. a ekspertkomisjoni koosseisus A. Jaani, A. Mäemets, E. Pihu, A. Raukas (esimees) ja E. Tavast, kes oma järeldustes rõhutas, et:

ei tohi lubada järve veetaseme alanemist või alandamist madalamale kui 30 m, mis tooks kaasa väga tugeva hüpertrofeerumise terves järve ökosüsteemis,



hävitades reliktised, nõudlikud ja väärtuslikud floora ja fauna esindajad, sealhulgas siiglased;

soovitatud veetaseme reguleerimine ei ole energeetika, transpordi, kalakasvatuse ja randade erosiooni seisukohast vastunäidustatud;

väljavoolutingimuste stabiliseerimiseks tuleks koheselt taastada möödunud sajandi 30ndatel aastatel ehitatud reguleerimisrajatised, mis on setetega täitunud, osaliselt lagunened ja ei täida enam oma ülesandeid;

veetaseme stabiliseerimiseks ja ohtlike madalseisude vältimiseks tuleks Narva jõe ülemjooksule umbes 18 km Narva jõe lähtest ehitada paisregulaator, et uputada Omuti karestikud kui ohtlik lobjakaummistuse piirkond ja rajada eeldused laevaliikluseks Narvast Tartu ja Pihkvani;

läbirääkimistesse on vaja kaasata probleemi tundvaid Venemaa spetsialiste, et saavutada mõlemaid riike huvitav lahendus järve veetaseme reguleerimise, kalamajanduse, vee puhtuse ja edasise kasutamise ning tulevaste ühisuuringute osas.

Peab kahetsusega märkima, et positiivseid nihkeid selles valdkonnas pole, kuid valminud monograafiad annavad edasisteks läbirääkimisteks hea teadusliku aluse.

#### PEIPSI KUJUNEMISEST JA ARENGUST

Peipsi nõgu piiritleb üldjoontes vana reljeefi 40 meetri samakõrgusjoon, kuid sellest rajatähisest on Peipsi möödanikus ulatunud märksa kaugemale. Taanduva mandrijää serva ees laiunud ja liustiku poolt üles paisutatud veekogud olid aga lühiajalised ning nende rannajooned seetõttu üsna raskesti määratletavad. Pärast liustiku taandumist Soome lahte langes veetase järsult ja Holotseeni alguseks oli järv kahanenud kitsukeseks veekoguks vaid Nüüdis-Peipsi põhjaosas, nõo lõunaosa oli aga valdavalt kuiv maismaa. Me ei taha lugejat koormata järve arengu detailidega ja seetõttu piirdume vaid raamatutes "Peipsi" ja "Lake Peipsi. Geology" toodu loeteluga. Neis raamatutes tuuakse põhjalik ülevaade Peipsi nõo ja rannikualade geoloogilisest ehitusest ja arenguloost, aluspõhjageoloogiast ja tektoonikast, Kvaternaariajastu setetest ja maakoore jääajajärgsetest liikumistest, järve põhjareljeefist, põhjasetetest, nende keemilisest ja mineraalsest koostisest, randade ehitusest ja murrutusest, Peipsisse suubuvate jõgede orgude ehitusest, tuuletekkelistest pinnavormidest jpm. Oluliseks täienduseks varasemale teabele oli koos Stockholmi Ülikooli professori Tom Flodeni ja doktorant Monica Bjerkusega tehtud akustilise pidevsondeerimise uuringud, mis andsid Peipsi järves tunduvalt suurema pinnakatte paksuse, kui seda varem oletati. Järve keskosas ja kohati ka lääneranniku lähedal on selle paksus üle 50 meetri, mis on liusiku kulutusnõgudele ebatavaline. Kui jätta kõrvale järve loode- ja põhjaosa, kus pinnakatte paksus ulatub vaid 10 meetrini, siis mujal on neid setteid kõikjal vähemalt 20 meetri jagu. Sealhulgas on jääjärvelist savi ning järvelist liiva ja muda Peipsi keskosas koguni 34–36 meetrit. Geofüüsikalised uuringud täpsustasid oluliselt ka aluspõhja pealispinna reljeefi, näidates seal rea vagumusi ja lohke. Piirissaarest kümnekond kilomeetrit põhja pool kerkib aga aluspõhi meretasemeni ja lubab oletada, et saar paikneb aluspõhjakõrgendikul.

Tektoonilised liikumised Peipsi nõos pole veel täiesti selged, kuid selge on nende erinevus Peipsi põhja- ja lõunaosas, mistõttu järveveed valguvad lõunasse ja katavad üha uusi alasid. Kui 1796. aastal oli Piirissaare pindala 20,08, siis praegu on see kõigest 7,5 ruutkilomeetrit ning saare pindala väheneb ka tulevikus. Holotseeni alguses, 10 000 aastat tagasi oli Optjoki jõe suudmes veetase praegusest üle 10 m madalamal. Emajõe suudmealal olev Akali noorema kiviaja asulakoht on kaetud kuni 3 m paksuse turbakihi. Hoopis halvemini on läinud mitmel teisel paigal. Näiteks Ozolitsa saarele ehitati 1458. a. kirik, mille varemed on praegu järvepõhjas 2,5 m sügavuses vee all. Järve tulevase kontuure on võimalik ette prognoosida.

#### PEIPSIS ON MAAVARASID JA HÄID PUHKUPIIRKONDI

Tehtud uuringud andsid uut teavet ka Peipsi maavarade optimaalseks kasutamiseks. Ehitusliiva suurimad maardlad asuvad Kodavere (varud umbes 2 725 000 m<sup>3</sup>) ja Piirissaare ümbruses (varud ligikaudu 2 100 000 m<sup>3</sup>), Meerapalu ja Podborovje madalal, Sigovetsi neeme ja Salu saare lähedal, Talabski saarte piirkonnas ning Velikaja deltaalal. Liivad on kahjuks enamasti peeneteralised ning vajavad enne ehituses kasutamist fraktsioneerimist ning rikastamist. Väga suured on järves sapropeeli varud ja neid kasutatakse Värskas ravimudana. Värskas lahes on uuritud varud 3,52 ja prognoosvarud 44,5 milj m<sup>3</sup>. Suured varud on ka Raskopeli lahes jm. Kogu Peipsi nõos leidub erineva koostisega mineraalvett, sealhulgas Värskas, Alatskivil ja Mehikoormas. Kuivõrd tervisevee ja ravimudade läheduses on ka kaunist puhkuseks sobivat randa ning ehitusgeoloogilised tingimused on head, siis saab siia ehitada mitmekülgset ravi ja puhkust pakkuvaid pansionaate ja kämpinguid. Ala sobivuse puhkuseks määravad rannavööndi geoloogiline ehitus, taimkate, eksponeeritus päikese ja valdavate tuulte suhtes, samuti tervisemuda või -vee olemasolu. Tehislikest mõjudest tuleks nimetada sanitaartehnilisi tingimusi, juurdepääsude olemasolu, olmet ja tööstusobjektide lähedust, mis määravad ühtlasi vee puhtuse. Premeeritud töödetsükliks on toodud rannatüüpide ja puhkuse-sobivuse kaardid.

#### PEIPSI HÜDROKEEMIA JA REOSTUSKOORMUS

Peipsi oma ligi 40-aastase veekeemia ja -bioloogia ning enam kui 100-aastase hüdroloogilise andmerekaga pakub suurepäraselt võimalust veeökosüsteemide pikaajaliste muutuste selgitamiseks. Peipsi järve Eestile kuuluv valgala koos Võrtsjärve valgala moodustab 40% Eesti maismaaterritooriumist. Peipsi vesi seguneb lainetuse mõjul põhjani, vee viibeag on Peipsis keskmiselt 2 aastat. Madalate järvede olukord sõltub suurel määral nende valgalt (Peipsil 47 800 km<sup>2</sup>) saabuvast reostuskoormusest ning selles osas on viimasel kümnendil toimunud suured muutused seoses sotsialistliku majandussüsteemi kokkuvarisemisega. Viimastel aastakümnetel täheldatud kliima soojenemisel võib veeökosüsteemidele olla eutrofeerumisele sarnane mõju. Varasem jääminek ja vegetatsiooniperioodi pikenemine võivad põhjustada veekogude produktiivsuse tõusu, soojalembeste sinivetikate osakaalu suurenemist ning vee-õitsengute sagenemist. Kliimamuutused põhjustavad nihkeid ka valgala soojus-, vee- ja ainebilansis ning mõjutavad järve veerežiimi ning reostuskoormust. Eriti märgatav on veebilansi muutuste mõju madalates järvedes nagu

Peipsi, kus see mõjutab tugevasti veealuseid valgustingimusi, põhjasetete resuspensiooni, toitainete vabanemist setetest ja denitrifikatsiooni. Nimetatud tegurid on olulised veekogu toiduahela alglüli – vetikate ehk fütoplanktoni hulga ja koosseisu mõjutajad.

Valdava osa Peipsi reostuskoormusest annavad jõed, eriti Velikaja ja Emajõgi, mille kaudu saabub järve enam kui 80% kogu fosforist ja lämmastikust. Emajõgi toob Peipsisse ca 70% Eestile kuuluva valgala reostuskoormusest ning Velikaja kannab järve umbes 65% kogu Peipsisse saabuvatest toiteainetest [Stålnacke jt, 2002]. Peipsi reostuskoormus suurenes kiiresti 1980ndatel aastatel, mil hoogustus väetiste kasutamine. Väetised olid odavad ning neid kasutati rohkem kui põllukultuurid neid ära tarvitada suutsid, tihti külvati väetist lennukitelt külmunud maale ja lumele. Suur osa väetisainetest sattus sulamisvetega jõgedesse ning järvedesse. Veekogude reostamisele aitas kaasa ka maaparandus. 1990ndate aastate alguses toimus muutunud sotsiaalpoliitilistes tingimustes kogu majanduse ja eriti põllumajanduse kiire langus. See väljendus selgelt Eesti valgalalt saabuva reostuskoormuse vähenemises, mis kestis 1990ndate aastate keskpaigani [Loigu jt, 1999; Blinova, 2001]. 1990ndate keskpaigaks oli sotsiaalmajanduslikest põhjustest tingitud reostuskoormuse langus peatunud ning Peipsisse saabuv toiteainete hulk sõltus eelkõige hüdroloogilistest tingimustest. Veekogudesse saabuva reostuse puhul tuleb lämmastikku rohkem põllumajandusest ja fosforit inimasulatest, viimase allikana on esikohal fosfaate sisaldavad pesupesemisvahendid. Ilmselt ei olnud muutused inimeste olmes nii dramaatilised kui põllumajanduses, sest lämmastikukoormus kahanes tunduvalt järsemini kui fosforikoormus. Selle tulemusel muutus lämmastiku ja fosfori tasakaal (kahanes N/P suhe) nii Peipsisse voolavates vetes kui ka järvevees. Siiski ei ole Peipsi järve vees fosfori ja lämmastiku hulga ja vahekorra muutuste trendid nii tugevad kui sissevooludes. Võimalik, et olukorda järves stabiliseerib sisekoormus. Madalal tuule poolt segatud järves, kus veemass on pidevas kontaktis settega, võib ökoloogilise seisundi kujunemisel olla oluline osa fosfori vabanemisest settest. Madalaveelistel aastatel on väliskoormus küll väiksem, kuid lainetus segab madalamas vees põhjaseteid intensiivsemalt, suurendades nõnda sisekoormust. Musternäiteks oli väga veevaene 1996. aasta, kui Peipsi väliskoormus oli nii N kui P osas väike, kuid fosfori kontsentratsioon järvevees kõrge. Suhteline sügavus (keskmise sügavus: ruutjuur pindalast) on Peipsis väike, muide, isegi väiksem kui teada-tuntud madalal Võrtsjärves. Seetõttu on ka tuulest tingitud vee ning põhjasetete segunemine intensiivne. Suuremad ebakõlad valitsesid koormuste ja järvesiseste kontsentratsioonide vahel just 1990ndate alguses, alates 1998. aastast on eriti fosfori osas kooskõla parem. Võimalik, et madalaveelistel aastatel (1996, 1997) vabanes järv märkimisväärselt hulgast setetes akumulunud fosforist – see kanti vette ülessegatuna järvest välja. Edaspidi paistab järv koormuse muutustele kiiremini reageerivat. Samas näitavad Vene uurijatega isiklikul suhtlemisel saadud avaldamata andmed, et Velikaja ja teiste suuremate Vene jõgede poolt Peipsisse kantav fosfori hulk ei pruugigi olla 1990ndatel aastatel vähenenud, vaid võib olla isegi kasvanud. Nende andmete tõlgendamisel peab aga arvestama, et Vene poolel mõõdeti kuni viimase ajani vaid fosfori ja lämmastiku mineraalvormide kontsentratsioone ning ainete üldhulgad on leitud kaudsete arvutuste teel. Mineraalvormide kontsentratsioon ei pruugi alati

üheselt seotud olla kogu N ja P hulgaga. Venemaal on jõgede seire ka ajaliselt tunduvalt hõredam (maksimaalselt 4 korda aastas) kui Eestis, kus proove võetakse igakuiselt. Peipsi reostuskoormustest täieliku ja tõese ülevaate saamiseks oleks vaja tunduvalt parandada koostööd ja andmevahetust Venemaaga.

Fosfor ja lämmastik on põhilised taimede, sealhulgas ka vetikate kasvuks vajalikud mineraaltoiteained. Nende ainete hulk ja tasakaal määravad suuresti ära nii vetikate hulga kui ka liigilise koosseisu. Sinivetikatest tingitud veeõitsengud on Peipsis viimastel aastatel sagenenud. Neid põhjustavad potentsiaalselt toksilised sinivetikad, mis reeglina suudavad kasutada atmosfääris küllaldaselt saadaolevat molekulaarset lämmastikku. Lämmastiku kättesaadavate vormide puudumine selliste sinivetikate kasvu ei piira. Nende puhangut soodustab madal lämmastiku ja fosfori suhe järvevees. Sinivetikate, sealhulgas õitsengut põhjustavate vormide ja lämmastikufikseerijate arengut soodustab ka kõrge veetemperatuur ning tuulevaikne ilm. Näiteks erakordselt külm, tuuline ja vihmane 1998. aasta suvi ei olnud sinivetikatele soodne ning nende osa fütoplanktonis oli väike; erakordselt soojal ja tuulevaiksel 2002. aasta suvel ning sügisel oli veeõitseng viimaste aegade tugevaim. Samas ei ole seos ilmastikuga ühene, vee toiteainete sisaldusel on samuti tähtis roll. Mida rohkem on Peipsis fosforit, seda suurem on suvine sinivetikate, sealhulgas lämmastikufikseerijate biomass ja ka nende osa fütoplanktonis. Ka lämmastiku kontsentratsiooni ja N/P suhte langus mõjuvad samamoodi, kuid nende mõju ei ole nii tugev ja usaldusväärne kui fosfori kontsentratsioonil. Seega on kliimatiliste tegurite kõrval just fosforil Peipsi veeõitsengute kujunemisel juhtiv roll ning nende peatamiseks tuleb jälgida, et fosfori sissekanne järve ei tõuseks.

Peipsiga seoses on palju juttu olnud ka sulfaatidest. Lisaks eutrofeerumisele tõusis Peipsis 1970ndatel ja 1980ndatel ka sulfaatide kontsentratsioon, ületades 1950ndate taseme viiekordselt. See lähenes piirile 50 mg/l, mille juures hapnikupuuduses suureneb risk mürgise divesiniksulfiidi ( $H_2S$ ) tekkeks [Nõges, 1996]. Peipsis võib selline olukord kujuneda karmi talve korral põhjalähedases veekihis, juhul kui järve produktiivsus enne jäätumist on olnud kõrge. Praeguseks on  $H_2S$  tekke oht Peipsis võrreldes 1980. aastatega suuresti vähenenud, sest nii sulfaadikoormus kui ka kontsentratsioon järvevees on langenud.

#### KESKEALINE PEIPSI

Kui loodus on suhtunud väikesesse Eestisse ülimalt heldelt ning kinkinud talle peaaegu poole Peipsi järve täie magedat ja suhteliselt puhast vett – loodusvaradest õhu järel olulisemat, on eesti inimese püha kohus seda vara hoida ja austada. Eesti hüdrobioloogid on selle poole vahelduva eduga püüelnud juba 40 aastat. Inimene on väga enesekeskne, järveelanikest huvitab teda vaid kala, keda saab suhu pista ja kelle lupsulöömist on ussileotamise kõrval paadist kena jälgida. Veekogu tervis ja saatus aga otsustatakse inimest palju vähem huvitavate, palja silmaga nähtamatute ning kalast tunduvalt väiksemate veeorganismide poolt. Asja otsustavad vetikad e fütoplankton (suvel  $8 \text{ g m}^{-3}$ ), zooplankton (suvel  $3 \text{ g m}^{-3}$ ), bakterid ( $2,4 \times 10^6$ – $4,6 \times 10^6$  rakku  $\text{ml}^{-1}$ ) ja veekogu põhjaloomastik e bentos ( $13 \text{ g m}^{-2}$ ) [Haberman, 2001; Laugaste jt, 2001;

Lokk, Kisand, 1999; Timm jt, 2001]. Vetikad assimileerivad Päikese energiat ja loovad fotosünteesil orgaanilist ainet (nagu taimed ka kuival maal), ilma milleta pole elu üldse võimalik. Zooplanktonist ja bentosest toituvad kalad, kes jagunevadki planktontoidulisteks (peamiselt tint ja räabis, samuti kõikide kalade maimud) ja bentostoidulisteks (põhiliselt latikas ja kiisk). Kõiki mainitud vee-elanikke on Peipsi järves just nii palju, et teha Peipsist hea kalajärv ja samal ajal ka nii palju, et Peipsit võib veel nimetada mõõdukalt rohketooiduliseks ehk eutroofseks, veel suhteliselt heas seisundis olevaks järveks. Peipsi järve ökosüsteem on veel üsna heas tasakaalus, mistõttu jäävad sellega enam-vähem rahule nii majandusmehed (palju kala) kui ka looduskaitsjad (vesi veel suhteliselt puhas).

Vee-uurijad tavatsevad Peipsi järve võrrelda jõulise, hea ainevahetusega keskea pisut ületanud mehega, kellel on küljes mõned tervisehäädad, kuid toime tuleb ta enesega veel hästi. Järve toimetulekut võib edukalt hinnata temas valdava toiduahela tüübi, st orgaanilise aine (energia) liikumise tõhuse alusel vetikatest kaladesse. Toiduahel algab nii vees kui kuival maal orgaanilist ainet fotosünteesiva taimega, jätkub taimest toituva loomaga ning lõpeb taimtoidulist looma sööva röövloomaga. Suur tähtsus on vetikatest toituvatel pisiloomakestel (zooplanktonil), kes on omakorda ise toiduks kaladele. Mida rohkem jõuab orgaanilist ainet (energiat) vetikatest kaladesse, seda efektiivsem on toiduahel. Kuna toiduahela igalt lülilt läheb järgmisele vaid 10–20% energiat, ülejäänud hajub, siis mida lühem on toiduahel, seda efektiivsem ta on. Peipsi järves domineeribki lühike ning tõhus toiduahel: vetikas > zooplankton > kala, mis sarnaneb kuival maal toimiva toiduahelaga: kartul > siga > inimene. Selline lühike toiduahel iseloomustab häid, mõõduka troofusega järvi, kus vetikate hulgas on piisavalt väikesi (<40 µm), zooplankteritele toiduks sobivaid vetikaid ning kus zooplankterid on piisavalt suured, et üldse vetikaid süüa (tugevalt eutroofsete vete väikesed zooplankterid söövad põhiliselt baktereid) ning olla samal ajal tõhusaks toiduks suuremaid suutäisi jahtivatele kaladele [Nõges jt, 2001]. Peipsi järve vetikamassist on zooplankteritele söödav umbes 22% (tugevalt eutroofses Võrtsjärves 12%), vetikate produktsioonist jõuab zooplanktonisse 6% (Võrtsjärves 2–3%) ning kaladesse 0,4–0,5% (Võrtsjärves 0,2%). Tuleb lisada, et ka bentostoidulistel kaladel on Peipsis hea söögilaud, sest põhjaloomastiku e zoobentose biomassilt (13 gm<sup>-2</sup>) on Peipsi Põhja-Euroopa suurjärvede hulgas esikohal (40 000 t toorkaalus, sellest 28 000 t kalatoiduna eriti väärtuslik). Eelpoolkirjeldatust tulenevalt on ootuspärane, et Peipsi on üks Euroopa kalarikkamaid järvi.

Keskea kriisid on omased ka veekogudele. Peipsit kimbutavatest hädadest üks suuremaid on viimaste aastate suvedel aset leidnud sinivetikate massiline voamine – õitsemine. Tuulega ranna lähedale aetuna võib fütoplanktoni biomass tõusta kuni 800 gm<sup>-3</sup>. Rannalseisjale tundub nagu oleks järv enesele selga tõmmanud roheliselaigulise sõdurimundri. Selline vetikamass võib põhjustada tugevat õist hapnikupuudust (õösel vetikad ei tooda, vaid ainult tarbivad hapnikku). Kui tuulevaikne ilm, kõrge veetemperatuur ja tugev vee õitsemine kokku langevad, võib see saada saatuslikuks kaladele [Laugaste jt, 2001]. Kõige hilisem näide pärineb 2002. a suvest, mil Peipsi rand oli pikalt kaetud kala (peamiselt kiisa) korjustega.

Kes Peipsi järve vähegi pikemat aega on jälginud, märkab taimestikuga kaetud alade suurenemist, mis on järve selge vananemise (eutrofeerumise) tunnus. Seda seisukohta kinnitab ka taimestiku vohamine jõgede, peamiste järve reostajate, suudmetes. Väga võimsaks on muutunud roostikud: pilliroovarte arv ruutmeetril on 64–84, nende kõrgus 3–4 m. Paljudelt rannalõikudelt on juba võimatu näha Peipsi avarat veevälja [Mäemets, Mäemets, 1999].

Ka bakteritega võiks lood Peipsi järves paremad olla. Igale veekogu tüübile vastab teatud bakterite hulk ja koostis, mis peegeldab veekogu troofsuse astet ja sanitaarset seisundit. Kõige kõrgem on bakterite arvukus järve kõrgeima troofsusega osas – Pihkva järves ( $4,6 \times 10^6$  rakku  $\text{ml}^{-1}$ ), mõnevõrra madalam Lämmijärves ( $3,9 \times 10^6$  rakku  $\text{ml}^{-1}$ ) ja madalaim Peipsi *ss.* põhjaosas ( $2,4 \times 10^6$  rakku  $\text{ml}^{-1}$ ). Bakterite hulk on kõige suurem (kuni  $8,1 \times 10^6$  rakku  $\text{ml}^{-1}$ ) Velikaja jõe suudme lähedal, mis viitab reostusohule Pihkva linna poolt. Ka madal kolitiiter (<1) ja enterokokkide leiud Velikaja ja Emajõe suudmealadel (kuni 200 rakku 10 mls vees) viitavad reovete kandumisele järve [Lokk, Kisand, 1999].

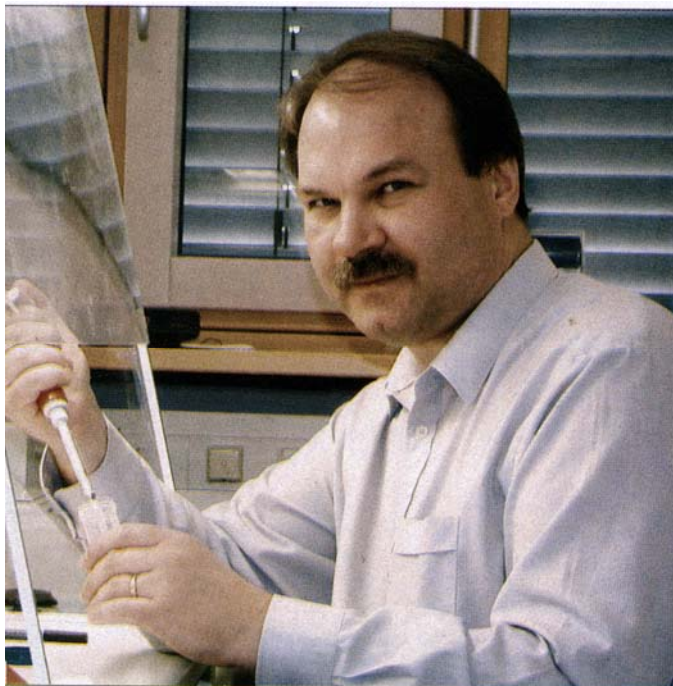
Kui võrrelda 1960ndate ja 1990ndate aastate Peipsi zooplanktonit, siis järve seisundi halvenemist peegeldavaid muutusi leidub sealgi. Järvest on kadunud kaks oligomesotroofsete vete liiki – keriloom *Asplanchna herricki* ja vesikirp *Holopedium gibberum* ning 1960ndail üksikleidudena esinenud eutroofsuse indikaatorliigid, üliväikesed keriloomad *Anuraeopsis fissa*, *Keratella tecta* ja *Trichocerca rousseleti* on muutunud järve lõunaotsas keset suve sagedasteks [Haberman, 1996; 1997; 2001].

## KIRJANDUS

- Blinova, I. 2001. Water quality and pollution load of the rivers of L. Peipsi basin. Riverine load into the L. Peipsi. Nõges, T. (ed.) Lake Peipsi. Meteorology, Hydrology, Hydrochemistry. Tartu : Sulemees, 94-96.
- Haberman, J. 1997. A comparative study of zooplankton in two large lakes of Estonia. Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol., 46, 4, 225-244.
- Haberman, J. 1996. Contemporary state of zooplankton in Lake Peipsi. Hydrobiologia, 338, 113-123.
- Haberman, J. 2001. Zooplankton. Pihu, E., Haberman, J. (eds.) Lake Peipsi. Flora and Fauna. Tartu : Sulemees, 50-68.
- Laanetu, N. 2001. Amphibians, reptiles and mammals. Pihu, E., Haberman, J. (eds.) Lake Peipsi. Flora and Fauna. Tartu : Sulemees, 119-129.
- Laanetu, N. 1999. Kahepaiksed, roomajad ja imetajad. Pihu, E., Raukas, A. (toim.) Peipsi. Tallinn : Keskkonnaministeeriumi Info- ja Tehnokeskus, 172-181.
- Laugaste, R., Nõges, T., Nõges, P., Yastremskij, V. V., Milius, A., Ott, I. 2001. Algae. Pihu, E., Haberman, J. (eds.) Lake Peipsi. Flora and Fauna. Tartu : Sulemees, 31-49.
- Loigu, E., Iital, A., Karlova, S., Leisk, Ü., Pachel, K., Sults, Ü., Trapido, M., Vassiljev, A., Veldre, I. 1999. Peipsi valgla reostuskoormus ja jõgede vee

- kvaliteet. Pihu, E., Raukas, A. (toim.) Peipsi. Tallinn : Keskkonnaministeeriumi Info- ja Tehnokeskus, 66-80.
- Lokk, S., Kisand, V. 1999. Bakterplankton. Pihu, E., Raukas, A. (toim.) Peipsi. Tallinn : Keskkonnaministeeriumi Info- ja Tehnokeskus, 90-96.
- Luigujõe, L., Kuresoo, A. 2001. Birds. Pihu, E., Haberman, J. (eds.) Lake Peipsi. Flora and Fauna. Tartu : Sulemees, 112-118.
- Mäemets, H., Mäemets, A. 1999. Suurtaimed. Pihu, E., Raukas, A. (toim.) Peipsi. Tallinn : Keskkonnaministeeriumi Info- ja Tehnokeskus, 97-107.
- Nõges, T. 1996. Phytoplankton pigments and adenosine triphosphate (ATP) in Lake Peipsi-Pihkva. *Hydrobiologia*, 338, 91-103.
- Nõges, T., Haberman, J., Kisand, V., Laugaste, R., Zingel, P. 2001. Trophic relations and food web structure of plankton community in Lake Peipsi s.s. Pihu, E., Haberman, J. (eds.) Lake Peipsi. Flora and Fauna. Tartu : Sulemees, 74-81.
- Pihu, E., Kangur, A. 2001. Fishes and fisheries management. Birds. Pihu, E., Haberman, J. (eds.) Lake Peipsi. Flora and Fauna. Tartu : Sulemees, 100-111.
- Stålnacke, P., Sults, U., Vasiliev, A., Skakalsky, B., Botina, A., Roll, G., Pachel, K., Maltsman, T. 2002. An assessment of riverine loads of nutrients to Lake Peipsi, 1995-1998. *Archiv Für Hydrobiol. Suppl. Large Rivers*, 141, 437-457.
- Timm, T., Kangur, K., Timm, H., Timm, V. 2001. Zoobenthos. Pihu, E., Haberman, J. (eds.) Lake Peipsi. Flora and Fauna. Tartu : Sulemees, 82-99.

*Teaduspreemia põllumajandusteaduste alal tööde tsikli*  
"OHUSTATUD JA KASVATATAVATE KALALIIKIDE  
GENEETILISTE RESSURSSIDE UURINGUD" eest



*Riho  
Gross*

Sündinud 4.05.1958 Tartus

1976 Tartu 7. Keskkool

1981 Tartu Ülikool, bioloogia

1991 põllumajandusteaduste kandidaat (põllumajandusloomade aretus, selektsioon ja taastootmine), Eesti Loomakasvatuse ja Veterinaaria Instituut

1981–1994 Eesti Loomakasvatuse ja Veterinaaria Instituut: vanem-zootehnik, nooremteadur, teadur, vanemteadur. Alates 1994 Eesti Põllumajandusülikooli loomakasvatuse instituudi vanemteadur. Töötanud külalisedlasena Rootsi, Soome ja Saksamaa teadusinstituutides.

Avaldanud üle 50 teaduspublikatsiooni.





*Tiit  
Paaver*

Sündinud 9.08.1952 Tartus

1970 Tartu 5. Keskkool

1975 Tartu Ülikool, bioloogia

1980 bioloogiakandidaat (geneetika), Leningradi Riiklik Ülikool

1975–1990 Eesti Teaduste Akadeemia (nüüd EPMÜ) Zooloogia ja Botaanika Instituut: insener, aspirant, nooremteadur, vanemteadur, juhtiv teadur. 1990–1994 Eesti Loomakasvatuse ja Veterinaaria Teadusliku Uurimise Instituudi kalakasvatuse osakonna juhataja. Alates 1994 Eesti Põllumajandusülikooli loomakasvatuse instituudi kalakasvatuse osakonna juhataja.

Eesti Kalakasvatajate Liidu asutajaliige ja juhatuse liige EKL loomisest alates. “Eesti Kalakasvataja” peatoimetaja 1997–2002.

Avaldanud üle 50 teaduspublikatsiooni.

## KALAKASVATUS, KESKKONNAKAITSE JA GENEETIKA

Kui meie, teadlased, kõneleme kalakasvatusest, tulevad kuulajal tavaliselt silma ette tiigid, kus kasvatatakse tonnide viisi kala turul müümiseks. Kõigile on mõistetav, et tootmistingimustele sobivate tõugude aretamine ja nende geneetilise potentsiaali ärakasutamine on sellise kalakasvatuse, nagu igasuguse muu põllumajandustootmise võtmeküsimuseks. Seakasvatuskombinaadi laadis intensiivse kalaliha tootmise kõrval hõlmab kalakasvatus aga ka erinevaid väikemajanduse vorme, nagu ilukalade kasvatamine või õngitsemisturism ja isegi otseselt loodushoiule suunatud tootmist, mille juures samuti ei saada läbi geneetikata. Kalakasvatuse oluline ja riikliku kalanduspoliitikaga seotud haru on kalavarude taastootmine – ohustatud või üle eksploateeritud kalaliikide noorjarkude kasvatamine ja loodusesse laskmine inimtegevuse poolt kalavarudele põhjustatud kahjude korvamiseks. Kalakasvatus peidab endas ka ohte loodusele – näiteks inimese poolt asustatud või kalakasvandustest põgenenud “kodustatud” kalade mõju looduslikele kalapopulatsioonidele. Tänapäevase loodushoiu aluseks on loodusliku mitmekesisuse säilitamise nõue. Loomaliikide kaitse peab toetuma nende evolutsioonipotentsiaali tagamisele. Eelkõige tuleb säilitada ja kaitsta evolutsiooniliselt olulisi üksusi (*evolutionary significant unit*, ESUs). Tegeledes globaalsete looduskaitsete probleemidega ja püüdes säilitada väljasuremise ohus liike (näiteks tagada troopiliste vihmametsade liigirikkust), ei saa rahvusvaheline üldsus fikseerida konventsioone iga piirkonna populatsioonide jaoks. Nende säilitamine on kohalik probleem, mis jääb riikide või naaberriikide lahendada. Kuid kogu kasvatatud kalade asustamise poliitika peab toetuma liigi struktuuri tundmisele, mida saab kindlaks teha vaid kogu liigi areaali katva mitmete maade teadlaste koostöö tulemusena ja mille aluseks on geneetilised uuringud.

## KAS KALAKASVATUSE ARENDAMISE POLIITIKAL ON SEOST KALASTIKU KUJUNEMISE AJALOOGA?

Kogu Põhja-Euroopa loodus on kujundatud jääaegade poolt. Jääaegade loodus on alati erutanud inimeste – nii loodushuviliste poisikeste kui halli habemega professorite kujutlusvõimet. Tavaliselt kujutatakse jääaegadest mõeldes ette mammuteid lumel ja karvaseid ürginimesi neid küttimas. Teadlase jaoks peidab jääaegade lugu endas probleeme iga elusorganismi puhul. Meie maa on teatud hetkel olnud otsekui *tabula rasa*, kuhu loodus hakkas kirjutama uusi sõnumeid. Jää alt vabanenud elutu maastiku asustasid järjest uued taime- ja loomaliigid kuni see viis praeguste keerukate koosluste kujunemiseni. Ka kalad ei ela ju jääs – nad vajavad vaba vett ja küsimus, kust tulid mandrijää sulamisel tekkinud Põhja-Euroopa veekogudesse kalad, on tänapäeval rohkem kui akadeemiline probleem. Vastusest sellele küsimusele oleneb kalakasvatuseliku taastootmise strateegia.

Pikka aega olid jää alt vabanenud maade loomastiku kujunemise probleemid rohkem või vähem teaduslike spekulatsioonide mängumaaks. Peamisteks andmete allikateks olid geoloogilised maastiku (jäälüustike ja veekogude paiknemise) rekonstruktsioonid, loomaliikide ja nende liigisiseste vormide ökoloogilised ja morfoloogilised iseärasused ning harvad subfossiilsed luuleiud. Molekulaargeneetika on andnud teadlastele töövahendid, mis võimaldavad hinnata erinevate loomapopulatsioonide sugulust ja teha kindlaks praeguste asurkondade päritoluseid lõuna pool paiknenud refuugiumide populatsioonide

nidega. Samuti lubavad nad mõõta populatsioonide diferentseerumise ulatust ja kaudselt hinnata populatsioonide isolatsiooni aega. Seetõttu on järsult kasvanud teadlaste huvi molekulaarse ökoloogia ja fülogeograafia (teadus, mis uurib liigisiseste fülogeneetiliste liinide geograafilise leviku seaduspärasusi) vastu. Jäaaegadega seotud liigisisese diferentseerumise ning fauna ajaloo teemadel ilmub praegu pidevalt uusi publikatsioone, mistõttu aastavanused artiklid on tihti juba vananenud. Selline arengutempo pole üllatav molekulaarbioloogidele, küll aga on ebatavaline biogeograafia valdkonnas.

#### KALADE GENEETIKA UURINGUD EESTIS

Eestis algasid kalade geneetika uuringud 1960ndatel aastatel Tartus M. Tammeri töödega latika populatsioonigeneetika alal. Esialgu oli valdavaks meetodiks valkude polümorfismi uurimine elektroforeesi abil tärkli- ja poliakrüülamiidgeelis. 1980ndatel kujunes Tartust Zooloogia ja Botaanika Instituudi ja Eesti Loomakasvatuse ja Veterinaaria Instituudi töö tõttu arvestatav kalade geneetika keskus. Tiit Paaver uuris karpkalatõugude ja nende metsiku eellase, sasaani alamliikide ning viker- ja meriforelli populatsioonide geneetilist mitmekesisust, kasutades markeritena polümorfseid valke ja ensüüme. Riho Gross iseloomustas Eestis kasvatatavate karpkalatõugude ja nende ristandite geneetilisi, morfomeetrisi ja kalamajanduslikke omadusi ning koostöös Iisraeli tunnustatud karpkala aretusteadlase prof. G. Wohlfarthiga töötas välja uude meetodika karpkala tõugrühvide kasvuomaduste võrdlevaks hindamiseks geneetiliste markerite abil.

1990ndatel aastatel lubas DNA analüüsi meetodite kiire areng, eeskätt polümeeraasse ahelreaktsiooni (PCR) kasutuselevõtt, minna üle vahetult DNA uurimisele. Kätesaadavaks said erinevad geneetiliste markerite tüübid – emaliinis päranduvad mitokondriaalse DNA geenid, ülimuutlikud mikrosatelliidid, kodeerivate tuumageenide intronite ja eksonite lõigud. Samal ajal kujunes välja Eesti kalateadlaste R. Grossi, T. Paaveri ja A. Vasemägi tihe koostöö teiste Läänemere-äärsete riikide kalade geneetika teaduskeskustega Rootsis (Umeas), Soomes (Helsingis, Oulus), Saksamaal (Münchenis, Berliinis), Taanis (Silkeborgis). Paljude riikide territooriumi katva levilaga loomade fülogeograafia uuringud võivad anda tulemusi vaid paljude maade teadlaste koostöö korral.

#### MIDA ANDSID POPULATSIOONIGENEETILISED UURINGUD LÕHE KASVATUSE JA KAITSE KORRALDAMISELE?

Lõhel on lõhestatud loomus – ühelt poolt on ta kalurite ja kalasportlaste jaoks hinnatud püügiobjekt, teiselt poolt ohustatud ja kaitsealune liik, kolmandaks on ta veel koduloom, keda Lääne-Euroopas kasvatatakse sumpades sadade tuhandete tonnidenä. Looduslikku lõhet tuleb kaitsta, kasvatatud lõhet majandada. Läänemere lõhepopulatsiooni probleemid algavadki sellest, et suurem osa meie vete lõhet pärineb tänapäeval kalakasvandustest. Lõhede kudejõgede tõkestamine elektrijaamade paisudega (Eestis näiteks Narva, Jägala ja Valgejõel) ja reostamine tööstuse heitvetega (Purtse ja Selja jões) vähendas oluliselt siirdekalade loodusliku paljunemise võimalusi. Selle kompenseerimiseks hakati lõhemaimusid kalakasvandustes kasvatama ja loodusesse laskma. Lõhel ja teistel siirdelõhelastel on aga keeruline liigisisene struktuur, mis tuleneb sellest, et nad sünnivad jões, rändavad kaugele avamerre toituma ja tulevad

kudemiseks tagasi samasse jõkke, kus nad sündisid. Seega on igas lõhejões oma populatsioon, mis on teistest geneetiliselt erinev ja kohastunud teatud tingimustele, kuid meres segunevad nad kõik – kasvatatud ja looduslikud, Eesti, Soome jt maade kalad ning satuvad paljude maade kalurite püüki. Kui kalakasvandustes paljundatud lõhesid loodusesse lastakse, on oluline teada, kus on populatsioonide segamise piir, mida ei tohi ületada, ilma et liigi kohastumisvõime saaks häiritud või asustamise tulemuslikkus väheneks. Erinevaid geneetilisi markereid (allosüümid, mitokondriaalne 16S rRNA/ND1 geen, 9 mikrosatelliidilookust, kasvuhormooni geen GH1) kasutades selgitasid Eesti teadlaste osalusega teaduskollektiivid välja lõhe liigisisese hierarhilise struktuuri ja näitasid, kuidas see on tingitud lõhe levila kujunemise jääaegsest ja sellejärgsest ajaloost. Suurimad erinevused on Ameerika ja Euroopa lõhepopulatsioonide vahel. Läänemere lõhe on omakorda eristunud Atlandi Ookeani Euroopa ranniku lõhest ja seejuures on Läänemere lõhe ka geneetiliselt vähem muutlik kui Atlandi lõhe. Läänemeres on Botnia lahe lõhe geneetiliselt kõige erinevam ülejäänud Läänemere lõhedest ja veidi kõrgema muutlikkuse tasemega.

Ilmselt lõhkus mandrijää pealetung lõhe asurkonna mitmeks osaks. Atlandi Ookeani Euroopa rannikule tulid lõhed tagasi arvatavasti praeguse Hispaania piirkonnas asunud refuugiumist. Idapoolsete lõhepopulatsioonide eripära paneb arvama, et kusagil Põhja-Venemaa territooriumil asus omaette refuugium, kust pärast jää taandumist asustati kujuneva Läänemere lõuna- ja idakallas. Sealt võisid kalad levida ka praegustesse suurjärvedesse (Oneega, Laadoga, Saima) ja Valge mere piirkonda. Seevastu Botnia lahte on ulatunud ka Atlandipoolseid mõjusid. Seega ei ole lubatav erinevatest Läänemere regioonidest pärinevate lõhede genofondide segamine.

Allpool Läänemere sisest suurjaotust on diferentseerunud ka erinevate piirkondade ja jõgede populatsioonid. Eestis on näiteks Soome lahte suubuvate väikejõgede lõhe erinev Neeva (ja temast pärinevast Narva) lõhest. Praktilise järeldusena ülaltoodust tuleb meil kaitsta eeskätt Eesti kõige stabiilsemate looduslike lõheasurkondade – Kunda ja Keila jõe lõhe genofondi.

Kuna Eesti jõgedes oli looduslik lõhe muutunud haruldaseks, alustas Põlula Kalakasvatusteskus 1997. aastal Eesti lõhepopulatsioonide taastamist Neeva jõest pärinevate kaladega. Esimeseks taastatavaks lõhejõeks sai Selja jõgi. Sealt vaid kümnekonna kilomeetri kaugusel asub aga Kunda jõgi, kus veel käivad kudemis looduslikud lõhed. Mikrosatelliitide uuringutel põhinev isendite päritolu identifitseerimine (*assignment test*) näitas, et osa Selja jões sündinud noorkaladest olid sarnased Kunda lõhedele – ilmselt kudejõega eksinud vanemate järglased, osa aga Neeva päritolu – asustatud kalade järglased. Järgnevatel aastatel täheldati juba geneetiliste erinevuste kadumist – noorkalade enamus ei olnud kindlalt identifitseeritavad, mis näitab populatsioonide segunemist. Säilinud looduslikest populatsioonidest pärinevatel kudejõega eksinud kaladel võib olla oluline osa hävinud lõhejõgede spontaansel taasasustamisel. Kasvatatud kalade asustamine võib aga põhjustada lõhepopulatsioonide genofondi suuri muutusi. Paraku selgus ka, et vähearvukates populatsioonides, kus järglaskond võib mõnel aastal pärineda vaid mõnelt paarilt või mõnel aastal puududa (nagu Loobu jões), ähvardab lõhet geneetiline vaesumine.

## HARJUSE POPULATSIOONISTRUKTUUR JA KASVATUS

Lõhele sarnane temaatika kordus harjuse uuringute tsüklis. Kalasportlaste meeliskala harjus *Thymallus thymallus* on puhta looduse indikaatorliik. Paljudes Euroopa maades on tema arvukus vähenenud. Eestis on harjus looduskaitse all. Harjusepüügi edendamiseks lasevad kalasportlased teistes maades jõgedesse kasvandustes toodetud harjusemaime. Ka harjuse kasvatamisel ja asustamisel tuleb arvesse võtta liigi kujunemise lugu ja mitte segada erinevatest evolutsioonilistest liinidest materjali. R. Grossi poolt koostöös Müncheneri Tehnikaülikooli teadlastega tehtud uuringud näitasid, et harjuse populatsioonistruktuur Kesk-Euroopa suurte jõgede (Doonau, Elbe, Rein) vesikondades on kujunenud nii ajalooliste (erinevatest jääaja refuugiumitest pärinevate diferentseerunud liinide koloniseerimine) kui tänapäevaste (populatsioonide isolatsioon ja diferentseerumine elupaikade fragmenteerumise tagajärjel) faktorite toimel. Saksamaal arvestatakse seetõttu vesikondade vahelisi geneetilisi erinevusi harjuse kasvatamisel ja asustamisel. Harjusekasvatuse käivitamisel Eestis tuleb lähtuda samast printsüübist.

## KARPKALA ALAMLIIGID JA TÕUD

Esimese kodustatud kala – karpkala *Cyprinus carpio* liigi ja liigisiseste vormide ajalugu on veelgi keerulisem kui lõhel ja harjusel. Euroopa lõunaosas ja Kesk-Aasias elavad metsikud karpkalad e sasaanid, kellest on alguse saanud siinsed kultuurkarpkala tõud. Lõuna-Siberist Vietnamini esineb aga karpkala Aasia vorm, kellest pärineb Hiinas kasvatatav karpkala. Nende kahe alamliigi erinevused on piisavalt suured, andmaks omavahelisel ristamisel heteroosi efekti. Paraku on seda kuritarvitatud, paljudades saadud ristandeid ja luues segapopulatsioone, kus kasulik heteroosiefekt on kaduma läinud. Juba 1970–80ndatel näitasid meie tollased primitiivsed valkude polümorfismi uuringud kahe karpkala alamliigi suuri geneetilisi erinevusi ja vajadust säilitada alamliike puhtana. Samuti ilmnes, et Euroopa karpkala on geneetiliselt vaesunud, pärinedes nähtavasti mõnest ürgse ühise areaali marginaalsest populatsioonist. Nüüd on need oletused leidnud veenvat kinnitust DNA uuringute alusel, mis tehti EPMÜ LKI kalakasvatuse osakonna koostöös Berliini Sisevete Ökoloogia ja Kalanduse Instituudi teadlastega. Saadud tulemused võimaldavad kontrollida kasvatatavate tõugude ja liinide geneetilist puhtust, säilitada kodumaiseid kalatõuge ning on abiks aretusprogrammide kavandamisel.

## GLOBAALNE INFO – LOKAALNE TEGUTSEMINE

Rahvusüleste teadusprobleemidega tegeledes kasutab EPMÜ LKI kalakasvatuse osakond saadud tulemusi Eesti kalakasvatuse heaks. Kasvatatavate kalade populatsioonigeneetika ja ohustatud liikide (tuura, vähi, meriforelli) seisundi uurimustele tugineb “Riiklikku kaitset vajavate ja ohustatud kalaliikide kaitse ja kalavarude taastootmise programm 2002–2010”. Kalakasvatuse osakonna lõheuuringud on aluseks Põlula Kalakasvatusekeskuse töö planeerimisele ja Eesti lõhevarude kaitse korraldamisele. Eesti kalakasvatuse arenguperspektiivide hindamise aluseks on osakonnas koostatud T. Tohverti ja T. Paaveri monograafia “Kalakasvatus Eestis”.

## KIRJANDUS

- Gross, R., Kohlmann, K., Kersten, P. 2002. PCR-RFLP analysis of the mitochondrial ND-3/4 and ND-5/6 gene polymorphisms in the European and East Asian subspecies of common carp (*Cyprinus carpio* L.). *Aquaculture*, 204, 507-516.
- Gross, R., Kühn, R., Baars, M., Schröder, W., Stein, H., Rottmann, O. 2001. Genetic differentiation of European grayling populations across the Main, Danube and Elbe drainages in Bavaria. *J. of Fish Biology*, 58, 264-280.
- Gross, R., Nilsson, J. 1999. Restriction fragment length polymorphism at the growth hormone 1 gene in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and its association with weight among the offspring of a hatchery stock. *Aquaculture*, 173, 73-80.
- Koljonen, M.-L., Jansson, H., Paaver, T., Vasin, O., Koskiniemi, J. 1999. Phylogeographic lineages and differentiation pattern of Atlantic salmon in the Baltic Sea with management implications. *Canadian J. of Fisheries and Aquatic Sciences*, 56, 1766-1780.
- Kupper, P., Paaver, T., Kääri, M. 2000. Noorjärkude asustamise mõju meriforelli kudekarja vanuselisele struktuurile. Eesti VIII Ökoloogiakonverents. Loodusteaduslikud ülevaated Eesti Maa Päeval. Tartu, 110-116.
- Nilsson, J., Gross, R., Asplund, T., Dove, O., Jansson, H., Kelloniemi, J., Kohlmann, K., Löytynoja, A., Nielsen, E.E., Paaver, T., Primmer, C.R., Titov, S., Vasemägi, A., Veselov, A., Öst, T., Lumme, J. 2001. Matrilinear phylogeography of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in Europe and postglacial colonization of the Baltic Sea area. *Molecular Ecology*, 10, 89-102.
- Paaver, T. 1999. Historic and recent records of native and exotic sturgeon species in Estonia. *J. of Applied Ichthyology*, 15, 1766-1780.
- Paaver, T. (koost.) 2002. Riiklikku kaitset vajavate ja ohustatud kalaliikide kaitse ja kalavarude taastootmise programm 2002-2010. Tartu: EPMÜ, 88 lk.
- Tohvert, T., Paaver, T. 1999. Kalakasvatus Eestis. Tartu: Tavita, 183 lk.
- Vasemägi, A., Gross, R., Paaver, T., Kangur, M., Nilsson, J., Eriksson, L.-O. 2001. Identification of the origin of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) population in a recently recolonized river in the Baltic Sea. *Molecular Ecology*, 10, 2877-2882.

*Teaduspreemia sotsiaalteaduste alal uuringute tsükli*  
"OTSESTE VÄLISINVESTEERINGUTE MÕJU SIIRDERIIKIDE  
MAJANDUSE KONKURENTSIVÕIME TÕSTMISEL" eest



*Urmas  
Varblane*

Sündinud 20. juulil 1961 Mõisakülas

1979 Mõisaküla Keskkool

1984 Tartu Ülikool, majandusküberneetika, *cum laude*

1989 majanduskandidaat, Moskva Riiklik Ülikool

Alates 1985. aastast Tartu Ülikooli majandusteaduskond: stažöör-uuriija, assistent, vanemõpetaja, dotsent, professor, rahvusvahelise ettevõtluse õppetooli juhataja, turunduse ja juhtimise instituudi juhataja. 1993–2000 Euroteaduskonna Tartu Keskuse juht ja Euroteaduskonna asedirektor.

Avaldanud umbes 110 teaduslikku tööd, sealhulgas monograafiaid või nende osi 10.

## SISSEJUHATUS

Otsesed välisinvesteeringud on maailmamajanduses suhteliselt uus, kuid samas väga kiiresti kasvav välisurule sisenemise meetod. Ajavahemikus 1982 kuni 2001 on otseste välisinvesteeringute maht maailmas kasvanud 12 korda ja jõudnud juba 7 triljoni USA dollarini. Seetõttu pakuvad nad väga huvitavaid uurimisvõimalusi.

Otseseid välisinvesteeringuid on määratletud erinevalt, kuid põhimõtteliselt on nende puhul ühine olulise omandiõiguse ülevõtmine. Näiteks ühe määratluse järgi: “otsene välisinvesteering on teises riigis asuva ettevõtte asutamine või selle omandiõigusest olulise osa ostmine mingi riigi residentide poolt” [Wells, Wint, 1990]. Seega säilitab investeerija kontrolli investeeritud kapitali üle. Otsene välisinvesteering seisneb sageli firma filiaali loomises või mingi teise firma võtmises oma kontrolli alla.

Otseste välisinvesteeringute põhjuste empiirilisel uurimisel on pikaajalised traditsioonid ja saadud tulemuste alusel on sõnastatud mitmeid teooriaid, mis peaksid kirjeldama, miks välisfirmad valivad selle turule sisenemise meetodi [Lizondo, 1991]. Erinevates teooriates on välja pakutud väga erinevaid põhjendusi – alates firma kasumi ja majandusliku kasvu taotlustest, riski vähendamisest, tootmise mitmekesistamisest ning lõpetades organisatsiooniliste ja keskkonnast tulenevate põhjustega [Varblane, 1996]. Suurem osa teooriatest esitab välisinvesteeringute peamise põhjusena vabaturu tingimuste ebatäiuslikkust, mis tähendab seda, et reaalne vabaturg erineb palju ideaalsest. Enamikul nendest teooriatest on ka mõningane empiiriline toetus. Turutingimuste täiuslikkuse korral puuduksid paljud välisinvesteeringute põhjused. Teisalt on olemas ka teooriad, mis osutavad otseste välisinvesteeringute tekkimise võimalusele täiusliku turu tingimustes. Tunnustatuimaks teooriaks on viimasel kümnendil kujunenud J. Dunningu eklektiline teooria [Dunning, 1981], mille kohaselt on kolm põhjuste gruppi, miks potentsiaalne investor valib otseste välisinvesteeringu. Esiteks peab investoril olema teatud omandieelis sihtriigi turul oma konkurentidega võrreldes (näiteks, monopoolne toode, ainulaadne tehnoloogia, parem turu tundmine, parem marketingi tehnika jne). Teiseks, sihtriigil peab olema teatud asendieelis, et ligi meelitada investorit. See võib olla suur olemasolev või potentsiaalne turg, või tootmisbaas väikeste kuludega eksporditootmise jaoks, madalad transpordikulud sihtriigi turule. Kolmandaks, peab tekkima siseturu loomise efekt, mis suunab investori investeerima ja mitte kasutama teisi turule sisenemise meetodeid.

## OTSESTE VÄLISINVESTEERINGUTE ALASE UURIMISTÖÖ KUJUNEMINE EESTIS

Käesoleva artikli autoril tuli alustada olukorrast, kus Eestis puudus täielikult välisinvesteeringute alane teaduslik uurimistegevus. Tõuke vastava suuna väljaarendamiseks andis koostöö Stockholmi majandusülikooli vastava valdkonna juhtiva spetsialisti prof A. Kokkoga, mis algas 1993. aastal ja kestab siiani. Tema poolt saadetud väga mahuka kirjanduse läbitöötamise tulemusena tekkis sügavam huvi antud valdkonna vastu ja samas oli ka saabunud aeg, mil Eestis algas erastamisprotsess, mis tõi siia märkimisväärset hulgal välisinvesteeringuid. Nii algaski süstemaatiline uurimistöö, mis algul piirdus küll vaid mõnede tagasihoidlike artiklite avaldamisega Eesti väljaannetes. Kuid juba 1996. aastal moodustasime töörühma ja alustasime tihedat koostööd Eesti



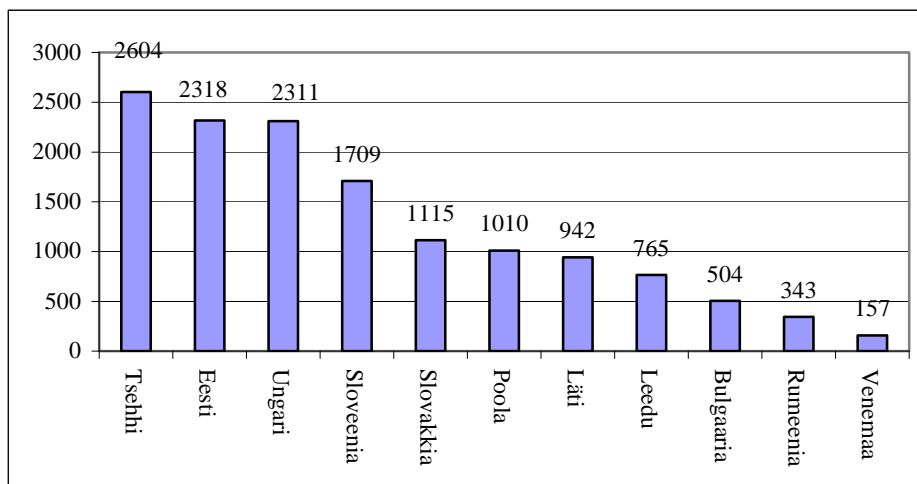
Välisinvesteeringute Agentuuriga. Selle raames oleme alates 1996. aastast regulaarselt läbi viinud küsitlusi välisinvestorite hulgas. Nii on kogutud originaalne andmebaas välisinvestorite kohta, mille vastu tuntakse huvi ka rahvusvahelises ulatuses. Saadud tulemuste alusel valmis 1997. aasta lõpuks esimene kollektiivne monograafia “Otsesed välisinvesteeringud Eesti majanduses”, mis kajastab meie tookordset teadmiste taset [Varblane jt, 1998]. Hiljem on see uurimisrühm tugevnenud, nüüdseks on kaks selle liiget kaitsnud doktorikraadi ja kolm peaksid selleni jõudma tuleva aasta jooksul. Meie rühma uurimistöös on erilist tähelepanu pälvinud välisinvesteeringute motiivide analüüs ja erinevate investorite tüüpide väljaselgitamine. Põhjalikult on käsitletud ka välisinvesteeringute panust restruktureerimise protsessi siirdemajandustes [Varblane, Reiljan, 1999], samuti on püütud näidata juhtimisteabe ja tehnoloogia ülekande toimumise mehhanisme, hinnatud välisinvesteeringute mõju tööhõivele [Mickiewicz jt, 2000] ning näidatud välisinvestorite panust Eesti ettevõtete ekspordi arendamisel [Varblane, Ziatic, 1999]. Nende uurimuste tulemused on avaldatud kokkuvõtlikult ka monograafias “Foreign Direct Investments in the Estonian Economy” Tartu, 2001. Viimasel viiel aastal on uurimisrühmal õnnestunud osaleda mitmes rahvusvahelises projektis.

#### OTSESTE VÄLISINVESTEERINGUTE ROLL EESTI MAJANDUSES VÕRRELDUNA TEISTE SIIRDERIIKIDEGA

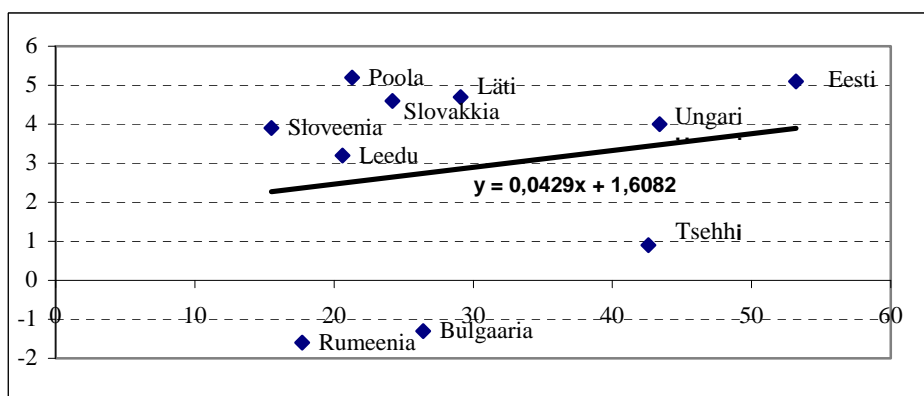
Eesti majanduse areng viimasel kümnendil annab põhjust rõõmustamiseks, sest keskmine majanduskasv on suurem kui 5 protsenti aastas. Väga olulise panuse kiireks restruktureerimiseks on andnud otsesed välisinvesteeringud (OVI), mille poolest Eesti asub siirderiikide hulgas väljapaistval kohal. 2001. aastal oli ühe elaniku kohta Eestisse tehtud otseseid välisinvesteeringuid 2318 dollarit ühe elaniku kohta, jäädes maha vaid Tšehhi vabariigist ja edestades juba Ungarit. Võrreldes Läti ja Leeduga on Eesti olnud oluliselt edukam välisinvesteeringute ligitõmbamisel (vt joonis 1).

Pidevalt on otsesed välisinvesteeringud andnud 20–40 % koguinvesteeringutest Eesti majanduses. Võrreldes erinevate siirderiikide majanduskasvu kiirust ja otsesest välisinvesteeringute rolli (vt joonis 2) võib teha järelduse, et välisinvestorite ligitõmbamisel edukamad riigid on ka saavutanud kiiremat majanduskasvu. Kui seda seost põhjalikumalt uurida, on alust arvata, et otsesed välisinvesteeringud tõepoolest aitavad kaasa suurema majanduskasvu saavutamisele, kuid sealjuures on oluline ka siirderiikide majanduspoliitika läbimõeldus. Joonisel 2 esitatud andmetele tuginedes võib tekkida küsimus, miks Tšehhi vabariigi majanduskasv ajavahemikus 1996–2000 on olnud aeglasem kui Ungaril, kuigi välisinvesteeringute osakaal sisemajanduse koguproduktis on võrdne. Siin on tegemist ühe näitega sellest, kus Tšehhi ebaõnnestunud erastamisprotsess avaldas väga tugevat negatiivset mõju [Mickiewicz, Varblane, 2001].

Joonisel 3 on esitatud otseste välisinvesteeringute sissevool Eestisse kvartalite lõikes. Vaatamata nende voogude väga suurele volatiilsusele on siiski võimalik välja tuua üldine kasvutrend. Välisinvesteeringute sissevool Eestisse on olnud tsükliline protsess. Esimene kiire OVI kasvu periood oli kuni 1994. aasta lõpuni, mis oli esmajoonel seotud riiklike ettevõtete erastamisprotsessiga. Seejärel oli madalseis investeeringutes ja 1996. aasta teisest poolest alates algas jälle kasv. Nüüd oli suur osa investeeringutest seotud saadud tulude rein-

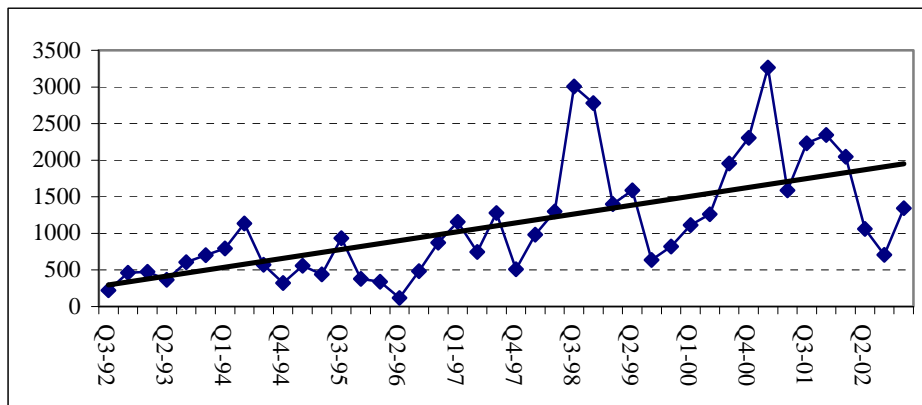


Joonis 1. Otseste välisinvesteeringute kogumaht (USA dollarites) elaniku kohta Kesk- ja Ida-Euroopa riikides 2001. aasta lõpu seisuga (World Investment Report 2002, Unctad, Geneva, 2002).



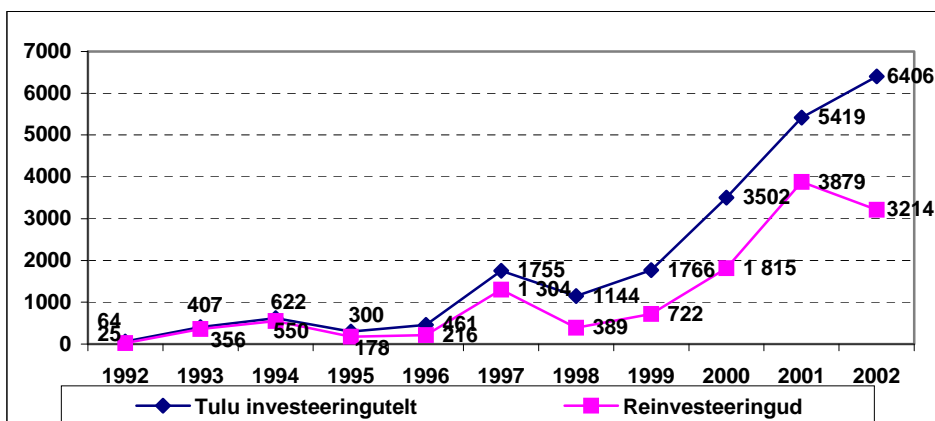
Joonis 2. Siirderiikide reaalne SKP keskmine kasv 1996–2000 (vertikaaltelg, protsentides aastas) ja otseste välisinvesteeringute osakaal SKPst 2001 aastal (horisontaaltelg, protsentides). Autori arvutused, kasutades WIR, 2002.

vesteeringutega ja uute investeeringute osakaal koguinvesteeringutes langes. Uue hoo said otsesed välisinvesteeringud sisse 1998. aastal, mil liikumapanevaks jõuks kujunes soov osta Eestis tegutsevaid erafirmasid pärast Vene kriisi, mis muutis müüdavate firmade hinnad väga soodsateks investoritele, kes oskasid hinnata õigesti Eesti makromajandusliku riski taset. See põhjendab Skandiinaavia firmade erilist aktiivsust tol perioodil.



Joonis 3. Eestisse tehtud otsesed välisinvesteeringud 1992–2002 (milj. EEK kvartalite lõikes) Allikas (<http://eestipank.info>).

Alates 2000. aastast on suurinvesteeringud lõppenud ja nüüd on põhirõhk nihkunud Eestis tegutsevate edukate firmade ostmisele välisinvestorite poolt (nt Norma, Sylvester Grupp). Samuti on väga olulise rolli omandanud juba Eestisse tehtud investeeringutelt saadud tulu reinvesteeringud Eesti majandusse. Reinvesteeringute maht kajastab kaudselt investorite hinnangut Eesti investeerimiskliima kohta. Kas investorid kasutavad teenitud tulu oma investeeringute laiendamiseks Eestis või võtavad selle välja dividendidena? Selle küsimuse selgitamiseks on viidud läbi arvutused, kasutades Eesti Panga poolt avaldatud laiendatud maksebilansi andmeid, ja tulemused on kokkuvõtlikult esitatud joonisel 4. Esimese väga positiivse järeldusena ilmneb, et välisinvestorite poolt tehtud reinvesteeringud pole ühelgi aastal olnud negatiivsed ehk Eestist väljaviidavad tulud pole olnud suuremad kui teenitud tulud.



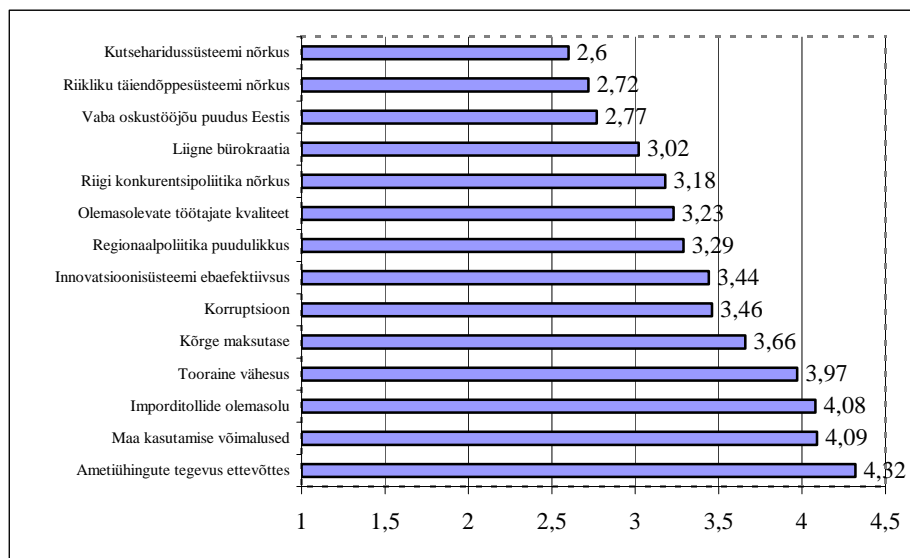
Joonis 4. Eestisse tehtud välisinvesteeringutelt saadud tulu ja reinvesteeringud 1992–2002 (miljonit krooni). Allikas (<http://eestipank.info>).

Teise järeldusena võib väita, et välisinvestorite poolt teenitud tulud on kasvanud 6 korda ajavahemikus 1998 kuni 2002, mis on oluliselt kiirem kui Eesti majanduskasv samal ajal. Kolmanda järeldusena ilmneb 2002. aastal teatud murdepunkt, kus reinvesteeringud enam ei suurenenud, hoolimata sellest, et 2002. aasta oli väga hea majanduskasvu aasta Eestis.

Seega tõstatub huvitav küsimus: kas 2002. aasta oli teatud murdepunkt välisinvestorite käitumises ja nad ei leia enam Eestis piisavalt neile vajalikke tootmistegureid, et siin teenitud tulu tagasi investeerida. See on tõsine probleem, kui võtta arvesse Eesti poolt 2001. aastal rakendatud ettevõtte tulumaksuvabastust reinvesteeringutavate tuludele. Hoolimata soodustustest reinvesteeringud ei suurenenud, vaid isegi veidi vähenesid. Kui see areng jätkub ka järgmistel aastatel, on vaja midagi ette võtta selle suundumuse peatamiseks.

**TAKISTUSED VÄLISINVESTORITE TEGEVUSE LAIENDAMISEKS EESTIS**  
Eelmises alalõigus tõstatatud küsimusele vastuse otsimisel pöörduetakse tagasi mikroandmete juurde. Selleks kasutatakse Tartu ülikooli majandusteaduskonna töörühma poolt läbi viidud küsitluse "Välisinvestor" tulemusi 2001. aasta kevadest. Ühe teemana on alati küsitud ka välisinvestorite arvamusi Eesti investeerimiskliima ja selle arengusuundade kohta [Varblane, 2001a]. Järgneval joonisel 5 on esitatud investorite arvamused peamiste nende firmade arengut segavate tegurite kohta. Tulemused näitavad, et Eesti majanduses hakkavad ilmne juba kroonilised takistused. Töajõuga seotud probleemide takistav mõju ettevõtete arengule süveneb üha. See on eriti kahetsusväärne olukorras, kus tööpuudus ulatub Eestis kümne protsendini. Juba varasemad küsitlused näitasid, et Eesti tööajõu ebapiisav kvaliteet ja selle täiendamise aeglane kulgemine on muutunud välisinvestoritele probleemiks. 2001. aasta küsitluse tulemused üksnes süvendavad neid arvamusi. Investorite arvates on kõige suuremad probleemid seotud Eesti kutseharidussüsteemi nõrkusega, mida hinnati 2,60 punktiga skaalal, kus 5 punkti kirjeldab olukorda, kui probleeme ei ole üldse, ja 1 punkt osutab väga tõsistele probleemidele. Riiklikku täiendõppesüsteemi hinnati samuti väga madalalt (2,72). Tööstusharudest on rahulolematust suurim tekstiilitööstuses (1,75), masinaehituses (2,17) ja mööblitööstuses (2,17).

Üha enam muutub probleemiks mitte ainult tööajõu kvaliteet, vaid ka selle olemasolu. Vaba oskustööajõu puudus (2,77) takistab juba kõiki peamisi välisinvestoreid Eestis. Selles osas on eriti kriitiline tekstiilitööstus, kuid ka kõik ülejäänud osutasid selle probleemi suurele tähtsusele. Eelpoolnimetatut ei ole enam uudis, sest samad probleemid on häirivad ka kodumaistele omanikele kuuluvates ettevõtetes. Kuid muutusi ei ole seni veel toimunud. Kokkuvõtteks võib väita, et olemasoleva tööajõuga on investorid enam-vähem rahul (hinnang 3,23), kuid uut sobivat tööajõudu pole kuskilt võtta. Kui riik siin ei sekku või sekkub väga aeglaselt, siis hakkavad tööle isereguleerumise mehhanismid. Positiivse variandi puhul välisinvestorid ja Eesti ettevõtjad hakkaksid ise vajalikku tööajõudu koolitama, avaksid koolituskeskused ja püüaksid lahendada puuduva tööajõu probleemi sel teel. Palju suurema tõenäosusega hakkab ilmne negatiivne variant, kus lihtsalt tootmist Eestisse enam juurde tuua ei saa, sest sobivat tööajõudu pole. Siis liigub tootmine teistesse riikidesse ja meil jäävad kavandatud töökohad täitmata.



Joonis 5. Peamised takistused välisinvestorite tegevuse laiendamisele Eestis (1 – väga tõsised probleemid, 5 – pole üldse probleeme, küsitlus “Välisinvestor2000”, Tartu 2001).

Teine rühm tegureid, mis takistavad Eesti arengut investorisõbralikus suunas on seotud bürokratiaga kõige laiemas mõttes. Siia kuulub liigne bürokratia (3,02), tolliprotseduuride kohmakus (3,32), käibemaksu tagastamise probleemid (3,49), kuid ka puudused seadusandluses tervikuna (3,44) ja tööseadusandluse keerukus (3,46) eraldi (need tegurid ei ole joonisel 5 kajastatud, kuid vt [Varblane, 2001b]).

Kolmas rühm tegureid, mis takistavad arengut, seonduvad riigi makromajanduss poliitiliste tegematajätmistega. Esmajoones on siin riigi konkurentsipoliitika nõrkus (3,18) ja regionaalpoliitika puudulikkus (3,29), kuid ka tegevusetus innovatsioonipoliitika valdkonnas. Jätkub maa kasutamise probleemide lahendamise ja investorite hinnang Eesti valitsuse sellealasele tegevusele paraneb aasta-aastalt (hinnang juba 4,09). Eesti liberaalne väliskaubanduspoliitika sobib investoritele, mida näitab, et imporditollide olemasolu ei häirinud neid kuigi-võrd (4,08). Samuti ei ole ametiühingud üldse probleem (4,32 ehk kõige vähem muret tekitav küsimus).

Kokkuvõtlikult on investorite hinnangute põhjal kõige üldisemad märksõnad, mis tulid jätkuvalt esile: stabiilsus, läbipaistvus ja bürokratia vähendamine. Stabiilsust nõutakse seadusandluses, asjaajamises, majanduspoliitikas. Kuid lisaks hakkab üha enam ilmnema investorite nõue struktuurireformide läbiviimiseks Eesti majanduses. Hakatakse üha rohkem rõhutama mõtet, et Eesti lihtne liberaalne majanduspoliitika pole piisav, et lahendada eriti tööturul tekkinud väga tõsiseid probleeme.

## RIIKLIKU ARENGUKAVA VÕIMALIK PANUS EESTI INVESTEERIMISKLIIMA PARANDAMISSE

Eelpool esitatud probleemide lahendamine eeldab valitsuse senisest aktiivsemat majanduspoliitilist tegutsemist. Selles mõttes on Riiklik Arengukava (RAK) oluline dokument, mille ettevalmistamise käigus analüüsiti kõigi oluliste riigi tegevusvaldkondade hetkeseisu, viidi läbi Eesti SWOT analüüs ja sõnastati Eesti sotsiaalmajandusliku arengu eesmärk, ülesanded ning strateegiad [www.fin.ee]. Ainuüksi sellise kava koostamine iseenesest annab välisinvestoritele stabiilsustunde, et Eesti sotsiaalmajanduslik areng keskpikas perioodis toimub kindla plaani kohaselt. See on äärmiselt vajalik soodsa investeerimiskliima loomisel. Veelgi selgema pikaajalise orientiiri saavad investorid siis, kui 2004. aastal valmistatakse ette juba Riiklik Arengukava perioodiks 2007 kuni 2013.

RAKi lõppversioonis sisalduvates prioriteetides – Inimressursi arendamine; Ettevõtluse konkurentsivõime; Maaelu ja põllumajandus; Kohalik areng ja infrastruktuur – leiavad kajastamist investorite poolt esile toodud peamised takistused nende tegevuse laiendamisele Eestis. Riikliku arengukava elluviimine võimaldab suurendada Eesti jätkusuutliku arengu võimet, tuues kaasa täiendavad investeeringud inimkapitali arendamisse, keskkonnaseisundi säilitamisse ja parandamisse ning infrastruktuuri arendamisse. Positiivse märgina tuleb hinnata asjaolu, et investeeringute jaotus prioriteetide vahel on RAKi koostamise käigus oluliselt muutunud. Kuna Euroopa Liidu struktuurifondidest raha taotlemisel on vajalik ka Eesti-poolne omafinantseerimine, siis algul lihtsalt võeti kõik Eesti riigieelarves tehtud kulutused, mida saab käsitleda Eesti-poolse kaasfinantseerimisena, ja selle alusel kujundati EL struktuurifondidest taotleva abi struktuur [vt Varblane, 2002]. Nii aga olid prioriteedid vaid paberil ja tegelikult määras investeeringute suuna senine kulutuste struktuur. Tänu väga tõsisele survele RAKi eelhindamisel ja üldisel arutelul on RAKi viimases versioonis leitud võimalus investeerida seni kavandatud tunduvalt enam inimkapitali arengusse. Kui algselt oli selleks planeeritud 8% koguinvesteeringutest, siis nüüd on see jõudnud 15,6 protsendini ja võttes arvesse ka teiste prioriteetide raames inimkapitalile tehtavad kulutused, jõuab osakaal 20 protsendini (vt tabel 1).

Kindlasti aitavad need investeeringud kaasa Eesti tööjõu kvaliteedi parandamisele ja loovad sellega välisinvestoritele võimalused laiendada oma tegevust Eestis. Investeeringud inimkapitali suurenevad Eestis kolmes suunas:

- a) uue tööjõu ettevalmistamise parandamine;
- b) olemasoleva tööjõu ümberkoolitamine;
- c) seni hõivest väljas olnute kaasamine.

Esimeses suunas on kavandatud ajavahemikus 2004 kuni 2006 investeerida meetme 1 (“Tööjõu paindlikkust, toimetulekut ja elukestvat õpet tagav ning kõigile kättesaadav haridussüsteem”) raames kokku 571 miljonit krooni [vt Eesti riiklik arengukava. Programmitäiend, 2003]. Lisaks on kavas meetme 28 (“Kutse- ja kõrghariduse ning seda toetava infrastruktuuri moderniseerimine”) raames investeerida 483 miljonit krooni. Seega kokku suunatakse kutsehariduse ja ka kõrghariduse kaasajastamisele vähemalt 1 miljard krooni kolme aasta jooksul. Olemasoleva tööjõu ümberkoolitamise osas lisanduvad veel 240 miljonit krooni meetme 6 (“Ettevõtluse arengu toetamine”) raames, kus muude

tegevuste hulgas rahastatakse ka ettevõtete poolt algatatud koolitusprogramme oma töötajate ümberkoolitamisel. See võiks olla välisinvestoritele väga soodne meede, millega nad saavad kujundada endale sobivat koolitust.

Tabel 1

Riikliku Arengukava prioriteetide rahastamise jaotus 2004–2006  
kokku miljonites kroonides

Prioriteedid	Kokku prioriteedile	sh EL panus	sh Eesti panus	Prioriteedi osakaal RAKi koguinvesteeringutest (%)
1. Inimressursi arendamine	1223	954	269	15,4
2. Ettevõtluse konkurentsivõime	1712	1013	699	21,6
3. Maaelu ja põllumajandus	2323	1093	1230	29,3
4. Kohalik areng ja infrastruktuur	2428	1879	549	30,6
Tehniline abi	253	203	50	3,2
<b>KOKKU</b>	<b>7939</b>	<b>6452</b>	<b>1487</b>	<b>100,0</b>

Allikas: autori arvutused, EV Rahandusministeerium ([www.fin.ee](http://www.fin.ee)).

Seni hõivest väljas olnute kaasamine tööturule muutub väga oluliseks RAKi käivitumisel ja meetme 3 (“Aktiivsete tööturumeetmete rakendamine”) jaoks on ette nähtud 380 miljonit krooni kolme aasta peale ehk ca 4 korda enam kui varem. See annab lootust, et on võimalik ka suurendada tööjõu pakkumist, mitte ainult parandada olemasoleva tööjõu kvaliteeti. Seega võib kõiki eelpoolnimetatud vahendeid ühendades kokku suunata inimkapitali arendamisse otseselt ja kaudselt kokku 1,6 miljardit krooni, mis on 4 korda enam kui seni. Niisugune põhimõtteline investeeringute suurendamine antud valdkonnas annab väga selge signaali välisinvestoritele, et Eesti soovib lahendada välisinvestorite poolt tõstatatud probleemid. See omakorda suurendab veendumust, et tulevikus suudetakse paremini ära kasutada välisinvestorite potentsiaal Eesti konkurentsivõime suurendamisel.

#### KIRJANDUS

Dunning, J. 1981. International Production and the Multinational Enterprise. London : George Allen and Unwin.

- Eesti riiklik arengukava Euroopa Liidu struktuurifondide kasutuselevõtuks – ühtne programm-dokument 2003-2006. (www.fin.ee)
- Lizondo, J.S. 1991. Foreign direct investment. IMF Occasional Paper, No. 77, 68.
- Mickiewicz, T., Radosevic, S., Varblane, U. 2000. Foreign direct investment, structures of employment and job creation in transition economies (1993-1996). Foreign Direct Investment in a Transition Economy. London : UCL, 41-60.
- Mickiewicz, T., Varblane, U. 2001. FDI in Central Europe: Short-run effects in manufacturing. Fabry, N., Zeghni, S., Kogut, B. (eds.) Transition in Asia and Eastern and Central Europe: A Closed Door & Two Open Windows? New York : Nova Science, 31-54.
- Varblane, U. 2001a. Estonia: Strategic objectives of foreign investors. CEE Countries in EU Companies` Strategies of Industrial Restructuring and Relocation. Brussels : ETUI, 197-233.
- Varblane, U. 1996. Valitsuse osa välisinvesteeringute riiki suunamisel. Aktuaalsed majanduspoliitika küsimused Euroopa Liidu riikides ja Eesti Vabariigis. Tallinn : AS Matimar, 1.
- Varblane, U. (ed.) 2001b. Foreign Direct Investments in Estonian Economy. Tartu : Tartu University.
- Varblane, U., Reiljan, E. 1999. Välisinvesteeringute mõju Eesti ettevõtete majandamise tõhususele. Eesti majanduse konkurentsivõime Tartu: TÜ, 282-336.
- Varblane, U., Ziatic, T.L. 1999. The impact of foreign direct investment on the export activities of Estonian firms. J. of East-West Business, 5, 1/2, 173-190.
- Varblane, U. jt. 1998. Otsesed välisinvesteeringud Eesti majanduses. 1998. Tallinn : Eesti Välisinvesteeringute Agentuur. Tartu Ülikool, 146 lk.
- Wells, L.T., Wint, A.G. 1990. Marketing a country. FIAS Occasional Paper No. 1. Washington: The World Bank.



*Teaduspreemia humanitaarteaduste alal monograafiate*  
"VENE LAENSÕNAD EESTI MURRETES" JA "PÕHJAEESTI  
KESKMURRE: HÄÄLIKULISI JA MORFOLOOGILISI  
PEAJOONI" eest



*Mari  
Must*

Sündinud 11. novembril 1920 Tartus

1938 Eesti Noorsoo Kasvatuse Seltsi Tütarlastegümnaasium Tartus  
1946 Tartu Ülikool, eesti keel  
1954 filoloogiakandidaat, Tartu Ülikool  
1998 Ferdinand Johann Wiedemanni keeleauhind  
2001 Valgetähe V klassi teenetemärk

Soome Kalevalaseura ja Suomalais-Ugrilainen Seura välisliige (1966, 1968),  
Suomalaisen Kirjallisuuden Seura kirjavahetajaliige (1974), Emakeele Seltsi  
auliige (1990).

1945–1947 Tartu Ülikooli foneetikalaboratooriumi vanemlaborant, 1947–1992  
Eesti TA Keele ja Kirjanduse Instituut: nooremteadur, vanemteadur, sektori-  
juhataja.

Avaldanud 3 monograafiat, 3 murdetekstikogu, üle 20 teadusliku ja üle 20  
populaarteadusliku artikli, ülevaateid, kogumisjuhendeid jms. 3 eesti murretest  
tehtud vinüülplaadi kaasautor.

Põlvnedes kooliõpetaja perekonnast ning kasvanud linnamiljões, oli mulle maakeskkond ja eesti taluelu üsna võõras ning ma astusin 1938. a Tartu Ülikooli eesmärgiga saada emakeeleõpetaja kutse. Ometi sai minust murdeuurija ning selle ameti kõige olulisemaks ja meelikõitvamaks osaks on olnud suvised murdematkad mööda Eestimaa külasid ja talusid, usalduslikud vestlused põliste eite-de-taatidega – meie keelejuhtidega, nagu me oma kohalikke informante kutsume.

Omaaegse Tartu Ülikooli eesti keele ja läänemeresoome keelte õppetoolides ning Akadeemilises Emakeele Seltsis valitses tohutult murdelembene õhkkond. Professorid Andrus Saareste, Julius Mägiste, äsja doktoriks promoveerunud Paul Ariste ja mitmed teisedki õppejõud olid ise tulihingelised murdekogujad-uurijad, kelle juhtimisel toimus hoogne murdeainese talletamine ning murdearhiivi sihipärane täiendamine. Igal suvel said murdekogumiseks lähetuse paar-kümmend eriettevalmistuse saanud üliõpilast-murdestipendiaati, peaülesandeks murdesõnavara kogumine suure mitmekõitelise eesti murdesõnaraamatu koostamiseks.

Selle hiigeltöö võttis Emakeele Seltsilt üle 1947. a tegevust alustanud Eesti TA Keele ja Kirjanduse Instituut. Aastad 1947–63 kulusid kogumistöö jätkamiseks, olemasolevate murdekogude korrastamiseks, kopeerimiseks ja sõnaraamatutööks vältimatu alfabeetilise koondkartoteegi loomiseks (2 735 000 sedelit). 1968. a ilmus trükist “Eesti murrete sõnaraamatu prospekt” (208 lk), mida hiljem on ositi muudetud ja täpsustatud. 1994. a alustas ilmumist “Eesti murrete sõnaraamat” ning tänini on seda trükist tulnud 13 vihikut *a – koortama* ulatuses (2,5 köidet).

Sõnaraamatu kõrval on murdesektori teiseks suurprojektiks olnud 8-kõiteline akadeemiline eesti murdetekstide sari “Eesti murded”, mille avaldamine muutus reaalseks portatiivsete magnetofonide kasutusele tulekuga 1957. a ning instituudi fonoteegi loomisega (2900 tundi eesti murrete salvestusi). Sarja esimene köide “Mulgi murdetekstid” ilmus 1961. a, viimase köitena “Saarte murde tekstid” 2002. a. Lisaks teaduslikus foneetilises transkriptsioonis murdenäidetele sisaldab iga köide vastava murde keelelise ülevaate, murdesõnade sõnastiku ning tekstide sisuregistri. Sarja peatoimetajana olen osalenud viie esimese köite toimetamises. Koostanud olen kaks köidet – “Keskmurde tekstid” (1965) ja “Kirderannikumurde tekstid” (1995).

Palju aega ja tähelepanu on nõudnud praeguse Eesti Keele Instituudi üks väärtuslikumaid ainekogusid – eesti murdearhiiv, kus murdesõnavara (5 349 000 sed) ja murdetekstide (50 915 lk) kõrval on hoiul eesti murrete häälikulised ja grammatilised ülevaated (37 137 lk), murdekogujate päevikud (9386 lk), ulatuslik eesti kohanimekogu (600 000 sed) jm. Instituudi murdearhiivi on deponeeritud ka Emakeele Seltsi murdekogud, millest kõige hinnatavam on seltsi vabatahtlike kaastööliste, murdekorrespondentide tekstikogu (31 249 lk). Trükis on sellest avaldatud viis köidet, mille koostamises ja toimetamises on allakirjutanugi osalenud. Emakeele Seltsi murdetoimikonna juhatajana ja murdevõistluste žürii esimehena olen lähedalt seotud olnud korrespondentidevõrgu töö korraldamisega.

Suurte kollektiivsete tööde kõrval on isiklikus huviorbiidis olnud mõned muudki uurimisteed. Juba ülikooli diplomitööst ja kandidaaditööst alates on paelunud eesti murretes kodunenud vene laensõnade uurimine.

Eesti keelde tulnud vene laenude hulgas võib tinglikult eristada vähemalt kuut laenukihti: 1) meie ajaarvamise alguse paiku tulnud esimesed slaavi laenud; 2) meie ajaarvamise I aastatuhande teisest poolest pärinevad idaslaavi ehk algvene laenud; 3) 11.–14. sajandil tulnud muinasvene laensõnad; 4) vanemad vene laenud 15.–17. sajandist; 5) alates 18. sajandist uusvene keelest saadud uuemad vene laenud; 6) uusimad ehk hilislaenud, kodunenud eesti keeles 20. sajandil.

Käsitletavat laensõnad on tulnud eesti keelde põhiliselt suulisel teel, otsese suhtlemise kaudu naabruses elavate venelastega, kokkupuudetel maal liikuvate kaupmeeste, ülesostjate ja meistriteestega, ühisel tegutsemisel kalapüügi-artellides ja nootkondades, vene kroonut teenides või omaaegsetes riigi- ja munitsipaalasutustes asju ajades.

Nagu tunnistab laensõnade häälikuline ehitus, pärineb valdav osa sõnalae-nudest otse vene naabermurretest, eeskätt keskvene murrete läänerühma kuulu-vast Pihkva ning Oudova murderühmast. Laensõnad on enamasti sobitunud eesti foneetikaga ning on olenevalt sõna kohanemisastmest ja igas konkreet-ses murdes kehtivatest seaduspärasustest mitmeti muutunud ning lihtsustunud. Vanemad ja laiema levikuga laensõnad on paremini lõimunud laenava keele struktuuri, hilisematele on tunnuslikud mitmed võõrapärasused.

Tunduvat mõju on vene keel avaldanud setu murraku foneetikale ja sõnavarale. Tugevasti vene keelega ristunud külades on laene silmapaistvalt rohkesti. Põhisõnavarasse sulanenud laensõnade kõrval on siin käibel hiliseid juhu- ja toorlaene, mille vene päritolu on kõnelejale eneselegi selgesti tajutav. Esineb tähenduselt võrdseid, absoluutseid sünonüüme moodustavaid sõnapaare, nagu *jaama* ~ *haud*, *kuran* ~ *kalkun*, *serdesnik* ~ *kaalpulk* 'vankri vahepulk', *vasnja* ~ *mõhk* 'leivaastja' jt. Põlise setu nimetuse *varjukaetus* on asendanud vene *serkal*, mille kõrval on kasutusel ka teistest lõunaeesti murrakutest saadud saksa laensõna *piidli* 'peegel' jne.

Vanemaid vene laene, mis on tulnud eesti keelde enne 18. sajandit, on eesti murretest teada umbes 160. Neist veerandsada on omased ainult lõunaeesti murdele. Nt *kari* 'koi', *korets* ~ *karits* 'kibu, kapp', *kootsel* ~ *kuutsli* 'koonal', *lahits* ~ *lasits* 'kärp', *lohets* ~ *luhits* ~ *luits* 'lusikas', *luus* : *loosu* 'madal allikane koht põllus; kinnikasvanud jõekäär', *napp* : *napu* 'käsitsi pekstud pikk rukki-õlg', *pälin* ~ *pällün* 'koirohi', *sõir* 'kodujuust' jmt.

Üle-eestilise levikuga vanemad vene laenud on nt *aken*, *hirs*, *ike*, *jaam*, *kiisel*, *kõrts*, *lodi*, *lusikas*, *mässama*, *nädal*, *piits*, *raamat*, *ristima*, *roosk*, *sahk*, *tubli*, *turg*, *uulits*, *vaagen*, *vabadus*, *värav*, *värten* jpt.

Uusvene keele vanemasse kihistusse kuuluvad sõnad, nagu *karnits*, *kasakas*, *kasarm*, *kissell*, *kostitama*, *kresla*, *krutski*, *munder*, *nuhutama*, *nuut*, *parisnik*, *pliin*, *riisikas*, *rogusk*, *roitma*, *sedelgas*, *sohk*, *sudak(as)*, *tentsik*, *trahter*, *tõlk*, *tõlkima*, *tõkat*, *voli*, *vurle* jpt.

19. sajandil vene laensõnade hulk eesti keeles mitmekordistub. 20. sajandil lisandusid veel sõnad, nagu *kirsa(voi)*, *kolhoos*, *kolhoosnik*, *kombain*, *krusa(voi)*, *kuraas*, *kuraasitama*, *mannerg*, *meena*, *oblaava*, *pakaa*, *patinka*, *pritsaala*, *propusk*, *puhvaika*, *salooga*, *sapiska*, *sovhoos*, *sovhoosnik*, *tormas*, *trussikud* jpt.

Raamatu “Vene laensõnad eesti murretes” sõnaloendis on ühtekokku 2052 sõnaartiklit. Neist on uuemaid vene laensõnu ligikaudu 2015, lisaks umbes 35 varasemat laenu ja 34 muinasvene laenu, mis on uusvene keelest taaslaenatud. Sõnaliigiti jagunevad uuemad laensõnad järgmiselt: substantiive üle 81,5%, verbe ligi 10%, adjektiive üle 4%, adverbe ligi 2,5%, interjektsioone, konjunktsioone ja partikleid kokku ligi 2%.

Registreeritud laensõnadest ligi pooled piirduvad lõunaeesti murretega, neist umbes 750 kitsamalt kagueesti murrakutega. Kirderannikumurdest teada olevast u 600 vene laenust pärineb valdav osa Ida-Virumaalt. End Põhja-Tartumaale omaseid laene on ligikaudu 150. Eelkõige saarte ja läänemurdes kasutatavad on umbes 70 vene laensõna. Üle-eestiliselt tuntud ja murretes laiemalt käibel olevaid või olnud uuemaid vene laene on ümmarguselt 450.

Koos slaavi, muinasvene ja kuni 18. sajandi alguseni tulnud vanemate laenudega, mida eesti kirjakeeles on umbes 120, on tänapäeva eesti kirjakeele sõnaraamatuisse murrete ja kõnekeele kaudu jõudnud ligi 500 vene laensõna. Osa eesti vanemas kirjanduses ning eriti 19. sajandi ajakirjanduses esinenud laenudest on kirjakeelest hiljem taandunud (*isvostsik, jäävitama, maner, prikassik* jmt). Peale selle on kirjakeeles hulk kirjanduslikul teel ja administratiivseid teid pidi tulnud laensõnu (nt *altõnn, arhierei, bajaan, barakk, baškiir* jpt), mida kõnealuses töös ei käsitleta. Ühtekokku võiks vene laensõnu eesti murretes ja kirjakeeles olla tublisti üle kahe ja poole tuhande.

Et Eestimaa oma territooriumi väiksusest hoolimata on jagunenud paljudeks eri murreteks ja murrakuteks, on püsivalt olnud päevakorral murrete liigendus ja jaotus, murrete ja murderühmade piirid. 1950ndail aastail oli tulipunkti põhjaeesti keskmurde, selle eesti kõige ulatuslikuma ja kirjakeele aluseks olevana ühiskondlikult tähtsaima murde struktuur ja liigendus, milles oli veel mõndagi vaieldavat. Murdesektori tööplaani võeti sellekohase monograafia koostamine, mille häälikuline ülevaade jäi allakirjutanu, morfoloogiapeatükk Aili Univere hooldeks. Käsikiri valmis 1958. aastaks. Paraku jäi töö publitseerimine tollal mitmesugustel põhjustel katki. Üheks olulisemaks teguriks oli portatiivsete magnetofonide tarvituseletulek, millega kaasnes uute ülesannete päevakorrale kerkimine. Hiljem lisanes foneetilise kirja trükkimise võimatuks muutumine, lõpuks veel ühe autori, A. Univere surm. Eesti Teadusfondi materiaalsel toel sai allakirjutanu võimaluse neli aastakümnet avaldamist oodanud uurimuse “Põhjaeesti keskmurre” algkäsikirja täiendamiseks, täpsustamiseks, kohatiseks ümbertöötamiseks ning trükivalmis seadmiseks. Raamat ilmus trükist 2002. a.

Nagu ütleb juba nimetuski, paikneb keskmurre teiste eesti murrete vahel. Põhjas ja kirdes piirneb ta kirderannikumurde, lõunas lõunaeesti murde, läänes põhjaeesti läänemurde ja idas idamurdega. Oma keskse asendi tõttu on kõnealune dialekt arenenud kokkupuutes kõigi Eesti mandri murretega, nii et selle ulatusliku murde perifeersemaid alad on kujunenud üksteisest tihti tublisti erinevaks. Teatavasti on murdepiirid harilikult üsnagi suhtelised ning kahe murde piirialade keelt iseloomustab tavaliselt mõlemapoolsete elementide segunemine. Nii ei ole ka kesk- ja läänemurde vahel järsku murdepiiri ja selleks tinglikult peetav vanade maakondadade Harju- ja P-Viljandimaa lääneraja ei ole kuigivõrd olnud takistuseks keelenähtuste vastastikusele levimisele. Nii nagu Läänemaa põhjaosa ja Pärnumaa idamurrakutes leidub

mitmeid keskmurdega ühiseid nähtusi, nii on ka Harju- ja P-Viljandimaa läänemurrakutes rohkesti läänelisi erijooni. Üheks märgatavaks isoglosside vöötteks on Keila-Hageri-Juuru-Türi idaraja, millega piirneb paljude lääneliste keelendite levi keskmurde alal, ent mõnedki ühisjooned hõlmavad suuremas või väiksemas ulatuses ka teisi Järvamaa murrakuid, mis lubab kogu end Harju-, Järva- ja P-Viljandimaa ala nimetada keskmurde LÄÄNERÜHMAKS. Seda iseloomustavad nähtused, nagu 1) nõrgaastmeliste sõnakujude üldistumine (*lammas* : *lammad*, *alv* : *alvad*, *kurv* : *kurvad*, *teivas* : *teivad*); 2) hääliku muutus *v > b* (*kõba kibi*, *ilbes*); 3) muutus *ja-* > *jä-* (*jägu*, *jäksama*); 4) *el-*, *erlõpuliste* sõnade käändumine *e*-liselt (*kõstre*, *naaskle*), *e*-line *lene-*, *mene*-liide (*pulmalene*, *tulemene*); 5) tugevaastmeline inessiiv (*sukad jalgas*, *puud lehtes*); 6) *e*-mitmus (*jalge*, *laude*); 7) tugevaastmeline preesensi pluraali 3. pööre (*tegevad*, *laulvad*) jmt.

Üsna nõrgaks murdepiiriks on olnud Järva- ja Virumaa ning P-Viljandi- ja P-Tartumaa vahepiir, ent ometi on siin võimalik kõnelda keskmurde IDARÜHMAST, mille põhja- ja kirdeosa murrakuid on mõjustanud kirderannikumurre. End P-Tartumaa lääneosas ja idapoolsetes P-Viljandimaa murrakutes on taas tuntav põhjaeesti idamurde naabrus.

Harjumaal ja Lääne-Virumaal on kirderannikumurre tänapäevaks taandunud kitsale rannaribale ning ainult Ida-Virumaal ulatub sügavamale maa sisse. Rannikumurde lähimate naabermurrakute vanemas keelepruugis leidub aga veel rohkesti murdejooni, mida võib pidada reliktideks kunagi siin kõneldud soomepärasest idioomist: 1) Haljala murrakuala kesk- ja Rakvere põhjaosas puudub eesti keelele omane vältevaheldus ning teisteski viru maa- ja harju kirderannikumurrakutes esineb üldeestilise vahelduse kõrval juhuslikku vaheldumastustki; 2) Kirde-Harjumaal ja Lääne-Virumaal kuulub tugevaastmelisi sisevokaali kaota *ne*-adjektiive (*vanaaegane*, *kahepuolised* 'angiin'); 3) essiivikäänne on kasutusel elavas kõnekeeles (*nuorena*, *vanuna* 'vanas eas', *vihkuna* 'vihkudena'); 4) kivilinenud väljendeis on säilinud 3. isiku possessiivsufiks (*ajaldasa* 'parajal, õigel ajal', *ridanasa* 'ridamisi', *tegi rumalutasa tööd*); 5) esineb soomepärasest lõputa impersonaali (*kui toimne kangas teha*, *siis kaks lõnga panna piira* 'soasse').

Viru maamurrakute tihedatele sidemetele kirderannikumurdega vihjavad veel sellised kogu Virumaad ühendavad ja iseloomustavad nähtused, nagu 1) vaheldus *b* : *v* ka lühikese silbi järel (*saba* : *sava*, *uba* : *uvad*); 2) assimilatsioon verbides nagu *lassa* : *lassasse*, *pessa* : *pessasse*; 3) *mb*-lõpuline keskvärre (*ilusamb* : *ilusama*, *suuremb* : *suurema*) jmt.

Tuleb arvata, et kirderannikumurre domineeris varem peaaegu tervel muistsel Virumaal, sest mitmed mainitud murdejooned ulatuvad kuni Simuna ja Väike-Maarja murrakuni (*incl.*).

End P-Tartumaal, keskusega Kodavere ümbruses, kõneldud vana vadjapärase põhjaeesti idamurre, mille areaal hõlmas ka Iisaku kihelkonna edelaosa, on jätnud jäljed kõigi end P-Tartumaa, osalt ka Virumaa murrakute ehitusse. Nt 1) laadivahelduseta *kodad*, *madud*, *kudub* jts; 2) sõnuti *o* asemel *õ* (*kõdar*, *kõrd*, *õmeti*, *õlema*); 3) tüübiti *da*-lõpuline partitiiv (*isada*, *tädida*); 4) *ta*-tunnusega infinitiiv kaasrõhulise silbi järel (*ehitata*, *parandata*); 5) *h*-lised *nud*-kesksõnad (*lähnd* ~ *lähend* ~ *lähnud*, *nähnd* ~ *nähend* ~ *nähnud*, *tehnd* ~ *tehend* ~ *tehnud*).

Mõningad ühisjooned iseloomustavad kogu Ida-Eestit kirderannikumurdest kuni lõunaeeesti murdeni välja, nagu 1) diftongid või pikk vokaal kaasrõhulises silbis (*inimeisi, küsimuisi, sugulaisi; pikkameisi ~ pikkamiisi, tasakeisi, ühtlasisi*); 2) *st*-line translatiiv (*jäi vanast, ole mehest*); 3) *vad*-lõpuline imperfekti ja konditsionaali pluurali 3. pööre (*tulivad, annaksivad*); 4) eriline *nuvad*-lõpuline partitsiibivorm (*nad olivad müenuvad, nad ei võtnuvadki*); 5) *i*-minevik teatud sõnatüüpides (*kuulin, kannime, laulime*) jmt.

Kui seni vaadeldud keelenähtused jagasid keskmurde ala lääne- ja idarühmaks, siis on eesti murdekaardil võimalik tõmmata rohkeid isoglosse ka horisontaalselt, mis lubab kõnelda ka keskmurde PÕHJA- ja LÕUNARÜHMAST. Mitmete põhjapoolsete nähtuste levikupiir ühtib suuremas või väheemas ulatuses endiste Harju-, Järva-, Virumaa lõunapiiriga, st kunagise Eestimaa ja Liivimaa kubermangu rajaga.

Põhjarühma murrakutele on omane nt 1) vaheldus *põrsas* : *põrssid, varss* : *varsa*; 2) häälikumuutus *ir* > *er* sõnades *kern, kerp, kerst, kerves*; 3) kesk- kõrgete pikkade vokaalide diftonginemine (*ee* > *ie, oo* > *uo, öö* > *üö*), nagu see esineb ka kirderannikumurdes; 4) Eesti põhjaosas *määd, pää(v)*, lõuna pool *mäed, päev*; 5) diftongiline pluurali partitiiv (*kangaid, ilusaid tütreid, rebaseid*), kuna lõuna pool on üldistunud *id*-lõpp; 6) *i*- ja *u*-tüvelised verbid kujul *istuma* : *istuda, pühkima* : *pühkida*, lõuna pool *istma* : *istu, pühkma* : *pühki* jt.

Eesti murdekaarti horisontaalses suunas läbivate isoglosside puhul on sageli tegemist lõunaeestiliste murdejoontega, millest mõned on küündinud kaugelt põhjaeeesti murde alale: nt 1) häälikulised kujud *kauva* ~ *kavva, uuved* ~ *uvved, kuub* : *kuuve* ~ *kuvve, õuve* ~ *õvve*; 2) assimilatsioon *tk* > *kk* (*kakkema, sõkkuma* ~ *sõkma*); 3) laialdane häälikumuutus *ks* > *ss* (*jänessed, orassed*; translatiiv *märjass, puruss; kuulusse, näisse, tunnusse*; impersonaali preesens *aetasse, kurnatasse*); 4) pikavokaalsed sõnakujud *kaar* : *kaara* 'kaer', *naal* : *naala* 'nael', *naarma* : *naaran* 'naerma' jmt.

Lõunaeeesti murrete mõju peegeldavad isoglossid lõhestavad tihedalt Põhja-Viljandi- ja Põhja-Tartumaa murrakuid, mis on siirdealaks keskmurde ja lõunaeeesti murrete, olenevalt asendist ka kesk- ja idamurde ning kesk- ja läänemurde vahel.

Millised on aga kogu keskmurdeala ühised tunnusjooned ning kuivõrd need lubavad kõnelda põhjaeeesti keskmurdest kui iseseisvast dialektist?

Eelkõige on keskmurdele omased muidugi need jooned, mis iseloomustavad kogu põhjaeeesti murderühma või suuremat osa sellest. Nt 1) konsonantühendi püsi sõna algul (*kleit, kratt, plahvatama, trepp*); 2) karitiivadjektiivide obliikvakäändeis *m* (*inetuma, vallatumad*), alternatiivselt ka järgarvsõnades (*kolmandama*); 3) assimilatsioon *lj* > *l'l, sj* > *s's* (*nal'lakas, as'sad*); 4) lühikese vokaali pikenemine uuemates sõnades (*aavaldama, iisik, uuvitav*); 5) diftongide järelkomponendi alanemine ning assimileerumine nõrgaastmelistes vormides (*vaik* : *vaegu, toit* : *toedu, sein* : *seena, täitma* : *täedan, saun* : *saana*); 6) valdavalt *de*-pluural; 7) rohkesti *si-* ~ *sid*-partitiivi (*koisi* ~ *koisid, radasi* ~ *radasid, oksasi* ~ *oksasid*); sõnatüübiti ka *a*-partitiivi (*kiva, sulga, linda, aednikka*); 8) ulatuslik *sse*-illatiiv (*maasse, künnasse, taevasse, südamesse*); 9) allatiivi lõpp kaasrõhulise silbi järel *-lle* (*peredelle, lammastelle*); 10) *nud-*

partitsiibi lõpp *-(n)d* või kadu (*vaadand, olnd ~ old, tõstnd ~ tõst, ei võtt, oli leid*) jmt.

Kirde-Harjumaa, Põhja- ja Ida-Järvamaa ning Lääne-Virumaa moodustavad KESKMURDE TUUMALA, mida iseloomustab suhteliselt suurem ühtlus ning kus keskmurde tüüpilised jooned esinevad kõige järjekindlamalt. Siia kuulub harilikult ka Põltsamaa ja Kursi põhjaosas ning Laiuse lääneosas kõneldav murrak.

Ka nimetatud piirkonnas leidub mitmeid üsna olulisi ja vanu murdelisi lahknevusi, nagu 1) lääneline *kottu, takka*, idaline *kodunt, tagant*; 2) komparatiivi lõpp *-mb* viru murrakutes, 3) *ks-* ja *st-*lõpuline translatiiv; 4) impersonaali preesensi lõpp *-kse* ja *-sse*; 5) *da-*infinitiiv *parandada* ja *parandata*; 6) *id-* ja *ivad-*lõpuline verbide imperfekti ja konditsionaali mitmuse 3. pööre; 7) *ma-* ja *da-*infinitiivi kujuline kaudne kõneviis jmt.

Kuid lisaks eespool esitatud keskmurde põhjarühmale iseloomulikele joontele on sellele kitsamale alale omane veel 1) vaheldumatus tüübis *adra : adra : adra, ladva : ladva : ladva, padja : padja : padja (~ patja)*; 2) häälikuühendi *ks* järjekindlam püsi järgsilpides (*kaheksa, üheksa, katuksed; kuulukse, näikse, tunnukse; teeksin, tuleksime, nad viskaksivad*); 3) ainult nimetatud piirkonnale on omane metatees *lj > il, sj > is (väli : väilad, selg : seilas, asi : aisad)*; 4) pikad vokaalid on ulatuslikult diftongeerunud (*aa > oa ~ ua, ää > ea ~ ia, ee > ie, oo > uo ~ ua, öö > üö ~ üe, üü > üi*) jmt.

Põhjaeesti keskmurre on pikaajalise arengu tulemus. Kui suur osa keskmurdes esinevaid üldpõhjaeestilisi keelelisi nähtusi läheb tagasi tõenäoliselt omaaegsele põhjaeesti hõimumurdele, siis 20. sajandi keskmurret iseloomustavad erijooned on enamikus tekkinud ja välja kujunenud 16.–18. sajandil. 19. sajandil need jooned veelgi süvenesid ning levisid. Keskmurre, mille alusel kujunes eesti kirjakeel ja hiljem rahvuskeel, muutus üha enam kogu Põhja-Eesti üldrahalikuks suhtlemisvahendiks, hõlvates järk-järgult aina ulatuslikumalt ka naabermurrete ala. Kirderannikumurret kuuleb Harjumaal ja Lääne-Virumaal veel vaid vähestes kalurikülades, kodaverepärase idamurre on peaaegu hääbunud, Põhja-Läänemaal on keskmurdeliste joonte hulk aina lisandumas. Samuti on lõunaeestilised keelendid Põhja-Tartumaal ja Põhja-Viljandimaal üha vähenemas.

Keskmurde laialdast levikut soodustas tema struktuuriline ja leksikaalne lähedus eesti kirjakeelele. Koos rahvuskeele tekkimisega oli aga ka keskmurde enda saatust otsustatud. Silmatorkavamad murdejooned, mis kirjakeelde ei pääsenud, hakkasid ajapikku ikka enam taanduma ühiskeelse kõnepruugi ees. Viimaste aastakümnete ühiskondlikud ümberkorraldused, koolihariduse, kirjastõna, raadio ja televisiooni levik, üldine kultuuriline tõus maal, üha elavnev liiklus, aina tihenevad sidemed maa ja linna ning eri paikkondade vahel on murrete taandumisprotsessi viinud selle lõppjärku. Traditsioonilist murdekeelt või selle üksikjooni võib keskmurde alal kuulda veel vaid aniharvadelt vanuritelt ning selle murde lõplik sulanemine eesti ühiskeelde on praegu juba kõige lähema aja küsimus. Mõningaid murdesugemeid võib küll edasi elada kohalikus suhtluskeeles, paikkondlike murdejoontega segatud argikeeles või isegi linlikus kõnekeeles.

Olgu lõpuks tuhandeks tänatud Eesti Keele Instituut, Eesti Teaduste Akadeemia, Eesti Teadusfond (grant nr 737, 1830, 3513) ja hea saatus, et mul on olnud võimalik oma nooruspäevil alustatud tööd lõpule viia ja näha nende ilmumist raamatutena.

#### KIRJANDUS

Must, M. 1956. Vene laensõnade laenamisel ja kodunemisel valitsevatest seaduspärasustest eesti keeles. Eesti NSV Teaduste Akadeemia toim. Ühiskonnatead., 2, 128–142.

Must, M. 1958. Põhja-eesti keskmurde läänepiirist. Keelelisi küsimusi. Tallinn : ERK, 86–95. (Keele ja Kirjanduse Instituudi uurimused; 2).

Must, M. 1959. Mõningaid vene laensõnu eesti murretes. Emakeele Seltsi aastaraamat. IV. Tartu : Emakeele Selts, 157–163.

Must, M. 1965. Keskmurde tekstid. Tallinn : Keele ja Kirjanduse Instituut, 448 lk. (Eesti murded; 2).

Must, M. 1965. Vene–eesti kakskeelsus Kirde-Eestis. Moora, H., Jaanits, L. (toim.) Slaavi–läänemeresoome suhete ajaloost : Artiklite kogumik. Tallinn : Eesti Raamat, 107–131.

Must, M. 1987. Kirderannikumurre : Häälikuline ja grammatiline ülevaade. Tallinn : Valgus, 408 lk.

Must, M. 1989. Lahemaa lugusid : Valimik korrespondentide murdetekste. 4. Tallinn : ENSV TA, 236 lk.

Must, M. 1989. Wiedemanni sõnaraamatust “Eesti murrete sõnaraamatuni”. Ferdinand Johann Wiedemannin muisto : Suomalais–virolainen Wiedemann-seminaari Helsingissä 5.–6.10.1987. Helsinki : Suomalais-ugrilainen seura, 90–98. (Castrenianumin toimitteita; 31).

Must, M. 1992. Ida-Virumaa murdelisest taustast. Rüütel, I. (toim.) Ida-Virumaa rahvakultuurist. Tallinn : Infotrikk, 10–26.

Must, M. 1995. Kirderannikumurde tekstid. Tallinn : Eesti Keele Instituut, 724 lk. (Eesti murded; 5).

Must, M. 2000. Vene laensõnad eesti murretes. Tallinn : Eesti Keele Sihtasutus, 660 lk.

Must, M., Univere, A. 2002. Põhjaeesti keskmurre : Häälikulisi ja morfoloogilisi peajooni. Tallinn : Eesti Keele Sihtasutus, 455 lk. (Eesti Keele Instituudi toim.; 10).