

# EESTI VABARIIGI TEADUSPREEMIAD

2002

TALLINN, 2002

Raamat sai ilmuda tänu

EESTI VABARIIGI HARIDUSMINISREERIUMI  
toetusele

Jüri ENGELBRECHT (vastutav toimetaja)  
Eesti Vabariigi teaduspreemiate komisjoni esimees

Helle-Liis HELP, Galina VARLAMOVA

Kaante kujundamisel kasutati 2002. a teaduspreemiate laureaaside  
diplomi fotosid (Tõnu KRÜNVALD)

---

ISSN 1406-2321

© EESTI TEADUSTE AKADEEMIA

## SISUKORD

Saateks .....	5
<b><i>Silm Kallas</i></b> Eesti Vabariigi peaministri tervitus teadus- ja kultuuripreemiate üleandmisel 24.02.2001 .....	6
<b><i>Mailis Rand</i></b> Eesti Vabariigi haridusministri tervitus teadus- ja kultuuripreemiate üleandmisel 24.02.2001 .....	7
<b><i>Jüri Engelbrecht</i></b> Eesti Riigi teaduspreemiate komisjoni esimehe sõnavõtt teadus- ja kultuuripreemiate üleandmisel 24.02.2001 .....	8
<b><i>Erast Parmasto</i></b> teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest .....	10
<b><i>Ene Ergma</i></b> teaduspreemia täppisteaduste alal tööde tsükli “Kompaktsete objektidega kaksiktähtede evolutsioon” eest .....	18
<b><i>Nigulas Samel</i></b> (kollektiivi juht), <b><i>Ivar Järving</i></b> , <b><i>Reet Koljak</i></b> , <b><i>Karin Valmsen</i></b> teaduspreemia keemia ja molekulaarbioloogia alal tööde tsükli “Prostaglandiinide biosüntees selgrootutes” eest .....	30
<b><i>Jüri Elken</i></b> (kollektiivi juht), <b><i>Jüri Kask</i></b> , <b><i>Tarmo Kõuts</i></b> , <b><i>Uno Liiv</i></b> , <b><i>Tarmo Soomere</i></b> teaduspreemia tehnikateaduste alal Saaremaa süvasadama võimalike asukohtade hüdrodünaamiliste ja geoloogiliste uuringute eest .....	42
<b><i>Marika Mikelsaar</i></b> teaduspreemia arstiteaduse alal uurimuste tsükli “Inimese normaalne mikrofloora ja olulisemad bakteriaalsed infektsioonid Eestis” eest .....	54

<b>Raivo Mänd</b> (kollektiivi juht), <b>Peeter Hõrak</b> , <b>Indrek Ots</b> , <b>Toomas Tammaru</b> teaduspreemia geo- ja bioteaduste alal tööde tsükli “Baasuuringud evolutsioonilise loomaökoloogia vallas – bioloogilise mitmekesisuse huvides” eest .....	64
<b>Anne Luik</b> (kollektiivi juht), <b>Küllli Hiiesaar</b> , <b>Aare Kuusik</b> , <b>Enno Merivee</b> , <b>Luule Metspalu</b> teaduspreemia põllumajandusteaduste alal entomoloogiliste uurimuste eest keskkonnasäästliku taimekaitse arendamiseks (1998–2001). . . . .	78
<b>Kalevi Kull</b> teaduspreemia sotsiaalteaduste alal tööde tsükli “Jakob von Uexküll ja biosemiootika distsiplinaarsed piirid” eest .....	86

## SAATEKS

Teadustulemused ei ole alati laia tähelepanu fookuses nagu näiteks olümpiamängud. Ometi on inimhõimustuse rakendused ühiskonnale põhiliseks edasiviivaks jõuks.

Nii on ka meil Eestis, uued teadmised on vajalikud kõigi argipäeva murede kiuste. Eesti teadus- ja arendustegevuse strateegia, mille Riigikogu heaks kiitis möödunud aasta lõpus, seab kindlad sihid Eesti kujunemiseks teadmistepõhiseks ühiskonnaks.

On hea meel, et tänavuste laureaatide tegemised on kõik selle suundumusega – mõista loodus- ja tehismaailma seaduspärasusi ning sellega inimeste tegemisi hõlbustada ning väärtustada. Vaadates üle laureaatide nimistu, tundub et väga suur osa pärjatud teadustulemustest leiab otsest rakendust just Eestis, olles samal ajal rahvusvaheliselt tunnustatud. See on äärmiselt hea märk ja teeb tõsisist rõõmu.

*Jüri Engelbrecht*

*Síim Kallas*

Eesti Vabariigi peaminister

*Tervitus teadus-, kultuuri- ja spordipreemiade kätteandmisel 24.02.02*

Austatud akadeemikud, head kohalviibijad, lugupeetud laureaadid!

Teadus-, kultuuri- ja spordipreemiaid kätte andes austame me täna oma eelkäijaid. Igal rahval on eelkäijad, rahvas vajab eelkäijaid, kes lähevad edasi seniseid teadmisi, arusaamu muutes, murdes, täiendades, seniseid maitseid ümber kujundades, seniseid treenimis- ja võistlusvõtteid muutes.

Eelkäijatest saavad kuulsused, tähed, kes säravad, kelle poole vaadatakse, keda imetletakse, keda vajatakse nagu päikesevalgust, kes toidavad usku uutesse võimalustesse, kes innustavad uusi tegijaid uutele saavutustele, uutele piiride uuendamisele.

Oma kunagise mälumänguhuvi tõttu olen tutvunud tuhandete inimeste elulugudega. Ja kindel on, et kõik kuulsused on ainulaadsed.

Ainulaadsus ei ole kunagi kergelt tulnud ega vastuseisuta omaks võetud. Alati on keegi, kes ütleb – nii ei saa, nii ei tehta, teised teevad teisiti. Midagi uut-moodi teha, see on valus ja vaevaline, aga meeletult õnnelikuks tegev protsess.

Õnnitledes tahan tunnustada tööd, mis on tehtud, vaeva, mis on ületatud, et olla eelkäija, olla kordumatu.

*Mailis Rand*

Eesti Vabariigi haridus- ja teadusminister

## *Tervitus teadus- ja kultuuripreemiade kätteandmisel 24.02.03*

Austatud laureaadiid, Peaminister, külalised!

Mul on suur heameel tervitada siin saalis käesoleva aasta teaduspreemiade 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 tippteaduse 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!





## SAATEKS

Mul on hea meel kõiki tervitada siin Teaduste Akadeemia saalis, mis on igati kohane taolisteks pidulikeks sündmusteks. Palju õnne kõigile Eesti iseseisvuspäeva puhul!

Me alustame tänast pidulikku sündmust riigi teaduspreemiade kätteammisega. Teadustulemused ei ole alati laia tähelepanu fookuses nagu näiteks olümpiamängud. Ometi on inimõistuse rakendused ühiskonnale põhiliseks edasiviivaks jõuks. Nii on ka meil Eestis, uued teadmised on vajalikud kõigi argipäeva murede kiuste. Eesti teadus- ja arendustegevuse strateegia, mille Riigikogu heaks kiitis möödunud aasta lõpus, seab kindlad sihid Eesti kujunemiseks teadmispõhiseks ühiskonnaks. On hea meel, et tänaste laureaate tegemised on kõik selle suundumusega – mõista loodus- ja tehismaailma seaduspärasusi ning sellega inimeste tegemisi hõlbustada ning väärtustada. Vaadates üle laureaate nimistu, tundub et väga suur osa pärjatud teadustulemustest leiab otsest rakendust just Eestis, olles samal ajal rahvusvaheliselt tunnustatud. See on äärmiselt hea märk ja teeb tõsist rõõmu.

Ja nüüd lubagegi järjekorras välja kutsuda tänavused teaduspreemia laureaadid. Alustame nagu ikka traditsiooniliselt, pikaajalise tulemusliku teadustöö preemia, ehk elutöö preemia laureaadist.

Eesti loodus on meile kõigile südamelähedane. Et loodust hoida, tuleb loodust mõista ning on ülimalt hea meel paljudest inimestest, kelle pühendumus avab nii teadusele kui meile kõigile looduse eripära. Tänavune pikaajalise teadustöö preemia lähebki loodusteadlasele, keda kogu Eesti rahvas tunneb. Mehele, kes on teadlase täpsusega edendanud botaanikat ja mükoloogiat, kes tunneb põhjalikult seeni ja on osava sulega teinud looduse lähedaseks nii noortele kui ka vanadele, seda juba rohkem kui 50 aastat teadlase, õpetaja, filosoofi, publitsisti, teadusjuhi rollis.

Pikaajalise teadustöö preemia laureaate tänavu on Erast Parmasto.

Täppisteaduste aastapreemia läheb tänavu astrofüüsika valdkonda, mis Eestis pikaajalise traditsiooniga on. Tegemist on 21. sajandi tähtede-neutronitähed evolutsiooni mehhanismi seletamisega, mis annab lisateavet Universumi ehitusest. Aastapreemia laureaate on rahvusvaheliselt kõrgelt tunnustatud astrofüüsik Ene Ergma.

Keemia ja molekulaarbioloogia valdkonnas tunnustati aastapreemia vääriliseks rakuhormoonide uurimise. Rakuhormoonidel on täita signaalide osa paljudes füsioloogilistes protsessides. Alustades lihtsamatest selgrootutest, annavad taolised uurimused aluse patofüsioloogiliste mehhanismide mõistmiseks inimesel, olgu selleks siis põletikuprotsessid või südame-veresoonkonna haigused. Aastapreemia laureaate on kollektiiv eesotsas Nigulas Sameliga. Temaga koos Ivar Järving, Reet Koljak, Karin Valmsen ja Külliki Varvas.

Tehnikateadustes on tavakohaselt põimunud nii teoreetiline kui rakenduslik pool ühtseks tervikuks. Nii on see ka tänavuse aastapreemia vääriliseks tunnustatud uurimusega, mis käsitleb meie kodust Läänemerd. Et mõista lainete dünaamikat, peab olema hea teoreetik, et seletada lainete mõju kaldale,

peab olema hea praktik. Konkreetne rakendusliku ülesandena kavandatud uurimus andis käesoleval juhul olulisi teadustulemusi laineväljade käitumisest äärmuslikes olukordades. Aastapremia saab kollektiiv eesotsas Jüri Elkeniga, kuhu kuuluvad Tarmo Soomere, Jüri Kask, Tarmo Kõuts ja Uno Liiv.

Arstiteaduses on alati oluline inimeste tervis ja elukvaliteet. Tänavune aastapremia laureaat on otseselt seotud infektsioonide profülaktikaga ja raviga. Tulemused haaravad laste allergilisi haigusi, tuberkuloosi, seedeinfektsioone. Ja jälle pole need tulemused jäänud laboratooriumi seinte vahele, vaid jõudnud litsenseerimisele ja patenteerimisele. Aastapremia laureaat on Marika Mikelsaar.

Geo- ja bioteaduste alal läheb aastapremia bioloogilise mitmekesisusega tegelevatele teadlastele. Tegemist on alusuuringutega loomaökoloogia valdkonnas, tulemuseks liikide areaali muutuste selgitamine, mis otseselt seotud kliimaatiliste teguritega, selle kaudu aga tehiskeskkonnaga. Rahvusvaheliselt tunnustatud teadlaskollektiivi eesotsas seisab Raivo Mänd, temaga koos saavad aastapremia Peeter Hõrak, Toomas Tammaru ja Indrek Ots.

Põllumajandusteaduste väga oluline osa on maaviljelus. Heade saakide saamine sõltub aga väga palju sellest, kuidas kaitsta kultuurtaimi kahjurite eest. Tänavuse aastapremia laureaate tulemused haaravad putukatõrjevahendite toime selgitamisest alates süvauuringutest kuni tulemuste juurutamiseni, eriti Eestis ja samuti rahvusvahelises ulatuses. Aastapremia laureaadiks on kollektiiv, kelle eesotsas on Anne Luik, temaga koos saavad aastapremia Külli Hiiesaar, Aare Kuusik, Enno Merivee ja Luule Metspalu.

Sotsiaalteadustes läheb aastapremia biosemiootika valdkonda. Alguse on see teadusvaldkond saanud Jakob von Uexküllist, kuid tänapäevane biosemiootika haarab märkide tähtsust füüsilises looduses, kogu looduse kujunemist ning palju muudki, haarates ka keele võimalikku teket. Laureaat on oskuslikult ühendanud teoreetilise bioloogia, arenemisõpetuse, ökoloogia ja semiootika ühtsesse arusaama, rahvusvaheline hinnang laureaadile nimetab teda maailma juhtivate biosemiootikute hulka kuuluvaks. Mul on ka hea meel kuulutada sotsiaalteaduste aastapremia laureaadiks Kalevi Kulli.

*Jüri Engelbrecht*

Eesti Riigi teaduspreemiate komisjoni esimehe tervitus  
24. veebruaril 2001

## *Teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest*



*Erast  
Parmasto*

Sündinud 23. oktoobril 1928 Nõmmel

- 1947 Tallinna X Keskkool (Nõmme Gümnaasium)
- 1952 Tartu Ülikool
- 1955 bioloogiakandidaat, NSV Liidu Teaduste Akadeemia V. L. Komarovi nim Botaanika Instituut
- 1969 bioloogiadoktor, Eesti Teaduste Akadeemia
- 1972 Eesti Teaduste Akadeemia liige
- 1980 professor, botaanika
- 1998 Valgetähe III klassi teenetemärk

Eesti Looduseuurijate Seltsi, Ameerika Mükoloogia Seltsi ja Poola Botaanika Seltsi auliige; Emakeele Seltsi, Rahvusvahelise Taimetaksonoomia Assotsiatsiooni ja Briti Mükoloogia Seltsi liige.

Ametid Eesti Teaduste Akadeemias: Zooloogia ja Botaanika Instituudis alates 1950. a: vanemaednik, vanemlaborant, vanemteadur, sektorijuhataja, laboratooriumijuhataja, teadussekretär, direktor, peateadur, vanemteadur; Eesti TA presiidiumis 1973–1981 Keemia-, Geoloogia- ja Bioloogiateaduste Osakonna akadeemiksekretär. Kohakaaslasena: 1957–1960 ajakirja “Eesti Loodus” toimetaja, 1987–1995 Tartu Ülikooli botaanika ja ökoloogia instituudi professor ja erakorraline professor.

Avaldanud üle 175 teaduspublikatsiooni, 150 populaarteadusliku ja 200 publitsistliku kirjutise.

*Teadlaseks kujunemist on mõjustanud sündimine ja kasvamine loodusrikka Nõmme linna metsaservases osas; pooltosinat maal veedetud pikka suve (seehulgas nii karjusena kui ka talu tööpoisina); õigeaegne kohtumine loodusteaduslike huvidega endast pisut vanemate noortega (Endel Alas, Valdar Jaanusson, Ralf Männil, Kuno Thomasson, Juhan Vilbaste); teadlaste sõbralik toetus juba koolipõlves (Jaak Ruubel, Gustav Vilbaste, Albert Üksip, teaduskirjanduse muretsemisel Karl Orviku ja August Vaga); head õpetajad-juhendajad (Üksip, Vaga, Apollinari S. Bondarzew); veel tudengina teadusasutusse laborandiks võtmine (Silvia Talts, Harald Haberman); head sõbrad-kaasbioloogid (Erich Kukk, Väino Lasting, Harry Ling, Hans Remm, Hans-Voldemar Trass jt.), geoloog Arvo Rõõmusoks ja latinist Ülo Torpats; head kaugemad, maailmanimega vanemad kolleegid, kellega kohtumiseni pidasin pikki aastaid kirjavahetust (John Eriksson, Viljo Kujala) või kellega ei kohtunudki (Elmar Leppik, Josiah L. Lowe, Albert Pilát, Luella K. Weresub).*

*Teadlaseks kujunemise alguse alusepanijaiks olid mu isa, Riigi Trükikoja tisler Hans, kes aastakümnete jooksul oli koju muretsevad väärtkirjanduse kogu; ema Marie, kes mind varakult seenestamiskäikudele kaasa võttis; vend Hubert, kes 1943. aasta suvel tõi mulle maale esimese hea taimemääraja; Anton Hansen, kelle tõlgitud 2-köiteline “Looduse imed” oli mulle lapsepõlves kuu aega põetud haiguse ajal peamiseks lugemisvaraks.*

*Siinkohal on ka võimalus veel kord tänusõnu ütelda neile vast mitmesajale metsavahile, metsaülemale, metsatöölisele, talunikule, looduskaitseala töötajale nii Eestis kui ka Venemaal, Kesk-Aasias ja Kaukasuses, kes mulle, vähivõõrale inimesele mingi tasuta öömaja, sõitu, sageli ka einet, alati aga sõbralikku suhtumist pakkusid.*

See pikk ja ometi väga ebatäielik nimekiri oleks siin ehk ebasobiv, kui see ei kinnitaks professor Johannes Piiperi paljutsiteeritud sõnu: *Inimene on seltskondlik loom*. Mida keegi oma elus tunnustust pälvivat ära teeb, see sõltub pisut geenidest, tublisti juhusest, kõvasti töökusest, eelkõige aga teda ümbritsevatest teistest inimestest.

Alustasin oma teadustegevust 1943. aastal lihhenoloogias, samblike “uurijana”, ja botaanikas. Minust ei saanud ornitoloogiahuvilist, nagu alguses mu sõpradest: silm ja kõrv ei olnud küllalt väledad, taipamis- ja äratundmishetked olid aeglasemad kui kulus linnul ära lendamiseks. Taimed ja samblikud olid minusugusele sobivamad. Endale aru andmata alustasin sellest, mis valitses Eesti botaanikas 1930ndail: liikide kogumisest (herbariseerimisest), määramisest, äratundmisest, nende esinemise registreerimisest. Ülikooli teisel kursusel taipasin, et Eestis on lihhenoloogide liiga palju – minuga koos tervelt kolm –, seentest ei hooli aga keegi. Meil on pikka aega peetud liikide tundmist ja esinemise kirja panemist taimesüsteemataika tähtsaimaks ülesandeks – koos vastavate kokkuvõtete ja taimemäärajate avaldamisega. Tänapäevalgi on niini-

metatud bioloogilise mitmekesisuse uurimine sageli põhiosas samal, registreerival tasemel.

Mingil väiksemal alal, näiteks Eestis ei valmista taimeliikide eristamine harilikult erilisi probleeme – kui mitte arvestada agaamselt paljunevate võilillede, hunditubakate ja veel mõne perekonna mikroliike. Seentega on asi vaid selle võrra keerulisem, et nende liigi määramiseks tuleb kasutada mikroskoopi. Veel enne seda tuleb neid aga värskest peast kirjeldada – värvus, konsistents, isegi kuju muutuvad herbariseerimisel lausa tundmatuseni. Algul huvitusin Eesti lehikseentest (kuhu kuulub enamik meie söödavatest ja mürgistest seentest); puudusid aga sobivad käsiraamatud ja nende seente õppimine ilma hea asjatundja abita on lootusetu. Nii pöördusin metsades tavaliste, eluspuudel mädanikke ja surnud puidu kõdunemist tekitavate torikseente poole. Nende levikust Eestis ja spetsialiseerumisest kirjutasin diplomitöö (1952) ja siis kandidaaditöö (1955), mis pisut täiendatuna ja tublisti lühendatuna ilmus vene keeles aastal 1959. Viimast juhendas selle rühma maailma parimaid asjatundjaid, Leningradi professor Bondarzew. Viimaselt õppisin kõige rohkem kriitilist meelt ja seda, et kui tahes huvitav hüpotees pole seni midagi väärt, kuni seda pole kinnitatud uute andmetega ja kümneid kordi kontrollitud. Doktoritöö koostamisele ma hiljem aega ei raisanud (kaitsesin 1969. a 64 trükis avaldatud töö temaatilist tsükli).

Eestist leidsin 130 torikseente liiki ja meie maa muutus selles suhtes hästi uuritud väiksemaks paigaks Euroopas – arvata teiseks Taga-Karpaatia järel. Välitöödel veedetud paljude päevadega hakkasin pääsema ka liigijahtija-registraatori lummusest. Enam kui 60 vaatluskäigul Järvelja põlismetsadesse hakkasin jälgima torikuliste eoste valmimise ja eraldumise fenoloogiat ja nende suhtelist hulka sõltuvalt ilmastikutingimustest. Tolle ajani oli seda (maailmas) looduses uuritud vaid 19 liigil; nüüd oli uurimise all 56. Leidsin, et lisaks ühe- ja mitmeaastastele viljakehadele esineb neil seentel ka üheaas-taseid-talvituvaid – õistaimede vastava elukäiguga eluvormi analooge. Nägin, et laboratoorsed eksperimendid ilma looduses toimuvaga seostamata võivad teadlase viia eksiteele. Torikulised sporuleerisid (kirjandusandmeil) laboris mõne nädala, Järveljal tegid nad seda looduses kuni kuus kuud. Mitte sel ajal, kui eoste moodustamine on soodsaim (soojal suvel), vaid siis, kui eoste levimiseks ja idanemiseks on parimad tingimused – alates väga varasest kevadest suveni ja siis hilissügiseste külmadeni. Kümme aastat hiljem teostasime kolme aasta jooksul terve seeria eoste hulga määranguid eri liikidel ja eri ilmastikutingimuste puhul, seda ka ööpäevase dünaamika leidmiseks. Eluspuudel kasvavad torikseened moodustavad eoseid 100–200 päeva vältel aastas, üks viljakeha annab selle aja jooksul  $5\text{--}35 \times 10^{10}$  [kümme astmes kümme – E.P.] eost. Eriti intensiivne on eoste levimine sel ajal, millal me praegu Eestis taotleme raierahu kehtestamist.

Pärast väitekirja kaitsmist soovitas Bondarzew võtta käsile mõne väheuuritud nahkiseliste (Corticaceae) perekonna süstemaatika monograafilise käsitluse, mis hõlmanuks kogu tollase Nõukogude Liidu. Tutvumine kesketes herbaariumides leiduvate eksemplaridega näitas, et neid peaaegu polegi. Niisiis asusin esialgu hoopis teise suurseente rühma, harikuliste määrajat koostama ja alustasin ekskursioonide ning välitöödega. Noorusele omase maksimalismiga koostas kava mõne aastakümne jooksul läbi käia kõik taimkattevõetmed Kesk-Aasia mägikõrbest Jakuutia metsatundrani, Vilsandilt Kuriili saarteni.

Esimene matk toimus koos entomoloog Hans Remmiga 1956. aastal Taga-Karpaatiasse, viimane kaugem kogumisretk oli 1998. a Arizonas (USA). 63 kaugmatkale lisandub mõnikümme puhku, millal kongresside ja sümposiumide täiendusena kogusin mõned päevad seeni peatuspaiga läheduses või järgnenud ekskursioonidel. Kui Eesti jagada 10x10 km suurusteks UTM-kaardiruutudeks, olen enam kui 500 maismaaruudust viibinud 410-l. Neil kogumispäevadel korjasin umbes 37 000 eksemplari seeni. Meelispaikeks said Venemaa Kaug-Ida (kuhu ulatub paarikümne subtroopilise liigi levila) ja Siber. Suuremas osas kogumispaikest on praegu taiga asemel raiesmikud või põlendikud, nende alade kõrgemad seemed on praegu esindatud peamiselt vaid (Tartus asuvas) ZBI kollektsioonis. Tänu praegustele meetoditele on paljusid neid võimalik kasutada ka molekulaarsüsteemaatiliseks uurimiseks. See kogumistegevus, eelkõige väheasustatud või hoopis “metsikutes” paikades, sai aluseks järgmistele uurimiste tasemetele, eelkõige nn  $\alpha$ -taksonoomilisele.

Seda taset iseloomustab looduse mitmekesisuse tundmise algandmestiku täiendamine – uute liikide kirjeldamine ja neile põhjendatud koha leidmine senituntud seente süsteemis. Kui piiratud alal (näiteks Eestis) on liigid üksteisest hästi eristatavad, siis kogu oma levikualal teeb asja keeruliseks liigisisene varieeruvus ja sarnaste teisikliikide olemasolu. Olen uusi liike kirjeldanud üle 110 ja suurem osa on neist hiljem osutunud looduses tõepoolest esinevaks. Seeneliike tuntakse seni umbes 80 000; oletatavasti leidub neid maailmas kuni poolteist miljonit, enamuses küll troopilistel ja subtroopilistel väheuuritud aladel. Samas jõudsin iseloomustada mitmete piirkondade metsaseenestikku üldise-maltki – nii Kamtšatkat, Komimaad, mitmeid Kaug-Ida looduskaitsealasid. Materjali kogunemisega võimaldus teha esialgseid järeldusi seente leviku kohta – eelkõige Aasia Kaug-Ida ja Põhja-Ameerika seenestiku sidemete ning Gibraltarist Gobi kõrbeni ulatunud Ürgvahemere levikuelemendi kohta. Nende seente praegune levik on kujunenud ajalooliselt ja viitab, et paljud seeneliigid võivad olla enam kui kahekümne miljoni aasta vanused, niisiis tunduvalt vanemad kui enamik taimeliikidest.

Üheks oma kordaläinud tööks loen monograafiat troopilise sambliku/seeneperekonna *Dictyonema* (sünonüüm: *Cora*) kohta [1978]. Maailma 40 eri herbaariumist laenatud 1133 eksemplari uurimise alusel leidsin, et enam kui 40 kirjeldatud liigi asemel on neid tegelikult vaid viis, ja et sama seeneliik võib eri vetikaliikidega kombineerudes moodustada eri sambliku “liike”. Viimase eksperimentaalse tõestamiseni pole paraku veel jõutud.

Liikide käsitlus on süstemaatikas teine etapp. Järgmine viib  $\beta$ -süsteemaati-kasse. Liikide suure hulga puhul (nagu see on ka mu lemmikobjektidel, torikulaadsetel ja nahkiselistel) on süstemaatikule alati parajaks pähkliks olnud nende suhted, nende korrastamine suurematesse taksonoomia ühikutesse (pere-kond, sugukond, selts, klass, hõimkond). Sajandite jooksul oli ideaaliks peetud nn loomulike taksonite (rühmituste) kirjeldamist, kasutades selleks eelkõige *oluliseks peetud* tunnuste sarnasuse määra. Pika aja jooksul oli peamiseks töövahendiks süstemaatikul välja kujunev *intuitsioon*. Mõistagi viis see üksteisest erinevate klassifikatsioonide kujunemiseni ja õigustatud etteheideteni teiste bioloogide poolt – süstemaatika pole niiviisi teadus, vaid kunst. Sellise omaaegse lähenemisnurga all kirjutasin mitmed pisimonograafiad üksikute seenerühmade kohta (Lachnocladiaceae – 1970, *Cerinomyces* jt). Teooriaga põhjendatumaks kujunes nahkiseliste sugukonna (Corticaceae s.l.) süsteemi esimese

ülevaate koostamine [1968]. See olude sunnil ladinakeelne teos (alternatiiviks oli maailma mükoloogidele veel vähem mõistetav vene keel) oli üldkasutatavaks käsiraamatuks veerandsajandi jooksul. Lähtusin alguses vägagi vaieldavaks peetud hüpoteesist, et nahkiselised pole sekundaarselt lihtsustunud organismide rühm, vaid algselt “primitiivsete” tunnuste ülekaaluga taksonite kogum. Tänapäevases süstemaatika keeles öelduna valdavad neil morfoloogilises ehituses plesiomorfsed tunnused. Uuemate andmete kuhjumisel koostasini ka sama süsteemi teise, uuema versiooni (1986).

Mul on olnud õnn elada süstemaatika poolenisti kunstist täiesti teaduslikuks kujunemise ajajärgul. 1950ndaist alates levis kiiresti feneetika – meetod, mis võimaldab (liikidevahelist) sarnasust formaliseerida, mõõta ja saadud parameetrite alusel liike rühmitada. Tunnustejärgse erinevuse põhjal võib leida liikidevahelise distantssi, selle alusel kasutada ordinatsioonimeetodeid, liike klasterdada, graafidena kujutada nende sarnasuspuid. Paraku kulus mitu aastakümnet, enne kui nõustuti: feneetika võimaldab küll liikide sarnasust ja erinevust hästi korrastatult (ordineeritult) esitada, kuid saadud klassifikatsioon ei kajasta liikide ega isegi mitte nende tähtsamate tunnuste evolutsiooni. Küll aga võimaldavad feneetilised meetodid kontrollida lähedaste liikide erisust või nende eristamise alusetust. Selleks olen neid kasutanud praeguseni (näiteks *Phellinus linteus*’e liigirühmas) [Parmasto, Parmasto, 2001].

1988. aastal, koos tolle aja kohta korraliku IBM XT-tüüpi arvuti muretsemisega alustasin kolmandat korda nahkiseliste süsteemi täiustamist, kasutades fülogeneetilist (kladistilist) meetodit. Selle meetodi alussambaks on liike isoleerimise tunnuste ajaloolise kujunemise arvutuslikult leitud puude kui hüpoteeside hindamine parsimoonia- ehk säästuprintsiibi abil. Metodoloogiliselt tähendas see, et biosüstemaatikud hakkasid möödunud sajandi lõpul liigandmestiku ordineerimise, mitmel viisil korrastamise asemel püstitama teaduslikke hüpoteese, neid kinnitama ja falsifitseerima.

Fülogeneetiline süstemaatika levis zooloogide ja botaanikute hulgas, seente kohta avaldatud uurimusi oli veel 1994. aastalgi alla tosina. Viiendal Rahvusvahelisel Mükoloogia Kongressil (Vancouver, 1994) esitasin kaks aastat enda ja arvuti aega võtnud nahkiseliste süstemaatika kladistilise analüüsi tulemused [Parmasto, 1995a]. Enam kui 1000 liigi 240 perekonna võrdse pikkusega kladogramme, st samaväärseid arengupuid ehk klassifikatsiooni-hüpoteese olin saanud üle 2500. Nende konsensuspuu, st kõigi hüpoteeside ühisosa võimaldas eristada 11 monofüleetilist, st *looduslikku* perekondade rühmitust (sugukonda). Paljude perekondade asetus süsteemis jäi samas lahtiseks. Seegi oli tollal hea tulemus; ilmselt polüfüleetiliste nahkiseliste üldise klassifikatsiooni saamine osutus aga võimatuks. Morfoloogiliste tunnuste vähesus, nende siis eriti selgeks saanud ulatuslik konvergens, paralleelne teke ja evolutsioonis tagasi pöördumine näitasid: ainus lootustandev tee on molekulaarsete tunnuste eeliskasutamine.

Selle tee realiseerimisel sattusin raskustele, millest oleme üle saamas alles viimastel aastatel: aparatuuri ja raha puudus. Tegin vea: ennast 65-aastasena rumalal kombel liiga vanaks pidades ei õppinud ma ära oma kätega DNA eraldamist ja sekveneerimist, vaid lootsin kasvatada selleks noori. Neid leidis mõni, aga nad ise leidsid peagi oma võimetele huvitavamaid rakendusi. Nii olen nahkiseliste nüüdisaegset süstemaatikat saanud edasi viia ainult mõne

rühma osas; seda koostöös oma sõbra Nils Hallenbergiga, kes sekvenerimist teostas Göteborgis (vt. nt [Parmasto, Hallenberg, 2000]). Õnneks leidub maailmas praegu paar mükoloogi, kes nahkiseliste ja sugulasrühmade klassifitseerimise mammuttöö on väga edukalt käsile võtnud (Karl-Henrik Larsson Rootsis, Urmas Kõljalg Tartus jt).

Ikka ja jälle olen tagasi pöördunud liikide olemuse ja eristamise probleemide juurde. Ligi pooled maailma uutest seeneliikidest on kirjeldatud väga vähese faktilise andmestiku alusel, sageli üheainsa eksemplari (isendi) põhjal ja seega ilma liikide varieeruvuse ulatust hoomamata. Koos Ilmi Parmastoga avaldasin 1987. aastal rohketele mõõtmistulemustele toetuva uurimuse eoste suuruse ja kuju varieeruvusest ja selle arvestamisest liikide eristamisel. Liigi eri eksemplaride keskmised on normaalse või lognormaalse jaotusega, variatsioonikoefitsient on tavaliselt piires 5–9. Ühe isendi eoste omavaheline varieeruvus pole korrelatsioonis eri isendite varieeruvusega liigi piires. Sellest järeldub, et eoste andmestiku kasutamine näiteks kahe sarnase liigi eristamiseks nõuab mitte ainult mõlemal mitme (soovitavalt 10–21) eksemplari uurimist, vaid ka erinevuste olulisuse hindamist – mida statistilised meetodid ka võimaldavad.

Laiemalt võttes on küsimus üksiknähtustest järelduste tegemise lubatavuses, veelgi laiemalt – teadusliku ehk kriitilise mõtlemisviisi aktsepteerimises. Seda mitte ainult teaduse suurtõhususes, vaid ka süstemaatika igapäevases töös. Paraku tuleb tal sageli võtta liikide eristamises seisukoht vähese faktilise andmestiku alusel. Nii olen minagi kirjeldanud mitmeid uusi liike kergekäeliselt; püüan oma viga parandada sellega, et uurin (praegu *Hymenochaete*-) liikide varieeruvust ja liidan selle alusel teiste poolt ekslikult iseseisvana käsitletud liike. See nõuab tunduvalt suuremat tööd kui uute liikide kirjeldamine.

Pean 1987. a ilmunud raamatut üheks meie olulisemaks publikatsiooniks; ometi on seda kaunis vähe märgatud ja mingil määral ignoreeritudki – oma järeldustelt on see ju suunatud paljude aina uusi liike tegevate mükoloogide vastu. Viga on ehk ka tõendava materjali liiga põhjalikus esituses; raamatut on raske lugeda, eriti neil paljudel mükoloogidel, kes pole vaevaks võtnud biomeetriat tõsiselt võtta.

Elusolendite süsteemi perekonnad, sugukonnad jt liigist kõrgemad üksused on inimese poolt nimega varustatud rühmitused, mis ideaaljuhul ühendavad kõiki ühise päritoluga liike, st on monofüleetilised. Kuni hilisajani on neid püütud luua nii, et näiteks mõnest suurest perekonnast on eraldatud ja siis teadusele uue perekonnana kirjeldatud teistest mingi oluliseks peetud tunnuse poolest erinev liikide rühm. Loodetakse, et selline feneetiline lähenemine muudab süsteemi reaalsusele paremini vastavaks. Tegelikult toimub vastupidine: perekondade killustamine (*skisotaksia*) suurendab segadust, muutes algse suure perekonna parafüleetiliseks, suvaliste piiridega rühmituseks [Parmasto, 1994]. Oma elu jooksul kirjeldatud 100 uue liigiülese taksoni seas leidub paraku hulk selliseid ülearuseid. Kuni fülogeneetilise klassifikatsiooni loomiseni on nende ainsaks õigustuseks liigiandmestiku *korrastamine* – võimalus hõlpsamini kirjeldada biomitmekesisust.

Orienteerumiseks maailma nahkiselike rohkete sünonüümide (kokku üle 8000 nimetuse) ja erinevate klassifikatsioonide kaoses valmis 1996. aastal ligi 25-aastase andmekorrastuse tulemusel nomenklatuurne andmebaas CORTBASE koos kasutajasõbraliku otsinguprogrammiga. Selle eelmine ver-



sioon (vers. 1.3) tehti minevaasta keskel kättesaadavaks ka interneti abil ja levis aasta lõpuni 450 koopiana. Käesoleva aasta jaanuaris valmis ja asuti levitama uut versiooni (1.4).

Nende ridade kirjutamise ajal on käsil viimne suurem töö – taeliknahkiseliste perekonna *Hymenochaete* ja sugulasrühmade fülogeneetilise süsteemi selgitamine kladistilise analüüsiga. Sellele eelnes umbes 40 aasta jooksul nende seente kogumine, liikide kirjeldamine, leviku selgitamine. Üheks selle kokkuvõtteks sai [2001b] Põhja-Ameerika ja Mehhiko käsitus, viimistlemisjärjus on Hawaii saarte ja Taiwani bioota. Uurimiste esimeses etapis näitas kladistiline analüüs perekondade seni kasutatud morfoloogilise süsteemi alusetust [1995]. Käsilolevas lähtutakse nii molekulaarsetest kui ka morfoloogilistest tunnustest ja püütakse perekonna evolutsiooni seostada teiste taelikulaadsete kujunemisega. Nagu minust varem uuritud nahkiseliste, nii ka nende seente evolutsiooni peegeldav süsteem ei valmi praegu veel optimaalsena. Seda enam, et tänapäevane molekulaarsüsteematika on alles metoodika kujunemisjärjus. Jättes nende uurimiste edasise arendamise mitmete, ka Tartus esindatud maailma nooremate mükoloogide hooleks, kordan tänagi täies meelerahus Ernest D. Burtoni sententsi: *I long ago decided that anything that could be finished in my lifetime was necessarily too small an affair to engross my full interest.* – Probleem, mille lahendamisega teadlane saab hakkama oma elu jooksul, on liiga tühine sellele täie tähelepanu pööramiseks.

Võimalikule küsimusele, miks olen nii palju tähelepanu pööranud Eestile kaugete probleemide uurimisele, on kaks vastust. Esiteks: paljud uurimused on siiski käsitletud Eesti seenestikku, viimasel pooltosinal aastal näiteks indiikaator-seeneliikide kasutamist põlis- ja loodusemetsade kaitsevajaduse hindamisel [2001a]. Olen püüdnud kõiki oma töötulemusi ka eesti keeles populaarselt esitada. Teiseks: seened ei tunne riigipiire, teadus ka mitte. Mükolooge on maailmas palju vähem, kui vajab nende bioloogilise mitmekesisuse uurimine. Kus huvitavaid probleeme ja tööd palju ning tegijaid vähe, tuleb kaasa lüüa.

## KIRJANDUS

Parmasto, E. 1968. *Conspectus systematis Corticiacearum*. Tartu. 261 pp. (Ladina k., venek. kokkuvõttega.)

Parmasto, E. 2000. CORTBASE. A nomenclatural database of corticioid fungi. Vers. 1.3, February 2000. ISBN-9985-9081-7-1; <http://www.systbot.gu.se/database/cortbase/cortbase.html> (Koos otsinguprogrammiga; 6.7 MB, user's guide 4 p.)

Parmasto, E. 1995a. Corticioid fungi: a cladistic study of a paraphyletic group. *Canadian J. of Botany*, 73, Suppl. 1, S843-S852.

Parmasto, E. 2001a. Fungi as indicators of primeval and old-growth forests deserving protection. Moore, D., Nauta, M.M. et al. (eds.). *Fungal Conservation. Issues and Solutions.*, Cambridge: Cambridge University. 81-88.

Parmasto, E. 1978. The genus *Dictyonema* ('Thelephorolichenes'). *Nova Hedwigia*, 29, 99-144.

- Parmasto, E. 1995b. The genus *Hymenochaete* (Hymenomycetes): Infrageneric classification and satellite genera. *Documents Mycologiques* 25, 98-100, 305-315.
- Parmasto, E. 2001b. Hymenochaetoid fungi (Basidiomycota) of North America. *Mycotaxon*, 79, 107-176.
- Parmasto, E. 1994. Limits of splitting. (On schizotaxia.) *Mycologia Helvetica*, 6, 1, 8-34.
- Parmasto, E. 1986. On the origin of the Hymenomycetes (What are corticioid fungi?). *Windahlia*, 16, 3-19.
- Parmasto, E., Hallenberg, N. 2000. A taxonomic study of phlebioid fungi (Basidiomycota). *Nordic J. of Botany*, 20, 105-118.
- Parmasto, E., Parmasto, I. 2001. *Phellinus baumii* and related species of the *Ph. linteus* group (Hymenochaetaceae, Hymenomycetes). *Folia Cryptogamica Estonica*, 38, 53-61.
- Parmasto, E., Parmasto, I. 1992. Size and shape of basidiospores in the Hymenomycetes. *Mycologia Helvetica*, 5, 1, 47-78.
- Parmasto, E, Parmasto, I. 1987. Variation in basidiospores in the Hymenomycetes and its significance to their taxonomy. *Bibliotheca Mycologica*, 115, 168 pp.

*Teaduspreemia täppisteaduste alal tööde tsükli*  
**“KOMPAKTSETE OBJEKTIDEGA KAKSIK-  
TÄHTEDE EVOLUTSIOON” eest**



*Ene  
Ergma*

Sündinud 29. veebruaril 1944 Rakveres

- 1962 Viljandi I Keskkool
- 1969 Moskva Ülikool, astronoomia
- 1972 füüsika-matemaatikakandidaat, Moskva Ülikooli Astronoomia Instituut
- 1985 füüsika-matemaatikadoktor, Moskva Kosmiliste Uurimiste Instituut
- 1994 Göttingeni Teaduste Akadeemia Gauss-külalisprofessor
- 1997 Eesti Teaduste Akadeemia liige
- 2001 Valgetähe IV klassi teenetemärk

Eesti Teadusfondi nõukogu ja täppisteaduste komisjoni esimees, Riigi teaduspreemiate komisjoni liige, Haridusministeeriumi teaduspoliitika komisjoni liige, Euroopa Akadeemiate Ühenduse (ALLEA) alalise teaduseetika komitee liige, Rahvusvahelise Astronoomia Liidu, Euroopa Astronoomia Liidu ja “Euroscience” liige, Kuningliku Astronoomia Ühingu assotsieerunud liige (UK).

1972–1974 Eesti TA Füüsika ja Astronoomia Instituudi nooremteadur, 1974–1988 NSVL TA Astronoomia Nõukogu nooremteadur, teadussekretär, vanemteadur, juhtivteadur. Alates 1988 aastast Tartu Ülikool: 1988–1992 teoreetilise füüsika ja astrofüüsika professor, 1992– astrofüüsika korraline professor, 1992–1998 füüsikaosakonna juhataja. Alates 1999. aastast Eesti TA asepresident.

Avaldanud üle 100 teaduspublikatsiooni.

## NEED IMELISED XX SAJANDI TÄHED

### SISSEJUHATUS (*emotsionaalne*)

15 aprillil 1964 a kohtus Tartu Ülikooli füüsikaosakonna teise kursuse tudeng Füüsika ja Astronoomia Instituudi asedirektori Charles Villmanniga. Kusagil keskkooli kümnendas klassis armus see tudeng tuuma- ja plasmafüüsikasse ning kuigi ta esimene katse minna tuumafüüsikat Moskvasse õppima ebaõnnestus, jäi ikkagi see soov terava okkana südamesse. Ja äkki Ch. Villmanni kabinetis tehakse talle selgeks, et täht on suurepärase looduse poolt juhitud termotuumareaktor, mis kujutab endast hiiglaslikku plasmakera. Ja veel saab ta teada, et üheks täheevolutsiooni rajajaks oli üks Eesti Teaduste Akadeemia kaheteistkümnest 1938 a Eesti Vabariigi valitsuse poolt määratud akadeemikust – Ernst Öpik. Vaevalt see teise kursuse tudeng teadis siis, et sel päeval võidab ta oma elu suurima “jackpoti”, et tal tekib suurepärase võimalus elada kõige erutavamast aegast, mis teadlasele osaks võib saada, kui tema erialal toimub hiiglaslik progress.

Kuuekümnendate aastate keskpaigaks kasvasid astronoomia võimalused tohutult seoses inimese tungimisega kosmosesse. Inimese “pisike silm” nähtava kiirguse piirkonnas muutus pea lõpmatuks, haarates endasse kogu elektromagneetilise kiirguse piirkonna (joonis 1). Üks tuntumaid selle aja astrofüüsikuid Josif Šklovski ütles tabavalt, et kuuekümnendatel aastatel toimus astronoomias teine revolutsioon.

1	2	3	4	5	6	7			
$10^{-12}$	$10^{-10}$	$10^{-8}$	$10^{-6}$	$10^{-4}$	$10^{-2}$	1	$10^2$	$10^4$	$10^6$

Joonis 1 Elektromagneetilise kiirguse skaala (lainepikkus sentimeetrites).

1–2	gammakiirgus,	5–6	infrapunane kiirgus,
2–3	röntgenkiirgus,	6–7	mikrolainekiirgus,
3–4	ultraviolettkiirgus,	7–	raadiokiirgus
4–5	nähtav kiirgus,		

Ja 38 aastat hiljem on see tudeng Eesti Teaduste Akadeemia liige ning tema tagasihoidlik panus tähefüüsikasse pärjatakse Eesti Vabariigi teaduspreemiaga *täppisteaduste alal*.

Kahjuks polnud mul võimalik olla isiklikult tuttav akadeemik E. Öpikuga, kuna tema eluajal me elasime kardinaalselt erinevates maailmades. Olgu see kirjutis väikeseks panuseks akadeemik Ernst Öpiku mälestuse talletamisel.

## SISSEJUHATUS (*emotsioonideta*)

Tähe sündi, elu ja surma võiks tähistada ühe märksõnaga – võitlus gravitatsioonijõuga. Algab ju tähe elu hõreda gaasitolmupilve kokkusurumisega gravitatsiooni mõjul, kuni prototähes süttib vesinik. Tähe noorus, nagu noorus ikka, on väga tormiline, millega kaasneb hulk huvitavaid, kaasaegsete meetoditega vaadeldavaid nähtusi, kuid see ei ole antud artikli teema. Ja lõpuks on tähe sees temperatuur ja tihedus nii kõrge, et hakkab toimima nelja prootoni süntees heeliumiks. Gravitatsiooniline kokkutõmbumine peatub lõplikult, kuna termotuumareaktsioonidest eralduv energia on küllaldane, et stabiliseerida gravitatsiooni mõju. Tähe elus saabub nüüd pikk stabiilne periood, mille vältel ta põletab ära suurema osa oma vesinikust. Mida massiivsem on täht, seda kiiremini toimub vesiniku põlemine. Meie Päike jätkab veel vesiniku põletamise staadiumis umbes 5 miljardit aastat (praeguseni on ta sellises staadiumis olnud juba 4,5 miljardit aastat). Üldse on tähe mass tema termotuumalise evolutsiooni põhiparameetriks. Mida suurem mass, seda kaugemale termotuumalises mõttes toimub tähe evolutsioon. Näiteks Päikese termotuumalise evolutsiooni tipuks on ainult hilisem heeliumi põlemine, Päikesest natuke massiivsemad tähed ( $< 9 M_{\odot}$ ) lõpetavad oma elu C-O (süsinik-hapnik) valgete kääbustena, kusjuures nende hilist evolutsiooni määrab suurel määral pisike osake – neutriino, mille abil evolutsiooni lõpp-staadiumides toimub efektiivne energiakadu. Suurema massiga tähed lõpetavad oma termotuumalise evolutsiooni raudtuuma moodustamisega, mis kollapseeerub kas siis neutrontähte või musta auku, kusjuures seda gigantset sündmust saadab võimas aine väljapurse ja taevasse tekib “uus täht” – Supernoova, nagu seda väideti juba vanades Hiina ürikutes. Saatuse iroonia tõttu aga “uus täht” ei ole mitte tähe sünd (see toimub pea märkamatuks), vaid tähe surm, tema viimane järelhüüe meile.

Varsti pärast neutronite avastamist Sir J. Chadwick’i poolt (1932) näitas noor tulevane Nobeli preemia laureaat L. Landau, et on võimalik konstrueerida stabiilne konfiguratsioon, mis koosneb neutronitest, kusjuures aine on nii tihedalt kokku pakitud, et sellise tähe keskmine tihedus on umbes  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup> – tõeline gigantne aatomituum. Et näiteks meie Päikesest teha neutrontäht, tuleks ta kokku suruda kerra, mille raadius on umbes kümme kilomeetrit. Sellise kokkusurumise tagajärjel eraldub hiiglaslik energia – umbes  $10^{53}$  erg. Kahjuks või õnneks Päike ei satu ialgi situatsiooni, kus selline kokkusurumine võiks realiseeruda.

Möödunud sajandi kolmekümnendate aastate lõpul pakkusid kaks tuntud astrofüüsikut F. Zwicky ja W. Baade välja vapustava hüpoteesi – neutrontähed sünnivad Supernoovade plahvatustes!!! Tolle aja kohta, mill tähe termotuumaline evolutsioon oli alles embrüonaalses olekus, oli see tõesti lausa selgelnägija ennustus!

Kuid kas neutrontäht on viimane evolutsioonistaadium kompaksete tähtede reas? Selgus, et ei, juba 1939 a leidsid ameeriklased G. Volkoff ja R. Oppenheimer (tulevane USA aatompommi isa), et kui neutrontähe mass on suurem kui 3 Päikese massi, kollapseeerub neutrontäht gravitatsiooni mõjul musta auku. Kui neutrontäht on tõeline XX sajandi laps, siis mustast august teati juba enne de Laplace’i. 1783 a oli John Michell, inglise loodusfilosoof, esimene, kes näitas, et kui mingi keha omab väga tugevat gravitatsioonivälja, siis on isegi valguse osakesel (arvestades valguse korpuskulaarset iseloomu) võimatu pääseda kompakse tähe gravitatsiooniväljast. Tulles rohkem maisemate asjade

juurde on teada, et Maa gravitatsioonivälja mõjust pääsemiseks peab osakese paakiirus olema suurem kui 11 km/s, Päikeselt juba 617 km/s. Kriitilisel juhul, kui osakese kiirus on võrdne valguse kiirusega, on võimalik leida, milline peab olema selle kompaktse objekti raadius, mida nimetatakse tähe gravitatsiooniliseks raadiuseks. See raadius on

$$R_g = \frac{2GM}{c^2},$$

kus  $M$  on kompaktse objekti mass,  $G$  – gravitatsiooni konstant ja  $c$  valguse kiirus. Asendades konstandid saame, et  $R_g = 3 \text{ km} (M/M_\odot)$ , st meie Päikese gravitatsiooniline raadius on ainult 3 kilomeetrit ja siis oleks Päike must auk!

Kuigi mustade aukude ja neutrontähtede olemasolu oli teoreetikute poolt “avastatud” juba küllalt ammu, ei pakkunud see kuni XX sajandi keskpaigani astronoomidele mingit huvi, sest astronoomide silm, mis oli orienteeritud ainult nähtavale piirkonnale, haaras väga väikese osa tähtede poolt eraldatud elektromagneetilisest kiirgusest (vt joonis 1), kus nii neutrontähed kui ka mustad augud olid lihtsalt nähtamatud.

Saabusid kuldsed kuuekümnendad ja astronoomidele hakkas nagu külluse sarvest sadama uusi avastusi. Kõigepealt radiopulsarid – kiiresti pöörlevad neutrontähed, siis heledad röntgenallikad, mille röntgenkiirgus ületas kümneid tuhandeid kordi Päikese optilise kiirguse. Kiiresti selgus, et neutrontähed ja mustad augud annavad astronoomidele suurepärase võimaluse ennast nähtavaks teha, kui nad on kaksiktähtede süsteemis, kus toimub aine ülevool tavaliselt tähelt kompaktsele objektile (neutrontäht või must auk). Lihtne on näidata, et sel juhul eralduv gravitatsiooniline energia on hiiglaslik. Võtame jälle neutrontähe, mille mass on üks Päikese mass ja raadius 10 km. Langegu sellisele neutrontähele lõpmatuses üks prooton. Sellisel juhul eralduv energia on 150 MeV nukloni kohta (või  $10^{20}$  erg/g). Kui tuletame meelde, et kõige energiarikkamas reaktsioonis vesiniku põlemisel eralduv energia on vaid 7 MeV nukloni kohta (või  $10^{18}$  erg/g), siis on näha kuivõrd võimas energiamasin võib olla akretseeriv neutrontäht. Langev gaas kuumeneb nii suurte temperatuurideni, et seda on võimalik detekteerida röntgenpiirkonnas.

Ja nüüd muutume veelgi tõsisemaks ja püüame anda lugejale pildi, millega tegeleb käesoleva aasta laurea.

Kõigepealt aga veel ühest asjast. Ma ei hakka siin kirjeldama täheevolutsiooni kõõgipoolt, mis kujutab endast pea kogu kaasaegse füüsika saavutuste kasutamist. Muutuvad ju tähe evolutsiooni vältel tema temperatuur (umbes  $10^4$ – $10^{10}$ K) ja tihedus (umbes  $10^{-28}$ – $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>) nii hiiglaslikes piirides, et see nõuab kogu kaasaegse füüsika teadmisi. Kahjuks on maapealsetes tingimustes tihti võimatu eksperimentaalselt tekitada situatsioone, mis eksisteerivad tähtedes, ja seetõttu on meil kasutada ainult teoreetilised hinnangud (näiteks termotuumareaktsioonide kiiruste kohta), mis võivad olla ka mitte väga õiged, kuna puuduvad eksperimentaalsed andmed.

## KAKSIKTÄHE EVOLUTSIOON, KUS KOMPAKTSEKS OBJEKTIKS ON KAS MUST AUK VÕI NEUTRONTÄHT

Vaatame nüüd kuidas tekib süsteem must auk/neutrontäht+ väikese massiga (Päikese) optiline täht (joonis 2).

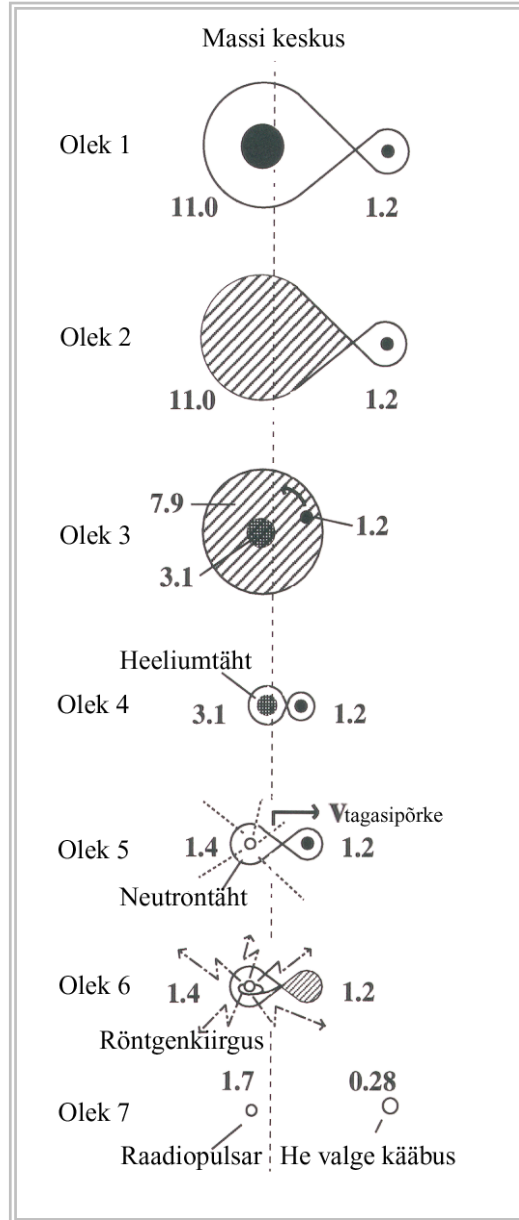
Olek 1 Meil on tekkinud gaasitolmupilvest kaksiktähe süsteem, kus üks tähtedest on teisest üle kümne korra massiivsem. Algne orbitaalperiood on umbes 700 päeva ja hakkame nüüd vaatlema sellise süsteemi evolutsiooni.

Olek 2. Kuna suurema massiga tähe evolutsioon on väga kiire, toimub tema sees vesiniku põlemine heeliumiks, tähe raadius suureneb, toimub teatud kriitilise pinna täitmine ning suuremast tähest hakkab aine üle voolama väiksemale tähele.  $P_{orb}=700$  päeva,  $t_{ev}=22,7 \cdot 10^6$  a ( $t_{ev}$  on evolutsiooni aeg).

Olek 3. Tänu tähtede massidevahelisele suurele erinevusele, on selline aine ülevool äärmiselt ebastabiilne ning teine täht satub massiivse tähe ümbrisse. Seda staadiumit nimetatakse ühiseks ümbriseks. Selleks, et ühisest ümbrisest lahti saada, tuleb kusagilt leida energiat ja energia ammutatakse kaksiktähe orbitaalliikumisest.

Olek 4. Pärast ühise ümbrise faasi tekib süsteem heeliumitäht ning väikese massiga põhijada täht, mille termotuumaline evolutsioon pole faktiliselt alanud. Laiast kaksiktähe süsteemist on saanud lähiskaksiktäht.  $P_{orb}=1,4$  päeva,  $t_{ev}=22,7 \cdot 10^6$  a.

Olek 5. Heeliumi, süsiniku, hapniku ja räni järjestikune põlemine toimub väga kiiresti, endise massiivse tähe sees tekib raudtuum, mis kollapseeerub koos neutrontä-



Joonis 2. Evolutsiooniline stsenaarium millisekundlise pulsari ja He valge kääbuse moodustamiseks.

Numbrid tähistavad kaksiktähe masse Päikese massides.

he moodustamisega Supernoova plahvatuses. Kaksiktähe orbitaalperiood suurenes ( $P_{\text{orb}}=8,6$  päeva), kuna heeliumi põlemise faasis toimus tänu intensiivsele tähetuulele suur massikadu süsteemist. Kui Supernoova plahvatuseni oli kulunud aega ainult (astronoomilises mõistes) 23 miljonit aastat, siis nüüd saabub pikk-pikk ooteperiood.

Olek 6. Väikese massiga optiline täht täidab oma kriitilise pinna ning aine hakkab voolama neutrontähele. Taevasse tekkib ere röntgenallikas, mida detekteerivad röntgensputnikud. Et selline faas saaks teoks, läheb aega umbes 8,7 miljardit aastat. Tänu sellele, et akretseeritav aine omab liikumishulga momenti, kiirendatakse neutrontäht kuni millisekundiliste perioodideni. Teatud momendil on kogu optilise tähe ümbris üle kantud neutrontähele.

Olek 7. On tekkinud kaksiksüsteem, kus üheks komponendiks on millisekundiline raadiopulsar ja teiseks väikese massiga He (heelium) valge kääbus.

Alustades natuke erineva algsüsteemi parameetritega võib analoogselt üles ehitada kaksiksüsteemi must auk+väikese massiga täht, mis kujutab endast pehmete röntgennoovade mudelit.

#### PEHMED RÖNTGENNOOVAD JA MILLISE MASSIGA TÄHTEDEST MOODUSTUVAD MUSTAD AUGUD?

Minu huvi pehmete röntgennoovade vastu sai alguse (tüüpiline situatsioon teoreetikute ja interpretaatorite jaoks) Amsterdamis, kui nüüd juba manalateele lahkunud Amsterdami Ülikooli professor Jan van Paradijs küsis minult ühel hilisel õhtutunnil Astronoomia Instituudis, miks sellised süsteemid on ainult röntgennoovad, st nad omavad teatud aja väga kõrget röntgenkiirgust ja siis pea kaovad röntgenpiirkonnast või on väga nõrgad röntgenallikad. Sellest küsimusest saigi alguse terve tsükkel töid, millest osa oli esitatud preemiales. Põhilise võtsime kokku koos professor van den Heuveliga (Astronoomia Instituut, Amsterdami Ülikool) [Ergma, Heuvel, 1998].

Enne meie tööd arvati, et ainult väga massiivsed tähed ( $> 40-50 M_{\odot}$ ) lõpetavad oma evolutsiooni, moodustades musta augu. Me toetusime järgmistele faktidele:

- Koos Hollandi kolleegide Dr. Simon Portigiez Zwart'i ja Prof. Frank Verbunt'iga näitasime [Portegiez-Zwart jt, 1997], et kui mustade aukude eelkäijaks on väga massiivne täht  $> 40-50 M_{\odot}$ , siis pehmete röntgennoovade tekkimiskiirus on kaks suurusjärku väiksem vaadeldavast. Juhul kui mustade aukude teke algab juba tähtedel, mille mass on  $20-25 M_{\odot}$ , siis vaatlused ja teooria on kooskõlas.
- Enamus pehmeid röntgennoovaid omab väikest orbitaalperioodi ( $< 1$  päev), mistõttu on väga raske seletada, kuidas sellised lühikese orbitaalperioodiga süsteemid tekkivad. Asi on selles, et heeliumi põlemise faasis (vt joonis 2, olek 5) kaotab massiivne heeliumtäht, mille algmass oli  $> 40-50 M_{\odot}$ , väga intensiivselt tähetuule toimel massi, mis viib tunduval orbitaalperioodi suurenemisele ( $P_{\text{orb}}$  suurem kui üks päev) ja sellisel juhul kaksiktähe süsteem evolutsioneerub suuremate orbitaalperioodide suunas [Ergma, Fedorova, 1998]).
- Šveitsi astronoom Maeder [Maeder, 1992] näitas, et kui mustad augud tekkivad ainult väga massiivsetest tähtedest, siis tekitab probleem süsi-



niku, hapniku, räni üleprodutseerimisega meie Galaktikas. Jällegi oleks selle probleemi lahendamiseks vaja, et mustad augud tekkiksid tähtedest, mille mass on suurem kui  $20\text{--}25 M_{\odot}$ . Kuna musta augu mass võib olla suvaline (alates  $3 M_{\odot}$  ja rohkem) võrreldes neutrontähe massiga ( $1,4\text{--}1,8 M_{\odot}$ ), siis must auk neelab alla suurema osa tähe evolutsiooni käigus sünteesitud süsinikust, hapnikust, ränist.

- Eksisteerib väga massiivne kaksikröntgensüsteem röntgenpulsariga, kus see noor tugeva magnetväljaga neutrontäht tekkis väga massiivsest ( $>40\text{--}50 M_{\odot}$ ) tähest. See tähendab, et peab olema veel midagi, mis määrab, kas massiivse tähe evolutsioon lõpeb neutrontähe või musta augu moodustumisega.

Püüdes nendest tükkidest kokku panna lõpliku pildi, saime aru, et peale tähe massi peab olema veel midagi, mis määrab ära, kas täht lõpetab oma evolutsiooni musta augu või neutrontähe moodustumisega. Need “midagi” meie ettekujutuses olid: magnetväli, kiire pöörlemine, Supernoova plahvatuse asümmeetria. Meie artikli esimene variant “Nature’sse” sai karmi kriitika osaliseks, nagu alati, kui pakutakse välja kardinaalselt uut lähenemist. Kirjutan sellest siin väite kummutamiseks, et loodusteadlastel on väga lihtne publitseerida nn CC ajakirjades. See artikkel ilmus Euroopa ajakirjas “Astronomy and Astrophysics” kiirete publikatsioonide rubriigis [Ergma, Heuvel, 1998].

CYG X-3.

#### KAS SELLES SÜSTEEMIS KOMPAKTNE OBJEKT ON MUST AUK?

See kaksiktähe süsteem on paljustki unikaalne. Tema orbitaalperiood on vaid neli tundi, süsteemi iseloomustab suur aktiivsus erinevates energia piirkondades, alates gammakiirgusest ja lõpetades raadiodzettidega. Optiliseks komponendiks osutus Wolf-Rayet’i täht (vaatlused infrapunases spektraalpiirkonnas [van Kerwijk jt, 1997]). Milline on aga nähtamatu kompaktne objekt – kas neutrontäht või must auk ja miks on selline süsteem WR täht + kompaktne objekt täheevolutsiooniteooria vaatevinklist nii huvitav?

1973 a van den Heuvel ja De Loore [1973] ennustasid selliste süsteemide olemasolu, kuid kuni hilise ajani neid süsteeme ei õnnestunud avastada vaatluslikult. Probleem on selles, et sellise faasi eluiga, mis määratakse heeliumi põlemise iseloomuliku ajaga, on väga väike (astronoomilises mõttes), vaid  $10^5\text{--}10^6$  aastat. Seega on selline evolutsiooniline staadium väga kiire ja vaadelda sellist süsteemi on tõeliselt “suur vedamine”.

Selliste süsteemide leidmine annab kinnitust ka sellele, et kuulsad kaksikneutrontähtede süsteemid on läbinud analoogset faasi. Näiteks, hästi tuntud kaksikneutrontähe süsteem PSR 1913+06, mis avastati Taylor’i ja Hulse’i poolt 1974 a (1993 a Nobeli füüsikapreemia).

Koos oma endise Moskva kolleegi Lev Yungelsoniga analüüsisime kõiki vaatlusandmeid Cyg X-3 jaoks ja jõudsimme järeldusele, et kompaktne objekt antud süsteemis peab olema must auk. Meie analüüs näitas samuti, et selliste süsteemide moodustumine on väga haruldane sündmus. Loodame, et järgnevatel aastatel on võimalik suurendada vaatlusi nii maapealsete kui ka kosmiliste aparaatide abil, näiteks sel sügisel saadetakse uus röntgensputnik

“INEGRAAL” orbiidile ja Cyg X-3 vaatlus on lülitatud põhiprogrammi [Ergma, Yungelson, 1998].

### MILLISEKUNDILISED PULSARID KAKSIKTÄHTEDE SÜSTEEMIS

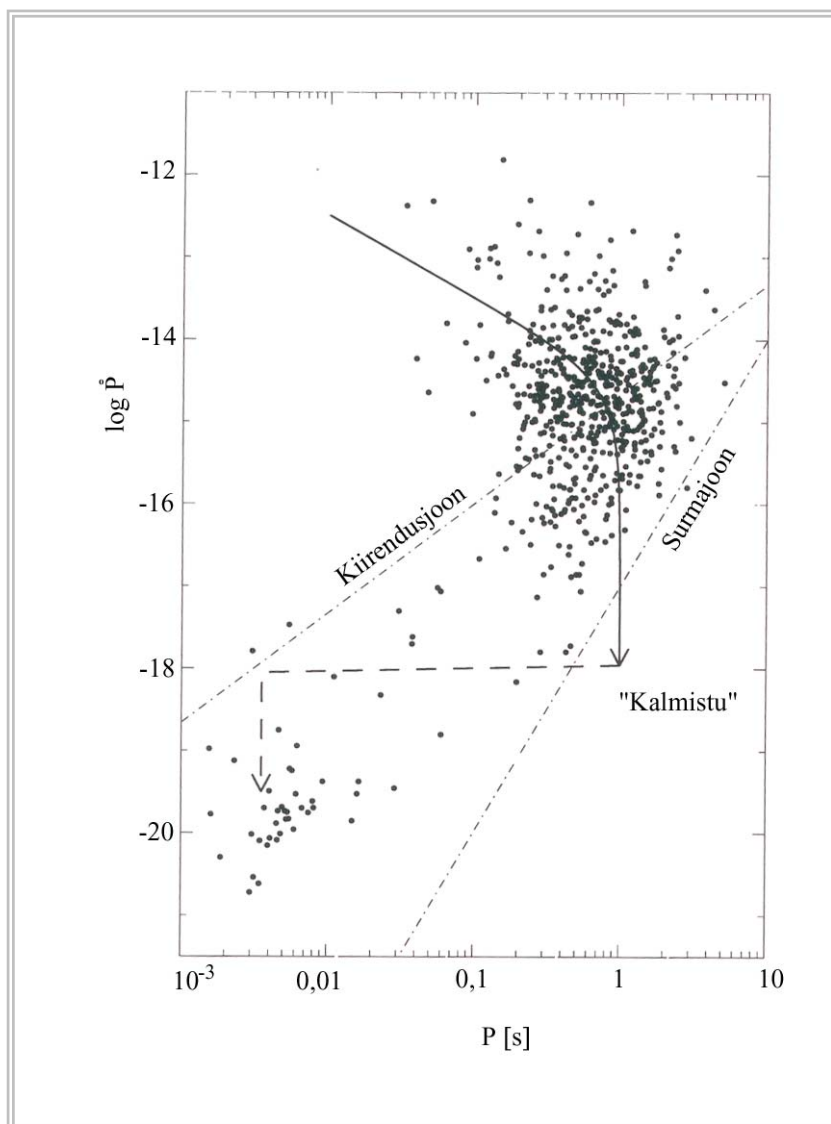
Teiseks minu viimaste aastate huviobjektiks on olnud millisekundilised pulsarid kaksiktähtede süsteemis. Mida nad endast kujutavad? Neutrontäht, mis sünnib Supernoova plahvatuses, omab tavaliselt väga tugevat magnetvälja ning tema pöörlemisperiood on väike (vähem kui üks sekund). Selline tugeva magnetvälja ja lühikese pöörlemisperioodiga neutrontäht kiirgab raadiolaineid ning radioastronoomid on võimelised seda kiirgust detekteerima. Joonisel 3 ongi näidatud diagramm P – P suure hulga raadiopulsarite kohta.

Tänu magnet-dipoolsele kiirgusele kaotab pöörlev neutrontäht energiat, suurendades oma pöörlemisperioodi. Kui toimub ka spontaanne magnetvälja lagunemine, siis teatud hetkel raadiokiirguse genereerimine lakkab ja neutrontäht-raadiopulsar kaob raadiopiirkonnast ning sattub nn neutrontähtede kalmistule (joonisel 3 on see tähistatud allpool “surmajoon”).

Selliseid nähtamatuid neutrontähti on hinnanguliselt meie Galaktikas umbes üks miljard. Kui aga selline “surnud” neutrontäht on kaksiktähe süsteemis, siis võib olukord kardinaalselt muutuda. Vaatame jällegi joonist 2 Olek 6, kus kaksiktähes optiline kaaslane täidab oma kriitilise pinna ja algab aine ülevool neutrontähele. Süsteem on nüüd hele röntgenallikas, mida on võimalik röntgenpiirkonnas detekteerida väga suurte kaugustel (astronoomilises mõttes). Kuna neutrontähe magnetväli on kas lagunenu spontaanselt või vähenev akretsiooni mõjul, siis võrreldes noore neutrontähega on selliste vanade neutrontähtede magnetvälja tugevus  $10^8$ – $10^9$  Gaussi. Akretsiooni faasis võib toimuda neutrontähe kiirendamine kuni millisekundiliste perioodideni, mille määravad ära järgmised faktorid: akretsiooni kiirus (teisiti öeldes massikao kiirus optilisest tähest), akretsiooni faasi kestvus ja neutrontähe magnetvälja tugevus. Tänu liikumishulga momendile ei saa akretseeriv aine otse landeda neutrontähele, neutrontähe ümber moodustub siis nn akretsioonikettas, kus aine neutrontähe poole liikudes kaotab oma momenti tänu viskoossele vahetusele diferentsiaalselt pöörlevas akretsioonikettas. Akretsioonikettas pöörleb aine lookaalse Kepleri kiirusega. Aine tugev interaktsioon neutrontähega toimub siis, kui aine jõuab neutrontähe magnetosfääri piirini. Siin on neutrontähe magnetvälja tugevus nii suur, et ta hakkab domineerima akretsiooni dünaamika üle ja sunnib ainet akretsioonikettas neutrontähega kaaspöörlema. Kui ainet kettas on vaja kiirendada suuremate kiirusteni, siis neutrontäht võib kaotada oma liikumishulka ja, vastupidiselt, kui kaaspöörlemine nõuab, et kettas aine peab aeglustuma kuni sub-Kepleri kiirusteni, siis osa liikumishulga momendist kantakse läbi magnetvälja üle neutrontähele. Teatud aja möödumisel saabub nn tasakaaluolek, kui kaaspöörlemise kiirus magnetosfääri piiril on võrdne Kepleri kiirusega samas kohas. Siit ongi võimalus hinnata tasakaalulise perioodi suurst, mis avaldub järgmise lihtsa valemi kaudu:

$$P_{eq} = 1,9 \text{ ms } B_9^{6/7} (M_{ns}/1,4M_{\odot})^{(-5/7)} (M/M_{ed})^{(-3/7)} R_6^{(16/7)},$$

kus  $B_9 = B/10^9$  Gaussi,  $R_6 = R_{ns}/10$  km,  $M_{ed} = 1,5 \cdot 10^{-8} M_{\odot}/\text{aastas}$ . Sellest lihtsast valemist on kerge näha, et kui  $M$  on umbes  $0,1 M_{ed}$  ning  $B$  on umbes  $5 \cdot 10^8$  Gaussi,  $R_6 = 1$ , siis neutrontähe periood on millisekundite piires.



Joonis 3. Raadiopulsarite võimalik evolutsioon  $P$  ja  $\dot{P}$  diagrammil.

Iga punkt on vaadeldav raadiopulsar.  $P$  ja  $\dot{P}$  on vastavalt raadiopulsari pöörlemisperiood ja perioodi muutus ajas. Pideva joonega on näidatud raadiopulsari evolutsioon, kui neutrontähe magnetväli laguneb. Punktiirjoonega on näidatud, kuidas "surnud" neutrontäht akretsiooni faasis uuesti muutub raadiopulsariks. Kiirendusjoon näitab, millise pöörlemisperioodini on võimalik kiirendada neutrontähte, kui akretsiooni kiirus on  $\sim 1,5 \cdot 10^{-8} M_{\odot}/a$  (maksimaalne võimalik akretsiooni kiirus neutrontähele).

1982. aastal olidki ameerika astrofüüsiku Don Backer'i [Backer jt, 1982] poolt sellised kaksiktähtede süsteemid avastatud, kus kompaktne objekt oli kiiresti pöörlev neutrontäht – millisekundiline pulsar. Praeguseks ajaks on nende süsteemide arv kasvanud sajani, kusjuures suurem osa millisekundilistest pulsaritest on kaksiktähe süsteemides, mis näitab, et kaksiktähe olemus omab siin ilmselt väga suurt tähtsust. Enamik süsteeme koosnevad väikese massiga He valgetest kääbustest ja millisekundilistest pulsaritest, mõningates süsteemides on optiliseks kaaslasel ka massiivsed C-O valged kääbused ja 10 süsteemi omavad optiliste kaaslastena väga väikese massiga ( $< 0,1 M_{\odot}$ ) kaaslasi, kusjuures nad on varjutusmuutlikud (raadiopiirkonnas).

Meie väikese grupi (Dr Marek Sarna, Koperniku nimeline Astronoomia Keskus Varssavis, ja Tartu Ülikooli doktorant Jelena Antipova-Gerškevitš) huviojektiks oligi uurida, kuidas tekkivad sellised süsteemid – He valged kääbused paaris millisekundiliste pulsaritega. Ja jällegi tuli läbi rehkendada palju erinevaid evolutsioonijadasid, et saada küllalt tõest informatsiooni erinevate vaadeldavate süsteemide tekkeks. Me näiteks leidsime, et eksisteerivad küllalt karmid tingimused, et aru saada, kuidas on tekkinud lühikeste orbitaalperioodidega süsteemid PSR J0751+1807 ( $P_{\text{orb}} = 0,263$  päeva,  $M(\text{He}) 0,15 M_{\odot}$ ,  $P_p = 3,48$  ms) ja PSR J1012+5307 ( $P_{\text{orb}} = 0,605$  päeva,  $M(\text{He}) = 0,13 M_{\odot}$ ,  $P_p = 5,26$  ms). Selleks peab nende süsteemide eelkäijates optiline kaaslane täitma oma kriitilise pinna, kui saab alguse massi ülevool neutrontähele, väga piiratud (orbitaalperioodi mõttes) diapsoonis. Võib-olla see ongi põhjuseks, et praegu me oleme leidnud ainult kaks sellist süsteemi, kuna nende moodustumine on küllalt “fine tuning” protsess [Ergma jt, 1998]. Kuid sellega kõik probleemid ei lõppenud. Optilised vaatlused näitasid, et süsteemis PSR J1012+5307 on He valge kääbus tunduvalt kuumem või, teisiti öeldes, tema jahtumise iseloomulik ajaskaala on tunduvalt väiksem võrreldes pulsari iseloomuliku eluea ajaskaalaga, mis määratakse vaatlustest järgmise lihtsa seose kaudu

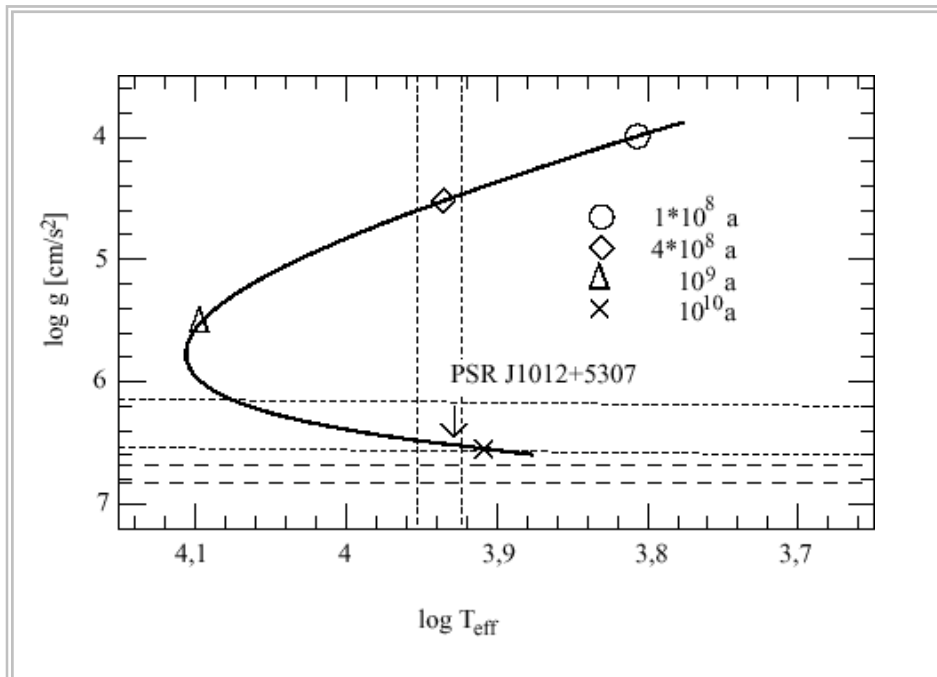
$$\tau = P_p / 2 P_p$$

Süsteemi PSR J1012+5307  $\tau = 7,0 \cdot 10^9$  aastat, kuid tema He kääbuse jahtumise iseloomulik eluiga on vaid  $0,3 \cdot 10^9$  aastat. Tuletan siin meelde seda tõsiasja, et nii valge kääbuse jahtumine kui ka pulsari aeglustumine sai alguse ühel ja samal ajahetkel, kui optilisest kaaslasest lõppes aine ülekanne.

Teise süsteemi PSR J0751+1807 jaoks, mille orbitaalperiood on küllalt sarnane PSR J 1012+5307, selgus, et valge kääbuse jahtumine vastab pulsari eluea iseloomulikule ajaskaalale, st valge kääbuse jahtumine on toimunud vastavalt valge kääbuste jahtumise teooriale. Selleks ajaks olime me jõudnud arusaamale, et väikese massiga He valgete kääbuste jahtumise faasis on määrava tähtsusega küllalt massiivne ( $0,01 - 0,06 M_{\odot}$ ) vesiniku ümbris heeliumi tuuma ümber, kus siis toimub aeglane vesiniku põlemine, mida on küllalt, et muuta He valge kääbuse jahtumise protsessi PSR J1012+5307.

Joon. 4 ongi  $\log g$  ( $g$  on valge kääbuse gravitatsiooniline kiirendus) ja  $\log T_{\text{eff}}$  (kääbuse efektiivne pinnatemperatuur) teljestikus näidatud valge kääbuse jahtumise evolutsioon. Me näeme, et võttes arvesse vesiniku põlemist, saavutame kooskõla pulsari ja valge kääbuse iseloomuliku jahtumise eluigade vahel.

Kuid nagu ühes ilusas lasteloos, kui lind istus tõrvase katuse peale ja ta saba jäi kinni, siis püüdes saba vabastada, tõmbas saba lahti ja nokk jäi kinni jne. Ka meie kahe süsteemi jaoks – kui saime ilusti ühe paika (saba lahti), siis miks PSR J0751+1807 (sarnase evolutsiooniga kui PSR J1012+5307 jaoks) valge kääbus on nii külm? Leidsime ka sellele küsimusele võimaliku lahenduse [Ergma jt, 2000]. Kiiresti pöörlev millisekundiline pulsar kiirgab kuni  $10 L_{\odot}$  energiat, millest enamik tuleb kalgi röntgenkiirguse piirkonda. Sellises kiirgusväljas ongi nüüd millisekundilise pulsari väikese massiga optiline kaaslane, mille omahelgedus võib olla pea suurusjärg väiksem (isegi veel rohkem) kui millisekundilise pulsari poolt kiiratud energia. Palju sõltub ka sellest, kui suur on vahemaa pulsari ja optilise tähe vahel ja kui kiiresti pulsar pöörleb. Kui me nüüd võrdleme neid mõlemaid näitajaid PSR J1012+5307 ja PSR J0751+1807 jaoks, siis selgub, et PSR J0751+1807 on umbes kümme korda tugevamas kiirgusväljas kui PSR J1012+5307, mis viib selleni, et proto valge kääbus PSR J0751+1807 süsteemis kaotab oma paksu vesinikust koosneva ümbrise, vesiniku põlemine lakkab ning valge kääbus jahtub kiiresti.



Joonis 4. Valge kääbuse jahtumine PSR J1012+5307 kaksiktähe süsteemis.

Nool näitab vaatlustest leitud andmeid sellises süsteemis oleva He valge kääbuse kohta. Juurde on märgitud iseloomulikud ajaskaalad.

Need olid mõningad detailid minu tegemistest täheevolutsiooni alal. Uskuge, et on väga huvitav mõistatada, kuidas üks või teine tähesüsteem on tekkinud.

Miks on nendel süsteemidel sellised omadused jne. Tähtede maailm on niivõrd suur ja mitmekesine ning iga täht on ere individualist.

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

#### KIRJANDUS

Backer, D.C. et al. 1982. A millisecond pulsar. *Nature*, 300, 615.

Ergma, E., Feudorova, A.V. 1998. Evolution of black hole low-mass binaries. *Astron. Astrophys.*, 338, 69.

Ergma, E., Heuvel, E.P.J van den. 1998. On the initial progenitor masses of stellar mass black holes and neutron stars. *Astron. Astrophys.*, 331, L29.

Ergma, E., Sarna, M.J., Antipova, J. 1998. Evolution of the short binary pulsars: systematic study. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, 300, 352.

Ergma, E., Sarna, M.J., Gerškevič, J. 2000. The helium white dwarf in two pulsars: too cold in PSR J0751+1807 and too hot in PSR J1012+5307. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, 321, 71.

Ergma, E., Yungelson, L.R. 1998. Cyg X-3: can the compact object be a black hole? *Astron. Astrophys.*, 333, 151.

Heuvel, E.P.J. van den, de Loore, C. 1973. The nature of X-ray binaries III. Evolution of massive close binaries with one collapse component, with a possible application to Cyg X-3. *Astron. Astrophys.*, 25, 387.

Kerwijk, M.M. van, et al. 1992. Infrared helium emission lines from Cyg X-3 suggesting a Wolf-Rayet star companion. *Nature*, 355, 703.

Maeder, A., 1992. Stellar yields as a function of initial metallicity and mass limit for black hole formation. *Astron. Astrophys.*, 263, 129.

Portegiez-Zwart, S.F., Verbunt, F., Ergma, E. 1997. The formation of black holes in low mass X-ray binaries. *Astron. Astrophys.*, 321, 207.

*Teaduspreemia keemia ja molekulaarbioloogia alal tööde tsükli*  
**“PROSTAGLANDIINIDE BIOSÜNTEES**  
**SELGROOTUTES” eest**



*Nigulas*  
*Samel*  
Kollektiivi juht

Sündinud 3. septembril 1950 Mahu vallas Virumaal

1969 Rakvere Gümnaasium

1974 Tallinna Tehnikaülikool, keemiainsener

1983 keemiakandidaat, Eesti Teaduste Akadeemia Keemia Instituut

Alates 1974. aastast Eesti Teaduste Akadeemia Keemia Instituut (praegune TTÜ Keemia Instituut): vaneminsener, nooremteadur, vanemteadur ja juhtivateadur, 1996. aastast kuni käesoleva ajani bioorgaanilise keemia osakonna juhataja. Alates 2001. aastast Tallinna Tehnikaülikooli korraline professor, bioorgaanilise ja looduslike ühendite keemia õppetooli juhataja.

Eesti riigi teaduspreemia 1987. aastal töödetsükli “Prostaglandiinid – süntees, uurimine ja rakendused” eest (kollektiivi liige).

Avaldanud üle 60 teaduspublikatsiooni



*Ivar Järving* (neljas vasakult)

Sündinud 13. 07.1957 Tapal  
 1975 Tallinna 24. Keskkool  
 1980 Tallinna Tehnikaülikool,  
 keemiaspetsialist  
 1991 Keemiakandidaat, orgaaniline  
 keemia  
 TTÜ Keemia Instituudi vanem-  
 teadur  
 Üle 45 teaduspublikatsiooni.

*Reet Koljak* (viies vasakult)

Sündinud 4.06.1965 Tartus  
 1983 Tallinna 32. Keskkool  
 1988 Tartu Ülikool, bioorgaaniline  
 keemia  
 2001 PhD loodusteaduste alal  
 TTÜ Keemia Instituudi vanem-  
 teadur  
 Üle 20 teaduspublikatsiooni.

*Karin Valmsen* (esimene  
 vasakult)

Sündinud 2.10.1960 Tartus  
 1979 Tallinna 37. Keskkool  
 1986 Tartu Ülikool, bioorgaaniline  
 keemia  
 1999 loodusteaduste magister  
 TTÜ Keemia Instituudi teadur  
 Üle 20 teaduspublikatsiooni.

*Külliki Varvas* (kolmas  
 vasakult)

Sündinud 18.10.1959 Märjamaal  
 1978 Tallinna 2. Keskkool  
 1983 Tartu Ülikool, orgaaniline  
 keemia  
 1999 PhD loodusteaduste alal  
 TTÜ Keemia Instituudi vanem-  
 teadur  
 Üle 30 teaduspublikatsiooni.



## PROSTAGLANDIINID KUI LOKAALSED RAKUHORMOONID

Tavakäsitluses mõeldakse hormoonide all endogeenseid bioaktiivseid keemilisi ühendeid, mis sünteesitakse spetsiaalsetes endokriinnäärmetes ning transportitakse seejärel vere või lümfiga märklaud-rakuni, kus nad reguleerivad füsioloogilisi funktsioone ja metaboolseid protsesse. Selline definitsioon hõlmab küll neerupealiste, hüpofüüsi, sugu-, kilp-, kõhu- ja paljude teiste näärmete poolt produtseeritavaid hormone, kuid ei arvesta, et hormonaalse toimega aineid sünteesitakse inimorganismis lisaks endokriinnäärmetele veel paljudes teistes kudedes ja organites. Seega tuleks kahele suurele hormoonide klassile, milleks on peptiidhormoonid ja steroidhormoonid, lisada kindlasti kolmas – eikosanoidhormoonid. Siia gruppi kuuluvad prostaglandiinid, tromboksaanid, leukotrieenid ja teised rasvhapete ensümaatilise oksüdatsiooni produktid, koondnimetusega oksülipiinid.

Prostaglandiinideks nimetatakse polüküllastamata C-20 rasvhapete (tuntuim arahhidoonhape) tsüklopentaani struktuurifragmenti sisaldavaid oksüderivaate. Tromboksaanidele on iseloomulik 6-liikmeline ring. Arahhidoonhappe esmane oksüdeerimine molekulaarse õhuhapnikuga toimub raku tuumaümbrises või sellega külgnevas endoplasmaatilises võrgustikus ensüümide abil, mida kutsutakse prostaglandiin-endoperoksiid süntetaasideks, ehk suupärasemalt tsüklooksügenaasideks (COX) [Picot jt, 1994; Kiefer jt, 2000]. Viimane nimetus väljendab üsna täpselt nende ensüümide katalüütilist rolli: rasvhapete oksüdatiivne tsükliatsioon. Prostaglandiinide biosünteesi vaheproduktid, prostaglandiin-endoperoksiidid, on väga labiilsed ühendid, mis konverteeritakse erinevate isomeraaside ja konvertaaside poolt prostaglandiinideks ( $\text{PGD}_2$ ,  $\text{PGE}_2$ ,  $\text{PGF}_{2\alpha}$ ), prostatsükliiniks ( $\text{PGI}_2$ ) ja tromboksaaniks ( $\text{TXA}_2$ ). Kuna prostaglandiinid toimivad raku plasmamembraanis lokaliseeruvate retseptorite kaudu, tuleb sünteesitud ühendid kiiresti rakust välja viia. Sellest protsessist teatakse vähe, kuid tõenäoliselt toimub see spetsiaalsete transportvalkude osalusel.

Erinevalt endokriinsetest hormoonidest, mida veri transportib teistes organites asuvate sihtmärk-rakkudeni, on prostaglandiinid ja tromboksaanid nn lokaalsed signaalmolekulid. Nad toimivad autokriinselt, s.o samale rakule, kus nad sünteesiti või parakriinselt, s.o naaberrakkudele. Prostaglandiinide, nagu paljude teistegi signaalmolekulide toime on vahendatud G-valkudega interakteeruvate retseptorite abil ning realiseeritakse cAMP taseme muutmise kaudu. Prostaglandiinide füsioloogilise toime spekter on väga lai [Funk, 2001]. Nime-taksime siinkohal vaid mõnda: maosekretsiooni reguleerimine ja limaskesta kaitse; emakakaela lõõgastamine ja emakakontraktsioonide esilekutsumine sünnituseks; vererõhu regulatsioon ja neeruvereringe tagamine. Omaette äärmärkimist väärib trombotsüütide agregatsiooni reguleerimine.  $\text{TXA}_2$ , mida sünteesitakse trombotsüütides, on võimsaim trombotsüütide agregatsiooni initsiierija. Veresoone seina endoteelirakkudes sünteesitav  $\text{PGI}_2$  omab vastupidist toimet, olles efektiivne agregatsiooni inhibiitor. Ning viimasena olgu nimetatud prostaglandiinide roll põletikuprotsessides.  $\text{PGE}_2$  on põletiku mediaator, osaledes põletikulise vastuse, palaviku ja valuaistingu tekkes nii infektsioonide kui krooniliste põletike korral. Mõlemal juhul tõuseb põletikulises rakus järsult  $\text{PGE}_2$  produktsioon. Siinkohal jõudsimegi peamise põhjuseni, miks prostaglandiinid ja nende sünteesi katalüüsivad ensüümid on püsinud biokeemia ja biomeditsiini alastes alus- ja rakendusuuringutes ühe kuumema teemana juba neli aastakümnet.

## TSÜKLOOKSÜGENAASID – KÕIGE KALLIMAD ENSÜÜMID?

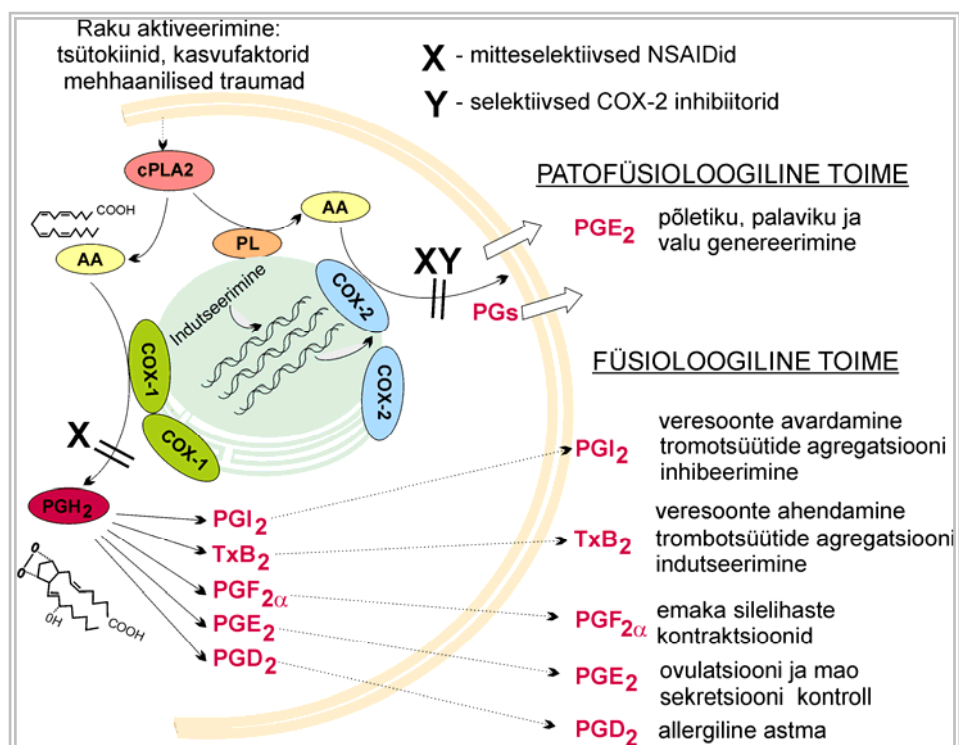
Tsüklooksügenaase, prostaglandiinide sünteesi esimest kahte etappi katalüüsivaid dioksügenaase, on nimetatud kõige tähtsamateks ja kallimateks ensüümideks. Selles väites on tõetera, kuna põletikuvastased ravimid ja valuvaigistid on üks suurema turuosaga ravimigruppe maailmas. Olgu siinkohal illustratsiooniks ainult üks arv. Klassikaliste mittesteroidsete põletikuvastaste ravimite (NSAIDs – nonsteroidal anti-inflammatory drugs) aastakäive maailmas on ligikaudu 12 miljardit dollarit. See summa, mis mitmeid kordi ületab Eesti riigieelarve, kulutatakse prostaglandiinide sünteesi blokeerimisele tsüklooksügenaaside inhibeerimise teel. Tõepoolest, selle grupi ravimite, kuhu kuuluvad meile kõigile hästi tuntud aspiriin, indometatsiin, ibuprofeen, diklofenak, tolfe-naamhape jpt, terapeutiline toime põhineb just prostaglandiinide biosünteesi inhibeerimisel. Kuigi taimset päritolu salitsülaate tuntakse palaviku alandajana ning põletike leevendajana juba paartuhat aastat ning sünteetiline derivaat aspiriin (atsetüülsalitsüülhape) on kasutusel 1899. aastast, õnnestus NSAIDide toimemehhanism välja selgitada alles 1971. aastal [Vane, 1994; Vane jt, 1998]. See oli üks neist avastustest, mis tõi autorile John Vane'le koos prostaglandiinide struktuuri ja biogeneesi avastajate Sune Bergströmi ja Bengt Samuelssoniga 1982. aasta Nobeli meditsiinipreemia. Prostaglandiine on nimetatud aineteks, mis valmistades pettumuse ravimitena, on andnud tohtu panuse rakusiseste regulatsiooniprotsesside paremaks mõistmiseks. Selle väite esimese poolega saab siiski ainult osaliselt nõustuda. Tõepoolest, kõikeravivat imerohtu nad endast ei kujuta, kuid mitmed looduslikud prostaglandiinid ja nende sünteetilised analoogid, nagu latanoprost glaukoomi ravis, dinoproston sünnitusabis ning alprostadiil erektsiooni- või alajäsemete mikrotsirkulatsiooni häirete ravis, on üldtuntud. Teiselt poolt, prostaglandiinide rolli väljaselgitamine põletiku tekkemehhanismis andis uued võimalused nende protsesside efektiivsemaks mõjutamiseks ning uue põlvkonna ravimite disainiks. Muide, tänaseks on selgunud, et lisaks eelpoolmainitud NSAIDidele on ka steroidsete ravimite, nn glükokortikoidide, põletikuvastane toime kaudselt seotud prostaglandiinide taseme alandamisega põletikukoldes. Nimelt inaktiveerivad nad fosfolipaaas A<sub>2</sub>, mille rolliks on prostaglandiinide sünteesi eelühendi arahhidoonhappe vabastamine rakumembraani fosfolipiididest. Selle grupi ravimite toime avaldub ka tsüklooksügenaasi geeni ekspressiooni pärssimises.

## MIKS TRADITSIOONILISED PÕLETIKUVASTASED RAVIMID EI RAHULDA?

On üldtuntud, et pikemaajalise aspiriini ja teiste NSAIDide manustamisega näiteks krooniliste põletike korral võivad kaasneda mitmed ebasoovitavad kõrvalnähud, nagu seedekulglu limaskestast kahjustused (peptiliste haavandite teke, maoverejooksud), neeruverevastuse halvenemine (sooladepeetus, tursed), vererõhu tõus ja vere hüübimishäired [Vane jt, 1998]. Tegu oleks nagu surnud ringiga. Põletikuprotsessi taandamiseks tuleb blokeerida prostaglandiinide süntees, aga kuna prostaglandiinidel on mitmeid kaitsvaid funktsioone, tuleb paratamatult leppida kudede või organite tõsiste kahjustustega.

Ootamatult pakkus väljapääsu nõiarüügist kümnekonna aasta eest mitmes laboris samaaegselt tehtud avastus. Nimelt selgus, et prostaglandiinide sünteesi katalüüsival tsüklooksügenaasil on kaks isovormi. Üks neist, mida tähistatakse COX-1, on konstitutiivne isovorm ning teda sünteesitakse pidevalt enamikus

imetaja rakkudest. COX-1 geeni ekspressioonitaset reguleerivad füsioloogilised (hormonaalsed, neuraalsed) mõjurid ning tema ülesandeks on füsioloogiliseks regulatsiooniks tarviliku prostaglandiinide taseme tagamine. Teine isovorm, COX-2, ei ole reeglina detekteeritav “normaalses” rakus, kuid ekspresseeritakse teatud kindlates rakutüüpides nn põletikurakkudes (monotsüüdid, neutrofiilid, makrofaagid) vastusena välisele mõjurile. Selle tulemusena kasvab oluliselt PGE<sub>2</sub> biosüntees arahhidoonhapest, mida seostatakse põletikueelsete tsütokiinide (raku kaitsefunktsioonide aktivaatorid) produktsiooni pärssimise ning palaviku, nahapunetuse, turse ja valu tekkega.



Prostaglandiinide süntees ja bioloogiline toime

Siit on lihtne jõuda järelduseni, et tsüklooksügenaasi puhul võiks rääkida füsioloogilisest (heast) ja patofüsioloogilisest (halvast) isovormist. Tegelikult on niisugune lähenemine tugevalt lihtsustatud, sest COX-1 ja COX-2 roll ei ole nii selgepiirilisel määral määratletav. Juba praeguseks on teada, et ka COX-2 on vähesel määral ekspresseeritud ka mõnedes mitte-põletikulistes rakkudes. Teiseks, “knockout” hiirtel, kellel lülitati välja COX-1 geen, ei täheldatud kaugeltki kõiki patoloogilisi efekte, mis kaasnevad COX-1 blokeerimisega NSAIDide poolt.

## COX-2 SELEKTIIVSED INHIBIITORID – UUED PÕLETIKUVASTASED RAVIMID

Eelpoolõeldu ei kahanda siiski oluliselt neid ootusi ja lootusi uute ohutumate põletikuvastaste ravimite loomiseks, mida pakub tsüklooksügenaasi kahe isovormi olemasolu. Möödunud kümme aastat COX-2 avastamisest võiks jagada kaheks perioodiks: selektiivsete inhibiitorite otsing katse-vea meetodil 1991–1995 ning eesmärgipärane, COX isovormide struktuurierinevustest lähtuv ravimidisain alates COX-2 röntgen-kristallstruktuuri kindlakstegemisest 1996. aastal [Kurumbail jt, 1996]. Tuleb tunnistada, et esimesed COX-2 selektiivsed põletikuvastased ravimid nn koksiibid Celebrex ja Vioxx jõudsid apteekidesse tavatult lühikese ajaga, ainult kaheksa aastat pärast sihtmärkensüümi avastamist [FitzGerald, Patrono, 2001]. Kuigi nad pole veel täiuslikud ja otsingud jätkuvad, on nad kahtlemata suureks sammuks edasi ohutumate põletikuravimite poole. On mitmeid uusi küsimusi tsüklooksügenaasi katalüüsi mehhanismi ja oksüdatsiooni stereokontrolli kohta, millele vastuse leidmine oleks suureks abiks ravimite efektiivsuse, selektiivsuse ja ohutuse tõstmisel. Siinkohal ainult mõned neist. Miks aspiriini toime inaktiveerub COX-1 täielikult, samal ajal kui COX-2 muudab oksüdatsiooni stereospetsiifilisust C-15 juures ja hakkab käituma nagu lipoksügenaas? Milline on tekkiva 15R-monohüdroperoksühappe funktsioon põletikuprotsessis? Kuidas tagatakse stereokontroll tsüklooksügenaasi aktiivsentsis? Hindamatu väärtusega nendele ja paljudele teistele küsimustele vastamiseks oleks COX uute isovormide, sealhulgas 15R-spetsiifiliste, leidmine ja nende struktuur-funktsioon sõltuvuste väljaselgitamine. Üks selline paljulubav uurimisobjekt oli biokeemikute ja farmakoloogide huviorbiidis juba aastakümneid.

### KORALLIMÜSTEERIUM

Kuni meie töödeni oli COX ensüümide olemasolu tõestatud ainult selgroogsetes organismides (lisaks imetajatele ka lindudes ja kalades). Kõlab paradoksina, kuid kõrgeim teadaolev prostaglandiinide sisaldus on detekteeritud selgrootutes. Nimelt avastasid Weinheimer ja Spraggins 1969. aastal, et Florida rannavetest pärit koralli *Plexaura homomalla* proovid sisaldavad kuni 2–3% kuivkaalust 15R-PGA<sub>2</sub> metüülestrit ning vastavat atsetaati [Weinheimer, Spraggins, 1969]. Kõige üllatavam selle avastuse juures oli koralli prostaglandiinide 15R-konfiguratsioon vastandina kõikide senituntud looduslike prostaglandiinide 15S-konfiguratsioonile. Hiljem leiti, et Kariibi mere teistest piirkondadest (Caymani saared, Bahama) pärit *P. homomalla* kolooniad sisaldavad peamiselt 15S-prostaglandiine. Kuni efektiivsete sünteesimeetodite väljatöötamiseni kasutati *P. homomalla* ekstrakte lähtematerjalina prostaglandiinide saamiseks biomeditsiiniliseks uurimistööks, samuti farmaatsiatööstuses. Prostaglandiinide päritolu korallis püsis aga mõistatusena veel aastakümneid. Biogeneesi uuringuid raskendas asjaolu, et nii *P. homomalla* kui kõik teised uuringutes kasutatud “sooja mere” korallid ei sünteesi prostaglandiine *in vitro* tingimustes. Kuna *P. homomalla* preparaatides domineerib 8R-lipoksügenaasi ja alleenoksiidsüntetaasi aktiivsus, püstitati E. J. Corey ja A. R. Brash<sup>1</sup> poolt hüpotees, et prostaglandiinide süntees mereselgrootutes erineb totaalselt imetajatele omasest tsüklooksügenaasi rajast ning kulgeb analoogselt jasmoonhappe sünteesiga taimedes üle alleenoksiidi kui labiilse vaheühendi [Corey jt, 1975; Corey jt, 1985; Brash jt, 1987]. Kuna seda hüpoteesi ei õnnestunud katseliselt tõestada, olid prostaglandiinide sünteesi mehhanismi uuringud 1990ndate

alguseks, kui käesoleva töö autorid alustasid mereselgrootute projektiga, jõudnud sisuliselt ummikusse.

#### LIPOKSÜGENAAS VÕI TSÜKLOOKSÜGENAAS – KUMB SÜNTEESIB POSTAGLANDIINE SELGROOTUTES?

Võtme korallimüsteriumi lahendamiseks leidsime arktilisest korallist *Gessemia fruticosa*. Me näitasime, et see korall on võimeline arahhidoonhappes *in vitro* sünteesima PGD<sub>2</sub>, PGE<sub>2</sub>, PGF<sub>2α</sub> ja 15-keto PGF<sub>2α</sub>, lisaks terve rea mono- ja dihidroksühappeid [Varvas jt, 1993]. Selline produktide koosseis, mis langes täpselt kokku korallist ekstraheeritud endogeensete eikosanoididega, võimaldas püstitada hüpoteesi, et polüeenhapete ensümaatilisel oksüdatsioonil korallis, nagu imetajateski, sünteesitakse prostaglandiinid üle ühise endoperoksiidse vaheühendi. Peagi õnnestus meil see vaheühend ka inkubatsiooni-segust eraldada ning spektraalselt tõestada, et tegu on tõepoolest prostaglandiin-endoperoksiidiga, PGG<sub>2</sub> [Varvas jt, 1994]. Vara oli siiski veel rääkida koralli tsüklooksügenaasidest. Püsis teoreetiline võimalus, et PGG<sub>2</sub> sünteesitakse mõne spetsiifilise lipoksügenaasi poolt.

Nagu eelpool öeldud, sünteesivad korallid arahhidoonhappesst alleenoksiidi. Katsed kloneerida korallist alleenoksiidsüntetaasi (AOS) kodeerivat cDNA RT-PCR meetodil, kasutades taime AOS järjestustel põhinevaid primereid, osutusid edutuks. See viitas võimalusele, et AOS sünteesi katalüüsivad mereselgrootutes valgud, mis oluliselt erinevad oma taimsetest kolleegidest. Lahendus sellele küsimusele saabus koralli lipoksügenaaside kloneerimise käigus. Koostöös Dr. Brash'i grupiga Vanderbilti Ülikoolist avastasime korallis *P. homomalla* loodusliku kimäärse valgu (fusion protein), mis koosneb C-terminaalsest 8R-lipoksügenaasi domeenist ja N-terminaalsest AOS domeenist. Lipoksügenaasi domeeni aminohappejärjestus on 41% ulatuses identne inimese 5S-lipoksügenaasi järjestusega, samal ajal kui peroksüdaasi domeenis leidub sarnaseid piirkondi katalaasiga (peptiidjärjestuse identsus < 20%), kõikides aeroobsetes organismides leiduva ensüümiga, mille rolliks on ülireaktiivse vesinikperoksiidi kõrvaldamine. Uus ensüüm osutus bifunktsionaalseks. Tema lipoksügenaasaktiivsus katalüüsib arahhidoonhappe esmast oksüdatsiooni hüdroperoksiidiks, mis seejärel konverteeritakse peroksüdaasaktiivsuse poolt alleenoksiidiks. Tegu on esimese loodusliku kimäärse valguga, kus lipoksügenaas esineb koos teise aktiivsusega, mis katalüüsib ensümaatilise transformatsiooni järgmist etappi [Koljak jt, 1997]. On märkimisväärne, et taimedes on alleenoksiidi sünteesiks kaks eraldi ensüümi, lipoksügenaas ja alleenoksiidsüntetaas, mis kuulub tsütokroom P450 perekonda [Song, Brash, 1991].

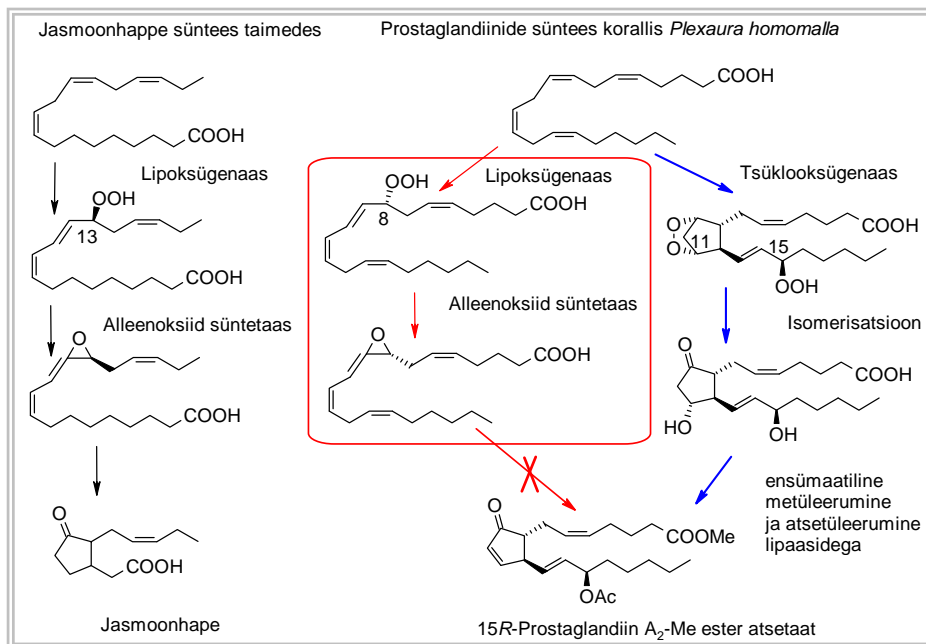
Kuigi ülalmainitud lipoksügenaas-AOS kimäärse valgu kõrge katalüütiline aktiivsus korallis viitas tema võimalikule osalemisele prostaglandiinide sünteesis, tõestasid *G. fruticosa* inkubatsioonid nõrga taandaja (SnCl<sub>2</sub>) juuresolekul, nagu ka inhibeerimiskatsed põletikuvastaste ravimitega, vastupidist. Sarnaselt imetajatega, inhibeerisid aspiriin, indometasiin ja tolfenaamhape prostaglandiinide sünteesi korallis, kuid ei mõjutanud lipoksügenaas-AOS produktide teket. SnCl<sub>2</sub>, taandades hüdroperoksiidid vastavateks hüdroksü-ühenditeks, blokeeris AOS raja, kuid ei mõjutanud oluliselt summaarset prostaglandiinide sünteesi. Need tulemused välistasid lipoksügenaaside osaluse prostaglan-

diinide sünteesis ning näitasid, et alleenoksiid ei ole prostaglandiinide sünteesi vaheühendiks [Varvas jt, 1999].

#### KORALLI TSÜKLOOKSÜGENAASID – STRUKTUUR JA SPETSIIFILISUS

Seega puudus meie hüpoteesi lõplikuks tõestamiseks veel ainult viimane lüli, see on korallist eraldatud ja puhastatud funktsionaalne tsüklooksügenaas. Imetajate tsüklooksügenaasid on monotoopsed membraanivalgud, mis solubiliiseerituna mitteioonsete detergentide abil on suhteliselt kergesti puhastatavad kuni homogeense preparaadini. Paraku ei allunud koralli tsüklooksügenaas sellisele eraldamise skeemile ning ensüümpreparaatide saamiseks edasiseks uurimistööks tuli meil valida teine tee – rekombinantse DNA meetod.

Kuna selgroogsete tsüklooksügenaasides leidub katalüütiliselt olulistes piirkondades mitmeid hästi konserveerunud järjestusi, tundus lootustandev homoloogial põhinev PCR kloneerimismeetod. Järgnevalt õnnestuski meil korallidest *G. fruticosa* ja *P. homomalla* kloneerida tsüklooksügenaasi kodeeriva cDNA. Selgus, et kahe koralli ensüümide primaarstruktuuride omavaheline sarnasus ulatub 80%-ni ning et koralli ensüümide aminohappejärjestused on võrdselt 50% ulatuses identsed nii imetajate COX-1 kui COX-2 järjestustega. See viitab võimalusele, et tegu on imetajate COX isosüümide ühise evolutsioonilise eellasega. Selgroogsetest ja selgrootutest loomadest pärit tsüklooksügenaaside struktuuride võrdlus näitas, et vaatamata kõikide katalüütiliselt oluliste aminohappejääkide konserveerumisele, leidub mitmeid struktuuri erinevusi peroksüdaasi aktiivtsentri ümbruses, membraaniga seonduvas domeenis ja glükosüleerimistsentrite paiknemises, mis mõjutavad katalüüsi ja inhibeerimiskarakteristikuid. Mõlema koralli tsüklooksügenaasi kodeeriva cDNA ekspressioonil nii imetaja kui putukarakkudes saime funktsionaalsed rekombinantsed valgud, mille biosünteesi produktide absoluutne konfiguratsioon langes kokku vastavate korallide endogeensete produktide omaga, 15S-prostaglandiinid *G. fruticosa* ja ja 15R-prostaglandiinid *P. homomalla* puhul [Koljak jt, 2001; Valmsen jt, 2001]. Sellega olime lõplikult tõestanud tsüklooksügenaaside esinemise ja nende rolli prostaglandiinide sünteesis selgrootutes organismides. Ühtlasi andis unikaalse 15R-spetsiifilise tsüklooksügenaasi kloneerimine ja iseloomustamine korallist *P. homomalla* võimaluse taastada *in vitro* tingimustes kogu biosünteesirada arahhidoonhapest kuni 15R-prostaglandiinideni ning pakkuda välja skeem *P. homomalla* müstiliste endogeensete produktide, 15R-PGA<sub>2</sub> diestrite, tekkeks (vt järgnev skeem).



## PERSPEKTIIVID

Tänu mitmetele struktuurilistele ja katalüütilistele erinevustele võrreldes inimese COX isosüümidega, on koralli COX ideaalseks mudelensüümiks mitmete COX katalüüsi võtmeküsimuste uurimiseks. Madala peroksüdaasaktiivsuse tõttu pakub ta suurt huvi tsüklooksügenaasi ja peroksüdaasi koostoiime mehhanismide uurimisel tsüklooksügenaasi katalüüsi käivitamisel ja käiguhoidmisel. Omapärane glükosüleerimismuster tõstatab uuesti küsimuse suhkru rollist COX katalüüsis. Ebaharilikke 15*R*-prostaglandiine sünteesiva COX avastamine lõi uued võimalused tsüklooksügenaasi katalüüsi stereokontrolli uurimiseks, mis on tähelepanu fookuses seoses tsüklooksügenaasi isosüümspetsiifiliste inhibiitorite loomisega. Koralli ja imetajate ensüümide struktuurierinevuste baasil on meil välja töötatud strateegia punktmutatsioonide läbiviimiseks, et määrata kindlaks stereokontrolli seisukohast kriitilised aminohappejäägid. Mõndagi uut COX katalüütiliste tsentrite struktuuri kohta loodame saada koralli ensüümide difraktsioonanalüüsist. Evolutsioonibioloogia vaatepunktist ootavad vastust järgmised küsimused: (i) kas prostaglandiinide sünteesi tsüklooksügenaasi rada on kasutusel kogu loomariigis ning mis toimub taimedes, kus on samuti detekteeritud prostaglandiine, ja (ii) mitu COX kodeerivat geeni esineb selgrootutes ning millises evolutsioonilise arengu staadiumis toimus COX diferentseerumine indutseeritavaks ja konstitutiivseks isovormiks.

Miski ei teki tühjale kohale. Meie töö, mis eeldab nii orgaanilise ja analüütilise keemia kui biokeemia ja molekulaarbioloogia meetodite oskuslikku kasutamist, osutus paljuski võimalikuks tänu Ülo Lille poolt veerandsaja aasta eest Tallinnas alustatud eikosanoidide keemia ja biokeemia alastele uuringutele. Teisalt kuulub meie siiras tänu headele kolleegidele Keemilise ja Bioloogilise

Füüsika Instituudist, Eesti Biokeskusest ja Vanderbilti Ülikoolist, kes on võimaldanud kasutada seadmeid, mida meie laboris ei ole, ning ühtlasi aidanud saavutada tiptasemel teadustööks hädavajalikku kriitilist massi.

Projekti on toetanud EV Haridusministeerium (sihtteema 0350314s98), Eesti Teadusfond (grandid nr. 2153 ja 3783) ning USA Rahvuslik Terviseinstituut (NIH FIRCA koostöögrandid Vanderbilti Ülikooliga RO3 TW004-1 ja RO3 TW004-04).

## KIRJANDUS

Brash, A. R., Baertschi, S. W., Ingram, C. D., Harris, T. M. 1987. On non-cyclooxygenase prostaglandin synthesis in the sea whip coral, *Plexaura homomalla*: An 8(R)-lipoxygenase pathway leads to formation of an alpha-ketol and a racemic prostanoid. *J. Biol. Chem.*, 262, 15829-15839.

Corey, E. J., Ensley, H. E., Hamberg, M., Samuelsson, B. 1975. Disparate pathways of prostaglandin biosynthesis in coral and mammalian systems. *J. Chem. Soc. Chem. Commun.*, 277-278.

Corey, E. J., Lansbury, P. T., Yamada, Y. 1985. Identification of a new eicosanoid from *in vitro* biosynthetic experiments with *Clavularia viridis*. *Tetrahedron Lett.*, 26(35), 4171-4174.

FitzGerald, G. A., Patrono, C. 2001. The coxibs, selective inhibitors of cyclooxygenase-2. *N. Engl. J. Med.*, 345, 433-442.

Funk, C. D. 2001. Prostaglandins and leukotrienes: advances in eicosanoid biology. *Science*, 294, 1871-1875.

Kiefer, J. R., Pawlitz, J. L., Moreland, K. T., Stegeman, R. A., Hood, W. F., Gierse, J. K., Stevens, A. M., Goodwin, D. C., Rowlinson, S. W., Marnett, L. J., Stallings, W. C., Kurumbail, R. G. 2000. Structural insights into the stereochemistry of the cyclooxygenase reaction. *Nature*, 405, 97-101.

Koljak, R., Boutaud, O., Sieh, B.-H., Samel, N., Brash, A. R. 1997. Identification of a naturally occurring peroxidase-lipoxygenase fusion protein. *Science*, 277, 1994-1996.

Koljak, R., Järving, I., Kurg, R., Boeglin, W. E., Varvas, K., Valmsen, K., Ustav, M., Brash, A. R., Samel, N. 2001. The basis of prostaglandin synthesis in coral: Molecular cloning and expression of a cyclooxygenase from the Arctic soft coral *Gersemia fruticosa*. *J. Biol. Chem.*, 276, 7033-7040.

Kurumbail, R. G., Stevens, A. M., Gierse, J. K., McDonald, J. J., Stegeman, R. A., Pak, J. Y., Gildehaus, D., Miyashiro, J. M., Penning, T. D., Seibert, K., Isakson, P. C., Stallings, W. C. 1996. Structural basis for selective inhibition of cyclooxygenase-2 by anti-inflammatory agents. *Nature*, 384, 644-648.

Picot, D., Loll, P. J., Garavito, M. 1994. The X-ray crystal structure of the membrane protein prostaglandin H2 synthase-1. *Nature*, 367, 243-249.

Schneider, C., Boeglin, W. E., Prusakiewicz, J. J., Rowlinson, S. W., Marnett, L. J., Samel, N., Brash, A. R. 2002. Control of prostaglandin stereochemistry at



the 15-carbon by cyclooxygenases-1 and -2. A critical role for serine 530 and valine 349. *J. Biol. Chem.*, 277, 478-485.

Song, W. C., Brash, A. R. 1991. Purification of an allene oxide synthase and identification of the enzyme as a cytochrome P-450. *Science*, 253, 781-784.

Valmsen, K., Järving, I., Boeglin, W. E., Varvas, K., Koljak, R., Brash A. R., Samel, N. 2001. 15*R*-cyclooxygenase of invertebrate origin: Molecular cloning and expression from the Caribbean coral *Plexaura homomalla*. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 98, 7700-7705.

Vane, J. 1994. Towards a better aspirin. *Nature*, 367, 215-216.

Vane, J., Bakhle, Y. S., Botting, R. 1998. Cyclooxygenases 1 and 2. *Annu. Rev. Toxicol.*, 38, 97-120.

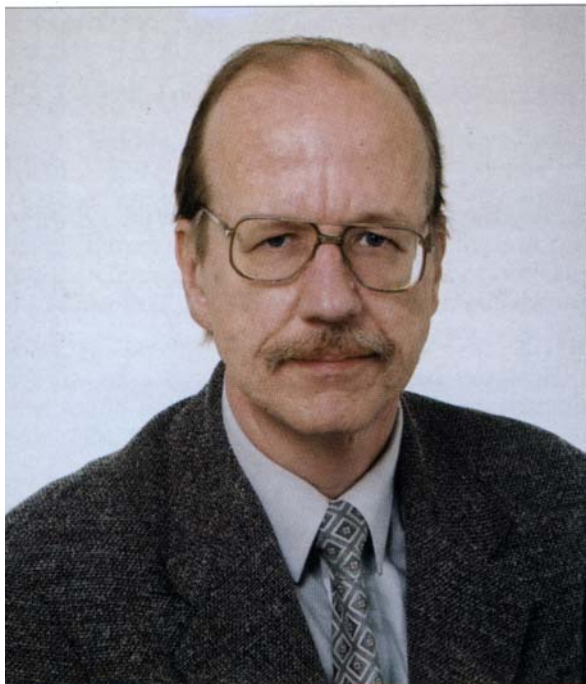
Varvas, K., Järving, I., Koljak, R., Vahemets, A., Pehk, T., Müürisepp, A.-M., Lille, Ü., Samel, N. 1993. *In vitro* biosynthesis of prostaglandins in the White Sea soft coral *Gersemia fruticosa*. Formation of optically active PGD<sub>2</sub>, PGE<sub>2</sub>, PGF<sub>2α</sub> and 15-keto-PGF<sub>2α</sub> from arachidonic acid. *Tetrahedron Lett.*, 34, 3643-3646.

Varvas, K., Järving, I., Valmsen, K., Koljak, R., Brash, A. R., Samel, N. 1999. Evidence of a cyclooxygenase-related prostaglandin synthesis in coral: The allene oxide pathway is not involved in prostaglandin biosynthesis. *J. Biol. Chem.*, 274, 9923-9929.

Varvas, K., Koljak, R., Järving, I., Pehk, T., Samel, N. 1994. Endoperoxide pathway in prostaglandin biosynthesis in the soft coral *Gersemia fruticosa*. *Tetrahedron Lett.*, 35, 8267-8270.

Weinheimer, A. J., Spraggins, R. L. 1969. The occurrence of two new prostaglandin derivatives (15-*epi*-PGA<sub>2</sub> and its acetate, methyl ester) in the gorgonian *Plexaura homomalla*. *Chemistry of coelenterates. XV. Tetrahedron Lett.*, 59, 5185-5188.

*Teaduspreemia tehnikateaduste alal*  
**SAAREMAA SÜVASADAMA VÕIMALIKE  
ASUKOHTADE HÜDRODÜNAAMILISTE JA  
GEOLOOGILISTE UURINGUTE eest**



*Jüri  
Elken*  
Kollektiivi juht

Sündinud 22. juunil 1952 Pärnus

1970 Pärnu 2. Keskkool

1975 Tartu Ülikool, geofüüsika

1983 füüsika-matemaatikakandidaat, NSVL TA Okeanoloogia Instituut,  
okeanoloogia

1975–1989 Eesti TA Termofüüsika ja Elektrofüüsika Instituut: insener, noo-  
remteadur, vanemteadur. 1989–1992 Eesti TA Ökoloogia ja Mereuringute  
Instituudi ning 1992–2002 Eesti Mereinstituudi merefüüsika sektori juhataja.  
Alates 2002 TTÜ Meresüsteemide Instituudi direktor. Külalisteadlane Sak-  
samaal 1993 ja 1994. Alates 1998 ühtlasi TPÜ geofüüsika professor.

Eesti delegatsiooni juht HELCOMi Keskkonnakomitees (1992–2000), Rahvus-  
vahelise Füüsikaliste Ookeaniteaduste Assotsiatsiooni (IAPSO) rahvuslik  
korrespondent, Läänemere Operatiivse Okeanograafilise Süsteemi (BOOS)  
juhtkomitee liige.

Avaldanud üle 60 teaduspublikatsiooni.



**Jüri Kask** (neljas vasakult)

Sündinud 31.05.1951 Tartus

1969 Nõo Keskkool

1974 Tartu Ülikool, geoloogia

1984 geoloogia-mineraloogiakandidaat, Eesti TA Geoloogia Instituut

Eesti Geoloogiakeskuse juhtivgeoloog.

Üle 40 teaduspublikatsiooni.

**Uno Lii** (teine vasakult)

Sündinud 22.01.1930 Tallinnas

1949 Tallinna 7. Keskkool

1954 Tallinna Tehnikaülikool, hüdrotehnilised ehitused

1966 tehnikakandidaat, Peterburi Tehnikaülikool

1984 tehnikadoktor, Peterburi Tehnikaülikool

1984 Tallinna Tehnikaülikooli professor

1997 Tallinna Tehnikaülikooli emeriitprofessor

2001 Valgetähe IV klassi teenetemärk

Üle 120 teaduspublikatsiooni.

**Tarmo Kõuts** (kolmas vasakult)

Sündinud 11.04.1963 Abja-Paluojaal Viljandimaal

1981 Viljandi 5. Keskkool

1986 Tartu Ülikool, geofüüsika

1999 PhD, Tartu Ülikool, keskkonnafüüsika

TTÜ Meresüsteemide Instituudi vanemteadur.

Ligi 20 teaduspublikatsiooni.

**Tarmo Soomere** (esimene vasakult)

Sündinud 11.10.1957 Tallinnas

1974 Kohila Keskkool

1980 Moskva Riiklik Ülikool, matemaatika

1984 füüsika-matemaatikakandidaat, NSVL TA Okeanoloogia Instituut, okeanoloogia

1992 matemaatikadoktor, Tartu Ülikool

TTÜ Meresüsteemide Instituudi vanemteadur.

Üle 60 teaduspublikatsiooni.

Alfred Nobel liigitas möödunud sajandi algul tõeliste teaduste hulka füüsika, keemia ja meditsiini. Aastal 1969 tõstis Rootsi Teaduste Akadeemia samale aujärjele majandusteaduse. Loomulikult vastab see jaotus nüüdseks juba sada aastat vanadele ettekujutustele. Nobeli eluajal oli geofüüsika lapsekingades. Ilmakaardid ning paar kuulsamat ookeanihoovust olid küll teada, kuid teadmised Maa sisemusest, kliima muutumisest või Maailmamere struktuurist – teistel planeetidel toimuvatest protsessidest rääkimata – puudusid pea täielikult. Eestimaa juurtega mehe Jakob von Uexkülli initsiatiivil annab Rootsi parlament 1980. aastast alates välja nn alternatiivset Nobeli preemiat neile, kes on saavutanud edusamme inimkonna oluliste probleemide lahendamisel. Eesti Vabariik on kuskil Nobeli ja Uexkülli positsioonide vahel, andes välja preemiaid kaheksas valdkonnas.

Tehnikateadused said seekord “koduks” grupile tavaliselt kardinaalselt erinevates valdkondades (alates geoloogiast ja lõpetades “puhta” matemaatikaga) töötavatele teadlastele. Töörühm kontseptsioonide alale, milles kohtusid kõik neli ürgelementi. Maa, vesi ja õhk saavad kokku rannajoonele. Uuriti piirkonda, kus neile kolmele elemendile lisandusid veel inimlikud kireleegid. Erinevalt tavapärasest teadusest, kus teadustulemuse kuuluvus on määratud meetodi valikuga, oli seekord tegemist moodsalt väljendudes objektorienteeritud uurinutega. Nimelt uurimisobjekt määras teadusvaldkonna: rannajoone läheduses toimuvate protsessidega tegeleb “coastal engineering” ehk toortõlkena rannikutehnika.

#### MERI ON HÜDRODÜNAAMILISELT KEERULINE SÜSTEEM

“Meri, mu tuhandenäoline meri...”, ütlevad tuntud laul ja tal on tuline õigus. Igapähele meist on olnud nii emotsionaalseid kui ka ratsionaalseid kokkupuuteid merega.

On üksjagu hämmastav võrrelda laiaulatuslikke teadmisi, mida inimkond on kogunud Maast kujutlematuil kaugusil asuvate tähtede, miljardite aastaid tagasi aset leidnud sündmuste või mikromaailma sügavuste kohta nende nappide faktidega, mida teame peaaegu endi varvasteni ulatuva ja 5/7 Maast katvate ookeanide sisemise struktuuri ja hingeelu kohta.

Isegi täppisteadusliku taustaga mereuurijatel on kasutusel palju erinevaid professionaalseid vaatenurki, mis on sageli vastuolulised, rääkimata geoloogidest, bioloogidest või ökoloogidest. Näiteks, lainetuse (aga erinevaid liiki laineid on meres palju) uurija võib kujutleda merd Fourier’ reaksarenduse liikmete kogumina, kus superpositsiooni stabiilsus saab mõnevõrra häiritud erinevate lainete mittelineaarse interaktsiooni tõttu. Tsirkulatsiooni modelleerija käsitleb merd numbrilise arvutusvõrgu punktidenä, lootes, et järjest kasvavad arvutusvõimsused võimaldavad võrgusammu vähendamise abil isenesest lahendada vastuolud mõõtmis- ja arvutustulemuste vahel. Turbulentsi uurija võib väita, et Reynolds’i keskmistamine ja turbulentsi eristamine keskmisest voolamisest ei ole geofüüsikas teostatav, kuna pole võimalik reaalselt looduslikust protsessist välja eraldada fikseeritud välistingimustele vastavat juhuslike realisatsioonide ansamblit. Seda olulisem on mereteaduses oskus üksikute teadmiskildude najal üles ehitada süstematiseeritud pilti protsessidest

ja meresüsteemidest tervikuna, nii kontseptsioonide, teooria kui ka sünteesitud mudelite tasandil.

Meres esinevad nähtused ja protsessid on paljumastaapsed (mõõtmed millimeetri murdosadest kümnete tuhandete kilomeetriteni), mis omavahel tihedalt ning sageli ootamatul viisil seotud. Alles 1970ndatel aastatel kummutas mõõtetehnika areng varasema laialt levinud kontseptsiooni, et (1) mere pinnakihis domineerivad lühikese perioodiga tuulelained, seega kiireloomuline dünaamika, (2) sügavamas kihis on liikumine ja veemasside struktuur suhteliselt ühtlased ning muutused toimuvad väga aeglaselt, ning (3) nende kahe dünaamilise süsteemi vahel ei eksisteeri midagi olulist. Selgus, et märkimisväärne osa kogu mere kineetilise energiast on kaskaadmehhanismide kaudu koondunud sünoptilise mastaabiga protsessidesse – sünoptilised keerised, frondid, jugavoolud jt, kuigi olulist välist energiaallikat selles spektri osas ei ole. Seejuures oma tekke- ja arengumehhanismidelt on nad analoogilised atmosfääri sünoptiliste protsessidega (sünoptilist mõõdet iseloomustav Rossby deformatsiooniraadius on ookeanis ca 50 km, Läänemeres 10 km, atmosfääris 1000 km).

Turbulents kui ebakorrapärase liikumise üldmõiste esineb küll kõigis liikumise mastaapides, kuid see ei tarvitse tingimata sarnaneda vektorudes ilmnevale “takistavale” turbulentsile. Ühe näitena on muutlike hoovuste süsteemid kirjeldatavad geostroofilise turbulentsina, kus on võimalik ka “negatiivne viskoosus”, st küllalt suured sünoptilised keerised ja Atlandi läänerrannikult peegelduvad Rossby lained “toidavad” Golfi hoovust. Üldise kaootilise pildi taustal esinevad koherentsed struktuurid, mis teatavas veekihis aeglaselt liikuvate keerisläätsetena võivad ookeanis püsida kompaktsena mitmeid aastaid, kandes enda tuumas Vahemere vett praktiliselt segunemata üle Atlandi ookeani kuni Sargasso mereni. Läänemere keskosas, Gotlandi süvikus tekivad sügistalvel analoogilised keerisläätseted (kui “mõõta” Rossby deformatsiooniraadiusega), mis kannavad mõne kuu jooksul nõlvade juures moodustuva “uue” süvakihtide vee üle kogu basseini laiali. Eesti teadlased olid pioneeriks uute meetodite rakendamisel Läänemeres, näidates, et Läänemeri ei ole ainult välisjõudude otsesest mõjust determineeritud veekogu (nagu järved ja estuaarid seda enamasti on), vaid käitub dünaamilises mõttes iseseisvalt nagu “väike ookean”. Selle tegi võimalikuks teadlaste koolitamine maailma juhtivates ülikoolides ja teaduskeskustes ning hästi varustatud uurimislaevade “Aju-Dag” ja “Livonia” (varasema nimega “Arnold Veimer”) oskuslik kasutamine.

Kõrvalepõikena, mereuuringute täppisteadustesse kalduval tiival (ja hüdrodünaamikal üldisemalt) on tõeliselt vedanud, sest just sellest valdkonnast on pärit mitmeid ideid ja kontseptsioone, mis on muutnud ühes või teises küsimuses tervet füüsikalist maailmapilti. Klassikaline näide on John Scott Russelli poolt 1834 Edinburghi lähistel kanalis tähele pandud soliton ehk üksiklaine, millel on tänapäeval ka optoelektronilisi rakendusi ülikauges ja -kiires andmesides. Isegi mereteadusest pealtnäha nii kauge mõiste nagu fraktaalusus sai laiemate teoreetiliste käsitluste objektiks pärast seda, kui Inglismaa rannajoone pikkuse täppismõõtmine osutus sügavalt mittetriviaalseks probleemiks.

Kaasaja kurioosumina võiks mainida, et XX sajandi algul kasutusele võetud ideaalse gaasi käitumist (sh molekulide pörkumist) kirjeldava Boltzmanni

võrrandi matemaatiliselt enam-vähem korrektne tulemus õnnestus leida alles pärast seda kui Hamburgi okeanoloog ja kliimauurija Klaus Hasselmann tuletas 1962. aastal sama tüüpi võrrandi tuulelainete “põrkumise” ehk interaktsiooni jaoks. Saaremaa lähistel arvutati ekstreemseid lainekõrgusi just Hasselmanni tuletatud kineetilise võrrandi alusel. Muu hulgas ennustati, et just tulevase süvasadama lähistel, Harilaiupeenra kandis, asub tõenäoliselt üks Läänemere markantsemaid laineanomaaliaid (st piirkond, kus lainekõrgus mingitel põhjustel ületab märgatavalt naaberlade lainekõrguse).

Kineetilise võrrandi alusel 1980ndatel aastatel Mereinstituudi eelkäijas – tollases Eesti TA TEFI merefüüsika sektoris – arendatud planetaarsete ehk Rossby lainete teooria, sh lainete topeltresonantsi teooria, leidis 1990ndatel aastatel äkitselt sügavaid rakendusi mitmes fundamentaalses valdkonnas, alates triivlainetest plasmafüüsikas ja lõpetades galaktikate massijaotuse problemaatikaga. Võimalus, et mingi vabalt areneva lainesüsteemi termodünaamilise tasakaaluseisundi struktuur ei pruugi olla üheselt määratud, või et see võiks sõltuda konkreetsetest algtingimustest, aga ka selle idee kinnituseks esitatud kaalutlused, olid piisavalt põnevad ja ka veenvad, et lüüa laineid füüsikateoretikute seas.

Merepõhi ja -rannik, mille arengut sageli käsitletakse geoloogilises ajaskaalas, muutub hüdrodünaamilistel põhjustel ka palju lühema aja jooksul. Rannajoone ja madalmeres, kus tormilainete tekitatud jõud on kümneid ja sadu kordi suuremad põhjalähedaste hoovuste mõjust süvameres, võivad ranniku ümberkujunemise protsessid olla eriti kiired.

Praeguse Läänemere kohale kujunes nõgu hulk aega tagasi Kambriumi, Ordooviitsiumi ja Siluri settekivimite kulutusel. Soome lahe ja Põhja-Eesti klindi väljakujunemisel etendas olulist osa nn Ürg-Neeva veevoolu kulutav tegevus. Nüüdisaegsed meresetted on kujunenud välja vanemate setete hüdrodünaamilise kulutuse ja selle käigus tekkinud materjali ümbersetemisega. Seda protsessi on oluliselt mõjutanud veetaseme suur, kuni mitmekümnemeetrine kõikumine kogu Läänemere ajaloo vältel. Kui stratigraafilises mõttes pakub mere süvikutes settinud materjali läbilõige rohkesti teavet mere arengu varasemate staadiumite kohta, siis hiliste setete kihistus peegeldab ka hüdrodünaamiliselt põhjustatud ökoloogiliste stagnatsiooniperioodide korduvust ja kestust, mõni neist kuni mõnikümmend aastat.

Arvutusvõimsuste kasv on kujundanud olukorra, kus merede tsirkulatsiooni ja lainete ning nende tulemite – ainelevi ja setete dünaamika – numbriline modelleerimine on muutunud üksikute superarvutuskeskuste privileegist mereuuringute praktiliseks vahendiks. Modelleeritud stsenaariumid on saanud igapäevaseks otsustamise abivahendiks. Telekommunikatsiooni kättesaadavus on loonud võimalused erinevate andmekogumite ja mudelite ühildamiseks ning eeldused mereuuringute süsteemse lähenemise tegelikuks realiseerimiseks. Siiski, mudelsüsteemil on optimaalne keerukus, mis sõltub sinna lülitatud erinevate protsesside kvantitatiivse kirjeldamise adekvaatsusest. Liiga keeruline mudel võib kergesti kaotada sideme modelleeritava objektiga ning muutuda sisuliselt juhuslike arvude generaatoriks.

Tänapäevane mõõtetehnika võimaldab mere füüsikalisi parameetreid ja nende kaudu leitavaid merekeskkonda iseloomustavaid näitajaid registreerida sekundilise ajaintervalliga. Seadmete autonoomsus on kasvanud ja ulatub tarvidusel mitme kuuni. Üha enam evitatakse autonoomseid reaalarajas töötavaid ning andmeid edastavaid mõõtesüsteeme. Kombineerituna hüdrodünaamiliste mudelitega moodustavad need võimsa infotehnoloogilise toe merendusele tervikuna. Ka Eestis on hüdro meteoroloogilised reaalaraja mõõtesüsteemid rakendust leidnud praktiliselt kõigis suuremates sadamates. Käesoleval ajal käib nende täiendamine hüdrodünaamiliste mudelitega.

## SADAMAUURINGUTE TAUST

Eesti geograafiline asend tingib ajalooliselt välja kujunenud soovi olla ida ja lääne vahelise transiitkaubanduse üheks osaks. Sadamate rajamise praktika Eesti rannikule on pikaajaline. Juba X–XII sajandil seilasid Eestist pärit meresõitjad aktiivselt Läänemeres, mis ajalooürikute andmeil kulmineerus Rootsi tolleaegse pealinna Sigtuna jõulise külastamisega 12. augustil 1187. Kui olid laevad, pidid olema ka sadamakohad, kuhu kurja mere eest varjule tulla. Et tolleaegsed sadamad olid enamuses lihtsalt tuule ja lainete eest kaitstud varjulised lahesopid, siis suurema süvisega hansakogesid lossiti reidil ja kaup toodi maale väiksemate paatidega. Hansaliidu perioodi aktiivne kaubandus arendas Eesti rannikul välja kolm sadamakohta: Tallinn, Pärnu ja Narva.

Kui merel pidi iga laevakapten loodusjõududega ise toime tulema, siis sadam varjupaiga pakkujana oli otsesel määral huvitatud nii laevasõidu kui ka sadamas seismise tingimusi mõjutavate looduslike protsesside analüüsist ja prognoosist. Meie laiuskraadil on navigatsiooni enim mõjutavaks teguriks jääolud. Tallinna sadama logiraamatutest on võimalik välja lugeda küllalt head jääolude kirjeldused alates XVI sajandi esimesest poolest. Nimetatud aega võib üsna kindlalt lugeda ka sadamauuringute alguseks, seega on need traditsioonid Eestis üsna pikad. Tõenäoliselt püüti eelnevate talvede kirjelduse põhjal ennustada, milliseks kujunevad järgnevad talved laevaliikluse jaoks ja vastavalt planeerida ka sadamarajatisi. Tallinna kujunemine kogu Läänemere arvestatavaks sadamaks juba XVI sajandil on tõenäoliselt seotud sellega, et Pärnu ja Narva lahe jääolud on oluliselt halvemad kui Tallinna lahes.

Veeseis on Eesti madalas rannikumeres samuti oluliseks navigatsiooni mõjuks teguriks. Selle pistelist registreerimist alustati Tallinna sadamas juba 1805. a ja süstemaatilist vaatlust 1842. a. Tallinna meretaseme aegrea näol on tegu maailma vanuselt teise (Stockholmi järel) pidevalt tegutsenud ja siiani toimiva mõõtejaamaga. Kaasajal on veeseisu režiim (kõrgeimad, madalaimad ja keskmised veeseisud) strateegiline alusmaterjal, mille põhjal projektee ritakse hüdrotehnilisi rajatisi.

Eesti rannik ei ole tänapäevaste sadamate rajamiseks eriti soodne. Enamasti on rannalähedane meri madal. Suletud lahtedes on hulgaliselt pehmeid ning kiiresti teisalduvaid põhjaseteid. Merele avatud piirkonnad on aga lainete otsese mõju vallas. Kuigi on võimalik ehitada avatud sadamaid, on Läänemeres levinud sadamatüübiks siiski varjusadam, kus laevad saavad varjuda tormi eest ja

segamatult lossimistöid teostada. Transpordilogistika seisukohalt on tihti oluline iga tund ja varjusadam seega eelistatud variant.

Taasiseseisvunud Eesti riik sai pärandiks vaid ühe sadama, mida oli võimalik kasutada märkimist väärivate transiidivoogude läbilaskmiseks – Muuga. Sellest praeguseks Eesti jaoks tähtsaimast sadamast oli esialgsete plaanidega võrreldes välja ehitatud võrdlemisi väike osa, mis oli orienteeritud väga ühekülgsete kaubavoogude transiidiks – peamiselt vilja impordiks läänest itta. Teiseks selle sadama puuduseks oli ja on tänaseni see, et ei ole rajatud kaitseehitisi kirdest, põhjast ja loodest puhuvate tormituulte korral tekkivate lainete vastu. Selle tagajärjel kehtib Muuga sadama eksploatatsioonitingimustes nõue, et üle 15 m/s puhuvate tuulte korral laevade laadimine lõpetatakse ja laevad viiakse ohutuse tagamiseks sadamast välja reidile.

Plahvatuslikku sadamaehituse kasvu ei ole enam kui kümneaastase taasiseseisvusperioodi jooksul toimunud. Seevastu on välja kujunenud põhilised sadamatiüübid, mis on võimelised end ise ära majandama. Ootuspäraselt suurimad muutused on toimunud AS Tallinna Sadamale kuuluvates Vanasadamas ja Muuga sadamas: jäävad need ju pealinna ja olid juba NSV Liidu ajal välja kujunenud transiidikoridori elementideks. Tallinna Vanasadam on muutunud tänapäevaseks reisisadamaks, mille kaudu saabub aasta jooksul Eestisse ligi 6 miljonit turisti. Muuga sadam on saavutanud Läänemere piirkonnas arvestatava positsiooni vedelkütuste transiidisadamana. Nimetatute kõrval toimetavad mitmed väiksemad kauba- ja transiidisadamad nii Tallinna ümbruses (Miiduranna, Vene-Balti jne) kui ka mujal Eestis (Kunda, Pärnu, Roomassaare, Lehtma, Paldiski jne). Hoogsalt on kasvanud huvi purjetamise vastu, mille tulemusena on planeerimis- ja teostamisjärgus hulgaliselt väikesi atraktiivseid jahisadamaid, nagu Pirita, Kuressaare, Vergi, Haapsalu. Enamasti on tegu juba varasemast ajast kasutatud sadamakoha või endiste mereväebaaside korrastamisega, päris uusi kohti praktiliselt ei ole kasutusele võetud.

Uute sadamate rajamine on keerukas protsess, mis algab asukoha valikust ja lõpeb laevade sildumisega valminud kaide ääres. Enamik Eestis praegu kasutusel olevaid sadamaid paikneb juba aastakümneid või isegi mitu sajandit tagasi välja valitud kohtades. Oma roll on siin kindlasti rannarahva lautri rajamise oskustel. Tuli ju väga nappide vahenditega rajada hüdrotehniline rajatis, mis meres ka kehtaks. Seega merd tuli tunda, mis oli võimalik vaid pikaajaliste tähelepanekute põhjal. Suuremate laevade jaoks on vajalikud aga suuremad kaid ja muulid, mis tähendab vanemate sadamate täielikku rekonstrueerimist. Kaasajal tähendab see ühtlasi ka põhjalikke uurimistöid, mis lisaks navigatsioonilistele ja ehituslikele teguritele näitaksid ära uute rajatiste mõju keskkonnale ja kavandaksid meetmed kahjulike keskkonnamõjude ärahoidmiseks või leevendamiseks.

Saaremaa on nii ajaloolises kui majanduslikus plaanis jätkuvalt Läänemere üks atraktiivsemaid saari. Kuigi saarlased ja muhulased on kõikidel aegadel kõvad meresõitjad olnud, ei ole Saaremaale muinas- ega keskajal suuri sadamaid rajatud. Tõenäoliselt olulisim oli XV–XVI sajandil Kuressaare linnuse juurde tekkinud sadam, mille kaudu toimus soola ja veini sissevedu, ning põhiliselt vilja, karusnahkade ja lubja väljavedu. Sadam kängus sagedaste viljaikalduste ja rannikumere madaldamise tagajärjel XVII sajandi algul. Kaubanduslikult



aktiivsel Hansaliidu ajastul võttis hoopis lähedalasuv Gotland transiidikeskuse rolli endale. Võimalik, et üheks põhjuseks oli sobiva süvasadama puudumine Saaremaal. Ajaloolise kõrvalepõikena võiks mainida ka kaptenite saart Vilsandit. Sinna ehtasid oma kodu mitmed Saaremaalt pärit laevakaptenid – ikka selle pärast, et suurelt merelt saaks suure laevaga võimalikult kodu lähedale. Laev ise tuli aga jätta reidile, sest puudus piisavalt sügav sadam. Kogu XX sajandi esimese poole kujutas Vilsandi endast kultuuriloolist ja looduslikku vaatamisväärsust, mida külastas aastas mitu tuhat turisti. Inglismaa vahet kurseeris selleks tarbeks spetsiaalne aurik.

Viimase poolsajandi poliitiliste mullistuste tõttu on nii Saaremaa kui ka kogu Lääne-Eesti regioon jäänud laevaliikluse seisukohalt teatavas mõttes isoleeritud seisu, kuna endiselt puudub korralik merevärv – süvasadam. Kuigi saartega ühenduse pidamiseks olid karmidele piiritsooni tingimustele vastavad sadamad olemas, ei rahulda need vaba liikumisega seotud tänapäevaseid vajadusi. Poole sajandi pikkuse okupatsiooniperioodi jooksul olid suletud ja praktiliselt kasutamiskõlbmatuks muutunud enamik rannakalurite sadamaid. Mereturismile ning lääne suunas toimuvale kaubavahetusele orienteeritud sadamad puudusid sootuks. Seetõttu on Saaremaa uue süvasadama idee ääretult oluline kogu regiooni edasisele arengule. Keskkonnaminister Heiki Kranich kirjutas eessõnas Eesti TA Toimetiste Tehnikateaduste seeria Saaremaa erinumb-rile: “Euroopa suunas avatud sadam loob saare jaoks uue dimensiooni, integreerides saare rahvusvahelisse transpordivõrku, ning soodustab olulisel määral nii tööstuse kui ka turismi arengut”.

Süvasadama rajamine ökoloogilises mõttes väga tundlikus piirkonnas, sealhulgas Vilsandi rahvuspargi vahetus läheduses ning globaalselt ohustatud linnuliikide, eriti kirjuhaha, peamiste talvituspaikade naabruses, on nii mereteadlastele kui inseneridele tõsine väljakutse nii teaduslikus, keskkonkaitselises kui insener-tehnilises mõttes. Sadam peab olema planeeritud viisil, et nii selle ehitus kui ka ekspluatatsioon toimuksid minimaalse riskiga ümbritsevale keskkonnale.

#### ARVAMUSED EI TARVITSE OSUTUDA ÕIGEKS

Saaremaa süvasadama uuringu tähendus ulatub kindlalt kaugemale pelgalt ühe sadama problemaatikast. Suhteliselt lühikese aja jooksul tehti komplekselt erinevate valdkondade uuringuid mahus, milleks tavaliselt kulub mitmeid kordi rohkem aega. Uuringu tulemused ei kinnitanud mitmeid varasemaid lõpliku tõe pähe serveeritud arvamusi, mis olid kõlama jäänud süvasadama küsimuste eelneva arutelu käigus. Siinkohal tasub meenutada, et ka uuringu autoritel oli töö algstaadiumis, kui mõõtmisandmed ja arvutustulemused veel puudusid, üsna erinevaid arusaamu ja veendumusi Saaremaa süvasadama kohta. Õnneks on matemaatikas ammu teada efektiivsed meetodid, kuidas ratsionaalselt lõpetada näiteks vaidlus teemal: “Kas meie toa pindala on 20 või 25 m<sup>2</sup>?”. Neist lihtsaim taandub mõõdulindi ja korrutustabeli kasutamisele.

Et “mõõdulindi” kasutamine ei tulnud kõne alla, otsustas Sergei Koroljov “Lunohodi” ehitamise ajal, et Kuu pind on kõva, mis õnneks osutus antud kontekstis õigeks. Sadamate rajamisel ja laiendamisel võib Eestis kahjuks leida

mitmeid madalakvaliteedilise otsustamise näiteid. Kohati on ebaõnnestunud projekteeritud hüdrotehnilised rajatised suurendanud lokaalseid rannapurustusi, kohati aga jälle setete kuhjumist sadama suudmes või laevateel nii suurel määral, et sadama käigushoidmine on muutunud majanduslikult ebaotstarbekaks. Eesti rannikul võib siinkohal varasemast perioodist näitena tuua mitmeid väikesadamaid: Jaagupi ja Loode sadamad Saaremaal, Ruhnu päästejaama sadam jne. Sadamate muulid on mitmel juhul rannavööndis setete liikumise takistuseks, kusjuures nendest ühele poole jääb setete kuhjeala ning teisel pool võivad esineda aktiivsed rannapurustused. Üheks huvitavaks näiteks Eesti sadamaehituse lähiajaloo on Kuressaare jahisadam, mille maapealsed rajatised ehitati küll eeskujulikult valmis, kuid rajamata jäi nõuetele vastav laevatee. Viimase projekteerijad ilmselt Koroljovi mõõtu välja ei andnud, ja uurida või mõõta ka ei viitsinud. Alles süvendustööde käigus selgus, et osa kanalist tuleb rajada kaljupinnasesse, mis tunduvalt suurendab tööde maksumust. Kuna vastav raha on leidmata, ei ole ligi 2 km pikkune sissesõidukanal sadamasse siiani lõpetatud. Sadam on, kuid ilma seal oodatavate jahtideta! Neid vigu olnuks võimalik korralike uuringute tulemustele tuginedes vältida. Uurimistöde puudulikkuse tõttu on ebaõnnestunud ka Ruhnu sadama rekonstrueerimine.

Sadamaehituse arengu peamiseks takistuseks on ühest küljest olnud ehk investeeringute nappus, aga kahjuks ka sellealase arendustegevusega seotud inimeste teadmiste piiratus. Samas ei ole rakendatud ka vastava ala spetsialistide potentsiaali, kes Eestis praegusel ajal olemas on. Muuga sadama äärmiselt keerulistes ehitusgeoloogilistes tingimustes on ühe jooksva meetri lainemurdja keskmiseks ehitusmaksumuseks umbes 30 tuhat USD. Selleks, et kõiki perspektiivseid sadamarajatisi kaitsta lainetuse mõju eest, on vajalik lainemurdja üldpikkusega 5–7 km. Suurte investeerimismahtudega kaasneb aga ka küsimus valitud lahenduse õigsusest. Vead hüdrotehniliste ehitiste rajamisel meres tuleb tavaliselt hiljem kallilt kinni maksta. Pahatihti on vigade kõrvaldamine koguni kallim kui ehitus ise, või osutub koguni võimatuks.

Valitud sadama lahenduse õigsus ja majanduslik tasuvus selgub õnnetuseks alles pikaajalises perspektiivis. Viimase aastakümne jooksul on esinenud mitmeid juhuseid, kus sadama arendaja, omamata vajalikke teadmisi, esitab nii projekteerijatele kui ka ehitajatele põhjendamatu nõudmisi nii sadama projekti kui ka sadama majanduslike näitajate osas. Sageli paistab silma arendajate üleolev suhtumine projekteerimisele eelneva uurimistöo suhtes. Pole haruldane, et piirduakse vaid keskkonnamõtjude hinnanguga, mis kohustuslikult käib kaasa igasuguse mere hüdrotehnilise rajatise ehitamisega, ning jäetakse teostamata piisavad ehitusgeoloogilised, reostusainete leviku, jääolude, hoo-vuste, lainetuse ja setete liikumise uuringud. On elementaarne tõde, et iga rannajoonele püstitatav ehitus muudab selles kohas väljakujunenud lithüdrodünaamilist tasakaalu. Uue tasakaalu saavutamine võib võtta aastaid (halvemal juhul aastakümneid või sajandeid) ja kahjustada suuremal või vähemal määral ümbruskonna muid huvigruppe.

Mereteaduses on tänapäevaks välja arendatud mitmeid kvantitatiivseid prognoosilisi meetodeid, mis võimaldavad hinnata sadama rajamisega paratamatult kaasnevat keskkonnamõju ning läbi mängida stsenaariume nende leevendamise teedest. Kõneolevas uurimuses rakendati neid hulgaliselt. Erinevate meeto-

ditega saadud tulemused, mis harmoneerusid omavahel, kuid mitte varasemate tugitoolimõtiskluste tulemustega, olid mitmel juhul üllatuseks ka uurijatele endile. Jätame siinkohal kõrvale ulatuslike välitööde käigus kujunenud suuremahulised andmebaasid ning nende põhjal tehtud insener-tehnilist ning rakenduslikku laadi järeldused.

Tõelist põnevust kogu kollektiivile pakkusid mitmed uuringute käigus selgunud ning edasises töös lahti mõtestatud alusteaduslikud faktid ning järeldused. Tulenevalt Keskkonnaministeeriumi poolt tellitud uuringu lähteülesandest, käsitleti kolme võimalikku sadama asukohta: Suuriku-Kuriku (Tagalahe suudme läänerannikul), Vaigu (Tagalahe keskosa läänerannikul) ja Undva (Uudepanga lahe idarannikul).

- Võimalikes sadamakohtades on geoloogiline ja hüdrogeoloogiline situatsioon, sealhulgas liikuvate põhjasetete paiknemine ning merevee intrusioon põhjasete kohati lausa vastupidine võrreldes varasemate arvamustega [Kask jt, 2001]. Suuriku-Kuriku sadamakohas paikneb sadamaala mere ja 10–12 m kõrguse pangaastangu vahel. Sadamakoha akvatooriumi väga õhuke pinnakate koosneb valdavalt karbonaatkivimitest klibust ja segateralistest setetest. Veepiiril lasub aluspõhjakiivimitel 0,30 m paksuselt veeristega liivsavi ning 0,5 m kruusa ja veeristega liiva. Sadamabasseinide rajamiseks tuleb süvendada suhteliselt pehmet merglit ning süvendamismahud on kolmest sadamakohast väikseimad. Aktiivsete rannaprotsesside tõttu on tõenäoline, et rajatavast lainemurdjast põhja poole jääv mereosa täitub setetega. Vaigu sadamakoha akvatooriumis katab Jaani lademe savikatest lubjakividest koosnevat aluspõhja 4,5–10,0 m paksune liivpinnaste kompleks. Seetõttu on sadama rajamiseks vajalikud mahukad süvendustööd ning eksisteerib rajatud süvendite täitumise oht. Undva sadamakohas on planeeritav sadamaala peaaegu ilma pinnakatteta tasane paeplatoo. Selle ülemise osa (4–8 m) moodustab Jaani lademe biohermse kompleksi muutliku savikusega lubjakivi ning alumine 2 m paksune osa koosneb tugevast puhtast lubjakivist. Vee all avaneb biohermne kompleks 5–8 m sügavusel. Uudepanga lahe keskosa jääb pehmete Jaani lademe merglite avamusalale. Sadamabassein tuleb valdavalt rajada karbonaatkivimitesse ja süvendustööde maht on suur. Suuriku ja Kuriku panga vahel ning Vaigu rannas on mageda põhjavee saamine (kuni 50 m<sup>3</sup>/ööp) võimalik ilma täiendavate hüdrogeoloogiliste uuringuteta. Kvaliteetse joogivee saamise võimalused Uudepanga lahe ääres on keerulised, kuna põhjavesi on kohati kloriidirikas ja soolakas.
- Kahes kõrvuti asetsevas, peaaegu samas suunas avatud ning võrreldava suurusega lahes on reostuslevi kontrolliv hoovuste struktuur diametraalselt erinev [Kõuts, Laanearu, 2001]. Hoovuste, stratifikatsiooni, lokaalse tuule ja veetaseme kahekuulised mõõtmised näitasid, et mõnevõrra sügavamas Tagalahes esineb kahekihiline voolamine. Mõõtmisperioodi jooksul puhusid valdavalt lõunakaarte tuuled ning lahe pindmises kihis domineeris põhjasuunaline voolamine, mis viis pinnavee lahest välja. Samal ajal tekkis sügavamas kihis kompenseeriv lõunasuunaline sissevool. Uudepanga lahe hoovuste struktuur oli põhiliselt ühekihiline ning sisemist tsirkulatsiooni lahes iseloomustas antitsükloonaalne voolamine. Avamere vesi sisenes Uudepanga lahte Harilaiu piirkonnast

ja väljus piki idarannikut Undva neeme suunas. Tagalahes olid hoovuste kiirused keskmiselt 12 cm/s, ulatudes kohati üle 35 cm/s, kuid Uudepanga lahe hoovused olid väga nõrgad ning jäid peamiselt vahemikku 2–4 cm/s.

- Hoovuste struktuuri eripärade tõttu on võimaliku punktreostuse levik tugevalt asümmeetriline [Elken, 2001]. Rannikumere tsirkulatsioonimudeli (neljaastmeline seotud arvutusvõrkudega mittestatsionaarne kolmemõõtmeline mudel) kalibreerimiseks kasutati uuringute käigus mõõdetud hoovuste ja tuulte andmeid. Ranniku "tuulevarju" arvestamiseks mere kohal puhuvale tuulele kasutati poolempiirilist mudelit. Õlireostuse leviku tõenäosust hinnati hoovuseid käivitavate tuulte pikaajalise statistilise jaotuse alusel. Analüüs ei kinnita 1999. a tehtud asukohavaliku keskkonnamõtjude hindamise tulemuste arutamisel kõlama jäänud oletust, et sadama rajamisega Undvasse kaasneb väga suur õlireostuse oht Uudepanga lahe lõuna- ja lääneosas talvituvatele lindudele, eriti kirjuhakkadele. Tegelikult on Uudepanga lahes hoovused nõrgad ning suunatud nii, et võimaliku õlilekke korral reostus levib eelkõige piki idarannikut lahest välja. Võimalus, et õlireostus jõuab 24 tunni jooksul Vilsandi rahvusparki piiresse jäävate lindude ja hüljeste peatuspaikadeni, on väga ebatõenäoline.
- Tuulte struktuur ja lainetuse kliima on nii kogu Läänemere avaosas kui ka Saaremaa lähisel äärmiselt anisotroopne ja ebahütlane ([Soomere, 2001]; avamerelt pealetuleva lainetuse parameetrid erinevatest suundadest puhuvate tuulte jaoks arvutati spektraalse lainemudeli WAM abil). Näidati, et tugeva tuulega on sadamate läheduses võimalikud ulatuslikud tuulelainete kõrguse anomaaliad. Ei leidnud kinnitust varasem oletus, et Suuriku-Kuriku juures on suurte laevade jaoks lainetuse režiim avatud ranna tõttu oluliselt halvem kui Undva sadamakohas. Põhjuseks on tuulte ebahütlane jaotus ilmakaarte järgi ning lainetuse hüdrodünaamika iseärasused: Suuriku-Kuriku sadamakoht on avatud kirde suunas, kuid tugevaid (>15 m/s) kirdetuuli esineb väga harva. Arvutuslik lainekõrgus ületab 3 m sadamakohtade lähedal järgmise sagedusega: Suuriku-Kuriku – 0,6 % päevadest, Vaigu – 0,13%, Undva – 1 %.
- Lainekliima iseärasuste tõttu on enim avatud sadamakohas – Suuriku ja Kuriku pankade vahel – hoopis parim lainetuse režiim, kuid enim kaitstud sadamakohas (Vaigu) toimub liivase merepõhja tõttu suurim sadama täisuhutumine [Liiv, Liiv, 2001]. Töötati välja süvasadama põhiplaanid kolme võimaliku sadamakohta jaoks. Rannalähedaste protsesside matemaatilise mudeliga MIKE 21 määrati lainetuse ja kiiruste väljad sadamakohtade ümbruses, lainemurdjate läheduses ja sadamate erineva sügavusega basseinides. Lainetusest tekkivaid põhjalähedasi nihkepingeid ning nendest tingitud uhtumist ja settimist uuriti mudeli SandCalc 2.0 abil. Selgus, et Suuriku-Kuriku sadamakohas võimaldab sadama konstruktsioon akvatooriumi prevaleerivate tuulte eest hästi kaitsta. Uhtainete liikumine selle sadama akvatooriumisse ei ole merepõhja iseloomu tõttu tõenäoline.

## LÕPETUSEKS

Hüdrodünaamiliste mudelite rakendamine nii globaalses plaanis kui ka lokaalselt sadamalähedase ala dünaamika kirjeldamiseks on muidugi väljakutsuv ja intriigeriv temaatika, millele on ka piisavalt lai huvitatute ring sadama arendajate, keskkonnaspetsialistide ja ka tavalise kodaniku näol. Kes siis ei tahaks, et hoovused või lained värvilise liikuva pildina tema teadmisi täiendavad. Paraku on loodus keerulisem mis tahes matemaatilisest mudelist. Seetõttu on otsene side reaalse merega *in situ* ehk kohapeal tehtavate mõõtmiste näol äärmiselt oluline. Mereteaduse edasise arengu seisukohalt on igati positiivne, et majanduslikult edukates sadamates arendatakse jõudsalt reaalajas töötavaid hüdro meteoroloogilisi mõõtekomplekse. Nende andmestiku integreerimine kaasaegsesse hüdrodünaamilistesse mudelitesse, millega praegu intensiivselt tegeldakse, lahendaks mitmed navigatsiooni, sadamate opereerimise ja rannikuvööndi seisundi prognoosi aktuaalsed mured.

Ometi ei tohiks kaasaegne mereteadus piirduda pelgalt mudelite kontrolliks vajaliku informatsiooni ja andmestiku kogumisega. Mereuuringute peamised komponendid – klassikalised mõõtmised, protsessorienteeritud mõõtmiskampaniid, mudelite arendamine, teoreetiline analüüs ja andmestiku ohjamine – peaksid olema omavahel tasakaalustatud. Samas on oluline jälgida ja aru saada pikaajalistest muutustest meresüsteemides, eelkõige mõista, milline on looduslik ja milline inimtegevusest tingitud põhjus. Viimane ongi tänapäeval mereuuri ja ette kõige sagedamini tõstatav küsimus ja vastust sellele tuleb igas kohas otsida ikka ja uuesti. Sealjuures mosaiik tuleb kokku panna väga erinevatest kildudest. On meeldiv tõdeda, et Eestis on igasugustest tõmbetuultest hoolimata väärtustatud asjalikku analüüsi ja korralikku teaduslikku taset.

## KIRJANDUS

Elken, J., 2001. Modelling of coastal circulation and oil drift at possible deep harbour sites, north-western Saaremaa Island. Proc. Estonian Acad. Sci. Engng., 7, 2, 141-156.

Elken, J., Kask, J., Kõuts, T., Liiv, U., Perens, R., Soomere, T. 2001. Hydrodynamical and geological investigations of possible deep harbour sites in north-western Saaremaa Island: Overview and conclusions. Ibid., 85-98.

Kask, J., Perens, H., Perens, R., Suuroja, S., Kask, A. 2001. Comparison of geological settings at possible deep harbour sites, north-western Saaremaa Island. Ibid., 99-125.

Kõuts, T., Laanearu, J. 2001. Variability of currents in bays of Tagalaht and Uudepanga. Ibid., 126-140.

Liiv, T., Liiv, U. 2001. Saaremaa deep harbour layout design and computer simulation of the wave climate and sediment transport. Ibid., 174-192.

Soomere, T. 2001. Wave regimes and anomalies off north-western Saaremaa Island. Ibid., 157-173.

*Teaduspreemia arstiteaduse alal uuringute*

**“INIMESE NORMAALNE MIKROFLOORA JA  
OLULISEMAD BAKTERIAALSED  
INFEKTSIOONID EESTIS” eest.**



*Marika  
Mikelsaar*

Sündinud 12. novembril 1938 Tallinnas

1957 Tallinna 20. Keskkool, kuldmedal  
1963 Tartu Ülikool, arstiteaduskond, ravi eriala  
1969 meditsiinikandidaat, Tartu Ülikool  
1993 meditsiinidoktor, Tartu Ülikool

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

Avaldanud ligi 80 teadusartiklit (CC), kaasautorluses 2 rahvusvahelise monograafia peatükki, 2 meditsiinilise mikrobioloogia eestikeelset õpikut, toimetanud käsiraamatu kliinilisest mikrobioloogiast.

1994. aasta Eesti riigi teaduspreemia meditsiinis vastsündinute mikrofloora kujunemisest (kollektiivi juht).

Juhendanud 5 doktoritööd.

Maailmas hakati 1960ndatel aastatel rääkima nakkushaiguste edukast väljajuurimisest. Infektsioonide vältimine näis võimalikuna tänu uute vaktsiinide ja efektiivsete antibiootikumide kasutuselevõtule, samuti inimeste teadmiste ja oskuste suurenemisele, et kõrgete hügieeninõuetega luua enda ümber mikroobivaba keskkond. USA teadlane Abigail Salyers kirjeldab, kuidas kaasüliõpilaste meelest oli ta pärast ülikooli lõpetamist valinud oma erialaks nn kaduva teaduse, mille tõttu talle kahetsevalt kaastunnet avaldati. Tänapäevaks on ta üks viljakamaid mikrobiolooge, mitmete avastuste ja õpikute autor.

Unustati, et mikroobimaailm on nii avar, mikroobipopulatsioonid nii arvukad, geneetiliselt muundunud mikroorganismide tekke tõenäosus nii suur, et inimeskonnal on võimalik nautida turvalisust vaid lühikestel perioodidel. Hoolimata meditsiini edusammudest pole viimase 20 aastaga vähenenud inimeste suremus infektsioonhaigustesse. Maailma ulatuses on sagedasemateks surma põhjustajateks hingamisteede viiruslikud infektsioonid, seedenakkused, tuberkuloos, malaaria ja AIDS. Kolme viimatinimetatud haiguse suur sagedus põhineb eeskätt arengumaade väga laiadel rahvahulkadel. Seevastu uute omadustega ja antibiootikum-resistentsete mikroorganismide, sealhulgas tuberkuloosi- ning mitmesuguseid olme ja haigla infektsioone põhjustavate bakterite levik ähvardab just arenenud tervishoiusüsteemiga riikide elanikkonda.

Seoses ühiskonna arenguga täheldatakse viimastel aastatel krooniliste haiguste osakaalu tõusu. Mitmete laialtlevinud krooniliste haiguste (südame-veresoonkonna-, ainevahetuse-, neurodegeneratiivsed haigused ja allergia) tekkemehhanismid (patogenees) on tänini selgitamata, mistõttu pole võimalik nende suhtes rakendada ei efektiivseid profülaktika- ega uudseid ravimeetodeid. Viimasel ajal on selliste kroonilise kuluga haiguste käsitlemisel tegemist teadusliku mõtteviisi muutusega. Kui varem peeti nende haiguste patogeneesi kindlalt mitteinfektsioosseks, siis tänapäeval vaadeldakse mikroobe mõne kroonilise haiguse teket soodustava või pärssiva tegurina. Inimesega koosluses olevad bakterid, mis moodustavad tema normaalse mikrofloora, on selliste bioaktiivsete faktorite võimalikud allikad, mille olemasolu või puudumine võiks esile kutsuda vastavaid haigusi.

Inimese ja mitmete bakterite genoomi primaarstruktuuri selgitamine 2000ndatel aastatel võimaldab kindlaks teha, missuguste geenide ja nende produktidega määratakse inimese ja mikroobi suhe – vastuvõtlikkus infektsioonidele. Uuringud erinevatel rahvastel, kes elavad erinevates sotsiaalsetes ja majanduslikes keskkondades, on üheks algseks võimaluseks uudsete diagnostiliste ja antibiootikumravi meetodite väljatöötamiseks.

Eesti on oma industrialiseerimise ja meditsiinitaseme poolest ilmselt keskmiselt arenenud maade hulgas, mistõttu sobiv otsimaks teaduslikke lahendusi eelpoolnimetatud probleemidele. Eestis levivate infektsioonide osas on probleemiks kõrge mao- ja kaksteistsõrmiksoole haigusi tekitavate helikobakterite esinemissagedus. See seostub peptilise haavandi ja maovähi kõrge sagedusega. Viimasel kümnel aastal on Eestis sagenenud ka inimeste nakatumine multi-resistentsete tuberkuloositekitajatega. Puuduvad usaldusväärsed andmed oportunistlike patogeeni ravimiresistentsuse kohta, mis komplitseerib mitmete kliiniliste infektsioonide (kuseteedehaigused, haavainfektsioonid jt) ravi.

Samas on eestlaste tervise näitajates ka midagi positiivset: meil esineb märkimisväärselt vähem allergiat kui kõrgelt arenenud majandusega riikides. Pole

teada, mis on selle põhjuseks ja kuidas sellist tulemust säilitada Euroopa riikide ühenduses.

Kokkuvõtteks – kõigist eelpooltoodud senini teoreetiliselt ja praktilistelt lahendamata probleemidest sõltub paljude inimeste tervis ja heaolu.

Minu töödetsükliks, mis pälvis meditsiini teaduspreemia, on hõlmatud biomeditsiini valdkonda kuuluvad uurimused (1998–2001), mis on läbi viidud tihedas koostöös kliinilise meditsiini esindajatega. Meditsiinis on tänapäeval uusi teaduslikult põhjendatud tulemusi võimalik saavutada eeskätt avarates funktsionaalsetes kollektiivides. Biomeditsiin on paljude erinevate katsetuste ja neist arenevate üldistuste ja teooriate teadus, kus teadmiste mosaiik pidevalt täieneb paljude inimeste käelise ja mõttetööga. Preemiaga autasustatud nelja viimase aasta teadusartiklitel on risti-rästi kaasautoriteks 7 professorit, neist kaks Rootsist ja üks Soomest, üldse kokku 41 kolleegi. Viimase nelja aasta jooksul kaitses minu juhendamisel 3 meedikut oma doktoritööd, valmis rida magistritöid ja esitasime patenditaotluse. Hiljuti küsis minult üks USA ajakirjanik: “Kui teil on nii palju kaasautoreid, kas te töötate oma või teiste ideede järgi? Kuidas te teete kindlaks, kellele kuulub idee, kes saab Nobeli preemia?” Kardan, et sellele ei saa üheselt vastata. Sageli tõstatab küsimuse kliinitsist, kogub haiged ja nende uurimismaterjalid, diagnoosib ja ravib olemasolevate teadmiste alusel. Meie, mikrobioloogid, alustame uurimistööd ühe hüpoteesi alusel, välja tuleb aga 10 uut, mis omakorda vajavad tõestamist uutel haigusemudelitel ning üldistamist hoopis uute vaatenurkade alt. Tulemi, s.o teadusartikli, esimeseks autoriks saab doktorant, kes õpib oma eksperimentaaltulemuste analüüsimist, mõistmist ja teadusartikli kirjutamist läbi vähemalt 20 mustandvariandi. Juhendaja, enamasti ideede genereerija, aga ka tulemuste eest vastutaja on viimasel, küll lohutavalt kõige auväärsemaks nimetatud kohal. Nagu kogu maailma teaduspraktikas, nii enamasti ka meil. Ja siiski on magistrantide ja doktorantide koolitamine privileeg – olla vaimses kontaktis erksa mõtlemisega noorte inimestega. Kokkukirjutatud projektide, püstitatud hüpoteeside ja koostatud uurimisprogrammide toel on tänaseks Tartu Ülikooli Biomeedikumis tekkinud tõeline tippkeskus, tulvil töökaid kolleege. Avaldan kõigile siinkohal südamlikku tänu koostöö eest, mis päädis minu jaoks teaduspreemiaga.

Premeeritud töödetsükli olid järgmised PÕHIEESMÄRGID selgitamaks:

- inimese normaalse mikrofloora mõju tema immuunsüsteemi seisundile, sh allergia kujunemisele;
- inimese laktobatsillide omadusi, mis võimaldaks neid kasutada probiootikumidena mitmesuguste infektsioonide profülaktikas ja ravis;
- Eestis levivate helicobakterite (*Helicobacter pylori*) fenotüüpiliste omaduste mõju tekitatud infektsioonide patogeneesile;
- Eestis sagedasemate haigusttekitavate bakterite antibiootikum-resistentust ja selle mõju antibiootikumravi tulemuslikkusele.

Tartu Ülikooli Arstiteaduskonna Mikrobioloogia instituudis koostasime mõnede haigusttekitavate mikroobide (*Helicobacter pylori*, *Clostridium difficile*, *Mycobacterium tuberculosis*, enterobakterid, stafülokokid) kollektiivseid nende fenotüüpiliste virulentsusmarkerite dünaamiliseks jälgimiseks ja



ülemaailmseks võrdluseks. Selle kollektiooni kõrvale loodi alates 1995. aastast ka normaalse mikrofloora esindajate – laktobatsillide kultuurikollektsioon.

Meie teadustulemustest loen üheks olulisemaks uurimust mikrofloora ja allergia seostest. Maailmas oli tekkinud raskestilahendatav mõistatus – koos kõrgemalt arenenud ühiskonnaga sagesid allergiahaigused. Ebatavaline situatsioon, tavaliselt on ju haiguste esinemissagedus pöördvõrdeline ühiskonna arenguga. Kui allergiat praktiliselt ei täheldata Pakistanis, harva on teda Moskvas ja Poolas, siis seevastu Rootsis, Soomes, USA-s, Inglismaal ja Saksamaal on ta muutunud väga tõsiseks probleemiks nii lapse- kui täiskasvanueas. Küll on proovitud seda nähtust seletada saastatud õhuga, ebakvaliteetse toiduga, küll umbsete ruumide ja toalestadega. Ei mingeid seaduspärasusi. Austraalia teadlane Patrick Holt püstitas hüpoteesi liigse hügieeni kahjulikkusest, arvates, et arenenud maade lastel on liigse hügieeni tõttu kokkupuude vähemarvukate ja liigivaesemate mikroobikooslustega. See maksvat kätte hiljem, kus organism ei tunne enam ära allergeene ja mitte-allergeene. Rootsi teadlased, kes asusid lahendama “hügieeni hüpoteesi”, leidsid arengumaade lastel rohkem erinevaid coli-bakterite serotüüpe, s.o. tõesti rikkalikuma mikroobikoosluse.

TÜ Mikrobioloogia instituudil on pikaajalised kogemused inimese mikrofloora ja laktobatsillide uurimises, mis said alguse 1960ndatel aastatel professor Akivo Lenzneri juhtimisel. Pärast head koostööd 1990ndate aastate alguses Soome teadlastega eesotsas professor Seppo Salmineniga Tampere/Turu ülikoolist ja VALIO tööstusega oleme käesoleval ajal vastavat uurimissuunda edasi arendanud ja uudsena seostanud seda allergia ja infektsioonide vastase kaitse probleemidega (vt kirjandusviidete 1. osa). Allergia olemuse selgitamiseks uurisime erinevate mikroobigruppide olemasolu ja hulki võrdlevalt Eesti ja Rootsi laste seedekulglas alates esimestest eluaastatest. Koos Rootsi teadlase Bengt Björksteni, vanemteadur Epp Sepa ja Tartu pediatritega õnnestus näidata, et Eesti lastel on esimestest elunädalatest alates soole mikroflooras rohkem kasulikke baktereid, nimelt piimhappelist käärimist põhjustavaid mikroobe kui nende Rootsi eakaaslastel. Edasi kontsentreerisime tähelepanu laktobatsillidele kui esimestele tähtsamatele bakteritele, millega laps puutub kokku ema sünnitusteid läbides. Tekkis uus hüpotees laktobatsillide kasulikust toimest imiku immuunsüsteemile. Neid meie leide tsiteerivad nüüd sajad mikrobioloogia-alased tööd mujalt maailmast. Kindlakstehtud seaduspärasus piimhappelist käärimist põhjustavate bakterite olulisest rollist toob meid teadusspiraali keerul tagasi ammusele Ilja Metšnikovi ideele laktobatsillide kasulikkusest inimese tervisele ja pikale elueale

Ometi ei tea me veel, kuidas need erinevused toimivad ja kust nad alguse saavad. Rootsi teadlaste arvates on võimalik, et coli-bakterite rakuseina lipopolüsahhariid avaldab indutseerivat toimet immuunsüsteemile, seevastu Soome teadlased omistavad olulise rolli gram-positiivsete bakterite rakuseina peptidoglykaanile. Mina pean oluliseks vastsündinu ja imiku seedekulglas laktobatsillide heterofermentatiivsel käärimisel vabanevaid biogeenseid amiine, mille suhtes lapse immuunsüsteem omandab väga varase kokkupuute tõttu tolerantsuse (mittereageerimine). Postuleerin, et biogeensete amiinide suhtes tekkinud tolerantsuse tõttu ei teki inimesel oma edaspidises elus ülitundlikkusreaktsioone (allergiat) ka mitmetele teistele võõrainetele (allergeenidele). Jäevad ära allergilised kooreaktsioonid, mis tavaliselt tekivad nuumrakkudest vabanevate biogeensete amiinide (histamiin jt) toimel (ettekanne SOMED

konverentsil Leidenis 2001. a). Eelpooltoodud teadlased eeldavad surnud mikroobirakkudest vabanevate ainete toimet, minu meelest peitub laktobatsillide potentsiaal just nende erilises ja võimekas ainevahetuses.

Hügieeniga liialdavas ühiskonnas võivad mikrofloora erinevused saada alguse kas ema sünnitusteede üledesinfitseerimisest või naha hoolduse üliküllusest, millega sünnituse ajal või rinnaga toitmise perioodil hävitatakse naha normaalsed bakterid, sealhulgas piimhappelised käärimehed põhjustavad. Või on erinevuse põhjuseks tõesti nn kiirtoit, mis ei paku tavalist substraati kasulike bakterite paljunemiseks. Nagu eelpool juba näidatud, kutsub ühe hüpoteesi lahendamise esile 10 uut, mis ootavad kinnitamist või ümberlükkamist. Mõlemad võimalikud resultaatid muudavadki teaduse tegemise põnevaks!

Eelpooltoodud allergia tekkemehhanisme selgitavate uurimuste käigus kogusime laktobatsillide kultuurikollektsiooni üle 700 laktobatsillide tüve. Eesmärgiks on säilitada Eestile ja eestlastele omaseid baktereid ka järglastele ja leida kandidaate kodumaiste probiootikumide väljatöötamiseks. USA-s räägitakse alles nüüd, ilmselt seoses 11. septembri 2001 hirmutavate sündmustega, vajadusest luua bioloogilisi keskusi, kuhu koguda ja kus säilitada järeltulevatele põlvvedele elusrakke, sealhulgas ka mikroobe ja nende genome.

Probiootikumid on elusaid kasulikke mikroobe sisaldavad toitained või farmatseutilised preparaadid (toidulisandid), mis positiivses suunas mõjutavad meie tervist. Eelpooltoodud Eesti ja Rootsi laste mikrofloora uurimise käigus isoleerisime tervelt Eesti imikult *Lactobacillus fermentum* (822-1-1) ME-3 tüve, mille tema eriliste biomarkerite tõttu deponeerisime Saksamaa kultuurikollektsiooni (DSMZ). *L. fermentum* ME-3 surub alla soole ja kuseteedehaigusi põhjustavaid kahjulikke mikroobe, suurendab inimese enda mikrofloora kaitsevõimet ning parandab mao ja soolestiku tegevust. Sarnaste biomarkeritega on maailmas patenteeritud sadu erinevatesse laktobatsillide liikidesse kuuluvaid tüvesid (*Lactobacillus acidophilus* – atsidofiilpiim, *L. rhamnosus* – Gefilus preparaadid, *L. fermentum* – Venemaa laktobakteriin jt.).

Eesti *L. fermentum* ME-3 on kõigist neist erinev, sest peale eelpoolnimetatud traditsioonilise toime leidsid TÜ Biokeemia Instituudi professor Mihkel Zilmeri juhitud teadlased, et ME-3 väldib organismis rakkude ja vereseerumi liigset oksüdatsiooni. Hapniku ainevahetuses toimub mürgiste radikaalide vabanemine, mis kahjustab veresoonte endoteeli, olles arterioskleroosi tekke üheks oluliseks patogeneetiliseks faktoriks. Teaduslikus keeles on laktobatsillil ME-3 võime vähendada vereseerumi oxLDL (oksüdeeritud madala tihedusega lipoproteiinide) hulka ja pikendada lipoproteiinide fraktsiooni ajalist vastupanuvõimet oksüdatsioonile. ME-3 on praegu patenteerimise pikaajalises tsükliis (TÜ patendinõudlus NO 0356/01PV, autorid M. Mikelsaar, M. Zilmer, T. Kullisaar, H. Annuk, E. Songisepp). Eesti Tehnoloogia Agentuuri innovatsioonifondi ja Euroopa 5. raamprogrammi toel uurime süvendatult ME-3 kasutamise võimalust toidulisandina, selgitades tema omadusi ja käitumist erinevate krooniliste haiguste profülaktikas ja ravis.

Maailmas toimub suur võidujooks tervist parandava toimega mikroorganismidele. Viimastel aastatel on erinevatel laktobatsillide liikidel ja tüvedel avastatud väga erilisi biomarkereid, mis kutsuvad esile immunogeenseid efekte, aga ka vererõhu langust ja südame isheemiatõve leevendumist. Isegi Alzheimeri haiguse ja parkinsonismi vastu postuleeritakse laktobatsillide

kasulikku mõju kas mõne organismis koguneva kahjuliku metaboliidi (nt homotsüsteiini) hulga vähendamise või kasuliku toimega aine tekitamise (interleukiinid, lämmastikoksiidi süntetaas) kaudu. Ilmselt algab palju kroonilisi haigusi meid saatvatest nähtamatutest pisilastest, mida me endaga kaasas kanname 10 korda suuremas hulgas kui meil on endal keharakke. Õppides neid taltsutama ja kasutama heaks eesmärgiks, võime parandada inimeste tervist. Sellest ka moraal – säilitagem looduslikku meie ümber, austagem rahvuse ja ka isiku bioloogilist omapära.

Bioloogilise omapära – inimese ja tema mikroobide seose selgitamisega alustasin nooremteadurina, mil õnnestus kindlaks teha ühemunaraku kaksikute seedekulgla mikrofloora hämmastav sarnasus. Hiljuti kordasid Hollandi teadlased uute molekulaarsete meetoditega meie tulemust. On tekkinud aimdus, et inimese geneetika määrab isegi meie organismist väljaspool asuvate kaaslaste spektri. Piltlikult väljendades võiks meie geneetiline kood määrata ka selle, millised mikroobid punuvad meie peale oma pesa.

Sellest ideest lähtudes püstitasin hüpoteesi, et erinevatel rahvustel esinevad just neile spetsiifilised haigustekitajate tüved. Heaks uurimise mudeliks kujunesid kroonilise gastriidi ja mao haavandtõvega haiged (vt kirjandusviidete 2. osa). Neid haigusi põhjustavad helicobakterid avastas 1984. aastal Austraalia teadlane Barry Marshall, Eestis on helicobakterite uurimise pioneerideks professorid Heidi-Ingrid Maaros ja Ants Peetsalu, Rootsis Lundi ülikooli professor ja Tartu Ülikooli audoktor Torkel Wadström. Koostöö helicobakterite uurimisel algas 1990ndate aastate algusest. Ühe märkimisväärsema leiuna näitasime, et helicobakterid valivad, kas nakatada venelast või eestlast. Postuleerin, et erinevate mikroobide/haigustekitajate leid erinevast rahvusest inimestel sõltub nn sobiva pesa olemasolust vastaval inimesel, teaduslikus keeles geneetiliselt määratud retseptoritest, kuhu kas kinnituvad või ei kinnitu sobivate adhesiinidega bakterid. Haiguse diagnostika, ravi ja vaktsiinide loomine peavad edaspidi ilmselt seda hakkama arvestama. Nii kummaline kui see ka pole, proovitakse praegu helicobakterite geograafiliste erinevuste kaudu kindlaks teha, kust me pärineme – kas ühest Aafrika Evast või paljudest erinevatest Evadest siit nurgast ja sealt nurgast üle maailma. Kuulun uurimisgruppi, kes selle probleemiga tegeleb Euroopas.

Just haavandtõbe esilekutsuva *Helicobacter pylori* puhul õnnestus noortel kolleegidel (Toomas Sillakivi, Helena Andreson (Aro), Krista Lõivukene) koos eelpool mainitud klinitsistidega näidata, et sama liigi mikroobide mõned geneetilised erinevused määravad nende poolt esilekutsutud haigusprotsesside olemuse. Näitasime, et erinevate haiguste korral pole *H. pylori* tüvedel ühesugused geenid, osadel on kromosoomis rakkude tsütotoksilist kahjustust esilekutsuvaid geene, teistel *H. pylori* tüvedel neid pole. See seletab ka vastuolu, miks helicobaktereid leitakse näiteks Eestis 80% inimestest, aga haavandtõbi tekib neist vaid 10%-l. Kahjuks on Eesti arstkonna vähese usu tõttu helicobakterite patogeneetilisse toimesse meil ikka veel tänaseni kuni kaks korda kõrgem mulgustunud maohaavanditega ja maovähiga haigete esinemissagedus. Mingil määral on arusaadav, miks pole antibiootikumravi eriti laialdaselt tahetud rakendada, sest senini puudusid kriteeriumid, keda helicobakteritega koloniseeritustest ravida, keda mitte. Eelmisel aastal litsenseerisime oma molekulaarse diagnoosimismeetodi *spin-off* firmale, loodame et saabub läbimurre

gastritiidi ja haavandtõve molekulaardiagnostikale põhinevas ravis (*evidence based medicine*) ka kodumaal.

TÜ mikrobioloogia instituudis on suurt tähelepanu pühendatud antibiootikumresistentsuse tekke ja leviku probleemidele (vt kirjandusviidete 3. osa). Juba 80ndatel aastatel selgus, et antibiootikumide õitseage hakkab mööduma. Kui paljud haigustekitavad bakterid muutusid antibiootikumresistentseks, siis alustasid üle maailma tsirkulatsiooni ohtlikud tekitajad. Sellise tuberkuloosibakteri leviku Eestis avastas TÜ Mikrobioloogia ja Rootsi Karolinska Instituudi doktorant Annika Krüüner ja päästis sellega Eesti arstide au. Maailmas oli üsna laialt levinud seisukoht, et ebaadekvaatne ja puudulik tuberkuloosi ravi Eestis genereerib multiresistentsete tuberkuloositekitajate esilekerkimist. Molekulaarse tüpiseerimisega õnnestus selgitada, et põhjuseks on hoopis Pekingist üle Venemaa leviv *Mycobacterium tuberculosis* Beijing tüvi. See mikroobitüvi oli juba põhjustanud ohtliku tuberkuloosipuhangu New Yorgis, ilmselt sinna emigreerunud kontingendi tõttu, hiljuti märgati seda ka Londonis. Teadmine on aga ravi ja profülaktika alus, nüüd hakkas Eesti tuberkuloosikaitse programmi üks alakomisjone selle probleemiga süvendatult tegelema.

Multiresistentsete tuberkuloositekitajate otsingute käigus jõudsimine uue probleemini, mille lahendamine võib esile kutsuda suure muutuse antibiootikumravi teoorias ja praktikas. Üldlevinud printsiibi alusel on antibiootikumpress see, mis genereerib mikroobide ravimiresistentsuse tekke. Ühe antibiootikumi ekstensiivse tarvitamine (antibiootikumi eelistatud väljakirjutamine arstide poolt) sunnib konkreetse haige mikroobipopulatsiooni otsima ellujäämiseks uusi võimalusi – muutuma ravimiresistentseks DNA mutatsioonide või rekombinatsioonide abil. Samas aga loetakse ravi käigus vähenenud antibiootikumpressi (valed doosid, ravi katkestus) just resistentsuse tekke aluseks. Eesti arstkonda süüdistati puudulikult organiseeritud tuberkuloosihaigete raviprogrammides ja -eeskirjades.

Koostöös Kopsukliinikuga leidsime, et ebaadekvaatse ravi tingimustes (enamasti asotsiaalsed haiged) on tuberkuloositekitajate käitumine kahesugune. Ühel variandil on tegemist pideva tundlike bakterite eritusega, mis 75% juhtudest lõpeb patsiendi surmaga väljaravimatu tuberkuloosi tõttu. Teisel juhul hakkab ebakorrapäraselt ravi saanud haige eritama multiresistentseid tekitajaid ja võib samuti surra. Milles on erinevus? Uute molekulaarsete meetodite rakendamise näitas A. Krüüner, et mitte olemasolev mikroobitüvi pole muutunud vähese antibiootikumpressi tingimustes multiresistentseks (miks ta pidigi?), vaid on toimunud tüve vaheldus (superinfektsioon). Meie poolt uuritud juhtudel nakatusid ravil olnud patsiendid haiglas uue, juba multiresistentse Beijing tüvega. See publikatsioon on nüüd trükkimiseks vastu võetud USA juhtiva kliinilise suunaga ajakirja poolt. Meie tähelepanek võib kaasa tuua olemasolevate antibiootikumresistentsuse teooriate korrektsiooni. Meedikutele on see leid aluseks, et suunata tuberkuloosihaigete vajaliku kontrollitud ravi kõrval oma jõupingutusi ka epidemioloogilistele uuringutele ja rangetele meetmetele haiglainfektsioonide vältimiseks. Eeskätt on vajalikud suuri rahalisi vahendeid nõudvaid ümberehitused haiglates, Kose haigla krooniliste tuberkuloosihaigete osakonnas on see tänaseks juba realiseerunud.

Antibiootikumresistentsed bakterid ei tunnista ei haiglate, linnade ega riikide piire. Rahvusvaheline terviseorganisatsioon (WHO) on organiseerinud võrgus-

tiku, et teada saada, millised ohtlikud antibiootikumresistentsed kliiniliste infektsioonide (kuse- ja suguteede-, haava-, kopsu-, vereinfektsioonide) tekitajad kuskil riigis tsirkuleerivad. Viimatinimetatus osaleb ka rida meie instituudi kaastöötajaid ja doktorante (dotsent Tõnis Karki, teadurid Paul Naaber ja Siiri Kõljalg). Tänaolev oleme kaardistanud Eestis levivate olme- ja haiglainfektsioonide tekitajate antibiootikumresistentsuse, aga ka normaalse mikrofloora laktobatsillide tundlikkuse antibiootikumidele, et neid ravi foonil paremini säästa (dotsent Reet Mändar). Eesti arstkonda oleme informeerinud kliinilise mikrobioloogia originaalkäsiraamatu (1998, Tallinn, Medicina), konverentside ja täienduskursuste kaudu. Plaanime Eesti haiglainfektsioonide ja antibiootikumresistentsuse kontrolli referentslaboratooriumi loomist Bio-meedikumis. Loodan, et molekulaarsete meetodite rakendamine paljude kliiniliste infektsioonide epidemioloogia probleemide lahendamiseks avab uusi perspektiive meditsiinilisele mikrobioloogiale ja infektsioonhaiguste efektiivsemale profülaktikale ja ravile käesoleval millenniumil.

## KIRJANDUS

(premeeritud töödetsükkel 1998–2002)

### 1. Inimorganismi mikrofloora, laktobatsillide ja allergia probleemid

Annuk, H., Hynes, S.O., Hirno, S., Mikelsaar, M., Wadström, T. 2001. Characterisation and differentiation of lactobacilli by lectin typing. *J. Med. Microbiol.*, 50, 1-6.

Annuk, H., Vainumäe, I., Aimla, K., Ausmees, K., Mikelsaar, M. 1999. Antagonistic activity of lactobacilli against urinary *Escherichia coli*. *Microecol. Therapy*, 28, 169-175.

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

Björkstén, B., Sepp, E., Julge, K., Voor, T., Mikelsaar, M. 2001. Allergy development and the intestinal microflora during the first year of life. *J. Allergy Clin. Immunol.*, 108, 4, 516-520.

Kaila, M., Isolauri, E., Sepp, E., Mikelsaar, M., Salminen, S. 1998. Fecal recovery of a human *Lactobacillus* strain (ATCC 53103) during dietary therapy of rotavirus diarrhea in infants. *Bioscience Microflora*, 17, 2, 149-151.

Kullisaar, T., Zilmer, M., Mikelsaar, M., Vihalemm, T., Annuk, H., Kairane, C., Kilk, A. 2002. Two antioxidative lactobacilli strains as promising probiotics. *Int. J. Food Microbiol.*, 72, 215-224.

Mikelsaar, M., Annuk, H., Shchepetova, J., Mändar, R., Sepp, E., Björkstén, B. 2002. Intestinal lactobacilli of Estonian and Swedish children. *Micr. Ecol. Health Dis.* (in press).

Mikelsaar, M., Mändar, R., Sepp, E. 1998. Lactic acid microflora in the human microbial ecosystem and its development. Salminen S., Wright A. von (eds). *Lactic acid bacteria*. New York: Marcel Dekker Co, 279-342.

Mikelsaar, M., Songisepp, E., Annuk, H., Sepp, E., Lõivukene, K., Mändar, R., Stsepetova, J., Kullisaar, T., Vihalemm, T., Zilmer, K., Kilk, A., Zilmer, M. 2001. Eesti uudne laktobatsillaarne probiootikum. Eesti Arst, 9, 410.

Mändar, R., Lõivukene, K., Hütt, P., Karki, T., Mikelsaar, M. 2001. Antibacterial susceptibility of intestinal lactobacilli of healthy children. Scand. J. Infect. Dis., 33, 344-349.

Sepp, E. 1998. Doktoridissertatsioon med. dr. kraadile "Formation of intestinal microbial ecosystem in children". Tartu Ülikool. Juhendaja M. Mikelsaar.

Sepp, E., Naaber, P., Voor, T., Mikelsaar, M., Björkstén, B. 2000. Development of intestinal microflora during the first month of life in Estonian and Swedish infants. Micr. Ecol. Health Dis., 12, 22-26.

Smidt, I. 1999. Biomeditsiini magistri väitekiri "Soole indigeensete laktobatsillide ja oportunistlike patogeenide *Clostridium difficile* ja *Escherichia coli* interaktsioon *in vitro* ja *in vivo*". Tartu Ülikool. Juhendajad M. Mikelsaar, P. Naaber.

## 2. *Helicobacter pylori* patogeneesi probleemid

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

Annuk, H., Hirno, S., Türi, E., Mikelsaar, M., Arak, E., Wadström, T. 1999. Effect on cell surface hydrophobicity and susceptibility of *Helicobacter pylori* to medicinal plant extracts. FEMS Microbiology Letters, 172, 41-45.

Hynes, S.O., Broutet, N., Eurohepygast Study Group, Wadström, T., Mikelsaar, M., O'Toole, P.W., Telford, J., Engstrand, L., Kamiya, S., Mentis, A.F., Moran, A. P. 2002. Phenotypic variation of *Helicobacter pylori* isolates from geographically distinct regions detected by lectin typing. J. Clin. Microbiol., 40, 227-232.

Lõivukene, K. 2000. Biomeditsiini magistri väitekiri "*Helicobacter pylori* tüvede antibiootikumtundlikkus ja selle seos *vacA* ja *cagA* genotüübiga gastriidi ja peptilise haavandi korral". Tartu Ülikool. Juhendaja M. Mikelsaar.

Lõivukene K., Aro, H., Hütt, P., Kolk, H., Maaros, H.-I., Mikelsaar, M. 2001. Erinevate *Helicobacter pylori* diagnoosimisvõimaluste efektiivsuse võrdlus. Eesti Arst, 9, 408.

Lõivukene, K., Kolk, H., Maaros, H.-I., Kasenõmm, P., Aro, H., Ustav, M., Mikelsaar, M. 2000. Metronidazole and clarithromycin susceptibility and the subtypes of *vacA* of *Helicobacter pylori* isolates in Estonia. Scand. J. Infect. Dis., 32, 59-62

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

### 3. Antibiootikumresistentsuse probleemid

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

Krüüner, A. 2001. Doktoridissertatsioon med. dr. kraadile “*Mycobacterium tuberculosis* – spread and drug resistance in Estonia”. Tartu Ülikool. Juhendajad M. Mikelsaar, S. Hoffner

Krüüner, A., Pehme, L., Ghebremichael, S., Koivula, T., Hoffner, S.E., Mikelsaar, M. 2002. Use of molecular techniques to distinguish between treatment failure and exogenous re-infection. *Clin. Infect. Dis.* (in press).

Kõljalg, S. 1999. Doktoridissertatsioon med. dr. kraadile “*Acinetobacter* – an important nosocomial pathogen”. Tartu Ülikool. Juhendaja M. Mikelsaar.

Kõljalg, S., Sults, I., Raukas, E., Truu, J., Ustav, M., Mikelsaar, M. 1999. Distribution of *Acinetobacter baumannii* in a neurointensive care unit. *Scand. J. Infect. Dis.*, 31, 145-150.

Kõljalg, S., Sults, I., Raukas, E., Truu, J., Ustav, M., Mikelsaar, M. 1999. Distribution of *Acinetobacter baumannii* in a neurointensive care unit. *Scand. J. Infect. Dis.*, 31, 145-150.

*Teaduspreemia geo- ja bioteaduste alal tööde tsükli*  
**"BAASUURINGUD EVOLUTSIOONILISE  
LOOMAÖKOLOOGIA VALLAS — BIOLOOGILISE  
MITMEKESISUSE HUVIDES" eest**





## Raivo Mänd (vasakult esimene)

Sündinud 2. detsembril 1954 Saaremaal

1973 Kingissepa (Kuressaare) Keskkool

1979 Tartu Ülikool, bioloogia (*cum laude*)

1986 bioloogiakandidaat (ökoloogia), Tartu Ülikool

1977–1998 Eesti TA Zooloogia ja Botaanika Instituut: vanemlaborant, nooremteadur, teadur, laborijuhataja, juhtivteadur, osakonnajuhataja. Alates 1992. aastast Tartu Ülikooli loomaökoloogia professor.

1991–1994 Eesti Ornitoloogiaühingu esimees ja Eesti Looduseuurijate Seltsi asepresident. Eesti Malakoloogiaühingu asutaja. Põhja-Euraasia Ornitoloogiakomitee liige. Ornitoloogiaajakirja “Hirundo” asutaja ja toimetuskolleegiumi esimees aastail 1987–1998. Ajakirja “Eesti Teaduste Akadeemia Toimetised. Bioloogia. Ökoloogia” toimetuskolleegiumi liige.

Avaldanud üle 50 teaduspublikatsiooni, kirjutanud arvukalt populaarteaduslikke artikleid ja raamatuid.

## Toomas Tammaru (vasakult teine)

Sündinud 3.05.1968 Tartus

1986 Tartu 10. Keskkool (kuldmedal)

1992 Tartu Ülikool, bioloogia (*cum laude*)

1993 zooloogiamagister, Tartu Ülikool

1997 filosoofiadoktor (evolutsiooniline ökoloogia), Turu Ülikool

Tartu Ülikooli dotsent

Avaldanud üle 35 teaduspublikatsiooni.

## Peeter Hõrak (vasakult kolmas)

Sündinud 11.12.1963 Tartus

1982 Tartu 5. Keskkool

1989 Tartu Ülikool, bioloogia

1995 filosoofiadoktor (loomaökoloogia), Tartu Ülikool

Tartu Ülikooli vanemteadur

Avaldanud üle 20 teaduspublikatsiooni.

## Indrek Ots (vasakult neljas)

Sündinud 19.11.1972 Tartus

1991 Ülenurme Keskkool

1996 Tartu Ülikool, bioloogia (*cum laude*)

1997 zooloogiamagister, Tartu Ülikool

1999 filosoofiadoktor (loomaökoloogia), Tartu Ülikool

Tartu Ülikooli vanemteadur

Avaldanud üle 15 teaduspublikatsiooni.

Suuresti tänu teadusele ja tehnikale on inimeste arv meie planeedil viimasel ajal tohutult kasvanud ja inimkond on õppinud kiiresti ja efektiivselt tarbima loodusvarasid. Selle tulemusel on aga planeedi nägu oluliselt muutunud. Sedavõrd, kuidas kerkivad linnad ja “kultuuristuvad” maastikud, jääb paraku järjest vähemaks looduslikke elupaiku teiste elusorganismide jaoks, kellega me seda maailma jagame. Tagajärjeks on globaalne protsess, mida on hakatud kutsuma bioloogilise mitmekesisuse hävimiseks. See protsess kätkeb endas mitmeid soovimatuid tagajärgi ja riske ka inimkonnale endale, mistõttu riigid on ühiselt otsustanud hakata bioloogilist mitmekesisust kaitsma. Nii nagu teadlased on olnud oluliseks katalüsaatoriks biodiversiteedi allakäigu kiirendamisel, tuleb teadlastel seekord tulla appi selle protsessi pidurdamisel ja negatiivsete mõjude leevendamisel.

Üheks võimaluseks on kahtlemata elupaikade ja liikide kaitse. Teatud juhtudel on võimalik ka looduse ümberkujundamist ennast suunata nii, et liigid suudaksid muutunud tingimustega kohastuda. Selleks on aga ennekõike vaja põhjalikult tunda neid ökoloogilisi ja evolutsioonilisi mehhanisme ja seaduspärasusi, mis on organismide kohastumisvõime aluseks. Loomade puhul, kellele on omane aktiivne käitumine ja elupaigavalik, on tähtis teada ka elupaigavaliku signaaltunnuseid ning ühe või teise elupaiga asustamise ökoloogilisi piiranguid. Ilma selliste baasteadmisteta on teaduslikult põhjendatud looduskaitse bioloogiliste ja ökotehnoloogiliste meetmete väljatöötamine raske ja altmineku oht tõsine. Niisuguste alusuuringutega tegelebki evolutsiooniline loomaökoloogia, mis huvitub näiteks elukäikude (*life histories*) ja sigimisstrateegiate mitmekesisuse põhjustest ja nende evolutsiooni mehhanismidest, käitumisökoloogia ja immuno-ökoloogia probleemidest, sugulise valiku mehhanismidest, elupaigavaliku printsiipidest ja paljudest teistest loomade kohanemis- ja kohastumisvõimega seotud küsimustest. Tartu Ülikooli zooloogia ja hüdrobioloogia instituudi loomaökoloogia õppetooli teadlased koostöös nende poolt juhendatud kraadiõppurite ja üliõpilastega on mitmes nimetatud valdkonnas olnud viimastel aastatel edukad ja saavutanud rahvusvahelises teaduses väärrika positsiooni.

Putukad on kaasajal meie planeedi liigirikkaim loomarühm. Seega kujutavad nad endast bioloogilise mitmekesisuse olulist komponenti, kuid inimese poolt on paljud neist paraku pärvinud ka ohtlike kahjurite tiitli. T. Tammaru juhtimisel ja osavõtul on “rännatud” mitmeid putukate evolutsioonilises ökoloogias aktuaalseid teoreetilisi probleeme.

Putukaisendi viljakus sõltub sageli tema keha suurusest – suurem putukas muneb rohkem, viljakus on kehakaaluga sageli suisa võrdelises seoses. Samas võib tunduda peaaegu iseenesestmõistetavana, et putukaisendi kehakaal valmiskuna sõltub tema toidu kvaliteedist vastsees. Evolutsioonilise ökoloogia lähenemisviis seab sellise seose iseenesestmõistetavuse siiski kahtluse alla: pole sugugi selge, miks putukavastne ei võiks kehvema toidu peal oma kasvuperioodi veidi pikemaks venitada ja seeläbi kängujäämist vältida. Arusaamatust põhjustab asjaolu, et eespool mainitud kehakaalu tugev seos viljakusega peaks tekitama ülitugeva suuremaid mõõtmeid soosiva loodusliku valiku surve. Suurem peaks alati “parem” olla olema ja alati peaks “ära tasuma” kasvada võimalikult suureks. Miks siis vastsed ei pinguta? Ja üldisemalt – miks ei näe me pidevalt toimumas evolutsiooni suuremate kehämõõtmete suunas? Kumma-

lisel kombel pole sedavõrd ilmsetele ja ehk kesksetelegi küsimustele rahuldavat vastust.

Vastus saab olla põhimõtteliselt kaheksugune. Esiteks, suuremaks kasvamine võib olla võimatu mingite füsioloogiliste piirangute tõttu, sellisel juhul jääks vastus küsimusele väljapoole ökoloogia uurimisvaldkonda. Teiseks, vastus võib olla ökoloogia "siseasi", seda sellisel juhul, kui valik suuremate mõõtmete kasuks on tasakaalustatud mingi vastassuunalise valikusurvega. Teisisõnu, suur olemisel peavad olema ka mingid halvad küljed ehk, evolutsioonilise ökoloogia mõisteid kasutades, võib rääkida kehasuuruse hinnast.

Kasutades mudelobjektina üht väikest metsaliblikat – harilikku hallavaksikut – on püütud hinnata nii piirangutele tugineva kui ka ökoloogilise hüpoteesi paikapidamise võimalusi. T. Tammaru [1998] leidis, et rööviku kasvujärgu lõppkaal on algkaalust tugevasti sõltuv. Lisaks sellele leiti hämmastav sarnasus isas- ja emasisendite ning ka eri kasvujärgude lõppkaalu determinatsiooni reaktsiooninormides. See lubab oletada, et kasvujärgusiseste reaktsiooninormide kuju on suurelt osalt määratud arenguliste piirangute poolt – võimalikud pole kaugeltki mitte igasugused modifikatsioonid. Samuti on leitud, et kasvujärgude endi arv on hallavaksikul fikseeritud. Üheskoos peaksid kasvujärgusisese reaktsiooninormi "jäikus" ja fikseeritud järgude arv moodustama tõhusa arengulise piirangu liblika kehasuurusele. Teisisõnu, pole võimalik reaktsiooninormide selline plastiline ja ehk ka evolutsiooniline muutus, mille käigus saavutatakse suurem valmiku kaal rööviku aregukestuse pikendamise teel. Huvitaval kombel leidis kinnitust vastupidise suunaga plastilise muutuse võimalikkus – liigikaaslaste rühmas kasvavad hallavaksiku röövikud kasvasid lühemat aega ning saavutasid seejuures madalama lõppkaalu [Tammaru jt, 2000]. Populatsiooni tihedusest tingitud kasvukõverate muutusi on täheldatud paljudel putukatel, selliste efektide analüüs elukäiguteooria optimaalsusparadiigma raames pakuti mainitud töös välja esmakordselt.

Ökoloogilisi seletusi hallavaksiku kehasuuruse determinatsiooni reaktsiooninormidele ei saa seevastu pidada perspektiivseiks. Intuitiivselt peaks suuremaks kasvamise kõrgem hind väljenduma eelkõige pikenenud aregukestuses ehk siis putuka puhul kauem kestvas vastseeas. Seda seetõttu, et pikem vastseperiood toob paratamatult kaasa kõrgema suremuse enne paljunemisikka jõudmist. Tasakaalustamiseks suurema kehakaalu ilmset kasu peaks suremus saavutama nii kõrgeid väärtusi, et populatsiooni stabiilne eksisteerimine poleks enam võimalik [Tammaru, 1998]. Asjamainitud analüüs põhines lihtsustaval eeldusel, et suremus on kehasuurusest sõltumatu. Nii ei pruugi see aga olla. Kontrollimaks võimalust, et röövikute suremus ajaühikus kasvab nende kehämõõtmete kasvades, eksponeerisid T. Teder ja T. Tammaru [2001] eri suuruses hallavaksiku röövikuid kiletiivalistele parasitoididele – putukatele, kes teadaolevalt põhjustavad suure osa liblikaröövikute suremusest. Hüpotees kõrgeenenud parasitismiriski kaudu ilmnevast kehasuuruse hinnast kinnitust ei leidnud, pigem langesid just väikesed röövikud eelistatult parasitoidide ohvriks. Kehasuuruse kõrgest viljakusest tulenevaid eeliseid ei saa seega teadmiste hetkeseisu valguses seletada kehasuuruse ökoloogiliste protsesside vahendusel väljenduva hinnaga. Pole siiski selge, mil määral on hallavaksiku näitel saadud tulemused üldistatavad teistsuguse ökoloogiaga putukaliikidele ja töid selles suunas jätkatakse. Nii selgus kaldaöölasi – vastsetena hundinuiades toituvaid liblikaid – uurides, et emaste nukkude suremus parasitismi läbi on kõrgem kui

isastel liigikaaslastel [Teder jt, 1999]. Tähelepanekut on raske seletada muul moel kui nii, et emased on suurematena parasitoidide poolt paremini leitavad. Olukord erineb seega hallavaksiku puhul täheldatust ja viitab võimalusele, et kehasuuruse nn selektiivne keskkond võib ainuüksi liblikaliste seltsi piires liigiti oluliselt erineda.

Kehasuuruse determinatsiooni reaktsiooninormide uurimise tähtsus ei piirdu vaid evolutsioonilise ökoloogia teoreetiliste probleemidega. Sõltub ju valmiku kaalust ja seeläbi viljakusest ka populatsiooni potentsiaalne kasvukiirus. Hari-lik hallavaksik on tuntud kui liik, millel esineb laiaulatuslikke hulgisigimisi, seda eelkõige Skandinaavia põhjaosas. Hallavaksik võib seal hävitada kase-metsi paljude ruutkilomeetrite suuruselt territooriumidelt. Eelpool kirjeldatud piirangud kehasuuruse determinatsiooni reaktsiooninormidele on oluliseks põhjuseks, miks toidutaimede kvaliteet on kaalukaks parameetriks liigi populatsioonidünaamikas – putukas ei saa oma toidu kvaliteedist üle ega ümber ja taime omadused peegelduvad otseselt putuka populatsiooni tiheduses [Ruohomäki jt, 2000]. Tammaru osales antud valdkonnaga haakuvas üksikuurimises, mille eesmärgiks oli hinnata toidutaimede kvaliteedi languse mõju hulgisigimist lõpetava faktorina. Leiti, et kahjuritite poolt kahjustatud kaskede kvaliteet küll ootuspäraselt langes, kuid selle languse mõju hallavaksiku viljakusele ei olnud piisav seletamiseks populatsiooni arvukuse järsku kahanemist [Kaitaniemi jt, 1999]. Toidutaimede kvaliteedi olulist mõju putukate populatsiooniparameetritele õnnestus näidata ka teises Tartu putukaökoloogide mudelsüsteemis – hundinuiade toituvate öölaste näitel. Nii leiti, et eelkõige kevadisest veetasemest sõltuv hundinuiade kvaliteet putukavatsete toiduna avaldab otseselt ja tugevat mõju liblikate nukukaalule ja seeläbi ka nende viljakusele [Teder, Tammaru, 2002]. Veelgi enam, esmakordselt maailmas õnnestus loodusliku süsteemi põhjal näidata, et taime kvaliteet mõjutab ka liblikate parasitoidide kehakaalusid. Seejuures näitavad andmed veenvalt, et taime kvaliteedi varieerumise mõju on liblikate populatsioonile tugevam ja seega peaks taimse ressursi kvaliteedi paranedes langema hundinuiadel toituvate liblikate parasiteerituse määr. T. Teder ja T. Tammaru [2002] teevad põhjendatud oletuse, et mainitud järeldus peaks kehtima selliste süsteemide puhul, milles taimtoidualine putukas on varusigija – valmiku toitumisel pole mõju viljakusele, kuid parasitoid on seevastu tulusigija, tema järglaste arv sõltub tugevalt valmiku toitumiskäitumise tulemuslikkusest.

Putukate populatsioonidünaamika teooria rakendused ei piirdu kindlasti kahjuritõrjega. Nii on putukapopulatsioonid kiiresti muutuvatena ja ka lihtsasti uuritavatena sobivaks indikaatorsüsteemiks keskkonnamuutuste registreerimiseks. Inimkond on teadvustanud globaalse kliimamuutuse ohu, kliima soojenemise toimumist võib muuhulgas näha ka liblikate areaalide nihkumisest põhja poole – selline järeldus põhineb osaliselt ka Eesti materjalil [Parmesan jt, 1999]. Eesti teadlaste osalemine kirjeldatud projektis sai võimalikuks seetõttu, et siinmail on amatöörfaunistika tase rõõmustaval kombel võrreldav Euroopa keskmisega ja oluliselt parem kui näiteks USA-s, kus sellist tööd läbi viia poleks saanud. Näide illustreerib kujukalt amatöörteaduse tähtsust ja amatöör-andmete kasutusvõimalusi muuhulgas ka rakenduslike probleemide lahendamisel. Loodetavasti suudame Eestis liikide tundjate arvu ja kvalifikatsiooni osas senisel tasemel ka püsida. Selline eesmärk eeldab süstemaatilist tööd koo-

linoortega, amatöörseitside tegevuse soodustamist ja poliitikutelt muuhulgas ka tarkust tõkestada loodusharrastusi piiravate seaduste liiga agarat importimist.

Eelkirjeldatud hallavaksiku mudelsüsteem pakub võimalusi uurida ka putuka-populatsioonide võimalikke reaktsioone kliimamuutustele. Nii teame, et toidutaime pungade puhkemise ja hallavaksiku munade koorumise sünkroonia on oluline vaksikuisendi paljunemisedukust ja seeläbi ka populatsiooni kasvu-kiirust mõjutav faktor – sünkroonia saab tõenäoliselt häiritud kliimamuutuse tingimustes ja süsteem väärib sellest seisukohast lähemat uurimist. Seevastu on piisavalt põhjust arvata, et kliimamuutuse mõju hallavaksiku sügisel lendavate valmikute käekäigule on vähetähtis. Uurimuste tulemusena on selgunud, et valmikueas kogetavad keskkonnatingimused mõjutavad liblikate paljunemisedukust vaid vähesel määral. Lisaks sellele on koorumisaegades tähelepanuväärsel hulgal geneetilist varieeruvust [Tammaru jt, 1999; 2001], mis omakorda tähendab, et populatsioonid suudavad kiiresti ja valutult evolutsioneeruda vastavalt muutunud keskkonnatingimuste “nõudmistele”. Viidatud uurimused hallavaksiku fenoloogia alalt on seejuures olulised ka evolutsioonilise ökoloogia teoreetiliste probleemide lahendamise seisukohalt – tegu on ühega väga vähestest üksikjuhtudest, kus varieeruvust pideval skaalal mõõdetava elukäiguparameetri (antud juhul nukuperioodi kestuse) osas on analüüsitud kindlustusstrateegiate teooria raames.

Evolutsioonilise ökoloogia teooria ja populatsioonidünaamika haakuvad ka putukate munemiskäitumise uurimisel. Nii on munemisselektiivsus klassikalisi mudelsüsteeme, mille põhjal uuritakse optimaalsete käitumisstrateegiate evolutsiooni erinevates keskkondades. Samas on munemise selektiivsusel ilmne väljund putukate populatsioonidünaamikasse: kui valmikud suudavad hinnata ressursi kvaliteeti ja oma mune ka vastavalt jaotada, vähendab see lokaalsete hulgisigimiskollete tekke ohtu. T. Tammaru ja J. Javoš [2000] leidsidki, et erinevalt varem uuritud hallavaksikust on mitmed teised vaksiklaste sugukonna liblikad võimelised kohandama oma munatoodangut ja munemiskiirust vastavalt ressursitasemele. Autorid esitasid põhjendatud oletuse, et need uuritud liikide omadused võimaldavad seletada vastavate populatsioonide stabiilsust ehk siis hulgisigimiste puudumist neil.

Koostöös Eesti Põllumajandusülikooli teadlastega osales R. Mänd agroökoloogilises uurimuses, mille eesmärgiks oli selgitada looduslike tolmeldajate (peamiselt kimalased) asurkondade seisundit Eesti põllumajandusmaastikus. Erinevalt Lääne-Euroopast, kus sealse intensiivse põlluharimismetoodika tõttu on tolmeldajate populatsioonid kõvasti kokku kuivanud, on meie põllumajandusmaastik suhteliselt liigendatud ja loodussõbralik. Seetõttu võis koguni oletada, et Eesti põllumajandusmaastik sobib tolmeldajatele rohkemgi kui (pool)looduslikud elupaigad. Uurimine seda kahjuks siiski ei kinnitanud. Kimalaste liigirikkus oli asunud selgelt vähenemise teele ka Eesti põllumajandusmaastikus [Mänd jt, 2002a]. See tulemus toetab vajadust arendada Eestis nn mahepõllundust.

\* \* \*

Üheks olulisemaks keskkonnateguriks, mis määrab loomade kohanemis- ja kohastumisvõimet ning seletab paljuski nende käitumist ja elukäiguomadusi, on mitmesuguste parasiitsete mikroorganismide esinemine elukeskkonnas ja loomade vastupanuvõime haigustekitajatele. Seepärast on niinimetatud immu-

noloogiline ökoloogia kujunenud üheks kuumemaks uurimisvaldkonnaks evolutsioonilises loomaökoloogias. P. Hõrak ja I. Ots on andnud tõhusa panuse lindude immunoloogilisse ökoloogiasse. Üheks saavutuseks selles valdkonnas võib lugeda kliinilisest ja veterinaarmeditsiinist pärinevate uurimismeetodite esmakordset ekstensiivset rakendamist loomaökoloogia alases uurimistöös. Isendi konditsioon e seisund on paljudes kaasaegsetes elukäigu evolutsiooni mudelites keskseks mõisteks, ometi puudub teadlaste hulgas üksmeel selle kohta, milliste tunnuste abil on isendi konditsiooni kõige otstarbekam kirjeldada. Võrdlemaks mitmesuguste konditsiooniindeksite rakendatavust erinevates ökoloogilistes eksperimentides kirjeldati esmakordselt kuni 17 (peamiselt hemato-seroloogilise) parameetri sessoonset muutlikkust [Hõrak jt, 1998a], seost *Haemoproteus*- vereparasiitide nakkusega [Ots, Hõrak, 1998] ning lühija pikaajalist individuaalset varieeruvust pesitsevatel rasvatihastel ning vangistuses peetavatel rohevintidel [Ots jt, 1998; Hõrak jt, 2002]. Seejuures näidati esmakordselt, et leukotsüütsetele immuunparameetritele on omane isendispetsiifiliste väärtuste püsimine suhteliselt pika ajaperioodi (4 kuud) vältel [Hõrak jt, 2002]. See tulemus võimaldab paremini mõista ja tõlgendada mitmeid varem tuvastatud seoseid leukotsüütsete immuunparameetrite ja sugulise valiku signaaltunnuste vahel. Samuti kirjeldati mitmesuguste konditsiooniindeksite seoseid selliste kohasuse komponentidega nagu ellujäämus [Hõrak, Ots, 1998] ning sigimise katkestamine [Hõrak jt, 1999a].

Teiseks oluliseks P. Hõraku ja I. Otsa uurimissuunaks on olnud immuunfunktsiooni rolli selgitamine elukäigu lõivsuhetes (*trade-offs*). Isendite võimet kaitsta ennast parasiitide ja patogeenide vastu peetakse tänapäeval üheks oluliseks funktsiooniks, mis konkureerib ühise ressursi pärast muude organismi vajadustega. Kuna pideva parasiitidepoolse valikusurve tagajärjel on (eriti) selgroogsete loomade immuunsüsteem saavutanud äärmise rafineerituse ning kompleksuse, võib eeldada, et immuunsüsteemi ülesehitamine ja immuunreaktsioon vajavad ressursse, mida organism saaks kasutada ka mõneks muuks otstarbeks. Seega on põhjust oletada lõivsuhte eksisteerimist immuunfunktsiooni ja teiste organismi elutähtsate funktsioonide vahel. Et mõista selliste lõivsuhte võimalikku rolli elukäigu evolutsioonis, tuleb kindlaks teha kas, kuidas ja mil määral konkureerib immuunfunktsioon ressursside pärast kasvu, enesesäilitamise ja sigimisinvesteeringutega, ning kuidas realiseeruvad nende potentsiaalsete konfliktide lahendused. Peamiseks saavutuseks selles valdkonnas tuleb lugeda immuunvastuse energeetilise kulukuse esmakordset demonstreerimist lindudel [Ots jt, 2001]. See lükkab ümber hüpoteesi, mille kohaselt humoraalsele immuunvastusele kulutatud energia ei oma isendi kogu energiabilansiga võrreldes olulist tähtsust. Samas ei pruugi makrotoitained ja energia olla immuunfunktsiooniga seonduvates lõivsuhetes sugugi ainukehtivaks vääringuks: katsed rasvatihase pesapoogadega näitasid, et kuigi organism vajab immuunvastuse tekitamiseks ressursse [Hõrak jt, 1999b], ei võeta neid ressursse kasvamiseks vajaminevate arvelt [Hõrak jt, 2000a]. Katseid, mis näitasid kasvutingimuste mõju pesapoegade immuunfunktsioonile [Hõrak jt, 1999b; 2000a] ja sulestikuvärvusele [Hõrak jt, 2000b], samuti tõendeid pesapoegade immuunfunktsiooni seostest ellujäämusega, võib lugeda oluliseks toetusmaterjaliks hüpoteesile, mille kohaselt varajase ontogeneesi mõju isendi elukäigule on paljuski vahendatud immuunfunktsiooniga seonduvate lõivsuhte ja maternaalsete mõjude kaudu. Immuunvastusega seonduvatest lõivsuhetest väärib märkimist ka sigimispingutuse võimaliku immuunosuppressiivse

mõju tuvastamine: leiti, et pesakonna eksperimentaalne suurendamine tingis emastel rasvatihastel veres tsirkuleerivate lümfotsüütide kontsentratsiooni languse [Hõrak jt, 1998b]. Samuti heidab sigimise hinna füsioloogiliste mehhanismidele uudset valgust tulemus, mille kohaselt sigimisega seotud jõupingutused võivad oluliselt vähendada isendi toitumuslikku seisundit [Hõrak jt, 1999a]: mitmesuguste plasma metaboliitide ja kehamassi võrdluse alusel olid pesa hüljanud emased rasvatihased paremas konditsioonis kui mitte-hülgaajad. Sellega tõestati esmakordselt, et pesakonna hülgamine lindudel võib aset leida sigimispingutuse tagasihoidmise (*reproductive restraint*) eesmärgil. Tulemus vastandub üldlevinud arvamusele, mille kohaselt sigimise katkestamise põhjuseks peetakse järglaste eest hoolitsemiseks vajalike jõuvarude ammendumist.

Lisaks sigimiskäitumise eksperimentaalsele manipuleerimisele on T. Tammaru ja P. Hõrak [1999] andnud oma panuse ka optimaalse sigimiskäitumise teooria arengusse. Nende poolt esitatud mudel ennustab (vastupidiselt seniarvatule), et vanemate jaoks ei ole sugugi alati kasulik eksperimentaalselt suurendada pesakondade puhul oma sigimisinvesteeringuid suurendada. Seega esitati täiesti uudne seletus paljudele teadlastele peamurdmist valmistanud paradoksile, miks sigimise hinna maksmist pole õnnestunud tuvastada enamikus pesakonna suuruse manipuleerimise katsetes. Kaudselt haakub sigimise hinna temaatikaga ka P. Hõraku ja J.-D. Lebretoni [1998] artikkel rasvatihase eluea võrdlusest erikvalieedilistes elupaikades.

\* \* \*

Nii nagu muinasjutus fööniks tõuseb tuhandest, nii on uuesti teaduse eredasse rambivalgusesse tõusnud aastakümneid suhtelise vaikuse hõlmas viibinud sugulise valiku teooria, mille Darwin lõi juba 19. sajandil. Praegu valitseb evolutsiooniliste loomaökoloogide seas arusaam, et seniarvatust märgatavalt suurem osa loomade eelistustest ja käitumisest on välja kujunenud mitte ellujäämisvaliku, vaid sugulise valiku teel. Olulise tõuke teooria taaselustumisele andsid kvalitatiivselt uued ideed, mis pakuti välja 20. sajandi viimasel veerandil ja mis püüavad anda vastuse mõistatusele, mille lahenduse puudumine oligi vahepealse vaikuseperioodi põhjuseks – nimelt küsimusele sugulise valiku taga peituvatest mehhanismidest. Tähtis roll selle mõistatuse lahendamisel on jällegi immunoloogilisel ökoloogial, sest paljude sugulise valiku seisukohast tähenduslike tunnuste taga nähakse nn ausat signaliseerimist isendi tervislikust seisundist ja immuunvõimest. Sugulise valiku märklauaks olevad tunnused baseeruvad sageli karotinoidsetel pigmentidel (nagu näiteks rasvatihaste kollane rinnasulestik). Karotinoidid on terpeensed, peamiselt taimse päritoluga ühendid, mida loomad ei suuda sünteesida. Samas on karotinoididel loomades oluline roll mitmesuguste füsioloogiliste funktsioonide täitmisel, millest olulisemad on osalemine detoksifikatsiooniprotsessides ja immuunvastuses ning vabade radikaalide kustutamine. Juhul, kui toidust saadavad karotinoidid on loomade jaoks limiteerivaks ressursiks, on meil põhjust ennustada lõivsuhet nende investeerimisprioriteetide vahel: isendid, kes peavad kulutama rohkem karotinoide tervise säilitamiseks, saavad neid vähemal määral investeerida signaaltunnuste väljaarendamisse. P. Hõraku ja I. Otsa tulemused [Hõrak jt, 2001] on selle hüpoteesiga heas kooskõlas: leiti, et pesitsevate rasvatihaste kollaste rinnasulgede värvitoon on seotud vereparasiidiga *Haemoproteus* nakatumisega. Samuti näidati, et rasvatihase karotinoididel baseeruv

kollaste sulgede värvitoon on sooliselt dimorfne (mis viitab sugulise valiku toimele) ning ennustab isendite ellujäämistõenäosust. Need tulemused toetavad seisukohta, mille kohaselt saavad karotinoididel baseeruvaid signaaltunnuseid maksimaalselt välja arendada (ja seeläbi oma fenotüübilist kvaliteeti tõepäraselt signaaliseerida) vaid parasiidirrsistentsed isendid. Samas ei pruugi karotinoididel baseeruvate signaalide kasutamine piirduda vaid sugulise valiku märklauaks olevate tunnustega. P. Hõrak jt tõestasid eksperimentaalselt, et ka rasvatihase pesapoegade kollane sulestikuvärvus (võimalik signaal vanematele järglaste kvaliteedi kohta) sõltub nii toidust saadavatest kui maternaalsetest (munarebu) karotinoididest. Tulemus viitab emapoolsete mõjude seni arvatust suuremale tähtsusele karotinoidsete signaaltunnuste väljaarendamisel [Hõrak jt, 2000b].

Eesti teadlased ei saa loomulikult jääda kõrvale ka meie rahvuslinnu – suitsupääsukese – uurimisest. Käesoleval juhul polnud tegu siiski mitte niivõrd pääsukese kui niisuguse uurimisega, vaid sugulise valiku signaaltunnuste teooria kontrollimisega sobival mudelligil. Manipulatiivsete välieksperimentide abil tõestati, et esmapilgul tähtsusetute sulestikuornamentidena tunduvatel heledatel laikudel isapääsukese sabal on emapääsukese jaoks oluline informatiivne funktsioon. Nimelt eelistatakse partneritena suuremate sabalaikudega isaseid, mistõttu viimaste sigimisedukus on oluliselt kõrgem kui väiksemate laikudega suguvendadel. Põhjuseks leiavad uurimuse autorid, et suuremad sabalaigud signaaliseerivad lindude suuremast vastupanuvõimest ektoparasiitidele, täpsemalt suleväividele [Kose jt, 1999].

Lisaks sellele, et suguline valik on põnev evolutsiooniliste uuringute objekt, on vajadusel leida partner väljund ka populatsioonidünaamikasse. Nii toob biparentaalne (kahevanemaline) paljunemine paratamatult kaasa Allee efekti ehk siis olukorra, kus populatsiooni suhteline kasvukiirus on liigikaaslaste väikeste tiheduste korral madal või suisa negatiivne. Seda sellepärast, et paljudel jääb partner lihtsalt leidmata. T. Tammaru osales teoreetilises uurimuses [Gyllenberg jt, 1999], kus matemaatilise analüüsi meetoditega tõestati, et Allee efekt võib säilitada ebahühtlust populatsioonitiheduste ruumilises jaotuses ja teatud tingimustel ebahühtlust ka tekitada.

\* \* \*

Loomade elupaigaeelistuste uurimisel toitumisbioloogia kontekstis on siiani domineerinud tähelepanu kontsentreerumine tavatoidu koostises olevaile nn makrotoitainetele – valkudele, rasvadele, süsivesikutele. Sellisel rõhuasetusel on tõsine puudus: paljud loomad vajavad teatud kriitilistel eluperioodidel tavalisest märgatavalt suuremal hulgal mitmesuguseid mikrotoitaineid, mistõttu nende vähesus elukeskkonnas võib osutada koguni olulisemaks ökoloogiliseks piiranguks kui tavatoiduainete defitsiit. Näiteks vajavad linnud munemisajal munakoore moodustamiseks erakordselt suuri kaltsiumikoguseid, mida tavatoidust ei saa. Seepärast sõltuvad linnud pesitsusajal keskkonnas esinevatest kaltsiumirikastest lisatoiduobjektidest, milleks metsalindudel on peamiselt maismaatigude koad. Euroopa ja Ameerika hapestunud regioonides pesitsevatel lindudel esineb tõsiseid raskusi munade moodustamisega, mille põhjuseks leiti olevat maismaatigude arvukuse allakäik hapestunud aladel. Püstitati oletus, et kaltsiumipuudus võib piirata lindude sigimisedukust ka mittehapestunud, looduslikult kaltsiumivaestes elupaikades, mida maailma mitmetes



regioonides esineb hulgaliselt. Kuni viimase ajani puudusid siiski kindlad tõendid, mis seda hüpoteesi usaldusväärset kinnitanuks. Seepärast on arvatud, et niisugustes elupaikades on linnud kaltsiumipuudusele täielikult kohastunud.

Eestis R. Männi ja tema üliõpilaste poolt läbi viidud pikaajalised lindude kaltsiumirikka toiduga lisa söötmise eksperimendid tõestasid esmakordselt maailmas veenvalt eespool nimetatud hüpoteesi paikapidavust: nimelt on looduslikult kaltsiumivaestes elupaikades pesitsevate metsavärvuliste jaoks kaltsiumi nappus tõepoolest spetsiifiline pesitsust limiteeriv tegur [Mänd jt, 1998; 2000ab; Tilgar jt, 1999ab; 2002; Mänd, Tilgar, 2002]. Ilmnes kaltsiumipuuduse limiteeriv mõju munemise ajale, kurna ja munade suurusele, muna-koore paksusele ja poegade kasvule. Leiti tõendeid, et kaltsiumipuudus võib lindudel suurendada sigimise hinda. Kaltsiumipuuduse konkreetne mõju varieerus liigiti ja ka liigisiselt, sõltudes ühtlasi elupaiga omadustest ja aasta ilmastikutingimustest. Paralleelselt lindude uurimisega viidi läbi ka maismaatigude kui lindude loodusliku kaltsiumiallika arvukuse ja liigirikkuse uuringud Eesti erinevates metsatüüpides [Mänd jt, 2000a; 2001; 2002b]. Leiti, et paljudes meie looduslikult kaltsiumivaestes metsaelupaikades on tigude arvukus väga madal ja lähedal sellele väärtusele, mis iseloomustab hapestunud regioonide metsi. Järelikult on niisugustes metsades pesitsevad värvulised tigude arvukuse võimaliku edasise vähenemise korral potentsiaalselt ohustatud. Kirjeldatud uuringute tulemustel on oluline tähendus metsaelupaikade kaitse korraldamise seisukohast.

\* \* \*

Lõpetuseks tuleks meenutada, et teadust ei tehta „elevandiluu tornis“, vaid teadustulemused peavad varem või hiljem jõudma peale teiste teadlaste ka laiema avalikkuse ette. Ka on iga teadlase moraalne kohus oma eriala propageerida, luues sellega pinnase järelkasvuks. Ülalnimetatud uurimisrühmale pole ka selles osas palju ette heita. Üliõpilastega tehtava õppetöö, erialaseltside jm organisatsioonide kaudu on nad oma uurimissuundade propageerimise ning tulemuste tutvustamisega regulaarselt tegelenud. Seni tõhusaimaks panuseks selles vallas on populaarteaduslik raamat [Mänd, 1998], kus eestikeelsele lugejale esmakordselt tutvustatakse kaasaegse evolutsioonilise loomaökoloogia ja käitumisökoloogia saavutusi.

## KIRJANDUS

Gyllenberg, M., Hemminki, J., Tammaru, T. 1999. Allee effects can both create and maintain spatial heterogeneity in population densities. *Theoretical Population Biology*, 56, 231-242.

Hõrak, P., Jenni-Eiermann, S., Ots, I., Tegelman, L. 1998a. Health and reproduction: sex-specific clinical profile of great tits (*Parus major*) in relation to breeding. *Canadian J. of Zoology*, 76, 2235-2243.

Hõrak, P., Jenni-Eiermann, S., Ots, I. 1999a. Do great tits (*Parus major*) starve to reproduce? *Oecologia*, 119, 293-299.

- Hõrak, P., Lebreton, J.-D. 1998. Survival of adult Great Tits in relation to sex and habitat: a comparison of urban and rural populations. *Ibid.*, 140, 205-209.
- Hõrak, P., Ots, I. 1998. Health state and local survival in the great tit. *Biol. Cons. Fauna*, 102, 311- 317.
- Hõrak, P., Ots, I., Murumägi, A. 1998b. Hematological health state indices of reproducing Great Tits. A response to brood size manipulation. *Functional Ecology*, 12, 750-756.
- Hõrak, P., Ots, I., Tegelmann, L., Møller, A.P. 2000a. Health impact of phytohaemagglutinin-induced immune challenge on great tit nestlings. *Canadian J. of Zoology*, 78, 895-904.
- Hõrak, P., Ots, I., Vellau, H., Spottiswoode, C., Møller, A. P. 2001. Carotenoid-based plumage coloration reflects hemoparasite infection and local survival in breeding great tits. *Oecologia*, 123, 166-173.
- Hõrak, P., Saks, L., Ots, I., Kollist, H. 2002. Repeatability of condition indices in captive greenfinches (*Carduelis chloris*). *Canadian J. of Zoology*, 80. (in press).
- Hõrak, P., Tegelmann, L., Ots, I., Moller, A.P. 1999b. Immune function and survival of great tit nestlings in relation to growth conditions. *Oecologia*, 121, 316-322.
- Hõrak, P., Vellau, H., Ots, I., Møller, A.P. 2000b. Growth conditions affect carotenoid-based plumage coloration of great tit nestlings. *Naturwissenschaften*, 87, 460-464.
- Kaitaniemi, P., Ruohomäki, K., Tammaru, T., Haukioja, E. 1999. Foliage quality and induced resistance of host plant during and after a natural insect outbreak. *J. of Animal Ecology*, 68, 382-389.
- Kose, M., Mänd, R., Moller, A.-P. 1999. Sexual selection for white tail spots in the barn swallow in relation to habitat choice by feather lice. *Animal Behaviour*, 58, 1201-1205.
- Mänd, M., Mänd, R., Williams, I.H. 2002a. Bumblebees in the agricultural landscape of Estonia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 89, 69-76.
- Mänd, R. 1998. *Elukunstnikud: Teejuht käitumise ökoloogiase*. Tallinn: Huma.
- Mänd, R., Ehlvest, A., Kiristaja, P. 2001. Land snails in an afforested oil-shale mining area. *Proc. Estonian Acad. Sci., Biol. Ecol.*, 50, 15-19.
- Mänd, R., Talvi, T., Ehlvest, A., Kiristaja, P. 2002b. Land snails in Estonian forests: numbers and species richness. *Proc. Estonian Acad. Sci., Biol. Ecol.*, 51. (in press).
- Mänd, R., Tilgar, V. 2002. Does supplementary calcium reduce the cost of reproduction in the Pied Flycatcher *Ficedula hypoleuca*? *Ibid.* (in press).
- Mänd, R., Tilgar, V., Leivits, A. 1998. Calcium deficiency as an ecological constraint for passerines in oligotrophic forests of Estonia. *Biol. Conserv. Fauna*, 102, 345.

- Mänd, R., Tilgar, V., Leivits, A. 2000a. Reproductive response of Great Tits *Parus major* to calcium supplementation in a naturally base-poor forest habitat. *Canadian J. of Zoology*, 78, 689-695.
- Mänd, R., Tilgar, V., Leivits, A. 2000b. Calcium, snails, and birds: a case study. *Web Ecology*, 1, 63-69. Ots, I., Hõrak, P. 1998b. Health impact of blood parasites in breeding great tits. *Oecologia*, 116, 441-448.
- Ots, I., Kerimov, A.B., Ivankina, E.V., Ilyina, T.A., Hõrak, P. 2001. Immune challenge affects basal metabolic activity in wintering great tits. *Proc. of the Royal Society of London Series B*, 268, 1475-1482.
- Ots, I., Murumägi, A., Hõrak, P. 1998a. Hematological health state indices of reproducing Great Tits. *Methodology and sources of natural variation. Functional Ecology*, 12, 700-707.
- Parmesan, C., Ryrholm, N., Stefanescu, C., Hill, J. K., Thomas, C. D., Descimon, H., Huntley, B., Kaila, L., Kullberg, J., Tammaru, T., Tennent, J., Thomas, J. A., Warren, M. 1999. Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with global warming. *Nature*, 399, 579-583.
- Ruohomäki, K., Tanhuanpää, M., Ayres, M. P., Kaitaniemi, P., Tammaru, T., Haukioja, E. 2000. Causes of cyclicity of *Epirrita autumnata* (Lepidoptera, Geometridae): grandiose theory and tedious practice. *Population Ecology*, 42, 211-223.
- Tammaru, T. 1998. Determination of adult size in a folivorous moth: constraints at instar level? *Ecological Entomology*, 23, 80-89.
- Tammaru, T., Hõrak, P. 1999. Should one invest more in large broods? Not necessarily. *Oikos*, 85, 574-581.
- Tammaru, T., Javoiš, J. 2000. Responses of ovipositing moths (Lepidoptera: Geometridae) to host plant deprivation: life-history aspects and implications for population dynamics. *Environmental Entomology*, 29, 1002-1100.
- Tammaru, T., Ruohomäki, K., Saloniemi, I. 1999. Within-season variability of pupal period in *Epirrita autumnata* (Lepidoptera: Geometridae): a bet-hedging strategy? *Ecology*, 80, 1666-1677.
- Tammaru, T., Ruohomäki, K., Montola, M. 2000. Crowding-induced plasticity in *Epirrita autumnata* (Lepidoptera: Geometridae): weak evidence of specific modifications in reaction norms. *Oikos*, 90, 171-181.
- Tammaru, T., Tanhuanpää, M., Ruohomäki, K., Vanatoa, A. 2001. Autumnal moth - why autumnal? *Ecological Entomology*, 26, 646-654.
- Teder, T., Tammaru, T. 2001. Larger larvae of a flush-feeding moth are not at a higher parasitism risk: implications for host life-history. *European J. of Entomology*, 98, 277-282.
- Teder, T., Tammaru, T. 2002. Cascading effects of plant vigour on the relative performance of insect herbivores and their parasitoids. *Ecological Entomology*, 27, 94-104.

Teder, T., Tammaru, T., Pedmanson, R. 1999. Patterns of host use in solitary parasitoid species: field evidence from a homogenous habitat. *Ecography*, 22, 79-88.

Tilgar, V., Mänd, R., Leivits, A. 1999a. Effect of calcium availability and habitat quality on reproduction in Pied Flycatcher *Ficedula hypoleuca* and Great Tit *Parus major*. *J. of Avian Biology*, 30, 383-391.

Tilgar, V., Mänd, R., Leivits, A. 1999b. Breeding in calcium-poor habitats: are there some extra costs? *Acta Ornithologica*, 34, 215-218.

Tilgar, V., Mänd, R., Mägi, M. 2002. Calcium shortage as a constraint on reproduction in Great Tits *Parus major*: a field experiment. *J. of Avian Biology*. (in press).

*Teaduspreemia põllumajanduse alal*  
**ENTOMOLOOGILISTE UURIMUSTE EEST  
KESKKONNASÄÄSTLIKU TAIMEKAITSE  
ARENDAmiseks (1998–2001)**



*Anne  
Luik*  
Kollektiivi juht

Sündinud 3. märstil 1949 Lüllemäel Valgamaal

1967 C. R. Jakobsoni nimeline Viljandi I Keskkool

1972 Tartu Ülikool, bioloogia

1975 bioloogiakandidaat (entomoloogia), Eesti Teaduste Akadeemia  
Zooloogia ja Botaanika Instituut

1972–1975 Eesti Teaduste Akadeemia Zooloogia ja Botaanika Instituudi aspirant, nooremteadur; 1976–1992 Eesti Põllumajandusülikool: assistent, vanemõpetaja, dotsent, professor, taimekaitse instituudi juhataja.

1976 vabariiklik noorteadlaste preemia, Eesti Taimekaitse Seltsi aseesinaine, Eesti Mahepõllumajanduse Sihtasutuse Nõukogu esinaine, erinevate rahvusvaheliste seltside ja töögruppide liige (ISHS, IUFRO, IOSDV).

Avaldanud üle 100 teaduspublikatsiooni.



*Küllil Hiiesaar* (esimene vasakult)

Sündinud 4.10.1943 Tartus  
 1962 Tallinna 7. Keskkool  
 1967 Eesti Põllumajanduse Akadeemia, agronoomia  
 1974 bioloogiakandidaat  
 Eesti Põllumajandusülikooli taimekaitse instituudi vanemteadur  
 Üle 150 teaduspublikatsiooni.

*Aare Kuusik* (neljas vasakult)

Sündinud 29.01.1929 Tartus  
 1947 Gustav Adolphi Gümnaasium  
 1959 Tartu Ülikool, bioloogia  
 1967 bioloogiakandidaat  
 Eesti Põllumajandusülikooli taimekaitse instituudi vanemteadur  
 1985 vabariigi teaduspreemia bioloogiliselt aktiivsete ühendite kasutamise alal kahjurputukate arvukuse regulatsioonis  
 Üle 160 teaduspublikatsiooni.

*Enno Merivee* (teine vasakult)

Sündinud 27.05.1950 Tõrvas  
 1969 Tõrva Keskkool  
 1982 Tartu Ülikool, bioloogia  
 1999 PhD entomoloogia erialal, Eesti Põllumajandusülikool  
 Eesti Põllumajandusülikooli taimekaitse instituudi vanemteadur  
 Ligi 30 teaduspublikatsiooni.

*Luule Metspalu* (kolmas vasakult)

Sündinud 12.02.1941 Pühalepa vallas Hiiumaal  
 1959 Türi Põllumajandustehnikum  
 1967 Eesti Põllumajanduse Akadeemia, agronoomia  
 1973 bioloogiakandidaat entomoloogia erialal  
 Eesti Põllumajandusülikooli taimekaitse instituudi vanemteadur  
 Ligi 160 teaduspublikatsiooni.

Putukad on maailma kõige liigirikkam ja isenditeohtram loomarühm, kellest küll tühine protsent, tihti aga siiski tuntavalt, võib inimesele tõsiseid probleeme põhjustada.

Taimekasvatuses on oluline putukate poolt tekitatud saagikadude vähendamine, kasutamata sealjuures keskkonnale ohtlikke sünteetilisi mürgkemikaale. Selle asemel võiks viljelda hoopis kahjurite looduslike vaenlasi soosivaid kasvatustehnoloogiasid. Kahjurite kõrgema arvukuse korral tuleks otseselt tõrjes rakendada keskkonnasõbralikke, kergesti lagunevaid, samas aga efektiivseid, looduslike vahendeid.

Paraku eeldavad taolised loodussõbralikumad kahjurite arvukuse reguleerimise viisid väga põhjalikke teadmisi kahjurite ja nende looduslike vaenlaste liigilise koosseisu, bioloogia, ja ökoloogia kohta eri kasvatustehnoloogiatega põllukooslustes. Samas tuleb tunda, kuidas putukas leiab oma toiduobjekti, nii taime kui teise putuka, ja kas ning kuidas seda protsessi saab muuta ning suunata. Selleks on vajalik teada putukate käitumist reguleerivate tundeorganite ehitust ning talitlust. Looduslike tõrjevahendite rakendamine eeldab aga nende toimemehhanismide ja putukate füsioloogiliste talitluste tundmist.

PUTUKATE UURIMINE ERINEVA KASVATUSTEHNOLOOGIAGA PÕLLUKULTUURIDES on võimaldanud neis kindlaks teha olulisema maapinnal liikuvaid kahjureid hävitava röövtoiduliste putukate rühma – jooksiklaste liigilise koosseisu ja esinemissageduse [Luik jt, 2000ab]. Eesti siiani veel küllaltki mosaiikse põllumajandusmaastiku tingimustes oli jooksiklaste liigiline koosseis nii tava- ja maheviljeluses kasvatatava teravilja puhul sarnane. Kuid tavapõllul, kus kasutati sünteetilisi umbrohutõrjevahendeid, oli isendite arvukus poole võrra madalam. Seetõttu jäi tavapõllul tagasihoidlikumaks ka jooksiklaste mõju kahjureile. Avaldus ka erineva botaanilise koostisega põlluservadelt rändas teraviljapõllule kaks korda enam jooksiklasi kui põlluga piirnevalt kultuurheinamaalt. Seega on mitmekesise taimikuga äärealad jooksiklaste kui röövtoiduliste putukate soodustamiseks põllul äärmiselt olulised. Maasikakasvatuses segaviljeluse ning erinevate multside kasutamine näitas, et jooksiklased ei lasknud end oluliselt häirida segaviljelusest, küll aga soodustas jooksiklasi nii peenravaip kui ka must kilemults, sest need pakkusid varjevõimalusi. Maasikaistanduses pealsete põletamisel hukkusid ka jooksiklased ning ämblikud, kuid mõne nädala möödudes migreerusid nad taas istandusse ümbritsevatelt looduslikelt aladelt [Metspalu jt, 2000]. Külvikorras olevate kultuuride võrdlemisel avaldus ristiku ja talivilja soodustav toime röövtoiduliste putukate ohtrusele [Tarang, Luik, 2001]. Järelikult kasuliku fauna soodustamiseks ning keemilise tõrje vältimiseks on oluline külvikorda mitmeaastase kasvuperioodiga kultuuride lülitamine ning põldudele mitmekesise taimikuga põllupeenarde jätmise.

MITME OLULISE KAHJURILIIGI BIOLOOGILISTE omaduste uurimisel on selgunud uued iseärasused. Noorte okaspuukultuuride vaenlase – männikärsaka kahjustusaktiivsus on kõrgem suurema õhuniiskuse ning madalama valgusintensiivsuse tingimustes [Merivee jt, 1999b; Sibul jt, 1999]. Kartulimardikas, kes varasematel aegadel pidevalt üllatas uute sisserännetega, on tänu oma suurenenud talvisele külma-karastumisvõimele muutunud meil kohalikuks asukaks [Hiiesaar jt, 2001]. Toidu suhtes on ta üsna valiv, mistõttu kahjustatakse kartu-

lisorte erineval määral [Metspalu jt, 2000a]. Odra, nisu ja kartuli tugevdatud lämmastikväetamine soodustab taimede asustust lehetäide poolt, samas aga pärsib ripslaste ning lehevaablaste asustust [Luik jt, 1999]. Seega saab teatavate kahjurite esinemist ning arengut mõjutada nii peremeestaimede sortide valiku kui väetamisega.

**TUNDLATEL PAIKNEVAD TUNDEORGANID ON MÄÄRAVA TÄHTSUSEGA PUTUKATE KÄITUMISE MÕJUTAMISEL.** Mitmetoiduliste kahjurite naksurlaste ja röövtoiduliste jooksiklaste erinevate liikide tundlatel elektronmikroskoopiliselt kindlaks tehtud eri tüüpi tundeorganite arv ja asetus viitavad olulistele erinevustele nende putukate käitumist mõjutavate välistegurite osas [Merivee jt, 1998ab; Merivee jt, 1999a; Merivee jt, 2000ab; Merivee jt, 2001]. Kõikide uuritud liikide isasisendeil selgus vastassugupoole lõhna tundvate organite arvu oluline ülekaal, mis on liikide bioloogilisel kestmajäämisel määraava tähtsusega, sest emasputuka lõhna kaduvväikese koguse peale peab isane vastuult liikudes oma partneri leidma. Lõhnadel on aga juhtiv roll ka toidu ja munemisobjektide leidmisel ning juba väga väiksedki erinevused põhiliste lõhnakomponentide koostises võivad näiteks seemnekireslaste peremeestaimede valikut mõjutada [Luik jt, 1999]. Missugused organid ja kuidas reageerivad toiduobjekti lõhnadele jooksiklastel, tuleb jätkuvaltel elektrofüsioloogilistel uurimistel selgitada. See võimaldab tulevikus luua lõhnastiimuleid, meelitamaks jooksiklasi põllukooslustesse kahjureid tõrjuma.

**TAIMSED TOIMEAINED ON EFEKTIIVSED LOODUSLIKUD KAHJURITÕRJE VAHENDID.** Nii nagu inimtervishoius tuntakse üha kasvavat huvi taimedest saadavate arstimite vastu, sobivad taimedes olevad mitmed teised ainevahetusaadused ka putukate tõrjeks. Nad kas halvavad kahjurputukate liikumist ja isu, mõjuvad lausa eemalepeletavalt, häirivad mitmesuguseid füsioloogilisi talitlusi – närvitalitlust, hingamist, südamegevust või kutsuvad esile arenguhälbeid [Harak jt, 1998; 1999; Hiiesaar jt, 1998; Kuusik jt, 1999; Luik jt, 1999; Luik jt, 2001; Metspalu jt, 2000b; 2001a]. Mitmete lõunamaiste taimede, näiteks neemi seemnete tõmmise baasil saadud preparaadi NeemAzal mõju on meie kodumaiste taimede omast küll efektiivsem, kuid ka tõmmised paljudest meil laialt levinud taimedest, nagu soolikarohi, puju, kesalill, sookail, koirohi jt, toimivad piisavalt tõhusalt [Hiiesaar jt, 2000ab; Luik, 2000; Metspalu jt, 2000a; 2001a; Hiiesaar jt, 2001ab; Kuusik jt, 2001ab; Tuubel jt, 2001; Sibul jt, 2001]. Sageli aitab meie taimede kahjuritõrje tõhusust tõsta nende segus kasutamine, kus vastastikku üksteist toetades suurendatakse toimefekti [Kuusik jt, 2000]. Taimsete toimeainete efektiivsuse kiiremaks hindamiseks aitab kaasa putukate füsioloogiliste reaktsioonide hea tundmine, milleks on välja töötatud spetsiifiline väga tundlik aparatuur koos vastavate uurimismeetoditega [Harak jt, 1998; Kuusik jt, 1999; 2001abc; Metspalu jt, 2001b].

Jätkuvad ökoloogilised ja elektrofüsioloogilised uurimused lisavad uut teavet putukate käitumise ning füsioloogiliste talitluste osas, mis võimaldab tulevikus uusi väljundeid ka praktilisse taimekaitsekeskkonnasõbraliku põllumajanduse arendamiseks.



## KIRJANDUS

Harak, M., Kuusik, A., Hiiesaar, K., Metspalu, L., Luik, A., Tartes, U. 1998. Calorimetric investigations on physiological stress in *Tenebrio molitor* (Coleoptera, Tenebrionidae) pupae. *Thermochimica Acta*, 309, 57-61.

Harak, M., Lamprecht, I., Kuusik, A., Hiiesaar, K., Metspalu, L., Tartes, U. 1999. Calorimetric investigations of insect metabolism and plant extract. *Thermochimica Acta*, 333, 1, 39-48.

Hiiesaar, K., Kuusik, A., Metspalu, L., Tartes, U. 1998. Stimulatory effect of extracts of *Tanacetum (Pyrethrum) roseum* on initiating development in diapausing pupae of large white butterfly (*Pieris brassicae*). Proceedings of the VI<sup>th</sup> European Congress of Entomology. České Budějovice, 2, 522-523.

Hiiesaar, K., Luik, A., Kuusik, A., Metspalu, L. 2000a. The effect of NeemAzal T/S on the mortality of mite *Tetranychus urticae* Koch and some insects- *Aphis gossypii* Glov. and *Thrips tabaci* Lind. Practice oriented results on use and productions of Neemingredients and Pheromones. Proc. 8th Workshop, Hohensolms, Germany, February 16-18. 1998, 41-45.

Hiiesaar, K., Metspalu, L., Kuusik, A. 2000b. Insect-plant chemical interaction: the behaviour effects evoked by plant substances on greenhouse pests. Proc. of Internat. Confer. Development of Environmentally Friendly Plant Protection in the Baltic Region. Tartu, Estonia, 46-49.

Hiiesaar, K., Kuusik, A., Jõudu, J., Metspalu, L., Hermann, P. 2001a. Laboratory experiments on cold acclimation in overwintering Colorado potato beetles, *Leptinotarsa decemlineata* Say. *Norw. J. Entomol.*, 48, 1, 87-90.

Hiiesaar, K., Metspalu, L., Jõudu, J., Kuusik, A. 2001b. Diverse effects of NeemAzal T/S revealed by preimaginal stages of the Colorado potato beetles, *Leptinotarsa decemlineata* Say. Kleeberg, H., Zebitz C. P. W. (eds). Practice Oriented Results on Use and Production of Neem Ingredients and Pheromones IX. Giessen, 105-110.

Hiiesaar, K., Metspalu, L., Kuusik, A. 2001c. An estimation of influences evoked by some natural insecticides on greenhouse pest-insects and mites. Metspalu, L., Mitt, S. (eds.). Practice oriented results on the use of plant extracts and pheromones in pest control. Tartu, 21-29.

Kuusik, A., Harak, M., Hiiesaar, K., Metspalu, L., Tartes, U. 1999. Studies on muscular activity, gas exchange cycles and water loss in pupae of greater wax moth *Galleria mellonella* (Lepidoptera, Pyralidae) during physiological stress. Proc. of the XXIV Nordic Congress of Entomology. Tartu, 77-82.

Kuusik, A., Hiiesaar, K., Metspalu, L. 2000. A study of synergistic effect of two combined plant extracts (*Artemisia absinthum* and *Pinus silvestris*) on twospotted spider mite (*Tetranychus urticae*). Proc. of Internat. Confer. Development of Environmentally Friendly Plant Protection in the Baltic Region. Tartu, Estonia, 90-93.

Kuusik, A., Hiiesaar, K., Metspalu, L., Hermann, P. 2001 Respiratory failures in adult Colorado potato beetles evoked by neem preparation. Metspalu, L.,

- Mitt, S. (eds.). Practice oriented results on the use of plant extracts and pheromones in pest control. Tartu, 52-57.
- Kuusik, A., Metspalu, L., Hiiesaar, K., Hermann, P. 2001b. Neuromuscular and respiratory responses of Colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata* (say) adults on the treatments with neem preparation. *Ibid.*, 46-51.
- Kuusik, A., Tartes, U., Vanatoa, A., Hiiesaar, K., Metspalu, L., 2001c. Body movements and their role as triggers of heartbeats in pupae of the Colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata*. *Physiological Entomology*, 26, 2, 158-164.
- Luik, A. 2000. Die Wirkung von NeemAzal-T/S auf den Fortpflanzungsfresser des grossen braunen Rüsselkäfers (*Hylobius abietis* L.). Practice oriented results on use and productions of Neemingredients and Pheromones. Proc. 8th Workshop, Hohensolms, Germany, February 16-18. 1998, 35-39.
- Luik, A., Eenpuu, R., Heidemaa, M., Arus, L., Tarang, T., Vares, A. 2000a. Carabids in different agrocoenosis of Estonia. Proc. of Internat. Confer. Development of Environmentally Friendly Plant Protection in the Baltic Region. Tartu, Estonia, 114-117.
- Luik, A., Eenpuu, R., Nõmmiste, K., Mänd, M., Mikk, M. 2000b. Impact of field margins on the occurrence of beneficial insects. - Proc. 13th Internat. IFOAM Scient. Confer., 29-31 August, 2000, Basel, 460-461.
- Luik, A., Metspalu, L., Mõttus, E. 2001. On applied research of the insect pheromones and plant extracts in Estonia. Metspalu, L., Mitt, S. (eds.). Practice oriented results on the use of plant extracts and pheromones in pest control. Tartu, Jan. 24-25, pp. 64-67.
- Luik, A., Kuldkepp, P., Heidemaa, M., Liiva, I. 1999. Abundanz einiger Blattfressender Insekten in Abhängigkeit von der Stickstoffdüngung im IOSDV-Versuch in Tartu/Estland. *Arc. Acker-Pfl. Boden.*, 44, 523-538.
- Luik, A., Ochsner, P., Jensen, T.S. 1999. Olfactory responses of seed wasps *Megastigmus pinus* Parfitt and *Megastigmus rafni* Hoffmeyer (Hym., Torymidae) to host-tree odours and some monoterpenes. *J. Appl. Ent.*, 123, 563-570.
- Luik, A., Sibul, I., Voolma, K. 2000. Influence of some plant extracts and neem preparations on the maturation feeding of the large pine weevil, *Hylobius abietis* L. *Baltic Forestry*, 6, 1, 53-58.
- Luik, A., Voolma, K. 1999. Monitoring of *Hylobius abietis* L. in Estonia and influence of some plant compounds on its maturation feeding behaviour. Proc. of the Second Workshop of the IUFRO WP 7.03.10, April 20-23, Sion-Chateauneuf, Switzerland. Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL), 250-251.
- Merivee, E., Luik, A., Rahi, M. 1998a. Distribution of antennal pheromone receptors in some click beetles (Coleoptera, Elateridae). Proc. of the VI<sup>th</sup> European Congress of Entomology. České Budějovice, 1, 45-46.

- Merivee, E., Ploomi, A., Luik, A., Rahi, M., Sammelseg, V. 2001. Antennal sensilla of the ground beetle *Platynus dorsalis* (Pontoppidan, 1763) (Coleoptera, Carabidae). *Microscopy Research and Technique*, 55, 5, 339-349.
- Merivee, E., Ploomi, A., Rahi, M., Bresciani, J., Ravn, H.P., Luik, A., Sammelseg, V. 2000a. Sensory organs on the antennae of the ground beetles *Bembidion lampros* Hbst. and *Bembidion properans* Steph. (Coleoptera, Carabidae). *Proc. of Internat. Confer. Development of Environmentally Friendly Plant Protection in the Baltic Region*. Tartu, Estonia, 128-131.
- Merivee, E., Ploomi, A., Rahi, M., Luik, A., Sammelseg, V. 2000b. Antennal sensilla of the ground beetle *Bembidion lampros* Hbst (Coleoptera, Carabidae). *Acta Zoologica*, 81, 339-350.
- Merivee, E., Rahi, M., Bresciani, J., Ravn, H. P., Luik, A. 1998b. Antennal sensilla of the click beetle, *Limoniuss aeruginosus* (Olivier) (Coleoptera: Elateridae). *Int. J. Insect Morphology and Embryology*, 27, 311-318.
- Merivee, E., Rahi, M., Luik, A. 1999a. Antennal sensilla of the click beetle, *Melanotus villosus* (Geoffroy) (Coleoptera: Elateridae). *Int. J. Insect Morphology and Embryology*, 28, 41-51.
- Merivee, E., Sibul, I., Luik, A. 1999b. Diel dynamics of feeding and locomotor activities in the large pine weevil, *Hylobius abietis*. *Baltic Forestry*, 4, 59-62.
- Metspalu, L., Hiiesaar, K., Jõudu, J., Kuusik, A. 2001a. The Effects of certain toxic plant extracts on the larvae of Colorado Potato Beetle, *Leptinotarsa decemlineata* (Say). Metspalu, L., Mitt, S. (eds.). *Practice oriented results on the use of plant extracts and pheromones in pest control*. Tartu, 84-89.
- Metspalu, L., Hiiesaar, K., Kuusik, A., Jõudu, J., Lõhmus, A. 2000a. Host-plant selection by Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say) between cultivars of potato (*Solanum tuberosum*). *Proc. of International Conference Development of Environmentally Friendly Plant Protection in the Baltic Region*. Tartu, Estonia, 132-135.
- Metspalu, L., Hiiesaar, K., Kuusik, A., Karp, K., Starast, M. 2000b. The occurrence of arthropods in strawberry plantation depending on the method of cultivation. *Proc. of the Internat. Confer. Fruit Production and Fruit Breeding*. *Transactions of the Estonian Agricultural Univ.* 207, 204-208.
- Metspalu, L., Kuusik, A., Hiiesaar, K., Jõudu, J., Tartes, U., Harak, M. 2001b. Simultaneous recording of gas exchange cyclicality, body movements and heartbeats in pupae of *Leptinotarsa decemlineata* Say made by infrared optical method. *Norw. J. Entomol.*, 48, 1, 91-96.
- Metspalu, L., Luik, A., Hiiesaar, K., Kuusik, A., Sibul, I. 2000c. On the influence of Neem preparations on some agricultural and forest pests. Kleeberg, H., Zebitz, C.P.W. (eds.). *Practice Oriented Results on Use and Production of Neem Ingredients and Pheromones IX*. Giessen, 95v103.
- Sibul, I., Luik, A., Voolma, K. 2001. Possibilities to influence maturation feeding of the large pine weevil (*Hylobius abietis* L.) with plant extracts and neem preparations. Metspalu, L., Mitt, S (eds.). *Practice oriented results on the use of plant extracts and pheromones in pest control*. Tartu, 112-119.

Sibul, I., Merivee, E., Luik, A. 1999. On diurnal locomotor activity of *Hylobius abietis* L. (Coleoptera, Curculionidae). Proc. of the XXIV Nordic Congress of Entomology. Tartu, 163-166.

Tarang, T., Luik, A. 2001. Jooksiklaste ja ämblike esinemine viieväljalises külvikorras. EPMÜ Teadustööde Kogumik, 213, 156v161. (With English summary: Occurrence of carabids and spiders in five year crop rotation).

Tuubel, E., Toom, T., Metspalu, L. 2001. The influence of pyrethrins on cabbage white (*Pieris brassicae*L.) larvae. Practice oriented results on the use of plant extracts and pheromones in pest control. Tartu, 127-131.

*Teaduspreemia sotsiaalteaduste alal tööde tsikli*  
**“JAKOB VON UEXKÜLL JA BIOSEMIOOTIKA  
DISTSIPLINAARSED PIIRID” eest.**



*Kalevi  
Kull*

Sündinud 12. augustil 1952 Tartus

1970 Tartu 5. Keskkool, bioloogia-geograafia eriklass  
1975 Tartu Ülikool, bioloog  
1987 bioloogiakandidaat, Tartu Ülikool (ökoloogia)

1975–1977, Eesti TA Atmosfäärifüüsika ja Astrofüüsika Instituudi insener (fotosünteesi töörühm). 1977– Eesti TA Zooloogia ja Botaanika Instituudi (süsteemökoloogia, ökofüsioloogia ja botaanika töörühmad) nooremteadur, teadur, peateadur, laborijuha-taja, vanemteadur.

1992–1997 Tartu Ülikooli ökofüsioloogia korraline professor  
1997–1998 Tartu Ülikooli külalisprofessor  
1997– Tartu Ülikooli semiootika dotsent

Avaldanud üle 100 teaduspublikatsiooni.

## ELU TÄHENDUSED

Akadeemiline vabadus tähendab võimalust valida vabalt ja ise need küsimused, millele vastust otsida. Selle vabaduse realiseerimine nõuab tähelepanu ja pole kuigi lihtne. Olles Eesti teadlane, on mu meelest oluline ja loomulik valida küsimusi, mis oleks (1) teoreetiliselt võimalikult sügavad, (2) kuidagi Eestiga seotud, ning (3) kultuuritraditsiooni ja kohaliku looduse püsimisele kaasaaitavad.

Miks on siin mõistlik tegelda biosemiootikaga, selleks on niisiis rida põhjusi. Teoreetiliste ideede kogum, mida meie eelkäijad (Baer, Uexküll, Lotman) pakuvad, on erakordselt võimas. Neile tuginedes, nende dialoogis osaledes on võimalik üles ehitada järjekordne kiht mõistmise sfääris. Omamaiseid mõtlejaid mõista on meie eelis. Nii semiootikas kui teoreetilises bioloogias on meil tugev ja elujõuline traditsioon. Biosemiootika on ka valdkond, kus on võimalik kokku puutuda maailma rajajoone ning tippudega, pealegi ühtaegu nii semiootika kui bioloogia omadega. See ala eeldab interdistsiplinaarsust, milleks Eestis on suurepärased eeltingimused. Ta ei nõua palju vahendeid, temaga saab tegelda majanduse olukorrast ja valitsevast poliitikast sõltumatult. Nagu teoreetilise tegevusega ikka, saab see pakkuda loovaid ideid paljudele teistele valdkondadele. Ja ühtlasi on see kokkukäiv loodust ja kultuuri hoidva vaatega, mis niisuguse tegevuse hingele mõnusaks ja armsaks teeb.

Kui ligi 30 aastat tagasi Puutu bioloogiajaamas töötades Jakob von Uexkülli (1864–1944) vastu huvi hakkasin tundma, küsitlesin mitmeid Tartu õpetlasi tema kohta. Väga vähesed olid talt kuulnud. Uku Masing oli neist vist ainus, kes rohkem teadis temast. Uexküll oli unustatud mõtleja. Ometi on tegu õpetlasega, kes eestimaaalastest praegu maailmas peaaegu kõige tuntum. Unustus ja arusaamine on kultuuri ja teadusvaadete ajaloo põnevad nähtused, neidki väärrib mõista.

Peale etoloogia aluseid rajava “Umwelt und Innenwelt der Tiere” ning fundamentaalse, teoreetilise bioloogia aluseid käsitleva “Theoretische Biologie”, on Uexküll “Bedeutungslehre” autor. Ta sõnum on lihtne: bioloog ei või olla *Bedeutungsblind*. Tähenduspimedusega löödud on aga möödunud sajandi bioloogia tundnud tõepoolest palju. Pigem tuleks öelda teisiti: bioloogide põhiline lähenemisviis on olnud loodusteaduslikuna selline, mis välistab tähenduse kui nähtuse eksisteerimise uuritavas maailmas. Sellest siis mõistmatus Uexkülli suhtes, ja unustus samuti.

Mismoodi aga teaduslikult uurida loodust, et seal leiduda võiv tähenduslikkus avastuda saaks? Seda küsides semiootika ja bioloogia kohtuvad. Tähtis eeldus, mida niisuguse lähenemise puhul kasutame, on muidugi see, et peame märgiprotsesse pärinevaks elu sellistest külgedest, mis olemas teistelgi organismidel peale inimese. Niisiis, bioloogia on ala, kus võiks koos eksisteerida nii loodus- teaduslik kui tähendusteaduslik lähenemisviis.

Märgiprotsesside uurimine loomadel – zoosemiootika – kujunes välja juba 1960ndail aastail, üheks peamiseks eestvedajaks Ungari päritolu ameerika semiootik Thomas A. Sebeok (1920–2001). Üle kõigi elusolendirühmade ulatuvast biosemiootikast kõneldakse sellise nime all aga viimased paarkümmend aastat. Oluliseks tähiseks on M. Andersoni jt. [1984] kollektiivne töö,

mis põhjendas semiootilise läve ulatumist kõigi elusrakkudeni. Uexkülli on aga osutunud semiootilise bioloogia pioneeriks.

Klassikalise morfoloogia, Baerist pärineva arengubioloogia ja etoloogiat rajanud käitumisuuringute ühenduses on Uexkülli arusaamade põhi praegusele lugejale mitte üksnes lummas, vaid ka sillaks, mis haruliseks lagunenud bioloogias eluteaduse tervikut tabada aitab. Järjekindla, organismide omailmade kirjeldamist võimaldava meetodi ülesehitamisel vajas Uexkülli alusmudelit. Selleks on ta funktsionaalne tsükkel – organismi tajuilma ja mõjuilma, tajumärkide ja mõjumärkide ühend, mis ühtaegu on osutunud üldiseks mudeliks märgiprotsessile. Ses ideestikus on elujõud, millest jagub hulgaks loominguks. Uexkülli täielik annoteeritud bibliograafia [Kull, 2001] ilmus ajakirja *Semiotica* temaatilises köites (kd. 134), mis on üleni pühendatud Uexkülli töödele.

Bioloogia ja semiootika kokkupuutes on kujunenud kaks mõneti seotud suunda – bio- ja ökosemiootika.

Märgiprotsesside uurimine eluslooduses on *biosemiootika* valdkond. Sii kuuluvad nii organismidevahelise kommunikatsiooni alased tööd, organismide maailmataju uurimine kui ka organismi siseprotsesside analüüs, sest, nagu Thure von Uexkülli (arstiteadlane, Jakob von Uexkülli poeg, Tartu Ülikooli auctor) on väitnud, “organismi keha on semiooside võrk” [Uexkülli jt, 1993: 9].

Semiootilised protsessid algavad sealt, kus keemiliste ja füüsikaliste suhete kõrvale ilmuvad koodid. Koodid on vastavused, mis ajalooliselt fikseerunud — üldistest loodusseadustest konkreetseid koodi tuletada ei saa. Koos koodidel põhineva käitumisega ilmub sellistes süsteemides individuaalsus, sisemise ja välise, oma ja võõra eristus. Koodide alusel toimuvad protsessid ongi märgiprotsessid ehk semioosid.

Semiootiline lähenemine võimaldab vaadata paljusid bioloogia põhiküsimusi aste sügavamalt. Näiteks biosüsteemaatika, mis on üritanud leida võimalikult head viisi organismide klassifitseerimiseks, on rühmitamise kriteeriumide otsimisel lähtunud ikka inimese vaatepunktist. Ometi on bioloogilised liigid kujunenud selle alusel, keda erinevad organismid ise omaks või võõraks peavad. Vastavalt on võimalik süsteemaatika, mis analüüsib seda, kuidas organismid ise end eristavad. Niisugune “seestpooltvaade” organismide elule ongi üks tähtis võte, mida biosemiootika võimaldab ja mille jaoks ta pakub meetodid. Maailma asjad saavad ju tähenduse ikka organismide omailmas, nende vajaduste, mälu, äratundmise ja interpreteerimise protsessides.

Praegusaegse biosemiootika suundi kajastab näiteks ajakirja *Sign Systems Studies* hiljutine number (kd. 30.1, 2002). Eesti keeles on selleteemalisi kirjutisi ilmunud teoreetilise bioloogia kevadkoolide kogumikes (nt. *Scholia biotheoretica* kd. 22, 1996, mille teemaks oli “Elu keeled”).

Teistsugused küsimused on seotud sellega, kuidas inimesed interpreteerivad loodust, milline on looduse koht eri kultuurides ja eri ajastutel. Selle probleemistikuga tegeleb *ökosemiootika*, millele ülevaate pakub ajakirja *Sign Systems Studies* vastav erinumber (kd. 29.1, 2001). Eesti keeles leidub selleteemalist raamatus “Tekst ja loodus” [Maran, Tüür, 2000].

Ökosemiotika üheks teesiks on, et tänapäevaste keskkonnaprobleemide lahendamiseks – ja neist päris arusaamisekski – ei piisa loodusteaduslikust lähene- misest, sest keskkonnaprobleemide tekkimine tuleneb suuresti kultuuris toimu- vast. Bio- ja semiosfääri põiming on see, kus oleme meie ja kõik teised loomad; ehk, nagu T. A. Sebeok väitis, bio- ja semiosfäär ongi üks. Mismoodi inimkeel, keelega seotud käitumine, sümbolite ilmumine looduse märkide sekka, mõjustab looduses toimimise viisi ja tekitab ta ümbertegemisetakte, see saab arusaadavaks inimökoloogia ja semiootika koosmõistmise kaudu.

Usun, et semiootika, see “21. sajandi füüsika”, nagu Roland Posner (Rahvusva- helise Semiootikaassotsiatsiooni president Berliini Tehnikaülikoolist) väidab, võib tõepoolest pakkuda olulisi võtmeid eluprotsesside mõistmise teel.

## KIRJANDUS

Anderson, M., Deely, J., Krampen, M., Ransdell, J., Sebeok, T.A., Uexküll, T. von. 1984. A semiotic perspective on the sciences: Steps toward a new paradigm. *Semiotica*, 52, 1/2, 7-47.

Emmeche, C., Kull, K., Stjernfelt, F. 2002. Reading Hoffmeyer, Rethinking Biology. Tartu: Tartu University, 79 p.

Kull, K. 1998a. On semiosis, umwelt, and semiosphere. *Semiotica*, 120, 3/4, 299-310.

Kull, K. 1998b. Baerian biology: Evolution by means of organisms' inter- pretation. In: Farré, G.L, Oksala, T. (eds.). *Emergence, Complexity, Hierarchy, Organization*. Espoo: Finnish Academy of Technology, 197-200.

Kull, K. 1999a. Biosemiotics in the twentieth century: A view from biology. *Semiotica*, 127, 1/4, 385-414.

Kull, K. 1999b. Towards biosemiotics with Yuri Lotman. *Ibid.*, 115-131.

Kull, K. 2000. Trends in theoretical biology: the 20th century. *Aquinas*, 43, 2, 235-249.

Kull, K. 2001. Jakob von Uexküll: An introduction. *Semiotica*, 134, 1/4, 1-59.

Maiväli, Ü. Kull, K.; Möls, T. (toim.) 1996. Elu keeled. *Schola biotheoretica*, 22. Tartu, 114 lk.

Maran, T. Tüür, K. (toim.) 2000. *Tekst ja loodus*. Tartu: Eesti Kirjanduse Selts, 170 lk.

Nöth, W. 1998. Ecosemiotics. *Sign Systems Studies*, 26, 332–343.

Oelschleger, M. 2001. Ecosemiotics and the sustainability transition. *Sign Systems Studies*, 29, 1, 219-236.

Randviir, A. 1999. Semiootika – 21. sajandi füüsika. *Sirp*, 22. okt.

Sebeok, T.A. 1972. *Perspectives in Zoosemiotics*. The Hague: Mouton, 188 p.

Sebeok, T.A 1998. The Estonian connection. *Sign Systems Studies*, 26: 20-38.



Sebeok, T.A.; Umiker-Sebeok, J. (eds.). 1992. Biosemiotics: The Semiotic Web 1991. Berlin: Mouton de Gruyter, xii+498 p.

Uexküll, J. von. 1921. Umwelt und Innenwelt der Tiere. 2te Aufl. Berlin: J. Springer, 224 S.

Uexküll, J. von. 1928. Theoretische Biologie. 2te Aufl. Berlin: J. Springer, 253S.

Uexküll, J. von. 1940. Bedeutungslehre. [Bios, Abhandlungen zur theoretischen Biologie und ihrer Geschichte sowie zur Philosophie der organischen Naturwissenschaften. Bd. 10]. Leipzig: J. A. Barth, iv+62 S.

Uexküll, J. von. 1982. The theory of meaning. *Semiotica*, 42, 1, 25-82.

Uexküll, T. von, Geigges, W., Herrmann, J. M. 1993. Endosemiosis. *Semiotica*, 96, 5-51.