

EESTI VABARIIGI TEADUSPREEMIAD

2013

TALLINN, 2013

Richard Villems (vastutav toimetaja)
Riigi teaduspreemiate komisjoni esimees

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

Raamatu kujundamisel kasutati laureaate diplomi ja medali fotot
ning kätteandmisel 24.02.2013 tehtud fotosid



Laureatide diplomid ja medalid üleandmise ootel
2013. aastal Eesti Teaduste Akadeemia majas ...

SISUKORD

Richard Villems

Saatesõna 6

Maie Kalda

teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest
FILOLOOGIKS VÄLISTAMISMEETODIL 8

Enn Mellikov

teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest 22

Mikhail Brik

teaduspreemia täppisteaduste alal uurimuste tsükli
“Ab initio and semi-empirical modeling of physical properties of pure
and doped functional materials ” eest
PUHASTE JA LEGEERITUD KRISTALLIDE
FÜÜSIKALISTE OMADUSTE TEOREETILINE KIRJELDUS. 36

Jaanus Remme

teaduspreemia keemia ja molekulaarbioloogia alal uurimuste tsükli
“Ribosoomide biogenees ja funktsioneerimine bakterites” eest
VALKUDE BIOSÜNTEES JA SELLE UURIMINE TARTUS 56

Tarmo Soomere

teaduspreemia tehnikateaduste alal uurimuste tsükli
“Merelt lähtuvate ohtude kvantifitseerimine ja minimeerimine
Läänemere ranniku kontekstis ” eest 64

Jaan Eha, Mihkel Zilmer

teaduspreemia arstiteaduse alal uurimuste tsükli
“Südame- ja veresoonkonna siirdemeditsiinilised uuringud” eest 116

Peeter Hõrak

teaduspreemia geo- ja bioteaduste alal uurimuste tsükli
“Immuunfunktsioon ja oksüdatiivne stress loomaökoloogilises
kontekstis ” eest 124

Veiko Uri

teaduspreemia põllumajandusteaduste alal uurimuste tsükli
“Produktioon, süsiniku akumulatsioon ning lämmastikuringe
kiirekasvulistes lehtpuupuistutes” eest 134

Rainer Kattel

teaduspreemia sotsiaalteaduste alal uurimuste tsükli
“Innovatsiooni- ja majanduspoliitika areng ja juhtimine Kesk- ja Ida-
Euroopa riikides 2000ndatel aastatel” eest
EESTI MAJANDUS- JA INNOVATSIOONIPOLIITIKA 2000ndatel. 148

Andres Ivauri

teaduspreemia humanitaarteaduste alal teadusmonograafia
“The Migration Period, Pre-Viking Age and Viking Age in Estonia”
eest
HIRMUS NÄLJAHÄDA EESTIS JA NAABERALADEL
AASTATEL 536–537 170

Vabariigi teaduspreemiate komisjoni koosseis 195

SAATESÕNA

Richard Villems

Kogumikku võib nüüdseks tõepoolest kutsuda traditsiooniliseks, kui võrd käesolev on teaduspreemiatele pühendatud sarja 17. köiteks.

Saatesõnas, mille kirjutasin 2008. aasta teaduspreemiate kogumikule (www.akadeemia.ee; vt “teaduspreemiad”), esitasin väikese tabeli Eesti teaduse nähtavusest enimkasutatavas andmebaasis, milles ära toodud kirjutised on pärvinud südamliku nimetuse ‘siisikesed’. Vahemik kattis aastad 1980–2008. Sedavõrd pikkade aegridade jälgimine on hingele kosutav – silmnähtavalt jõuline kasv nii artiklite arvu kui neile kogunenud viidete osas. Meenutades selles mõttes vanemale põlvkonnale n-liidu aegseid statistikaaid, kus võrdluse algpunktiks olid sageli Vene impeeriumi andmed aastast 1913 – valimisse toodud näitajate juurdekasv oli tüüpiliselt kümnetes kordades, samas kui võrdluseks toodud USAs need paremal juhul olid kolmekordistunud. Tuletan meelde – Eesti (ENSV) aadressiga rahvusvahelisi artikleid (täpsemalt – kirjeid andmebaasis) ilmus 1980. aastal 160 ja aastaks 2008 oli see jõudnud arvuni 1589 (neist *ca* 1050 *articles*).

Artiklite koguarv on kõige otsesemas tähenduses ekstensiivse arengu parameeter. Nagu kolleeg Allik põhjalikuma, paljusid riike haarava analüüsi põhjal juba mõne aasta eest näitas, ei pruugi siisikikeste koguarv sugugi käia koos riigi teaduse rahvusvahelise nähtavuse võrdväärse kasvuga. Meil Eestis jätkus publitseerimise kiire kasv aastani 2010. Kõige viimastel aastatel paistab tempo mõnevõrra aeglustuvat, mis pole iseenesest ilmingimata negatiivne nähtus. Samas on ‘Eesti fenomen’ siin kardinaalselt erinev Alliku poolt Leedu kohta tähendatule: viidatavus on meil tõusnud märksa kiiremini kui artiklite arv. Alljärgnev väike tabel summeerib *Word of Knowledge*’is (Thomson Reuters) nähtava teadusliku produktsiooni kolmeaastase sammuga ja toodud viidete arv näitab, kui mitu korda on neid töid just selle kolmeaastase perioodi jooksul viidatud. Seda ei tohi muidugi segi ajada sel perioodil ilmunud teadustööde ‘eluaegse’ viidatavusega, mis selgub alles paljude aastakümnete möödudes. Lihtsalt huvi pärast: praeguseks on 2001–2003 ilmunud artikleid viidatud mitte *ca* 3600 (vt andmeid), vaid 37298 korda – üle kümne korra enam.

Vahemik	Kirjeid ¹	Viiteid	Suhe ²
2001–2003	2491 (1810)	3587	1,44
2004–2006	3228 (2306)	5764	1,79
2007–2009	4664 (3230)	9343	2,00
2010–2012	5606 (4310)	18216	3,25

¹ Sulgudes toodud arv vastab kirjetele, mida andmebaas kvalifitseeruvad kui *articles*.

² Siin on allakirjutanu läinud lihtsamat teed – suhe on leitud kui viidete arv jagatud kõigi kirjetega.

Seega on tosina aasta jooksul enam kui kahekordistunud artiklite koguarv, kuid sellega on kaasnenud midagi hoopis olulisemat – viidatavuse selge ennakasv. Olen sellest kunagi juba ettevaatlikult kirjutanud, kuid nüüdne, märksa pikem aegrida, on igati representatiivne.

Samas on arusaadavalt huvitav selgitada, kust pärineb Eesti kaasautorlusega teaduse viidatavuse sedavõrd jõuline tõus? Palgad on meil ju endiselt keskpärased, teadlaste arv pole samuti hüppeliselt tõusnud. Sedalaadi süvaanalüüs on tegemata, sest et neil teemadel kirjutajatele on teaduse bibliomeetria esmajoonel hobiks põhitegevuse kõrvalt, samas kui analüüs nõuab süvenemist, tööhüpoteeside püstitamist jne, jne. Puudutavalt tööhüpoteese, pakuks välja kahte: a) viimase tosina aasta jooksul toimunud ulatuslik uue raha sissevool teadusesse, mis on küll olulisel määral kanaliseerunud taristu (üsna pretseedendituks) edendamiseks, kuid siiski ka 'teaduse enda tegemiseks'; b) eriti just viimase perioodi trend teaduspublitseerimises, mis on Eesti teadlaskonnale hästi sobinud. Pean silmas nn 'konsortsiumilaadsete' publikatsioonide massilist teket. On teaduslikke probleeme, mille olemus ei pruugi olla ilmtingimata tapvalt keeruline, kuid nende uurimine ei ole võimalik ilma massiivse rahvusvahelise koostööta sadade, aga kohati ka tuhandete teadlaste vahel. Piisab sellest, kui avada andmebaas, trükkida sisse aadress 'estonia', sisestada otsingusse ajavahemik 2010–2012 ja heita pilk kümnele enimviidatud artiklile – need on eranditult konsortsiumiartiklid – kolm CERNi lipu all, kuus inimgenoomikast ja üks väiksemalt konsortsiumilt, mis sisaldas üht TÜ aadressiga teadlast, koondades taimejuure molekulaargeneetika uurijaid.

Need olid tööhüpoteesid ja kindlasti on veel mitmeid muid olulisi põhjusi. Ja päris kindlasti ei ole mingit põhjust pidada ühtsorti teadust teisest paremaks, samuti mitte halvemaks. Kui võrd on tegemist sissejuhatusega teaduspreemiatele pühendatud väljaandele, lõpetan siiski tõdemusega, et preemiate üle otsustamise juures on meie printsipiibiks mitte bibliomeetria, vaid *peer review* selle sügavamas tähenduses.

Teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest



Maie Kalda

Sündinud 19.06.1929 Väike-Maarjas

1947	Väike-Maarja Keskkool
1956	Tartu Ülikool, eesti filoloogia
1963	filoloogiakandidaat, Eesti Teaduste Akadeemia
1960–1993	Keele ja Kirjanduse Instituudi nooremteadur, vanemteadur
1993–2002	Underi ja Tuglase Kirjanduskeskuse vanemteadur
2003–2009	Eesti Kirjandusmuuseumi vanemteadur
1966	Eesti Kirjanike Liidu liige
1971	ajakirja Looming aastapreemia
1977	Soome Kirjanduse Seltsi välisliige
1977	Nõukogude Eesti preemia ja Smuuli-nimeline preemia raamatu “Kirjandusest ja kriitikast” (1976) eest
1989	ajakirja Keel ja Kirjandus aastapreemia
1991	ajalehe Sirp aastapreemia
2001	Valgetähe IV klassi teenetemärk
2001	Eesti Kultuurkapitali kirjandusauhind esseistika alal raamatu “Mis mees ta on?” (2000) eest
2004	ajakirja Keel ja Kirjandus aastaauhind artikli “Smuuli mütoloogiat. Suur Hall” (2003) eest
2006	Riigivapi IV klassi teenetemärk
2006	ajakirja Looming preemia artiklite “Ülemiste vanakesed”, “Ruudi Rimmel ja “kirjanduselu tegelik parteiline juhtimine”” ja “Raha ja paremad riided” (2005) eest

Varasema teadustöö keskmes on olnud kirjandusmõtte ja kriitika ajalugu: diplomitöö J. H. Rosenplänteri “Beiträge’st” (käsikirjaline), “Jaan Kärner kirjanduskriitikuna (1920–1940)” (1964) ja lühiuurimused esimese Eesti Vabariigi kirjanduselist, -protsessist ja -kriitikast. Akadeemiline “Eesti kirjanduse ajalugu” ilmus 1965–1991 seitsmes köites. Maie Kalda oli kaasautor alates II köitest, mille aineks ärkamisaja kirjandus, ja toimetab kaht viimast köidet, s.o 1940.–80. aastate kodueesti kirjanduse osa. Koguteoses “Eesti kirjandus paguluses XX sajandil” (2008) on tema kirjutatud kirjandusteaduse peatükk.

FILOLOOGIKS VÄLISTAMISMEETODIL

1960. aastate kirjanduse hoogne uuenemine ahvatles kirjandusteadlasi osalema selle kriitilises mõtestamises. Minu artiklitest töid eestimaisesse luule- ja novelliteooriasse värskendust “Luule ja sõna”, “Noor autor ja argipäev” jt. Kirjastuses “Eesti Raamat” oli välja töötatud nn väikse kriitikaraamatu formaat, millele jäid minu üllitised truuks ka uue EV ajal: “Mis mees ta on?” (2000), “Mis loom see on?” (2004), “Debora ja vennad” (2010). Minu kirjutatud gümnaasiumiõpikust “Tuglasest Ristikivini” läks vaja kahte trükki (1997 ja 2002, Koolibri). Need on uue vabaduse ajastu publikatsioonid, kus ideoloogilised piirangud olid kaotanud kehtivuse, akadeemilisuse mõiste avardunud ja autorid üles näitamas järjest suuremat riskijulgust nii temaatikas ja meetodis kui ka esteetikas ja väärtushinnangutes. Sajandivahetuse märksõnadest võib mainida ruumipoeetikat (nt artikkel “Eesti kirjanduslik agul”), folkloorse tüpaaži ja motiivide ülekandeid kirjandusse (“Ülemiste vanakesed”, “Smuuli mütoloogiat. Suur Hall”,) või ka loomtegelaste funktsioone klassikute teostes (“Mis keeles kass naeratab?”, “Tammsaare, Koorti ja Wiiralti loomad”). Mu viimases raamatus, Debora Vaarandist, tuleb nähtavale isiku- ja loominguloo kulg läbi inimsuhete võrgustiku ja sootsiumi pingete.

KODU JA LAPSEPÕLVE KESKKOND VÄIKE-MAARJAS

Väike-Maarja on hariduslembene paikkond, mille 1873. aastal asutatud kihelkonnakooli kuulsus ja mõjuareaal ulatus XIX sajandi lõppkümnendil peale Lõuna-Virumaa ka Põhja-Järvamaale. Eesti Vabariigi rajamisega samaaegu kasvas ~ kasvatati see kool gümnaasiumiks. Nii nagu Väike-Maarja keskkool *resp.* gümnaasium loeb ennast kihelkonnakooli jätkuks ning õigusjärglaseks, võin mina ennastki määratleda näiteks Anton Hanseni kaasvilistlaseks. Peamiselt just kooli tõttu on Väike-Maarjal ühe eesti kultuuris tublilt toiminud transiitjaama tähendus.

Olin veel sündimata, kui seda kooli, nagu kõiki teisigi Eesti maagümnaasiume ähvardas Haridusministeeriumi poolt 1927. aastal sulgemise oht. Kohalik rahvas võttis asja enda kätte, tegusalt, energiliselt, realiteeditundega, ja ei lasknud sel juhtuda. Väike-Maarja mõjupiirkonnas üles kasvanud Kersti Merilaas ütles teadvat kaht juhtumit, kus noor inimene lõpetas oma elu, kui tal ei lastud edasi õppida, samal ajal kui siinmail ei teata mitte ühtegi juhtu, kus seda oleks tehtud ‘romantilistel põhjustel’.

Gümnaasiumi olemasolu tähendas ka, et alevi elanikkonnas oli keskmisest rohkem ülikooliharidusega inimesi. Nemad andsid tooni avalikus vaimu- ja seltskonnaelus, kodu- ja käitumiskultuuris, elulaadis, suhtumistes ja sallivuses, kas või kuulujuttude stiilis ning hügieeniharjumustes.

Minu kodu – küllap tüüpiline maaharilase kodu. Ühepere elumaja, poli-funktsionaalne kõrvalhoone, hästi planeeritud ja haritud aed. Lehm, siga, kanad, kass. Eluruumid üldmuljes elegantsed. Isa oli juba Tartus koolipoi-sina raamatuid ostnud, sealhulgas “Kevade” esitrüki, ja neid tuli kogu aeg juurde. Üheksa-aastaselt minul oli isiklik “Väike entsüklopeedia”. Looming käis aastatellimusega.

Isa Juhan (Johannes Reinhold) Kalda oli Tartu Õpetajate Seminari vilist-lane aastast 1914. Tema õpetajakarjäär jäi lühikeseks, kuus-seitse aastat. Sellele tegi lõpu tbc ja vist määravamaltki sisim äratundmine, et pedagoog-ig töö pole päriselt tema jaoks. Ta olevat öelnud, et “mina ei saa teiselt ini-meselt küsida seda, mida ise tean”. Ja leidiski endale hästi sobiva töö seal-samas oma koolis, nn asjaajaja ametikohal. Ta olevat olnud hea mate-maatik.

Isa suri 1938. Olin kaheksa ja poole aastane, kõige vanem kolmest lapsest. Mu lapsepõlve võib sinnamaale idülliliseks nimetada. Nüüd oli see läbi. Ema leidis tagantjärele siiski ühe lohutuse. Kui isa oleks 1941. aastal elanud, ütles ta, siis oleks meid Siberisse viidud. Isa oli tõepoolest Väike-Maarja aleviku ja Vao valla avalikus ruumis väga populaarne isik. Matuse-fotodelt on näha, missugune rahvamurd teda saatma tuli. Teokas polnud ta mitte poliitikas, mitte kõnepidajana, vaid majandus-, haridus- ja muude ühisasjade praktilisel ajamisel. Näiteks gümnaasiumihoone ehitamisel osteti ära Kehras pooleli jäänud koolimaja, toodi see raudteevagunite ja hobu-veokitega kohale ja pandi siin uuesti püsti. Ümberkaudsetes külades võis näha mitmeid ja mitmeid isa projekteeritud eluhooneid.

Emal Made (Madde) Kaldal on omaette märksõna “Eesti kirjanike leksi-konis”. Pärit taluperest, kunsti- ja vaimuandeid rohkem kui üks. Mängis Harju- ja Virumaa näitelavadel. Kirjutas oma ema isikuloo etnograafiliseks jutustuseks “Seitse tähte taeva Sõelas”, millest sai 1980ndate algul haritud naiste bestseller. Tal oli ka pedagoogi- ja disaineriannet, hea aednikukäsi ja ainulaadselt ilus käekiri, mis aitas tal võita kohakonkursse ametiotsinguil. Samal 1919. aastal, kui ta lõpetas kuueklassilise kooli, asutati Tallinna Õpetajate Seminar. Kodutalu oleks rahastamisega toime tulnud, paraku sel-les paikkonnas (peaaegu Tallinna külje all!) valitses täiesti ühene arusaam talutütre karjäärist. Ema lahkus kodunt ja Harjumaaltki, töötas vallaamet-nikuna ja läks peatselt mehele. Mitte ainult mu isa, vaid ka teised selle maja kodakondsed olid haritlased. Ema tundnud ennast nende kõrval mühkami ja matsina. Isa olevat ta kõnest Harju murde jooned armutult välja rookinud. Minu muljete järgi oli tal abielu alguse aegsest ‘alaväärsustundest’ jäänud selline jälg, et ületähtsustas inimestele meeldimist, ‘kena inimese’ mainet. Ja suutis seda ka ise olla. Mina hakkasin kuskil teismeliseea keskel vastu turtsuma: miks peab püüdma näida kenam, kui tegelikult ollakse? Olen siiski kindel, et me konfliktid mahtusid ära ema-tütred normaalsete suhte-

mallide alla ega olnud neis midagi 'freudistlikku'. Kõige tähtsamaks minu kui tulevase kirjandusuurija professionaalsuse seisukohast, arvan, oli ema andekus. Kes võtab ette uurida kauneid kunste, peab julgema ka otsustada teose *resp.* loojaisiku andekuse üle. Aga kuidas peab uurija suutma tuvastada kunstiandekuse sädeme, st niisuguse nähtuse olemasolu, mida tal endal ei ole? Kooselu andeka inimesega võimaldab tähele panna vähemalt sekundaarseid andekuse tunnuseid. Minul mu ema (ja poja) andeid pole olnud. Mõõnan täiesti nende õigust ilmutada kärsitust minu kohmerdamiste korral. Nemad, andekad, omandavad kõike, ka õpitavaid oskusi teistest palju kiiremini. Emaga ühist oli see, et lugesime palju. Tal polnud raskusi hea ja halva kirjanduse äratundmisega ning ta suunas vastavalt ka minu lektüüri, eriti eesti klassika lugemist.

VARASEM KIRJANDUSHUVI JA LAPSEPÕLVE LUGEMUS

Ei mäleta, et mulle oleks lugemist õpetatud. Sain selle märkamatuks selgeks, gooti kiri kaasa arvatud. Fraktuuris trükiti 1930ndail veel lasteraamatuidki, samuti mitut ajalehte. Selle oskuse eest sain elu esimese komplimendi – onu Hennult (isa vennalt), kes oli Riisipere lastekodus õpetaja-kasvataja. Ütles, et tule õpeta meie omadele ka, see tähendab lastekodu kasvandikele, kes olid kooliskäijad, minust vanemad. Minu esimeste isiklike raamatute seas olid isa kingitud 'nurmikud', st Madis Küla-Nurmiku koostatud lugevikud. Sealt sain antiikmütoloogiat: vanakreeka jumalate süsteemi, Heraklese vägiteod, Odysseuse seilamised. Muinasjuttudega oli mu suhe jahe, see-eest NB! loomajutud eesotsas Peterson-Särgava narmendavaks loetud Reinuvader Rebasega. Hindrey lihtsakoeline, kuid toimiv nimelooming. Onu Henn tõi ameerika lastekirjanduse klassikat. Külaskäikudel ei huvitanud mind teise pere laste mänguasjad, vaid otsisin üles raamatud. Kodus kadusin, raamat kaasas, ema käskude-korralduste eest suure pärnapuu otsa, talvel pesukapi taha või voodi alla.

Lastekirjandus kadus mu lektüürist siiski üsna ruttu. Esimene algusest lõpuni loetud pärisraamat oli "Kevade" (nagu olevat enamikul eestlastel). Olin viie ja poole aastane, liiga noor ja rumal, et osa saada Lutsu tüpaažist ja inimsuhetest. Elamusi andsid hoopis Tootsi kärisevad loitsud ja häälikuseaded: kivi-rünta-punta-änta-paravänta, seiskärr, tamasseri rauad. Dialoogides komistasin tundmatu argikeelendi või murdesõna tähendusele, fikseerisin trükivigu, millest "Kevade" esitrükkis puudust polnud. Aastaid hiljem sain teada, et mõne inimese silm tuvastab sõnas vea veel enne, kui ta teab, mis konkreetselt selles kohas valesti on, mis täht puudu või üle. Niisugune vaataja hõlmavat korraga suuremat tähtede plokki kui tavalise silma omanik. Sellist pilku märkasin varakult endalgi olevat. Esimesed prillid sain kaheksakümne aastaselt (mu üks silm oli kergelt lühi-, teine kaugelenägev) ja sinnamaani olin ka suuteline korrektoori puhtaks lugema. Aga ajakirjan-

duše pürgijal sellest annist abi ei ole. Kui mulle pakutaks võimalust mõni oma elujärk välja vahetada, siis oleks see 1950ndate algus Vao masinatraktori jaama poliitosakonna lehe “Kolhoosi Tõde” toimetuses. Ma ei teeks seda isegi mitte niivõrd stalinismi mõistusevastasuse kui iseenda ajakirjanikuks kõlbmatuse pärast.

Võisin olla kümne-aastane, kui ema võttis suvises raamatupõuas riulist “Tõe ja õiguse” I köite ja otsis üles Vargamäe laste tekstikohad. Need, kus Andrese tütre ja Pearu pojad isade salaja aiaaugul kohtamas käivad. Eesperes ehitatakse, tüdrukud toovad puuklotse ja muud poistele ihaldusväärset. Varsti oli siiski terve köide loetud, midagi üle mõistuse eakohatut ei ilmnenu, vajadusel sain emalt lisaseletusi. Nüüd polnud Tammsaarel enam minust pääsu ega minul temast. Köidete lugemise järjekorra määras ema sisulistel kaalutlustel: II – Mauruse kooli kummastused, Indrek ja Ramilda, V – uuesti Vargamäel, noored tegelased, IV – suhted ja seltskond, Indrek ja Karin, III – poliitika, kõige igavam köide. Kui mõtlen oma hilisematele tõdemustele ja *Wertung*’itele – võibolla tõesti juba siit sain selle hoiaku, et eksistentsiaalsed väärtused ja probleemid on inimese elus sügavamalt määravad kui sotsiaalpoliitilised tingitused. Tänapäeva eesti kirjandusmõtte aktivistid tähtsustavad vastupidi esmasena kirjaniku poliitilist maailmavaadet ja eksplitsiitseid väärtushinnanguid punase-valge teljel. Asi pole üksnes selles, et rahvusluse aate nimel platsi puhtaks lööja satub ühtsamasse mõtlemistüüpi inimvaenuliku bolševismiga. Poliitika on ise, oma olemuses, liiga valjuhäälnel ja ühetähenduslik, et olla kirjanduse jõujooneks või sisukandjaks.

Esimesest sõjasuvest peale olin ema käealune kõigis majapidamis-, aia- ja heinatöodes, Ta õpetas mu korralikult välja, sealhulgas vikatit ja kahemehesaagi käsitsemata. Ta töötas sellal ühtlasi raamatukoguhoidjana ja saatis mind ühtelugu ennast asendama. Muidugi võisin nüüd lugeda kõike, mis huvitav tundus. Tagantjärele olen püüdnud ära arvata, miks lugesin rohkem algupärast kui tõkelist uudisproosat. Olid ju olemas Nobeli laureaate ja Põhjamaade sari. Asi oli ehk 1930ndate tõlkekirjanduse keeles: see oli üldjuhul eesti kirjanike omast kehvem. Praegu on asjalood vastupidiseks pööranud ja me ei jõua küllalt kiita professionaalsete tõlkijate virtuooslikkust ning tööeetikat. Siis aga – puine, hooletult kiirustav, kohmakate tõlkevastete ja võõrapärase süntaksiga. Mõttepause tuli pidada isegi ainult lausungi elementaarseks mõistmiseks. Et seesugust teksti küündimatuks hinnata, piisas loomulikust keeletundest.

HARIDUSTEE, ERIALA VALIK

Mind pandi kohe II klassi, isa initsiatiivil ja ettevalmistusega. V klassis algasid klaveriõpingud. Ema oli märganud, et mul ‘on kuulmist’ – otsisin ksülofonil lauluviisid üles –, ja ostis pianino (Sprenk-Läte; viimase osa-

maksu ülekanne sai tehtud just enne punaväelaste ja vene rubla tulekut). Olin neli aastat väga tunnustatud klaveriõpetaja Alice Kansa hoolas õpilane. Ma polnud teab mis andekas, aga üks tugev külg siiski oli, nimelt tehnika, sõrmede kiirus. Esinema pandi kõikvõimalikel aktustel ja koolipidudel – Mozart, Beethoven, Schubert, Chopin, Jürme jt. Ei pääsenud ka tantsuks mängimisest. See oli nürimeelne, jäin nn levimuusikaga eluks ajaks pahuksisse. Gümnaasiumi lõpuklassist peale olin Väike-Maarja kirikus orelimängija. Klaverioskuste baasil tulin toime, üsna kiiresti õppisin ära ka pedaalid. Ühtki vaba nädalapäeva enam polnud, aga mulle maksti rahapalka ja see oli perekonnale eluliselt tähtis. Võidukas Punaarmee oli Eestis tagasi. Igasugu partorgidele ja komsorgidele ‘usukultuse teenijad’ muidugi hästi ei meeldinud, aga nende kõnetamisel oldi minu kogemuse järgi vaoshoitum kui kirjanduse ja kirjanikega suheldes.

Proua Kansa pidas plaani viia mind kellelegi konservatooriumi õppejõule ette mängima, sel eesmärgil õppisin ära nõudliku eeskava. See plaan jäi katki, Kansad lahkusid Väike-Maarjast sügisel 1944. Esinemised jätkusid veel mõnda aastat, viimati Tartus üliõpilaselümpiaadil. Tallinna aspirantuuri tülles sai minust kindel kammer- ja sümfooniakontsertidel käija. Ent kas süvamuusikaline koolitus mõjutas kuidagi positiivselt ka mu tegelikku spetsialiseerumist? Pole ehk väga vale postuleerida, et lähedus klaveriga, mu igapäevased kohusetruud ja samas ikkagi täiesti vabatahtlikud harjutamistunnid noore teismelise eas arendasid, süvendasid, laiendasid vastuvõtlikkust ka teistele kunstiliikidele, sealhulgas kirjandusele. Teatrilimbus püsis läbi 1960ndate lõpu uuendusliikumise ja kinnistus lõpuks balletile.

Gümnaasiumi esimeses klassis oli meid 45, viimases – 21. Tüdrukuid 9, poisse 12. Meie seas oli kaks tulevast maalikunstnikku, neist teine ühtlasi luuletaja. Üks, kooliteatri täht, koomik, läkski näitlejaks õppima. Teisel oli imeilus bassihääl, millega luges Suitsu, Liivi ja Puškinit. Oli kaks säravat matemaatikut. Koolilõpumedaleid saime ühe hõbedase ja kaks kuldset, nendest teise mina, aga niipalju tark olin küll, et teada: anne on unikaalsem kui väga headega lõputunnistus. Mitmel meie poisil oli ka hea lauluhääl. Klassi hümniks või signatuuriks kujunes Gustav Suitsu sõnadele loodud “Ühte laulu tahaks laulda”. Isamaalisuse demonstratsioone ega muid ohtlikke aktsioone meilt ei tulnud, *in corpore* keeldusime astumast komsomoli. Kui lõpuks üks poiss siiski läks, talle pakuti kooli komsorgi palgalist kohta, panid teised poisid ta boikoti alla ega halastanud veel laulva revolutsiooni ajalgi – hakkasime siis uuesti koos käima.

Meie lennus (1947) lõpetanuist läks 80% kohe edasi õppima. Mina olin mahajääjate seas ja see oli väga kibe tunne. Ise oleksin ehk stipendiumist ära elanud, aga vennad olid veel koolipoisid ja pere rahapuudus krooniline. Ema korraldas mu mineku kontoritööle, raamatupidajaks. Vaevalt kuu aega seal olnud, komistasin NKVD-le, kes uuris mingit musta äri afääri. Mind

lükati ette, tõlgiks, ettekäändel, et olin värskelt vene keele eksami andnud. Afäär oli varsti ammendatud, aga siis tehti mulle ettepanek, eesti keeles ja igati viisakas vormis, edaspidiseks koostööks. Selgroog tõmbus külmaks. Ma ei saa, ütlesin, ma ei sobi teile ideoloogiliselt, sest käin juba teist aastat iga pühapäev kirikus orelit mängimas. Kutsuja võis olla selle ametkonna ebatüüpiline esindaja, rahuliku ilme ja olekuga. Ta ulatas paberilehe ja ütles, et pangu ma oma jutt nüüd kirja kah. Kui see tehtud, tuli karm hoiatus: ma ei tohi sellest jutuajamisest mitte kellelegi rääkida. Rohkem kontakte mul selle asutusega pole olnud, ka mitte '40 kirjale' allakirjutamise puhul 1980. Mu toonane eksprompt vastus osutus nähtavasti õnnelikuks päästvaks leiuks.

Medaliomanike soodustus pääseda sisseastumiseksamiteta edasi õppima kehtis ka järgmisel aastal pärast küpsustunnistuse saamist. Seega 1948. suvel oli mul viimane aeg eriala ära otsustada ja paberid Tartusse toimetada. Kaugõppeosakonnas olid valida filoloogia, matemaatika ja juura. Matemaatikaga olin kogu kooliaja heas läbisaamises olnud, algebra ja stereomeetria olid lausa meeldinud. Kuid meie klassi esimatemaatikute elegantsed lahendid olid mulle koha kätte näidanud. Juura – ei. Jäi filoloogia. Saksa keel? Väike-Maarja Gümnaasiumis saadud grammatikapõhi ja mõlematpidi tõlkimisoskus olid tublid, aga õppekirjandus, harjutustunnid, konsultatsioonid jne kättesaadavad ainult Tartus või Tallinnas elavale kaugõppijale. Vene filoloogiat ei mäleta oma plaanides esinenud olevat. Õigust öelda olidki mu eeldused võõrfiloloogia stuudiumiks pigem keskpärased kui paljulubavad. Mulle ei hakanud võõrkeeled külge 'õhust', praktilise kasutamise teel, vaid omandasin neid lektüüri ja grammatilise süsteemi vahendusel. Kirjalikud oskused tulid kergesti kätte, aga 'eesti aktsent' ei mõelnudki kaduda, ei intonatsioonist ega kõnemoonustusest. Eriti mis puutub vene keelesse; saksa keel sobis paremini, ilma et ma sellal oleksin teadnud, kui suur oli saksa keele roll eesti kirjakeele kujundamisel *resp.* tegemisel.

Kaugõppe sortimendis võis olla veel ka ajalugu, aga sellest nagu teistestki 'jutustavatest ainetest' ei olnud ma kogu kooliaja elavamalt huvitatud olnud. Pealegi kompromiteerisid vene keelest tõlgitud ajalooõpikud seda ainet lootusetult juba esimestel pärastõja-aastatel.

Siinkohal üks teoretiseering. Saan aru, et kahtlane, ent ta kripeldab hingel sellegipoolest.

Kui meie kursuse rahvas viiskümmend aastat pärast ülikooli lõpetamist kokku tuli, pani kursusevanem ette, et igaüks räägiks, mis asjaoludel või kaalutlustel ta valis just eesti filoloogia. Mitu meie seast arutlesid pikemalt, miks ei läinud matemaatikasse. Ühel kursusevonnal oli alternatiiviks ajalugu. Ühel kursuseõel ei lastud jääda juurasse poliitilistel põhjustel. Samas mitte ainust bioloogia või geograafia mainimist. Miks nii? Kas mitte selle-

pärast, et need erialad vajavad teistsugust mälu- ja mõtlemistüüpi? Tahan öelda, et filoloogias, ja muidugi veel rohkem matemaatilistes ainetes saab mõndagi kätte tuletamise teel, et seal tulevad appi süsteemsus ja abstraksioon ning et isiklikult läksin neile eksamitele palju kindlama enesetundega kui sellisele, kus polnud pääsu suurte ainekogumite päheõppimisest. Kirjandus on mittenaturaalne ka selles mõttes, et ei apelleeri vahetult retsi- piendi meeltele (nagu visuaal- ja audiokunstid), vaid laotab ette 'ainult' sõnade ja trükiridade halli kribuga kaetud pinna.

MILLISEID EELDUSI OLII MUL EESTI FILOLOOGIAKS?

Kui olin IV klassis, rääkis ema, et meie õpetaja olevat öelnud: Maie-Liisil on keelevaist. (Ei teinud etteütlustes vigu. – Ristimisel sain kaks eesnime, teise võttis nõukogude pass ära.) Ega mul hiljemgi õigekirjutuse ja grammatikaga raskusi olnud. Kõik seitse käändkonda ja neli pöördkonda oma kümnete tüüpsõnade ja eranditega jms tundus kerge ja lihtne. Samuti ülikoolis Gerda Laugaste perfektselt dikteeritud tekstide ümberpanek fonetiliselt transkriptsiooni. Suhetes kirjandusega tundsin aga juba üsna varakult materjali vastupanu. Näiteks kavapunktid: algklassides oli rutiinseks kodutööks lugemispala liigendamine ja saadud sisuüksuste vahepealkirjastamine. Siin tuli lühikese katva formuleeringu leidmiseks omajagu pead vaevata. Või näitelause moodustamine, illustreerimaks vastõpitud õigekeel- susreeglit – olen alati imetlenud keeleteadlaste sellealast sädelevat omaloo- mingut nii käsiraamatutes kui ka puhtakadeemilistes publikatsioonides.

Terve keskkooliaja olin Juta Inglismi õpilane, tema omakorda oli olnud Gustav Suitsu õpilane. (Olen temast veidi pikemalt kirjutanud ajakirjas Kooliuuenduslane 1995, nr 11/72.) Nendel aastatel, sõja- ning järel-eesti ajal – see on Madis Kõivu termin, minu arvates hea termin – oli veel võimalik anda ja saada professionaalset, politiseerimata kirjandusõpetust. Juta Inglismi respektisid ja ta ainet õppisid korralikult ka matemaatikud ja sportlased, ja tulevane insener, kes pidas ennast kirjandite alal lootusetuks kolmemehiks, kirjutas TPI-sse sisseastumise kirjandi puhtale viiele.

Juta Inglis õpetas kirjandust ja kirjanduslugu teoste kaudu. Lugemike pe- riood oli seljataga, üleminek kronoloogiapõhisele ainekäsitlesele läks suju- valt. Kirjanike elulugudest ta omaette numbrit ei teinud. Andis küll mne- motehnilisi võtteid, nagu: Koidula (sündis) 1843 + (elas) 43 = 1886, Jakob- son 1841 + 41 = 1882, Kreutzwald Võrus 1833 - 77 = 44 (arvan, et just tema õpetas mind kasutama süsteemset mälu). Neid aastaarve, mis tuli ilm- tingimata pähe jätta, oli vähe: 1535, 1739, 1862, 1896. Muusse puutuvast piisas plokki (ajajärgu, voolu) teadmisesest. Läbi teoste eneste õppimine käis meie vaesel ajal, mil õpikuid ega 'kohustuslikku lektüüri' juurde ei trükitud, õige palju ühislugemiste ja referaatidega. Juta Inglis tuli klassi, kolm-neli "Säärast mulki" või "Pisuhända" kaenlas, jagas rollid välja, kom-

menteeris, laskis tagasi võtta jne. "Libahundist" tuli igapäev teha graafilise kompositsiooniskeem. "Kalevipoeg" jagati peatükkide ja tsüklike kaupa ära kümme aasta referendi vahel. Holtzi "Jut on se Koroke, Õppetud on se Iwva" näitel puutusime kokku idüllilise ja struktuuri mõistega (viimast küll terminina veel ei eksisteerinud), Jannseni puhul stiili ja didaktilisusega. Juta Inglis oli kõrgintellektuaal ega lubanud endale ealeski lüürilise arvel tundlemist ega pateetilist ilukõnet. Tegelasajude karakteristikas tuli appi ainult keerulisema filosoofiaga juhtudel. Seega, kokkuvõttes, õpetus oli induktiivne ja analüütiline, suunas õpilasi mõistma kirjanduse kunstiomadusi ja kirjutama temast metateksti; järgis printsiipi, et kõrgema kvalifikatsiooniga isik (õpetaja) ei kuluta ennast madalama kvalifikatsiooniga isikutele (õpilastele) jõukohase töö peale.

TARTU RIIKLIK ÜLIKOOI

Peaaegu iga töö saab endale huvitavaks teha. Ka sellest neljast aastast, mil raamatuid pidasin, hakkas mulle midagi alatiseks külge. Mõned kolleegid on sedastanud mu kirjanduslooliste tööde 'raamatupidajalikkust', kusjuures kord osutab seesugune määrang pedantsusele (mille ausalt omaks võtan), teinekord vastupidi, tunnustab usaldusvärsust. Siis aga, asja sees olles, hakkas väsimus tunda andma. Ravile mitte alluv ekseem piinas mind talviti kõigil neil keskkoolijärgsetel aastatel. Nagu oleks stalinlikest kärnatõbedest veel vähe olnud! Kui pool stuudiumi läbitud, palusin dekanaadilt ajutist katkestust. See kestis jaanuarist 1951 septembrini 1953 ja tähendas ühtlasi, et ma olin filoloogias eemal kirjanduse jaoks kõige mustematel ja tühjematel aastatel. Kellele või millele peaksin selle eest tänulik olema? Seal edasi kuni diplomi saamiseni õppisin statsionaaris. Tudengielu tundus uskumatult kerge. Kuulasin fakultatiivseid loengutsükke (paleograafia, kunstiajalugu, inglise keel), käisin kirjandusringis, treeningutel, kinos, teatris, ja ikka jäi aega üle. Elasin stipendiumist, sellest jätkus isegi raamatute ostuks. (Kirjastus oli käivitanud mitu klassikute seeriat: Kreutzwald, Vilde, Luts, Tammisaare.) Käekella omanikuks sain, kui mulle riigilaenu obligatsioonide kustutusloosimisel õnn naeratas.

Enne oma n-õ akadeemilist puhkust olin teinud, nagu kord ette nägi, veel ühe erialavaliku, nimelt eesti filoloogia sisese spetsialiseerumise. Võimalusi oli neli – eesti keel, eesti kirjandus, rahvaluule, soome-ugri keeled – ja mina ikka veel nõnda rumal, et pidasin eesti keele eriala enam-vähem kattuvaks eesti õigekeelsusega. See ju mu tugev külge, mida seal veel kolm aastat õppida! ja meldisin enda kirjandusse. Kui püüda selle valiku üle objektiivsemalt mõelda, siis – kirjandusteadus tähendas toonases Tartu ülikoolis (nagu mujalgi) kirjanduse ajalugu. Kirjandusteooriat saime natukene esimesel, natukene viimasel kursusel, ja oli kuulda, et keegi kuskil, aga mitte eesti kirjanduse ja rahvaluule kateedris, teeb midagi marksistliku

esteetika nime all. Kirjanduse ajalugu tähendas esiplaaniliselt empiiriaga tegelemist. See sobib minu tunnetustüübiga. Olengi oma töödes eeskätt induktiivne, samas kui teooria on mu manipulatsioonides pigem vahend analüüsi rikastamiseks kui omaette uurimisobjekt. Küll aga oli mul üks üpris auahne unistus: avastada eesti ainekute läbitöötamise teel mingi universaalse kehtivusega teoreetiline seaduspära.

Tartu vaimuelu, sealhulgas kirjanduselu sai Stalini surma järel uskumatult kiiresti hoo sisse. Ülikoolil oli oma suur ja väga elujõuline kirjandusring. Sinna kohisesid 1954. aasta esimesel semestril kokku ning sealt uuesti välja võimsad vabadustuuled. Peeti seeria koosolekuid, kus arutati Keele ja Kirjanduse Instituudi kirjandusloolaste koostatud ja aastavahetusel ilmunud eesti kirjanduse õpikut keskkoolidele. Meie õppejõud Karl Taev ja Juhan Käosaar olid meid semestri jooksul üles keeranud, demonstreerinud tallinlaste faktivigu ja nõmedaid hinnanguid. Nüüd kuulasid naerul nägudega, kuidas me asja edasi ajasime. Auditorium oli pungil täis teiste erialade tudengeid, Tartu kirjanikke, õpetajaid ja muud ärksamast rahvast. Õpikukirjutajate juht, tuntud stalinist Endel Sõgel ilmus kohale tavaliselt mõne oma kaas autori saatel; nende enesekaitse oli aga võrdlemisi saamatu. Sirp ja Vasar ning Looming omalt poolt kajastasid neid arutlusi pikalt ja agaralt. Nõnda osutus minugi 'esimeseks publikatsiooniks' Sirbi ajakirjaniku üleskirjutus sõnavõtust Leberechti illustratiivse sümboolika kohta.

Kursusekaaslased. Meil teati olevat 'halli kursuse' maine. Võrreldes eelmise kursusega, kus tooni andsid toimekad ja sihikindlad kirjandusuurijad Harald Peep, Jaan Toomla, Eerik Teder, olime kahtlemata koduvillasemad. Siiski alates neljandast kursusest ühines meiega Aksel Tamm ja ergastas seminare oma eruditsiooniga selle aja kirjanduspoliitika alalt. Mis hallusse puutub, siis see läks varsti üle. Kui meie generatsioonil kuluski 'stalinliku nooruse' arengupeatusest väljatulekuks rohkem aega, siis seda põhjalikumalt see lõpptulemuses endast maha raputati.

Õppejõud. Kirjanduse eriala tudengitega tegelesid dotsent Juhan Käosaar ja kateedrijuhataja Karl Taev, mõlemad boheemlikku tüüpi. Neid tasakaalustas paari erikursusega noor väga tõsine teadusemees Aarne Vinkel. Taev oli loengute ettevalmistamise alal laisavõitu, aga tal oli artistlikke võimeid. Näiteks sirgendas teoreetilise postulaadi illustratsiooniks tahvlile ilmeka vinjeti, mudeli või olmeeseme. Temas oli ka näitlejat. Luges salapäraselt kumeda hauahäälega ette paroodiaid, pamflette ja muid kultuuriloo märgilisi tekste. See töö läks vägagi asja ette, sest meie, üliõpilased, sellal ju ise neile tekstidele ligi ei pääsenud. Mis puutub otse minusse, siis sain Taevi erikursusest "Eesti žurnalistika ja kriitika ajalugu" idee ning algteadmisi, et võtta diplomi- ja seejärel ka kandidaaditöö teema eesti kirjandusmõtte ajaloost.

Käosaare õppekoormusest märgiksin tänumeeles ära loengutsükli soome kirjandusest – tal oli sõja-aastaist olemas Soome akadeemiline taust – ja tekstikriitika eriseminari Boris Tomaševski krestomaatilise teose “Писатель и книга. Очерк текстологии” (1928) põhjal. Kirjandusteadlaste pakiliseks missiooniks oli ju ka klassikute väljapuhastamine stalinismiperioodi moonutuste, kärbeta ja juurdekirjutuste kõntsakihi alt. Ise sellal Vil-det uuriv Käosaar andis meilegi seminaritöö teemad peamiselt tema teoste tekstikriitiliste probleemide vallast. Mina sain “Prohvet Maltsveti” tekke-looga seotud teema. See läks töö käigus järjest põnevamaks, pani tegema detektiivitööd kaotsiläinud algallika rekonstrueerimisel, nii et lõpuks mainis Käosaar sealt enda jaoks mingi uudise leidnud olevat. Ma ei ole ebausklik, aga Eduard Vilde sekkus mu ellu nüüd juba kolmandat korda. Varem oli klassikirjand “Pisuhänna” meestüpaazist saanud kiita Juta In-glistilt ja küpsuskirjand Mahtra ning Anija meeste aktsioonist lugupeetud õpikuautorilt Karl Mihklalt, kes retsenseeris Haridusministeeriumis medali-kandidaatide kirjatöid.

Aarne Vinkliga saime varsti kolleegideks. KKI katuse all sõime ära mitu puuda soola, kuni sai valmis paks hall akadeemiline eesti kirjanduse aja-lugu. Ka oli ta mu kandidaaditöö juhendaja, rasketel hetkedel hea sõnaga alati kohal, ega lasknud pooleli jätta. Seda teatepulka olen püüdnud omagi kolmele doktorile ja teistele noorematele kolleegidele edasi anda, sest ka mulle meeldib, kui alustatud töö lõpule viiakse.

Diplomitöö kirjutamiseks oli terve semester. Niisiis kirjandusküsimused baltisaksa literaatide jätkväljaandes “Beiträge zur genauern Kenntniß der ehstnischen Sprache” (1813–1832). Teema valikut põhjendasin enda ees vajadusega üle korrata saksa keelt. Tegelikuks põhjuseks oli vististi tõde-mus, et kirjanduselu, kirjandusmõtte *resp.* kriitika ajaloo, s.o kirjanduse ümber olevate faktorite ja seikade uurimine on lihtsam kui kirjandus-loomingu enese uurimine; et selle ainestik on analüüsile kättesaadavam kui kirjanduse tuumollus. Näiteks luule analüüsi mõttekusse, isegi võimalik-kusse ma ei usu tänapäevani. Luule räägib keeles, mida ei oska keegi ega miski peale tema. Asuda uurima kriitika ajalugu oli aga vist päris hea mõte, sest varsti pärast minu väitekirja kaitsmist võtsid veel kaks KKI aspiranti ette analoogilise teema.

Estofiilide loomingu ja kultuuritöö juurde tulin uue ringiga 1990ndail, publitseerides mõned artiklid (nt “Jacob Johann Malm ja makarooniline luule”) siinmail peaaesjalikult baltisaksa-eesti segakeeles viljeldud maka-roonilisest kirjandusest. Ajaloolis-teoreetilist materjali sain, töötades terve nädala Göttingeni ülikooli raamatukogus. See Itaalias ladinakeelselt rah-vuskeelsele kirjandusele ülemineku perioodil tekkinud vorm on mõnes mõttes vägagi ‘eestilik’. Rääkimata meie praegusest anglitsismi- ja hiljuti-sest fennismilembusest (ja sporaadilistest russitsismihirmu hoogudest) –

teatud metafoorse liialdusega saaks isegi väita, et eesti kirjakeel kui niisugune seadistati XVI ja järgmistel sajanditel 'makaronistlikul' printsiibil, s.o mitte eesti oma keele koetises kätkevate, vaid võõras (saksa) keeles valitsevate seaduspärade rakendamise teel.

Mu diplomitöö oponent oli Käosaar. Ta isegi helistas mulle internaati enne kaitsmist. Et olevat läbi lugenud (see oli suur au), kiidab ja soovitab kandideerida KKI aspirantuuri, mis oli vahepeal välja kuulutatud. Teadmata, kui palju bürokraatiat ja telefonikõnesid see minu esitamine temal ja ka-teedril maksuma läks, olen aga kindel, et Käosaar mu sellele teele lükkas. (Endal kippus sisimas eneseusaldusest puudu tulema.) Teiselt poolt, kohtadele määramisel – see toimus mitu kuud enne riigieksameid ja lõpetamist – olin ju küll taltsalt lubanud minna õpetajaks Saverna vastasutatud keskkooli, aga samal ajal teadsin, et Lõuna-Eestis ma ei kohane. Ei oska võru keeltki!

KKI oli välja kuulutanud kaks aspirantuurikohta, sisseastumiseksamid sooritas kolm isikut. Sain sisse teisena. Esimene oli literaadina juba tollal hästi tuntud Olev Jõgi, ajakirja Keel ja Kirjandus kauaaegne peatoimetaja. Minu erialaeksam oleval olnud parem kui konkurendil. Aspirantuuriaeg hakkas jooksuma novembrist 1956.

Aga katkestagem siinkohal memuaarid.

Olen juba mõnda aega märganud, et inimesed on minu vastu liiga head. Ikka ilmub keegi kuskilt, kust oodatagi ei oskaks, ja asub, tegevteoliselt või moraalselt, mind täbarast seisust välja aitama. Ta jääb sageli anonüümseks ja mu võlg aina kasvab.

Tean, et süüme- ja tänuvõlgu ei saa ega tulegi ekvivalentselt 'tasuda'. Kui midagi klaarida annab, siis vahest ringkäenduse korras.

Teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest



Enn Mellikov

Sündinud 1.04.1945 Pärnus

1963 Pärnu 4. Keskkool
1968 Tallinna Tehnikaülikool, elektroonika erimaterjalide tehnoloogia
1977 keemiakandidaat, Sverdlovski Riiklik Ülikool
1988 tehnikadoktor, NSVL TA Uurali filiaali Anorgaanilise Keemia Instituut (Sverdlovsk)

Alates 1968 Tallinna Tehnikaülikooli vaneminsener, vanemteadur; 1987–1992 optoelektronika materjalide laboratooriumi juhataja; 1992–2003 pooljuhtmaterjalide tehnoloogia õppetooli juhataja, professor; 1997–2003 materjaliteaduse ja geeni(bio)tehnoloogia kompetentsikeskuse juhataja; alates 2003 materjaliteaduse instituudi direktor

1985 teaduspreemia tehnikateaduste alal
1998 Eesti Vabariigi teaduspreemia tehnikateaduste alal
2002 Eesti Teaduste Akadeemia liige
2006 Eesti Vabariigi teaduspreemia tehnikateaduste alal
2006 Valgetähe IV klassi teenetemärk
2011 TTÜ parim teadlane

“Teadus- ja arendustegevuse inimressursi arendamine” ning “Eesti teadus- ja arendustegevuse konkurentsivõime tugevdamine teadusprogrammide ja kõrgkoolide ning teadusasutuste kaasajastamise kaudu” juhtkomisjoni liige

Eesti Teadusagentuuri (ETAG) hindamisnõukogu liige

Energeetikaalaste uuringute sihtvalveerimise juhtkomitee esimees

Tippkeskuse “Kõrgtehnoloogilised materjalid” juhtkomitee liige

Eesti Teaduse teekaardi objekti NAMUR teaduskomitee liige

Ettevõtluse Arendamise Sihtasutuse (EAS) hindaja-ekspert

SA Archimedes hindaja-ekspert

EL päikeseenergeetika konverentside EU PVSEC 2009–2013 programmi-komitee liige

Avaldanud üle 200 teaduspublikatsiooni, neist 111 artiklit *Web of Science* andmebaasis; 8 patentset leutist

Preemia laureaadi akadeemik Enn Mellikovi lühisõnavõtt Riigi teaduspreemiate, kultuuripreemiate, spordipreemiate ning F. J. Wiedemanni keeleauhinna kätteandmisel 24. veebruaril 2013. aastal

Lubage kõigepealt väljendada tänu tunnustuse eest, mida Eesti Vabariik on meile, teaduspreemiate saajatele osutanud.

Täna tähistame oma riigi 95ndat sünnipäeva. Inimese elus seostub selline kõrge vanus reeglina elutarkuse, erudeerituse ning väarikusega. Juba Koguja raamatustki võime lugeda, et “tarkus valgustab inimese palet.” Niisugune inimene on teadja, kes teenib oma kogukonda. Inimesega võrreldes on 95-aastane riik aga veel suhteliselt noor. Võiksime öelda tema kohta, et ta alles ammutab tarkust. Teadmispõhine Eesti, millest viimasel kümnendil on olnud palju juttu, kujutabki endast teed Eesti riiki, mida piltlikult väljendudes võiksime nimetada tarkuseriigiks. Selle kujundlikuks vasteks pidas Lennart Meri Eesti oma Nokia otsimist. Ja nii, nagu elab eesti kirjarahva seas Nobeli ootus, nõnda rühivad ka eesti teadlased saavutuste poole, mis väariksid Nobelit.

Mul on hea meel tõdeda, et siinmail on usutud teaduse jõudu ja teadlastesse kogu selle ajaloo kestel, mis on teinud eestlastest kui maa rahvast moodsa kultuurrahvuse. See usk sai alguse juba Kreutzwaldi “Kalevipojast”, mis mäletatavasti tunnistati Peterburi Teaduste Akadeemia Demidovi auhinna vääriliseks. See jätkus akadeemik Wiedemanni keeleteaduslike töödega. Selle usu üheks väljenduseks oli 19. sajandi lõpus Karl August Hermannini koostatud esimene – tõsi küll, tookord pooleli jäänud – Eesti entsüklopeedia. See kinnistus 1920.–30. aastatel intensiivses teadustöös nii Eestit ennast puudutavates suundades kui ka alusteadustes. Seda usku kroonis 1938. asutatud Teaduste Akadeemia. Eesti teadlased püüdsid täita pühendumusega oma missiooni ka nõukogude totalitaarideoloogia tingimustes. Taasiseseisvunud Eesti riigis kuuluvad eesti teadlased korraga nii rahvusvahelisse kui ka Eesti teadlaskonda.

Jah, mõnikord on kuulda hääli, et vaatamata sellele usule pole Eestil ette näidata pöördelisi teadussaavutusi ja säravaid maailmanimesid. Siiski on meil nii mõnigi just Eestist võrsunud koolkond, ja on ka teadlasi, kelle töödele viitamine on möödapääsmatu enesestmõistetavus. Mõõngem, et selliseid tulemusi pole palju suurematel ja pikema arengulooga riikidelgi. Aeg-ajalt ilmub kurtmist, et teadusilmas seatavad eesmärgid on liiga kõrged ühele väikerahvale ja riigi võimalused teadust finantseerida ei vasta neile eesmärkidele.

Ometi on tähtis, et mõistaksime täna koos – nii noored kui vanad, et teadus on vältimatu vahend inimeste elamise ja riigi arengueelduste täiustamiseks. Teadmispõhine majandus on mitte ainult Eesti konkurentsivõimelisuse tagatis, vaid ilmselt ka ainus võimalus Eesti Vabariigil ellu jääda riigina.

Olen jälginud eesti teaduse konarlikku arengut ning selle infrastruktuuri vaevalist rahastamist Euroopa Liidu struktuurifondidest. Teame ju kõik, kui kallis on tegelikult teaduse tegemine tänapäeva tasemel. Teame sedagi, et noorel teadlasel kulub vähemalt kaksikümne aastat rahvusvaheliselt arvestatava taseme saavutamiseks. Aga vaatamata kõigile raskustele on meil olnud taas kord põhjust täna Toompeale koguneda, et väljavalitutena vastu võtta oma rahva toetus ja tunnustus – teaduspreemia.

Nähes täna saali kogunenud noori teadlasi, selle aasta valdkondlike teaduspreemiade laureaate, võin julgelt väita, et nende saavutused teeksid au igale ka meist palju suurematele ja rikkamatele riikidele. Olen kindel, et selle aasta teaduspreemia ei jää neile viimaseks ja nii mõnigi neist võtab ühel päeval siinsamas vastu ka oma elutööpreemia. Selleks on aga vaja veendumuse kestmist, et teaduskultuur on osa eesti kultuurist ja et vabariigi valitsus seda oma rahastamisotsustes ka arvestaks. Tahan loota, et Eesti teaduspõllul töötavad inimesed tajuvad isikliku teadlaskarjääri tegemise kõrval vastutust ka kogu riigi teadusvõimekuse arenemise eest. Meil on piisavalt andekaid noori, kellel on olemas soov ja juba ka vajalik pädevus, et teostada oma ideid mitte ainult rahvusvahelises teadusvõrgustikus, vaid siinsamas oma enda kodumaal, Eestis.

Kui see on nii, see tähendab, kui mu lootusel on võimalus täituda, siis võin kindel olla, et Eesti teadus suudab rõõmustada oma saavutustega nii teadlaskonda ennast kui ka kogu rahvast. Üks meie suurtest eelkäijatest, 97-aastaseks elanud akadeemik Harald Keres, mees, kes valutas südant Eesti teaduse kui loomekultuuri pärast, on teadust nimetanud tänapäeva inimesele kõrgeimaks vaimseks autoriteediks. “Kes eales tahab teha midagi tõsiväärtuslikku,” ütleb Keres, “teeb seda kindlasti teaduslikult.” Just siin on see koht ja just täna on see päev, kus seda Harald Kerese tõdemust rõhutavalt meenutada. Väärigem siis oma eelkäijate suuri mõtteid ja tegusid ning püüdkem ka ise olla väärt, et meid järgitaks.

Lõpetuseks tahan kõigi premeeritute nimel veel kord väljendada tänu meile osutatud au eest.

Õnne teile kõigile! Õnne Eestile!

Sündisin Pärnus, kus möödus kogu minu lapsepõlv ja kooliaeg. Väikese lapsena oli minu suviseks lemmiktegevuseks karjapoisiamet. Just selles ametis tundsin end tol ajal vaba mehena – karjamaa, loomad ja mina – oli aega lugeda ja unistada. Isa ja ema olid lihtsad töölised, kes alati toetasid minu püüdlusi edasi õppida ja uskusi minu võimetesse.

Teadlase ‘geeni’ või nagu on kombeks öelda uudishimu meid ümbritseva maailma vastu olen saanud ilmselt oma vanaisalt, kes mind tudengit kodulinna Pärnus vastu võttis alati suure hulga küsimustega. Paljudele küsi-

mustestele jäin paraku vastuse võlgu ja pole vähe neidki, millele ei oska tänagi veel vastata.

Esimesed neli aastat käisin Pärnu Ülejõe Algkoolis, mille asutajaks meie papa Jannsen. Keskkooli lõpetasin 1963. aastal juba uues Pärnu 4. Keskkoolis. Keskkoolis olin tavaline õpilane, millegi erilisega ma silma ei paistnud. Tahtsin vaid väga spordis midagi saavutada. Käisin võrkpalli trennis, aga minu kasv oli paraku juba tol ajal väike võrreldes omaealiste trennikaaslastega. Keskkoolist on eriti meelde jäänud just täppisteaduste õpetajad, olgugi et need ained tulid mulle väga kergelt.

Ka ülikooli valik oli mõjutatud just huvist reaalteaduste vastu. Suurim lemmik oli vast matemaatika, aga Tartu Riiklikus Ülikoolis puudus tol ajal sõjalise kateeder, mis oleks kindlustanud üliõpilastele vabastuse Nõukogude armeest. Samal aastal (1968) avati TPIs aga uus eriala – elektroonika erimaterjalide tehnoloogia – mis mulle kättesaadava info alusel oli tugevalt suunatud reaalteadustesse. Seega oli minu valik TPI ja keemia ja “elektroonika erimaterjalide tehnoloogia”. Meie ülikooli grupp oli väga tugev ja valitud eriala vägagi populaarne. Alustades oli meid 25 ja lõpetades juba 32, neist 4 lõpetas kiitusega. Õppejõududest ülikooli ajal on enim meelde jäänud kunagine TPI rektor Agu Aarna, kes õpetas meile orgaanilise keemia teoreetilisi aluseid, ja dotsent Peeter Kukk, kelle ülesandeks oli meile selgeks teha kvantmehaanika põhitõed. Nende kahe isiksuse mõju, loengute sisu ja tase olid määrava tähtsusega minu haridusteel – just see, mille pärast tasus ülikoolis käia. Ülikooli lõpetamisel suunati mind tööle TPI füüsikalise keemia kateedrisse, kus olin töötanud üliõpilasena juba alates teisest kursusest.

Nagu ikka elus, viis üks tee teiseni ning käänakutel tehtud valikud määrasid järgmised rajad. Teadustöö füüsikalise keemia kateedris kiirgustundlike materjalide keemia ja tehnoloogia vallas tõi kaasa esmalt kandidaadi- ja siis juba doktoritöö. (Teaduste doktoriks sain tolle aja kohta väga varakult, kusjuures valmis töö kaitsmine oli niikuinii aasta võrra edasi lükatud just minu ‘kohatu nooruse’ tõttu – natuke üle neljakümne aastasena polnud NSVLs suurte sekka trügida paslik!). Sverdlovski perioodist meenutan alati tänuga professor Albert Arkadjevitš Fotijevi, NSVL TA Uurali filiaali anorgaaniliste materjalide laborijuhatajat, kes juba meie esmakordsel kohtumisel ja tutvumisel minu kandidaaditööga suutis näha selle tugevust ja kes soovitas mind kaitsmisele Sverdlovski Riikliku Ülikooli Teadusnõukogusse.

Minu kandidaativäitekirja edukas kaitsmine Sverdlovskis vallandas meie labori teadlastele uute võimaluste ahela, mis pani aluse meie tugevale TPI materjaliteadlaste koolkonnale päikeseenergetika materjalide valdkonnas. Järgnevalt kaitsesid erinevates Sverdlovski teadusasutustes meie instituudi teadurid 7 kandidaadi- ja 2 doktoritööd. Ise liitusin NSVL Anorgaanilise

Keemia Teadusnõukogu tööga, mis aitas tunduvalt suurendada meil läbiviidava teadustöö 'nähtavust' kadunud NSVLs. Sellest teadusnõukogust on eriti meelde jäänud minu kontaktid NSVL akadeemiku V. I. Spitsõniga, kelle vaadet teadusele ja teadlase osale ÜHISKONNAS olen püüdnud järgida oma edasises teadustöös. Teaduslabori koosseis suurenes jõudsalt ja ületas möödunud sajandi kaheksakümnendate aastate lõpuks 40 piiri. Teaduslabor sai TPI esimesed miljonilepingud, olid teadusuuringud, mis olid suunatud 'nähtamatute lennukite' ja 'optiliselt juhitud radarsüsteemide' loomisele.

Mingil moel juhuslik, kuid samas vägagi loogiline oli ka ühest teadusvaldkonnast teise jõudmine üheksakümnendate aastate alul. Nõukogude ajal kiirgustundlikke materjale uurida tähendas läbinisti sõjandusega seotud tegevust ning kui tuli oma iseseisev Eesti riik, polnud seda enam kellelegi vaja. Siis arvasime, et lihtsaim sarnane valdkond, kus on võimalik meile avanenud maailmas läbi lüüa meil juba olemasoleva teaduskomponenti ja aparatuuriga, on päikeseenergeetika. Järgnev aeg on aga näidanud, et see ei olnud täpselt nii. Kiirgustundlikud materjalid, mida uurisime, olid suhteliselt lihtsad, päikeseenergeetika nõuab tunduvalt keerulisemaid materjale ja struktuure nende alusel.

Eesti Vabariigi periood algas meile Rootsi teadlaste poolt läbiviidud Eesti teaduse evalveerimisega 1992. aastal, kus meie teadustöö sai aga hävitava kriitika osaliseks. Hindajad jõudsid järeldusele, et Eestis ei ole võimalik edu saavutada sellises kõrgtehnoloogilises mikroelektronika materjalide valdkonnas nagu päikeseenergeetika. Sellele vaatamata olime me esimesed TPIs, kes said 1993. aastal finantseerimise Volkswagen Fondi poolt. Järgnes meie teadurite koostöö Hannoveri Päikeseenergeetika Instituudi DSc. D. Meissneri poolt juhitud päikeseenergeetika teaduslaboris. Dr D. Meissnerit kohtasin esmakordselt Helsingis toimunud teaduskonverentsil 1992. aastal. Teemaatilisel sarnast uurimistööl olime teinud enda laboris pulbriliste materjalide loomise ja kasutamise teematikas ilma et me sellest kumbki oleksime teadnud, sest kogu meie teadustöö oli publitseeritud vaid vene keeles. Kui me olime oma laboris pööranud põhitähelepanu nn monoteriliste materjalide tehnoloogia loomisele, siis Dr D. Meisner oli samal ajal tegelenud põhiliselt uute pooljuhtseadiste loomisega, kus sellised materjalid on hädavajalikud. Minu ettekanne Stuttgati Ülikoolis prof W. H. Blossi ja Dr H-W. Schocki poolt juhitud teaduslaboris viis meie liitumiseni Euroopa Liidu EuroCIS projektiga (see oli periood, kus maailmas suurimad efektiivsused CIS tüüpi ühendite baasil valmistatud päikeselementidele olid saavutatud Euroopas ja just selle projekti alusel). 2000. aastal kolisime oma vanast teaduslaborist Koplast Mustamäele. Järgnesid erinevad uued Euroopa Liidu projektid ja teaduslabori infrastruktuuri intensiivne areng. Teaduslabor sai esimese tänapäevase teadusseadme, kõrglahutusega skaneeriva elektronmikroskoobi, mis võimaldas meil näha ja pare-

mini aru saada sünteesitud materjalidest. Labori rahvusvaheline renomee kasvas kiiresti ja tema koosseis suurenes jälle 12 teadurilt 35-ni.

2002. aasta EV teaduse rahvusvaheline evalveerimine oli meile üliedukas ja lõppes väga kõrge hinnanguga meie teadustööle. Komisjon märkis ära meie uuringute uudsust ja originaalsust ning teaduslabori suurt edu nii rahvusvahelises koostöös kui ka taristu arengus. 2002. aastat võib üldse lugeda murranguliseks: saavutasime edu vastaval üle-Euroopalisel konkursil ning meie teadlaste kollektiiv kuulutati EL Päikeseenergeetika Materjalide ja Seadiste Teaduse Tippkeskuseks. Sellele järgnes edu ka Eesti esimesel teaduse tippkeskuste konkursil ja Keemia- ja Materjaliteaduse Tippkeskuse staatus koos Tartu Ülikooli keemia instituudi akad I. Koppeli poolt juhitava teaduslaboriga aastateks 2002–2006. 2003. aastal valis Eesti Teaduste Akadeemia mind akadeemikuks materjaliteaduse valdkonnas.

Teaduse tippkeskuste teises voorus ei olnud meie ühine taotlus koos Tartu Ülikooli keemiinstituudiga paraku edukas. Ekspertide poolt toodi põhjenduseks minu kui planeeritud tippkeskuse projektijuhi terviseprobleemid, mille tõestuseks ei esitatud mingeid materjale. Järgneval perioodil oleme saavutanud suurt edu erinevatel EL poolt finantseeritavate tehnoloogiliste programmide konkurssidel nii energiatehnoloogias, keskkonnatehnoloogias kui ka materjalitehnoloogias. Kolmandal tippkeskuse konkursil 2012. aastal esines instituut kahes edukas materjaliteaduse alases taotluses. Ühe taotluse (Säästva Energeetika Materjaliteaduse Tippkeskus koos TÜ keemia instituudi ja füüsika instituudiga) aluseks oli teadustöö meie pooljuhtmaterjalide õppetoolis pulbriliste materjalide alal ja teise taotluse (Teaduse Tippkeskus “Mesosüsteemide teooria ja rakendused” mis oli moodustatud samuti koos TÜ keemia instituudi ja füüsika instituudiga) aluseks oli teadustöö keemiliselt pihustatud õhukeste kilede valdkonnas meie keemiliste kiletehnoloogiate teaduslaboris. Samuti oli 2012. aastal edukas nanomaterjalide valdkonnas esitatud Teaduse Teekaardi projekti taotlus koos TTÜ keemia ja füüsika instituutidega. Selle Teekaardi projektiga jätkasime oma labori teadus- ja tehnoloogilise taristu parandamist eesmärgiga luua meie instituudi juurde EV analüütilise skaneeriva mikroskoopia keskus.

Kogu saavutatu taga on olnud kogu meie instituudi teaduskollektiiv ja siin tahan avaldada tänu kõigile neile, kes mind on selles kõiges toetanud. Eelkõige aga suur tänu minu õpilastele meie instituudist – Olga Volobujevale ja Julia Koisile, Malle Krunksile ja Jaan Hiiele, kellel on olnud jõudu ja tahtmist jätkata minuga ka teaduskraadi kaitsmisele järgnenud aastate jooksul.

Järgnevalt veel paar sõna päikeseenergeetika valdkonnast, mille arendamisele on minu teadustöö olnud suunatud viimase 20 aasta jooksul. Järgnev ehk aitab ka paremini aru saada, mida oleme teinud selle aja jooksul ja milles on meie osa selles arengus.

Aegade vältel on tsivilisatsiooni areng sõltunud tema võimest toota energiat ja inimkonna elukvaliteedi paranemine on olnud otseselt seotud kasutatava energia hulgaga. Maailma elanikkond suureneb aga igal aastal kuni kuue miljoni inimese võrra ja igaüks neist vajab energiat. Viimase saja aasta jooksul on inimkond saanud endale vajalikku energiat valdavalt fossiilsete energiaallikate – kivisöe, nafta ja maagaasi põletamisel. Selle tõttu on aga oluliselt saastunud looduskeskkond ja kujunenud kasvuhooneefekt. Tänapäeval on kindlalt aru saadud, et kasvuhoonegaaside kontsentratsiooni tõus atmosfääris on põhjustanud nii inimkonnale kui ka elusloodusele mõneti ebameeldivaid kliimamuutusi. Aastas Maale langeva Päikese kiirgusenergia hulk on tohtu: 178 000 TW. See ületab kogu inimkonna energiakulu samal ajavahemikul umbes 15 000 korda. Eesti-suurusele pindalale langenud energiast piisaks, et täielikult rahuldada maailma praegused vajadused. Vaatamata noorusele on päikeseenergeetika üks kiiremini arenevaid energietikaharusid ning juba järgnevatel aastakümnetel oodatakse tema olulist panust energiaprobleemide lahendamisse. Ollakse seisukohal, et aastal 2040 peaks päikeseplatvareide abil toodetav elektrienergia moodustama ligi 10% maailma elektritoodangust praeguse (2005. a) 0,01% asemel (Kazmerski, 2006). 2005. aastal võeti Euroopa Komisjonis vastu Euroopa Liidu 21. sajandi strateegiliste uurimissuundade reeglistik (tehnoloogilised platvormid) kuni aastani 2040 ja selles on pooljuhtpäikeseenergeetika nimetatud üheks eelisarendatavaks suunaks ELs (A Vision..., 2005). Selle dokumendi järgi peab Euroopa pooljuhtpäikeseenergeetika saama hinnalt konkurentsivõimeliseks võrreldes traditsioonilise energietikaga aastaks 2030. Kuna PV-elektri hinnast moodustab kõige suurema osa (ca 55%) patareimoodulite hind, siis tuleb eelkõige leida teed päikeseplatvareide hinna alandamiseks. Kui aastal 2005 oli PV paneeli hind 7 €/W, siis aastal 2012 on see ca 1,1 €/W ja aastaks 2030 peaks see langema 0,5 €/W-ni, mis võimaldaks toota elektrit konkurentsivõimelise hinnaga (A Vision..., 2005).

Miks on päikesepaneelide hind nii kõrge, mis määrab ära selle hinna ja ka suuresti selle, kas päikeseenergeetikal on tulevik helge või mitte? Peamine põhjus on päikesepaneelides kasutatavate materjalide ja ka tehnoloogiate kõrge maksumus. Seni on domineerivaks materjaliks päikesepaneelide valmistamiseks olnud kristalliline räni. Selliste paneelide valmistamine on aga tõepoolest väga keeruline ja kasutatavad tehnoloogiad on mingil määral vägagi imelikud. Esimese protsessina, kasutades keerulisi ja ka kalleid keemilisi tehnoloogiaid, valmistatakse ülipuhas räni ja sellest suurte mõõtmetega (kaaluga üle 100 kg ja pikkusega, mis ületab meetri) monokristalsed kangid. Selliste monokristallide kasvatamine on üsna aeganõudev ja kulukas protsess. Seejärel saetakse need ülisuured räni monokristallid õhukesteks liistakuteks (plaatideks) (hetkel paksusega 200–300 µm, tulevikus on planeeritud üleminek räniplaatide paksustele alla 100 µm), millest omakorda valmistatakse päikesepaneelide tarvis struktuurid. Seejuures ulatuvad

materjali kaod lõikamisel kuni 70% sellest ülikallist räni monokristallist. See on viinud maailmas uute materjalide ja tehnoloogiate otsimise buumini, mis kestab täies mahus ka praegu. Üks võimalus on üleminek õhukese-kilelistele tehnoloogiatele, mis aitavad vähendada paneelide valmistamiseks vajalikku materjali kulu. Juba praegu kasutatakse ligi 20% päikesepaneelides erisuguseid õhukese-kilelisi tehnoloogiaid ja neid tootva tööstuse eelisareng on planeeritud ka tulevikus. Need materjalid omavad võrreldes monokristallilise räniga mitmeid eeliseid, mis võimaldavad neid efektiivselt kasutada päikesepaneelides polükristalliliste õhukeste kihtide kujul:

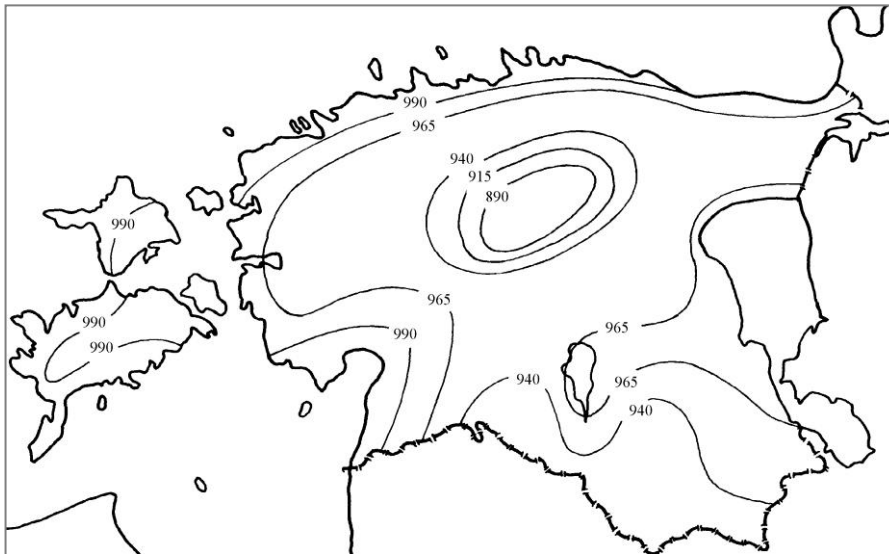
1. Erinevalt kristallilisest ränist, mis on mitteotsese keelutsooniga, on need otsese keelutsooniga pooljuhtmaterjalid. See erinevus on põhimõtteline ja võimaldab kasutada päikesepaneelides võrreldavate efektiivsusparameetrite saamiseks tunduvalt õhemaid struktuure (paksusega 1 μm CIS ja CZTS kilesid võrreldes 200–300 μm paksuste räniplaatidega). Teiste sõnadega – need päikesepaneelid vajavad enda loomiseks rohkem kui 100 korda vähem kallist pooljuhtmaterjali võrreldes sellega, mis oleks vaja nende valmistamiseks kristallilisest ränist.
2. Nendest materjalidest valmistatud paneelide kaal on tunduvalt väiksem.
3. Nende materjalide kasutamine annab võimaluse saada painduvaid paneele.
4. Nendest materjalidest valmistatud päikesepaneelid on tunduvalt stabiilsemad nii maal atmosfääri tingimustes kui ka kosmoses.
5. Nendest materjalidest valmistatud päikesepaneelid on väiksema tundlikkusega neile langeva päikese kiirguse ja paneeli vahelisest nurgast.
6. Nendest materjalidest valmistatud päikesepaneelide efektiivsus on väiksema tundlikkusega päikese kiirguse intensiivsuse suhtes (eriti tähtis väiksema päikese kiirguse intensiivsuste puhul, näiteks Eestis).

Summeerides eelneva võib väita, et nende materjalide kasutamine annab võimaluse saada odavamalt elektrinergiat. Selliste materjalide hulgas on hetkel perspektiivsemad CuInSe_2 (vaskindiumseleniid, lühendatult CIS) ja (vasktsinktinaseleeniid, lühendatult CZTS), mis paistavad silma ülisuure päikese kiirguse neeldumiskoeffitsiendi poolest. Nendel keerulistel kolmik- (nelik)ühenditel on veel hulgaliselt teisigi häid omadusi. Neist valmistatud päikesepatareid on suutelised ennast ise 'ravima', st nad püüavad säilitada defektstruktuuri, mis on vajalik päikeseelementides maksimaalse efektiivsuse saamiseks. CIS tüüpi päikesepatareide suurimaks 'puuduseks' on nende loomiseks kasutatava materjali CuInSe_2 (CuInS_2) ühe komponendi – indiumi – suhteliselt piiratud levik maakoos ja samaaegselt suur 'populaarsus' tänapäeva mikroelektroonikas. See on viinud indiumi hinna ca 10-kord-

sele tõusule viimase 6 aasta jooksul. Seetõttu on paljud maailma laboratooriumid asunud otsima päikeseenergeetikale alternatiivseid indiumivabaid materjale. Antud hetkel loetakse kõige perspektiivsemateks alternatiivseteks materjalideks CZTS tüüpi ühendeid ($\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$), kus 2 In aatomit on asendatud vastavalt laialt levinud odavate elementide, Zn ja Sn aatomitega. Vaatamata suurtele ootustele pole kiiret edu nende materjalide kasutamisel seni veel saavutatud, sest 'lihtsad' materjalid on osutunud arvatust palju keerulisemaks kui seni kasutatud materjalid. Kui labori tingimustes valmistatud CIS-tüüpi päikeseplatereid omavad kasutegurit *ca* 21% ja tööstuslikud päikeseplatereid on kasuteguriga 10–15%, siis CZTS tüüpi ühendite baasil valmistatud päikeseelementide efektiivsus jääb hetkel ka laboratooriumis 11% piiridesse. Maksimaalsed efektiivsuse väärtused (*ca* 10%) meie teaduslaboris CZTS tüüpi ühendite kasutamisel on seni saadud sulades soolades rekristalliseeritud monoterallistele pulbrilistele materjalidele (Mellikov jt, 2009), kus iga pulbri osake on täiuslik etteantud suurusega ja kontrollitud elektriliste ning optiliste omadustega mikro-monokristall. Olemasolevad materjalid ja tehnoloogiad on olnud aluseks TTÜ ettevõtte Crystalsol OÜ (ja GmbH Austrias) loomisele.

Oma teadustöös oleme hetkel keskendunud rohkem kasutatavate materjalide erinevate keemiliste ja füüsikaliste omaduste uurimisele, kuna just kasutatavate materjalide omaduste põhjalik tundmine aitab parandada nende materjalide alusel valmistatud päikeseplatereide kasutegurit. Täiendavalt oleme uurinud mitmeid teisi materjale (SnS , $\text{Cu}_2\text{CdSnSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$), mis võiksid olla perspektiivsed kasutamiseks tuleviku päikeseplatereides. Et olemasolevate õhukesekileliste CIS päikeseelementide valmistamisega tegelevatel ettevõtetel on olnud suur ja pidev huvi $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$) õhukesekileliste päikeseplatereide valmistamise vastu, kasutades juba olemasolevaid tööstuslikke tehnoloogiad ja tehnoloogilist apartuuri, siis oleme alustanud ka erinevaid teadusuuringuid õhukesekileliste materjalide tehnoloogiate arendamiseks (Volubujeva jt, 2009).

Päikeseenergeetika tulevikust võivad rääkida täpsemalt meie lapselapsed 30–50 aasta pärast. Ise usun, et päikeseenergeetikal on särav tulevik ja et juba paarikümne aasta pärast meenutab Euroopa (võib-olla ka Eesti) pilti, mida hetkel näeme vaid ulmeraamatutes – elektri tootmises domineerivad päikesepaneelid. Peamisteks komistuskivideks (probleemideks) on päikeseenergeetikal hetkel ja ilmselt ka tulevikus päikesekiirguse hajutatus ja mitteküllaldane intensiivsus Põhjamaades (joonis 1), selle perioodilisus ja juhuslik iseloom (eriti Põhjamaades, suurem osa päevi meil Eestis on vahelduva pilvitusega ilm (joonised 2, 3) (Tomson, Mellikov, 2010). Pilvitut sinitaevast, kui päikeseplatereide efektiivsus ja nendega toodetav energiahulk on suurim, näeb paraku üsna harva. Lauspilves päevadel on aga päikeseplatereide tõhusus ja toodetav elektrienergia hulk suhteliselt väike.

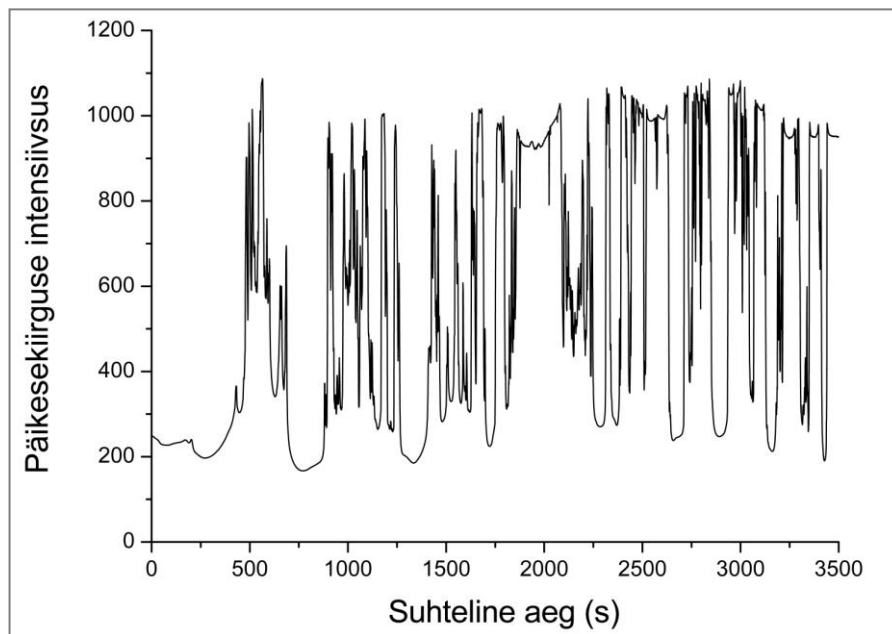


Joonis 1.
Päikesekiirguse intensiivsus Eestis.

Samuti on väga suured erinevused päikeseenergia intensiivsuses kuude kaupa, öö ja päeva vaheldumine, päikesepaneelide loomiseks vajalike materjalide mitteküllaldane levik maakoores ja kõigest sellest tulenev päikeseenergeetikas saadava elektrienergia kõrge hind. Oleme seisukohal, et nii mõnigi nendest probleemidest lahendakse lähemas või kaugemas tulevikus, sest vähemalt hetkel ei tea inimkond energeetikas kaugema tuleviku jaoks päikeseenergeetikale mingit reaalset alternatiivi. Vastavalt sellele annavad kõik ennustused 2080. aastaks päikeseenergeetika osaks maailma energeetikas *ca* 80%.

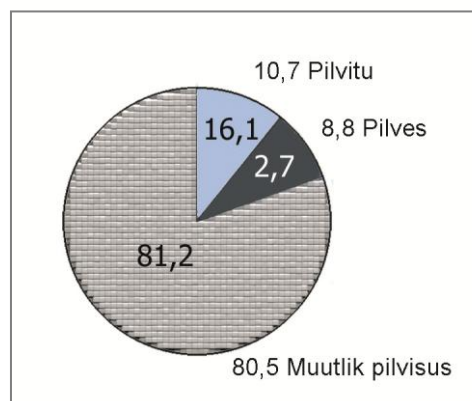
Kõige olulisemaks teadusvaldkonnaks, millega olen tegelenud, pean päikeseenergeetika materjalide uurimissuuna avamist TPIs, selles valdkonnas teadus- ja arendustegevuslikult tugeva teaduslaboratooriumi loomist algul TPIs ja selle edukat arendamist TTÜs, samuti materjalide alaste uuringute edule kaasaaitamist Eesti Vabariigis üldiselt. Antud hetkel on tehnikaülikoolis välja kujunenud teaduskoolkond, mis väljundina 'toodab' *ca* 1–3 uut PhD aastas, lisaks veel *ca* 25–35 rahvusvahelist teaduspublikatsiooni aastas. Imselt on uue teadlastepõlvkonna loomiseks oluline ka TTÜ ja TÜ ühistöös uue rahvusvahelise õppekava avamine TTÜs säästva energeetika valdkonnas, mille üks algataja ma olin koos prof D. Meissneriga.

Suur töö ja kordaminek oli ka TTÜ spin-off firma Crystalsol OÜ (Eestis) ja Crystalsol GmbH (Austrias) loomine, milles ma aktiivselt koos professor



Joonis 2.
Päikesekiirguse muutus aegskaalas 14.08.2008 (Tallinn, Mustamäe).

Joonis 3.
Tartu-Tõravere
Meteoroloogiajaamas
suvesessoo-nidel 1999–2002
1 min keskväärtustena mõõ-
detud kiirusrežiimid: pilvitu,
lauspilves ja vahelduva pilvisu-
sega. Diagrammist väljas –
kestvus, %. diagrammil sees –
kiirgusenergia, %.



D. Meissneriga osalesin mitme aasta jooksul. Koostöö firmaga Crystalsol jätkub ka praegu. Ühine arendustöö keskendub põhiliselt CZTS monotera pulbrite ja membraansete päikeseplatade tööstuslike lahenduste väljatöötamisel.

Praeguseks hetkeks on laboratoorsed tulemused vägagi lootustandvad selleks, et loodud firmas realiseerida see meie poolt välja töötatud uut tüüpi

päikesepatareide valmistamise tehnoloogia. Seda tehnoloogiat on sageli nimetatud revolutsiooniliseks nii kasutatavate materjalide kui ka päikese-paneelide kujunduse poolest. Saavutatud lahenduste uudsuse kinnituseks on firma poolt erinevatel rahvusvahelistel innovatsioonikonkurssidel saavutatud esikohad (vt ka <http://www.crystalsol.com>). Loodud tehnoloogia pakub võimalust ka paindlike päikesepaneelide konseptsiooni realiseerimiseks. Paraku pole Eesti elektrimajanduse arengukavas aastani 2015 päikeseenergeetikat peaaegu mainitudki. Samal ajal annab meie labori olemasolu ja tema kõrge teaduskompetents kõik eeldused selle valdkonna edasiarendamiseks Eesti Vabariigis.

KIRJANDUS

Kazmerski, L. L. (2006). Solar photovoltaics R&D at the tipping point: a 2005 technology overview. *J. Electron. Spectrosc. Related Phenom.*, 150, 105-135.

Mellikov, E., Meissner, D., Varema, T., et al. (2009). Monograin materials for solar cells. *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, 93, 1, 65-68.

Tomson, T., Mellikov, E. (2010). Päikeseenergia ja selle kasutamine. *Elektriala*, 3, 30-33.

A Vision for Photovoltaic Technology (2005). European Commission, Brussels.

Volobujeva, O., Raudoja, J., Mellikov, E., et al. (2009). $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ films by selenization of Sn-Zn-Cu sequential films. *J. Phys. Chem. Sol.*, 70, 3-4, 567-570.

*Teaduspreemia täppisteaduste alal
uurimuste tsükli “Ab initio and semi-empirical modeling of physical
properties of pure and doped functional materials” eest*



Mikhail Brik

Sündinud 30.01.1969 Tšernojerkovskaja, Krasnodari krai, Venemaa

- 1985 Tšernojerkovski 48. keskkool
1992 Kubani Riiklik Ülikool (Krasnodar, Venemaa), füüsika
1995 füüsika-matemaatikakandidaat, tahke keha füüsika, Kubani Riiklik Ülikool
2012 Dr. Sci. (füüsika), Poola Teaduste Akadeemia Füüsika Instituut
1996–2000 Kubani Riikliku Ülikooli nooremteadur, vanemteadur, dotsent
2000–2001 Asmara Ülikool, Eritrea, dotsent
2001–2002 Weizmanni Teadusinstituudi (Rehovot, Israel), külalisteadur
2003–2007 Kyoto Ülikooli (Jaapan) Fukui Fundamentaalkemia Instituudi külalisteadur
2007–2009 Tartu Ülikooli füüsika instituudi erakorraline vanemteadur
2009– Tartu Ülikooli arvutisüsteemide materjaliteaduste professor
2006 Rumeenia Teaduste Akadeemia Dragomir Hurmuzescu autasu
2011 Honkongi Haridusinstituudi (Hiina) auprofessor

Avaldanud üle 200 teaduspublikatsiooni *Web of Science* andmebaasis, kahe raamatu kaastoimetaja ja ühe õpiku koostaja

PUHASTE JA LEGEERITUD KRISTALLIDE FÜÜSIKALISTE OMADUSTE TEOREETILINE KIRJELDUS

SISSEJUHATUS

Pikka aega on füüsikuid ja keemikuid paelunud ammendamatu mõistatustena siirdemetalle ja haruldaste muldmetallide ioone sisaldavate kristallide ebatavalised omadused, millest arusaamine ja mille selgitamine täiendab meie teadmisi aine olemusest, aitab arendada uusi tehnoloogiaid ja pakub teadlastele esteetilist rahuldust. Ilmsiks on tulnud nende ühendite kui uute ainete vaieldamatult väga suur potentsiaal. Nüüdseks on kinnitust leidnud nende rakendused sellistes erinevates valdkondades nagu uued lasermaterjalid, infrapunastest kuni nähtava spektraalpiirkonna üleskonverteerimise materjalid, fotoredoks-protsesse hõlmavad päikeseenergia muundamise süsteemid, uued fotogalvaanilised seadmed, fosforescentsandurid, eriti elektroluminestsentsi seadmed, jne.

Kõik nimetatud rakendused põhinevad võimalusel lisada kristallivõrele teatud lisandeid – teisi keemilisi elemente. Isegi väike kogus lisandioone, mis on sisestatud kristalli kas kunstlikul või loomulikul teel, võib selle optilisi omadusi drastiliselt muuta. Üheks klassikaliseks näiteks on korund, st alumiiniumoksiid Al_2O_3 . Keemiliselt ‘puhtana’ on see kas värvitu või hallikat tooni kristall. Kuid vaid vähese (mõneprotsendise) kroomi ionide sisalduse korral muutub see korund roosaks või punaseks ja temast saab hinnaline vääriskivi – rubiin. Ja veel, kui selles ei ole lisandina kroomi, vaid on titaani ja raua lisandeid, muutub korund siniseks ja temast saab teine kalliskivi – sinine safiir.

Erinevate materjalide võime absorbeerida ja emiteerida valgust ning ka nende potentsiaalsed rakendused on otseselt seotud põhimaatriksis asuva mingi iooni elektroonilise põhioleku ja teiste ergastatud olekutega. Selle järelduseni jõudmine võttis teadlastel üsna kaua aega. Nii olid ka nüüdseks hästi tuntud nähtavas spektraalses piirkonnas asuvad neli vesiniku aatomi teravat joont müstee-riumiks, kuni 1885. aastal J. J. Balmer pakkus välja empiirilise võrrandi, millega oli võimalik arvutada nende joonte lainepikkusi. Kuid selgitust (mis ei ole lihtne!) tuli oodata kuni XX sajandi alguseni, kuni E. Rutherfordi ja N. Bohri tööde tulemusena formeerus aatomi planetaarne mudel, mis viis kvantmehhaanika tekkeni – spetsiaalse füüsikaharuni, mille eesmärgiks oli väikeste objektide, nagu molekulide, aatomite ja elektronide, õige kirjeldamine.

Tohutu edusammu legeritud kristallide optiliste omaduste mõistmisel ja modelleerimisel tegi H. Bethe artikkel “Termide lõhenemine kristallides” (Bethe, 1929). Selles töös pani ta aluse kaasaegsele kristallivälja teooriale. Lisaks sellele on ta andnud kokkuvõtva selgituse rühmateooria rakendamiseks erineva sümmeetriaga kristalliväljas asuvate lisandioonide spektrite analüüsis. Järgnevad arengud kristallivälja teoorias on seotud nimedega J. H. Van Vleck, S. Sugano, Y. Tanabe, D. J. Newman, jt.

Lisandiooni energiatasemete skeemi mõjutavad faktorid on järgmised: i) lisandiooni ja põhivõre ionide elektrilised laengud, ii) ionidevaheline kaugus, iii) koordinatsiooniarv (lisandi ümber asuvate lähimate ionide hulk), lisandit ümbritseva keskkonna sümmeetria, jne.

Järgmine peatükk sisaldab lühiülevaadet kristallivälja kvantitatiivse teooria põhialustest.

KRISTALLIVÄLJA TEOORIA PÕHIALUSED

Kvantmehhaanilisest vaatevinklist võib mitterelativistlikul juhul täitmata elektronkestaga lisandiooni energiatasemeid E esitada järgmise Schrödingeri võrrandi lahenditena:

$$\left\{ \sum_{i=1}^n \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta_i + U(\mathbf{r}_i) \right) + V(\mathbf{r}_i) \right\} \Psi = E\Psi, \quad (1)$$

kus $-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta_i$ on i-nda elektroni massiga m kineetiline energia, $U(\vec{r}_i)$ on i-nda elektroni potentsiaalne energia lisandiooni tuuma ja selle ülejäänud elektronide poolt loodud elektrostaatilisest väljast ja

$$V(\vec{r}_i) = -\sum_{j=1}^N \frac{Z_j e^2}{|\vec{\mathbf{R}}_j - \vec{r}_i|} \quad (2)$$

on lisandiooni i-nda elektroni potentsiaalne energia elektrostaatilisest väljast, mis on loodud kristallvõre ioonide poolt laengutega Z_j (prootoni laengu ühikutes) positsioonivektoritega $\vec{\mathbf{R}}_j$. $V(\vec{r}_i)$ on kristallivälja operaator. Võrrandis (1) on summeeritud kõik lisandiooni täitmata elektronkesta elektronid ja võrrandis (2) on summeerimine laiendatud üle kristallvõre N ioonide. Võrrandit (2) lahendatakse tavaliselt häiritusteooria abil, st eeldatakse et

$$V(\vec{r}_i) \ll \sum_{i=1}^n \left(-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta_i + U(\vec{r}_i) \right).$$

Vaba iooni LS-termide lainefunktsioonid (mis tegelikult on üheelektronsete lainefunktsioonide lineaarsed kombinatsioonid, kus L ja S viitavad vastavalt kõnealuse multielektronse seisundi orbitaal- ja spinnmomentidele) võib võtta esimese lähendusena ja arvesse võetakse neile vabaiooni seisunditele kristallivälja poolt tekitatud nõrga häirituse efekte. Kristallivälja maatrikselemente tuleb arvutada vaba iooni lainefunktsioonidega Ψ_n, Ψ_n^* järgnevalt:

$$V_{n,n'} = \int \Psi_n^* V(\vec{r}) \Psi_n dq. \quad (3)$$

Integreerimine selles võrrandis toimub üle kõikide ruumiliste koordinaatide q . Põhiküsimus on nüüd kuidas hinnata integraali võrrandis (3). Selleks on otsustarbekas väljendada häiritusoperaatorit $V(\vec{r})$ sfääriliste harmoonikute terminites:

$$V(\vec{r}) = \sum_{j=1}^N \frac{Z_j e^2}{|\vec{\mathbf{R}}_j - \vec{r}|} = Z e^2 \sum_{j=1}^N \sum_{k=0}^{\infty} \frac{r_{<}^k}{r_{>}^{k+1}} \frac{4\pi}{2k+1} \sum_{m=-k}^k Y_{km}(\theta, \varphi) Y_{km}^*(\theta_j, \varphi_j). \quad (4)$$

Siin on $r_{<}$ ja $r_{>}$ kõige väiksem ja kõige suurem r (elektronkoordinaat) ja R_j (kaugus tsentris asuva iooni ja ümbritsevate punktlaengute vahel), (θ, φ) ja (θ_j, φ_j) on sfäärilised nurgakoordinaadid, mis vastavad \vec{r} ja $\vec{\mathbf{R}}_j$ ($j=1, \dots, N$) -le. Esiialgu võib näida, et võrrand (4) ei lihtsusta arvutusprotseduuri sugugi, kuigi tegelikult on sisseviidud lihtsustused märkimisväärsed. Kuigi summeerimine võrrandis (4) toimub $k=0$ kuni $k=\infty$ (viidates sel viisil lõpmatule arvule terminitele), siis paljud neist kaovad. Eelkõige me juhime tähelepanu, et maatrikselementid võrrandist (3) on proportsionaalsed kolme sfäärilise funktsiooni produktist tulenevate integraalidega

$$V_{n,n'} \sim \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} Y_{l_1 m_1}(\theta, \varphi)^* Y_{l_2 m_2}(\theta, \varphi) Y_{l_3 m_3}(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (5)$$

kusjuures kvantarvud l_1 ja l_2 on üldiselt erinevad. See integraal on väljendatav Wigneri $3j$ -sümbolite terminites:

$$\int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} Y_{l_1 m_1}^* Y_{km} Y_{l_2 m_2} \sin \theta d\varphi d\theta = (-1)^{m_1} \sqrt{\frac{(2l_1+1)(2k+1)(2l_2+1)}{4\pi}} \begin{pmatrix} l_1 & k & l_2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_1 & k & l_2 \\ -m_1 & m & m_2 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Et muuta integraal võrrandis (6) nullist erinevaks, peavad olema täidetud järgmised tingimused:

i) $0 \leq k \leq (l_1 + l_2)$; ii) k võtab ainult paarisarvulised väärtused ülal täpsustatud intervallist. See on põhjus, miks meie d -elektronide juhu puhul tuleb arvestada vaid $k = 0, 2, 4$ väärtustega (juhul, kui näiteks analüüsitakse f elektronidega aatomeid, on nullist erineva väärtusega vaid termid $k = 0, 2, 4, 6$).

Seega võib kristallivälja potentsiaali väljendada sfääriliste harmoonikute terminites ja sellise kombinatsiooni koefitsiendid sõltuvad kristallivõre ioonide positsioonidest ja laengutest. Ülaltoodud matemaatiliste tuletiste kokkuvõtteks mainime, et tänapäeval on juba tavaks väljendada kristalliväljas olevate täitmata elektronkihtidega ioonide energeetilisi tasemeid kui järgmise kristallivälja Hamiltoni operaatori omaväärtusi:

$$H = \sum_{p=0}^{2l} \sum_{k=-p}^p B_p^k O_p^k, \quad (7)$$

kus O_p^k on taandumatute tensoroperaatorite lineaarsed kombinatsioonid, mis tegutsevad lisandiooni lainefunktsioonide nurgast sõltuval osadel.

On õpetlik tähele panna, et teistjärku panus ($k = 2$) kaob, juhul kui ümbritsevad ioonid moodustavad ideaalse kaheksatahuka, tetraeedri või kuubi (selline situatsioon esindab kuubilise kristallivälja juhtu). Kuid kõigil muudel juhtudel teistjärku panus ei võrdu nulliga. Üldjuhul võib maksimaalne nullist erinevate termide arv võrrandis (7) olla 14 ja 27 vastavalt d ja f elektronidele. Võrrandis (7) on term, kus $k = 0$, konstantne, mis ei sõltu elektronide koordinaatidest ja mis esineb samal viisil kõikides maatrikselementides. Sellel ei ole muud mõju üldisele energiataseme skeemile, kui kõikide energiatasemete üheaegne nihkumine ning selletõttu võib ta välja jätta, ilma et sellest oleks mingit kadu üldistustele.

Tuleb märkida, et kirjanduses leidub mitmeid operaatorite O_p^k definitsioone ja normalisatsioone (Rudowicz, 1987). Järjekindluse mõttes kasutame me järgnevas Stevensi normalisatsiooni (Stevens, 1952). B_p^k e sisestused võrrandis (7) on kristallivälja parameetrid (CFP), mis sisaldavad kogu informatsiooni lisanditsentri ümbruse geomeetrilise struktuuri kohta.

On kaks erinevat (tegelikult vastanduvat) moodust B_p^k väärtuste määramiseks. Esimene on nende väärtuste ekstraheerimine arvutuslike energiatasemete sobitamisest eksperimentaalselt tuletatutega. Selline meetod on vaid matemaatiline lähenemine ja see põhineb mittelineaarsetel vähimruutude lähendus-

meetoditel. Vaatamata sellele tuleb sel juhul esmalt eeldada vaadeldava lisanditsentri sümmeetriat, selleks et kindlaks määrata millised CFP-d ei ole nullid ja siis lasta neil vabalt varieeruda. Sobitamisprotseduuri lõpptulemusena saadud CFP komplekt ei pruugi olla ühene, kuna alati on võimalus saada kammitsetud lokaalses miinimumis minimaliseerimiseks, mis võib viia valele kristallivälja parametriserimisele ja tulemusena lisandiooni energiatasemete ebaõigele kirjeldamisele.

Teine meetod põhineb OTSESEL CFP väärtuste ARVUTAMISEL, kasutades kristalli struktuuri andmeid (kasutades nii vähe sobivaid parameetreid kui võimalik). Arvutatud CFP-sid kasutatakse seejärel kristallivälja Hamiltoniani diagonaliseerimiseks ja saadud energiatasemete võrdlemiseks eksperimentaalsete spektritega. See on rohkem füüsikaline lähenemine, kuna ei ole vaja algseid oletusi lisanditsentri sümmeetria kohta ja arvutused algavad olemasolevatest kristalli struktuuri andmetest. Väike hulk sobivaid parameetreid võimaldab sümmetriaefektide mõju mõtestatud käsitlemist lisandiooni energiataseme skeemil ja CFP komplektide võrdlust erinevatele ioonidele ja kristallidele. Üks esimesi sedalaadi meetodeid oli kristallivälja superpositsiooni mudel (SM) (Newman, 1971; Newman, Ng, 1989). See mudel põhineb eeldustel, et ainult lähimad naabrid (ligandid) määravad ära lisandiooni ümbritseva kristallivälja ja iga ligandi vahelise interaktsiooni ning et lisand on aksiaalsümmeetriiline. SM parameetrite arv 3d ioonidele on 4 ja 4f ioonidele 6. Täiendavaid detaile selle mudeli kohta võib lugeja saada paljudest originaalpublikatsioonidest (Yeung, 2013 ja viited selles).

SM mudelit arendas edasi B. Z. Malkin (1987). Tema soovitas esitada CFP B_p^k -d kui kahe termi summat:

$$B_p^k = B_{p,q}^k + B_{p,s}^k. \quad (8)$$

Esimene panus on lisandiooni optiliste elektronide ja kristallivõre ioonide vastastikusest elektrostaatilisest mõjust (neid loetakse kristallivõre sõlmedes asuvateks punktlaenguteks, ilma nende elektronstruktuuri arvestamata) ja teine panus on proportsionaalne lisandiooni ja ligandite lainefunktsioonide kattumisega. See term arvestab kõiki kovalentse sideme moodustumise ja vahetuse koostoime efekte. Nende efektide kaasaarvamine parendab oluliselt arvutatud ja eksperimentaalselt vaadeldud energiatasemete kooskõla. Võrrand esimese panuse arvutamiseks kogu CFP-sse 3d-iooni puhul on järgmine:

$$B_{p,q}^k = -K_p^k e^2 \langle r^p \rangle \sum_i q_i \frac{V_p^k(\theta_i, \varphi_i)}{R_i^{p+1}}. \quad (9)$$

Summeerimine teostatakse üle võre ioonide, mis on tähistatud i -ga ja mille laengud on q_i , R_i , θ_i , φ_i on kristallivõre i -se iooni sfäärilised koordinaadid lisandiooni juurde koondunud taustsüsteemis. Lisandiooni elektronide koordinaadi p -astme keskmistatud väärtusi $\langle r^p \rangle$ leiab kas kirjandusest või neid saab

arvutada numbriliselt, kasutades vastavate ionide lainefunktsioone. Kõiki numbriliste faktorite K_p^k väärtusi ja tähistusi polünoomide V_p^k jaoks võib leida Malkini originaaltööst (1987). Teist termi võrrandis (8) võib arvutada järgmiselt:

$$B_{p,S}^k = K_p^k e^2 \frac{2(2p+1)}{5} \sum_i (G_s S(s)_i^2 + G_\sigma S(\sigma)_i^2 + \gamma_p G_\pi S(\pi)_i^2) \frac{V_p^k(\theta_i, \varphi_i)}{R_i}. \quad (10)$$

Tsentraalse iooni d -funktsioonide ja ligandite p - ja s -funktsioonide vahelisi katumisintegraale tähistavad S_s, S_σ, S_π (need vastavad järgmistele integraalidele ($\langle lm|l'm' \rangle$ tähistuses): $S(s) = \langle d0|s0 \rangle$, $S(\sigma) = \langle d0|p0 \rangle$, $S(\pi) = \langle d1|p1 \rangle$). G_s, G_σ, G_π sisendid on mudeli dimensioonideta kohaldatavad parameetrid, mis määratakse ära esimese kolme neeldumisriba positsioonidest. Väga sageli võib eeldada nende omavahelist võrdsust: $G_s = G_\sigma = G_\pi = G$ (sellisel juhul piisab vaid esimesest neeldumisribast, et määrata G väärtust) ja käesolevas artiklis me kasutame seda lihtsustatud mudelit. Numbriline väärtus γ_p d -elektroonide puhul on $\gamma_2 = 1$ ja $\gamma_4 = -4/3$.

Operaatorid O_p^k on Stevens'i homogeenised sfäärilised polünoomid ja neid väljendatakse sfääriliste operaatorite terminites $C_p^k = \sqrt{\frac{4\pi}{2p+1}} Y_{pk}$ (Y_{pk} on sfäärilised funktsioonid) järgmiselt:

$$O_p^k = \frac{1}{a_{pk}} Z_p^k, \quad (11)$$

ja Z_p^k on

$$Z_p^k = \begin{cases} C_p^{-k} + (-1)^k C_p^k, & k > 0 \\ C_p^k, & k = 0 \\ -i(C_p^{-k} - (-1)^k C_p^k), & k < 0 \end{cases}. \quad (12)$$

Nagu juba mainitud, maksimaalne termide arv võrrandis (7) on 14 d -ioonide jaoks ja 27 f -ioonide jaoks (praegusel juhul on lisatud 13 termi $p=6$ -ga). Kui aga vaadeldava kompleksi sümmeetria on piisavalt kõrge, võib see nullist erinevate CFP-de arvu oluliselt vähendada. Seega, täiusliku kuubilise sümmeetria puhul jäävad võrrandis (7) ellu vaid kaks parameetrit: B_4^0 ja $B_4^4 = 5B_4^0$. See lihtsustab oluliselt kristallivälja Hamiltoni operaatori diagonaliseerimist, mida paljudel juhtudel võib isegi analüütiliselt teha.

Laenguvahetuse mudelit võib samuti edukalt rakendada mitte ainult kristallides olevate energiatasemete ja 3d ionide neeldumisspektrite analüüsil, vaid

ka elektron-võnkumise vastastikuse koostoime parameetrite ning mitteradioaktiivsete üleminekute tõenäosuste hindamisel (Avanesov, 2001; Brik, 2005). Laengu vahetuse mudelit on samuti edukalt kasutatud kristallides olevate haruldaste muldmetallide spektrite kirjeldamiseks (Pytalev, 2012; Makhov, 2012; Brik, 2011). Rohkem 3d ioonidega seotud näiteid võib leida hiljaaegu ilmunud raamatust (Brik jt, 2013).

TIHEDUSFUNKTSIONAALIDE TEOORIA

Kristallivälja teooria, mis on võimeline arvutama küll lisandioonide energiatasemeid (nagu näidatakse allpool), ei suuda hakkama saada tahkiste energetilise tsooni struktuuri õige kirjeldamisega. Seda suudab aga efektiivselt teha tihedusfunktsionaalide teooria (DFT), mis on laialt kasutusel oleva Hohenberg-Kohni teoreemidel põhineva kvant-keemilise meetodi haru (Hohenberg, Kohn, 1965; Kohn, Sham, 1965).

Lihtsustatud vormis väidab esimene teoreem, et põhioleku energia Schrödingeri võrrandist on ühene elektrontiheduse funktsionaal:

$$\rho(\mathbf{r}) = 2 \sum_{i=1}^N \psi_i^*(\mathbf{r}) \psi_i(\mathbf{r}) , \quad (13)$$

mida väljendatakse üheelektronsete lainefunktsioonide terminites $\psi_i(\mathbf{r})$. Kordaja 2 ilmub summeerimismärgi ette elektroni spinni tõttu. Teine moodus sama teoreemi esitamiseks on öelda, et põhioleku elektrontihedus määrab üheselt ära kõik põhiolekute omadused, kaasa arvatud selle energia ja laine-funktsiooni. Selle teoreemi oluline tulemus on see, et ta võimaldab vähendada 3N muutujatega Schrödinger'i võrrandi lahendi leidmist, lihtsustamaks kolme ruumilise muutujaga sobiva funktsiooni leidmist, mis kirjeldab elektroni tiheduse jaotust ja milline siis, tulenevalt Hohenberg-Kohni esimesest teoreemist, annab süsteemi põhioleku täpse kirjelduse.

Samal ajal Hohenberg-Kohni esimene teoreem, postuleerides elektrontiheduse funktsionaali olemasolu, ei ütle midagi selle kohta, milline see funktsionaal välja näeb. See on Hohenberg-Kohni teine teoreem, mis annab võtme elektrontiheduse funktsionaali valikuks: elektrontihedus, mis minimeerib üldise funktsionaali, on tõeline elektrontihedus, mis vastab Schrödingeri võrrandi täielikule lahendusele.

Juhul kui 'tõeline' funktsionaal oleks teada, võiks elektrontihedust muuta seni, kuni saavutatakse energia miinimum. See variatsiooni printsiip moodustab nende kahe teoreemi rakendamise võtme. Energia funktsionaali võib kirjutada selliselt:

$$E[\psi_i] = E_{\text{known}}[\psi_i] + E_{\text{XC}}[\psi_i] , \quad (14)$$

kus ψ_i on üheelektronne lainefunktsioon, esimene term parempoolses osas esindab kõiki 'tuntud' terme, mis sisaldavad kõikide vaadeldava süsteemi elektronide ja tuumade kineetilisi ja potentsiaalseid energiasid, ja kõik muu on peidetud parempoolse osa teise liikmesse, mida tuntakse ka kui vahetus-korrelatsiooni funktsionaali.

Kohn ja Sham on näidanud, et õige elektrontihedus saadakse üheelektronsete võrrandite komplekti lahendamisel, kus iga võrrand sisaldab vaid ühte elektroni ja on väga sarnane Schrödingeri võrrandiga:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) + V_H(\mathbf{r}) + V_{xc}(\mathbf{r}) \right] \psi_i(\mathbf{r}) = \varepsilon_i \psi_i(\mathbf{r}), \quad (15)$$

$$\text{kus } V_H(\mathbf{r}) = e^2 \int \frac{\rho(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3\mathbf{r}' \quad (16)$$

on Hartree potentsiaal. See kirjeldab Coulombi tõukejõudu selle elektroni, mida käsitletakse ühes Kohn-Shami võrrandis, ja kõikide süsteemis olevate elektronide poolt defineeritud kogu elektrontiheduse vahel. See sisaldab ka n-ö omainteraktsiooni, kuna vaadeldav elektron annab panuse ka kogu elektrontiheduse moodustumisse. Seetõttu kirjeldab see, teiste sõnadega öeldes, elektroni Coulombilist vastasmõju iseendaga, mis muidugi on mittefüüsikaline interaktsioon. Sellise mittefüüsikalise vastastikmõju parandus on lisatud ka vahetus-korrelatsiooni potentsiaali $V_{xc}(\mathbf{r})$, mida defineeritakse kui vahetus-korrelatsioon energia funktsionaali tuletist

$$V_{xc}(\mathbf{r}) = \frac{\delta E_{xc}(\mathbf{r})}{\delta \rho(\mathbf{r})}. \quad (17)$$

Siin see funktsionaali tuletis (mis rangelt võttes ei ole võrdne funktsiooni tuletisega) on tähistatud sümboliga δ .

Siit on näha, et elektrontihedus $\rho(\mathbf{r})$ on Hartree potentsiaalis. Samal ajal on see peamine muutuja vahetus-korrelatsiooni potentsiaali $V_{xc}(\mathbf{r})$ kindlaksmääramiseks. Et sellest kinnisest ringist väljapääsu leida, rakendatakse järgmist algoritmi:

1. Defineeritakse algne (katseline) elektrontihedus $\rho(\mathbf{r})$. See võib olla 'hea oletus' või juba teadaolev tihedus mõne sarnase süsteemi puhul.
2. Selle katsetihedusega lahendatakse Kohn-Sham'i võrrandid, leidmaks üheelektronsete lainefunktsioonid $\psi_i(\mathbf{r})$.
3. Elektrontihedus $\rho(\mathbf{r})$ arvutatakse nende $\psi_i(\mathbf{r})$ -dega.
4. 3-ndas astmes arvutatud elektrontihedust võrreldakse esimeses astmes kasutatuga. Kui need kaks tihedust on identsed, siis leitakse põhioleku elektrontihedus ja seda saab kasutada kogu süsteemi energia arvutamiseks, jne. Juhul, kui need kaks tihedust on erinevad, siis värskendatakse katsetihe-

dust ja kogu protseduuri korratakse seni, kuni erinevus kahe elektroniühenduse vahel kahes üksteisele järgnevas kordusprotseduuris ei ületa varemvalitud täpsuslimiiti.

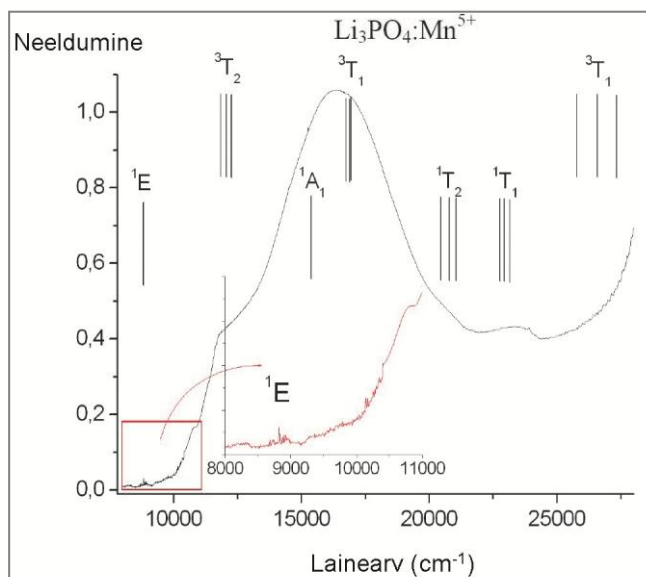
Pärast 'aluse panemist' kristallivälja ja DFT põhialuste lühikirjeldusega, jätkame mitmete näidetega nende arvutustehnikate rakendusest tegelikele füüsilistele süsteemidele.

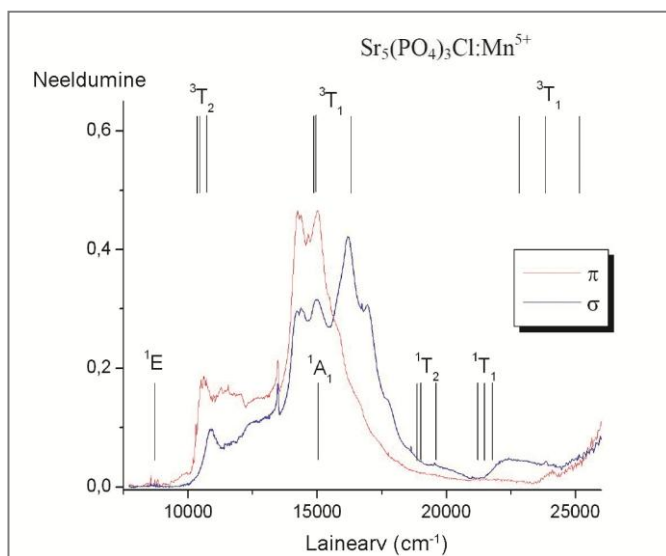
NÄIDE LAENGUVAHETUSE MUDELI RAKENDUSTEST:

Mn^{5+} IOONID Li_3PO_4 , Ca_2PO_4Cl ja $Sr_5(PO_4)_3Cl$ KRISTALLIDES

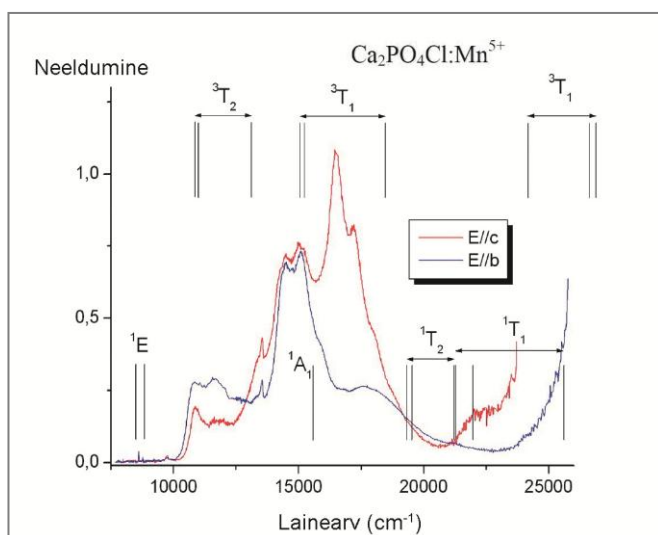
Kristallid, mis on dopeeritud ülemineku metallide ioonidega, millel on $3d^2$ väliskihi elektronide konfiguratsioon, V^{3+} , Cr^{4+} , Mn^{5+} , Fe^{6+} , jne, pakuvad rakenduslikku huvi kui laseraktiivsed keskkonnad (Brik jt, 2013). Need ioonid asuvad tavaliselt sõlmedes, millel on tetraedriline hapniku koordinatsioon kas madala (V^{3+} , Cr^{4+}) või tugeva kristalliväljaga (Mn^{5+} , Fe^{6+}). Esimesel juhul laiaribaline kiirgus 3T_2 olekust lähi-infrapunases spektraalpiirkonnas on huvipakkuv timmitavatele laserrakendusele, samal ajal kui teisel juhul kiirgus 1E tasemelt koosneb peamiselt kitsast joonest, mis laseri tegevuseks sobib ainult mõnedes soodsates põhivõredest. Nende lisandite energiatasemete struktuuri analüüs sobivates keskkondades on tähtis nende perspektiivsete rakenduste hindamiseks. Selles peatükis me näitame kuidas laenguvahetuse mudelit saab rakendada Li_3PO_4 -s ja Ca_2PO_4Cl -s olevate Mn^{5+} ioonide ja $Sr_5(PO_4)_3Cl$ kristallide madalatemperatuursete neeldumisspektrite võrdlevas analüüsis (Brik jt, 2009). Kasutades laenguvahetuse mudelit, nagu kirjeldatud peatükis 2, me arvutasime need kristallivälja parameetrid, mis mõjuvad Mn^{5+} ioonidel(e) kõigis valitud põhiainetes ja Mn^{5+} energiatasemetele, mida võrreldi joonistel 1–3 näidatud eksperimentaalsete neeldumisspektritega.

Joonis.1.
 $Li_3PO_4:Mn^{5+}$ 10 K
polariseerimata
neeldumisspekter.
Arvutatud Mn^{5+}
energia tasemed on
näidatud vertikaal-
joontega.





Joonis 2.
 $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}:\text{Mn}^{5+}$
 10 K polariseeritud
 neeldumisspekter.
 Arvutatud Mn^{5+}
 energia tasemed on
 näidatud vertikaal-
 joontega.



Joonis 3.
 $\text{Ca}_2\text{PO}_4\text{Cl}:\text{Mn}^{5+}$
 10 K polariseeritud
 neeldumisspekter.
 Arvutatud Mn^{5+}
 energia tasemed on
 näidatud vertikaal-
 joontega.

Peamine sõnum, mille joonistelt 1–3 saab, on see, et kõikidele tippudele eksperimentaalsetes neeldumisspektrites (pidevjooned) võib anda täpse määranu tetraedrilises kristalliväljas lõhestunud Mn^{5+} termidele. Kõik tähistused joonistel on kristallivälja teoorias standardsed ja põhinevad T_d punktrühma taandumatutel esitlustel. Sisenemata teostatud arvutuste peenematesse detailidesse, märgime, et eksperimentaalselt vaadeldud neeldumise maksimumid on väga heas kooskõlas arvutatud Mn^{5+} energiatasemetega. Veel enam, neeldumismaksimumide struktuur on hästi arvesse võetud mangaani ionide orbitaalselt kõdunud olekute madalastruktuuriliste lõhenemistega. 3T_1 olekute ar-

vutatud lõhenemissuuruste 16000–18000 cm^{-1} juures võrdlemine võimaldas leida järgmise trendi MnO_4 ühikute sümmeetria langetamiseks: Li_3PO_4 (kõrgeim sümmeetria – väikseim lõhenemine) \rightarrow $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ (vahepealne juhtum – vahepealne lõhenemine) \rightarrow $\text{Ca}_2\text{PO}_4\text{Cl}$ (madalaim sümmeetria – suurim lõhenemine). Selline käitumine leiti olevat kooskõlas teistjärku kristallivälja invariantide samas suunas kasvamisega.

Teostatud arvutused koos nende kolme materjali madalatemperatuursete spektroskoopiliste uuringutega aitasid välistada mõningad senised ebaselgused nende optiliste spektrite tõlgendamisel (Brik jt, 2009).

NÄIDE KRISTALLIDE OPTILISTE JA ELASTSETE OMADUSTE *AB INITIO*

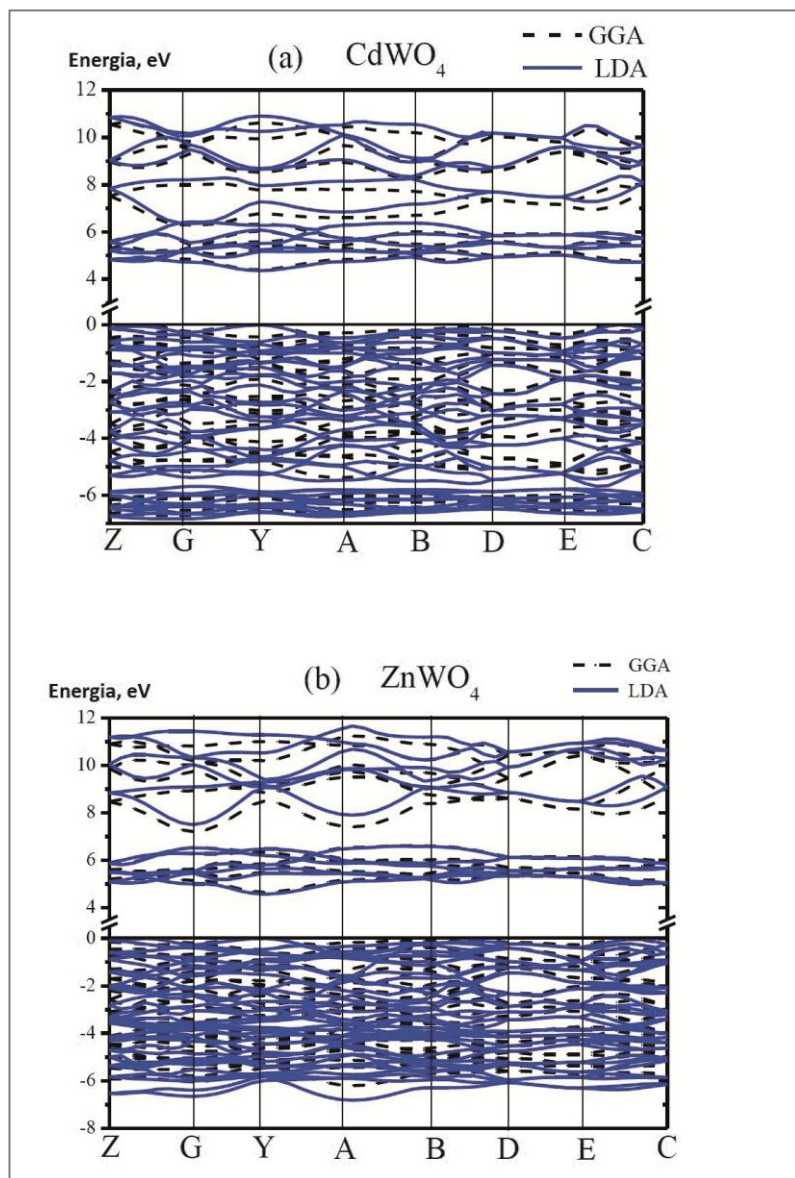
ANALÜÜSIST: ZnWO_4 , CdWO_4 JA ÜLEMINEKUMETALLIDE MONONITRIIDID

Kristallide struktuursete, elektrooniliste, optiliste ja elastsete omaduste põhiprintsipiidest lähtuvad arvutused muutuvad nüüd vältimatuks abivahendiks uute materjalide otsingul ja juba eksisteerivate materjalide omaduste hoolikal selgitamisel.

Konkreetsemalt öeldes, oleme me viimasel ajal detailselt uurinud kahte tehnoloogiliselt tähtsat kristalli – CdWO_4 ja ZnWO_4 , milliseid kasutatakse stsintillaatormaterjalidena (Brik jt, 2012a). Arvutused teostati, kasutades Materials Studio paketi CASTEP moodulit (Segall, 2002); kõik vajalikud detailid on saadaval ülalmainitud artiklis. Saadud tulemuste illustreerimiseks näitame siin mõlema materjali arvutatud tsoonide struktuure (joonis 4), mis saadi, kasutades üldist gradiendi lähendushinnangut (GGA) ja lokaalse tiheduse lähendushinnangut (LDA).

Nagu on näha jooniselt 4, näitavad elektroonsed olekud olulist hajuvust rohkem juhtivustsoonis (CB) ja vähemal määral valentstsoonis (VB), mis näitab laengukandjate efektiivsete masside olulist anisotroopiat (ja seega elektroonset juhtivust) mõlemas kristallis piki erinevaid suundi \mathbf{k} -ruumis. Juhtivustsooni madalaim osa CdWO_4 -s koosneb volframi 5d olekutest, kusjuures kaadmiumi 5s olekud panustavad selle ülemisse ossa. Hapniku 2p olekud on segatud Cd ja W olekutega ja võivad seetõttu olla nähtavad ka juhtivustsoonis. Valentstsooni madalaim osa koosneb hästi lokaliseeritud Cd 4d olekutest, kusjuures W 5d ja O 2p olekud moodustavad valentstsooni ülemise osa.

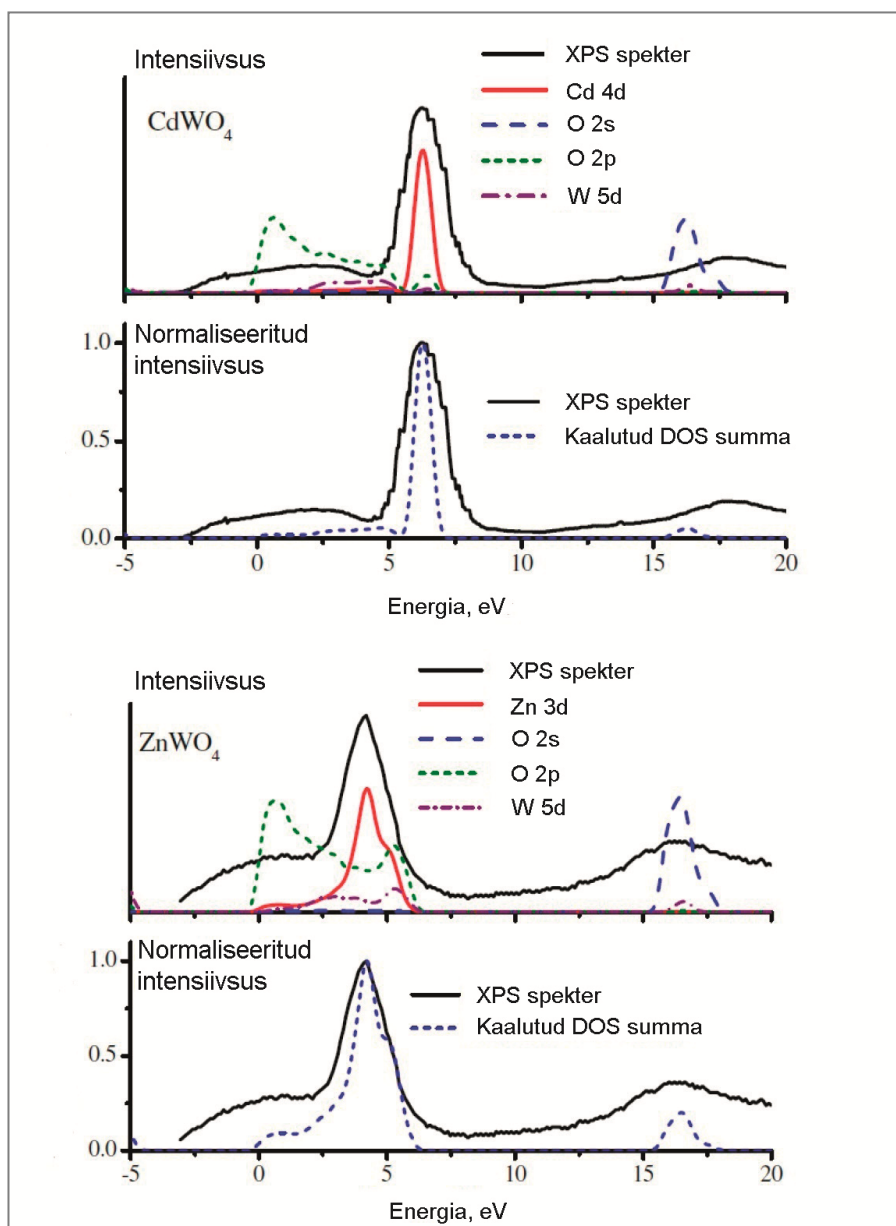
ZnWO_4 -s juhtivustsoon näitab kahte hästi eraldatud alatsiooni. Alumine (alates ~ 5 kuni 6 eV) on peamiselt põhjustatud W 5d olekutest, ülemine (7 kuni 11 eV) aga on moodustatud Zn 4s olekute poolt. Juhtivustsoonis võib tuvastada ka väikest panust metalsete olekutega hübridiseeritud O 2p olekutelt. Zn 3d olekud on levinud üle kogu valentstsooni, selgelt märgatava maksimumiga umbes -5 eV juures. Hapniku 2p olekud moodustavad valentstsooni ülemise osa koos W 5d olekute mõningase panusega valentstsooni hübridisatsiooni tõttu.



Joonis 4.

Tsoonide struktuurid, arvutatud CdWO_4 (a) ja ZnWO_4 (b) jaoks. LDA ja GGA tulemused on näidatud vastavalt pidevate ja katkendlike joontega.

Arvutatud elektroonilise struktuuri eksperimentaalne tõestus tuleneb röntgenfotoelektron-spektroskoopiast (XPS). Joonis 5 näitab käesolevas töös saadud teoreetiliste DOS diagrammide ja eksperimentaalsete XPS (Itoh, 2006) võrdlust.



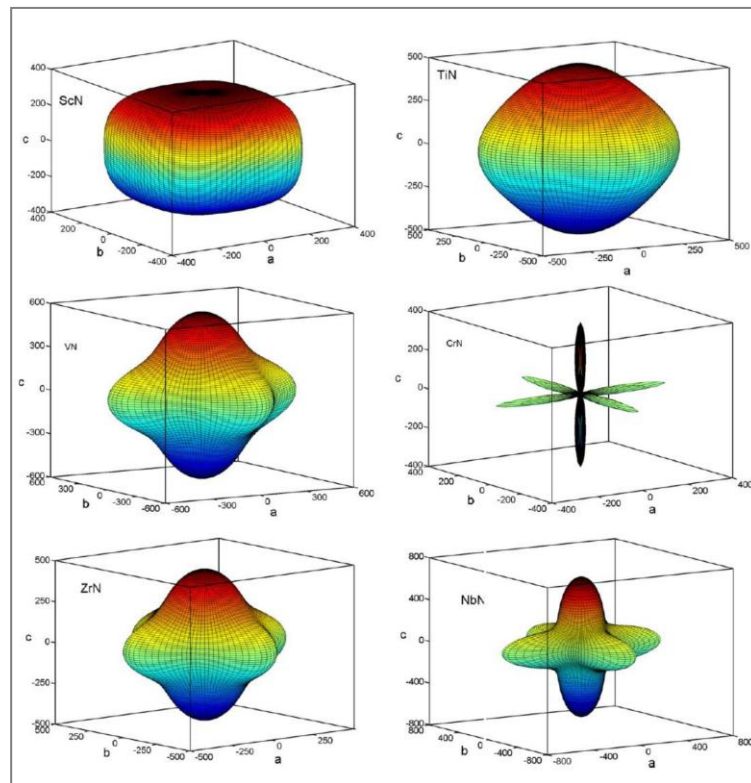
Joonis 5. Eksperimentaalsete XPS spektrite võrdlus (Itoh, 2006) ja osalised olekute tiheduse (DOS) diagrammid CdWO₄-s ja ZnWO₄-s.

Madala energiaga XPS tipp umbes 1 eV juures joonisel 5 on peamiselt põhjustatud mõlema kristalli O 2p olekutest. Väiksem Zn 3d olekute panus sellesse tippu on märgatav ZnWO₄-s, samal ajal kui Cd 4d olekute panus selle ener-

gia juures on oluliselt väiksem CdWO_4 -s. W 5d olekute panused rakendusid ainult madalaimatele XPS tippudele ja neid loeti CdWO_4 ja ZnWO_4 jaoks praktiliselt identseteks (Itoh, 2006). Meie puhul on need aga erinevad. W 5d olekute olemasolu madalaimas XPS tipus ei ole CdWO_4 -s tähtsusetu, ZnWO_4 -s aga nad panustavad peamiselt XPS tippu umbes 5 eV juures. See teine, kõige intensiivsem tipp, mis CdWO_4 -s asub umbes 6 eV juures ja ZnWO_4 -s 5 eV juures, on peamiselt põhjustatud vastavalt Cd 4d ja Zn 3d olekutest.

Kolmas eksperimendis jälgitav XPS tipp 16–17 eV juures on põhjustatud peamiselt hapniku 2s olekutest ja väiksema, kuid ikkagi selge panusega W 5d olekute hübriidseerumisest O olekutelega. Niisiis aitaksid need elektroonsete omaduste arvutused eksperimentaalseid XPS spektreid täielikult selgitada.

Teine tähtis *ab initio* arvutuste rakendus on tahkete kehade elastsete omaduste analüüs. Selle väite illustreerimiseks me näitame joonisel 6 Young'i moodulite



Joonis 6. Youngi moodulite suunasõltuvused ScN, TiN, VN, CrN, ZrN ja NbN jaoks. Kõikide pindade ja ristlõigete kujutamiseks kasutati GGA tulemusi. Telgede ühikuteks on GPa.

3-dimensioonilist visualisatsiooni kuues erinevas metall-monokarbiidis: ScN, TiN, VN, CrN, ZrN, NbN (Brik, Ma, 2012). Neid materjale iseloomustab unikaalne kombinatsioon kõrge tugevusastmest, kõrge sulamispunktist ja juhtivusest, tehes need sobivaks paljudes tehnoloogilistes rakendustes, nt pinnakate, korrosioonikindlus masina instrumentaariumis jne. Nende jooniste tähendus on järgmine: kaugus tsentrist pinnani on võrdne Youngi mooduliga piki valitud suunda kristallivõres.

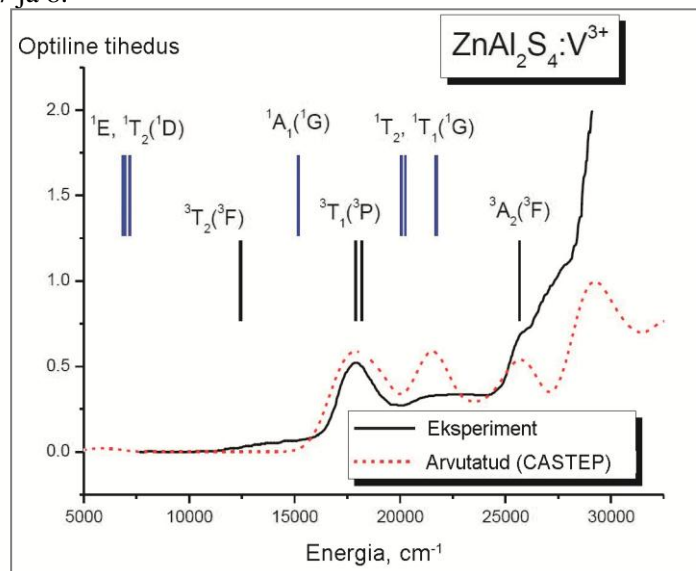
Peamine järeldus, mille võib teha toodud joonistest on järgmine: kõik ühendid on elastsuselt anisotroopsed; teiste sõnadega, nad reageerivad erinevalt piki erinevaid suundi rakendatud survetele. Konkreetsemalt, CrN ilmutab märkimisväärset anisotroopiat: ta on väga kõva materjal, kui survet rakendatakse piki kristallograafilist telge, ja osutub äärmiselt hapraks, kui survet avaldatakse piki mingit muud suunda. Selline asjaolu paneb kindlasti teatud piirangud CrN kasutamisele näiteks pinnakatematerjalina või osana masinates ja pöörlevas instrumentaariumis.

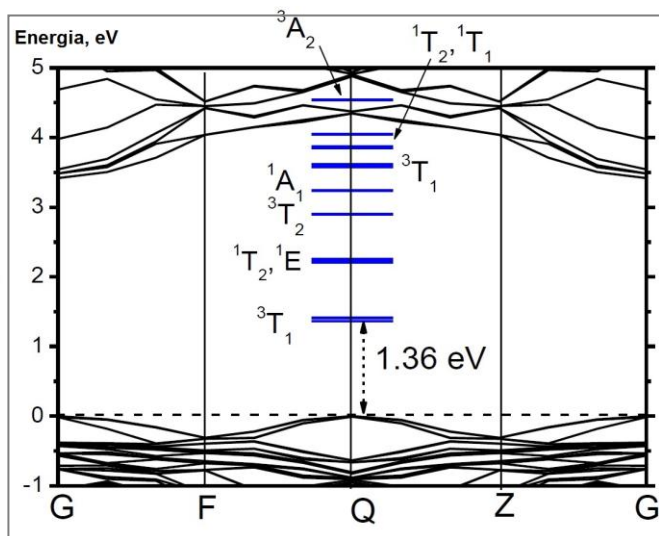
POOLEMPIIRILISE JA *AB INITIO* MEETODITE KOMBINATSIOON DOPEERITUD KRISTALLIDE OPTILISTE PARAMEETRITE ANALÜÜSIMISEL: $ZnAl_2S_4:V^{3+}$ KRISTALLID

$ZnAl_2S_4$ on suure spinel kristallide rühma 'klassikaline' esindaja. Tema struktuur võimaldab lihtsat dopeerimist siirdemetallide ioonidega. Täpsemalt öeldes, V^{3+} ioonid võivad hõivata Al^{3+} olekud mida ümbritsevad kuus väavliiooni.

Meie teostasime $ZnAl_2S_4:V^{3+}$ -i spektroskoopiliste omaduste kombineeritud analüüsi (kaasates kristalli välja laenguvaetusmudeli ja Materials Studio CASTEP mooduli) (Brik jt, 2012b). Nende uuringute põhitulemused on kokku võetud joonistes 7 ja 8.

Joonis 7. Eksperimentaalsete (pidev joon), *ab initio* arvutatud (katkendlik joon) $ZnAl_2S_4:V^{3+}$ -i neeldumisspektrite ja arvutatud (kristallivälja teooria, vertikaaljooned) V^{3+} energiatasemete võrdlus.





Joonis 8.
Arvutatud ZnAl_2S_4 -i
tsooni struktuur
koos V^{3+} ionide
energiatasemetega.

Nagu näha jooniselt 7, CASTEP-ga arvutatud neeldumisspekter reprodutseerib hästi eksperimentaalse spektri põhijooned. Lisaks sellele laenguvahtuse mudeli abil arvutatud kolmevalentse vanaadiumi energiatasemed on väga heas kooskõlas eksperimentaalsete neeldumisribade maksimumidega.

Lõppkokkuvõttes, kombinatsioon *ab initio* arvutatud elektroonse struktuuri ja vanaadiumi energiatasemete arvutuste tulemustega annab võimaluse esitada täieliku $\text{ZnAl}_2\text{S}_4:\text{V}^{3+}$ -i energiatasemete struktuuri (joonis 8), mis sisaldab põhitsooni struktuuri ja selle kohal asetsevaid lisandenergia tasemeid. Võtmetulemusena tuvastati et V^{3+} lisandi kõige alumise energianivoo positsiooni asukoht ZnAl_2S_4 keelutsoonis on umbes 1,36 eV valentstsooni laest kõrgemal.

KOKKUVÕTE

Me oleme näidanud mitmete näidete varal, kuidas on võimalik kokku kombineerida kristallivälja laenguvahtuse mudelil põhinevat poolempiirilist kristallivälja analüüsi ja DFT-l põhinevaid struktuursete, elektrooniliste, optiliste ja elastsete omaduste esmaprintsiibil rajanevaid arvutusi, et saada täiendav pilt siirdemetallidega ja haruldaste muldmetallidega dopeeritud kristallide füüsikalistest omadustest. Asjast huvitatule soovitame lugeda artikleid viidatud materjalides.

TÄNUAVALDUSED

Käesolevat uurimustööd toetasid i) Euroopa Sotsiaalfondi programm DORA meetmest “Doktoriõppe ja rahvusvahelistumise edendamine” ja ii) Euroopa Liit Euroopa Regionaalarengu Fondi kaudu (Tippkeskus “Mesosüsteemide

teooria ja rakendused”, TK114). Autor tänab dr Evi Vaiku abi eest käesoleva käsikirja tõlkimisel inglise keelest eesti keelde.

KIRJANDUS

Avanesov, A. G., Brik, M. G., Tumayev, E. N. (2001). Non-radiative transitions in the oscillating field model. *J. Lumin.*, 92, 133-137.

Bethe, H. A. (1929). Splitting of terms in crystals. *Ann. Physik*, 3, 133-206.

Brik, M. G., Ma, C.-G. (2012). First-principles studies of the electronic and elastic properties of metal nitrides XN (X = Sc, Ti, V, Cr, Zr, Nb). *Comput. Mater. Sci.*, 51, 380-388.

Brik, M. G., Drăgănescu, G. E., Avram, N. M., Avram, C. N. (2005). Non-radiative transitions in the anharmonic oscillating field model. *Physica B*, 364, 170-179.

Brik, M. G., Cavalli, E., Borromei, R., Bettinelli, M. (2009). Crystal field parameters and energy level structure of the MnO_4^{3-} tetraoxo anion in Li_3PO_4 , $\text{Ca}_2\text{PO}_4\text{Cl}$ and $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ crystals. *J. Lumin.*, 129, 801-806.

Brik, M. G., Sildos, I., Kiisk, V. (2011). Calculations of physical properties of pure and doped crystals: Ab initio and semi-empirical methods in application to $\text{YAlO}_3:\text{Ce}^{3+}$ and TiO_2 . *J. Lumin.*, 131, 396-403.

Brik, M. G., Nagirnyi, V., Kirm, M. (2012a). Ab-initio studies of the electronic and optical properties of ZnWO_4 and CdWO_4 single crystals, *Mater. Chem. Phys.*, 134, 1113-1120.

Brik, M. G., Nazarov, M., Ahmad-Fauzi, M. N., Kulyuk, L., Anghel, S., Sushkevich, K., Boulon, G. (2012b). Comparative first-principles analysis of un-doped and V^{3+} -doped $\alpha\text{-ZnAl}_2\text{S}_4$ spinel. *J. Lumin.*, 132, 2489-2494.

Brik, M. G., Avram, N. M., Avram C. N. (2013). Exchange charge model of crystal field for 3d ions. Avram, N. M., Brik, M. G. (eds.). *Optical Properties of 3d-ions in Crystals: Spectroscopy and Crystal Field Analysis*. Springer, 29-94.

Hohenberg, P., Kohn, W. (1964). Inhomogeneous electron gas. *Phys. Rev.*, 136, B864-B871.

Itoh, M., Fujita, N., Inabe, Y. (2006). X-ray photoelectron spectroscopy and electronic structures of scheelite- and wolframite-type tungstate crystals. *J. Phys. Soc. Jpn.*, 75, 084705.

Kohn, W., Sham, L. J. (1965). Self-consistent equations including exchange and correlation effects. *Phys. Rev.*, 140, A1133-A1138.

Makhov, V. N., Kirm, M., Stryganyuk, G., Vielhauer, S., Zimmerer, G., Malin, B. Z., Solovyev, O. V., Korableva, S. L. (2012). 5d-4f luminescence of Ce^{3+} , Gd^{3+} and Lu^{3+} in LiCaAlF_6 . *J. Lumin.*, 132, 418-424.

- Malkin, B. Z. (1987). Crystal field and electron-phonon interaction in rare-earth ionic paramagnets. Kaplyanskii, A. A., Macfarlane, B. M. (eds.). Spectroscopy of Solids Containing Rare-Earth Ions. Amsterdam, North Holland, 33.
- Newman, D. J. (1971). Theory of lanthanide crystal fields. Adv. Phys., 20, 197-256.
- Newman, D. J., Ng, B. (1989). The superposition model of crystal fields. Rep. Prog. Phys., 52, 699.
- Pytalev, D. S., Chukalina, E. P., Popova, M. N., Shakurov, G. S., Malkin, B. Z., Korableva, S. L. (2012). Hyperfine interactions of Ho³⁺ ions in KY₃F₁₀: Electron paramagnetic resonance and optical spectroscopy studies. Phys. Rev. B, 86, 115124.
- Rudowicz, C. (1985). Transformation relations for the conventional O_k^q and normalized O_k^q Stevens operator equivalents with $k=1$ to 6 and $-k \leq q \leq k$. J. Phys. C: Solid State Phys., 18, 1415-1430.
- Segall, M. D., Lindan, P. J. D., Probert, M. J., Pickard, C. J., Hasnip, P. J., Clark, S. J., Payne, M. C. (2002). First-principles simulation: ideas, illustrations and the CASTEP code. J. Phys. Condens. Matt., 14, 2717.
- Stevens, K. W. H. (1952). Matrix elements and operator equivalents connected with the magnetic properties of rare earth ions. Proc. Phys. Soc. A, 65, 209.
- Yeung, Y. Y. (2013). Superposition model and its applications. Avram, N. M., Brik, M. G. (eds.). Optical Properties of 3d-ions in Crystals: Spectroscopy and Crystal Field Analysis. Springer, 95-121.

*Teaduspreemia keemia ja molekulaarbioloogia alal
uurimuste tsükli
“Ribosoomide biogenees ja funktsioneerimine bakterites” eest*



Jaanus Remme

Sündinud 18.12.1953

1972 Tallinna Spordi-internaatkool
1980 Tartu Ülikool, bioloog-geneetik
1993 PhD, bioloogia, Tartu Ülikool

1980–1995 Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi insener, grupijuht, teadur, vanemteadur; 1993–1997 Tartu Ülikooli vanemteadur, dotsent; alates 1997 molekulaar- ja rakubioloogia instituudi professor

2001 Valgetähe III klassi teenetemärk

Avaldanud 48 teaduspublikatsiooni

VALKUDE BIOSÜNTEES JA SELLE UURIMINE TARTUS

Valgusünteesi käigus realiseerub pärilik teave, mis on talletatud geenides. Programmeeritud valgusünteesi teket peetakse elu tekke alguseks. Siit tulevalt on valgusüntees elu üks alusprotsess ja selle protsessi molekulaarsete mehhanismide mõistmine on tänapäeva alusteaduste üks olulisemaid aspekte. Nii nagu teistegi alusteadmiste puhul on valgusünteesi tundmine vajalik nii eluprotsesside mõistmisel kui nende suunamisel. Kaasaegsed eluteadused rajanevad suures osas genoomide informatsioonil. DNA nukleotiidsete järjestuste kiire ja üha odavnev määramine toob kaasa kogu bioloogiateaduse muutumise. Evolutsiooniteooria, kui üks keskseid bioloogia teooriaid koos geneetikaga, on muutumas täppisteaduseks ja liikide süsteematika asetub tõeliselt evolutsioonilisele alusele. DNA järjestustes peituv informatsioon on iseenesest väga spetsiifiline ja tema seos vastava organismi omadustega ei ole ühetähenduslik, samade geenide põhjal võib areneda vägagi erinev organism. Geenide informatsioon realiseerub valkude tasemel ja seetõttu peame arvestama valgusünteesi eripära ja tundma selle mehhanisme. Viimased aga pole kaugeltki selged. Tänapäeva meditsiiniteadus

ja biotehnoloogia kui kiirelt arenevad majandusharud põhinevad elu molekulaarsete mehhanismide tundmisel ja nende kasutamisel. Käsitlen siin põgusalt valkude biosünteesi uurimise lugu Tartus ja mõningaid probleeme valgusünteesi uurimisel, mis on olulised meie töörühma jaoks. Avaldan tänu kõigile siin nimetatud teadlastele, nii minu õpetajatele kui õpilastele, kellelt kõigilt olen palju õppinud ja nad mind on elus edasi aidanud.

VALGUSÜNTEESI UURIMISEST TARTUS

Valgusünteesi uurimist Tartus alustas Artur Lind, kirurg, kelle käed ei talunud enam kummikindaid. 20. sajandi 60ndate algul arstiteaduskonna bioloogilise keemia kateedri juures alustas Artur radioaktiivsete aminohapete lülitumise uurimist valkudesse. Tema loodud uurisgrupp sai kiiresti kuulsa ja avaldas sügavat mõju paljudele selle liikmetele. Kuidas muidu seletada Artur Linnu, keda laiemalt tunti Atsi nime all, jõudmist mitme ilukirjandusliku ja meenutusraamatu lehekülgedele. Atsi labor oli eriline nähtus, mille mõju Eesti teadusele, eriti molekulaarbioloogiale, on raske üle hinnata. Entusiasm ja innukus, mille kutsus esile Atsi isik koos kaastöölisega, on unustamatu nähtus. See nähtus väärrib kindlasti eraldi uurimist ja käsitlemist, kuid jääb siiski väljapoole selle kirjatüki piire. Üks autori arvates oluline aspekt, mis aitas Atsi laboril võimekaid noori ligi tõmmata, oli asjaolu, et just XX sajandi 60ndail selgitati välja põhilised päriliku teabe ülekande teed: murti lahti geneetiline kood, selgitati valgusünteesi põhilised etapid, kirjeldati geenide aktiivsuse regulatsiooni esimesed alusmehhanismid. Teadus, mis arenes nii kiiresti kui molekulaarbioloogia eelmise sajandi teisel poolel, tõmbas paratamatult ligi teadusest huvitatud noori. Teine ja ilmselt mitte vähem tähtis asjaolu, mis tingis Atsi labori suure populaarsuse, oli tema rahvusvaheline haare. Rahvusvaheline igas mõttes – probleemide, kirjanduse, isiklike sidemete ja reisimise osas. Praegu tundub see iseenesestmõistetav, kuid NSVL piires oli arusaam, et teadus saab olla vaid rahvusvaheline, pigem erandlik. Väga tihedad sidemed olid NSVL tähtsamate laboritega Moskvast, Leningradis, Novosibirskis ja mujalgi.

Artur Lind oli esimene Tartu teadlane, kes uuris valgusünteesi. Esimesena kasutas ta radioaktiivseid aminohappeid. Samal ajaperioodil, kui maailmas leiti RNA tähtis osa valkude sünteesil, alustati Arturi laboris esimesena Eestis RNA uurimist. Artur sai koos kaastöölisega andmeid, mis näitasid, et lisaks kõrgmolekulaarsetele ribosoomi RNA'le on imetajate ribosoomides ka väikesed RNA molekulid. Nii avastati 5S ribosoomi RNA Tartus sõltumatult teistest uurijatest Läänes. Üheks töömahukamaks projektiks kujunes roti maksa 5S ribosoomi RNA (5S rRNA) nukleotiidsed järjestuse määramine. Selles töös oli oluline osa Arturi õpilastel R. Villemsil ja M. Kelvel. Mujal maailmas määrati 5S rRNA nukleotiidsed järjestused mitmetel evolutsiooniliselt kaugetel liikidel, mis andis aluse makroevolutsiooni-

liste järelduste tegemiseks. Imselt pole see juhus, et praegusel ajal on Tartu üks DNA nukleotiidsse järjestuse määramise oluline keskus. Ja seegi pole juhus, et Tartu teadlased R. VILLEMSI juhtimisel määravad ja kasutavad nukleotiidsseid järjestusi evolutsiooniprotsesside kirjeldamisel eelkõige inimese näitel. R. VILLEMSI pani aluse RNA ruumilise struktuuri uurimisele spektroskoopia meetoditega rohkem kui 40 aasta eest. 5S rRNA sulamiskõverate mõõtmine pani aluse selle siiani mõistatusliku RNA molekuli ruumilise struktuuri ennustamisele.

RNA uurimine laienes peagi teistele ribosoomi RNAdele, aga samuti tRNA ja mRNA erinevate aspektide uurimisele. Atsi labori kromatograafia kolonid, mida kasutati erinevate RNA molekulide eraldamiseks, jätsid sügava mulje kõigile, kes juhtusid neid nägema. Kromatograafia ja geel-elektroforees olid tähtsamad meetodid, mis arendati välja täiuseni. Esialgu oli labor väga piiratud tehnilise varustusega. Noorte ja võimekate teadlaste – R. VILLEMSI, M. Kelve, M. Saarma, A. Metspalu – (nimetades ainult vähe-seid ja kõige olulisemaid tegijaid) tulekuga muutus labori varustatus kiiresti oma aja võimalusi ületavaks. Seejuures mängis olulist osa Füüsika Insti-tuudi juurde loodud molekulaargeneetika töörühm, mis asus küll füüsiliselt Atsi laboris. Seda juhatas osavalt Mart Saarma, kes füüsikute toel suutis laborile olulised aparaadid muretseda. Ultratsentrifuugid ja radioaktiivse kiirguse spektromeeter olid vaid Atsi laboris. Artur mõistis kaasaegse apa-ratuuri tähtsust biokeemilises uurimistöös ja andis selle teadmise edasi ka oma õpilastele ja nende õpilastele.

Ribosoomi uurimisel kujunes üheks teetähiseks ribosoomi pinna uurimine, mis viis seal asuvate nukleotiidsse kindlakstegemiseni. Selgus, et euka-rüootse ribosoomi pinnal on suhteliselt sagedasemad pürimidiinid (C ja U), mida tõlgendati kui võimalikku platvormi mRNA poly(A) saba sidumisel. Uurimuse tulemused avaldati Euroopa biokeemiaühingute ajakirjas. Sellest artiklist algas järjekindel ja viljaks artiklite jada rahvusvahelistes aja-kirjades. Teaduse rahvusvahelist olemust mõisteti laboris hästi. Pärast kan-didaadikraadi kaitsmist suundus R. VILLEMSI Uppsalasse end täiendama. Seal sattus ta C. G. Kurlandi laborisse, millest algas elukestev koostöö ja sõprus kahe karismaatilise teadlasisiksuse vahel. Richard tuli Rootsist tagasi uute ideedega ja tõi kaasa mudelobjektina soolekepike ribosoomi, mida uurime siiani. Richard kutsus laborisse teise Mardi, Mart Ustavi. Viimane oli varem olnud A. Aaviksaare õpilane ja pärast ülikooli lõpeta-mist suunatud Nõukogude Armeesse. Molekulaarbioloogia laboris moodus-tasid Richard ja Mart 'dünaamilise duo', mis muutis labori seniseid teema-sid ja meetodeid. Hakati uurima ribosoomi valke ja valk-RNA seondumist. Algas väga produktiivne periood, mida iseloomustas afiinsuskromato-graafia rakendamine RNA-valk komplekside uurimisel. Kõigepealt määrati ribosoomi kõige väiksema RNA, 5S rRNA'ga seonduvad ribosoomi val-

gud. 30 aastat hiljem näitas ribosoomide uurimine kristallograafia meetoditega, et tõepoolest valgud L5, L18 ja L25 ongi ainsad, mis 5S rRNA-ga vahetult kontakteeruvad, nii nagu Ustav ja Villems kindlaks tegid. Nendes katsetes osalesid Toivo Maimets, Mart Speek, Ene Metspalu ja teisedki. M. Speek tegi põhjaliku uurimistöo 5S rRNA struktuuri määramisel, kasutades struktuuritundlikke nukleaase. Uuriti ka ribosoomi ligandidega – tRNA ja mRNA-ga seonduvaid ribosoomivalke. Kuigi afiinsusmeetodite abil määratud valgud ei osutunud hilisemate uuringute valguses kõik otse tRNA või mRNA sidujateks, andsid ka need katsed olulisi andmeid ribosoomi töö kohta. Üks huvitavam tulemus, mille sai hilisem silmapaistev pedagoog Tago Sarapuu, näitas, et kolm kindlat ribosoomivalku (S4, S9 ja S13) suudavad stabiliseerida mRNA-tRNA äratundmist, st need kolm valku suudavad teha sedasama, mida terve ribosoomi väike subühik. Tõepoolest, Nobeli preemiaga pärjatud uurimused V. Ramakrishnani, aga samuti teistes ribosoomi laboreis saadud tulemused näitasid, et valgud S9 ja S13 on ainsad, mis ulatuvad ribosoomi dekodeerivas tsentris mRNA koodoni ja tRNA antikoodoni kompleksini. Siiski tuleb arvestada, et ribosoomi dekodeeriv keskus on RNA põhine ja koosneb peamiselt ribosoomi väiksema subühiku RNAst. Praeguse arusaama kohaselt on mRNA koodoni ja tRNA antikoodoni paardumise täpsuse määramisel juhtiv osa RNA-l ja r-valgud on pigem moduleeriva tähtsusega. Samas tuleb märkida, et ribosoom on üks ühtne struktuur, milles RNA ja valgud on integreeritud kompaktselt struktuuriks ja valkude ning RNA rollide vastandamine on kunstlik.

Üks läbiv teema oli sellise ribosoomi komponendi otsimine, mis suudaks sünteesida peptiidsidet. Vaatamata pingutustele ja paljudele lootustandvatele vihjetele ei läinud korda sellist komponenti leida. Sarnaseid katseid tehti ka paljudes teistes laborites üle maailma. Tol ajal ilmusid nii mõnedki tööd kus näidati, et paljas 23S rRNA suudab peptiidsideme moodustumist katalüüsida. Paraku lükati need tulemused hiljem ümber, paljas ribosoomi RNA ei katalüüsi aminohapete polümerisatsiooni. Huvitav on asjaolu, et ribosoomi aktiivtsentri, mis vastutab peptiidsideme sünteesi eest, moodustab tõepoolest kindel osa 23S rRNA-st. Sellise järelduse sai teha alles selle sajandi algul tehtud kõrge lahutusvõimega kristallograafiline analüüs. RNA põhine ensümaatiline katalüüs kirjeldati esmakordselt 1980ndatel algul. See oli niivõrd oluline avastus, et mõjutas mitme ribosoomi uuriva teadlase mõtlemist ja andis tõuke uurimistulemuste interpretatsioonile soovitud suunas. Meie sellele liimile ei läinud. Nii nagu dekodeeriva tsentri puhul ribosoomi väiksemas subühiks, on ka peptiidsideme sünteesi tsenter ribosoomi suuremas subühikus moodustunud küll RNAst kuid töötab vaid koos ribosoomivalkudega.

Samal ajal uuriti Tartu keemiahoones edukalt eukarüootseid ribosome. Roti maksast eraldatud ribosoomide komponentide struktuuri ning nende

komponentidega sarnaseid katseid, kui Ustavi ja VILLEMSI juhtimisel, tehti bakteri ribosoomidega. Määrati nii 5S, 5.8S, tRNA kui mRNA analoogidega seonduvad eukariootsed ribosoomivalgud, uuriti nende RNAde struktuuri ja muidki aspekte.

Samal ajal hakati Mart Saarma juhtimisel uurima ribosoomi RNA geene. See oli hüpe tundmatusse, mis tähendas täiesti uute meetodite selgeksõppimist ja kasutamist. Tolleaegsed tudengid Indrek Toots ja Heini Ilves olid eriti entusiastlikud DNA tehnoloogia alal. Kui Mart Saarma tõi Baselist F. Mischeri Instituudist kaasa monokloonsete antikehade tehnoloogia, siis asusid mitmed noored immunoloogia meetodeid kasutama ja hakkasid uurima teisi probleeme kui seni. Nii juhtuski, et valgusünteesi uurimine jäi tagaplaanile. Uued meetodid ja lähenemised aga rikastasid ka valgusünteesi alaseid uurimisi. DNA-põhiste meetodite kasutamine võimaldas hakata kasutama lisaks senistele biokeemia meetoditele ka molekulaargeneetika arsenalit. Selleks ajaks, 1980ndate teiseks pooleks, tegeles peale allakirjutanu valgusünteesiga seotud küsimustega veel A. Metspalu grupp, kus püüti identifitseerida ribosoomivalgude geene imetajates. Metspalu avastas endas varsti meetodite arendaja ja organisaatori võimed ning siirdus biomeditsiini geneetika põllule.

Uute DNA-põhiste meetodite kasutamine, mille sisseviimisel olid suured teened Mart Ustavil, võimaldas meil hakata uurima üksikute nukleotiidide tähtsust ribosoomide funktsioneerimisel. Ribosoomi biokeemia alal täiendasin teadmisi ja oskusi A. Spirini laboris Pushinos, I. Ionaki juures Prahast ja eriti olulisel määral K. Nierhausi laboris Max-Planck-Instituudis Berliinis. Tartus pakkus meile erilist huvi peptiidsime sünteesi katalüüs ribosoomis. See sai U. Saarma uuristeemaks, mis päädis PhD kraadiga. T. Tenson alustas bakteri ribosoomi uurimisega meie grupis, aga siirdus peagi Chicagosse A. Mankini laborisse, kus alustas makroliidsete antibiootikumide uurimist. DNA tasemel ribosoomi geenide muutmine võimaldas meil hakata detailselt uurima ribosoomide biogeneesiga seotud rRNA piirkondi. Sel alal tegi tähelepanuväärselt heatasemelist tööd Aivar Liiv, kellega jagame laborit siiani. Eraldi tahaksin veel esile tuua Lauri Peili ja tema suurepärase tehnilise taibu ning leidlikkuse. Lauri alustas meie laboris modifitseeritud nukleotiidide uurimist ja pani aluse järgnevate tudengite tööle. Peale doktorikraadi kaitsmist sai Laurist proteoomika ja mass-spektromeetria spetsialist. Tänu Lauri Peilile saime teha mitmeid katseid valkude sünteesi ja ribosoomide biogeneesi uurimisel rakkudes, mis poleks olnud ilma proteoomikata võimalikud. Ka teaduspreemiani viinud töö elongatsioonifaktor P modifikatsiooni keemilise struktuuri määramine on eelkõige Lauri Peili teostus.

Valkude biosünteesi ja ribosoomide biogeneesi molekulaarsete mehhanismide uurimine Tartus jätkub.

VALGUSÜNTEESI UURIMISE OLULISEMAD KÜSIMUSED

Ribosoomide struktuuri kindlakstegemine 3 Å tasemel käesoleva aastatuhande esimesel kümnendil viis valgusünteesi uurimise uuele tasemele. See Nobeli preemiaga kroonitud saavutus muutis võimalikuks hakata uurima ribosoomide struktuursete komponentide funktsionaalset tähtsust atomaarsel tasemel. Ribosoomide atomaarne struktuur on tänaseks teada nii bakterites, arhedes kui eukarüootides ja seda mitmes funktsionaalses olekus koos erinevate liganditega. Stabiilsed struktuursed olekud on kas teada või saavad peagi selgeks, kuid milliseid teid pidi need struktuursed üleminekud toimuvad on kindlasti oluline probleem ribosoomi uurimisel. Teisest küljest on tähtis aru saada, kuidas tagatakse mRNA koodonite äratundmise täpsus. See küsimus tundus juba selge olevat, kuid hiljuti näitas M. Yusupovi grupp, et see pole kaugeltki nii. Me teame, et peptiidsideme süntees ribosoomidel sõltub tRNA ja mRNA korrektsest seondumisest. Aga kuidas need teineteisest 70 Å kaugusel asuvad tsentrid omavahel signaaliseerivad, on täiesti lahtine. Peptiidsideme sünteesi katalüüsi kohta on samuti mitu võistlevat teooriat, millest ükski pole üldist tunnustust leidnud. Ribosoomi struktuuri seisukohalt on huvitav probleemide ring ka bakteri ja eukarüooti ribosoomi struktuursete erinevuste tähtsus. Millist osa valgusünteesil mängivad eukarüootidele ainuomased struktuursed elemendid. Kas need elemendid on seotud valgusünteesi regulatsiooniga ja kui, siis kuidas? Selle probleemi lahendamisele püüame meiegi kaasa aidata.

Hoopis rohkem on lahendamata küsimusi valgusünteesi regulatsiooni alal. Nimetan siin vaid üht. On teada, et ribosoomid on struktuurselt heterogeensed, nad sisaldavad kas erinevaid valgulisi komponente või on RNA erineva järjestusega, või siis erinevalt modifitseeritud. Kas sellised struktuursed erinevused toovad kaasa ka funktsionaalse erinevuse? Teisisõnu, kas kõik ribosoomid on võimelised sünteesima kõiki valke võrdse eduga? Mitmed sõltumatud tulemused lubavad arvata, et ribosoomide koostis on tähtis geenide avaldumise kontrolli tase. Valgusünteesi ümber lülitamiseks uute mRNAde kasutamisel muudetakse veidi ribosoomide koostist. Selle trikiga saaks korruga ja kiiresti muuta paljude valkude sünteesi kiirust elusrakus. Meie huviorbiiti kuuluvad alternatiivsed ribosoomivalgud ja nende võimalik funktsionaalne tähtsus.

Suhteliselt vähe teame me sellest, kuidas ribosoomide funktsionaalne struktuur tekib ja millised faktorid selles osalevad. Siin puudub adekvaatne rakuvaba süsteem, mille abil uurida nii keerulist protsessi, kui seda on ribosoomi biogenees, mille kohta saab elusrakkudes vaid piiratud informatsiooni. Ka siin üritame anda oma panust.

Ribosoomide biogeneesiga on tihedalt seotud ka ribosoomide parandamise temaatika. Meil õnnestus mõne aasta eest näidata, et keemiliselt kahjustatud ribosoomi saab taas aktiivseks muuta, kui kahjustatud valgud ribosoomides

asendada. Selle nähtuse bioloogiline taust ja tähtsus on ebaselged. Püüame siin vähemalt osalist selgust tuua lähemate aastate jooksul nii bakteri kui pärmisüsteemis. Me ei tea ka seda, kas keemiliselt kahjustatud või katkenud ribosoomi rRNA parandatakse. See väljakutse jääb ilmselt järgmisele põlvkonnale lahendada.

*Teaduspreemia tehnikateaduste alal uurimuste tsükli
“Merelt lähtuvate ohtude kvantifitseerimine ja minimeerimine
Läänemere ranniku kontekstis” eest*



Tarmo Soomere

Sündinud 11. oktoobril 1957 Harjumaal

1974 Kohila Keskkool
1980 Moskva Riiklik Ülikool, matemaatika
1984 füüsika-matemaatikakandidaat, Moskva Okeanoloogia Instituut
1992 matemaatikadoktor, Tartu Ülikool
2007 Eesti Teaduste Akadeemia liige
2009 *Academia Europea* liige

1983–1990 Eesti TA Termofüüsika ja Elektrofüüsika Instituudi nooremteadur, vanemteadur. 1990–1992 Eesti TA Ökoloogia ja Mereuuringute Instituudi vanemteadur. 1992–2002 Eesti Mereinstituudi vanemteadur. 2002–2004 TTÜ meresüsteemide instituudi vanemteadur, sektorijuhataja, asedirektor. 2005–2008 TTÜ küberneetika instituudi vanemteadur, 2005–2010 ehitus-teaduskonna mehaanikainstituudi rannikutehnika professor (osakoormu-sega).

Alates 2009 TTÜ küberneetika instituudi juhtivteadur, lainetuse dünaamika labori juhataja.

2002 Eesti Vabariigi teaduspreemia tehnikateaduste alal
2007 Balti Assamblee teaduspreemia

Avaldanud 145 teaduspublikatsiooni.

SISSEJUHATUS

Eesti ja eestlaste suhted mere ja rannaga on keerukad ning aastasadade jooksul radikaalselt muutunud. Rahvusromantilise kallakuga käsitlus peab muistseid eestlasi peaaegu et Läänemere valitsejaks ja Eestit Hõbevalge tee sõlmpunktiks. Tõsi ta on, et mitmesaja aasta vältel olid mitmed Eestis paiknevad linnad Hansa Liidu kaudu tollase võimsa struktuuri komponendid ja olulised vahejaamad kaubateel, mis kulges üle Läänemere kaugele ida poole. Meri oli pikki sajandeid mugavaks ühendusteeks, selle rannal paiknevad linnad olulisteks versta-postideks ja külad kui eelpostid suhetes muu maailmaga ka siis, kui mõnda sorti suhted (nt piirituse vedu Soome) olid seadusega keelatud. Vaid eelmisel sajandil oli surve ja kontroll ligi viiekümne aasta jooksul nii tugev, et vaba mere tähendus ja ranna olulisus ühele mereriigile on nii tavakodanike kui ka riigiisade mõttemaailmast peaaegu kadunud.

Nii mere kui ka maantee ääres elamine on mugav kiire ühenduse mõttes, kuid sel on ka oma varjuküljed – liikluse kõrvalmõjuna reostus või avatus muudele ohtudele, nagu tormihood või kontvõõrad. Osa teooriaid väidab, et eestlased olla olnud üsna tundlikud merelt lähtuvatele ohtudele, eelistades elukohta sisemaal ning jättes rannaäärsed alad ja saared rootslaste kasutada. Hardo Aasmäe on (viitega kuulsale maadeuurijale Mikluhho-Maklaile) öelnud, et kui minevikus oli mere ääres elamine odav ja ohtlik, siis praegu on see kallis ja ohtlik. Ranna ja mere mõistlikust kasutamisest tulenevad plussid kaaluvad miinuspoole siiski kõvasti üle. Seda on näha meie viimase kahe aastakümne ranna strateegiliste väärtuste realiseerimisega seotud arengutest. Plahvatuslikult on laienenud sadamate ehituse ja renoveerimisega seotud tööde maht ja keerukus. Rajatud on uued süvasadamad Saaremaale ja Sillamäele ning praktiliselt uus sadam Kundasse. Märkatavalt on laiendatud Tallinna, Muuga ja Paldiski sadamate kompleksi, rääkimata olemasolevate väikesadamate renoveerimisest ja uute rajamisest. Nende tööde tarvis on teostatud Eesti kõigi aegade suurimad veealuste maavarade kaevandamised ning sadamate basseinate ja sissesõiduteede süvendamised. Järjest tiheneb laevaliiklus Eestiga piirnevatel merealadel, endiselt on moes elada merevaatega majas või lausa veepiiri ääres.

Kõik need protsessid tähendavad aga, et inimesed on üha enam eksponeeritud merelt lähtuvatele ohtudele ning infrastruktuur muutub nende ohtude suhtes järjest tundlikumaks. Merelt lähtuvate ohufaktorite analüüsi ning nende minimeerimise võimalustega tegelevad mitmed teadusharud ja institutsioonid. Kõige enam on sellele valdkonnale suunatud rannikutehnika (*coastal engineering*). Selle keskne ülesanne on rannikut mõjutavate tegurite omaduste analüüs ja prognoosimine ning võimaluste leidmine rannikute kaitseks ja mõistlikuks kasutamiseks. Kitsamas mõttes käsitleb see rannapiirkonnas asetsevate ehitiste projekteerimist ja eksploateerimist mere ja maismaa piiril aset leidvate protsesside põhjaliku tundmise ja analüüsi alusel. Ehitiste alla käivad ka paljud otseselt ehitusega mitte seotud ettevõtmised, nagu ranna täitmine liivaga või veeteede rajamine, seda nii süvendamise kui ka optimaalse planeerimise näol.

Kõnesoleva uuringute tsükli kandvaks ideeks on rannikutehnika klassikaliste ülesannete käsitlemine kaasaegsete meetoditega Läänemere idaranniku ning eelkõige Eestiga piirnevate merealade kontekstis. Suur hulk rannikuid mõjutavaid tegureid muutuvad koos kliimamuutustega, mistõttu merelt lähtuvate ohufaktorite adekvaatne analüüs on ülesanne, mida ei saa kunagi lugeda lõplikult lahendatuks ning seal on jätkuvalt palju arenguruumi uute tehnoloogiliste lahenduste jaoks. Sarnaselt paljude teiste insenerimõtte valdkondadega on rannikutehnikas järjest kasvav suund merelt lähtuvate ohtude mõju preventiivseks käsitlemiseks, selliste lahenduste leidmiseks, mis minimeeriksid võimaliku õnnetuse kahju ja õnnetuse taga-

järgede likvideerimiseks vajalike kulutuste summa. Allpool vaatlen kaht keskselt fundamentaalset mehhanismi, mille kaudu avamerelt pärinevad ohud rannikut mõjutavad: laineleviga seonduvaid koormusi ja hoovustega edasi kanduvat reostust. Nende mõju avaldub kõige teravamalt inimtegevuse kontekstis.

LAINED MUJAL JA MEIE MEREL

Pinnalainete omadused on paelunud teadlasi ja teisi huvilisi aastasadu, kuid veel praegugi ilmnevad lainete järjest uued omadused. See on üks väheseid maateaduste valdkondi, mis on pikka aega olnud naabervaldkondades töötanud kolleegidest kaugel ees (Solli jt, 2007). Teatavas mõttes on meil vedanud: paikneme Atlandi ookeanilt tulevate tormide teel ning need tormid tekitavad tõenäoliselt kogu maailmaookeani kõrgeimaid laineid. Lainete näitel saab selgeks, kui erineval moel iseloomustavad looduslikke nähtusi nende keskmised ja ekstreemsed väärtused. Maailma suurimad keskmised lainekõrgused on tõenäoliselt nn 'mõirgavatel neljakümnendatel' India ookeanis, kuid lainekõrguste absoluutne maksimum peaks paiknema Gröönimaa ja Inglismaa vahel (Sterl, Cairns, 2005). Praegu peetakse maailma kõrgeimaks avamerel usaldusväärset mõõdetud oluliseks lainekõrguseks 18,5 m Rockalli kalju lähisel 2000. a veebruaris (Holliday jt, 2006). Sellele sekundeerib 17,9 m Mehhiko lahes orkaani Ivan mõjualas 2004. a (Wang jt, 2005).

Rannale lähemal lainekõrgus üldiselt kahaneb, sest osa lainete energiast sumbub tänu refraktsioonile, põhjahõõrdele ja laineharjade osalisele murdumisele; samuti peegeldub osa energiast tagasi avamerele. Teisalt on võimalik lainekõrguse oluline, sageli mitmekordne suurenemine refraktsioonist tingitud laineenergia koondumise tõttu üksikutele merealadele ning nn teravdumise (*shoaling*) protsessis. Teravdumine on pikkade lainete kõrguse kasvu peamine mootor laine levikul avaookeanist rannavööndisse ning tsunami keskne ohutegur. Pealtnäha süütu refraktsioon on aga tõenäoline selgitus seni mõõdetud olulise lainekõrguse absoluutsele rekordile – 24 m taifuuni Krosa lähenemisel Taiwanile 2007. a oktoobris kõigest 38 meetri sügavuses vees (Liu jt, 2008; Babanin jt, 2011). Muide, üks esimesi selle nähtuse tõttu rannikuvööndis aset leidva lainekõrguse anomaalset kasvu kvantifitseerinud uuringuid (Soomere, 2001) kuulus 2002. a Eesti riikliku preemia saanud tööde komplekti.

Läänemere lainete süstemaatilised uuringud ulatuvad tagasi vähemalt 1920ndatesse, mil Taani väinade lähisel ankurdatud tulelaevadelt alustati regulaarseid lainetuse vaatlusi (Hünicke jt, 2013). Eestis on visuaalsete lainevaatluste traditsioon veel pikem: Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudi (EMHI) arhiivides on seni töötlemata lainetuse vaatlusandmeid Ruhnu saarelt juba 1890ndatest. Alates 1946. aastast vaadeldi laineid kolm

korda päevas mitmest rannikul paiknevast hüdrometeoroloogiajaamast, algul teatava kvalitatiivse skaala alusel (Soomere, 2013) ning alates 1954. aastast meie tavapärase meetermõõdustikus (Zaitseva-Pärnaste jt, 2011). Päril detailseid uuringuid tehti Tallinna lähel mõne aasta vältel enne 1980. a olümpiamänge (Orlenko jt, 1984). Rootsis testiti 1980ndate algul võimalusi kasutada laineenergiat elektri tootmiseks. Selle tarvis tehti mitme aasta jooksul mõõtmisi võimalikes lainelektrijaamade asukohtades ning paigutati Almagrundeti lähiste ülespoole vaatavad kajaloodid. Neist mõõtmistest on pärit seni pikim (1978–2003) Läänemere lainetuse andmestik (Broman jt, 2006).

Kõik need uuringud panustasid teataval määral Läänemere lainete keskmiste, tüüpiliste ja ekstreemsete omaduste määratlemisse. Nii ookeanilainetuse kui ka Läänemere laineväljade ruumiline varieeruvus ja ekstreemsete lainete parameetrid on selgunud siiski suhteliselt hiljuti. Läänemerel olid need üldiselt tuntud aastasadu, kuid kaasaegsete teadmiste mõttes said need teadlastele enam-vähem selgeks alles eelmisel aastakümnel, mil määratleti siin puhuvate tormituulte mõneti ebatavaline muster (Soomere, Keevallik, 2001, 2003), lainete reaktsiooni eripära neile muustritele (Jönsson jt, 2003; Soomere, 2003) ning koostati Läänemere põhjaosa lainekliima peamiste omaduste kirjeldus (Broman jt, 2008; Schmager jt, 2008; Soomere, 2008). Nõnda kujunes kõnesoleva tsükli lainetusele fokuseerivate tööde vundament.

Muu hulgas selgus, et ekstreemsus lainete ja veetõusu kontekstis on märksa sügavama tähendusega kui näiteks tuule kiiruste puhul (Soomere jt, 2008a) ning et hiidlained meie randades on mitte lihtsalt üks meie kodumere igapäevaseid elemente (Soomere, Engelbrecht, 2006), vaid õpetlikud nähtused kompleksüsteemide alases fundamentaalteaduses (Soomere, 2009b). Sellelt vundamendilt on viimastel aastatel lähtunud mitmed huvitavad arengud pikkade lainete ja tsunami teoorias, kaasa arvatud lainete transformeerumine madalas vees ning sellega seonduvad mittelineaarsed protsessid ja hiidlainete süvaanalüüs mitmesugustes erinevates olukordades (Ruban jt, 2010; Soomere, 2010). Noorte kolleegide uuringuid selles vallas tunnustas Euroopa Geoteaduste Liit Pliniuse medaliga (Ira Didenkulova 2010). Neist on antud ülevaade raamatus "Teadusmõte Eestis VIII. Meri. Järved. Rannik" (Soomere, 2011; Didenkulova, 2011).

LAINETE MÕÕTMINE

Enamasti alustatakse mingi loodusnähtuse analüüsi selle tüüpiliste või keskmiste omaduste määratlemisest. Pinnalainete puhul on see analüüs märksa keerukam kui paljude teiste meteoroloogiliste või hüdrodünaamiliste nähtuste puhul, sest lainetus merel koosneb suurest hulgast erinevates suundades levivatest, erineva pikkuse ja kõrgusega komponentidest. See-

tõttu on isegi lainete klassikaliste parameetrite (kõrgus, pikkus, periood, leviku suund) määramine sügavalt mittetriviaalne ülesanne ning mere-
lainete kõrgust või perioodi teatavaid aspekte kirjeldavate parameetrite
nimistu mitme lehekülje pikkune (IAHR, 1989). Eriti keerukaks teeb üles-
ande asjaolu, et erinevatel aegadel ja eri riikides on olnud kasutusel eri-
nevad lainekõrguse ja -perioodi määratlused.

Praegu kasutatakse valdavalt nn olulist lainekõrgust. See on ajalooliselt de-
fineeritud kui 1/3 kõrgeimate lainete keskmine kõrgus $H_{1/3}$ ja erineb ena-
masti vähem kui 10–20% visuaalselt hinnatud lainekõrgusest. Kuna üksik-
lainete eristamine on samuti mittetriviaalne protsess, on tasapisi üle mindud
olulise lainekõrguse $H_s = 4\sqrt{\sigma}$ definitsioonile veepinna ruutkeskmise
hälbe σ kaudy. Rayleigh jaotusega lainesüsteemides on $H_{1/3} \approx 4.005\sqrt{\sigma}$
(Massel, 1989), seega on nende määratluste erinevus 0,1% ringis. Uus
definitsioon on märksa mugavam kasutada, sest sellel on selge füüsikaline
sisu ja ühemõtteline seos lainetuse energiaga. Edaspidi kasutan lainekõrgust
peamiselt olulise lainekõrguse tähenduses, v.a visuaalsete vaatluste puhul.
Samalaadsed probleemid kerkivad esile lainete perioodi ja levikusuuna
määramisel: keskmine periood on ligikaudu 20% võrra lühem kõrgei-
mate lainete perioodist ning sageli domineeriv leviku suund lihtsalt puudub.

Tsükli üheks oluliseks väljundiks oli Läänemere lainetuse klimatoloogiliste
parameetrite täpsustamine. Kogu Läänemere basseini kogutud pikaajaliste
vaatlus- ja mõõtmisandmete ning lainetuse numbrilise modelleerimise tule-
muste võrdleva analüüsi kaudu määratleti Läänemere avaosa erinevate re-
gioonide ja Soome lahe lainekliima peamised parameetrid (Räämet jt,
2009; Räämet, Soomere, 2010; Soomere, Räämet, 2011a; Soomere jt,
2012). Sõltumata laineid iseloomustavate suuruste valikust on Läänemere
lainekliima igal juhul võrdlemisi mahe. Aasta keskmised lainekõrgused
(mida allpool nimetan lihtsalt lainetuse intensiivsuseks) ulatuvad mere
üksikutes osades 1 meetrini, kuid enamasti on 80–90 cm piirimail, Soome
ja Riia lahes 60 cm kandis. Keskmine lainekõrgus on suurim Läänemere
avaosa idapoolses sektoris ja Botnia mere idaosas, peegeldades suurelt jaolt
meie mere tuuleroosi anisotroopiat ehk läänetuulte suhteliselt suurt osa-
kaalu.

Lainekõrgus on üsna muutlik, selge sesoonse käiguga ning kõrgeimate
lainetega sügistalvel ja märksa tagasihoidlikuma lainetusega kevadsuvel.
Kuu keskmine lainekõrgus ei järgi päris täpselt kuu keskmise tuulekiiruse
muutusi (Räämet, Soomere, 2010), mis võib olla tingitud sellest, et erine-
vatel kuudel on tuule suund mõnevõrra erinev. Siiski vihjas selline nihe
võimalusele, et Läänemerel ei pruugi lainetuse omaduste muutus käia sa-
mas taktis tuuletingimuste muutustega. Ekstreemsed lainekõrgused võivad

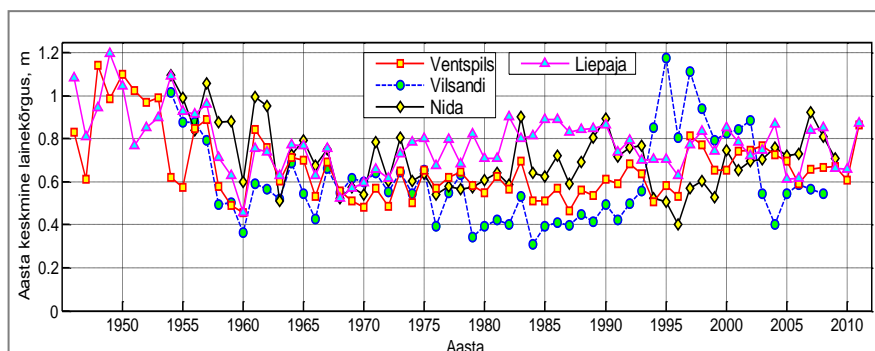
ulatuda 9,5 meetrini Läänemere avaosas ja ületada 5 m Soome lahes (Soomere, 2008a). Lainete perioodid on märksa lühemad kui avaookeanis, Läänemere avaosas enamasti 5–7 s ringis ja ranna lähistel üldiselt veel lühemad; enamasti vahemikus 3–5 s. Lainelevi suund järgib põhiosas tuule suunda, mistõttu nn laineroos Läänemere avaosas on samuti kahetipuline nagu tuulerooski.

TAVALISED LÄÄNEMERE LAINED

Toodud kirjeldus, kuigi oluline lainetuse klimatoloogia mõttes, on võrdlemisi väheinformatiivne. Lainetuse omaduste sügavamaks mõistmiseks ning nende prognoosiks võimalike kliimamuutuste puhuks on eelkõige tarvis adekvaatselt kirjeldada vastavate klimatoloogiliste muutuste ulatust. Nendel teadmistel põhineb nii lainete ja ranniku vastasmõju analüüs kui ka kiir- laevalainete mitmete põnevate omaduste identifitseerimine.

Kõnesoleva tööde tsükli oluliseks osaks oli lainetuse omaduste muutumise ajalis-ruumiliste mustrite identifitseerimine (Zaitseva-Pärnaste jt, 2009, 2011; Räämet jt, 2010; Räämet, Soomere, 2011; Soomere jt, 2011d; Soomere, Räämet, 2011a, 2011b). Tõuke sellesuunalistele uuringutele andis Rootsi ranniku lähistel Almagrundetil 1977–2003 mõõdetud andmestiku võrdlus visuaalsete vaatlusandmetega Vilsandilt. Kuni 1980ndate lõpuni suurenes lainekõrgus 1,8% võrra aastas (Broman jt, 2006), mis oli kooskõlas andmetega järjest suurenevast survest meie randadele (Orviku jt, 2003). Alates aastast 1995 hakkas aga lainekõrgus Almagrundetil kahanema ning pärast sajandivahetust taandus suhteliselt vaiksete 1980ndate aastate alguse tasemele. Vilsandil muutus lainekõrgus Almagrundetiga väga sarnasel moel (joonis 1). 1960ndatel ja 1970ndatel oli seal lainetuse intensiivsus suhteliselt madal, 1980ndatel hakkas kiiresti kasvama ning 1990ndate keskel ulatus peaaegu kolm korda kõrgemale kui vaikesel 1970ndatel. Sellele järgnes lainekõrguse drastiline kahanemine sajandivahetusel ning 2005. a paiku oli aasta keskmine lainekõrgus tagasi 1970ndate tasemel (Soomere, Zaitseva, 2007).

Selline käik vastas laias laastus lainekõrguse muutumisele Põhjamerel (Weisse, Günther, 2007), kuid ei klappinud kuidagi sellega, et aasta keskmine tuule kiirus Utö saarel (mis üsna hästi peegeldab tuuletingimusi Läänemere avaosas põhjapoolses sektoris) jätkas kasvamist samas tempos (Broman jt, 2006; Räämet, Soomere, 2011; Soomere, Räämet, 2013). Põhimõtteliselt ei pruugi lainekõrgus tuule kiiruse muutusi täpselt järgida. Kuigi üldiselt tekitavad tugevamad tuuled kõrgemaid laineid, sõltub keeruka kujuga merealadel ning eriti ranniku lähistel lainekõrgus oluliselt ka tuule suunast. Suurematel merealadel mängib oma osa veel tuule kestvus. Siiski tundusid kirjeldatud lainekõrguse radikaalsed muutused mõnevõrra kahtlastena, välistatud polnud ka vaatlusvead, instrumentide rikked või muutused meetodikas.



Joonis 1.

Aasta keskmine lainekõrguse muutumine Vilsandil, Ventspilsis, Liepajas ja Nidas 1946–2011 (Soomere, 2013).

NII PALJU ON VÕIMALIK NÄHA LIHTSALT VAADATES

Kuna Läänemere põhjapoolses ja idapoolses kandis rohkem pikaajalisi lainemõõtmisi tehtud pole, oli loogiline kõnesoleva vastuolu lähemaks analüüsiks rakendada modelleeritud lainetuse parameetreid. Haruldase võimaluse pakkusid ka Läänemere idaranniku paljudes punktides alates 1940ndatest (Soomere, 2013a) regulaarselt tehtud visuaalsete vaatluste salvestused. Need moodustavad unikaalse andmestiku maailma pikimate hulka kuuluvatest süstemaatilistest ning suhteliselt homogeensetest lainetuse vaatlusridadest. Kõnesolevas tsüklis kasutati kolmest Eesti (Vilsandi, Pakri, Narva-Jõesuu), kolmest Leedu (Palanga, Klaipeda, Nida) ning kahest Läti (Ventspils, Liepaja) rannikujaamast pärinevat andmestikku. Selle materjali digiteerimise ja analüüsi kaudu pikendati lainetuse omaduste süstemaatilist kirjeldust peaaegu 60 aastat tagasi minevikku (Zaitseva-Pärnaste jt, 2009, 2011). Käesoleval aastal pikendati andmeridu veel kaheksa aasta võrra minevikku, 1946. aastani (Soomere, 2013a).

Rannalt teostatud visuaalsete vaatluste kasutamine lainetuse klimatoloogia analüüsil on seotud tõsiste raskustega andmestikus sisalduvate määramatuste ja võimalike ebatäpsuste tõttu. Mis tahes visuaalsete vaatluste puhul sõltub lugem olulisel määral vaatleja ettevalmistusest ja distsipliinist. Kuna kasutatakse suhteliselt lihtsaid skaalasisid, annavad tulemused tavaliselt enam-vähem mõistliku ettekujutuse tavasituatsioonidest, kuid enamasti moonutatud pildi ekstreemsetest olukordadest. Probleem on päris terav keerukama lainetuse puhul, kus vaatlusobjekt paikneb vaatlejast mitmesaja meetri kaugusel. Veetaseme tõus või langus võib perspektiivi märgatavalt moonutada ning vaatlusalasse jõudnud lainetus ise võib olla märksa teistsuguste omadustega võrreldes avamerega. Pealegi toimub lainetuse visuaal-

ne vaatlus (vt täpsemalt Soomere, Zaitseva, 2007; Zaitseva-Pärnaste jt, 2009) suhteliselt lühikese aja vältel; enamasti viie kuni kümne minuti jooksul. Sellistes tingimustes ei pruugi üksikud vaatlused kuigi täpselt kajastada avamerel toimuvat. Teisalt, suure hulga vaatluste alusel koostatud statistika peegeldab kindlasti mingil moel muutusi avamere lainete parameetrites, kuigi nende andmete põhjal ei pruugi olla võimalik neid muutusi täpselt rekonstrueerida.

Lainetuse mitmesugused omadused (sh lainekõrguste ja perioodide kahe mõõtmelised jaotused) vastavad kõigis vaatlusjaamades Läänemere tüüpilistele jaotustele (Zaitseva-Pärnaste jt, 2009; Räämet jt, 2010; Soomere jt, 2011d). Lainetuse omaduste ajalise muutumise analüüs tõi esile mitmed huvitavad aspektid. Teatavas mõttes on ootuspärane, et aasta keskmise lainekõrguse lühiajalisel (aastatevahelisel) muutlikkusel on sama muster kogu Läänemere idaranniku avaosas: kõrgema ja madalama lainetuse intensiivsusega aastad esinevad samaaegselt kõigis vaatluspunktides. Samuti on ootuspärane, et Leedu vaatlusjaamade vaheline korrelatsioon on väga tugev, mistõttu osa varasemaid uuringuid (Kelpšaitė jt, 2008) toetus Leedu jaamade jaoks arvutatud keskmisele lainekõrgusele. Taoline sarnasus on pealegi tugev argument visuaalsetest lainevaatlustest tuletatud lainetuse statistika adekvaatsuse kohta.

AASTAD POLE VENNAD JA AASTAKÜMNED ON VÄGA ERINEVAD

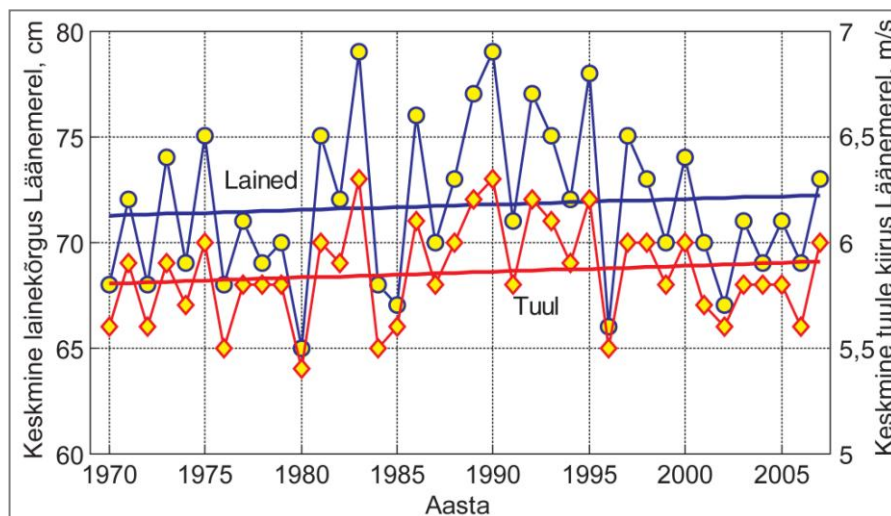
Pikemaajalise muutlikkuse käik oli seevastu mõnevõrra ootamatu: lainetuse intensiivsuse muutuste muster oli eri piirkondades oluliselt erinev ja kohati vastandfaasis. Kõigi kõnesolevate vaatluskohtade aasta keskmised lainekõrgused olid tugevas positiivses korrelatsioonis kuni aastani 1986. Sellest edasi on Narva ja Vilsandi andmete vahel hoopis tugev negatiivne korrelatsioon (Räämet jt, 2010). Kui ühes või teises jaamas olnuks tegemist süsteematailise vaatlusveaga (näiteks lainekõrguse ülehindamisega) või metoodika muutusega, jäänuks korrelatsioon enam-vähem samaks. Juhuslike vaatlusvigade sagenemisel (nt kogenematu vaatleja puhul) oleks korrelatsioon tugevasti kahanenud. Korrelatsiooni hüppeline muutus positiivsest negatiivseks viitab aga teatavale muutusele terve Läänemere tormide struktuuris. Lainetuse intensiivsuse käik neis jaamades viitab sellele, et kuni 1980ndate aastateni mõjutasid tormid enam-vähem ühtmoodi kogu Eestiga piirnevat mereala Saaremaast Narvani. Seevastu alates 1980ndate lõpust need tormid, mis tõstsid kõrgeid laineid Läänemere avaosas, ei tekitanud olulisi laineid Narva kandis ja vastupidi.

Samalaadne muutus tuleb esile ka arvutil rekonstrueeritud lainetuse andmestiku alusel koostatud setete transpordi bilansis Kura säärel (Viška, Soomere, 2012). Lainete poolt liikuma pandud setete koguhulk (nn bruto-

transport) kasvas seal aastail 1970–2007 märkimisväärselt. Seevastu neto-transport (tegelikult ühest kohast teise viidud setete hulk) kasvas ainult 1980ndate teise pooleni ning on sellest ajast peale ligikaudu samas tempos kahanenud. Taolise muutuse tekkimiseks ei pea teisenema terve atmosfääri tsirkulatsiooniskeem. Piisab sellest, et tavapäraselt läänest itta liikuvad tormid (mille puhul tormi algusfaas tekitab kõrgeid laineid Saaremaa lähistel ja lõpufaas Narva lahes) asenduvad veidi enam edelast kirdesse suunduvate tormidega. Sellised tormid liiguvad piki Läänemerd, tekitavad kõrgeid laineid vaid mere avaosas ning praktiliselt ei puuduta Narva lahte.

Tähelepanuväärne on, et lainekõrguse muutused pikemate ajavahemike vältel on Läänemere põhja- ja lõunaosas radikaalselt erinevad. Taolised muutused on kontsentreeritud Läänemere avaossa ning neid pole peaaegu üldse märgata ei mere lõunaosas Darssi künnisel (Soomere jt, 2012) ega Narvas, kus lainekõrgus kahanes aeglaselt ja peaaegu monotoonselt alates 1980ndate keskpaigast (Räämet jt, 2010; Soomere, Kurkina, 2011). Tallinna kandis ja mujalgi Eesti põhjarannikul ei ole samuti viimase kolmekümne aasta vältel erilisi muutusi aset leidnud (Kelpšaitè, Soomere, 2009; Kelpšaitè jt, 2009) ning keskmine lainekõrgus Soome lahe idaosas on pigem veidi kahanenud (Suursaar, 2010, 2011).

Lainetuse ajaloo horisondi pikendamine tagasi eelmise sajandi keskpaigani (Soomere, 2013) tõi ilmsiks, et Läänemere avaosa lainekõrguse muutumisel on eristatavad kaks faasi. Alates XX sajandi keskpaigast kuni 1970. aastani kahanes lainekõrgus kiiresti kogu merel (joonis 1). Aasta keskmine lainekõrgus vähenes ligikaudu kaks korda, 1 meetrilt 0,5 meetrini. Selle aja vältel oli lainekõrgus kogu Läänemere idarannikul enam-vähem ühesugune, väikeste variatsioonidega üksikutel aastatel. Järgmised kolmkümmend aastat valitses teistsugune muster: kui Läänemere lõunaosas oli laineid rikkalikult (nt 1980ndatel), siis mere põhjaosas oli samal aja suhteliselt vaikne. Rollid vahetusid äkitselt 1992. a paiku, mil Vilsandil (ja ka Almagrundetil Rootsi ranniku lähistel, Broman jt, 2006; Soomere, 2007a) registreeriti lainekõrguse kiire kasv, kuid kogu mere lõunaosas alates Kurzeme poolsaarest ja kogu Leedu rannikul (Kelpšaitè jt, 2008, 2011), sama järsk langus. Taoline pendeldamine ühest äärmusest teise kestis aastakümne jagu, kuid pärast sajandivahetust taastus 1960ndatel valitsenud olukord. Samas ei muutunud praktiliselt üldse üle kogu Läänemere arvatud keskmine lainekõrgus (joonis 2) (Räämet, Soomere, 2011; Soomere, Räämet, 2013). Nõnda meenutab Läänemere lainekõrguse graafik klassikalist kliimamuutuste näiteks toodavat hokikepi tüüpi pilti, ainult selle vahega, et meil on hokikepi laba vasakul ja ilmestab tormisuse järsku kahanemist tervelt veerand sajandi vältel (Soomere, 2013a). Seega ei oleks üldse ootamatu, kui lainetuse intensiivsus nüüd mõnekümne aasta jooksul natuke kasvaks: nõnda taastuks lihtsalt 60 aasta tagune situatsioon.



Joonis 2.

Geostroofilise tuule andmestikust arvatud aasta keskmine tuule kiirus kogu Läänemereel 10 m kõrgusel (rombid) ja selle alusel arvatud aasta keskmine lainekõrgus kogu Läänemere keskmisena (ringid) 1970–2007 (Soomere, Räämet, 2013).

Mõnevõrra ootamatu on, et Läänemereel ja eriti Eesti rannavetes on lainete statistika muutused üsna lõdvalt seotud tuule kiiruse muutustega (Räämet, Soomere, 2011b; Soomere, Räämet, 2013). Selle taustal ei olegi nii väga imelik, kuigi veidi kõhedusttekitav, et isegi parimad kaasaegsed lainemudelid ja tuuleandmestikud reprodutseerivad vaid osa tuule ja lainetuse omaduste ajalis-ruumilisest muutlikkusest (Soomere, Keevallik, 2010).

LÄÄNEMERE TUUL TEEB TRIKKE

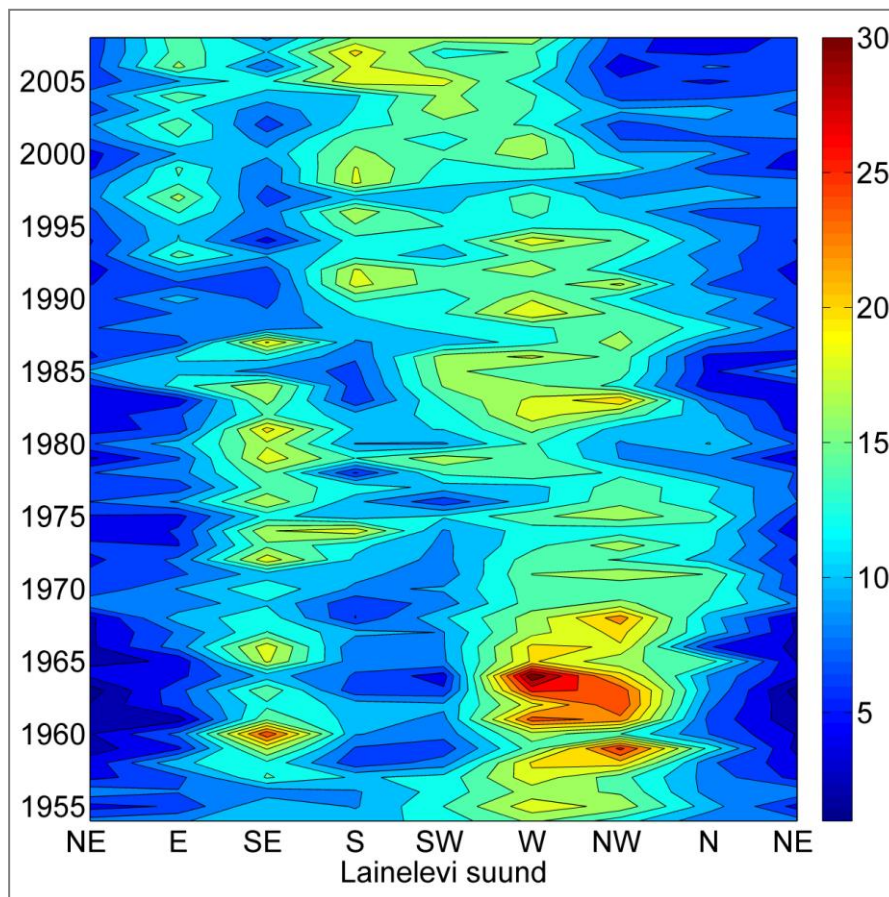
Kirjeldatud päris suure amplituudiga ja kümneid aastaid kestvad muutused lokaalses lainekliimas on praktiliselt võimatud avaookeanis, kus tsüklonite trajektoori muutumine võib küll natuke mõjutada lainetuse levikusuunda (Charles jt, 2012), kuid lainetuse üldine intensiivsus sellest kuigivõrd ei muutu. Läänemereel on aga oluline, kus täpselt, millises suunas ja kui kiiresti tsüklon merest üle läheb. Need parameetrid määravad tuule suuna ja kestvuse konkreetsetes tormis ning seega suurelt jaolt ka lainete omadused. Seetõttu osutus seletus ülalkirjeldatud pendeldamisele päris lihtsaks. Nimelt on tsüklonite trajektoori kaks korda või kaks sajandit koguneda justkui ühte kimpu ja ületada Läänemeri Botnia mere keskelt. Seda näitab ilmekalt madala õhurõhuga päevade arvu tsüklilisus Harnösandis Põhja-Rootsis (Barring, von Storch, 2004). Taoline trajektoori koondumine leidis aset

just 1990ndate keskel. Tsüklonite tavaline suurus on selline, et tugevaimad tuuled ja kõrgeimad lained on siis Stockholmi ja Saaremaa vahel ning samal ajal on Läänemere kesk- ja lõunaosas, Leedu kandis, üsna vaikne. Seejuures merel tervikuna keskmine lainekõrgus märgatavalt ei muutu, mis klapib kenasti arvutustulemustega (Soomere, Räämet, 2013).

Tsüklonite trajektooride nihkumine toob endaga üldiselt kaasa nii tuule suuna kui ka lainete levikusuuna teatavad muutused. Tõenäoliselt kajastus osa kirjeldatud muutustest lokaalsetes tuuleandmetes tuule suuna süstemaatilise pöördumisena edelasse (Jaagus, 2009, 2011). Lainetuse levikusuuna muutumise identifitseerimine oli veidi keerukam, sest vaatlustes määratletakse levikusuund vaid kaheksa rumbi süsteemis ehk 45° täpsusega. Meie regioonis seostati kõigepealt lainetuse levikusuuna muutumine erosiooni- ja akumulatsioonialade ümberpaiknemisega Leedu rannikul (Kelpšaitė jt, 2011). Pärast seda tähelepanekut võeti lähema vaatluse alla ka teiste vaatlusjaamade andmestikud. Vilsandi ja Pakri vaatlused olid järelduste tegemiseks liiga mürased, pealegi oli Pakri poolsaarel vaatluskohta mitu korda nihutatud (Zaitseva-Pärnaste jt, 2011). Seevastu Narva-Jõesuus pöördus kõige sagedasem lainelevi suund aastail 1954–2009 aegamööda tervelt 90 kraadi võrra (Räämet jt, 2010) (joonis 3). Märksa tagasihoidlikum, kuid siiski selgelt kõige sagedasem levikusuuna varieerumine ilmneb Klaipeda andmestikus (Zaitseva-Pärnaste jt, 2011). Selliste muutuste mõju rannaprotsesside käigule avaldub võrdlemisi keerukal moel (Viška, Soomere, 2012; Soomere, Viška, 2013), sest oma osa mängivad ka lainekõrgused ja -perioodid.

MUUTUSTE Mustrid

Lainetuse visuaalsete vaatluste andmestikus on keskmiselt üks vaatluspunkt 100 kuni 200 kilomeetri peale. Muutuste mustri tavaline samm meie merel on sellest kohati väiksem (Soomere, Räämet, 2011a), mistõttu selle määratlemiseks ja analüüsiks on tarvis rekonstrueerida lainete parameetrid numbriliste meetoditega. Kõnesoleva tööde tsükli raames tehti seda kogu Läänemeres 38 aasta pikkuse ajavahemiku 1970–2007 jaoks. Lainemudeleid, mis seda suudavad, on päris mitu. Keskseks probleemiks on ebatäpsused tuule ruumilise mustri ja ajalise muutlikkuse taastamisel isegi kaasaja parimates atmosfäärimudelites (Keevallik, Soomere, 2010). Isegi kõrgekvaliteediliste tuuleandmetike kasutamine annab mõnel merealal mõõdetud ja arvatud lainetuse peaaegu perfektse vastavuse, kuid teistes regioonides ilmnevad radikaalsed erinevused (Räämet jt, 2009; Räämet, Soomere, 2011). Suurimad puudujäägid on tuule suuna rekonstrueerimisel (Keevallik, Soomere, 2010), mistõttu arvutisimulatsioonides ei ole õnnestunud identifitseerida lainelevi suuna võimalikke muutusi laineroosi tasemel (Räämet jt, 2010). Need ilmnevad siiski Läänemere idaranniku settetranspordi arvutustes (Viška, Soomere, 2012; Soomere, Viška, 2013), millest veidi allpool.



Joonis 3.

Lainetuse levikusuundade jaotus ilmakaarte vahel Narva-Jõesuus tehtud visuaalsete lainevaatluste põhjal 1954–2008. Värvikood näitab erinevatest ilmakaartest saabuvate lainete osakaalu protsentides (Räämet jt, 2010). A. Räämeti joonis.

Taolises olukorras tuleb teha valik olemasolevate tuuleandmestike vahel, lähtudes konkreetsest ülesandest. Lainecliima muutuste identifitseerimine vajab maksimaalselt homogeenset tuuleinformatsiooni pika aja vältel. Kuigi kaasaegsed atmosfäärimudelid pakuvad suhteliselt head ruumilist ja ajalist lahutusvõimet, modifitseeritakse neid mudeleid sageli (Tuomi jt, 2011) ning nendesse assimileeritud andmete mõõtmise tingimused ja meetodika võivad samuti pikema perioodi vältel muutuda. Need muutused võimenduvad lainetuse omadustes ning siis pole enam võimalik kontrollida, milline osa muutustest on tegelikult aset leidnud. Seetõttu valiti lainetu-

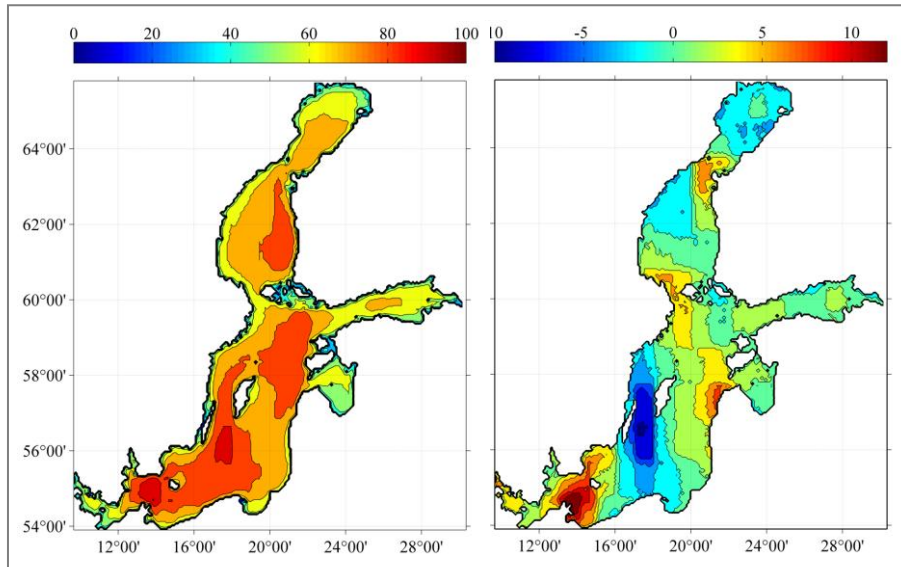
se rekonstruktsiooni aluseks mõõdetud õhurõhu jaotusest arvatud nn geostroofilise tuule andmestik. See kajastab õhumasside liikumist kõrgemates õhukihtides, kus maapinna ebahürtluste ja kareduse mõju on elimineeritud. Geostroofilise tuule arvutamise meetodika ja selle aluseks oleva õhurõhu andmestiku ruumiline lahtusvõime ei ole aastakümnete jooksul muutunud. Selle andmestiku miinuseks on kehv ruumiline lahtusvõime, mille tõttu kannatas üksikute tormide poolt tekitatud lainete rekonstruktsiooni kvaliteet ning ilmsed teatavad probleemid Läänemere lõunaosa lainete käsitlemisel. Kuna tuuleandmestiku tuletamisel ignoreeriti saarte ja maismaa olemasolu, oli nii tuule kiirus kui ka selle ajaline muutlikkus selles piirkonnas tõenäoliselt üle hinnatud ning arvutuste tulemused ei pruugi seal tegelikult väga täpselt kajastada. Siiski klapi rekonstrueeritud lainetuse intensiivsus päris mõistlikul moel mõõdetud andmetega (Kurkina, Soomere, 2011; Soomere jt, 2012).

Lainetus on intensiivsem Läänemere suurtes avatud basseinides Gotlandist lõuna pool, mere avaosas põhjapoolses sektoris ja Botnia mere idapoolses osas (joonis 4). Kuigi mudelarvutused (Räämet, Soomere, 2010; Räämet jt, 2010) hindasid pikaajalist keskmist lainekõrgust *ca* 10–15% võrra alla, klapi lainekõrguste ja perioodide ruumilised muustrid ning lainete omaduste kombinatsioonid tugevaimates tormides kenasti visuaalsete vaatluste tulemustega (Räämet jt, 2010). Lainekõrguse pikaajaline muutlikkus on mõistlikus korrelatsioonis vaatlustulemustega (Soomere jt, 2012), kuid nii instrumentaalselt mõõdetud kui ka vaadeldud muutuste ulatus on märksa suurem arvutustulemustega võrreldes. Samuti ei peegeldu arvutustulemustes lainelevi suuna muutused. Need kaks puudust on geostroofilise tuule kasutamisel üsna loomulikud.

Kuigi kogu Läänemere keskmine lainekõrgus ei ole viimase nelja aastakümne vältel praktiliselt muutunud (Räämet, Soomere, 2011; Soomere, Räämet, 2013), on lainekliima muutused mere erinevates osades radikaalselt erinevad. Modelleeritud lainekõrgus suurenes Kuramaa ja Stockholmi arhipelaagi vahelisel merealal, Botnia lahe ja Botnia mere vahel ning Rügeni saare ümbruses (joonis 4). Samas on lainekõrgus märgatavalt vähenenud Gotlandist edelas, Botnia mere loodeosas ja Botnia lahes. Läänemere avaosas vahelduvad lainekõrguse kasvu ja kahanemise alad iga 150–200 kilomeetri tagant. Suur osa identifitseeritud muutustest on toimunud jaanuarist märtsini (Räämet, Soomere, 2011), mis on kooskõlas tuuletingimuste muutustega Läänemere kohal viimastel aastakümnetel (Lehmann jt, 2011). Lisaks avaldub lainekõrguste muutustes tugev ligikaudu 10–15-aastase perioodiga signaal (Soomere, Räämet, 2013).

Saatuse ironiana on suurem osa mere ida- ja põhjaosas paiknevatest lainetuse mõõtmis- ja vaatluskohtadest aladel, kus pikaajalised muutused on tagasihoidlikud (Soomere, Räämet, 2011b). Alles Läti jaamadest pärinevad

visuaalsed vaatlusandmed kinnitasid, et Kuramaa poolsaare lähistel on alates 1970. aastast tõepoolest lainekõrgus kasvanud (Pindsoo jt, 2012). Sellele aga eelnes mitmekümne aasta vältel lainekõrguse kahanemine.



Joonis 4.

Pikaajaline keskmine lainekõrgus Läänemerel (cm) ja selle muutumine 1970–2007 (Räämet, Soomere, 2010; Soomere, Räämet, 2011a). A. Räämeti joonised.

Suurimad lainekõrgused (mida esindavad igal aastal tõenäosusega 1% esinevad lainekõrgused) paiknevad Läänemerel samades kohtades kus keskmine lainekõrguse maksimumid. Nende muutumise iseloom sarnaneb samuti joonisel 4 toodud keskmine lainekõrguste muutumise ruumilisele mustri. Vaid Soome lahes kohtame ebatavalist kombinatsiooni: keskmised lainekõrgused ei ole praktiliselt üldse muutunud, kuid ekstreemsed lainekõrgused on oluliselt kahanenud Eesti ranniku lähistel ning kasvanud lahe põhja- ja kirdeosas (Soomere jt, 2010; Suursaar, 2010). On väga tõenäoline, et just see nähtus on Soome lahe kirdeosa rannapurustuste aktiveerumise taga (Ryabchuk jt, 2011).

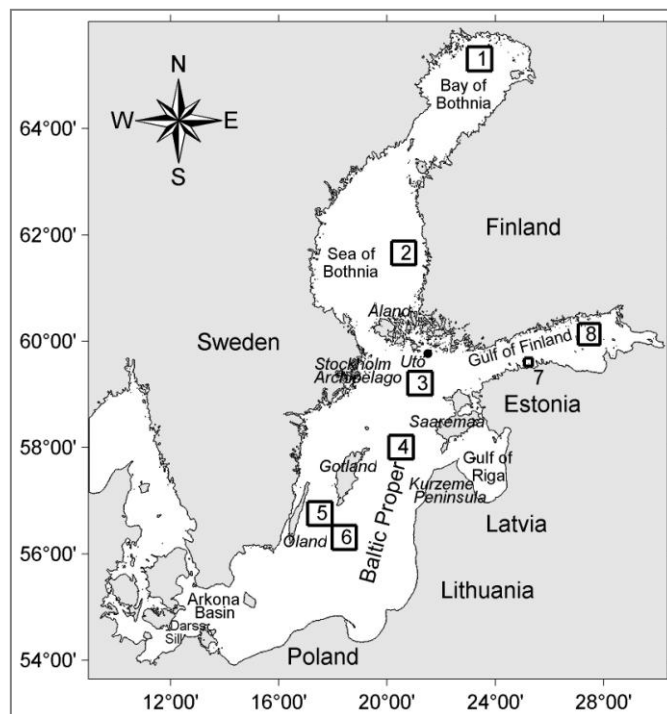
ÕHUVOOLU SUUNA PÕÖRDUMINE LAINETE MUUTUSTE MUSTRITE KUJUNDAJANA

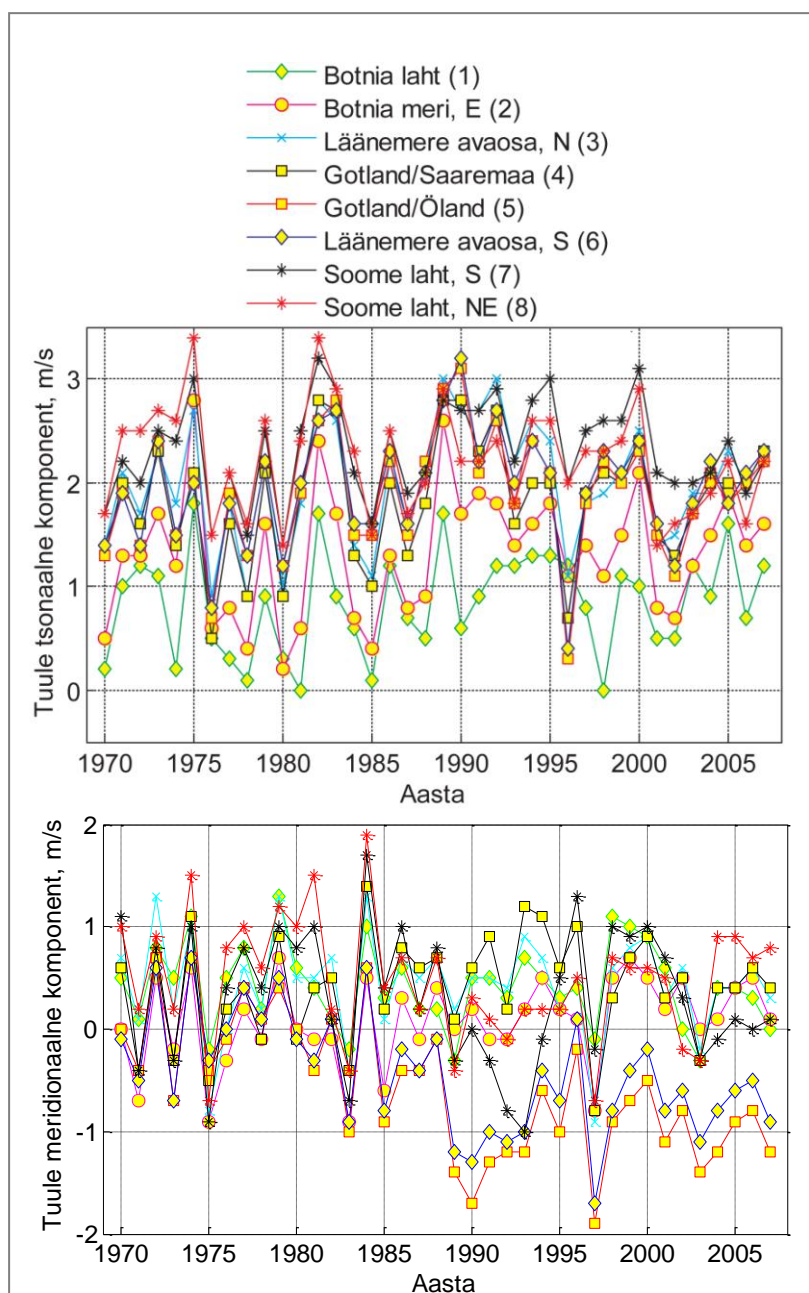
Kõnesolev lainekõrguste muutumise ruumiline muster ning rekonstrueeritud lainekõrguste drastiline muutumine (eriti lokaalne kahanemine, mis kohati ületab 15% 38 aasta keskmisest) on võrdlemisi ebatavaline situat-

sioonis, kus tuule kiirus avamerel on pigem tugevnenud (Pryor, Barthelmie, 2003; Soomere, Räämet, 2011b, 2013). Lokaalsed muutused on nii tugevad, et 10 aasta keskmise lainekõrguse maksimum on nihkunud Gotlandi lõunaosa juurest (kus 1970ndatel oli lainekõrgus märksa suurem kui mis tahes muus Läänemere piirkonnas) Saaremaa lähiste (Soomere, Räämet, 2013). Selline asjade käik selgitab, miks on erinevate ajavahemike jaoks rekonstrueeritud lainekliima kaartidel (Jönsson jt, 2003; Schmager jt, 2008; Tuomi jt, 2011) lainekõrguse maksimumid mõnevõrra erinevates kohtades. Tuleb nii välja, et see on lihtsalt Läänemere eripära, et erinevatel aastakümnetel pendeldab suurima lainetuse intensiivsusega piirkond erinevate merealade vahel.

Võtme selle nähtuse põhjuse mõistmiseks andis geostroofilise tuule muutuste analüüs üksikute piirkondade kaupa (Soomere, Räämet, 2013). Kuna ühes võrgupunktis puhuva tuule omadused ei pruugi olla piisavalt esinduslikud, analüüsisime tuule keskmisi omadusi kaheksas 5×5 punkti suuruses piirkonnas (joonis 5). Tuule komponentide aasta keskväärtuste analüüs (joonis 6) näitas, et 1988/89 aasta paiku toimus Läänemere avaosa lõunapoolse sektori tuule struktuuris järsk nihe: senine enam-vähem täpselt itta või veidi kirdesse suundunud õhuvool asendus äkitselt idakagu-suunalise vooluga. See muutus avaldus ainult Gotlandist lõuna pool paiknevatel aladel ning Saaremaa lähistel pöördus õhuvool vaid korraks (1992–1993) idakagusse.

Joonis 5. Piirkonnad Läänemeres, milles puhuva geostroofilise tuule komponentide ajaline käik on kujutatud joonisel 6. A. Räämeti joonis.





Joonis 6. Aasta keskmine tuule kiiruse ida-läänesuunaline (üleväl) ja põhja-lõunasuunaline komponent (all) joonisel 5 toodud piirkondades (Soomere, Räämet, 2013). A. Räämeti joonis.

Lainetuse seisukohalt tähendas see Ölandi ja Gotlandi vahel paikneval merealal valitsevate tuulte jooksumaa kahe- kuni kolmekordset lühenemist. Sellega pidigi kaasnema lainekõrguse järsk kahanemine. Sama nihe põhjustas tõenäoliselt piki Kura säärt aset leidva setete netotranspordi iseloomu muutuse 1990ndate algul (Viška, Soomere, 2012).

Kõnesolevat muutust pole muude vahenditega identifitseeritud. Seetõttu on meeldiv tõdeda, et lainete numbrilise rekonstruktsiooni ja olemasolevate vaatlusandmete ja instrumentaalsete mõõtmiste võrdlemise kaudu on võimalik määratleda senitundmatuid tendentse ja nähtusi meie regioonis toimuvate kliimamuutuste struktuuris ja muustris (Soomere jt, 2009b), aga ka ranniku reaktsiooni muutuvatele kliimatingimustele (Soomere, Healy, 2011; Ryabchuk jt, 2011). Nõnda on Läänemere tuulelainetuse omaduste põhjalik analüüs koos lainelevi analüütiliste uuringutega ja suhteliselt lihtsate setete transpordi kontseptuaalsete mudelite rakendamisega võimaldanud paigutada mõned rannikut mõjutavate lainekoormuste aspektid täiesti uude konteksti ning avada mitmed lainete ja ranniku vastasmõju senitundmatud tahud.

LAINED KULUTAVAD JA KUHJAVAD

Eesti rannad arenevad võrdlemisi omapärastes tingimustes. Enamasti vahelduvad hüppelise arengu perioodid pikaajaliste stabiilsete seisunditega (Orviku jt, 2003). Seetõttu võib Eesti randu paljude ülesannete lahendamisel lugeda praktiliselt tasakaalulisteks (Soomere, Healy, 2011). Selline tasakaal võib ilmnedä mitmel moel; enamasti tagasihoidliku ristiranda transpordi ja piiratud pikiranda transpordi näol lahepärades paiknevates liivarandades, nagu Pirita (Soomere jt, 2007, 2008b) või Valgerand (Kartau jt, 2011), aga ka dünaamilises tasakaalus suurte jõgede suudmealal (Laanearu jt, 2007). Seetõttu on Eesti ranniku reaktsioon muutuvatele kliimatingimustele sügavalt mittetriviaalne, kohati vastuoluline ning sageli leiab aset teatava viivitusega.

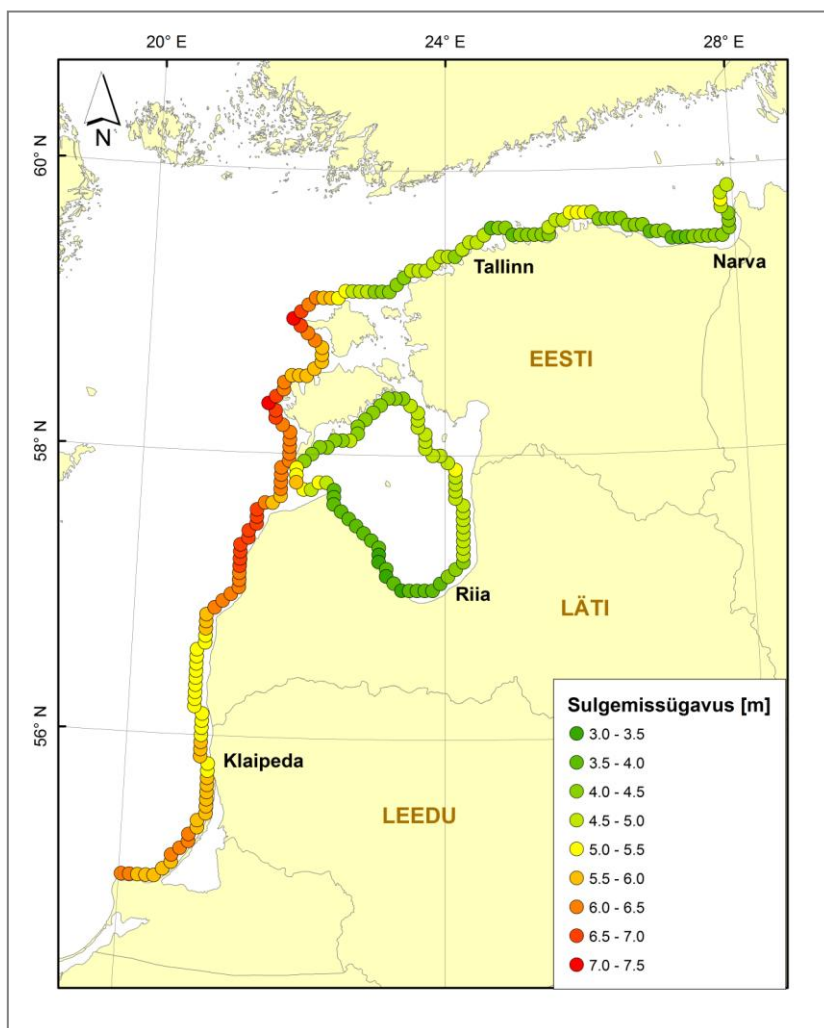
Kuna see reaktsioon sõltub paljudest omavahel lõdvalt seotud teguritest, on vahel üsna keerukas leida sobiv parameeter, mille valgusel neid muutusi eristada ja kvantifitseerida. Huvitavaks õppetunniks on rannaprotsesside aktiivsuse ja merejää olemasolu ehk jääperioodi pikkuse vahelised suhted. On loogiline oletada, et merejää kadumise tõttu rannaprotsessid kiirenevad. Selle oletuse paikapidavust on ilmekalt demonstreeritud üksikute näidete alusel (Orviku jt, 2003; Ryabchuk jt, 2011). Vastavate tegurite sidumine rannikuprotsessidega statistilise analüüsi tasemel osutus aga võrdlemisi keeruliseks. Nimelt ei ole jääperioodi pikkuse ja aasta keskmise lainekõrguse muutused Eesti vaatlusjaamades üldse korreleeritud (Soomere jt, 2011d). Selle põhjuseks on tuule kiiruse ja lainetuse intensiivsuse sesoonsus. Kõrgeimad lained on meie merel hilissügisel, just jää tekkimise eel, jää sul-

mise ajal on aga ilm vaikne. Jääperiood võib lüheneda nii hilisema jää tekketu kui ka varasema sulamise arvelt, mistõttu jäävaba perioodi keskmine lainekõrgus ei pruugi üldse muutuda. Meist kaugemal põhja pool võivad mitmed klassikalised lainetuse statistika parameetrid osutada lausamõttetuteks (Tuomi jt, 2011). Probleemi ei lahenda ka lainetuse keskmise energia arvutamine. Mõistlikuks parameetriks on tõenäoliselt hoopis aasta või jäävaba perioodi summaarne laineenergia voog (Zaitseva-Pärnaste, Soomere, 2013).

Laineenergia voog on nimelt see füüsikaline suurus, mis põhiosas määrab rannaprotsesside intensiivsuse, tasakaalulise rannaprofiili laiuse ja piki randa kulgeva settetranspordi mahu. Selle arvutamine Eesti randades on võrdlemisi keeruline, kuna randade geomeetria on keerukas ning lainetuse andmestiku lahutusvõime peab olema üldiselt 500 meetri ringis. Seetõttu on vastavaid arvutusi Eestis varem tehtud vaid üksikute rannaosade jaoks ning lihtsustatud lainearvutuste meetodika alusel (Soomere jt, 2007, 2008b). Mõnevõrra lihtsam on olukord Läti ja Leedu rannikutel, kus enamasti piisab 3-miilise sammuga lainetuse andmestikust. Selle alusel määratletud nn sulgemissügavuse jaotus (st sügavus, milleni ulatub tasakaaluline rannaprofiil ning millest sügavamal lained vaid episoodiliselt setteid ümber paigutavad) Läänemere idarannikul (Soomere jt, 2011h; Soomere jt, 2013b) demonstreerib ilmekalt lainetuse omaduste muutusi piki meie randa (joonis 7).

Enamasti kasutatakse tasakaalulise rannaprofiili veetaseme kontseptsiooni selleks, et hinnata rannajoone nihkumise ulatust veetaseme tõusu puhul (Bruun, 1962) või ranna täitmiseks vajaliku liivakoguse arvutamiseks (Dean, Dalrymple, 2002). Eesti kerkivate peaaegu tasakaaluliste randade puhul saab seda rakendada ka liiva kao hindamiseks (Kask jt, 2009). Põhimõtteliselt on tegemist lihtsa, kuid universaalse tehnoloogiaga, sisuliselt ekspressmeetodiga rannas paikneva settematerjali hulga muutuste hindamiseks väikese arvu parameetrite alusel (Kask jt, 2009; Kartau jt, 2011; Soomere, Healy, 2009). Näitena kvantifitseeriti setete bilanss Pärnu lahe põhjarannikul Valgerannast Pärnu jõe muulideni. Vaatamata suhteliselt kiirele rannajoone taganemisele on liiva kadu Valgerannast suurusjärgus 1000 m³ aastas (Kartau jt, 2011), mida on võimalik kompenseerida liiva juurdetoomise või -pumpamisega. Liiva optimaalne kasutamine on tuleviku seisukohalt järjest olulisema tähendusega, sest tööstuslikud liivamaardlad Eestis vetes on tagasihoidlikud (Kask jt, 2010).

Märksa sisukam parameeter on laineenergia voo rannaga paralleelse komponendi väärtustel põhinev potentsiaalse piki randa toimuva settetranspordi maht. Selle kahanemine settetranspordi suunas viitab akumulatsioonialale ja kasvamine erosioonihule. Erilist huvi pakuvad settetranspordi divergentsi- ja konvergentsipiirkonnad, kus vastavalt erosioon ja kuhjumine on kõige intensiivsemad.



Joonis 7.
Sulgemissügavus Läänemere idarannikul ja Riia lahe rannikul (Soomere jt, 2013b). M. Viška ja M. Eelsalu joonis.

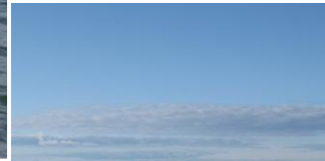
Nende ümberpaiknemise muster peegeldab teatavaid ranna toimimise seaduspärasusi. Üks taoline divergentsipiirkond Akmenrags'i neeme lähedal Lätimaal toimib nähtamatu barjäärina, mis jagab Läti ja Leedu rannikud kaheks settetranspordi mõttes praktiliselt lahutatud piirkonnaks (Soomere, Viška, 2013). Seevastu erinevatel aastatel Kura sääre eri osi liivaga täitev konvergentsipiirkond kindlustab pikemas perspektiivis selle unikaalse pinnavormi tasakaalu (Viška, Soomere, 2012).

LAEVALAINED VALIKULISELT RANDA UURISTAMAS

Varasematel aastatel Tallinna lähel tehtud laevalainete uuringud fokuseerusid ennekõike nende parameetrite võrdlemisele looduslike lainetega, põhimõtteliselt lineaarse laineteooria baasil prognoositavate nähtuste analüüsile, nagu suured põhjalähedased kiirused teatavas sügavuste vahemikus ja sellega kaasnev põhjasetete resuspensioon ning üksikutele teoreetilist laadi laevalainete mittelineaarsete omaduste analüüsile. Tulemusena paigutati esmakordselt kõik kiirlaevalainete süsteemi tollal teadaolevad komponendid ühtsesse raamistikku (Soomere, 2007b). Nende uuringute loogiline üldistus oli kontseptsioon laevalainetest kui spetsiifilist tüüpi energiareostusest (Kelpšaitē jt, 2009), mis võib tabada erinevaid rannaosi radikaalselt erineval moel (Kurennoy jt, 2009; Torsvik, Soomere, 2009; Torsvik jt, 2009; Soomere, 2009a) või osutada mõnede rannalõikude jaoks tormilainetest märksa tugevamaks mõjuriks (Soomere jt, 2009a; Kurennoy jt, 2011).

Kirjeldatud uuringute peamised subjektid – klassikalised kiirlaevad nagu *AutoExpress* ja *SuperSeaCat* – kas viidi Tallinna-Helsingi liinilt mujale või ei suutnud konkurentsist vastu pidada. Neid asendasid alates 2007. a suured võimsate mootoritega parvlaevad Viking *XPRS*, Tallink *Star* ja Tallink *SuperStar*. Need on klassikalistest kiirlaevadest veidi aeglasemad, kuid märksa suurema kere ristlõikega ja kümneid kordi suurema veeväljasurvega. Uute laevade käigulainete omadusi analüüsiti detailselt veepinna asendi kõrglahutusega (vertikaalne lahtusvõime 1 mm, salvestussagedus 5 Hz) salvestuste alusel ca 2,5 m sügavuses vees, kus lained olid veel täiesti lauged. Uute laevade poolt tekitatud lainete (joonis 8) perioodid olid mõnevõrra väiksemad eelmiste aastate rekorditest, kuid kõrgeimate lainete kõrgus, lainete summaarne energia ja selle voog olid praktiliselt sama, mis 6–8 aasta eest (Parnell jt, 2008; Kurennoy jt, 2009a,b). Peaaegu kõiki laevalainete süsteemi omadusi iseloomustab hästi maksimaalne lainekõrgus (Kurennoy jt, 2009a). Teine kiirlaevalaineid iseloomustav sõltumatu parameeter on lainete asümmeetria (Kurennoy jt, 2009b), millel on oluline tähendus lainerünnaku kontekstis (Didenkulova, 2011).

Pikkade kiirlaevalainete mõju Läänemere randadele on tavaliselt tugevaim sügavustes 5–10 meetrit, kuhu suhteliselt lühikesed laevalained ei ulatu (Soomere, 2007b). Põhimõtteliselt uue aspektina demonstreeriti, et nende mõju on ootamatult tugev üksikutes rannaosades, kus osa laevalainete parameetritest (nt levikusuund) erineb märgatavalt looduslike lainete omadest. Taolistes mittetasakaalulistes tingimustes võivad kiirlaevalained looduslike lainete poolt randa kuhjatud materjali väga kiiresti ära viia (joonis 9). Nii näiteks viis nelja hommikuse laeva järellainetus 18. juunil 2008 rannast ära 750 liitrit materjali (kruusa ja klibu) rannajoone meetri kohta. Terve päeva jooksul viisid laevalained ära ligikaudu 1,6 kuupmeetrit setteid rannajoone meetri kohta (Soomere jt, 2009a).



Joonis 8.
Kiirlaevalained Tallinna
lahel (Didenkulova, 2011;
Didenkulova jt, 2011a).
I. Didenkulova fotod.



Joonis 9.
Looduslike lainete poolt
Aegna randa kuhjatud liiv ja
klibu (vasakul) ning sama
rannalõik mõned päevad
hiljem laevalainete poolt
settematerjalist puhastatuna
(paremal) (Soomere jt,
2009a). K. Parnelli ja
I. Didenkulova fotod.



Samas paiskaside üksikud lained setteid märksa kõrgemale veepiirist (isegi kõrgemale uhtekõrguse mitmepäevasest maksimumist) kui võinuks arvata lainete omaduste alusel (Soomere jt, 2009a). Täheldatud omadustest järel-
dub olulise praktilise tähtsusega tõsiasi: kui tuule- ja lainekliima mingis rannaosas peaks tõepoolest radikaalselt muutuma, siis teiseneb rand mitte aastate või kuudega, vaid päevade ja tundidega.

Setete kiire kadumise taga on spetsiifiline, varem tundmatu hüdrodünaami-
line mehhanism, mille kaudu võivad laevalained randa kanda väga suuri veemasse (Soomere jt, 2011g). Samal ajal kõrgeimate laevalainetega jõuab Aegna randa veepinna häiritus kestusega 2–3 minutit ja kõrgusega mõned millimeetrid. See kannab endaga kaasas kuni 10 kuupmeetrit vett ranna-
joone meetri kohta (Soomere jt, 2011g). Rannal avaldub see veepinna teata-
va tõusuna. Veemass hakkab mere poole tagasi voolama parajasti siis, kui jõuavad kohale järellainetuse lühemad komponendid, mistõttu tagasivool viib veepiiri lähistel liikuma pandud settematerjali kiiresti suhteliselt suur-
tele sügavustele.

Selgus ka põhjus, miks on Tallinna lahe randade erinevates lõikudes kiir-
laevalainete omaduste muutlikkus väga suur. Laevad sõidavad siin kõrgete
lainete suhtes tundlikus režiimis võrdlemisi lühikest aega (Torsvik, Soo-
mere, 2008, 2009). Kõrgete lainete süsteemi levikusuund sõltub nii laeva
trajektooriga kui ka kiirusest, mistõttu erinevatel aegadel väljunud laevade
poolt tekitatud kõrged lained jõuavad üldiselt erinevatesse rannalõikudesse.
Seda omadust saab kasutada näiteks laevade kiiruse vähendamisel prakti-
liselt alati tekkivate ohtlike lainerühmade (Torsvik jt, 2006) suunamiseks
ohutusse kohtadesse. Tallinna lähel on kõrgete lainete 'lehviku' ulatus
enamasti vaid 2–3 km (Torsvik jt, 2009). Helsingisse suunduvate laevade
puhul tabab lainete 'lehvik' enamasti Aegna sadama ümbrust ning Tallinna
poole sõitvate laevade puhul Lennusadama ja Pirita ümbrust. Seetõttu on
Tallinna lahe läänerannikul lainete kõrgused märksa väiksemad (Kurennoy
jt, 2011; Erm jt, 2011) kui Aegna kandis.

LAEVALAINED TSUNAMIDE JA HIIDLAINETE MUDELINA

Nagu juba mainitud, on kiir-laevalained omapäraseks ühenduslülilik teatavat
liiki tsunamide, hiidlainete ja inimõju vahel. Sellel on selge füüsikaline
tagapõhi. Liikuv laev ja mis tahes põhjusel tekkinud õhurõhu häiritus mõju-
vad vee pinnale täpselt ühtmoodi, mistõttu nõnda tekkivad lainesüsteemid
on põhimõtteliselt identsed ning erineda võivad vaid lainete üksikud de-
tailid. Kui laev (või õhurõhu häiritus) liigub suhteliselt kiiresti võrdlemisi
madalas vees (laeva kiirus on enam-vähem võrdne pinnalainete leviku mak-
simaalse kiirusega antud sügavusega mere jaoks), tekib resonantsitaoline
nähtus, mille korral võib laeva poolt veemassidele edasi antud energia kont-
sentreeruda ühte-kahte väga kõrgesse lainesse.

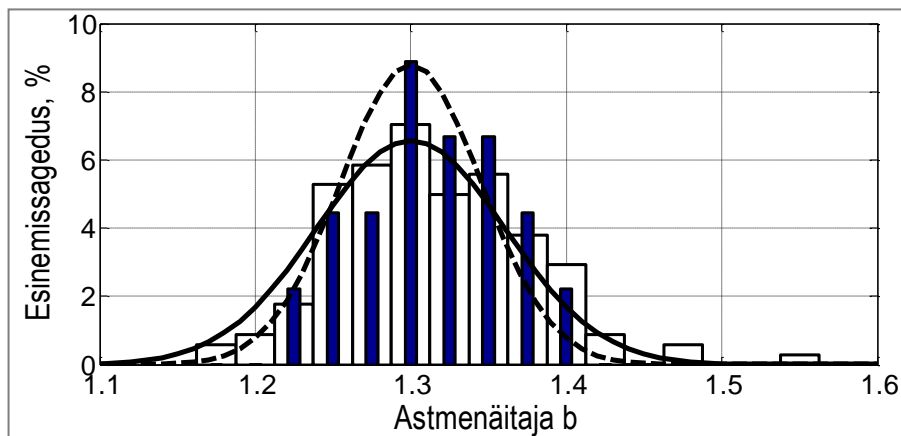
Põhimõtteliselt uue aspektina tõestati, et kiirlaevalained kujutavad endast mitut tüüpi tsunamide (nt maalihete tekitatud tsunamid) adekvaatset mudelit (Didenkulova jt, 2011a). Pealegi on neil sageli praktiliselt perfektsete solitonide omadused (joonis 8), mis võib oluliselt tõsta nagunii kõrget ohutaset pikkadele lainetele avatud rannaosades madala vee solitonide interaktsiooni käigus tekkivate struktuuride kaudu (Soomere, 2010). Teisalt, selline dünaamiline ekvivalentsus maalihete poolt tekitatud tsunamidega võimaldab neid ülimalt ohtlikke nähtusi laevalainete abil uurida ohututes ja hästi kontrollitavates tingimustes.

Teine erakordselt ohtlik nähtus nii avamerel kui ka rannikul on nn hiidlained (ka mõrvarlained, inglise k. *rogue waves*, *freak waves* või *killer waves*). Need lained on mitte lihtsalt märksa kõrgemad oma naabritest, vaid teatavas mõttes ootamatult kõrged (vt populaarseid ülevaateid Engelbrecht, Soomere, 2006; Didenkulova, 2011). Erinevalt tsunamidest ei ole need enamasti seotud konkreetse energiaallikaga. Kuna avamerel formeeruvad nad juhuslike tegurite koosmõjul, ei ole neid võimalik vähemalt praegu täpselt prognoosida. Seevastu madalas vees, kus nad tekivad enamasti solitonilaadsete lainete lõikumisel, on võimalik neid täpsemalt prognoosida (Soomere, 2010). Ka nende võimalik mõju on rannikualadel märksa suurem ning eriti siis, kui nad lõpevad ootamatult kõrge lainerünnakuga (*run-up*) (Nikolkina, Didenkulova, 2012).

Tegelikkuses on enamasti vähetõenäoline, et kogu laineenergia jõuaks randa ja veel vähem tõenäoline, et leiaks aset ohtlik lainerünnak. Osa randa jõudvate lainete energiast läheb kaotsi tänu põhjahõõrdele. Suhteliselt sileda põhja korral on vastav energiakadu tagasihoidlik, kuid siis väheneb randa jõudvate lainete energia nende murdumise ja laineenergia peegeldumise tõttu. Siin on aga võimalikud üksikud erandid. Väga pikkade lainete puhul ei pruugi lained üldse murduda; nii on see näiteks tõusulaine puhul. Peale selle on võimalikud situatsioonid, kus laineenergia rannalt üldse ei peegeldu. Selliseid randu nimetatakse mittepeegeldavateks (Didenkulova jt, 2009; Didenkulova, Pelinovsky, 2010). Teoreetiliselt eksisteerib vaid kaks laugelt muutuva põhjaga mittepeegeldavate rannaprofiilide klassi: sellised, kus vee sügavus h suureneb rannast eemaldumisel vastavalt astmefunktsioonidele $h \sim y^{4/3}$ või $h \sim y^4$, kus y on kaugus rannast (Didenkulova jt, 2009; Didenkulova, Pelinovsky, 2010).

Esmapilgul tundub, et taolised profiilid on looduses, kui neid üldse esineb, erandlikud. Tavaliselt moodustub looduslike lainete mõjul randade madalaveelises osas praktiliselt tasakaaluline nõgusa kujuga profiil, kus vee sügavus $h = Ay^{2/3}$ suureneb võrdeliselt kaugusega rannast astmes $2/3$. Erineva lainecliimaga randadel võib astmenäitaja veidi varieeruda, kuid jääb tavaliselt $2/3$ ja 1 vahele ning vaid väga üksikutel juhtudel on kuni $1,1$ (Kit, Pelinovsky, 1998).

Pealtnäha puhtteoreetiline tõestus (Didenkulova jt, 2009), et teatavat tüüpi kumeratel rannaprofiilidel ei toimu pikkade lainete energia peegeldumist, omandas põhimõtteliselt uue tähenduse, kui selgus, et erinevate perioodidega lainesüsteemide koosmõju võib rannaprofiili kardinaalselt modifitseerida ning kujundada looduslikes randades süstemaatiliselt just selliseid profiile (Didenkulova, Soomere, 2011; Didenkulova jt, 2011b). Lühikeste tuulelainetega vahelduvate pikkade laevalainete rühmade koosmõju tekitab Pikakari rannas veepiiri ümbruses püsiva profiili, mille astmenäitaja on $4/3$ (joonis 10) (Didenkulova, Soomere, 2011). Ülal mainitud tõestus tähendab, et selliste omadustega profiilil võivad pikad lained levida nõnda, et nende energia praktiliselt ei peegeldu, mistõttu saavad võimalikuks väga suured uhtekõrgused ja ohtlikud lainerünnakud. Eesti randades pole taolised situatsioonid tegelikult üldse haruldased. Mererannikute seire riikliku programmi raames mõõdistatud rannaprofiilide analüüs näitas, et juhuslikult valitud kohas on tõenäosusega ligikaudu 7% tegemist taolist tüüpi profiiliga (Didenkulova jt, 2013).



Joonis 10.

Erinevatel päevadel mõõdetud rannaprofiilide astmenäitajate empiirilised jaotused ja nende lähendus normaaljaotusega Pikakari rannas Tallinna lahe läänerannikul 2009. a juunis (Didenkulova, Soomere, 2011).

SÜVITSI VAADATES NÄEME SISELAINEID

Kuna Läänemeri on enamasti väga tugevasti stratifitseeritud mitmekihiline keskkond, on siin väga soodsad tingimused siselainete levimiseks (Delpeche jt, 2010; Kurkina jt, 2011a). Olemasolevad teoreetilised kontseptsioonid käsitlevad enamasti kahekihilisi või pidevalt stratifitseeritud keskkondi. Need aga ei võimalda adekvaatselt kirjeldada Läänemeres toi-

muvaid protsesse võrdlemisi sageli esineva kolmekihilise sümmeetrilise stratifikatsiooni korral (Kurkina jt, 2011a). Sellise struktuuriga mere kihtide teatava parameetrite kombinatsiooni puhul on tarvis rakendada märksa keerukamat võrrandit, mis sisaldab kaht võrdse kaaluga mittelineaarliiget ning ei ole enam integreeruv (Kurkina jt, 2011b).

Osa selle üksiklaine tüüpi lahendeid on siiski solitonidele sarnaste omadustega ning interakteeruvad peaaegu elastselt (Kurkina jt, 2011b; Kurkina jt, 2012). 'Tänu' siinse kolmekihilise struktuuri alumise kihi suhteliselt tagasihoidlikule paksusele on siselainete poolt tekitatud põhjalähedased kiirused Läänemeres märksa suuremad võrreldes näiteks klassikalise kahekihilise struktuuriga, kus alumine kiht on sageli ülemisest märksa paksem.

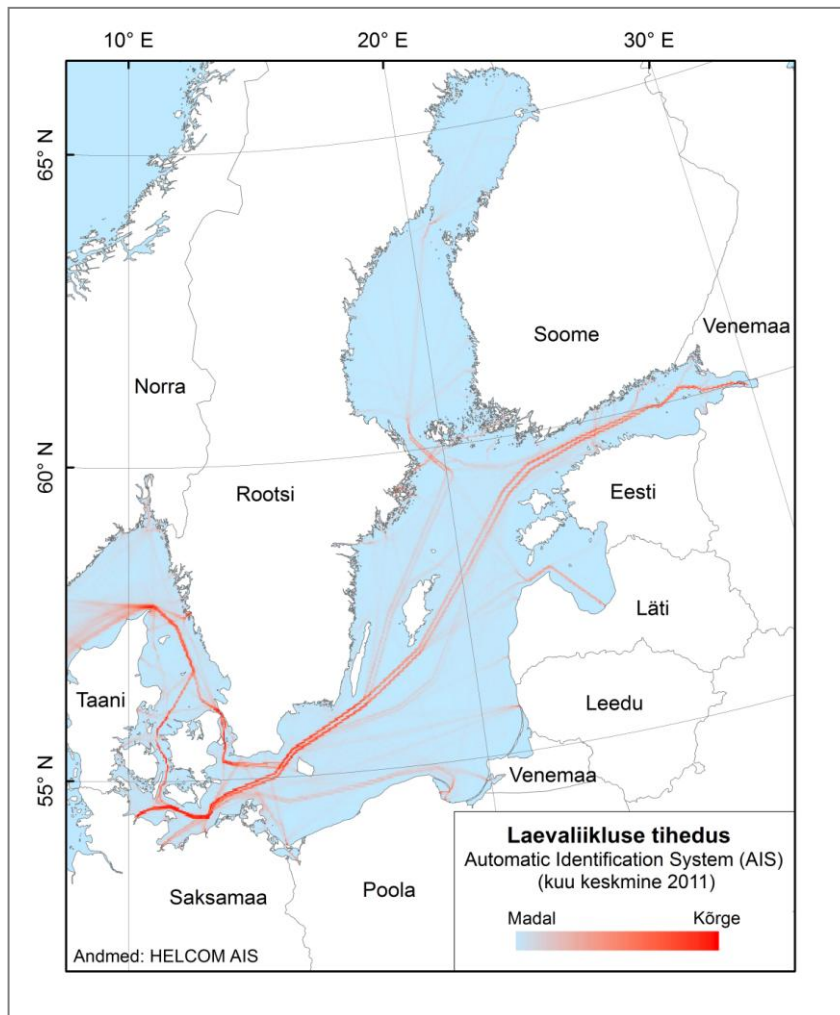
LAEVAD, REOSTUS JA RAND

On hästi teada, et ligikaudu 80% rahvusvahelisest kaubavahetusest toimub meritsi. Märksa vähem tuntud on aga tõsiasi, et 15% selles üüratust kaubavoost käib üle Läänemere (HELCOM, 2009). Üks Euroopa peamisi meremagistraale suundub Põhjamerelt läbi Kieli kanali ja Taani väinade itta, ning haruneb Läänemere keskosas Läti, Leedu ja Rootsi sadamatesse ning Botnia merele suunduvateks voogudeks (joonis 11). Lõviosa laevadest aga seilavad piki Soome lahte meie mere olulise tõmbekeskuse – Peterburi suunas. Seoses uute naftaterminalide (Primorsk, Ust-Luuga) ehitamisega Soome lahe idaosas pikeneb paljude tankerite marsruut senistest sihtkohtadest (Kalinigradi piirkonna ja Läti sadamad) üle kogu Soome lahe. Sügisese ja talvised pikad ööd, tugevad tuuled, sagedane udu, terav lainetus, kiiresti muutuv hoovuste muster ning kuni pool aastat kestev jääkate teevad navigeerimise selles piirkonnas väga keeruliseks. Seetõttu on laevaliiklusega ja eriti võimalike avariidega seotud merereostuse riskid väga suured.

Loodusteadustes ja tööstuslike lahenduste puhul kasutatakse valdavalt definitsiooni, mille kohaselt risk avaldub kahe teguri korrutisena. Nendeks on õnnetuse tõenäosus ja prognoositav kahju. Seega on laevaliiklusega kaasneva reostusega seonduvate riskide vähendamiseks põhimõtteliselt kaks võimalust. Õnnetuse tõenäosuse ning õnnetuse puhul reostuse merre sattumise tõenäosuse vähendamine on võimalik näiteks laevade konstruktsiooni tugevdamise kaudu, kahekereliste tankerite kasutamise abil, jne. (HELCOM, 2009).

Kõnesolevas tööde tsükli kontsentreeruti võimaliku õnnetusega seonduvate keskkonnakahjude minimeerimisele. Selle aluseks on kontseptsioon, et erinevate merealade keskkonnavalade 'väärtus' on erinev, mistõttu keskkonnakahju erinevates kohtades toimunud õnnetuste puhul on üldjuhul erinev. Selle kontseptsiooni juriidiline väljendus on näiteks merekaitsealade loomine ja üksikute piirkondade klassifitseerimine eriti tundlikeks merealadeks (Soomere, 2013b). Enamasti peetakse eriti väärtuslikeks madalaveelisi ala-

sid ja rannavööndit, mis on peamised bioaktiivsed ehk elu taastootmise piirkonnad. Kui õlireostus jääb avamerere, võib hukkuda küll suur hulk linde ja kalu, aga kui reostus jõuab rannikumerre, hukkuvad ka tulevased põlvkonnad. Avamerel on võimalik õlireostust ka märksa odavamalt ja kiiremini likvideerida kui rannikumeres. Seetõttu on oluline vältida võimaliku õlireostuse kandumist rannikupiirkonda, üldisemalt mis tahes eriti väärtuslikule või tundlikule merealale. Seda on võimalik teataval määral saavutada võimaliku õnnetuse koha (nt laevatee) preventiivse optimeerimise kaudu. Eesmärk on lihtne: kui õnnetus peaks tõesti juhtuma, juhtugu see siis kohas, kus keskkonnakahju on võimalikult väike.



Joonis 11.
Laevaliikluse tihedus Läänemeres. M. Viška joonis.

PÖÖRATUD KÜSIMUSED

Sarnaselt eelkirjeldatud pinna- ja siselainete omaduste kvantifitseerimisele avamere erinevates piirkondades ning nende piirkondade ja tundlike rannalõikude vaheliste seoste iseloomustamisele on kõnesolevas tööde tsüklis arendatud välja tehnoloogia, mis võimaldab erinevaid merealaseid süstemaatilist iseloomustada lähtuvalt nende potentsiaalset osutada hoovustega edasi kanduva ning teatava aja pärast rannikut tabava merereostuse alguspunktiks (Soomere jt, 2011b). Taoline tehnoloogia võimaldab ennetavalt optimeerida potentsiaalselt ohtlike tegevuste asukohti avamerel.

Tegemist on nii rannikutehnikas kui ka mereteaduses võrdlemisi harva käsitletava ülesannete klassiga, nn pöördülesandega. Põhimõtteliselt otsitakse mitte niivõrd kohti, kuhu reostus kandub, vaid piirkondi, kust reostuse kandumine tundlikele või väärtuslikele aladele on välistatud või vähetõenäoline (Soomere jt, 2010), või siis kulub selleks võimalikult palju aega. Nõnda formuleeritud reostustranspordi pöördülesande puhul on eesmärgiks arvutada teatav ruumiline riskide jaotus, mis iseloomustab konkreetsele merealale sattunud reostuse levimise potentsiaali. On igati loomulik, et iga etteantud väärtuslike alade konfiguratsioon koos reostuslevi omadustega genereerib, sarnaselt näiteks magnetite mingi konfiguratsiooni puhul tekki-va magnetväljaga, taolise jaotuse. Peamine keerukus kõnesoleva riskide jaotuse arvutamisel on selles, et suur osa reostusega kaasnevaid kahjusid ilmneb pika aja pärast, siis kui reostus on mingile konkreetsele alale jõudnud.

Taolised ülesanded on sageli matemaatilises mõttes ebakorrektselt seatud. Nende lahendamiseks pole olemas standardseid meetodeid ning sageli pole neil üldse mõistlikul moel määratletavat lahendit olemas. Kuigi mitmed hoovustranspordi mudelid on formaalselt pööratavad, on isegi hoovuste rekonstrueerimine suunaga minevikku matemaatilises mõttes ebakorrektnel, rääkimata sellest, et reostuse hajumine ja transformeerumine õhus ja vees on pöördumatu protsess.

Siiski on võimalik taolisi pöördülesandeid teatavas mõttes lahendada. Abiks on siin statistilised meetodid: pöördülesande lähilahend konstrueeritakse suure hulga reostuse edasikandumise otseülesannete lahenduste abil. Sellist lähenemist võib interpreteerida Monte Carlo tüüpi meetodi variatsioonina, kus iga katse kujutab endast klassikalise (hoovustega levivate liisandite) Lagrange'i transpordi ülesande ligikaudset lahendit. Merekeskkonnas tähendab see, et analüüsitakse paljude vee- või reostusosakeste transporti. Analüüsi tulemusena sünnivad teatavad kaardid, mis näitavad, millised on konkreetsesse avamere piirkonda sattunud reostuse teadaolevatele tundlikele või väärtuslikele aladele edasikandumise võimalused. Nende kaartide alusel on võimalik planeerida laevatee nõnda, et oleks minimeeritud reostuse sattumine näiteks väärisalade kudemisaladele, või siis

leida parim koht, kuhu pukseerida avariihtlik laev, või seada piirangud mingile muule keskkonnaohtlikule tegevusele. Põhimõtteliselt pole vahet, kas on tegemist näiteks hiidlainete tõenäosuse järsu suurenemisega mingil merealal, vaaladega kohtumise tõenäosuse kasvuga (Stokstad, 2009) või rannikureostuse tõenäosusega. Oluline on vaid see, kas ohtlikumad ja ohutumad piirkonnad on selgelt eristatavad.

ÕIGESTI ESITATUD KÜSIMUSES ON POOL VASTUST OLEMAS

Merre sattunud reostus kandub edasi kolme peamise teguri mõjul: tuul, lained ja hoovused. Tuule ja lainete mõju on kaasajal võimalik adekvaatselt prognoosida kaks-kolm päeva ette. Reostus liigub allatuult ning samas ka lainete leviku suunas. Kui reostus leviks vaid tuule ja lainete mõjul, oleks lahendus peaaegu triviaalne: laevatee peaks paiknema võimalikult kaugel vastutuult tundlikest merealadest. Ülesande teeb keerukaks reostuse edasikanne hoovustega. Nende suund avamerel tavaliselt ei ühti tuule suunaga. Hoovused kujutavad endast mere kui terviku veemassi reaktsiooni paljude tegurite koosmõjule, alates lokaalsest tuulepingest ja lõpetades veekihtide stratifikatsiooni ja Maa pöörlemine koosmõjuga. Nõnda tekkiv hoovuste süsteem on enamasti tugevalt anisotroopne ning mittehomoogeenne (st pealtnäha sarnastel merealadel võib hoovuste muster olla radikaalselt erinev) ja sageli mittestatsionaarne (ehk ajas ka statistilises mõttes varieeruv) isegi siis, kui seda käivitavad jõud on statsionaarsed. Seetõttu on hoovuste poolt põhjustatud reostustriivi prognoos tõsine väljakutse. Isegi selle lihtsaima versiooni, pinnakihti paigutatud passiivsete drifterite triivi reprodutseerimist vähegi pikemate ajavahemike (üle 12 tunni) vältel peetakse kaas-aegse mereteaduse käsutuses olevate vahenditega praktiliselt võimatuks (Vandenbulcke jt, 2009). See on tõenäoliselt ka põhjuseks, miks hoovustranspordi potentsiaali rannikureostuse minimeerimiseks ei ole varem arvestataval määral analüüsitud. Samal põhjusel fokuseerub tööde tsükkel nimelt hoovustranspordi potentsiaali määratlemisele ja kasutamisele.

Tulenevalt reostuslevi ülesannete arvutil konstrueeritud lahendite võrdlemisi kehvast vastavusest reostuse edasikandumise tegeliku pildiga, on formuleeritud ülesande lahendamine mõttekas vaid statistilisel tasemel. Sellistel puhkudel eeldatakse, et kuigi iga üksiku reostustilga või -laigu täpset trajektoori ei ole võimalik taastada, on siiski võimalik suure hulga taoliste trajektooride võrdlemise ja analüüsi kaudu tuletada olulist informatsiooni reostuse levimise tüüpilistest omadustest ja erinevatesse rannalõikudesse jõudmise tõenäosusest. Taoline positsioon võimaldab rakendada mitmesuguseid statistilisi meetodeid ja mudelite ansambleid, sh mitmekordseid arvutusi ühe ja sama mudeliga.

Põhimõtteline erinevus teistest Soome lähel rakendatud reostuslevi statistilistest või Bayesi mudelitest on, et kõnesolev tehnoloogia toetub mitte liht-

salt mündiviskamisele või vähestele teadaolevatele reostuse edasikande stsenaariumitele, vaid arvestab parimal võimalikul moel reostuse hoovustranspordi dünaamikat, tuginedes reostusosakeste trajektoore rekonstrueerimisel kaasaegsetele kolmemõõtmeliste mere tsirkulatsiooni mudelitele. Tänu mereteaduse ja arvutustehnika edusammudele on selles vallas viimastel aastakümnetel toimunud kiire areng ning kaasaegsed meremudelid rekonstrueerivad võrdlemisi adekvaatselt Läänemere ja Soome lahe hoovuste üldise struktuuri ja statistika. Siiski ei suuda isegi parimad kaasaegsed mudelid reprodutseerida hoovuste süsteemi detaile; pealegi on informatsioon tegelikest hoovuste ruumilistest muustritest praktiliselt olematu ning – nagu juba lainetuse analüüsi juures juttu oli – hoovuseid liikuma panevaid jõudusid kajastavad andmestikud võrdlemisi tagasihoidliku kvaliteediga. Seetõttu on reostuslevi usaldusväärse statistika leidmiseks vaja kasutada väga paljusid ‘mündiviskamisi’ ehk ulatuslikku modelleeritud reostusosakeste liikumise trajektoore andmestikku.

Iga taolise ‘mündiviskamise’ või ‘täringukeerutamise’ tulemust iseloomustab siin üsna keerukas reostusosakese liikumise trajektoor. Selle arvutamiseks annavad kaasaegsed mere dünaamika mudelid vaid teatavad pidepunktid. Need mudelid jaotavad mere veemassi üksikuteks rakkudeks ning arvutavad iga raku jaoks vee liikumise kiiruse ja suuna, nn Euleri kiirused. Reostuslevi ‘mündiviske’ puhul on suhteliselt väheoluline, milline on vee kiirus konkreetsetes punktis; määrav on see, kuhu vee- või reostusosake (allpool lihtsalt lisand) lõpuks jõuab ja kui palju aega selleks kulub. Nii veeosakesed kui ka mitmesugused lisandid liiguvad vahel väga keerulisi nn Lagrange’i trajektoore mööda. Reostuse hoovustranspordi modelleerimine tähendab seega suure hulga taoliste reostusosakeste teekonna ehk trajektoori samm-sammulist rekonstrueerimist.

Kui taolisi trajektoore on teada piisavalt palju, saab asuda erinevatesse avamere piirkondadesse sattuva reostuse edasikandumise omadusi analüüsima. Selleks on mitmeid võimalusi – kasutada saab näiteks trajektoore algus- ja lõpp-punktide vahekaugust, lisandi ümberpaiknemise kiirust jne. Kõnesoleva tehnoloogia jaoks on eelkõige oluline adekvaatselt määratleda, millised on mingist piirkonnast lähtuvate trajektoore šansid jõuda randa või muudele tundlikele merealadele. Millise iganes mõtteka parameetri valimisel on taolise analüüsi tulemuseks teatavate suuruste (nt lisandi randa jõudmise tõenäosuse või selleks kuluva aja) kaardid vaadeldava mereala jaoks, mis omakorda on praktiliste soovitude aluseks.

Kirjeldatud ideed on tööde tsüklis realiseeritud neljaastmelise tehnoloogiana. Selle aluseks on veemasside kolmemõõtmelise kiirusvälja suure lahutusvõimega numbriline modelleerimine, lähtudes konkreetse mereala dünaamika iseärasustest (Andrejev jt, 2011; Soomere jt, 2011f). Nendest andmetest konstrueeritakse reostusosakeste või lisandite Lagrange’i trajek-

toorid (Soomere jt, 2011e), mille statistikast tuletatakse erinevaid avamere piirkondi iseloomustavad suurused, nagu rannikureostuse tõenäosus või reostuse randa jõudmiseks kuluv aeg (Andrejev jt, 2011; Soomere jt, 2011b,c). Viimane samm on teatava sihifunktsiooni minimeerimine sisuliste otsuste alusmaterjaliks. (Soomere jt, 2011a; Viikmäe jt, 2011; Lu jt, 2012).

Ülesanne oli algselt formuleeritud Soome lahe kontekstis. Siinne hoovuste süsteem on tõenäoliselt soodus mõistliku tulemuse tagamiseks (Andrejev jt, 2004a,b; Soomere, Quak, 2007) ning laevaliikluse tihedus lausa kutsub sellega kaasnevaid riske analüüsima ja minimeerima. Lahendamist lihtsustab, nagu pöördmodelleerimise (*inverse modelling*) puhul ikka, detailsete teadmiste olemasolu selle piirkonna kohta (Soomere jt, 2008c, 2009b). Töö käigus kohandati tehnoloogia Läänemere lõunaosa ja Taani väinade jaoks (Lu jt, 2012), laiendati kolleegide poolt ka Läänemere kui terviku jaoks (Höglund, Meier, 2012; Lehmann jt, 2013) ning lisati võimalus adekvaatselt arvestada pinnareostuse tuuletriivi (Murawski, Nielsen, 2013). Rannikutehnika ja keskkonnatehnoloogia kontekstis valisime näidisülesandeks, mille baasil lahenduskäiku ning tehnoloogia võimalusi ja piire demonstreerida, laevatee paigutamise selliselt, et võimaliku õnnetuse korral oleks lekkiva reostuse mõju rannavööndile minimaalne (Soomere jt, 2011b). Põhimõtteliselt on see tehnoloogia universaalne ning rakendatav üsna laia sihifunktsioonide klassi jaoks, näiteks merekaitsealadele kanduva reostuse minimeerimiseks (Delpeche-Ellmann, Soomere, 2013a,b).

KASULIKUD JA OHTLIKUD HOOVUSTE MUSTRID

Kõnesolevas tehnoloogias on hoovuste kasutamine mõttekas vaid siis, kui hoovuste süsteemis eksisteerib teatav korrapära. Põhimõtteliselt on võimalik kasutada iga korrapära avaldumist. Võrdlemisi lihtne on see püsivate hoovuste puhul. Nii rajanes tehnoloogia esialgne, väga toores idee lootusel, et Soome lahe pinnaalune suhteliselt korrastatud voolamine võib siin tekkinud reostuse kanda lahest välja Läänemere avaossa, kus see tõenäoliselt teeb vähem kahju (Soomere, Quak, 2007). Märksa keerukam on hoovuste süsteemi lühiajaliste mustrite rakendamine (Soomere jt, 2011e). Juba nende identifitseerimine on keerukas. Hoovustega edasikanduvate lisandite trajektooride abil saab neid teataval määral nähtavaks teha lainikute ideoloogia rakendamise abil: valitakse teatava pikkusega ajaaken, hinnatakse kõigi selle pikkusega trajektooride abil igas mere punktis toimuvat transporti ning nihutatakse seda akent (ehk trajektooride algushetke) üle pikema ajavahemiku (Viikmäe jt, 2010). Tulemuseks on vähemalt neljamõõtmeline kujutis: Lagrange'i transpordi keskmine kiirus erinevate merealade ja ajahetkede jaoks, mis lisaks on ka ajaakna pikkuse funktsioon. Selle kujutise läbilõiked või sobivas suunas tehtud projektsioonid näitavad, kas vaadel-

dava mereala hoovustranspordis saab üldse arvestada mingi korrapäraga. Näiteks iseloomustab üle pikema ajavahemiku keskmistatud Lagrange'i transpordi kiiruse maksimum (mis on ka ajaakna pikkuse funktsioon) selles mere punktis vahel esineva korrastatud hoovuste mustris püsivust. Nõnda saab määratleda ühe vajaliku ajamastaabi. Arvutuste efektiivsuse tagamiseks peaksid kasutatavad trajektoorid olema nii lühikesed kui võimalik, samas peab iga arvutus adekvaatselt väljendama hoovustranspordi dünaamikat (Viikmäe jt, 2010).

Nii kirjeldatud kui ka muude vajalike suuruste arvutamise rutiin on üsna igav ning kordab ikka ja jälle üht ja sama skeemi (Soomere jt, 2010; Viikmäe jt, 2010; Andrejev jt, 2011). Valitakse võimalikult pikk ajavahemik, mis jagatakse lühemateks osadeks (ajaakendeks). Enamasti määravad selle ajavahemiku pikkuse tsirkulatsioonimudeli integreerimise võimalused või kasutada oleva hoovuste andmestiku ajaline ulatus. Iga ajaakna algul määratletakse teatava lisandi osakeste parve paiknemine mere pinnakihis, seejärel arvutatakse ja salvestatakse nende trajektoorid ajaakna vältel. Arvutusi sama osakeste parvega korratakse järgmise ajaakna vältel, mille algus on eelmise akna suhtes veidi nihutatud. Iga mereala omadusi iseloomustatakse kõigi sellest alast alguse saanud trajektooride alusel. Trajektooride arvu ei saa lihtsalt niisama suurendada. Parim võimalus selleks on alustada arvutusi järgmises aknas juba enne kui eelmine aken on lõpetatud. Osakeste arvu suurendamine on problemaatiline, kuna tsirkulatsioonimudeli igasse rakku paigutatud osakeste trajektoorid on võrdlemisi tugevasti korreleeritud (teisisõnu, osakesed kipuvad liikuma üheskoos). Siin ei aita ka suhteliselt väikeste mastaapidega vee liikumiste (*subgrid turbulence*) kunstlik ergutamine (Andrejev jt, 2010): nõnda leitud trajektoorid võivad küll mudelis kenasti lahknedada, kuid nende liikumisel pole siis enam midagi ühist tegeliku hoovuste mustriga (mida tsirkulatsioonimudel loodetavasti vähemalt natukenegi reprodutseerib). Samuti ei ole mõttekas ajaakende alguspunkide ülemäärane tihendamine, sest värskelt lisatud osakese trajektor kipub kordama nende osakeste trajektore, mis eelmise arvutuse käigus uue akna algushetkel uue osakesega samasse mudeli rakku on juhtunud, mistõttu sisulist informatsiooni ei lisandu. On vaid kaks head võimalust mõtteka informatsiooni hulga suurendamiseks: vaadeldava ajavahemiku pikendamine ja tsirkulatsioonimudeli lahutusvõime suurendamine. Mõlemad suurendavad olulisel määral vajaliku 'musta' töö mahtu.

Kogu vaadeldava ajavahemiku minimaalse mõistliku pikkuse hindamiseks on parimaks abivahendiks kaine mõistus ja uuritava mereala dünaamika tundmine. Meie kandis erinevad tuule (ja järelikult ka hoovuste) omadused oluliselt vaikselt kevad-suvisel ning tuulisel sügis-talvisel ajal. Selle erinevuse ühtlustamiseks peavad arvutused katma vähemalt kaks-kolm aastat (Andrejev jt, 2011; Soomere jt, 2011b), parem veel kui viis aastat. Aja-

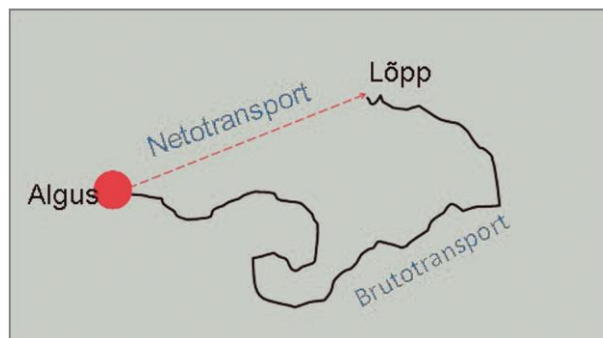
akendevahelise ajanihke muutmine ei mõjuta, nagu ülal toodud argumentidestki selge, kuigivõrd arvutuste tulemusi (Viikmäe jt, 2010), sest statistika adekvaatsus sõltub ennekõike kasutatud sõltumatute trajektooride arvust. Läänemere edelaosas on hoovuste sesoonne muutlikkus suhteliselt väike ning peamine tsüklilisus tuleneb ebaregulaarsetest soolase vee sissevooludest, mistõttu arvutusi on vaja teha vähemalt kümnekonna aasta vältel (Lu jt, 2012).

Kuigi ülal on kirjeldatud võimalust jämedalt hinnata üksikute trajektooride (*resp.* ajaakna) sobivat pikkust ilma reaalse olukorda üldse käsitlemata, tasub siiski tutvuda konkreetse mereala dünaamikast tulenevate piirangutega. Paljudes meredes, ka Soome lahes ja Läänemeres, pole püsivaid jugahoovuseid ning hoovustransport toimib suurelt jaolt nn sünoptiliste keeriste ehk keerisringide süsteemi kaudu. Need teevad täispöörde Soome lahes mõne päevaga ning Läänemere avaosas paari nädalaga. Seetõttu hoovustranspordi arvutustes ei tohiks piirduda keerisringide täispöördest märksa lühema ajaga, sest siis saaksime informatsiooni ainult hoovuste lokaalse struktuuri kohta, kuid mitte rannikuni ulatuva Lagrange'i transpordi kohta. Keerisringi enese ümberpaiknemise identifitseerimiseks tuleb vaadelda 2–3 täispööret, mis tähendab, et Soome lahes peaks trajektooride pikkus olema vähemalt kümnekond päeva (Viikmäe jt, 2010; Andrejev jt, 2010, 2011). Oleme kasutanud ka 20 päeva pikkusi trajektoore Soome lahes ja Läänemere edelaosas (Soomere jt, 2011c; Lu jt, 2011) ning isegi 60 päeva pikkusi arvutusi Läänemere avaosas (Viikmäe jt, 2011).

Suhteliselt lihtsa, kuid üsna sisuka võimaluse hinnata hoovuste mustri lühiajalise korrastatuse määra annab veosakeste või lisandi edasikandumise ülalkirjeldatud skeemi alusel arvutatud bruto- ja netokiiruse võrdlemine. Brutokiirus on siin tavaline osakese liikumise keskmine kiirus mööda mingit keerukat trajektoori, netokiirus aga virtuaalne kiirus, millega osake oleks liikunud otse trajektoori algusest lõppu (joonis 12). Jugavooludes on bruto- ja netokiirused ilmselt võrdsed; seevastu keerisringi sattunud osakese puhul brutokiiruse moodul on konstantne, kuid netokiirus varieerub tsükliliselt. Kõnesolev suhe iseloomustab seega keerisringide ja jugavoolude suhtelist osakaalu fikseeritud pikkusega ajaakna jaoks. Suure netokiirusega aladel on domineerivad jugavoolu tüüpi hoovused, kus reostus kandub tõenäoliselt kiiresti päris kaugele. Väike neto- ja brutokiiruse suhe on tüüpiline kohtades, kus paiknevad enam-vähem statsionaarsed keerisringid ning kuhu sattunud reostus võib küll mõnevõrra ringiratast käia, kuid ei kandu alguspunktist kuigi kaugele.

Soome lahe jaoks rehkendatud neto- ja brutotranspordi jaotused (Soomere jt, 2011e) ilmestavad tuntud tõsiasja, et Soome lahe pinnakihis domineerib valitsevate läänekaare tuulte poolt põhjustatud Ekmani transport ning et seal on kerges ülekaalus itta ja kagusse suunatud liikumised.

Joonis 12.
Lisandite bruto-
ja netotransport.



Huvitava uudisena selgus, et kuigi lahe kui terviku veemasside liikumises valitseb tsüklonaalne voolamine, võib pinnakihis ilmned aeglane anti-tsüklonaalne struktuur sarnaselt USA suurjärvedega (Beletsky jt, 2006) ja Kattegatiga. Põhimõtteliselt on tegemist stratifitseeritud ookeanide ja mere-de hüdrodünaamika võrrandi hästi tuntud lahendiga, mis aga realiseerub suhteliselt harva; enamasti siis, kui ülemine läbisegatud kiht on õhuke ja palju kergem kui alumised kihid. Taoline olukord on Soome lahes päris tavaline mõne kuu vältel pärast jää sulamist, mil tuuled on nõrgad, lained madalad (Soomere, Räämet, 2011b) ning ülakihi vesi on märksa magedam ja soojem kui sügavamal (Soomere jt, 2008c; Leppäranta, Myrberg, 2009).

Mõlemat sorti transpordi mustrid olid erinevatel aastaegadel radikaalselt erinevad (Soomere jt, 2011e), kuid üle terve aasta keskmistatuna üsna sarnased erinevate aastate jaoks. Oli igati loomulik, et kiire netotransport avaldus enamasti rannalähedases vööndis piki randa suunatud hoovuste näol. Mõnevõrra ootamatu oli aga, et üleminekusesoonidel talvelt suvele ja suvelt talvele ilmnis lahe teljega risti suunatud kiire edasikandumine (Soomere jt, 2011e). Sellisesse piirkonda sattunud reostuse puhul on tõenäoline, et see jõuab paari päevaga rannikule (Delpeche-Ellmann, Soomere, 2013b).

POLIITILISELT KORREKTNE LAHENDUS: VÕRDTÕENÄOSUSJON

Mitmesuguste merealade potentsiaali osutada randa tabava reostuse edasikandumise alguspunktiks saab iseloomustada väga mitmel erineval moel. Kui piklik mereala, näiteks Soome laht või Läänemere lõunaosa, on jagatud kahe riigi vahel, paikneb laevatee tavaliselt selle keskel kitsas koridoris ning on riikidevaheliste suhete mõttes optimaalne parajasti siis, kui sellelt lähtuv reostus kandub mõlemale poole randa võrdse tõenäosusega. Kui kogu rannavöönd lugeda võrdselt väärtuslikuks, saab reostuse randa kandumise pöördülesandele leida lähislahendi – poliitilises mõttes korrektse lae-

vatee – isegi mõõduta suuruste abil, lihtsalt loendades. Piisab sellest, et omistada ühele poole randa mineva reostuse alguspunktile mingi väärtus ning teisele poole randa jõudnud reostusosakese lähtekohale selle vastandväärtus. Seejärel tuleb ülaltoodud skeemi alusel lasta merre hästi palju reostusosakesi, rehkendada nende trajektoorid ning iga alguspunkti jaoks kokku lugeda, kui mitu osakest jõudis ühele või teisele poole randa. Ülesande lähislahendiks on (võrdtõenäosus)joon, mis on tõmmatud läbi nende punktide, kus suhe on hästi lähedal 50%:50%-le. Kui selline enam-vähem sile joon eksisteerib, näitab see ala, millele sattunud reostuse levik näiteks Soome lahe põhja- ja lõunarannikule toimub võrdse tõenäosusega (Soomere jt, 2010). Reostuse sattumine merre joonest põhja pool tähendab, et reostusel on suuremad šansid jõuda Soome randa ja vastupidi.

Vastavad rehkendused (Soomere jt, 2010; Viikmäe jt, 2011; Lehmann jt, 2013) näitasid, et nii Soome lahe kui ka Läänemere lõunaregiooni ja Taani väinade kitsamates osades paikneb võrdtõenäosusjoon enam-vähem lahe keskel. Kuna selle tõmbamise aluseks oleval suhtel on võrdlemisi suur rannasuunaline gradient, toob reostuse asukoha isegi väike nihkumine neil aladel endaga kaasa reostuse ühte või teise randa jõudmise suhte kiire muutuse. Huvitava iseärasusena selgus, et nii Soome lahe suudmes kui ka selle laiemas idaosas eemaldub võrdtõenäosusjoon lahe teljest kohati mitmekümne kilomeetri kaugusele. Selle taga on asjaolu, et neis kohtades reostusallika asukoha isegi suhteliselt ulatusliku nihkumisega ei kaasne kõnesoleva suhte arvestatavat muutumist. Edasistest arvutustest selgus, et taoliste aladele sattunud reostus püsib seal suhteliselt kaua ning selle randa jõudmise tõenäosus hoovustranspordi toel on üldiselt väike. Seega võib neid alasid õigusega nimetada minimaalse riskiga merealadeks rannikureostuse kontekstis. Poliitilises mõttes korrektne laevatee Peterburi peaks seega kulgema mööda võrdtõenäosusjoont nendel merealadel, kus reostuse randa jõudmise tõenäosusjaotusel on suur põhja-lõunasuunaline gradient, või siis mööda minimaalse riskiga merealaid (Soomere jt, 2010, 2011e).

KESKKONNAKAHJUSID MINIMEERIVAD LAHENDUSED

Ülaltoodud argumentatsioonist järeldub, et keskkonnakahjude kontekstis on võrdtõenäosusjoon vaid lokaalne optimum. See jagab riski (ja vastutuse) võrdselt kahe rannikuala vahel teatava suhte alusel, kuid ei arvesta mingil moel riski tegelikku suurust ning seetõttu ei paku kogu mereala ja rannikuvööndi jaoks optimaalset lahendust. Kuna risk on definitsiooni järgi mõõduga suurus ja sageli on mõõtühikuks raha(line kahju), on selle mõistlikuks kvantifitseerimiseks ja minimeerimiseks tarvis rakendada suurusi, mida saab vähemalt kvalitatiivselt rahaks ümber arvutada. Muidugi ei tähenda 'raha' siin seda, et õnnetuse puhul mõni konkreetne isik, institutsioon või riik üheselt määratletud summa peab välja käima sarnaselt BP-le

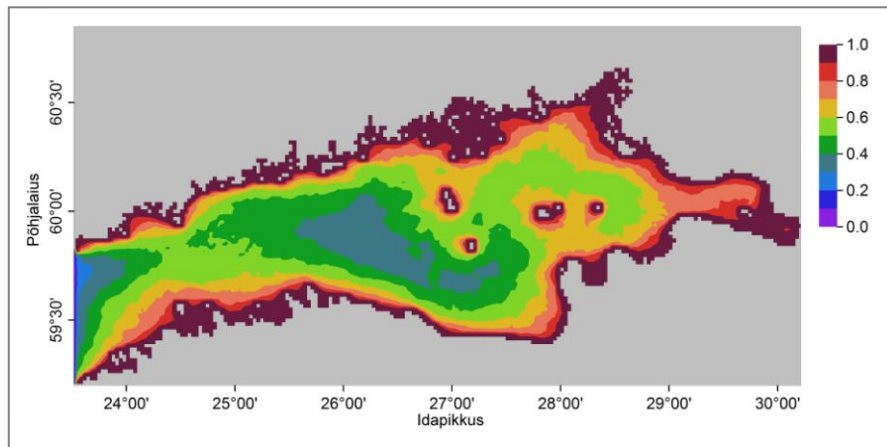
Deepwater Horizon'i avarii järel, veel vähem, et õnnetuse vältimise eest see summa kellegi pangaarvele laekub. Pealegi on kaasaegse keskkonnatehnoloogia keskseks leitmotiiviks arusaam, et mõistlik eesmärk on mitte kasu saamine, vaid kahju vältimine, eelkõige võimaliku kahju ja selle vältimiseks kuluvate investeeringute summa minimeerimise kaudu.

Ka mõõduga suuruste kaudu on võimalik avamere erinevate piirkondade potentsiaali olla tundlikele aladele kanduva reostuse leviku alguspunktiks kvantifitseeritud mitmel erineval moel. Matemaatikud on harjunud mõtlema tõenäosuse keeles ning tõepoolest on suhteliselt lihtne kvantifitseerida avamere erinevaid piirkondi vastavalt neisse sattunud lisandite mis tahes rannalõiku kandumise tõenäosusele (Soomere jt, 2011e). Tõenäosust on aga üsna raske rahasse ümber arvutada ja veel raskem on praktikutele selgitada, mida kõike saab sellega peale hakata. Märksa paremaid võimalusi optimaalse lahendi visualiseerimiseks osapooltele ja selgitamiseks asjast huvitatud isikutele, kuivõrd erinev võib olla erinevate merealade 'võime' tekitada rannikureostust, pakub aeg, mis kulub nendest alguse saanud reostuse randa jõudmiseks (Andrejev jt, 2010, 2011; Soomere jt, 2011c,e). Edaspidi nimetan seda aega lisandi vanuseks. Sarnaselt eelmainitud võrdtõenäosusjoonele peaks keskkonnakahjusid preventiivselt minimeeriv laevatee kulgema mööda merealaid, mille jaoks on kas rannikureostuse tõenäosus võimalikult väike või lisandi vanus võimalikult suur või, mis veel parem, kus mõlemate ekstreemumid langevad kokku (Murawski, Nielsen, 2013).

Rannikureostuse tõenäosuse (joonis 13) ja lisandite vanuse kaardid on võrdlemisi sarnased (Andrejev jt, 2011; Soomere jt, 2011b; Lu jt, 2012; Lehmann jt, 2013). Samuti on neil päris palju ühiseid jooni võrdtõenäosusjoone arvutamise aluseks oleva suhte jaotustega. Kõigi kolme kriteeriumi alusel leitud optimaalsed laevateed paiknevad Soome lahe kitsaimas osas ja Taani väinades praktiliselt lahe või väina telgjoonel (Andrejev jt, 2011; Soomere jt, 2011a,b,c; Viikmäe jt, 2011). Neis piirkondades on nii rannikureostuse tõenäosusel kui ka lisandite vanusel kaartide ristlõigetel selgelt eristuv lokaalne ekstreemum (Soomere jt, 2011c). Seevastu Soome lahe suudmeosas ja selle idapoolses laiemas osas, aga ka Kattegati teatavates piirkondades (Lu jt, 2012) on nendel suurustel väga väike gradient. Neis kohtades laevatee nihutamine kohati kuni mõnekümne kilomeetri võrra ei muuda arvestatavalt ei rannikureostuse tõenäosust ega reostuse randa jõudmiseks kuluvat aega.

KASU JA KAHJU

Lihtsalt kaardile vaadates pole tavaliselt võimalik hinnata, kas kõnesolevast tehnoloogiast mingi konkreetse mereala puhul võiks üldse mingi kasu sündida. Selle hindamiseks tuleb ülesanne vähemalt üks kord läbi rehkendada.



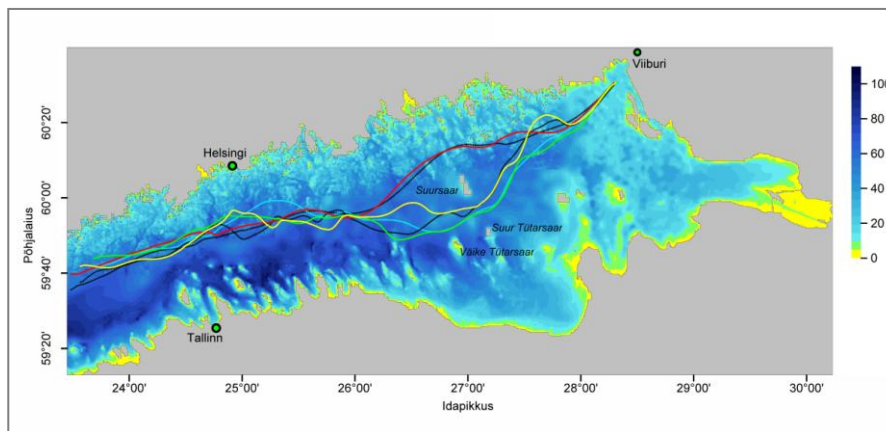
Joonis 13.

Rannikureostuse tõenäosus Soome lahe erinevatesse osadesse sattunud lisandite puhul 10 päeva jooksul (Soomere jt, 2011b). Arvutused ja graafika O. Andrejev.

See on suhteliselt kallis lõbu, sest kõrglahutusega tsirkulatsioonimudeli integreerimine on mahukas töö nii arvutusvõimsuste mõttes kui ka mudeli väljundi analüüsiks vajaliku inimressursi mõttes. Päril olulisel määral aitavad seda ülesannet lihtsustada erineva lahutusvõimega mudelitega tehtud arvutused (Andrejev jt, 2011). Nimelt selgus, et nii randa jõudva reostuse tõenäosuse kui ka selleks kuluva aja ruumilised jaotused on suurel määral sõltumatud mudeli lahutusvõimest. Seetõttu on esimeses lähenduses piisav rakendada suhteliselt tagasihoidliku lahutusvõimega mudelit ja trajektoride rehkendamise skeemi.

Samas kujunevad erineva lahutusvõimega tsirkulatsioonimudelite alusel rehkendatud optimaalsed laevateed vägagi erinevateks (Andrejev jt, 2011). Samuti on erinevatele kriteeriumitele (rannikureostuse tõenäosus, lisandi vanus, riskide võrdne jaotamine jms.) vastavad optimaalsed laevateed vahel üpris erinevad (Soomere jt, 2011c). Soome lahe jaoks rehkendatud laevateede erinevused on päris suured 2-miilise ja 1-miilise lahutusvõimega mudelite korral, kuid märksa väiksemad 1-miilise ja 0,5-miilise sammuga mudelite puhul (joonis 14). Sellise erinevuste mustri taga on tõenäoliselt asjaolu, et 2-miilise sammuga mudelid reprodutseerivad Soome lahe keerisringide süsteemi võrdlemisi ebatäpselt.

Seega on võimalik rakendada suhteliselt tagasihoidliku lahutusvõimega mudeleid ennekõike kõnesoleva tehnoloogia kasutusvõimaluste esialgseks hindamiseks.



Joonis 14.

Optimaalsed laevateed Viiburisse suunduvate laevade jaoks 2-miilise (punane ja must), 1-miilise (kollane ja sinine) ja 0,5-miilise (roheline ja helesinine) ruumilise lahutusvõimega tsirkulatsioonimudeli alusel lähtudes rannikureostuse tõenäosusest ja lisandite vanusest (Andrejev jt, 2011). Taustaks Soome lahe sügavus meetrites (Andrejev jt, 2010).

Täpsemad hinnangud optimaalse laevatee jaoks tuleb aga kindlasti leida mudelitega, mis adekvaatselt reprodutseerivad sünoptilise mastaabiga voolamised. Muidugi peab ka esialgseteks hinnanguteks kasutatava mudeli lahutusvõime olema piisav suurimate keerisringide tajumiseks; vastasel korral ei peegelda tulemused üldse reaalseid transpordimustreid meres. Kui see tingimus on täidetud, on rannikureostuse tõenäosuse ja lisandite vanuse keskväärtuste ja ekstreemumite võrdluse alusel võimalik esialgselt hinnata kõnesoleva tehnoloogia abil tekkivat kasu. Keskväärtused iseloomustavad teatavas mõttes vaadeldava mereala kui terviku tundlikkust avamerel aset leidnud reostuse suhtes. Kui rannareostuse tõenäosuse keskväärtus on väga suur, 80–90% ringis, jõuab reostus kiiresti rannavööndisse ning laevaliikluse riskide leevendamiseks laevatee valiku abil on vähe võimalusi. Kui aga rannikureostuse tõenäosus on väga väike, ei anna laevatee optimeerimine samuti arvestatavat võitu.

Taolised arvutused võivad peegeldada ka mõne üksiku sesooni, voolamise struktuuri või aasta jooksul aset leidvat ebatüüpilist transpordimustrit. Nii näiteks varieeruvad Soome lahe jaoks aastate 1987–1991 jaoks arvatud rannareostuse tõenäosus ja lisandi vanus arvutuste algul tugevasti, peegeldades tuule kiiruse sesoonselt muutlikkust. Kuid need suurused koonduvad juba paari-kolme aasta pärast praktiliselt konstantssele tasemele (Andrejev jt, 2011). Kuna mõlema suuruse ekstreemumid erinevad keskväärtusest ligikaudu 40% võrra (Soomere jt, 2011a,c), on laevatee optimeerimisel

siinkandis jumet. Ligikaudu samal moel varieeruvad kõnesolevad suurused ka Läänemere lõunaosas (Lu jt, 2012), kuid seal on kogu pinnahoovuste süsteemi struktuur ja seetõttu ka optimaalsed laevateed drastiliselt erinevad (tüüpilise) Läänemere vee väljavoolu ja (vähem tüüpilise) Põhjamere soolase vee sissevoolu jaoks.

Reaalse kasu hindamisel tuleb muidugi arvestada ka seda, et optimaalne laevatee on praegu kasutatavatest variantidest mõnevõrra pikem (Andrejev jt, 2011). Seetõttu on korrektne võimalikku 'kasu' iseloomustada piki laevateed arvutatud joonintegraalide abil, mis arvestavad ka läbitava maa pikenemist (Soomere jt, 2011a; Lehmann jt, 2013). Isegi siis on laevateede keskkonnahoidlik optimeerimine konkurentsivõimeline: tõenäoliselt on võimalik rannikureostuse tõenäosust vähendada 10–20 protsendipunkti võrra (seega kuni 30% võrra), või siis reostuse randa jõudmise aega pikendada 2–3 päeva (kuni 40%) võrra (Soomere jt, 2011a).

LAEVATEEDE OPTIMEERIMINE: ARVUTIMÄNG VÕI KESKKONNAHOID?

Kirjeldatud tehnoloogia keskne eesmärk on minimeerida kahjud juba eos, enne kui laev liinile läheb või enne kui antakse mingi tegevuse jaoks keskkonnaluba. Põhimõtteliselt on see praktiliselt puhta 'roheline' mõtlemise stiilinäide, mille kulutused on marginaalsed võrreldes näiteks laevatee süvendamise või laevaliikluse operatiivse juhtimisega. Seejuures on oluline, et selle rakendamisele tehtavad kulutused on investeering mitte niivõrd kasu saamiseks, kuivõrd kahju ärahoidmiseks või minimeerimiseks, kasutades selleks meres nagunii eksisteerivate protsesside teatavaid omadusi. Üldisemas plaanis on tegemist riskide ennetava maandamisega, mis on kaasaegse keskkonnakaitse, -hoiu ja -tehnoloogia üks keskseid sihte.

Praeguseks välja töötatud tehnoloogia prototüüp on muidugi pigem veel arvutimängu tasemel ning pole suuteline konkureerima laevade trajektoori valiku kommertstarkvaraga (Murawski, Nielsen, 2013), mis minimeerib laevasõiduga seonduvad materiaalsed kulutused (teekonna pikkus, kulutatud aeg, põletatud kütus) ning riskid laevale endale, selle meeskonnale ja laadungile. Seni on leitud vaid klimatoloogilises mõttes optimaalsed lahendused. Pinnahoovuste, eriti netotranspordi muustrite drastiline muutlikkus erinevatel aastaagadel (Soomere jt, 2011e) näitavad, et optimaalne lahendus võib kujuneda oluliselt erinevaks erinevate aastaegade puhul, mis on selgunud ka õlireostuse triivi mudelitest (Murawski, Nielsen, 2013). Kuna ka aastaegade algus ja lõpp võib märgatavalt varieeruda, on teoreetiliselt parimaks lahenduseks hoovuste muustrite ja võimaliku reostuslevi operatiivne prognoos ja laevade suunamine reaajas sarnaselt lennukite juhtimisele.

Optimaalsete laevateede määramatust saab kaudselt hinnata, arvutades koridorid, milles rannikureostuse tõenäosus või lisandite vanus erineb piira-

tud määral optimaalsest väärtusest (Soomere jt, 2011c). Soome lahe kitsaimas osas on taolised koridorid väga kitsad. Kohati suurendab optimumist eemaldumine vaid mõnesaja meetri võrra rannikureostuse tõenäosust enam kui 10 protsendipunkti võrra. Erinevad merealad on aga väga erinevad. Soome lahe laiemas idaosas ei suurenda optimaalsest laevateest eemaldumine mitmekümne kilomeetri võrra riske vähegi arvestataval määral. Sellel iseärasusel on oluline sõnum merealade ruumilise planeerimise kontekstis: suhteliselt sarnastel ning enam-vähem samasuguste mõõtmetega merealadel võib olla radikaalselt erinev sisemine dünaamika, mida tuleks mere kasutamisel tingimata arvestada.

On väga tõenäoline, et laevaomanikud pole uuest tehnoloogiast vaimustatud, sest nende kulutused üldiselt mõnevõrra suurenevad. Loodushoid on seevastu ühiskonna kui terviku huvides ning looduse ja ranniku kaitse reeglid kehtestavad mere haldajad – riigid; ja ka neil tuleb selle tehnoloogia rakendamisel teha teatavaid lisakulutusi. Kulutused tehnoloogiale endale ja laevateede optimeerimisele moodustavad neist väga väikese osa. Olemasolevad mereteed, osa meremärgistusest, lootsiraamatud ja kaardid tuleb ümber teha. Suureneb suhteliselt kitsas piirkonnas liikuvate laevade kokkupõrgete oht. Mitmeid sadamaid külastavate laevade teekond pikeneb märgatavalt. Kohati siseneb nõnda kujundatud laevatee erinevate maade territoriaalvetesse ning pole selge, kas kõik riigid seda aktsepteerivad. Pealegi on praeguseks üsna vähe teada kogu tehnoloogiaga seotud matemaatiliste küsimuste kohta, nagu võimalikud määramatused, leitud jaotuste stabiilsus või süstemaatilised moonutused. Siiski on alust arvata, et varem või hiljem tasakaalustavad loodushoiu argumendid majanduslikud kaalutlused. Eelkõige merekaitsealade puhul on lootust jõuda suhteliselt kiiresti vastavate otsusteni (Stokstad, 2009; Delpeche-Ellmann, Soomere, 2013b).

Laiemas plaanis on selle idee realiseerimine tõsine väljakutse kaasaegsele rannikutehnikale, aga ka mereteadusele ja järjest arenevale merealade ruumilisele planeerimisele. Siin on võimalus märgilise tähendusega läbimurdeks, demonstreerides, et alusteadusesse panustamine toob ühiskonnale tagasi ülisuuri, kuigi rahas raskesti mõõdetavaid väärtusi. Meie kasutada on unikaalne katsebassein Läänemere näol. Paljudes maailmamere osades tehnoloogia alusena toimivaid looduslikke 'agente' – mõistliku aja vältel püsivaid hoovuste mustreid – lihtsalt pole olemas. Tsirkulatsioonimudelite täiustamise abil uuendataks kaasproduktina veetaseme, lainete, hoovuste jm mereseisundi parameetrite jälgimise ja prognoosi süsteem. Puhta veega rannikualade positiivset mõju tunneks kaudselt kogu Läänemere ökosüsteem. Seejuures on kõnesolev tehnoloogia võrdlemisi universaalne, realiseeritav vabalt kättesaadavate mudelite kombineerimise abil ning väikeste muudatustega kasutatav mis tahes hoovuste poolt transporditavate ainete või objektide (päästepaadid, konteinerid, prügi meres jne)

jaoks. Samuti on seda võimalik kergesti kohandada üsna laia sihifunktsioonide klassi (ehk praktiliste ülesannete ringi) tarvis.

KOKKUVÕTE

Kõrge tunnustus kirjeldatud töödele peegeldab eelkõige Eesti mereteaduse kui terviku küpsust kohalikul teadusmaastikul. Merelt lähtuvate ohtude analüüs, kvantifitseerimine ja minimeerimine moodustab näitlikult jäämäe veepealse osa, mis teatavas mõttes toetub vähemalt kolmes ülikoolis ja neljas erinevas instituudis tehtavale tööle Läänemere dünaamika mõistmiseks erinevat tüüpi lainete ja hoovuste ning Eesti randade vahelise vastasmõju kontekstis. Vaid sellele vundamendile toetudes sai võimalikuks enam-vähem ühtsesse raamistikku koondada praktiliselt kõigi Läänemere lainekliima aspektide analüüs: lainetuse statistika nii avamerel kui ka ranniku lähistel, lainetuse parameetrite ruumiline muutlikkus, ekstreemsete situatsioonide (sh hiidlained, lainerünnak, tsunamid jne) detailne analüüs, lainekliima muutused Eesti ja lähipiirkondade rannavetes, looduslike ja inimtekkeliste lainete osakaalu, sarnasuse ja erinevuste ning nende poolt rannaprotsessidele avaldatava mõju võrdlev analüüs, aga ka lainete ja hoovuste rolli kvantifitseerimine randade dünaamikas ning nende praktiline kasutamine randade haldamiseks. Pean ise võtmetähtsusega momentideks järgmisi samme:

- esmakordselt on süstemaatiliselt kvantifitseeritud Läänemere pinnalainetuse omadused ja nende ajalis-ruumilise muutlikkuse mustrid;
- selle informatsiooni kombineerimise kaudu siselainete ja laevalainete uuringutega on avatud mitmed lainete ja ranniku vastasmõju senitundmatud aspektid;
- on loodud avamere omaduste uut tüüpi kvantifitseerimisel ning rannikute kaitse pöördülesande ligikaudsel lahendamisel põhinev tehnoloogia potentsiaalselt ohtlike inimtegevuste optimeerimiseks.

Laiemas plaanis pean väga oluliseks, et lõviosa uuringutest, mis on tehtud Eesti rannavetes vaadeldud, mõõdetud ja modelleeritud nähtuste alusel, on üldistatud Soome lahe ja siin ilmnevate kliimamuutuste konteksti. Enamgi veel, mõned Eesti rannavetes tehtud uuringud ja vastavate uuringualade omadused (Didenkulova jt, 2009) on õnnestunud seada normiks selle valdkonna uuringutes maailmateaduses ning selle kaudu senisest adekvaatsemalt positioneerida Eestis tehtavad mere- ja rannikutehnika-alased uuringud maailmateaduse jaoks. Teisisõnu, kõnesolevate tööde tsükli kaudu on demonstreeritud, et kohalike (Eesti rannikumeri) ja regionaalsete (Läänemere lainekliima ja rannikute kaitse probleemid) uuringute tulemused on väärikal kohal rannikutehnika globaalsete probleemide kontekstis ning et Läänemere spetsiifika võimalusi saab kasutada läbimurdeks nii fundamen-

taalsete probleemide lahendamisel kui ka selge praktilise väärtusega tehnoloogiate arendamiseks.

TÄNUAVALDUSED

Kirjeldatud tööde tsükli realiseerimine olnuks võimatu lähemate kolleegide ja 'kodulabori' – TTÜ küberneetika instituudi lainetuse dünaamika labori – panuseta. Andrus Räämet rehkendas Läänemere laineväljad. Inga Zaitseva-Pärnaste, Olga Tribštok, Katri Kartau, Katri Pindsoo, Maris Eelsalu, Mihhail Zujev ja Maarika Org digiteerisid kuude kaupa EMHI vaatluspäevikutest lainetuse kohta käivaid materjale. Ira Didenkulova tuli sageli välja pealtnäha hullumeelsete ideedega pikkade lainete käitumisest rannavööndis, ja enamasti oli tal õigus. Bert Viikmäe ja Nicole Delpeche-Ellmann rehkendasid lausa massiliselt reostuslevi trajektoore ja analüüsisid nende statistikat. Mikk Viidebaum lõi selles kaasa ning korraldas hoovuste mõõtmist triivpoidega. Oksana Kurkina pani tähele, et siselainete struktuur ja mõju võib Läänemeres olla hoopis teistsugune kui ülejäänud šelfimeredes. Tomas Torsvik arvutas välja kõrgete kiirlaevalainete 'lehviku'. Rolf Värvi digiteeris Soome lahe merekaartidelt selle piirkonna batümeetria. Tsükli algstaadiumis panustasid laevalainete uuringutesse Dmitry Kurennoy ja Loreta Kelpšaitė. Rannikute ja merepõhja geoloogia andmestiku interpreteerimisel olid suureks abiks Andres Kask ja Maija Viška. Ewald Quak toetas uuringute rahvusvahelist dimensiooni, milles keskset osa mängis viie Läänemere riigi teadlaste ühistöö projekti BalticWay raames. Anna Terentjeva, Katri Kartau, Katri Pindsoo ja Maris Eelsalu panusid labori hoolikate 'perenaistena' vabastas mind suurest hulgast aeganõudvatest piskohustustest ja võimaldas märksa rohkem teadustöösse süveneda. Rahaliselt on uuringuid toetanud Euroopa Regionaalarengu Fond Mitteli-nearsete Protsesside Tippkeskuse CENS ja KESTA programmi tegevuse TERIKVANT kaudu, Euroopa Sotsiaalfond tippteadlase granti MTT63 kaudu, kolm EL FP6 Marie Curie projekti, EL 7RP tulevikutehnoloogiate võrgustik "Global Systems Dynamics and Policies", Läänemere mereteadust finantseerivate institutsioonide ühenduse BONUS Baltic Way projekt, kaks sihtfinantseeritavat teemat (SF0140077s08, SF014000s11), kolm Eesti Teadusfondi grantide (7413, 8870, 9125) ja mitmed pisemad allikad.

KIRJANDUS

Andrejev, O., Myrberg, K., Alenius, P., Lundberg, P. A. (2004a). Mean circulation and water exchange in the Gulf of Finland – a study based on three-dimensional modelling. *Boreal Environ. Res.*, 9, 1-16.

Andrejev, O., Myrberg, K., Lundberg, P. A. (2004b). Age and renewal time of water masses in a semi-enclosed basin – application to the Gulf of Finland. *Tellus*, 56A, 548-558.

- Andrejev, O., Sokolov, A., Soomere, T., Värvi, R., Viikmäe, B. (2010). The use of high-resolution bathymetry for circulation modelling in the Gulf of Finland. *Estonian J. Eng.*, 16, 3, 187-210.
- Andrejev, O., Soomere, T., Sokolov, A., Myrberg, K. (2011). The role of spatial resolution of a three-dimensional hydrodynamic model for marine transport risk assessment. *Oceanologia*, 53, 1-TI, 309-334.
- Babanin, A. V., Hsu, T.-W., Roland, A., Ou, S.-H., Doong, D.-J., Kao, C.C. (2011). Spectral wave modelling of Typhoon Krosa. *Nat. Hazard. Earth Syst. Sci.*, 11, 501-511.
- Bärring, L., von Storch, H. (2004). Scandinavian storminess since about 1800. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L20202.
- Beletsky, D., Schwab, D., McCormick, M. (2006). Modeling the 1998–2003 summer circulation and thermal structure in Lake Michigan. *J. Geophys. Res. - Oceans*, 111, C10010.
- Broman, B., Hammarklint, T., Rannat, K., Soomere, T., Valdmann, A. (2006). Trends and extremes of wave fields in the north–eastern part of the Baltic Proper. *Oceanologia*, 48, S, 165-184.
- Bruun, P. (1962). Sea level rise as a cause of erosion. *J. Waterw. Harb. Div. - ASCE*, 88, 117-133.
- Charles, E., Idier, D., Delecluse, P., Deque, M., Le Cozannet, G. (2012). Climate change impact on waves in the Bay of Biscay, France. *Ocean Dyn.*, 62, 831-848.
- Dean, R. G., Dalrymple, R. A. (2002). *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Delpeche-Ellmann, N. C., Soomere, T. (2013a). Investigating the Marine Protected Areas most at risk of current-driven pollution in the Gulf of Finland, the Baltic Sea, using a Lagrangian transport model. *Mar. Pollut. Bull.*, 67, 121-129.
- Delpeche-Ellmann, N. C., Soomere, T. (2013b). Using Lagrangian models to assist in maritime management of coastal and marine protected areas. *J. Coast. Res. Special Issue* 65, 36-41.
- Delpeche, N. C., Soomere, T., Lilover, M.-J. (2010). Diapycnal mixing and internal waves in the Saint John River Estuary, New Brunswick, Canada with a discussion relative to the Baltic Sea. *Estonian J. Eng.*, 16, 2, 157-175.
- Didenkulova, I. (2011). Lainepõhised ohud rannavööndis. Teadusmõte Eestis (VII). Meri. Järved. Rannik. Eesti Teaduste Akadeemia, Tallinn, 103-115.

- Didenkulova, I., Pelinovsky, E. (2010). Traveling water waves along a quartic bottom profile. *Proc. Estonian Acad. Sci.*, 59, 166-171.
- Didenkulova, I., Soomere, T. (2011). Formation of two-parameter cross-shore profile under joint influence of random short waves and groups of long waves. *Mar. Geol.*, 289, 1-4, 29-33.
- Didenkulova, I., Pelinovsky, E., Soomere, T. (2009). Long surface wave dynamics along a convex bottom. *J. Geophys. Res. - Oceans*, 114, C07006.
- Didenkulova, I., Pelinovsky, E., Soomere, T. (2011a). Can the waves generated by fast ferries be a physical model of tsunami? *Pure Appl. Geophys.*, 168, 11, 2071-2082.
- Didenkulova, I., Pelinovsky, E., Soomere, T., Parnell, K. E. (2011b). Beach profile change caused by ship wakes and wind waves in Tallinn Bay, the Baltic Sea. *J. Coast. Res.*, Special Issue 64, 60-64.
- Didenkulova, I., Soomere, T., Pindsoo, K., Suuroja, S. (2013). On marine coastal hazards associated with non-reflecting cross-shore profiles along Estonian coasts of the Baltic Sea. *Estonian J. Eng.*, (esitatud).
- Engelbrecht J., Soomere, T. (2006). Kui meri märatseb: Mõrvarlained. *Horisont*, 1, 28-33.
- Erm, A., Alari, V., Lips, I., Kask, J. (2011). Resuspension of sediment in a semi-sheltered bay due to wind waves and fast ferry wakes. *Boreal Environ. Res.*, 16, Suppl. A, 149-163.
- HELCOM = Stankiewicz, M., Vlasov, N. (eds.). (2009). Ensuring safe shipping in the Baltic. Helsinki Commission, Helsinki, 18 p.
- Holliday, N. P., Yelland, M. J., Pascal, R., Swail, V. R., Taylor, P. K., Griffiths, C. R., Kent, E. (2006). Were extreme waves in the Rockall Trough the largest ever recorded? *Geophys. Res. Lett.*, 33, 5, L05613.
- Höglund, A., Meier, H. E. (2012). Environmentally safe areas and routes in the Baltic Proper using Eulerian tracers. *Mar. Pollut. Bull.*, 64, 1375-1385.
- Hünicke, B., Johansson, M., Skovgaard Madsen, K., Soomere, T., Suur-
saar, Ü., Zorita, E. (2013). Sea level and wind waves. Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin II. The BACC Author Team, Springer, (ilmub 2013 sügisel).
- IAHR = IAHR working group on wave generation and analysis (1989). List of sea-state parameters. *J. Waterway, Port Coast. Ocean Eng.*, 793-808.
- Jaagus, J. (2009). Pikaajalised muutused tuule suundade korduvuses Eesti läänerannikul. Kont, A., Tõnisson, H. (toim.). *Kliimamuutuste mõju Eesti rannikule = Climate Change Impact on Estonian Coasts*. Tallinn, 11-24. (Publikatsioonid / Tallinna Ülikool, Ökoloogia Instituut; 11).

- Jaagus, J., Kull, A. (2011). Changes in surface wind directions in Estonia during 1966-2008 and their relationships with large-scale atmospheric circulation. *Estonian J. Earth Sci.*, 60, 220-231.
- Jönsson, A., Broman, B., Rahm, L. (2003). Variations in the Baltic Sea wave fields. *Ocean Eng.*, 30, 1, 107-126.
- Kartau, K., Soomere, T., Tõnisson, H. (2011). Quantification of sediment loss from semi-sheltered beaches: a case study of Valgerand Beach, Pärnu Bay, the Baltic Sea. *J. Coast. Res.*, Special Issue 64, 100-104.
- Kask, A., Soomere, T., Healy, T., Delpeche, N. (2009). Rapid estimates of sediment loss for “almost equilibrium” beaches. *J. Coast. Res.*, Special Issue 56, 971-975.
- Kask, A., Soomere, T., Suuroja, S., Kask, J. (2010). Sand accumulation under varying lithohydrodynamic conditions in the coastal area of the north-eastern Baltic Sea. *Baltica*, 23, 2, 157-164.
- Keevallik, S., Soomere, T. (2010). Towards quantifying variations in wind parameters across the Gulf of Finland. *Estonian J. Earth Sci.*, 59, 4, 288-297.
- Kelpšaitė, L., Soomere, T. (2009). Vessel-wave induced potential long-shore sediment transport at Aegna Island, Tallinn Bay. *Estonian J. Eng.*, 15, 3, 168-181.
- Kelpšaitė, L., Herrmann, H., Soomere, T. (2008). Wave regime differences along the eastern coast of the Baltic Proper. *Proc. Estonian Acad. Sci.*, 57, 4, 225-231.
- Kelpšaitė, L., Parnell, K. E., Soomere, T. (2009). Energy pollution: the relative influence of wind-wave and vessel-wake energy in Tallinn Bay, the Baltic Sea. *J. Coast. Res.*, Special Issue 56, 812-816.
- Kelpšaitė, L., Dailidienė, I., Soomere, T. (2011). Changes in wave dynamics at the south-eastern coast of the Baltic Proper during 1993-2008. *Boreal Environ. Res.*, 16, Suppl. A, 220-232.
- Kit, E., Pelinovsky, E. (1998). Dynamical models for cross-shore transport and equilibrium bottom profiles. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*, 124, 138-146.
- Kurennoy, D., Soomere, T., Parnell, K. E. (2009a). Variability in the properties of wakes generated by high-speed ferries. *J. Coast. Res.*, Special Issue 56, 519-523.
- Kurennoy, D., Didenkulova, I., Soomere, T. (2009b). Crest-trough asymmetry of waves generated by high-speed ferries. *Estonian J. Eng.*, 15, 3, 182-195.

- Kurennoy, D., Parnell, K. E., Soomere, T. (2011). Fast-ferry generated waves in south-west Tallinn Bay *J. Coast. Res.*, Special Issue 64, 165-169.
- Kurkina, O., Pelinovsky, E., Talipova, T., Soomere, T. (2011a). Mapping the internal wave field in the Baltic Sea in the context of sediment transport in shallow water. *J. Coast. Res.*, Special Issue 64, 2042-2047.
- Kurkina, O. E., Kurkin, A. A., Soomere, T., Pelinovsky, E. N., Ruvinskaya, E. A. (2011b). Higher-order (2+4) Korteweg-de Vries - like equation for interfacial waves in a symmetric three-layer fluid. *Phys. Fluids*, 23, 11, 116602.
- Kurkina, O. E., Kurkin, A. A., Ruvinskaya, E. A., Pelinovsky, E. N., Soomere, T. (2012). Dynamics of solitons in non-integrable version of the modified Korteweg-de Vries equation. *JETP Lett.*, 95, 2, 91-95.
- Laanearu, J., Koppel, T., Soomere, T., Davies, P. A. (2007). Joint influence of river stream, water level and wind waves on the height of sand bar in a river mouth. *Nord. Hydrol.*, 38, 3, 287-302.
- Leppäranta, M., Myrberg, K. (2009). *Physical Oceanography of the Baltic Sea*. Springer Praxis.
- Lehmann, A., Getzlaff, K., Harlass, J. (2011). Detailed assessment of climate variability in the Baltic Sea area for the period 1958 to 2009. *Clim. Res.*, 46, 185-196.
- Lehmann, A., Hinrichsen, H.-H., Getzlaff, K. (2013). Identifying potentially high risk areas for environmental pollution in the Baltic Sea. *Boreal Environ. Res.*, (in press).
- Liu, P. C., Chen, H. S., Doong, D.-J., Kao, C. C., Hsu, Y.-J. G. (2008). Monstrous ocean waves during typhoon Krosa. *Ann. Geophys.* 26, 1327-1329.
- Lu, X., Soomere, T., Stanev, E., Murawski, J. (2012). Identification of the environmentally safe fairway in the South-Western Baltic Sea and Kattegat. *Ocean Dyn.*, 62, 6, 815-829.
- Massel, S. R. (1989). *Hydrodynamics of Coastal Zones*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Murawski, J., Nielsen, J. W. (2013). Applications of an oil drift and fate model for fairway design. Soomere, T., Quak, E. (eds.). *Preventive Methods for Coastal Protection: Towards the Use of Ocean Dynamics for Pollution Control*. Springer, (ilmub 21.06.2013).
- Nikolkina I., Didenkulova I. (2012). Catalogue of rogue waves reported in media in 2006–2010. *Nat. Hazard.*, 61, 3, 989-1006.

- Orlenko, L. R., Lopatukhin, L. I., Portnova, G. L. (eds.). (1984). Исследования гидрометеорологического режима Таллинского залива (Studies of Hydrometeorological Regime of Tallinn Bay). Gidrometeoizdat, Leningrad, (in Russian).
- Orviku, K., Jaagus, J., Kont, A., Ratas, U., Rivis, R. (2003). Increasing activity of coastal processes associated with climate change in Estonia. *J. Coast. Res.*, 19, 2, 364-375.
- Parnell, K. E., Delpeche, N., Didenkulova, I., Dolphin, T., Erm, A., Kask, A., Kelpšaitė, L., Kurennoy, D., Quak, E., Räämet, A., Soomere, T., Terentjeva, A., Torsvik, T., Zaitseva-Pärnaste, I. (2008). Far-field vessel wakes in Tallinn Bay. *Estonian J. Eng.*, 14, 4, 273-302.
- Pindsoo, K., Soomere, T., Zujev, M. (2012). Decadal and long-term variations in the wave climate at the Latvian coast of the Baltic Proper. *Proc. of the IEEE/OES Baltic 2012 Int. Symp. "Ocean: Past, Present and Future. Climate Change Research, Ocean Observation & Advanced Technologies for Regional Sustainability,"* May 8-11, Klaipėda, Lithuania. IEEE Conference Publications, 8 p. doi: 10.1109/BALTIC.2012.6249160
- Pryor, S. C., Barthelmie, R. J. (2003). Long-term trends in near-surface flow over the Baltic. *Int. J. Climatol.*, 3, 271-289.
- Ruban, V., Kodama, Y., Ruderman, M., Dudley, J., Grimshaw, R., McClintock, P. V. E., Onorato, M., Kharif, Ch., Pelinovsky, E., Soomere, T., Lindgren, G., Akhmediev, N., Slunyaev, A., Solli, D., Ropers, C., Jalali, B., Dias, F., Osborne, A. (2010). Rogue waves – towards a unifying concept?: Discussions and debates. *European Phys. J. Spec. Topics*, 185, 5-15.
- Räämet, A., Soomere, T. (2010). The wave climate and its seasonal variability in the northeastern Baltic Sea. *Estonian J. Earth Sci.*, 59, 1, 100-113.
- Räämet, A., Soomere, T. (2011). Spatial variations in the wave climate change in the Baltic Sea. *J. Coast. Res.*, Special Issue 64, 240-244.
- Räämet, A., Suursaar, Ü., Kullas, T., Soomere, T. (2009). Reconsidering uncertainties of wave conditions in the coastal areas of the northern Baltic Sea. *J. Coast. Res.*, Special Issue 56, 257-261.
- Räämet, A., Soomere, T., Zaitseva-Pärnaste, I. (2010). Variations in extreme wave heights and wave directions in the north-eastern Baltic Sea. *Proc. Estonian Acad. Sci.*, 59, 2, 182-192.
- Ryabchuk, D., Kolesov, A., Chubarenko, B., Spiridonov, M., Kurennoy, D., Soomere, T. (2011). Coastal erosion processes in the eastern Gulf of Finland and their links with geological and hydrometeorological factors. *Boreal Environ. Res.*, 16, Suppl. A, 117-137.

- Schmager, G., Fröhle, P., Schrader, D., Weisse, R., Müller-Navarra, S. (2008). Sea state, tides. Feistel, R., Nausch, G., Wasmund, N. (eds.). *State and Evolution of the Baltic Sea 1952–2005*. Wiley, 143-198.
- Solli, D. R., Ropers, C., Koonath, P., Jalali, B. (2007). Optical rogue waves. *Nature*, 450, 7172, 1054-1057.
- Soomere, T. (2001). Wave regimes and anomalies off north-western Saaremaa Island. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 7, 157-173.
- Soomere, T. (2003). Anisotropy of wind and wave regimes in the Baltic Proper. *J. Sea Res.*, 49, 4, 305-316.
- Soomere, T. (2007a). Lainetav Läänemeri Eesti teadlaste pilgu läbi. Teadusmõte Eestis (IV), *Tehnikateadused (II)*. Eesti Teaduste Akadeemia, Tallinn, 133-142.
- Soomere, T. (2007b). Nonlinear components of ship wake waves. *Appl. Mech. Rev.*, 60, 3, 120-138.
- Soomere, T. (2008). Extremes and decadal variations of the northern Baltic Sea wave conditions. Pelinovsky, E., Kharif, Ch. (eds.). *Extreme Ocean Waves*. Springer, 139-157.
- Soomere, T. (2009a). Long ship waves in shallow water bodies. Quak, E., Soomere, T. (eds.). *Applied Wave Mathematics: Selected Topics in Solids, Fluids, and Mathematical Methods*. Springer, Heidelberg, 193-228.
- Soomere, T. (2009b) Solitons interactions. Meyers, R. A. (ed.). *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, 9. Springer, 8479-8504.
- Soomere, T. (2010). Rogue waves in shallow water. *European Phys. J. Spec. Topics*, 185, 81-96.
- Soomere, T. (2013a). Extending the observed Baltic Sea wave climate back to the 1940s. *J. Coast. Res.*, Special Issue 65, 1969-1974.
- Soomere, T. (2013b). Towards mitigation of environmental risks. Soomere, T., Quak, E. (eds.). *Preventive Methods for Coastal Protection: Towards the Use of Ocean Dynamics for Pollution Control*. Springer, 46, (ilmub 21.06.2013).
- Soomere, T., Engelbrecht, J. (2006). Weakly two-dimensional interaction of solitons in shallow water. *European J. Mech. B Fluids*, 25, 5, 636-648.
- Soomere, T., Healy, T. (2011). On the dynamics of “almost equilibrium” beaches in semi-sheltered bays along the southern coast of the Gulf of Finland. Harff, J., Björk, S., Hoth, P. (eds.). *The Baltic Sea Basin*. Springer, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 255-279.
- Soomere, T., Keevallik, S. (2001). Anisotropy of moderate and strong winds in the Baltic Proper. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 7, 35-49.

- Soomere, T., Keevallik, S. (2003). Directional and extreme wind properties in the Gulf of Finland. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 9, 73-90.
- Soomere, T., Kurkina, O. (2011). Статистика экстремального волнения в юго-западной части Балтийского моря (Statistics of extreme wave conditions in the south-western Baltic Sea). *Фундаментальная и прикладная гидрофизика (Fundamental and Applied Hydrophysics)*, 4, 4, 43-57.
- Soomere, T., Quak, E. (2007). On the potential of reducing coastal pollution by a proper choice of the fairway. *J. Coast. Res., Special Issue 50*, 678-682.
- Soomere, T., Räämet, A. (2011a). Long-term spatial variations in the Baltic Sea wave fields. *Ocean Sci.*, 7, 1, 141-150.
- Soomere, T., Räämet, A. (2011b). Spatial patterns of the wave climate in the Baltic Proper and the Gulf of Finland. *Oceanologia*, 53, 1-TI, 335-371.
- Soomere, T., Räämet, A. (2013). Decadal changes in the Baltic Sea wave heights. *J. Mar. Syst.*, doi:10.1016/j.jmarsys.2013.03.009
- Soomere, T., Zaitseva, I. (2007). Estimates of wave climate in the northern Baltic Proper derived from visual wave observations at Vilsandi. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 13, 1, 48-64.
- Soomere, T., Viška, M. (2013). Simulated sediment transport along the eastern coast of the Baltic Sea. *J. Mar. Syst.*, doi: 10.1016/j.jmarsys.2013.02.001
- Soomere, T., Kask, A., Kask, J., Nerman, R. (2007). Transport and distribution of bottom sediments at Pirita Beach. *Estonian J. Earth Sci.*, 56, 4, 233-254.
- Soomere, T., Behrens, A., Tuomi, L., Nielsen, J. W. (2008a). Wave conditions in the Baltic Proper and in the Gulf of Finland during windstorm Gudrun. *Nat. Hazard. Earth Syst. Sci.*, 8, 1, 37-46.
- Soomere, T., Kask, A., Kask, J., Healy, T. (2008b). Modelling of wave climate and sediment transport patterns at a tideless embayed beach, Pirita Beach, Estonia. *J. Mar. Syst.*, 74, S133-S146.
- Soomere, T., Myrberg, K., Leppäranta, M., Nekrasov, A. (2008c). The progress in knowledge of physical oceanography of the Gulf of Finland: a review for 1997-2007. *Oceanologia*, 50, 3, 287-362.
- Soomere, T., Didenkulova, I., Parnell, K. E. (2009a). Implications of fast-ferry wakes for semi-sheltered beaches: a case study at Aegna Island, Baltic Sea. *J. Coast. Res., Special Issue 56*, 128-132.

- Soomere, T., Leppäranta, M., Myrberg, K. (2009b). Highlights of the physical oceanography of the Gulf of Finland reflecting potential climate changes. *Boreal Environ. Res.*, 14, 1, 152-165.
- Soomere, T., Viikmäe, B., Delpeche, N., Myrberg, K. (2010). Towards identification of areas of reduced risk in the Gulf of Finland, the Baltic Sea. *Proc. Estonian Acad. Sci.*, 59, 2, 156-165.
- Soomere, T., Andrejev, O., Sokolov, A., Quak, E. (2011a). Management of coastal pollution by means of smart placement of human activities. *J. Coast. Res.*, Special Issue 64, 951-955.
- Soomere, T., Andrejev, O., Sokolov, A., Myrberg, K. (2011b). The use of Lagrangian trajectories for identification the environmentally safe fairway. *Mar. Pollut. Bull.*, 62, 7, 1410-1420.
- Soomere, T., Berezovski, M., Quak, E., Viikmäe, B. (2011c). Modeling environmentally friendly fairways using Lagrangian trajectories: a case study for the Gulf of Finland, the Baltic Sea. *Ocean Dyn.*, 61, 10, 1669-1680.
- Soomere, T., Zaitseva-Pärnaste, I., Räämet, A. (2011d). Variations in wave conditions in Estonian coastal waters from weekly to decadal scales. *Boreal Environ. Res.*, 16, Suppl. A, 175-190.
- Soomere, T., Delpeche, N., Viikmäe, B., Quak, E., Meier, H. E. M., Döös, K. (2011e). Patterns of current-induced transport in the surface layer of the Gulf of Finland. *Boreal Environ. Res.*, 16, Suppl. A, 49-63.
- Soomere, T., Viidebaum, M., Kalda, J. (2011f). On dispersion properties of surface motions in the Gulf of Finland. *Proc. Estonian Acad. Sci.*, 60, 269-279.
- Soomere, T., Parnell, K. E., Didenkulova, I. (2011g). Water transport in wake waves from high-speed vessels. *J. Mar. Syst.*, 88, 1, 74-81.
- Soomere, T., Viška, M., Lapinskis, J., Räämet, A. (2011h). Linking wave loads with the intensity of coastal processes along the eastern Baltic Sea coasts. *Estonian J. Eng.*, 17, 359-374.
- Soomere, T., Weisse, R., Behrens, A. (2012). Wave climate in the Arkona Basin, the Baltic Sea. *Ocean Sci.*, 8, 2, 287-300.
- Soomere, T., Pindsoo, K., Bishop, S. R., Käär, A., Valdmann, A. (2013a). Mapping wave set-up near a complex geometric urban coastline. *Nat. Hazard. Earth Syst. Sci. Discussions*, 1, 2, 1651-1688.
- Soomere, T., Viška, M., Eelsalu, M. (2013b). Spatial variations of wave loads and closure depth along the eastern Baltic Sea coast. *Estonian J. Eng.*, (esitatud).

- Sterl, A., Caires, S. (2005). Climatology, variability and extrema of ocean waves – the web-based KNMI/ERA-40 wave atlas. *Int. J. Climatol.*, 25, 963-977.
- Stokstad, E. (2009). U.S. poised to adopt national ocean policy. *Science*, 326, 1618.
- Suursaar, Ü. (2010). Waves, currents and sea level variations along the Letipea-Sillamäe coastal section of the southern Gulf of Finland. *Oceanologia*, 52, 3, 391-416.
- Suursaar, Ü. (2011). Tuulekliima muutuste mõju Eesti rannikumere veetaseme-, hoovuste- ja lainerežiimile. Teadusmõte Eestis (VII), Meri. Järved. Rannik. Eesti Teaduste Akadeemia, Tallinn, 59-67.
- Torsvik, T., Soomere, T. (2008). Simulation of patterns of wakes from high-speed ferries in Tallinn Bay. *Estonian J. Eng.*, 14, 3, 232-254.
- Torsvik, T., Soomere, T. (2009). Modeling of long waves from high speed ferries in coastal waters. *J. Coast. Res.*, Special Issue 56, 1075-1079.
- Torsvik, T., Dysthe, K., Pedersen, G. (2006). Influence of variable Froude number on waves generated by ships in shallow water. *Phys. Fluids*, 18, Paper 062101.
- Torsvik, T., Didenkulova, I., Soomere, T., Parnell, K. E. (2009). Variability in spatial patterns of long nonlinear waves from fast ferries in Tallinn Bay. *Nonlin. Process. Geophys.*, 16, 2, 351-363.
- Tuomi, L., Kahma, K. K., Pettersson, H. (2011). Wave hindcast statistics in the seasonally ice-covered Baltic Sea. *Boreal Environ. Res.*, 16, 451-472.
- Viška, M., Soomere, T. (2012). Hindcast of sediment flow along the Curonian Spit under different wave climates. *Proc. of the IEEE/OES Baltic 2012 Int. Symp. "Ocean: Past, Present and Future. Climate Change Research, Ocean Observation & Advanced Technologies for Regional Sustainability,"* May 8-11, Klaipėda, Lithuania. IEEE Conference Publications, 7 p. doi: 10.1109/BALTIC.2012.6249195
- Zaitseva-Pärnaste, I., Suursaar, Ü., Kullas, T., Lapimaa, S., Soomere, T. (2009). Seasonal and long-term variations of wave conditions in the northern Baltic Sea. *J. Coast. Res.*, Special Issue 56, 277-281.
- Zaitseva-Pärnaste, I., Soomere, T., Tribštok, O. (2011). Spatial variations in the wave climate change in the eastern part of the Baltic Sea. *J. Coast. Res.*, Special Issue 64, 195-199.
- Zaitseva-Pärnaste, I., Soomere, T. (2013). Interannual variations of ice cover and wave energy flux in the north-eastern Baltic Sea. *Ann. Glaciol.*, 54, 62, 175-182.

- Vandenbulcke, L., Beckers, J.-M., Lenartz, F., Barth, A., Poulain, P.-M., Aidonidis, M., Meyrat, J., Arduin, F., Tonani, M., Fratianni, C., Torrisi, L., Pallela, D., Chiggiato, J., Tudor, M., Book, J. W., Martin, P., Peggion, G., Rixen, M. (2009). Super-ensemble techniques: Application to surface drift prediction. *Progr. Oceanogr.*, 82, 149-167.
- Viikmäe, B., Soomere, T., Viidebaum, M., Berezovski, A. (2010). Temporal scales for transport patterns in the Gulf of Finland. *Estonian J. Eng.*, 16, 3, 211-227.
- Viikmäe, B., Soomere, T., Parnell, K. E., Delpeche, N. (2011). Spatial planning of shipping and offshore activities in the Baltic Sea using Lagrangian trajectories. *J. Coast. Res.*, Special Issue 64, 956-960.
- Wang, D. W., Mitchell, D. A., Teague, W. J., Jarosz, E., Hulbert, M. S. (2005). Extreme waves under Hurricane Ivan. *Science*, 309, 5736, 896.
- Weisse, R., Günther, H. (2007). Wave climate and long-term changes for the Southern North Sea obtained from a high-resolution hindcast 1958–2002. *Ocean Dyn.*, 57, 3, 161-172.

*Teaduspreemia arstiteaduse alal
uurimuste tsükli
“Südame- ja veresoonkonna siirdemeditsiinilised uuringud” eest*



Jaan Eha (vasakul) ja Mihkel Zilmer

Jaan Eha

Sündinud 12.06.1950 Viljandis

- 1968 C. R. Jakobsoni nim Viljandi 1. Keskkool
- 1974 Tartu Ülikool, arstiteadus
- 1979 meditsiinikandidaat, Tartu Ülikool
- 1990 PhD, arstiteadus, Tartu Ülikool
- 1974–1980 Tartu Kliinilise Haigla arst
- 1975–1995 Tartu Ülikooli vanemlaborant, teadur, vanemteadur, laboratooriumi juhataja
- 1980–2002 Tallinna Kiirabihaigla, Mustamäe Haigla kardioloog, osakonnajuhataja, sisehaiguste kliiniku juhataja
- Alates 2002 Tartu Ülikooli Kliinikumi südamekliiniku juhataja
- Alates 2004 Tartu Ülikooli kardioloogia professor
- 1981 NSVL Arstiteaduste Akadeemia noore teadlase preemia
- 1985 ENSV teaduspreemia
- 1991 Euroopa Kardeoloogide Seltsi liige
- 2005 Eesti Punase Risti I klassi teenetemärk
- 2007 Eesti Kardioloogide Seltsi auliige

Avaldanud üle 300 teaduspublikatsiooni

Mihkel Zilmer

Sündinud 15.12.1948 Valgas

- 1966 Valga 1. Keskkool
- 1971 Tartu Ülikool, biokeemia
- 1976 bioloogiakandidaat, Tartu Ülikool
- 1992 PhD, biokeemia, Tartu Ülikool
- Alates 1974 Tartu Ülikooli teadur, vanemteadur, dotsent, üldise biokeemia professor, biokeemia instituudi juhataja, meditsiinilise biokeemia professor
- 1998 Eesti Vabariigi teaduspreemia meditsiini alal, kollektiivi juht
- 1999 Eesti Vabariigi innovatsiooni peapreemia
- 2002 Eesti Punase Risti III klassi teenetemärk
- 2005 TÜ innovatsiooni peapreemia (parim leiutus, ME-3)
- 2010 Soome riigi kvaliteedi-innovatsiooni kõrgeim auhind (kollektiivi liige)

Avaldanud üle 500 teaduspublikatsiooni, sh üle 120 artikli *Web of Science* andmebaasis.

Baasteaduse ehk teisiti väljendudes fundamentaaluuringute edusammud patoloogiliste probleemide molekulaarmehhanismide selgitamise alal on kogu aeg olnud pidev, arenev üha enam sügavuti minev protsess. Paraku on see protsess kippunud jääma kuidagi nagu asjaks iseeneses – väga vajalik areng teadusena, aga üsna väljundivaese või ülimalt aeglase väljundiga kliinilise teaduse ja praktika mõttes. Ja seda isegi kõige kõrgema arengutasemega riike silmas pidades.

Et tegemist on tõsise, süveneva ning ebamõistliku olukorraga, kinnitab juba 2008. aasta *Nature* väga murelik analüüsiv number, kus maailmale antud sõnumite hulgas öeldi selgelt välja ka järgmine: “worrying is the extent to which biomedicine in the past few decades has swung so far towards pure science, but money should also be spent on creating the mechanisms to translate those findings into clinical practice”. Kõige selle tõttu võib Ameerika Ühendriikide, Inglismaa jt väga kõrge teadustasemega riikide tulevikku suunatud strateegilistes arengukavades viimasel kümnendil kohata üha enam mõistet *translational medicine* (siirdemeditsiin). Juhtivad teadusriigid on nüüdseks tõstnud siirdemeditsiini meditsiiniteaduse lähituleviku arengustrateegia üheks prioriteediks, nimetades seda meditsiini valdkonna arengukavades läbimurdealaks.

Alljärgnevalt selgitame lühidalt, mida siirdemeditsiin lihtsalt lahtiseletatuna tähendab ning, püüdes vältida nii palju kui võimalik keerulisi erialaseid mõisteid, aitame lugejal mõista meie teadusgrupi viimase nelja aasta siirdemeditsiini alaseid tegemisi südame- ja veresoonkonna teadusuuringute valdkonnas.

Mis on siirdemeditsiin siis lihtsalt väljendudes? Siirdemeditsiini alla kuuluvad teadusuuringud, mis, olles väga heal teadustasemel, ei jää aga pelgalt baasteaduse väljunditeks, vaid nende tulemil on ka koheselt rakendusi kliinilises praktikas. Kui sõnastada seda eesmärgipõhiselt, siis võiks öelda nii – siirdemeditsiini eesmärgiks on teaduslaborite (baasteaduselaborid, kliinilised teaduselaborid) integreeritud ja eesmärgipärase teadustööga loodud uute teadmiste võimalikult kiire ja sihipärane rakendamine kliinilises praktikas.

Viimasel kümnendil on kogu maailmas esile tõstetud vajadust võimalikult süsteemselt läheneda ka südame- ja veresoonkonna haiguste põhjuste ja ravi aluseks olevate tegevuste ellurakendamiseks. See on aga selge signaal ja aja nõue, et tulevikurengute aluseks peab üha enam olema siirdemeditsiiniline lähenemine, mis sisuliselt/tegelikult integreeriks baas- ja kliinilise teaduse. Sellises lähenemises nähakse teaduspõhise meditsiini uusi läbimurdevõimalusi südame- ja veresoonkonna haiguste preventatsiooniks, diagnostikaks ja raviks. Et süsteemne integreeriv lähenemine on olnud meie lipukirjaks juba viimased kümme aastat, siis oli siirdemeditsiiniline lähenemine (kardioloogia ja meditsiinilise biokeemia läbipõimimine) ka viimased

neli aastat meie kardiovaskulaar-meditstiini ühisuuringute vundament ja sisu. Ja veel, arvestades erinevate lugejatega, ei eksponeeri me nelja aasta jooksul avaldatud kõiki artikleid (need on detailsema huviga lugejal kergesti leitavad avalikest andmebaasidest), vaid selgitame, mis oli võimalik nelja aasta jooksul muuta/teha, et siirdemeditstiiniline mõtteviis ja tegutsemise vajadus hakkaks kinnistuma ka sellises ülitähtsas ja ühiskonnale väga kulukas valdkonnas, nagu seda on südame- ja veresoonkonnahaigused.

Kardiovaskulaarsete siirdemeditstiiniliste ühisuuringute eesmärgipäraseks teostamiseks oli kindlasti vaja tegelda vähemalt kahe asjaga. Esiteks, välja arendada ja efektiivselt töös hoida taristuline pool Seetõttu saigi südamekliiniku ja biokeemia instituudi koostöös Tartu Ülikooli Kliinikumis välja arendatud interdistsiplinaarne Endoteeliuuringute Keskus, mis on väga vajalik ka edukaks rahvusvaheliseks koostööks teiste juhtivate vaskulaar-uuringute teadusgruppidega (Cambridge, Cardiff, Uppsala jt ülikoolid). Teiseks, nüüdisaegse mentaalse infrastruktuuri kujundamine vaskulaar-uuringute siirdemeditstiiniliseks teostamiseks. Ilma selleta pole võimalik mis tahes planeeritu süsteemne elluviimine. Oleme uhked, et Endoteeliuuringute Keskusega seonduvalt ja siirdemeditstiinilisest ideoloogiast lähtudes on lühikese ajaga tekkinud väga võimekas noor kliinilise teadusega otseselt seotud meditsiinidoktorite plejaad, kes kõik töötavad igapäevaselt arstidena (dr Jaak Kals, dr Priit Kampus, dr Maksim Zagura, dr Martin Serg, dr Kaire Heilman, dr Mai Blöndal). Kuna dr J. Kals ja dr P. Kampus said juba ka doktoritööde juhendamise kogemuse, siis sai siirdemeditstiinilise tegevuse edasiarendamiseks loodud ülivajalik teadusjärjepidevus.

Millised on olnud meie olulisemad suunad, elluviidud teadus-praktilised ja integreeritud rakendused südame- ja veresoonkonna haiguste uuringute siirdemeditstiinilises lähenemisstrateegias? Need on üldistatult järgmised:

1. Veresoonte funktsionaalsuse teadusuuringute kompleksi rakendamine (hõlmab mitte-invasiivset uuringukompleksi: endoteeli düsfunktsionaalsus, väikeste arterite jäikuse uuringud, aordirõhu uuringud jt).
2. Veresoonteseina ehituse muutuste teadusuuringute kompleksi rakendamine (struktuuriuuringud: intima-media paksenemine, angiograafilised uuringud).
3. Veresoonte struktuur-funktsionaalsuse profileerimise rakendamine biokeemilis-kliiniliste markerite (kaasasime lisaks tavamarkeritele ka palju uudseid indikatiivseid põletiku, oksüdatiivse stressi, metaboolse sündroomi, kaltsiumi ainevahetuse jt markereid) abil.

Need lähenemised oma uudsuses ja just integreerituses võimaldasid saada palju kliiniliselt väärtuslikku ja täiesti uutset teadusinformatsiooni. Kõike seda detailselt esitleda ja kommenteerida läheks liiga pikaks. Alljärgnevalt siiski selgitame võimalikult lihtsustatult mõningaid eriti huvitavaid aspekte just saadud teadmiste ja nende rakenduste mitmekesisust silmas pidades.

Näiteks, maailmas on üheselt aktsepteeritud, et südame- ja veresoonkonna haiguste väga kõrge esinemise ja suure kulukuse puhul on üheks võtmemomendiks kujunemas nn subkliinilises (st olukorras, kus kliinilised nähud, kaebused veel puuduvad) faasis/etapis toimuvate muutuste täpne tuvastamisvõimalus. Seetõttu olemegi viimastel aastatel püüdnud selgitada aordi ja magistraalarterite teatud omadusi ja nendega seotud biokeemilisi näitajaid, et teha kindlaks, mis toimub nende veresoonte aterosklerootilise kahjustuse väga varastes etappides, st enne kui tavapärased kliinilised võtted annavad tunnistust ateroskleroosi ning sellest tuleneva organkahjustuse olemasolust.

Oleme saanud oma uuringutega juba esimesi väljundeid, loomaks rohkem võimalusi veresoonkonna kahjustuse võimalikult varajaseks diagnoosimiseks ning ka vastavate patoloogiliste protsesside edasise kulu võimalikult tõhusaks pärssimiseks erinevate võtetega. Nii oleme uuringutega näidanud, et düsfunktsionaalse endoteeli kaitsevõime nõrgeneb/kaob ja on seega aterogeneesi (müokardiinfarkti, insuldi, gangreeni jne) üheks patogeneetiliseks juhtfaktoriks. Teisisõnu: endoteeliprobleemid ja neid põhjustavad tegurid on määrava tähtsusega kardiovaskulaarhaiguste patogeneesis. Meie töödest selgub ka, et endoteeli düsfunktsionaalsus on märksa varasem sündmus kui veresoonte seintes aterosklerootiliste naastude kujunemine, lisaks viib endoteeli düsfunktsionaalsus aja jooksul arterite jäigenemisele. Arterite jäigenemine on aga võimas patodeterminant süstoolse vererõhu tõusule, südamelihase hüpertroofiale, veresoonte aneurüsmide ja nende ruptuuride tekkele ning seeläbi ateroskleroosi, hüpertooniatõve, ajuinsuldi ja müokardiinfarkti patogeneesiks. Eelnevale lisaks oleme oma uuringute käigus avastanud mitmeid uudseid seoseid uute biokeemiliste ja kliiniliste markerite ning veresoonte patogeneetiliste talitluslike ja/või struktuursete muutuste vahel, mis on loonud oluliselt parema võimaluse südame- ja veresoonkonna haiguste täpsemaks profileerimiseks kliinilises praktikas. Mõned näited uuringute mitmekülgsusest.

Leidsime esimestena, et veresoonte kaltsifikatsiooni inhibiitori osteoprotegeriini tase peegeldab väga hästi arterite jäikust perifeersete arterite haiguste korral. Tegime kindlaks, et südameoperatsioone iseloomustab tugev oksüdatiivse stressi/põletiku-vastus ning et just müeloperokside tase on väga hea marker selle vastuse sügavuse/kahjulikkuse hindamiseks. Uurimaks suhkurtõve kui väga tõsise kardiovaskulaarhaiguste riski leidsime, et juba lastel, kes põevad esimest tüüpi diabeeti on oluliselt kõrgem prooksidantse müeloperokside tase ja ICAM-1 ning adiponektiini tase, langenud homotsüsteiini tase ja uriinis kõrgem isoprostaanide tase ning tõestasime ka selle seotust ateroskleroosi-seoseliste veresoonte seinte struktuur-funktsionaalsete muutustega (endoteeli teatud düsfunktsionaalsus) ning luude madalama mineraaltihedusega. Seega näitasime esmakordselt, et noortel T1DM-ga lastel ilmnevad selged vaskulaarse talitluse-, põletiku- ja oksüdatiivse stres-

si-seoselised probleemid. Näitasime esmakordselt, et aordi jäikus ja anormaalne vitamiin D tase veres mõjutavad vaskulaarset kaltsifikatsiooni ja nad on ateroskleroosiliste haiguste sügavuse näitajad (väga oluline teaduslik-praktiline väljund, arvestades Eesti elanike väga kõrget haigestumist ja suremust südame-versoonkonna haigustesse ning suurt hulka vitamiin D-defitsiitseid inimesi Eesti populatsioonis).

Tõestasime esmakordselt, et perifeersete arterite haigustega patsientidel on beeta2-mikroglobuliin uudne marker arteriaalse jäikuse hindamiseks. Ühe väga huvitava väljundi andis järgmine siirdemeditsiiniline lähenemine. Nimelt proovisime metodoloogilises plaanis integreerida järgmist: arterite nii öelda tervise hindamiseks selgitada ühelt poolt mitteinvasiivsete võtetega (registreerides pulsilaine levikut erinevates arterites) uuringutes osalenud erinevas järgus erinevate veresoonekonna haigustega patsientide suurte arterite elastsust ning teisi mehhaanilisi omadusi ja määrata lisaks sellele samaaegselt veres nii juba tuntud kui ka uute võimalike ateroskleroosi markerite sisaldusi. Selgus asjaolu, et viimastel aastakümnetel juba klassikalisteks peetud ateroskleroosi riskitegurite hindamine ja biomarkerite (nt kolesterool ja lipoproteiinide erinevad fraktsioonid) sisalduse muutused ei peegelda haiguse riski ega kulgu täiel määral, mistõttu on haigusprotsessi adekvaatsemaks mõistmiseks vajalik täiendada seda kirjeldavate parameetrite arsenalit.

Meie uuringud on kinnitanud seda, et madala tihedusega lipoproteiinide (LDL) oksüdeeritud vormi (oxLDL) ja mitmete uudsete põletikumarkerite ja kaltsiumiainevahetuse markerite muutused veres seostuvad veresoonte ateroskleroosilise kahjustuse tekkega. Väga oluline on kliinilise praktika jaoks mõista, et teatud keeruka struktuuriga komplekside (nt LDL jt) puhul ei sisaldu nende kliinilise tähendusega informatsioon üksnes tema veres mõõdetud kontsentratsiooni näidus, vaid ka selle kompleksi biokvaliteedis. LDL kompleksi näitel ongi selgunud, et teatud juhtudel ei pruugi me analüüsis leida nende üldsisalduse suurenemist, kuid just samaaegne aine oksüdeeritud vormi osakaalu suurenemine viitab ometi ateroskleroosilise veresoonte kahjustuse olemasolule. Siinkohal oleks paslik rõhutada, et menetlused, mis võimaldaks patoloogilist oxLDL hulka langetada, on kliinilises praktikas kergesti rakendatavad. See aga ongi siirdemeditsiinilise lähenemise üks konkreetne näide, baasteaduse väljundite rakendumine kliinilisse praktikasse.

Siirdemeditsiiniline lähenemine võimaldas meie teadustegevuses saavutada ka väga olulise väljundi kõrgvererõhu ravimite seisukohalt. Üks näide. Uurisime beetablokaatorite nebivolooli ja metoprolooli antihüpertensiivset toimet võrdlevalt meie tööühikute käsutuses olevate väga erinevate uurimismeetodite ja markerite abil. Selle töö aktuaalsust tõstis veelgi asjaolu, et mõned aastad tagasi hakkas levima arusaam, et beetablokaatorid tuleks

välja arvata kõrgvererõhktõve esimese valiku ravimite seast. Meie uuringud näitasid, et mõlemad beetablokaatorid langetasid üheaastase jälgimisperiodi jooksul vereõhku õlavarrearteril ühtviisi, kuid nebivolool oli metoproloolist märksa tõhusam tsentraalse arteriaalse vererõhu (aordis südame lähistel) langetaja. Uuringuravimitel ilmnis ka erinev mõju meie poolt uuritud veresoonte elastsetele omadustele ja biokeemilistele markeritele, mis andis alust väga praktiliseks järelduseks, et nebivoloolil on metoprolooliga võrreldes väljendunud vaskulo- ja kardioprotektiivne toime. Heameel on märkida, et see töö on rahvusvaheliselt leidnud suurt tähelepanu ja pälvinud kolleegide tunnustuse, aga oleme saanud ka asjalikke ettepanekuid edasiseks taoliseks siirdemeditiiniliseks uurimistööks.

Kui mõelda meie töödele ja tegemistele, siis on tähtis ka asjaolu, et mitmed meie tööd tegelevad ateroskleroosi nn subkliiniliste fenomenidega, mis hetkel ei kajastu ega saagi veel kajastuda käibivates kliinilistes juhtnõudes. See aga ei vähenda sugugi nende väärtust, sest haiguse eelkliiniliste faasidega tegelemine loob pikemas perspektiivis võimalused haiguse ja normi piiri täpsemaks fikseerimiseks ning sellest tulenevalt ka tõhusamad ja odavamad võimalused haiguse ennetamiseks ja esmaste nähtude korrigeerimiseks. Selliste uuringute tulemused leiavad piisaval tõenduse kujunemisel ühel päeval tee ka ravijuhenditesse üldisemaks järgimiseks. Nii juhtus näiteks homotsüsteiiniga, mida meiegi mõned aastad tagasi uurisime, ja nüüdseks on see olulise markerina juba ravijuhendites.

KOKKUVÕTTEKS

Eelpool selgitasime võimalikult lühidalt ja lihtsalt, miks ja kuidas integreerimine võimaldab saada siirdemeditiinilise profileerimise tervikpildi veresoonte struktuur-funktsionaalsusest, st teaduspõhise informatsiooni veresoonte tegelikust seisundist. Viimane on aga võtmetähtsusega südameveresoonekonna haiguste sisuliseks preventsooniks, täppisdiagnostikaks ja ravitulemuse prognoosimiseks. Väljendame heameelt aga ka selles plaanis, et oleme oma Endoteeliuuringute Keskuse toel suutnud hoogustada mitmetes arstiteaduskonna ja mitmete haiglate teadusgruppides siirdemeditiinilist lähenemist meditsiinis. Sellel kõigel on lisaks teadusväljunditele ka kõige otsesem mõju lähitulevikus Eesti inimeste tervisele ja elukvaliteedile. Ja veel, kui väljendada hästi piltlikult, siis TÜ kardioloogia kliiniku ja TÜ biokeemia instituudi füüsilist kaugust teineteisest (umbes 350 meetrit) meie tegevus muuta ei suuda, küll on aga meie nelja aasta töö suutnud kaotada mentaalse distantssi. Soovime seda ka kõigile teistele!

*Teaduspreemia geo-ja bioteaduste alal
uurimuste tsükli "Immuunfunktsioon ja oksüdatiivne stress
loomaökoloogilises kontekstis" eest*



Peeter Hõrak

Sündinud 11.12.1963 Tartus

1982 Tartu 5. Keskkool

1989 Tartu Ülikool, bioloogia-zooloogia

1995 PhD, loomaökoloogia, Tartu Ülikool

1989–1999 Teaduste Akadeemia/Eesti Põllumajandusülikooli Zooloogia ja Botaanika Instituudi teadur, vanemteadur; 1998–2008 Tartu Ülikooli vanemteadur, alates 2008 loomade füsioloogilise ökoloogia professor, bioloogilise mitmekesisuse tippkeskuse (FIBER) juhatuse liige

1993 Turu Ülikool (Kone Foundation'i stipendiaat)

1996–1998 Uppsala Ülikool, külalisteadlane

2002 Eesti Vabariigi teaduspreemia geo- ja bioteaduste alal (kollektiivi liige)

Avaldanud 67 teaduspublikatsiooni

PROBLEEMI TAUST

Mis on ilu? Miks me haigeks jääme? Kuidas on need küsimused omavahel seotud? Ilu on vaataja silmades ja veelgi sügavamal tema kohastumustes. Isendi välimus ja käitumine kõnelevad potentsiaalsetele sigimispartneritele ja konkurentidele tema fenotüübilisest ja geneetilisest kvaliteedist. Välimus peab aitama vaatajal selgusele jõuda, kellega on mõttekas tülinorimist vältida ja kellega koostööd teha ning kelle geenidega koos on kõige kasulikum enda omi järgmistesse põlvkondadesse lähetada. Häid geene – st terveid vanemaid – on järglastel vaja ka selleks, et hakkama saada parasiitide ja patogeenidega, keda peetakse üheks olulisemaks biotiliseks evolutsiooniteguriks.

Haigeks jäädakse siis, kui immuunsüsteem ei suuda organismi ründavate parasiitidega adekvaatselt hakkama saada ja/või kahjustab parasiidivastase rünnaku käigus peremeesorganismi. Mis takistab immuunsüsteemi paremini toimimast? Ühest küljest on süüdi parasiidid, kes on peremeestest evolutsioonilises võidurelvastumises alati sammukese võrra ees. Teisest küljest põhjustab probleeme immuunsüsteemi regulatsioonimehhanismide keerukus ja hävitusemehhanismide ohtlikkus, mis muudab immuunsüsteemi kasutamise kulukaks. Kui organismi mingi funktsioon on kulukas, siis peab see paratamatult teiste funktsioonidega ühise ressursi pärast konkureerima. Nii saaks ka immuunvastusesse paigutatavat ressursi kasutada hoopis millekski muuks – näiteks välimuse kaunistamiseks, sigimiseks või eluea pikendamiseks. Siit jõuamegi parasitoloogiat, immunoloogiat ja ökoloogiat ühise katuse alla ühendava lõivuhete e *trade-off*'ide võrgustikuni.

Evolutsioonilised ökoloogid otsivad vastuseid küsimustele, miks kõik olen did ei siigi maksimaalse kiirusega, kuidas makstakse sigimise hinda, miks toimub vananemine ning kuidas on ilu ja tervis omavahel seotud. Seejuures käsitlevad nad organismi kui investorit, kelle käsutuses on mingi piiratud hulk ressursi, mida ta peab jaotama erinevate funktsioonide vahel niiviisi, et maksimeerida oma geenide edasikandumist järgmistesse põlvkondadesse. Selleks, et oma gene edukalt levitada, peavad organismid järgima optimaalseid ressursside jaotamise reegleid. Neid reegleid, ehk siis sellist olukorda, kus mingisse tähtsasse funktsiooni on võimalik ressursse paigutada ainult mingi teise tähtsa funktsiooni arvelt, nimetatakse lõivuheteks ehk *trade-off* ideks. Evolutsiooniliste ökoloogide eesmärgiks ongi aru saada kuidas on need lõivuhetted evolutsiooni käigus kujunenud ning kus, kuidas ja mis asjaoludel nad aset leiavad.

1990ndate teisel poolel hakkas loomaökoloogide hulgas kinnistuma arusaamine, et kuna immuunsüsteem on niivõrd keerukas ja muude organismi funktsioonidega väga tihedalt seotud, peab tema omamine ja kasutamine olema kulukas. Selle arusaamise põhjalt tekkinud teadussuund – immuunökoloogia – käsitleb organismi immuunfunktsiooni kui elukäiguomaduste ja signaalitunnustega integreeritud süsteemi, mis konkureerib ühise ressursi pärast muude organismi füsioloogiliste funktsioonidega. Küsimus, millised konkreetset mehhanismid tingivad immuunvastuse kulukuse, on paraku ökoloogide jaoks siiani jäänud suhteliselt segaseks. Üheks olulisemaks immuunvastuse hinda kujundavaks mehhanismiks peetakse immuunvastuse käigus vallanduvate vabade radikaalide ja muude reaktiivsete osakeste poolt tekitatud oksüdatiivset stressi (OS).

Organismid genereerivad ainevahetuse käigus reaktiivseid hapniku ja lämmastiku osakesi. Vähestes, reguleeritavates ja kontrollitavates kogustes on need osakesed elutegevuseks hädavajalikud, kuid nende ülemäärane ja kontrollimatu moodustumine – oksüdatiivne stress – võib elutähtsaid bio-

molekule kahjustada. Kestev sügav oksüdatiivne stress võib põhjustada või süvendada mitmesuguseid haigusi. Organismid kaitsevad ennast oksüdatsioonireaktsioonide kahjulike tagajärgede vastu toidust saadavate ja enda poolt sünteesitavate antioksidantide abil.

Arusaamine sellest, kuidas organismid antioksidantkaitset oksüdatiivse stressi leevendamiseks rakendavad, on oluline mitmete evolutsioonilise ökoloogia valdkondade jaoks. Kuna reaktiivsete osakeste produktsioon suureneb füüsilise koormuse kasvades, võiks sigimispingutusega kaasnev oksüdatiivne stress olla üheks sigimise hinna maksimise füsioloogiliseks mehhanismiks. Usutakse, et oksüdatiivsel stressil on võtmeroll mitmetes vanemiseiga seotud protsessides. Paljud loomade värvainemolekulid, sh iseäranis karotenoidsed pigmendid, on vähemalt *in vitro* antioksidantsete omadustega.

Vaatamata teema olulisusele on loomaökoloogide katsed hinnata OS ja antioksidantkaitse rolli selgroogsetel loomadel edenenuks visalt. Samuti on loomaökoloogide katsed demonstreerida immuunaktivatsiooniga kaasnevaid oksüdatiivseid kahjustusi andnud vastuolulisi tulemusi. Oluliseks arengupiduriks on olnud nii sobivate uurimismudelite ja -metoodikate nappus kui ka katsete disaini ning tulemuste tõlgendamiseiga seotud kontseptuaalsed probleemid. Sarnased tõlgendamisprobleemid kimbutavad ka lindude immuunökoloogia alast uurimistööd. Selles valdkonnas on põhiliseks takistuseks ökoloogiakeskne ettekujutus, nagu oleks immuunsüsteem ühtne, terviklik ning hõlpsasti kvantifitseeritav ning veendumus, et maksimaalse tugevuseiga immuunvastus uudsele antigeenile markeerib head tervist. Arusaam, et tugevam immuunvastus ei pruugi alati viia kohasuse maksimeerimisele ega peegeldada parasiidiresistentsust ning et immuunsüsteemi erinevate komponentide vahel võib eksisteerida negatiivne tagasiside, on immuunökoloogias alles kujunemas. Eeltoodu viitab, et immuunaktivatsiooni ning antioksidantsete kaitsemehhanismide indutseerimisega seonduvad biokeemilised ja füsioloogilised protsessid vajavad loomaökoloogilises kontekstis süvendatud uuringuid. Nimetatud valdkonnas valitseb iseäranis suur vajadus selguse järele järgmistes küsimustes: kuidas hinnata immuunpatoloogiat ja oksüdatiivseid kahjustusi; mis on antioksidantkaitse aktiveerumise põhjused ja tagajärjed ning mis on endogeensete ja eksogeensete antioksidantide (sh karotenoidide) suhteline tähtsus oksüdatiivsete kahjustuste vältimisel.

Aastatel 2009–2012 on Tartu Ülikooli ökoloogia ja maateaduste instituudi zooloogia osakonnas tegutsev ning siinkirjutaja poolt juhitud immuunökoloogia töörühm eeltoodud küsimustele vastuste leidmisesse panustanud 16 teadusartikliga. Neist kuus artiklit tegelevad metoodiliste probleemideiga, kus testisime leukogrammi ning erinevate oksüdatiivkahjustuste ning antioksidantkaitse markerite rakendatavust ja diagnostilist väärtust immuun-

ökoloogilises uurimistöös. Kaks artiklit tegelevad oksüdatiivse stressi ökoloogia uurimismetoodiliste probleemide ja nende potentsiaalsete lahendusviiside formuleerimisega. Ülejäänud artiklid on uurimuslikud ja keskenduvad konkreetsete immuunökoloogiliste hüpoteeside testimisele. Uurimisobjektidena kasutasime loomaökoloogias traditsioonilisi mudel-liike – rohevinte ja rasvatihaseid, kellel viisime läbi immuunfunktsiooni ja antioksidantkaitse võimendamise ja allasurumise katseid. Selleks testisime, kohaldasime ning valideerisime loomaökoloogilises uurimistöös uudseid biokeemilisi ja immunoloogilisi meetodikaid.

TULEMUSED

Enamik loomaökolooge saab oma uurimisobjektidena kasutada suhteliselt väikesi loomi, kellelt on kliinilisteks uuringuteks võimalik ohutult kätte saada suhteliselt väike kogus verd, maksimaalselt paarsada mikrollitrit. See tähendab, et kliinilised testid, mis on välja töötatud inimvere analüüsiks, tuleb kohaldada väikestele vere kogustele. Järgnevalt tuleb välja selgitada uuritavate markerite diagnostiline väärtus, st kuidas mõjutab neid loomade vangistuses pidamine, ööpäevarütm, immuunsüsteemi aktiveerimine jne. Oluline on teada ka selliste markerite püsivust ajas, st kas nende abil on võimalik iseloomustada mingeid pikemaajalisi isenditevahelisi erinevusi tervislikus seisundis või on tegu suhteliselt lühiaegsete konditsioonimuutuste indikaatoritega. Eelnimetatud artiklitest kaks (Sild, Hõrak, 2009, 2010), mis põhinevad tollase doktorandi Elin Silla tööel, kujutavadki endast uudsete meetodikate [lämmastikmonooksiidi produktsiooni ja fagotsüütide oksüdatiivse purske mõõtmine väikestest verekogustest] kohandamist ja valideerimist immuunökoloogiliseks uurimistööks.

Lämmastikmonooksiid (NO) on multifunktsionaalne signaalmolekul, mis toimib vasodilaatorina, neurotransmitterina ning moduleerib põletikuprotsesse. NO reaktsiooniprodukt – peroksünitrit – osaleb parasiitide ning nakatunud rakkude hävitamises ning on üks olulisemaid vabaradikaalsete ahelreaktsioonide käivitajaid. Näitasime, et plasma NO produktsioon on väikestest vereplasma kogustest hõlpsasti mõõdetav; et see on mõõdukalt individuaalselt stabiilne ning et immuunvastuse indutseerimine põhjustab olulise NO produktsiooni tõusu.

Teine töövahend, mille me kohaldasime ja lindudel valideerisime, on folaasiinil põhinev inimese leukotsüütide oksüdatiivse purske mõõtmise meetodika. Siin saime algse protokollil modifitseerimise tulemusena meetodi, mis erinevalt senikasutatutest (mis mõõdavad peamiselt fagotsüütide degranulatsiooni tagajärjel aeglaselt vabanevaid reaktiivseid ühendeid) võimaldab mõõta fagotsüütide rakuvälist oksüdatiivset purset, mis toimub esimeste sekundite jooksul pärast kokkupuudet stimulantiga. Nii, nagu ka NO produktsiooni puhul, pakkus oksüdatiivse purske mõõtmine meile huvi see-

pärast, et uskusime, et niiviisi võiksime saada meid huvitavat informatsiooni immuunvastusega kaasnevate oksüdatiivsete kahjustuste kohta. Leidsime, et meie meetod on lisaks lindudele kasutatav ka kaladel ja putukatel. Mõlemat meetodit on meie kolleegid praeguseks edukalt rakendanud erinevatel loomaliikidel.

Metodoloogilise suunitlusega töödes testiti vangistuses peetavate rohevintide ja rasvatihaste leukogrammi (Krams jt, 2012; Sepp jt, 2010), samuti erinevate oksüdatiivkahjustuste ning antioksidantkaitse (Kilgas jt, 2010; Sepp jt, 2012b) parameetrite rakendatavust ja diagnostilist väärtust immuunökoloogilises uurimistöös. Tähelepanuväärseks tulemusteks võib pidada avastust, et leukotsüütsete stressimarkerite alusel ei saa väita, nagu põhjustaks loodusest püütud rohevintide vangistuses pidamine olulist stressitaseme tõusu (Sepp jt, 2010). Nimetatud tulemus (koos hiljem saadud andmetega vangistuses ja looduses kasvanud sulgede kortikosteroonisaldusest) toetab metsikute lindude vangistuses pidamise sobivust ökofüsioloogiliste ning käitumisökoloogiliste probleemide uurimiseks.

Projekti käigus teadvustus vajadus esitada laiem ülevaade oksüdatiivse stressi ja antioksidantkaitse ökoloogiliste arengute hetkeseisust, mille tagajärjeks oli ajakirja *Functional Ecology* vastavateemalise erinumbri koostamine (*Ecology of Antioxidants and Oxidative Stress in Animals*, FE 2010, 24, 5, viis artiklit; koostajad Kevin McGraw, Peeter Hõrak, David Costantini & Alan Cohen). Nimetatud erinumbris sisalduvad kaks artiklit (McGraw jt, 2010; Hõrak, Cohen, 2010) keskenduvad oksüdatiivse stressi ökoloogia arengusuundade määratlemisele ning uurimismetoodiliste probleemide ja nende potentsiaalsete lahendusviiside formuleerimisele. Usutavasti on eelnimetatud artiklite näol tegu teadussuuna arengu seisukohalt teedrajavate ja kontseptuaalselt oluliste kirjutistega. Tahaks loota, et nimetatud artiklid aitavad vähendada mõningat naiivsust ja kergeusklikkust, mis iseloomustab paljusid loomaökolooge kliiniliste markerite kasutamisel ning tõlgendamisel.

Ülejäänud, uurimuslikud artiklid, keskenduvad konkreetsete immuunökoloogiliste hüpoteeside testimisele. Peamisteks avastusteks nimetatud valdkondades on, et immuunökoloogilises uurimistöös laialdaselt kasutatav fütohemaglutiniini (PHA) test võib põhjustada pikaajaseid muutusi tsirkuleerivate leukotsüütide kontsentratsioonis (Sarv, Hõrak, 2009) ja et immuunaktivatsiooni mõju kroonilise koktsidioosi ägedusele sõltub toidus sisalduvatest karotenoididest (Sepp jt, 2011). Samuti tuvastasime esmakordselt leptiini vanusest sõltuva mõju PHA-poolt indutseeritud kutaanse immuunvastuse tugevusele (Lõhmus jt, 2011) ning näitasime, et nii immuunsüsteemi aktiveerimine (PHA manustamise teel) kui allasurumine (glükokortikoidi manustamine) põhjustavad märkimisväärsed somaatilisi kulutusi, mis on mõõdetavad sulgede kasvu pärsinguna (Männiste, Hõrak,

2011). Kõige uudsem avastus immuunaktivatsiooni kulude ja tulude kvantifitseerimise valdkonnas on leid, et immuunvastus eksperimentaalsele koksidioosinakkusele põhjustab oksüdatiivseid kahjustusi (mis on detekteeritavad vereplasma markeri – maloondialdehüüdi – kontsentratsiooni alusel) ning et tugevamate oksüdatiivsete kahjustustega kaasneb efektiivsem nakkuse mahasurumine (Sepp jt, 2012a). Tegemist on esmakordse tõestusega, et immuunvastuse käigus produtseeritud reaktiivsetel osakestel on loomaökoloogilises mudelsüsteemis tõepoolest selgelt mõõdetav kasu ja hind.

Kolm artiklit on pühendatud lindude visuaalses signaliseerimises kasutatavate sulepigmentide – karotenoidide ja melaniini – funktsiooni uurimisele immuunökoloogilises ja oksüdatiivse stressi kontekstis. Karotenoidid, mis annavad paljudele taimedele ja loomadele kollase, oranži ja punase värvuse, on huvitavad selle poolest, et loomad neid ise ei sünteesi ja peavad neid saama toiduahela kaudu taimedest. Samas on lindude, kalade, roomajate ja kahepaiksete hulgas karotenoididel põhinev kehavärvus äärmiselt laialdaselt levinud. Seepärast usuvad loomaökoloogid, et karotenoidse sule- või nahavärvuse abil saavad loomad kuidagi reklaamida oma kvaliteeti.

Küsimus, mida konkreetselt karotenoidsete signaalidega ikkagi reklaamitakse, on seni jäänud loomaökoloogide jaoks mõistatuseks. Karotenoidid on (vähemalt *in vitro*) antioksidantsete omadustega ning seetõttu oli veel hiljuti levinud seisukoht, et karotenoidsed pigmendid võiksid olla kasutusel oksüdatiivse stressi talumise indikaatorina. Siiski on karotenoidide osatähtsust antioksidantidena (*in vivo*) ka vaidlustatud ning mitmes vastilmunud töös on väidetud, et täiskasvanud selgroogsetel on nende pigmentide tähtsus antioksidantkaitses minimaalne. Mõningates olukordades (kuigi mitte alati) võivad avalduda ka karotenoidide immuunomodulaatorseid omadused (Sild jt, 2011b; Sepp jt, 2011; Hõrak jt, 2010). Leukotsüütide oksüdatiivse purske mõõtmise meetodikat rakendasime karotenoidide antioksidantse funktsiooni testimiseks (Sild jt, 2011b; Sepp jt, 2011). Avastasime, et karotenoidide lisamine toidule ei mõjuta fagotsüütide oksüdatiivse purske parameetreid ega superoksiidi baastaset organismis. Näitasime, et karotenoidide lisamine toidule ei vähenda glutatiooni sünteesi pärssimise teel tekitatud oksüdatiivseid kahjustusi (Hõrak jt, 2010). Karotenoidide immuunomodulaatorse toime kohta saime vastuolulisi tulemusi (Sepp jt, 2011). Kokkuvõttes võib sedastada, et meil ei õnnestunud leida tõendeid karotenoidide antioksidatiivse funktsiooni kohta *in vivo*. Sarnasele järeldusele on jõutud teistegi uurimisgruppide samal ajal avaldatud töödes. Seega on karotenoidsete pigmentide üldlevinud kasutamine biokommunikatsioonis mitmetes loomarühmades praeguse seisuga endiselt veenva seletuseta.

Huvitavaid tulemusi saime teise loomariigis levinud pigmenti – eumelaniini – ja oksüdatiivsete kahjustuste seoste kohta. Eumelaniin annab sulge-

dele, karvadele ja nahale musta värvuse. Mida rohkem on koesse eumelaniini deponeeritud, seda tumedama tooniga on must. Biokommunikatsiooni seisukohast on tähelepanuväärne, et eumelaniini süntees pole võimalik, kui raku glutatiooni tase on kõrge. Glutatiooni peetakse kõige tähtsamaks rakusiseseks endogeenseks antioksidandiks. Glutatiooni sünteesi on võimalik inhibeerida loomadele butioniinsulfoksimiini manustades. Näitasime, et glutatiooni sünteesi pärssimine põhjustab oksüdatiivseid kahjustusi (mis on detekteeritavad vereplasma maloondialdehüüdi kontsentratsiooni muutuste alusel) ning samal ajal võimaldab deponeerida sulgedesse rohkem eumelaniini (mille tagajärjeks on tumedamad mustad suleosad) (Hõrak jt, 2010). Viimatinimetatud mehhanismi esmakordne demonstreerimine pakub uudset tõendusmaterjali ja mõtteainet signaaltunnuste evolutsiooni mehhanismide mõistmiseks.

Lisaks eeltoodutele valmis projekti raames artikkel, mis kirjeldab originaalset meetodikat käitumistunnuste (vangistustolerants ja spontaanne liikumisaktiivsus) kvantifitseerimiseks (Sild jt, 2011a). Meetod, mis võimaldab vangistustolerantsuse ja stressitaluvuse mõõtmist sulestikukahjustuste alusel, omab laialdast rakenduspotentsiaali käitumis- ja füsioloogilises ökoloogias prevaleerivates olukordades, kus uuritakse vangistuses peetavaid loodusest püütud linde. Nimetatud meetodi kasutuselevõtt võimaldas meil esmakordselt metsikul linnuliigil demonstreerida seoseid isiksuseomaduste ja immuunfunktsiooni erinevate komponentide vahel. Näitasime, et vangistus-stressile tundlikumate rohevintide võime produtseerida antikehi vastusena uudsele *Brucella abortus*'e antigeenile ning fagotsüütide oksüdatiivse purske võime on pärsitud. Sarnased seosed leidsime hiljem ka rasvatihastel, mis viitab meie poolt kasutuselevõetud meetodi laiematele rakendusvõimlustele erinevatel liikidel. Avastus, et stressitaluvuse, immuunfunktsiooni ja isiksuseomaduste seosed on metsikutel lindudel ootamatult kergesti detekteeritavad, kiirendab tõenäoliselt psühhoneuroimmunoloogilise uurimistöö siiret loomaökoloogilistesse mudelitesse ning lähendab seni suhteliselt isoleeritult tegutsenud isiksuseuurijate ning immuunökoloogide kogukondi. Seega võib ennustada vastavateemaliste publikatsioonide arvu suurenemist lähiaastatel.

Praeguse seisuga on projekti käigus aastatel 2009–2012 ilmunud artikleid ISI WoS'is viidatud üle 100 korra. Uurimistöö valmis ETF (grandid 6622 ja 7737), sihtfinantseerimisteema SF0180004s09 ja Bioloogilise Mitmekeisuse Tippkeskuse FIBIR toel. Tulemuste saavutamise eest võlgnen tänu oma võrratutele kolleegidele ja endistele ning praegustele kraadiõppuritele – Ulvi Karule, Lauri Saksale, Elin Sillale, Tuul Sepale, Marju Männistele ja Richard Meiternile ning Ursel Soometsale ja Kalle Kilgile TÜ Arstiteaduskonna biokeemia instituudist. Mati Martinson Sõrve Linnujaamast

oli asendamatuks abiks katseobjektide püüdmisel. Aitäh kõigile – teiega oli tore nii välitöödel, laboris kui ka puhkehetkedel.

KIRJANDUS

Hõrak, P., Cohen A. (2010). How to measure oxidative stress in an ecological context: methodological and statistical issues. *Funct. Ecol.*, 24, 960-970.

Hõrak, P., Sild, E., Soomets, U., Sepp, T., Kilk, K. (2010). Oxidative stress and information content of black and yellow plumage coloration: an experiment with greenfinches. *J. Exp. Biol.*, 213, 2225-2233.

Kilgas, P., Tilgar, V., Külavee, R., Saks, L., Hõrak, P., Mänd, R. (2010). Antioxidant protection, immune function and growth of nestling great tits *Parus major* in relation to within-brood hierarchy. *Comp. Biochem. Physiol. B*, 157, 288-293.

Krams, I., Vrublevska, J., Cirule, D., Kivleniece, I., Krama, T., Rantala, M. J., Sild, E., Hõrak, P. (2012). Heterophil/lymphocyte ratios predict the magnitude of humoral immune response to a novel antigen in great tits (*Parus major*). *Comp. Biochem. Physiol. A*, 161, 422-428.

Lõhmus, M., Sild, E., Hõrak, P., Björklund, M. (2011). Effects of chronic leptin administration on nitric oxide production and immune responsiveness of greenfinches. *Comp. Biochem. Physiol. A*, 158, 560-565.

McGraw, K. J., Cohen, A. A., Costantini, D., Hõrak, P. (2010). The ecological significance of antioxidants and oxidative stress: a marriage between mechanistic and functional perspectives. *Funct. Ecol.* 24, 947-949.

Männiste, M., Hõrak, P. (2011). Effects of immune activation and glucocorticoid administration on feather growth in greenfinches. *J. Exp. Zool. A*. 315, 527-535.

Sarv, T., Hõrak, P. (2009). Phytohaemagglutinin injection has a long-lasting effect on immune cells. *J. Avian Biol.*, 40, 569-571.

Sepp, T., Sild, E., Hõrak, P. (2010). Hematological condition indices in greenfinches: effects of captivity and diurnal variation. *Physiol. Biochem. Zool.*, 83, 276-282.

Sepp, T., Karu, U., Sild, E., Männiste, M., Hõrak, P. (2011). Effects of carotenoids, immune activation and immune suppression on the intensity of chronic coccidiosis in greenfinches. *Exp. Parasitol.*, 127, 651-657.

Sepp, T., Karu, U., Blount, J., Sild, E., Männiste, M., Hõrak, P. (2012a). Coccidian infection causes oxidative damage in greenfinches. *PLoS ONE* 7, e36495.

- Sepp, T., Sild, E., Blount, J., Männiste, M., Karu, U., Hõrak, P. (2012b). Individual consistency and covariation of measures of oxidative status in greenfinches. *Physiol. Biochem. Zool.*, 85,299-307.
- Sild, E., Hõrak, P. (2009). Nitric oxide production: an easily measurable condition index for vertebrates. *Behav. Ecol. Sociobiol.*, 63, 959-966.
- Sild, E., Hõrak, P. (2010). Assessment of oxidative burst in avian whole blood samples: validation and application of a chemiluminescence method based on Pholasin. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 64, 2065-2076.
- Sild, E., Sepp, T., Hõrak, P. (2011a). Behavioural trait covaries with immune responsiveness in a wild passerine. *Brain Behav. Immun.*, 25, 1349-1354.
- Sild, E., Sepp, T., Männiste, M., Hõrak, P. (2011b). Carotenoid intake does not affect immune-stimulated oxidative burst in greenfinches. *J. Exp. Biol.*, 214, 3467-3473.

*Teaduspreemia põllumajandusteaduste alal
uurimuste tsükli "Produksioon, süsiniku akumulatsioon ning
lämmastikuringe kiirekasvulistes lehtpuuistutes" eest*



Veiko Uri

Sündinud 19.12.1969 Tartus

1988 Tartu 14. Keskkool
1993 Eesti Maaülikool, metsamajandus
2001 PhD metsateadus, Eesti Maaülikool

Alates 1992 Eesti Maaülikooli laborant, vanemlaborant, nooremteadur,
assistent, lektor, dotsent

1993 Metsaameti preemia diplomitöö eest
1997 Riiklik preemia magistriritöö eest

Avaldanud üle 60 teaduspublikatsiooni

Viimastel kümnenditel toimunud muutused Eesti majanduses ja metsanduses on mõjutanud suundumusi ka meie metsateaduses. Paarkümmend aastat tagasi oli metsamajandus orienteeritud valdavalt okaspuumetsade kasvatamisele, varustamaks metsatööstust kvaliteetse saepalgiga. Lehtpuumetsade kasvatamine ja nende uurimine oli teisejärguline küsimus, lehtpuupuidul puudus suurem majanduslik väärtus. Muidugi pole klassikaline okaspuumetsade kasvatamine ka tänapäeva metsanduses oma tähtsust mīnētanud, kuid on lisandunud mitmeid uusi valdkondi ja suundi, kusjuures on suurenenud lehtpuupuistute metsakasvatuslik tähtsus. Ühelt poolt on metsad kaasajal oluliseks bioenergiaressursiks ja teisalt omistatakse metsale tänapäeval palju enam rolle, kui vaid pelgalt puidu tootmine. Metsad on olulised elurikkuse säilitamisel, keskkonnaseisundi tagamisel ja regionaalse süsinikubilansi tasakaalustamisel. Suurema tähelepanu pööramine viimasel kümnendil lehtpuupuistute uurimisele on põhjustatud nii nende järjest kasvavast osatähtsusest meie metsade koosseisus kui ka suurenenud lehtpuupuidu kasutamise intensiivsusest, seda eriti energiasektoris. Kuid samas peaks metsade jätkusuutlik ning looduslähedane majandamine põhinema adekvaatsetel teadusuuringutel ja nende põhjal antud soovitusel.

HALL-LEPIKUD

Puidu osakaal Eesti energiabilansis on viimastel aastatel järjest kasvanud ja vastavalt Eesti energiamajanduse arengukavale peaks taastuenergia osakaal 2020. a moodustama 25% kogu energia lõpptarbimisest. Mahuka metsaressursi olemasolu lubab eeldada jätkuvalt puitkütustest energia tootmise suurenemist. Kasvav energiapuidu kasutamine võib aga lähitulevikus tingida spetsiaalsete energiameetsade rajamise Eestis ja sellega seoses ka vajaduse saada uusi teadmisi nende majandamise ja kasvatamise kohta. Sellised lühikese raieringiga, kiirekasvulised lehtpuupuistud võimaldaks tulevikus katta üha suureneva puidulise biomassi vajaduse ja seeläbi vähendada ka koormust meie loodulikele metsadele. Tõenäoliselt pole hetkel küll väga asjakohane rääkida energiameetsade kasvatamisest, sest valitseb olukord, kus olemasolevates metsades on väga suur kogus seni kasutamata puiduressurssi. Nii kasvab Eestis hinnanguliselt ca 30 mln m³ hall-lepikuid, millest ümmarguselt 75% on raieküpsed või üleseisnud ja neid ei majandata (raiuta) (Aastaraamat Mets 2010, 2012). Seega on Eestis olemas suur kogus looduslikku puiduressurssi, mida võiks palju intensiivsemalt kasutada, aga seni pole seda tehtud. Kuid teadus, ja eriti metsateadus, peaks olema ajast ning praktika hetkevajadustest ees, tulevikku vaatav. Metsateaduses võib kuluda palju aastaid või isegi aastakümneid, et saada adekvaatseid teadustulemusi, praktikutel aga on üldreeglina vastuseid vaja üsna kohe. Ja olukorrad ning vajadused muutuvad kiiresti. Siinkohal võiks meenutada, et kui üheksakümnendate aastate lõpul ei tasunud metsaomanikul küttepuidu varumine madala hinna tõttu ära, siis tänapäeval on raiejätmete (raidmete) kokku kogumine ja intensiivne kasutamine kujunenud metsamajanduse praktika loomulikuks osaks.

Kui energiameetsade majandamine peaks Eestis kunagi päevakorda kerkima, siis kodumaine hall lepp võiks meie tingimustes olla selleks üks perspektiivsemaid puuliike. Ta on väga produktiivne, tal puuduvad olulised kahjurid ja haigused ning kasvades sümbioosis kiiribakteriga *Frankia*, parandavad lepikud mulla viljakust.

Eesti hall-lepikute keskmine aastane juurdekasv on suhteliselt tagasihoidlik (7,3 m³ ha⁻¹ a⁻¹), kuid see ei kajasta kindlasti selle puuliigi tegelikku kasvupotentsiaali. Eestis endisele põllumaale rajatud halli lepa puistus hinnati aastaseks jooksvaks tüvepuidu juurdekasvuks 36 m³ ha⁻¹ a⁻¹, (Uri jt, 2010), mida tuleb meie tingimustes lugeda väga kõrgeks. Võrdluseks, kõigi Eesti metsade keskmine aastane juurdekasv on ligikaudu 5,5 m³ ha⁻¹ a⁻¹. Loomulikult ei kasva kõik meie hall-lepikud nii jõudsalt, kuid eespool toodud tulemus demonstreerib hästi selle puuliigi potentsiaalset produktiivsust.

Teine oluline huvipakkuv küsimus hall-lepikute kasvatamise ja majandamise juures on nende sümbiontne lämmastiksidumisvõime. Kuna kõik lepa

perekonna esindajad kasvavad sümbioosis kiirbakteriga *Frankia*, siis see võimaldab neil siduda molekulaarset lämmastikku atmosfäärist. Kui palju üks või teine leplik aasta jooksul lämmastikku võiks siduda, on väga varieeruv suurus, sõltudes nii puistu vanusest, tihedusest kui ka mulla viljakusest. Maailmas avaldatud tulemuste põhjal võib see varieeruda paarist kilogrammist kuni $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Johnsrud, 1978; Bormann, Gordon, 1984; Lõhmus jt, 2002). Siinkohal on puistu vanus üks olulistest teguritest, mis lämmastiku sidumist mõjutab. Noored ja keskealised metsad kasvavad intensiivselt ja sel ajal on ka nende toitainete vajadus suur ning lämmastikku seotakse palju. Vanemate leplikute kasv on aga oluliselt tagasihoidlikum ning ka toitainete vajadus väiksem. Eestis on varasemates töödes hinnatud noore 14-aastase kaldaäärse hall-lepiku aastaseks sümbiontselt seotud lämmastikuvoo suuruseks $185 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, samas 40-aastases hall-lepikus vaid $28 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Mander jt, 2008; Lõhmus jt, 2002). Kuid ega ka looduses tasuta lõunaid ei eksisteeri, sümbiontne lämmastiku sidumine on leppade jaoks energeetiliselt üsna kulukas. Näiteks võib 1 g lämmastiku fikseerimiseks kuluda 18,8 g glükoosi (Bormann, Gordon, 1984). Seega, kui leplik seob aastas 100 kg ha^{-1} õhulämmastikku, kaotab ta seetõttu $1,9 \text{ t ha}^{-1}$ potentsiaalset kuivmassi toodangut. Kuid samas tagab lehtede kõrge lämmastikuisaldus efektiivse fotosünteesi ning see omakorda puistu kõrge produktiivsuse.

Jätksuutliku metsanduse puhul ei saa muidugi metsade majandamisel juhinduda üksnes metsa maksimaalsest puidutootlikkusest, arvestada tuleb ka võimalikke kaasnevaid keskkonnamõjusid. Kuna lepad on N_2 -te sümbiontselt siduvad puuliigid ja suutelised ökosüsteemi juurde tooma arvestatava koguse lisälämmastikku, võivad hall-leplikute intensiivse majandamisega kaasneda ka teatud keskkonnariskid, nagu lämmastiku leostumine või mõningate kasvuhoonegaaside (N_2O) intensiivsem emissioon. Ilma võimalikke keskkonnamõjusid hindamata ei saa kinnitada, et hall-leplikute kasvatamine bioenergia saamiseks on keskkonnasõbralik ja sel moel saadud energia tõesti 'roheline'.

Et selgitada erinevate lämmastikuvoogude ja -varude osatähtsust puistu lämmastikuringes ja sümbiontselt seotud lämmastikuvoogu, koostati endisel põllumaal kasvava hall-lepiku lämmastikubilanss. Kümne aasta vanuses hall-lepikus seoti sümbiontselt lämmastikku 150 kg ha^{-1} aastas, millest lehevarise kaudu jõudis mulda ligikaudu 100 kg ha^{-1} . Et lepa lehtedes enne varisemist lämmastiku sisaldus oluliselt ei vähene, siis on nende lehevaris väga lämmastikurikas. Piltlikult võiks öelda, et lepad käivad oma lehelämmastiku varudega üsna pillavalt ringi. Halli lepa lehed on keskmiselt lämmastikurikkamad kui meie teistel kodumaistel lehtpuuliikidel (Saarsalmi, 1995; Uri jt, 2003). Enamikule meie lehtpuudele on iseloomulik intensiivne lämmastiku sügisene retranslokatsioon, st enne lehtede langemist liigub

oluline osa toitainetest tagasi puu võrsetesse ja koorde, osaliselt ka juurtesse. Näiteks arukase roheliste lehtede lämmastiksisaldus võib ulatuda 3–3,5%-ni, aga varisenud kaselehtedes on see enamasti alla 1% (Uri jt, 2007a,b). Kuid hall-lepa lehevarise keskmine lämmastiksisaldus (3–3,5%) on ligikaudu sama, mis rohelistes lehtedes (Uri jt, 2002, 2011). Tänu madalale lämmastiku retranslokatsioonile halli lepa lehtedes jõuab lämmastik pärast lehevarise lagunemist mulda.

Kuigi kogu gaasiline lämmastiku emissioon endise põllumaa hall-lepikust oli märkimisväärne, ulatudes ligi 75 kg ha^{-1} , moodustas ohtlik kasvuhooe-gaas N_2O sellest väga väikese osa, vaid $0,5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Ka lämmastiku leostumine ei olnud suur, ulatudes kuni $15 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Uri jt, 2011). Samas suurenes uuritavas puistus kümne aasta jooksul lämmastiksisaldus sügavamates mullakihtides, mis viitab sellele, et ülemistest kihtidest leostunud lämmastik immobiliseerus seal ja ökosüsteemist välja ei liikunud (Uri jt, 2011). Nagu näitavad viimased uurimistulemused looduslikes hall-lepikutes, sõltub aastane lämmastiku leostumine suurel määral ka konkreetse aasta ilmastikust ning enamikul juhtudel jäi leostunud lämmastiku voog uuritud puistutes vahemikku $2\text{--}5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Pikk ja soe sügis soodustab lehevarise kiiret lagunemist ja mineraliseerumist. Vaba mineraalset lämmastikku aga taimede poolt enam ei omastata, sest nad on oma vegetatsiooni lõpetanud. Rohkete sademete korral kantakse väga liikuvad nitraadid sügavamatesse mulla kihtidesse.

Kui hinnata ligikaudu 15 aasta jooksul toimunud muutusi põllumaa hall-lepiku mullas, siis selle aja jooksul suurenes mulla lämmastiksisaldus ligikaudu 400 kg ha^{-1} ja mulla süsiniksisaldus ligikaudu 6 t ha^{-1} . Viimane viitab aga asjaolule, et hall-lepikud on olulised süsinikusidujad, neis ei toimu mitte ainult intensiivne süsiniku sidumine puude biomassi, vaid arvestatavas koguses talletub see ka mullas (Uri jt, 2011). Ka see tulemus räägib halli lepa kui perspektiivse energiametsa puuliigi kasuks. Läbiviidud uurimuse üheks oluliseks meetodiliseks väärtuseks on asjaolu, et kõik mõõtmised on tehtud ühes puistus, seda ligikaudu kahekümne aasta jooksul, ning saadud tulemused peegeldavad otseselt metsaökosüsteemi arenguga kaasnevaid muutusi.

ARUKAASIKUTE SÜSINIKUBILANSS

Siit edasi võiks jätkata metsade süsinikusidumise teemaga laiemalt. Et metsad süsinikku salvestavad on üldteada fakt. Ka Eesti metsad on üldplaanis süsiniku salvestajad, kuid kuna meie metsad ja metsamullad on väga mitmekesised ja mosaiiksed, siis seovad nad süsinikku erinevalt. Peamine küsimus on seotava süsiniku kogustes ja sidumise dünaamikas, need võivad metsades olla vägagi erinevad, sõltudes paljudest teguritest, sh metsa liigilisest koosseisust, vanusest, kasvukoha viljakusest jne. Isegi alusmets ja

põõsarinne võivad metsa süsinikubilanssi mõjutada. Näiteks väliskirjanduses avaldatud töös oli rohelise lepa (*Alnus crispa*) alusmetsaga männikus (*Pinus banksiana*) süsiniku sisaldus mullas oluliselt suurem, kui alusmetsa männikus (Vogel, Gower, 1998). Kui analüüsida metsade aastast süsinikubilanssi, st kui palju puud salvestavad süsinikku oma biomassi ja kui palju eraldub seda mullahingamisega, siis jääb bilanss enamasti positiivseks, st metsad seovad aasta jooksul rohkem süsinikku kui emiteerivad. Vaid vähestel juhtudel võib see olla vastupidi. Näiteks raiesmikel ja väga noortes metsades, kus puid pole või on nad veel väga väikesed ja aastane puidu juurdekasv seetõttu tagasihoidlik, võib mullahingamisest eralduv süsinik ületada sidumist. See, kui kiiresti mets pärast raiet taas süsinikku siduma hakkab, sõltub paljudest asjaoludest, kuid raiesmik võib olla süsiniku allikaks veel kakskümmend aastat pärast lageraiet (Taylor jt, 2008). Ka kui-vendatud metsades võib süsiniku emissioon olla suurem sidumisest, aga see on märksa laiem ja suhteliselt väheuuritud küsimuste ring, mis vajab edaspidi meie metsateaduses põhjalikumat uurimist.

Teine oluline aspekt on metsa erinevate komponentide roll süsiniku sidumisel, ehk kuhu metsa poolt seotud süsinik rohkem akumulatsioon, kas puude biomassi või mulda? Paljud uurijad on seisukohal, et boreaalses ja hemiboreaalses kliimavöötmes salvestub puistu arengu vältel süsinikku mulda rohkem (Gower, 2003; Houghton, 2005). Kuid Eestis viljaka kasvukohtade arukaasikutes talletati enam süsinikku just puude biomassis (Uri jt, 2012). Seevastu madala viljakusega kasvukohtades või liigniisketel aladel, kus orgaanilise aine lagunemine on pidurdatud, talletub suur osa seotud süsinikust metsakõdus ja mulla süsinikuvaru aja jooksul kasvab. Viljakates lehtpuumetsades on aineriinge intensiivne ja suur osa mulda jõudnud orgaanilisest ainest (varisest) laguneb kiiresti. Lagunemise tulemusena eralduv CO₂ (mullahingamine) ja sellega ka suur osa mulda jõudnud süsinikust läheb tagasi atmosfääri ning mulla süsinikuvaru jääb kokkuvõttes stabiilseks. Teine oluline süsiniku dünaamikat mõjutav faktor on muidugi metsa kasvukiirus. Eestis on arukaasikute kohta koostanud väga põhjalikud kasvukäigutabelid prof. O. Henno. Neis on muu hulgas esitatud ka puistute prognoositav jooksev aastane juurdekasv (Henno, 1980). Nende kasvukäigutabelite juures on märkimisväärne veel see, et nad on koostatud erinevate kasvukohtatüüpide jaoks. Uuritud arukaasikud osutusid produktiivsemateks, kui seda kajastavad senised O. Henno kasvukäigutabelid (Uri jt, 2012). See, et meie metsad tervikuna on viimastel kümnenditel hakanud kiiremini kasvama, on kinnitust leidnud ka varem (Nilson jt, 1999) ja seda seletatakse vähemalt osaliselt suurenenud CO₂ kontsentratsiooniga atmosfääris. Kui ligi pool sajandit tagasi hinnati Eesti kaasikute keskmiseks aastaseks juurdekasvuks 2,7 m³ ha⁻¹ a⁻¹, (Valk, Eilart, 1974), siis praegu on see hinnanguliselt 4,9 m³ ha⁻¹ a⁻¹ (Aastaraamat Mets 2010, 2012).

Arukaasikute süsinikusidumise dünaamika hindamiseks kasutati aegridade meetodit, kus sama kasvukohatüübi piires valiti välja erinevas vanuses (5–60 aastat) katsealad. Eeldades, et kasvutingimused on sarnased, peegeldab süsiniku varu nende puistute mullas või biomassis süsiniku sidumise dünaamikat metsa arengu vältel. Muidugi on sellel meetodil omad puudused, neist kõige olulisem ehk see, et täiesti ühesuguste kasvutingimustega alasid leida pole võimalik, saab valida vaid võimalikult sarnaseid alasid. Samas pole sellele meetodile ka alternatiivi, hindamaks suhteliselt lühikese aja jooksul protsesse, mis looduses toimuvad aastakümnete vältel.

Kui noortes arukaasikutes moodustas kogu ökosüsteemi süsinikuvarust lõviosa (ca 80%) mullasüsinik, sest puude biomass oli väike ja neis seotud C kogus tagasihoidlik, siis vanemates puistutes puude biomassis seotud süsiniku suhteline osakaal suurenes. Et süsiniku sisaldus puitunud biomassis on stabiilne suurus, siis biomassi suurenemisega kaasneb süsinikuvaru suurenemine. Kuid nagu näitavad viimased teadustulemused, võib C sisaldus puudes varieeruda siiski üsna suurel määral, jäädes vahemiku 44–56% (Zhang jt, 2009, Bert, Danjon 2006; Laiho, Laine 1997). Kuigi ka arukase erinevates fraktsioonides ja erivanuselistes puudes oli keskmine süsiniku sisaldus varieeruv, kujunes kaalutud keskmiseks süsinikusisalduseks ikkagi 50% (Uri jt, 2012).

Mulla süsinikuvaru arukaasikute aegreas usaldusväärselt ei muutunud, st keskealiste ja vanemate arukaasikute mullasüsiniku varu oli sama suur nagu noortes arukaasikutes. Kuna metsade vanemaks saades puidu tagavara ja selles talletunud süsiniku varu suureneb, siis alates 30–35 aasta vanusest oli süsiniku varu osakaal puudes suurem kui mullas.

Siinkohal tekib küsimus, et miks vaatamata pidevale süsiniku lisandumisele mulda metsa kasvu vältel süsiniku varu mullas ei kasvanud? Jõuab ju igal aastal mulla pinnale märkimisväärne kogus varist, millest enamiku moodustavad lehed. Keskealises (30 a) kaasikus oli aastane lehevarise voog ligikaudu 3 t ha^{-1} ja selles süsinikku $1,5 \text{ t ha}^{-1}$. Kui kogu lehevarisest pärinev süsinik jääks mulda, siis peaks järgneva 30 aasta jooksul mulla süsinikuvaru kasvama ligikaudu 45 t hektari kohta.

Kuid lisaks maapealsele varisele lisandub igal aastal mulda orgaanilist ainet veel ka nn juurevarise näol, mis moodustub tänu peente juurte pidevale uuenemisele ja suremisele. Peenteks juurteks loetakse üldjuhul neid juuri, mille diameeter jääb alla 2 mm. Need on juured, mis tagavad puude varustamise vee ja toitainetega. Peente juurte eluiga puuliikide ja kasvukohtade lõikes võib olla küllaltki varieeruv, kuid üldiselt on nad lühiealised (Gaudinski jt, 2000; Eissenstat, Yanai, 2002). Puude peente juurte biomass on väga dünaamiline biomassi fraktsioon, neid moodustub juurde ja ka sureb pidevalt. Arukase peente juurte eluiga võib olla ca 0,5–2 aastat, aga sageli kasutatakse mudelites üldistatud hinnangute andmiseks eluea pikkust 1 aas-

ta. Viljaka kasvukoha keskealises arukaasikus oli peenjuurte biomass $2,4 \text{ t ha}^{-1}$ (Varik jt, 2013) ja eeldades, et keskmine peenjuurte eluiga on üks aasta, produtseeritakse igal aastal metsas juurde $2,4 \text{ t ha}^{-1}$ peenjuuri ning sama kogus peenjuuri ka sureb ja läheb mulla orgaanilise aine koostisesse. Seega võib mullasisese juurevarise näol igal aastal mulda lisanduda sama suurusjärgu süsinikku, mis maapealse varisega. Mõningate allikate järgi (Jackson jt, 1997) võib isegi kuni 33% maismaa ökosüsteemide globaalsest aastast netoproduktioonist kuluda peente juurte produktiooniks. See, et 30-aastase ja 60-aastase arukaasiku mullasüsiniku varud ei erine oluliselt, on tingitud orgaanilise aine kiirest lagunemisest viljakal mullal ja sellest tulenevast intensiivsest mullahingamisest (CO_2 emissioon). Orgaanilise aine lagunemisest tulenev mullahingamise voog (ilma juurte hingamiseta) kõnealusest puistust oli suurusjärgus 4 t C ha^{-1} . Seega emiteerub igal aastal metsamullast ligikaudu sama kogus süsinikku, mis sinna jõuab lehe- ning juurevarise näol, ning viljakal kasvukohal mulla süsinikusisaldus ei suurene, vaid jääb stabiilseks. Varise kiiret lagunemist soodustab ka varisenud kaselehtede kitsas C:N suhe (Uri jt, 2007a, 2012).

Erinevates metsaökosüsteemides tehtud süsinikuringe uuringud on aluseks üldisemate, regionaalsete süsiniku bilansimudelite koostamisel. Kuigi arvukaid uuringuid on läbi viidud erinevates regioonides, sh ka Eestis, pole paljude puuliikide või kasvukohtade süsinikusidumisvõime kohta andmeid ikkagi piisavalt. Saadud tulemused omavad ka laiemat rakenduslikku tähtsust, kuna Eestil on rahvusvahelised kohustused raporteerida oma metsade süsinikubilansist mitmete erinevate programmide raames. Samas empiiriline andmestik erinevate metsade süsiniku varudest ja voogudest on siiani puudulik. Saadud tulemustele toetudes on võimalik teha üldistusi Eesti arukaasikutes seotud aastase süsiniku koguse kohta, seal-hulgas mullas seotud süsiniku kohta, aidates kaasa ka adekvaatsete raportite koostamisele ja riigi rahvusvaheliste kohustuste täitmisele.

ENDISE PÖLLUMAA KAASIKUD

Alates üheksakümnendate teisest poolest jäi Eestis kasutusest välja hinnanguliselt 200–300 000 ha põllumajanduslikke maid (Astover jt, 2006), mis tõi endaga kaasa spontaanse põllumaade metsastumise kiirekasvuliste pioneerpuuliikidega (kased, lepad, pajud). Ka soovisid toona paljud maaomanikud oma põllumaid kunstlikult metsastada. Nendes tingimustes muutus põllumaade metsastamise ning põllumaal kasvavate metsade uurimise teema Eesti metsateaduses aktuaalseks. Seetõttu on endistel põllumaadel kasvavaid lehtpuupuistusi eelneva kümnendi jooksul üsna intensiivselt uuritud (Uri jt, 2007a,b, 2008, 2009, 2011; Kund jt, 2010; Tullus jt, 2007, 2009; Vares, 2003, 2005 jne.) ja kuigi põllumaade metsastamise teema on oma aktuaalsust kaotamas, jätkub selliste puistute edasise arengu uurimine.

Põllu asendumine metsa ökosüsteemiga toob endaga kaasa mitmeid muutusi, sh muutusi aineringetes, mõjutades mulla süsiniku, lämmastiku ja orgaanilise aine sisaldust ning mikrobioloogilist aktiivsust. Kuid teadmised nende protsesside mõjudest on endiselt üsna tagasihoidlikud.

Arukask on Eestis kindlasti üks vitaalsemaid ja majanduslikult väärtuslikumaid pionierpuuliike, kes asustab edukalt mahajäetud põllumaid. Paljudel juhtudel on arukask parim puuliik kasutusest välja jäänud põllumaade metsastamiseks, sest ta on kiirekasvuline ja produktiivne, temaga uuendamine on lihtne, ka puuduvad tal olulised kahjurid ning haigused. Ning kõikidest lehtpuuliikidest on just kasepuidu majanduslik väärtus viimastel kümnenditel kõige enam tõusnud. Kui enne taasiseseisvumist kasutati kase puitu meie metsatööstuses vähesel määral, siis praegu on kasepuit hinnatud tooraine paberi- ja tselluloositööstuses, sae-, mööbli-, vineeritööstuses jne. Kvaliteetne kase spoonipakk on ligikaudu kaks korda kallim, kui kvaliteetne männi või kuuse saepalk. Kui siia juurde lisada arukaasikute peaaegu poole lühem raiering okaspuudega võrreldes, saamegi ühe perspektiivsema ja rentaabliima puuliigi endistel põllumaadadel kasvatamiseks.

Samas võib noorte põllumaakaasikute biomass ning produktsioon olla suurtes piirides varieeruv, sõltudes eelkõige kasvukoha mullaomadustest ning puistu tihedusest (Uri jt, 2007a,b; Kund jt, 2010; Vares jt, 2003; Vares, 2005). Näiteks jäi kaheksa-aastaste arukase noorendike tüvemass vahemiku 4–16 t ha⁻¹. Sellises vanuses kasenoorendikele on väga omane ka puude kiire diferentseerumine ja intensiivne puistu iseharvenemine, samuti on keskmine kõrguse juurdekasv märkimisväärne, ligikaudu 1 m aastas. Sellised viljakatel muldadel kasvavad noored arukase puistud võivad juurdekasvu osas ületada oluliselt seniste kase kasvukäigutabelite vastavaid väärtusi, see aga näitab nende metsade kõrget kasvupotentsiaali viljakatel muldadel. Viieteistkümnenaastase põllumaa arukaasiku tagavaraks hinnati 118 m³ ha⁻¹, jooksev aastane juurdekasv oli 15 m³ ha⁻¹ ja keskmine aastane juurdekasv 8 m³ ha⁻¹. O. Henno (1980) koostatud arukaasikute kasvukäigutabelites (jänesekapsa kasvukohatüüp) on prognoositud juurdekasvud 15-aastasest arukaasikus aga oluliselt madalamad, vastavalt 5,2 ja 3,8 m³ ha⁻¹ ning tagavara 57 m³ ha⁻¹. Sellised puistud on üsna tundlikud ka ilmastiku suhtes konkreetsetel vegetatsiooniperioodil, reageerides jooksva aasta ebasoodsatele kasvutingimustele juurdekasvu märgatava langusega. Siin tuleb rõhutada, et tulenevalt kasvukohatingimuste erinevusest on puistute tootlikkus varieeruv, kuid saadud tulemused iseloomustavad hästi arukase kõrget potentsiaalset produktsioonivõimet.

Endise põllumaa arukaasikute kõrge produktiivsus tagatakse intensiivse lämmastiku netomineralisatsiooniga, mis võib olla kuni 156 kg N ha⁻¹ a⁻¹ (Uri jt, 2008), aga ka efektiivse toitainete kasutamisega, sealhulgas suure lämmastiku retranslokatsiooniga (57,0 kg N ha⁻¹ a⁻¹). Põllumaale tekkinud

puistu mõjutab kiiresti ja suurel määral erinevaid mullas toimuvaid protsesse. Märkimisväärne mõju lämmastikuringele avaldus juba 8-aastases kaasikus, kus netomineralisatsiooni aastane intensiivsus mullas oli 1,5 korda kõrgem, kui kõrval asuval metsastumata rohumaal.

KOKKUVÕTTEKS

Eesti on metsarikas maa, peame end ju ka metsariigiks ja metsarahvaks. Mets ilma inimeseta saab suurepäraselt hakkama ja kui inimtegevus peaks lakkama, kattuks kogu maa üsna ruttu metsaga. Seda on Eestis ilme-kalt olnud näha viimase poolsajandi vältel, kui metsasuse oluline suurene-mine toimus peamiselt kasutusest välja jäänud põllumajanduslike maade arvelt. Aga inimene ilma metsata küll hakkama ei saa, vajame oma eluks seda, mida mets meile pakub – ehitusmaterjali ja kütet, samuti on metsal väga oluline keskkonda kaitsev ja kujundav roll. Kui metsi majandada säästlikult ja jätkusuutlikult, siis ei rikuta ka tasakaalu metsa ja inimese vahelistes suhetes. Arukas ja jätkusuutlik metsade majandamine peaks aga põhinema vastavatel teadusuuringutel. Loodetavasti täiendavad tehtud uurimistöö tulemused seniseid teadmisi kiirekasvuliste lehtpuumetsade arengust ja sellega kaasaskäivatest protsessidest ning uued teadmised leiavad rakendamist Eesti metsanduses.

KIRJANDUS

- Aastaraamat Mets 2010. (2012). Keskkonnateabe Keskus, Tartu, 226 lk.
- Astover, A., Roostalu, H., Lauringson, E., Lemetti, I., Selge, A., Talgre, L., Vasiliev, N., Mõtte, M., Tõrra, T., Penu, P. (2006). Changes in agricultural land use and in plant nutrient balances of arable soils in Estonia. Arch. Agron. Soil Sci., 52, 223-231.
- Bert, D., Danjon, F. (2006). Carbon concentration variations in the root, stem and crown of mature Pinus pinaster. Forest Ecol. Manag., 222, 279-295.
- Bormann, B. T., Gordon, J. C. (1984). Stand density effects in young red alder plantations: productivity, photosynthate partitioning and nitrogen fixation. Ecology, 2, 394-402.
- Eissenstat, D. M., Yanai, R. D. (2002). Root life span, efficiency, and turnover. Waisel, Y., Eshel, A., Kafkafi, U. (eds.). Plant Roots: The Hidden Half. 3rd edition. Marcel Dekker, New York, 221-238.
- Gaudinski, J. B., Trumbore, S. E., Davidson, E. A., Zheng, S. (2000). Soil carbon cycling in a temperate forest: radiocarbon-based estimates of residence times, sequestration rates and partitioning of fluxes. Biochemistry, 51, 33-69.

- Gower, S. T. (2003). Patterns and mechanisms of the forest carbon cycle. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 28, 169-204.
- Henno, O. (1980). Arukaasikute kasvukäik põhilistes kasvukohatüüpides. EPA teaduslike tööde kogumik 128. Tartu, 80-89.
- Houghton, R. A. (2005). Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biol.*, 11, 945-958.
- Jackson, R. B., Mooney, H. A., Schulze, E. D. (1997). A global budget of fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *PNAS*, 94, 7362-7366.
- Johnsrud, S. C. (1978). Nitrogen fixation by root nodules of *Alnus incana* in Norwegian forest ecosystem. *Oikos*, 30, 475-479.
- Kund, M., Vares, A., Sims, A., Tullus, H., Uri, V. (2010). Early growth and development of silver birch (*Betula pendula* Roth.) plantations on abandoned agricultural land. *Eur. J. Forest Res.*, 129, 679-688.
- Laiho, R., Laine, J. (1997). Tree stand biomass and carbon content in an age sequence of drained pine mires in southern Finland. *Forest Ecol. Manag.*, 93, 161-169.
- Lõhmus, K., Kuusemets, V., Ivask, M., Teiter, S., Augustin, J., Mander, Ü. (2002). Budgets of nitrogen fluxes in riparian grey alder forests. *Arch. Hydrobiol.*, 13, 3-4, 321-332.
- Mander, Ü., Lõhmus, K., Teiter, S., Uri, V., Augustin, J. (2008). Gaseous nitrogen and carbon fluxes in riparian alder stands. *Boreal Environ. Res.*, 13, 231-241.
- Nilson, A., Kiviste, A., Korjus, H., Mihkelson, S., Etverk, I., Oja, T. (1999). Impact of recent and future climate change on Estonian forestry and adaptation tools. *Clim. Res.*, 12, 205-214.
- Saarsalmi, A. (1995). Nutrition of deciduous tree species grown in short rotation stands. Dissertation, University of Joensuu, Finland.
- Taylor, A. R., Wang, J. R., Kurz, W. A. (2008). Effects of harvesting intensity on carbon stocks in eastern Canadian red spruce (*Picea rubens*) forests: An exploratory analysis using the CBM-CFS3 simulation model. *Forest Ecol. Manag.*, 255, 10, 3632-3641.
- Tullus, A., Tullus, H., Vares, A., Kanal, A. (2007). Early growth of hybrid aspen (*Populus x wettsteinii* Hämet-Ahti) plantations on former agricultural lands in Estonia. *Forest Ecol. Manag.*, 245, 118-129.
- Tullus, A., Tullus, H., Soo, T., Pärn, L. (2009). Above-ground biomass characteristics of young hybrid aspen (*Populus tremula* L. x *P. tremuloides*

- Michx.) plantations on former agricultural land in Estonia. *Biomass & Bioenergy*, 33, 1617-1625.
- Uri, V., Tullus, H., Lõhmus, K. (2002). Biomass production and nutrient accumulation in short-rotation grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) plantation on abandoned agricultural land. *Forest Ecol. Manag.*, 161, 1-3, 169-179.
- Uri, V., Lõhmus, K., Tullus, H. (2003). Nutrient allocation, accumulation and above-ground biomass in grey alder and hybrid alder plantations. *Silva Fenn.*, 37, 3, 301-311.
- Uri, V., Vares, A., Tullus, H., Kanal, A. (2007a). Above-ground biomass production and nutrient accumulation in young stands of silver birch on abandoned agricultural land. *Biomass & Bioenergy*, 31, 4, 195-204.
- Uri, V., Lõhmus, K., Ostonen, I., Tullus, H., Lastik, R., Vildo, M. (2007b). Biomass production, foliar and root characteristics and nutrient accumulation in young silver birch (*Betula pendula* Roth.) stand growing on abandoned agricultural land. *Eur. J. Forest Res.*, 126, 4, 495-506.
- Uri, V., Lõhmus, K., Kund, M., Tullus, H. (2008). The effect of land use on net nitrogen mineralization on abandoned agricultural land: silver birch stand *versus* grassland. *Forest Ecol. Manag.*, 255, 226-233.
- Uri, V., Lõhmus, K., Kiviste, A., Aosaar, J. (2009). The dynamics of biomass production in relation to foliar and root traits in a grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) plantation on abandoned agricultural land. *Forestry*, 82, 61-74.
- Uri, V., Aosaar, J., Varik, M., Kund, M. (2010). Mõningate lehtpuupuistute kasv ja produktioonivõime endisel põllumaal. *Metsanduslikud Uurimused*, 52, 18-29.
- Uri, V., Lõhmus, K., Mander, Ü., Ostonen, I., Aosaar, J., Maddisson, M., Helmisaari, H.-S. Augustin, J. (2011). Long-term effects on nitrogen budget of a short-rotation grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) forest in abandoned agricultural land. *Ecol. Eng.*, 37, 920-930.
- Uri, V., Varik, M., Aosaar, J., Kanal, A., Kukumägi, M., Lõhmus, K. (2012). Biomass production and carbon sequestration in a fertile silver birch forest chronosequence. *Forest Ecol. Manag.*, 267, 112-126.
- Valk, U., Eilart, J. (1974). *Eesti metsad*. Tallinn, 304 lk.
- Vares, A. (2005). The growth and development of young deciduous stands in different site conditions. (Noorte lehtpuistute kasv ja areng erinevates kasvukohatingimustes). PhD Thesis. Tartu. 157 p.

- Vares, A., Uri, V., Tullus, H., Kanal, A. (2003). Height growth of four fast-growing deciduous tree species on former agricultural lands in Estonia. *Baltic Forestry*, 9, 1, 2-8.
- Varik, M., Aosaar, J., Ostonen, I., Lõhmus, K., Uri, V. (2013). Carbon and nitrogen accumulation in belowground tree biomass in a chronosequence of silver birch stands. *Forest Ecol. Manag.*, (ilmumas).
- Vogel, J. G., Gower, S. T. (1998). Carbon and nitrogen dynamics of boreal jack pine stands with and without of green alder understory. *Ecosystems*, 1, 386-400.
- Zhang Q., Wang, C., Wang, X., Quan, X. (2009). Carbon concentration variability of 10 Chinese temperate tree species. *Forest Ecol. Manag.*, 258, 5, 722-727.

*Teaduspreemia sotsiaalteaduste alal uurimuste tsükli
“Innovatsiooni- ja majanduspoliitika areng ja juhtimine Kesk- ja
Ida-Euroopa riikides 2000ndatel aastatel” eest*



Rainer Kattel

Sündinud 20.03.1974 Tartus

1992 Ülenurme Keskkool
1996 Tartu Ülikool, poliitiline filosoofia
1998 MA, klassikaline filoloogia, Tartu Ülikool
2001 PhD, avalik haldus ja sotsiaalpoliitika, Tartu Ülikool
1995–1996, 1998–2002 DAAD stipendiaat Marburgi Ülikoolis
2012 Rio de Janeiro föderaalülikool, külalisprofessor
1998–2002 Tartu Ülikooli korraline teadur, erakorraline vanemteadur
2002–2005 Poliitikauuringute Keskuse PRAXIS vanemanalüütik
Alates 2002 Tallinna Tehnikaülikooli professor, alates 2004 TTÜ Ragnar Nurkse innovatsiooni ja valitsemise instituudi direktor
Arengu ja strateegiate multidistsiplinaarse instituudi MINDS (Rio de Janeiro) juhatuse liige
Norra Teadusnõukogu programmi “Europe in Transition” juhatuse liige
Eesti Teaduspoliitika Nõukogu, Teadus- ja Arendusnõukogu ning Teadusnõukogu hindamiskomisjoni liige
Euroopa Komisjoni avaliku sektori innovatsiooni alase ekspertkomisjoni liige
Avaldanud üle saja teaduspublikatsiooni, juhendanud 3 doktori- ja 14 magistriväitekirja

EESTI MAJANDUS- JA INNOVATSIOONIPOLIITIKA 2000NDATEL¹

Piltlikult võib öelda, et Eesti majandus ja majanduspoliitika maitses 2000ndatel aastatel 1990ndatel aastatel külvatud vilju, makstes samal ajaperioodil ka tegemata jäetud tegude eest lõivu. Majanduspoliitika ja selle institutsioonide mõttes jätkus 2000ndatel aastatel sisuliselt juba 1980ndate aastate lõpus väljakujunenud neoliberaalse makromajanduslikule stabiilsusele orienteeritud režiimi toimimine. Peamiseks muutuseks kujunes Euroopa Liidu (EL) kasvav, kuid samas varjatud mõju Eesti majandus- ja eriti innovatsioonipoliitika arengule, eelkõige läbi ELi struktuurivahendite kasutamise innovatsiooni-, ning teadus- ja arendustegevuse poliitikates. ELi

¹ Käesoleva artikli varasemad inkarnatsioonid on Kattel, 2012 ja eelkõige Kattel, 2013.

mõju kinnistas ka 1980ndate aastate lõpust pärit rahvusliku kõrgtehnoloogilise ideaali ('Eesti Nokia') kui innovatsioonipoliitika peamise implitsiitse eesmärgi. Seega valitses läbi taasiseseisvumisjärgse kahe kümnendi selge ideoloogiline järjepidevus. 2008–2010 aastate kriis ainult süvendas väljakujunenud ideoloogilist raamistikku. Viimases seisnebki ehk 2000ndate aastate Eesti majanduse ja majanduspoliitika kõige silmatorkavam iseloomujoon: hoolimata peadpöörivast kasvust kümnendi keskel, millele järgnes vähemalt sama järsk langus, püsib Eesti majanduspoliitika sisuliselt muutumatuna. Lisaks on kujunenud majanduspoliitilistest dogmadest Eesti ühiskonna ja poliitiliste ning laiemate diskursuste kõige selgemini väljakujunenud ja mõjukam utopia: idee, et majandusse võimalikult vähe sekkuv riik on võimeline suunama majandust ühiskonna vajadustest lähtuvalt ning see toob kaasa kõrgtehnoloogial põhineva Eesti majanduse ja eestluse säilimise ja kasvu. Just see utopia viis nii kiire kasvuni kui samas paradoksaalselt ka languseni. Eesti majandus- ja innovatsioonipoliitikas on tekkinud otsekui paralleelenklaavid: töötleva tööstusel rajanev ekspordisektor ja kõrgtehnoloogilistele lahendustele suunatud teadus- ja arendustegevuse (T&A) sektor. Nende sektorite vahel on üksikuid puutepunkte, lisaks sellele on mõlemale iseloomulikud vähesed seosed Eesti majanduskeskkonnaga (nt tarnijate jt koostöövõrgustike kaudu). Alljärgnev käsitleb majanduspoliitilise utopia kujunemist ja selle paradoksaalset mõju majandusele ja ühiskonnale laiemalt, ning ELi mõju selle utopia tugevdamisel.

UTOPIA *GROUND ZERO*

IME debattides 1980ndate teisel poolel koorusid välja kaks Eesti majanduspoliitilist peamist probleemi, mida ühel või teisel moel tuli lahendada asuda: esiteks rahvuslik-demograafilised probleemid ja teiseks majanduslik-tehnoloogiline mahajäämus. Esimese kohta leiame IME 1989 aasta seadusest isemajandava Eesti põhieesmärgi sõnastatud järgmiselt: "Majandustegevuse suunamisel lähtutakse vajadusest kindlustada põlisrahvuse jäämine oma ajaloolisel territooriumil poliitilist, kultuurilist ja sotsiaalmajanduslikku arengut määravaks põhisubjektiks." (§5). Majandus-tehnoloogilise arengu puhul oli oluline arusaam, et Eesti arengus puudus piisav dünaamika (võrreldes teiste Balti riikide, Ungari, aga ka Soomega). Väidetavalt oldi jäädud pidama 1960ndate aastate industrialiseerimise poliitikates ja tegevustes. Nagu seda, sõnastas Edgar Savisaar 1988. aasta kevadel: pärast 1960ndaid "pole aktiivset struktuuripoliitikat tehtud. Järgmine struktuurinihe – üleminek kõrgtehnoloogiale, mis põhjanaabritel leidis aset 60ndate aastate lõpul, 70ndate algul, on meil tänini saabumata." (Savisaar, 1988). 1989. aasta IME Eesti seadus sätestabki, et "riik loob soodsad tingimused Eesti NSV majanduse arendamiseks kõrgtehnoloogia ja teadusmahuka tootmise alusel, teostades innovatsioonipoliitikat ja kasutades selleks majanduslikku soodusrežiimi ..." (§ 6).

Need kaks eesmärki leiame mõned aastad hiljem juba ka Mart Laari esimese taasiseseisvunud Eesti valitsuse programmilistest tegevustest: majanduspoliitika peamine eesmärk on antud läbi rahvuse säilimise ja taastootmise ning samas peab majanduspoliitika tagama struktuursed muutused teadmiste mahukama majanduse suunas (nii näiteks soovis Laari esimene valitsus tõsta kulutused teadusele 1,5%-ni SKT-st) (Laar, 1992).

Eesti majanduspoliitika areng järgneval kahel kümnendil, eelkõige 1990ndatel, ei tegelenud otseselt aga kummagi eesmärgiga. On võimatu leida ainsatki otseselt majanduspoliitilist seadust, määrust või laiemalt poliitilist meedet, kus rahvuslikul pinnal tehtaks mingeid eristusi. Samamoodi puudus 1990ndatel praktiliselt igasugune majanduspoliitiline tegevus innovatsiooni ja tehnoloogia valdkondades. Vastupidi, 1990ndate majanduspoliitika peamine joon seisnes eristamise ja prioritseerimise puudumises ja selle aktiivses vältimises. Arvestades nii IME diskussioone ja seadust kui ka laiemaid riikluse taastamise debatte, kus 1920ndatel ja 1930ndate eksisteerinud riik ja selle seaduslikud raamid ja poliitikad olid olulisteks lähte-positatsioonideks ja inspiratsiooniks, on majanduspoliitikas taoline areng 1990ndatel üllatav.

1930ndatel aastatel iseloomustas Eesti majanduspoliitikat tugev riigi sekumine nii tööstuse kui põllumajanduse arendamisel. Eesti rahvuslikku riigikapitalismi iseloomustasid püüdlused jäljendada Roosevelti 1930ndate aastate ning laiemat kõlapinda ja kasutamist leidnud Keynesiaanlike poliitikaid nii USAst kui teistest Lääneriikidest. Sümptomaatiline on tollase majandusministri Karl Selteri väide 1937 aastast, et “eesti rahva kapitalinappus ja meie geopoliitiline asend sunnivad riiki suunama eraalgatust rahvamajandusse suurte eemärkide sihis, ja tarbe korral haarama endale initsiatiivi vajalike ettevõtete ellukutsumiseks” (Tsiteeritud Karma 1999: 132; vt laiemalt Kõll, Valge, 1998). 1980ndate lõpuks, kui Eesti oli taasliitumas vabal turul põhineva globaalse majandusega, oli Eesti majanduse peamisi väljakutseid samuti kapitali puudus (Laar, 1992). Kui laias laastus toimus Eesti riikluse taastamine inspireerituna esimese iseseisvusperioodi aegsetest põhiseadustest, siis majanduspoliitikas valiti sisuliselt vastupidine lähene-mine.

Siim Kallase väitel on Eesti majanduspoliitilise edu aluseks olnud alustamine nullist, puhtalt lauvalt (2003: 510). Samas moodustas majanduse tagasi nulli kerimise ideoloogilise vastupoole nõukogudeaegsed majanduspoliitilised arusaamad, kus riik kontrollis tugevalt ka ettevõtte taseme otsuseid (nt kust ja millise hinnaga saadi tootmissisendeid, jne). Seetõttu eeldas nullist alustamine hoopis teistsugust majanduspoliitilist lähte-positiooni. Viimase sõnastab juba 1989 aasta IME seadus: “Eesti NSV riigivõimu- ja -valitsemisorganid suunavad majanduselu valdavalt kaudsete majanduse reguleerimise meetoditega (maksud, krediidi hinnad, sihtfondide eraldised

jm)'' (§6). Isemajandamine tähistas eelkõige välise kontrolli vältimist. Kuna antud seadus nägi ette ühisomandi prevaleerimist omandivormina, siis ei saa siinkohal veel rääkida turumajanduslike mehhanismide rakendamisest majanduse arendamisel, vaid peamiselt tuleb siin näha püüet vabaneda Nõukogude Liidu tugevalt tsentraliseeritud plaanimajandusest. Ometi viib siit otsetee mõned aastad hiljem väljakujunenud neoliberaalse kapitalismini, kus avatud ja stabiilne majanduslik keskkond on peamine struktuuri muutuste mootor ja seda eelkõige välismaiste säästude, peamiselt välisinvesteeringute abil. Teisisõnu, 1990ndate aastate alguse Eesti majanduspoliitilised otsused põhinevad eeldusel, et kapitali puudusele ei ole vastuseks riigi sekkumine majandusesse, vaid pigem võimalikult soodsa keskkonna loomine välise kapitali impordiks.

Nii nagu 1930ndate rahvuslik riigikapitalism ei olnud Eesti originaalse majandusmõtte ja -poliitika tulemus, vaid pigem laiemate rahvusvaheliste ideoloogiliste hoovuste järgimine, nii peegeldas ka 1990ndate alul avastatud neoliberaalne kapitalism paljuski tolleaegseid rahvusvahelisi majanduspoliitilisi dogmasid. Nii Ladina-Ameerika kui ka Ida-Euroopa kontekstis loodeti just väliskapitalile kui senistes rohkem või vähem suletud majandustes piisavalt kiirete struktuurimuutuste esilekutsujale (vt laiemalt Reinert, 2007; Rodrik 2007). Nii sõnastab ka 1989. a isemajandava Eesti seadus, et ''välisriikide kapitali paigutamist vabariigi majandusse stimuleeritakse eelkõige tootmise moderniseerimise ja ümberprofileerimise huvides.'' (§6). Lisaks oli näiteks 1991. aastal vastu võetud välisinvesteeringute seadus olemuselt liberaalne, sisaldamata ühtegi välisinvesteeringute juhtimisega seonduvat klauslit. Peamiseks välisinvesteeringute kanaliks muutus 1990ndatel erastamine (Tiits jt, 2003: 20).

Eesti majanduspoliitika jaoks kujutasid välisinvesteeringud endast loodetud uut algust, seda eriti olukorras, kus, nagu seda on kirjeldanud Siim Kallas, puudus usk valitsuse võimesse kaitsta kodumaised ettevõtjaid (Kallas, 2003: 511). 1980ndatel kinnistus Lääne peavoolu majanduspoliitikasse, eriti peamiste abiorganisatsioonide ideedesse arusaam, et välisinvesteeringute ligimeelitamiseks peab riik suutma tagada mõned põhimõttelised majanduspoliitilised väärtused. Seda väärtuste kogumit nimetatakse 1990ndatest aastatest Washingtoni konsensuseks (Williamson, 2002), lähtuvalt kahe suure rahvusvahelise majandusorganisatsiooni (Maailmapank ja Rahvusvaheline Valuutafond) asukohast. Üheks peamiseks väärtuseks Washingtoni konsensuse raames oli hinna- ja valuutakursi stabiilsus, mis pidi sisendama välisinvestoritele kindlustunnet selle kohta, et nad oma investeeringuid tagasi teenivad (Kregel, 2008).

Kuna Eesti ja teised endised sotsialismimaad loobusid 1990ndate alguses väga kiiresti erinevatest hinnakontrollidest (nii tarbekaupade ja teenuste kui tootmisendite puhul) olukorras, kus paljud Eesti enda tooted ei olnud

importtoodetega konkurentsivõimelised, oli inflatsioon oodatult kõrge. Nii näiteks langes aastane kaupade ja teenuste tarbijahinnaindeksi muutus alla 10% alles 1998 aastal.² Seetõttu asendus majanduspoliitikas majanduses struktuuriliste muutuste tekitamine erinevate majanduspoliitiliste vahendite abil õige ruttu stabiilsusele suunatud meetmetega. Lisaks Washingtoni konsensuse ideedele (nt fiskaalne distsipliin, stabiilne valuuta, madalad maksud; Williamson, 2002) mängis siin poliitike arengus olulist rolli ka Põhjamaade 1980ndate aastate kogemus, kus majanduse areng läbis suured tõusude ja mõõnade võnked (viimased päädisid sageli rahvusliku valuuta devalveerimisega) ning ühiskondlikud konfliktid ametiühingute ja tööandjate vahel (Kattel, 2009; Mjoset, 2000). Nii järskude tsüklite kui ka konfliktide vältimisest noores majanduses ja demokraatias kujunes usaldusväärse üks olulisemaid näitajaid. Seetõttu tõusid tähtsale kohale raha- ja fiskaalpoliitilised otsused (valuutakomitee süsteemi loomine, valuutakursi sidumine saksa margaga; riigi eelarve tasakaal), mis olid alates esimesest Laari valitusest 1992. aastal märgilise tähendusega, sest nendes väljendus valitsuse ja laiemalt Eesti majanduspoliitiline vabatahtlik poliitiliste valikute piiramine. Sisuliselt sidusid need otsused nii valitsuse kui Keskpanga käed majanduspoliitiliselt kurssi väga palju muuta, hoolimata sellest, millised on nii majanduslikud kui poliitilised arengud. Selline enesedistsipliin ja sellega samaaegselt kaasnev väga suur majanduse avatus pidid tõstma välisinvestorite usaldust (vt nt Laar, 1992). Ja nii see ka läks – välisinvesteeringud muutusid oluliseks jõuks Eesti majanduses alates 1990ndate keskpaigast, olles tänaseni üks peamisi Eesti majanduse kasvumootoreid (vt põhjalikumalt ülevaadet Varblane, 2001 ja Tiits, 2007).

1990ndate PATUD

Samas on oluline mõista, et valuutakomitee süsteem ja eriti valuutakursi jäik sidumine saksa margaga soodustas impordi konkurentsivõimet, kuna aitas tuua inflatsiooni kontrolli alla. See tähendas aga ka kodumaiste kaupade konkurentsivõime langust, tingituna nii madalast kvaliteedist kui ka paljude endiste sihturgude äralangemisest. See viis ettevõtteid kiiresti rahalistesse raskustesse, eriti olukorras, kus impordi piiravad ja juhtida üritavad tollid kadusid mõne aastaga pärast 1992. aastat. See kiirendas küll majanduse restruktureerimist, kuid tõi kaasa ka tööpuuduse järsu kasvu 1990ndate keskel ning hõivatute arv vähenes 10 aastat järjest alates 1990 aastast (825 tuhandelt 572 tuhandeni).³

Siit tulenevadki kaks aspekti, mis jäid Eesti majanduspoliitika kujundamisel 1990ndate alguses tähelepanuta. Esimene on nn Reinert-Vaneki efekt,

² Vt www.stat.ee.

³ Vt www.stat.ee. Rahvaarv vähenes samas ajavahemikus 200 tuhande inimese võrra.

mis toimib suletud või kõrge tollirežiimiga kaitstud majanduste avanemisel: nendel ettevõtetel, kus on tehtud hiljuti suuri kapitaliinvesteeringuid, on raskem hakkama saada vabaturutingimustes, sest investeeringute tasuvus langeb kiiresti samaaegselt kasvavate võlgade tingimustes (Reinert, 1980; Reinert, Kattel, 2007). See tähendab, et suurte hiljutiste kapitaliinvesteeringutega (tehnoloogia ja infrastruktuuri moderniseerimiseks) ettevõtted olid turgude avanedes kõige suuremates raskustes. Teisisõnu, just tehnoloogiamahukate ettevõtete konkurentsivõime kahanes kiiresti ja sellest tulenevalt kahanes ka nende väärtus hilisema erastamise mõistes. Lisaks tõstis, nagu mainitud, valuutakursi sidumine saksa margaga kiiresti ka importtoodete konkurentsivõimet võrreldes kohalike toodetega. Seetõttu ei toimunud peaaegu üldse olemasolevate ettevõtete järk-järgulist kaasajastamist, vaid pigem tootmisprotsesside ja toodete täismahuline kadu ja asendamine. Kuna paljud nõukogudeaegsed ettevõtted olid aga tugevasti vertikaalselt integreeritud, tähendas see ka paljude ettevõttega seotud lisafunktsioonide (mh ka teadus- ja arendustegevuse) täitjate ja allüksuste kiiret hääbumist.

Teine oluline tähelepanuta jäänud aspekt puudutas globaalseid struktuuraalseid muutusi tootmises tänu infotehnoloogilistele edusammudele, mis võimaldasid kasvavas mahus tootmisprotsesse standardiseerida ja tükeldada. See aga andis võimaluse neid üha rohkem geograafiliselt kaugematesse odavamate kulude struktuuriga (eriti tööjõu kulude osas) piirkondadesse üle viia (Perez, 2002, 2006; Berger, 2005). Tekkinud olukorras ei pruukinud tööstuslik masstootmine enam sisaldada kõrge lisandväärtusega tegevusi – pidevat õppimis- ja uuenemisvajadust, mis viib omakorda tootlikkuse pideva kasvuni.

Nende kahe aspekti koosmõju Eesti majanduses oli märkimisväärne: ühest küljest asendus välisinvesteeringute toel ja impordi kaudu väga kiiresti suur osa tootmisest konkurentsivõimelisemate kaupade ja teenustega; teisest küljest kadus selle asendamise käigus palju töökohti (eriti monofunktsionaalsetes asumites ja kohtades, mis jäid pealinnast ja suurematest linnadest kaugemale) ja väärtusahelaga seotud tegevusi ning ettevõtteid. Lisaks sellele olid uued tekkinud tegevused sageli madala lisandväärtusega ning antud väärtusahelas suhteliselt madalal positsioonil asuvad tegevused, kus pidevat tootlikkuse kasvu oli ja on tänaseni keeruline saavutada (Tiits jt, 2003).

Selle koosmõju tulemusena saab madal tootlikkus Eesti majanduse kõige tähtsamaks iseloomustajaks juba 1990ndate keskpaigast ning on seda tänaseni. Siin asuvad nii regionaalselt tasakaalustamata arengu juured kui 2008.–2010. aasta kriisi sügavuse põhjused, kui 2000ndate keskel kinnisvara- ja tarbimisbuum viis kiire palgakasvuni ja siit omakorda kiiresti kasvava majanduseni. Viimane toimus aga selleks hetkeks juba püramiidi-

skeemile sarnaselt peamiselt uute laenude näol ehk buumi pikendamise kaudu. Siin sai saatuslikuks ka 1990ndate aastate alguses valitud käedkinni majanduspoliitika juhtimise mudel, eriti valuutakomitee ja -kursi jäik seotus nüüdseks juba euroga, mis ei võimaldanud buumi pidurdamiseks olulisi ja tõhusaid vastumeetmeid käivitada. Lisaks puudus Eestil (ja puudub tänaseni) konkreetne välisinvesteeringute poliitika, mis on sisuliselt ainsaks võimaluseks valuutakomitee süsteemi kasutades (või valuutatsooni kuuludes) ja kapitali vabaliikumise tingimustes üritada juhtida majanduse finantsstabiilsust (vt eelkõige Kregel, 2004). Välisinvesteeringute toel majanduse pidev ümberstruktureerumine peab toetama sellises mudelis kõrge lisandväärtusega ekspordi ja sellega seonduvate tegevuste (mh ka teadus- ja arendustegevuse) kasvu, mis tagaks piisava teenistuse välisturgudel, et säilitada finantsiliselt tasakaalustatud areng läbi piisavate vahendite teenimise, et tasuda väikeses avatud majanduses paratamatult suurena püsiva kaupade ja teenuste impordi eest. Seda aga ei toimunud 1990ndatel ega 2000ndatel aastatel. Lõviosa otseinvesteeringuid liikus 2000ndate keskel finantsvahenduse kaudu kinnisvara- ja tarbimisbuumi rahastamisesse. Märkimisväärse osa otseinvesteeringutest moodustasid reinvesteeritud tulud (vt Varblane, 2004).

Olukorda iseloomustab ka majanduspoliitiliste institutsioonide ja võimekuste areng. Kuna majanduspoliitika keskmes olid makromajanduslikud meetmed, siis ka neid kandvad institutsioonid – Eesti Pank seoses valuutakomitee süsteemi haldamisega ja Rahandusministeerium seoses riigieelarve juhtimisega – hõivasid selgelt juhtohjad majanduspoliitilistel teemadel. Ka poliitikakujundamislike võimekuste osas olid esirinnas eelkõige neoliberaalse poliitikakujundamisele vajalikud teadmised ja oskused. Üha olulisemaks muutusid siin välismõjud seoses nii Euroopa Liidu kasvava rolliga (nt Maastrichti eelarve kriteeriumid fiskaalpoliitikas ning laiemalt EL liitumisläbirääkimised; samuti Euroopa Keskpank) kui teiste rahvusvaheliste organisatsioonidega (nagu Rahvusvaheline Valuutafond) tegevusega. 2000ndatel aastatel muutuski rahvusvaheline kogukond Eesti majanduspoliitika kujundajatele (nii ametnike kui poliitikute tasandil) ilmselt kõige olulisemaks mõjufaktoriks. Just rahvusvahelise poliitikakujundajate kogukonnas levinud neoliberaalsed ideed ja arusaamad, mis muutusid üha olulisemaks ka Euroopa Liidu laienemise käigus (Reinert, Kattel, 2007), pakkusid kindlust Eesti majanduspoliitika kujundajatele, et 1990ndate algul valitud poliitikarežiim ja selle juhtivate institutsioonide ja võimekuste areng on olnud õige.

Nagu mainitud, puudus 1990ndatel aastatel sisuliselt täielikult innovatsioonipoliitika kui selline. Samamoodi oli nii haridus- kui teadus- ja arendustegevuse poliitikate eesmärk esmalt olemasoleva olukorra kontrolli all hoidmine ning halvenemise ärahoidmine (nt väljendas seda Eesti Teadus-

fondi valdkondade vahelise rahastamise proportsiooni kokkulepe, mis ei ole tänaseni muutunud; vt ka Kattel, 2004). Siia tuleb lisada ka sotsiaalsete partnerite, nagu ametiühingud, ettevõtlusorganisatsioonid jne, peaaegu olematu kaasamine 1990ndate aastatel majanduspoliitikasse.

Seega on Eesti majanduspoliitilise utopia ehituskivideks ühest küljest tugev umbusaldus riigi sekkumise vastu ning seetõttu ülimalt läbipaistva ja stabiilsusele suunatud jäiga makromajandusliku režiimi tekitamine ning vastavate institutsioonide ja võimekuste arendamine. Teisest küljest toob just selline režiim kaasa massilise välisinvesteeringute sissevoolu, mida majanduspoliitiliselt kuidagi ei juhita (st millistesse sektoritesse investeringud tulevad). See viib eelkõige uute seadmete soetamise kaudu kiirete muutusteni tootmises ja seeläbi majanduse struktuuris. Nii majanduspoliitiline režiim kui muutused leiavad laiemat positiivset tunnustamist rahvusvahelise poliitikakujundajate kogukonna poolt. Just viimase toel tekib arusaam, et muutused on olnud suuresti positiivsed ning viivad ka edaspidi vajalike struktuurimuutusteni või et toimunud struktuurimuutused on olnud enamasti positiivsed. Samas toimub kasvu ja kiirete muutuste varjus hiiliv ebastabiilsuse kasv tasakaalustamata arengu ja madala tootlikkuse tõusu tõttu. Kuid kuna kodumaine sisend ettevõtelt, opositsioonilt või laiemalt sotsiaalsetelt partneritelt poliitikakujundamisse on teisejärguline, siis majanduspoliitiline utopia ainult süveneb. Neoliberaalne mittesekkuv riik näib toimivat.

EUROOPA KAHE TERAGA MÕÕK

1990ndate aastate neoliberalsele majanduspoliitilisele utopiale kujuneb ootamatuks vastukaaluks Euroopa Liit, mitte siseriiklik opositsioon. Euroopa Liiduga liitumine muudab ja mõjutab Eesti majanduspoliitikat, selle institutsionaalset maastikku ja võimekusi kolmes aspektis: esiteks, Eesti seadusandluse harmoniseerimine ELi juriidilise raamistikuga; teiseks, innovatsiooni-, teadus- ja arendustegevuse ja regionaalarengut käsitlevate poliitikate (allpool lühidalt: struktuuripoliitikate) teke ja rahastamine ELi struktuurivahendite kaudu; kolmandaks, tekkiva struktuuripoliitika elluviimine uute sihtotstarbeliste agentuuride kaudu, millest enamus tekib sihtasutuste vormis. Kuigi need kolm aspekti muutsid Eesti majanduspoliitilist maastikku olulisel määral komplekssemaks, siis üldjoontes jätkus ka 2000ndatel aastatel makromajanduslike ideede domineerimine majanduspoliitika kujundamises.

Eesti seadusandluse ühildamine Euroopa juriidilise raamistikuga tähendas eelkõige lisakindlust Eesti kui välisinvesteeringute sihtkoha riigi jaoks. Harmoniseerimisprotsessi tulemusel sai Eesti regulatiivne keskkond ELi heakskiidu ja kvaliteeditempli. Seetõttu toimus harmoniseerumine eelkõige kui 1990ndate aastate majanduspoliitika käepikendus uuel sajandil. Tõe-

poolest, 2000 aastate esimesel poolel intensiivistus välisinvesteeringute voog Eestisse, kulmineerudes 2005 aastal. Kuna kasvav osa välisinvesteeringutest liikus finantsvahenduse kaudu kinnisvara ja tarbimise finantseerimisesse, siis kasvas 2000ndatel ülikiiressi ka erasektori ja kodumajapidamiste (välis)võlgnevus. Olulist rolli mängis siin ka panganduse transformeerumine peaaegu 100% välispankade poolt domineeritud sektoriks. Kuigi selline tendents on omane paljudele Kesk- ja Ida-Euroopa ning ka teistele arenevatele riikidele antud perioodil, on Eesti radikaalsus siin unikaalne. Välisosalusega panganduse iseärasuseks on globaalselt sarnaste toodete pakkumine ning seeläbi mastaabisäästu saavutamine. Nii tegelevad taolised pangad pigem tarbimise kui kohaliku ettevõtluse finantseerimisega, sest viimane on oluliselt töömahukam ja seetõttu ka kõrgema riskiga. Lisaks tuleb ka seda tähele panna, et välisinvesteeringud on iseenesest kallis kasvu finantseerimise vahend, sest üldjuhul peab ka välisinvestor raha laenama ja on seetõttu kiirest tagasiteenimise võimalusest huvitatud, et alandada enda finantsriske.

RAHVUSLIKUST KÕRGTEHNOLOOGIAST ENKLAAVISTUNUD MAJANDUSENI

Nagu mainitud, sisaldas juba IME seadus ja sellega kaasnenud diskussioon Eesti majanduse peamise mootorina kodumaist kõrgtehnoloogiat. Kuigi 1990ndatel ei pööratud selle arendamisele mitte mingisugust tähelepanu, siis kriitilise allhoovusena püsis antud idee, eriti teadus- ja arendustegevusega tegelevate inimeste ja institutsioonide (nt Eesti Teaduste Akadeemia, Eesti Teadusfond) jaoks, olulisel kohal. Märkiliselt väljendas ja väljendab selliseid suundumisi tänaseni nn oma Eesti Nokia otsing. Võib öelda, et Nokia otsimises on alati väljendunud varjatud soov, et majanduspoliitika oleks midagi enam kui turu eneseregulatsioon. Just sellisele pinnasele langes Euroopa Liiduga liitumine ja eelkõige Euroopa Liidus prevaleerivad majandus- ja eelkõige struktuuripoliitilised ideed.

Euroopa Liiduga liitumise kõige käegakatsutavam mõju majanduspoliitiliste instrumentide ja institutsioonide arengule oli aga ELi struktuurivahendite kasutamiskavade kaudu Eesti (ja teiste Kesk- ja Ida-Euroopa riikide) majanduspoliitika jõuline mõjutamine (Suurna, Kattel, 2010). Eelkõige puudutab see struktuuripoliitikate teket 2004. aastast Eestile avanenud ELi struktuurivahendite kasutamiseks. Perioodiks 2004–2006 struktuurivahendite kasutamiseks loodud riiklik arengukava ja selle valdkondlikud kavad moodustasid sisuliselt esimesed struktuuripoliitikate strateegilised pikemaajalised poliitikad taasiseseisvunud Eesti majanduspoliitikas. 2007.–2013. aastateks struktuurivahendiks loodud arengukavad – ning laiemalt ELi nn Lissaboni eesmärkide saavutamiseks loodud strateegiliste kavade raamistik – süvendas strateegilisest planeerimist Eesti struktuuripoliitikates. Kõigi nende kavade iseärasuseks on teke ELi ja Eesti vastava

valdkonna ametnike läbirääkimisprotsesside kaudu. Eriti esimese perioodi (2004–2006) kavade puhul oli sotsiaalsete partnerite, nt ettevõtlus- ja erialaorganisatsioonide, kaasamine väga nõrk. Samuti on mõlema perioodi puhul olnud parlamendi ja seega ka opositsiooni roll teisejärguline. Sisulist opositsiooni rolli etendasid Euroopa Komisjoni ametnikud, kelle roll Eesti arengukavade suunamisel enam innovatsiooni kui regionaaltemaatikate suunas oli märkimisväärne (Suurna, Kattel, 2010). Selle protsessi ja läbirääkimistel väljakujunenud tavade ja väärtushinnangute tulemusel on Eesti struktuuripoliitikad oma olemusel võrdlemisi kompleksed ja detailised (Kattel, 2004; Karo, 2011), mistõttu aruteludes nende üle on suutelised osalema ainult vastava valdkonna üksikud spetsialistid ministeeriumides ning mõned ülikoolide esindajad.

Tekkiva struktuuripoliitika kandvaks ideeks on Eestis allhoovusena püsiv ja tugevnev oma rahvusliku kõrgtehnoloogia leiutamine ja turuletoomine ning Euroopast lisanduv tugevalt lineaarne arusaam innovatsioonist (nn Euroopa paradoks, vt lähemalt all). Viimase puhul on esmatähtis teadussaavutuste kommertsialiseerimine ning senise olukorra peamise puudusena nähakse erasektori vähest aktiivsust teadus- ja arendustegevuse valdkonnas. Taoline segu kohalikust soovunelmast, mida üha rohkem 2000ndate aastatel paradoksaalselt kandsid ka neoliberaalse poliitika pooldajad, ja välistest survest kujunes Eesti 2000ndate aastatel tekkiva struktuuripoliitika peamiseks veduriks.

Siia lisandus olulise teemana uute struktuuripoliitikate rakendamiseks ning ühtlasi ka ELi struktuurivahendite haldamiseks loodud institutsionaalne süsteem, mis tugineb valdkondlikel sihtasutustel (nt EAS, INNOVE, Archimedes jne). Taoline agentuuridel põhinev struktuuripoliitika juhtimine pärineb ühest küljest 1990ndate lõpu ja 2000ndate alguse Eesti edukatest info- ja tehnoloogia-alastest initsiatiividest, nagu Tiigrihüpe, jt; teisalt on agentuuridel põhinev halduspoliitika ideoloogiliselt moekas lahendus. Tiigrihüppe laadsed eestvedamised löid mulje, et erasektori kaasamine riigi poliitikate elluviimisesse ja ka finantseerimisesse on suhteliselt lihtne ja valutu. Esimene tagasilöökk tuli siin Eesti Geenivaramu ja tema finantseerimiskeemi ebaõnnestumisel (Kattel, Suurna, 2008), ometigi ei pidurdanud see sihtasutuste rajamist ELi struktuurivahendite rakendamiseks. Kuivõrd taoliste sihtasutuste peamiseks ülesandeks ei kujunenud mitte poliitikate kujundamine, vaid nende ellurakendamine, muutus kuluefektiivsus ja ELi ettekirjutiste järgimine kiiresti nende organisatsioonide peamiseks eesmärgiks. Seda aitas lihtsal moel saavutada projektipõhine struktuurivahendite jagamine, mis oli eriti perioodil 2004–2006 valdav mehhanism. Selline lähene-mine pidi tekitama loomuliku konkurentsi parimate ideede vahel ning viimaste toetamise kaudu edendama ka struktuuripoliitikate elluviimist ja võimaldama eesmärkide saavutamist.

Reaalsuses ilmnes sellisel rakendamismehhanismil palju probleeme, millest olulisemad on poliitikakujundamise ja ellurakendamise lahutamine, mistõttu puudus ülevaade ja pidev tagasiside poliitika ja toetuste tõhususest ja mõttekusest, teisalt viis see struktuuripoliitikate valdkonna killustumiseni ja tugevate koordinatsiooniprobleemide tekkeni (Kattel, 2004; Karo, 2011). Eriti silmatorkav on ettevõtlusele ja T&A asutustele suunatud poliitikate meetmete ellurakendamises tekkinud erinevad kultuurid ja väärtused: kui esimest iseloomustab tugev suundumus ettevõtete ja ülikoolide vahelise koostöö edendamisele, siis viimast iseloomustab pigem rahvusvahelisel tasemel toimiva teadustegevuse toetamine (Karo, 2011).

Just ettevõtluse ja ülikoolide koostööle suunatud meetmes (mis moodustavad Eesti innovatsiooni- ja seega ka struktuuripoliitika lõviosa) leiame ELi võrdlemisi negatiivse mõju Eesti majanduspoliitikale. ELi enda innovatsioonipoliitika maastikku on viimase 15 aasta jooksul iseloomustatud nn Euroopa paradoksi kaudu, mis seisneb selles, et väidetavalt on Euroopas üldjuhul tugev alusteadus, kuid selle kommertsialiseerimine jääb USAst ja Jaapanist maha. Selle paradoksi tekkimisel mängis märkimisväärset rolli Euroopa poliitikakujundajate võrdlemisi loominguiline arusaam USA teadmismahuka ettevõtluse arengust alates 1980. aastast. Sel aastal võeti vastu Bayh-Dole Act, mis võimaldas ülikoolidel kommertsialiseerida riigi rahade eest tehtud teadussaavutusi. Eriti biotehnoloogia valdkonnas viis see väga kiire patenteerimisaktiivsuse kasvuni, millele lisandus kiire alustavate ja ülikoolidega seotud ettevõtete kasv. Samas oli see muutus ainult üks suhteliselt väike osa USA majanduspoliitikast ja innovatsioonisüsteemi toimimisest, kus nii riigi kui osariikide erinevad poliitikad ja eriti rahastamine mängivad äärmiselt olulist rolli (Block, Keller, 2010). Ometigi tõlgendus Bayh-Dole väidetav edulugu esmalt ELi poliitikate konteksti ja sealt juba struktuurivahendite kasutamise läbirääkimiste tulemusel ka Kesk- ja Ida-Euroopa ning Eesti konteksti. Selles kontekstis tähendas selline arusaam eelkõige kõrgtehnoloogia eelistamist ja sellele suurte lootuste panemist. Samas olukorras, kus kohapealne ettevõtlus on keskendunud väärtusahelas suhteliselt lihtsate toodete ja protsessidega tegelemisele, on taolised ülikoolidega koostööle suunatud meetmed hambutud, kuna erasektoril puudub nõudlus taolise koostöö järele (vt ka Riigikontroll, 2010). Erasektori puhul saame pigem rääkida üksikust tugevatest enklaavidest, nagu Skype, kus toimub tugev arendustegevus ja innovatsioon. Samas on nende enklaavide mõju laiemale majanduskeskkonnale ja ettevõtlusele seni võrdlemisi piiratud. Ja kuna poliitikakujundamine ja selle ellurakendamine on funktsionaalselt ja organisatsiooniliselt eraldatud, samuti valdkonniti eri ministerriumide vahel, siis on peaaegu paratamatu olukord, kus paljude väljatöötatud poliitikate muutmiseks puudub sisend ning avaliku sektori antud kompetentsid ja võimekused ei arene.

Nii on EL küll mänginud äärmiselt olulist rolli struktuuripoliitikate rajamisel Eestis, kuid samas imporditi läbirääkimiste käigus ka Euroopas tollal levinud arusaamad, mida peaks struktuuripoliitika tegema, ning teisalt loodi struktuuripoliitikate rakendamiseks fragmenteeritud ja raskesti koordineeritav agentuuride süsteem. Seega saame rääkida Eesti majanduspoliitiliste paradoksides kuhjumisest 2000ndatel: ühest küljest prevaleeris jätkuvalt neoliberaalne arusaam mittesekkuvast majanduspoliitikast (eriti silmatorkav oli see välisinvesteeringute mitte juhtimisel, mistõttu järgnes tõsine buum kinnisvarasektoris), mis ei toonud aga oodatud struktuurimuutusi; teisalt tekkis ELi tugeva surve tõttu struktuuripoliitikate hulk, mis olid oma mõjult aga silmatorkavalt nõrgad, kuna probleemipüstitus oli vale ja ellurakendamine keskendus projektipõhisuse tõttu kuluefektiivsusele.

KRIIS KUI UTOOPIA KINNITUS

Eesti neoliberaalse majanduspoliitika piirid olid näha juba 2000ndate aastate alguses (vt nt Tiits jt, 2003; Varblane, 2004). Ometigi kujunes makromajanduslikku stabiilsust rõhutaval ja välisinvesteeringutel rajaneval majandusreežiimil väga tugev rajasõltuvus (ehk olukord, kus tänaseid valikuvõimalusi piirasid minevikus tehtud otsused), mida tegelikult ainult süvendas ELi struktuurivahendite kasutamisel tekkinud fragmenteeritud poliitikamaastik. Viimane tähendab aga eelkõige seda, et riik ei olnud võimeline kiiresti antud valdkondade tegevusi ümber kujundama, sest puudus usaldusväärne sisend ja tagasiside sotsiaalselt partneritelt ning avalikus sektoris endas oli suhteliselt vähe sisulist kompetentsi.

Sellises olukorras on lihtsasti hoomatav, miks Eesti valis 2008 aastal lahvatanud sügavale majanduskriisile reageerimiseks just eelarvekärped ning eurole ülemineku. Tulenevalt Eesti majanduspoliitika raamistikust ja eriti selles eksisteerivate kompetentside ja võimekuste (või nende puudumise) tõttu ei olnud Eesti poliitikutel suurt muud valikut, kui põgeneda eurotsooni. Jäigas majanduspoliitilises raamistikus, kus valuutakurs on seotud ja välisinvesteeringutel on oluline osa majanduse kasvus, pakkus eurotsooniga liitumine nii valitsusele kui ametnikele võimaluse jätkata ja tegelikkuses forsseerida tegevusi, mis on tuttavad ja milles ollakse kogemusi omandanud viimase kahe kümnendi jooksul (Raudla, Kattel, 2011). Eurotsooniga liitumine tähendas seega neoliberaalse majanduspoliitika paradigma tugevdamist. Sisuliselt ei suutnud ka opositsioon või laiemalt sotsiaalsed partnerid välja tuua ühtegi koherentset alternatiivset strateegiat ja taktikat, kuidas kriisiga toime tulla. Ühest küljest on see seletatav just mainitud kompetentsides valitseva rajasõltuvusega (nii Eesti Pangas kui Rahandusministeeriumis ei olnud kogemusi nt Keynesiaanlike poliitikate osas), teisest küljest tähendanuks alternatiivsed strateegiad Eesti senise majanduspoliitika ja selle institutsioonide peaaegu täielikku lõhkumist ja

ümberkujundamist: loobumist järgast valuutakursist, tasakaalus riigieelarvest ja väikesest riigi võlakoorumusest; samuti oleks see tähendanud Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi tegevuse olulist ümberkujundamist, laiemate ministeeriumide vaheliste koordineerimismehhanismide loomist ja see kõik oleks tähendanud nii kasvavat ametnike hulka kui väljakujunenud organisatsioonikultuuri ja -võimekuste jõulist muutmist. Just siin avaldus struktuuripoliitika fragmenteerituse peamine probleem: kui Eesti oleks olnud olukorras, kus nii Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumis kui Haridus- ja Teadusministeeriumis oleksid tekkinud 2000ndatel aastatel tugevad kompetentsid nt tööstusklastrite arendamisel, välisinvesteeringute juhtimisel, ekspordisektorite arendamisel jne, siis oleks saanud taolisi tegevusi kriisi saabudes forsseerida. Sellisel juhul oleks kriisist võinud saada Eesti majanduspoliitika uus murdepunkt, kus loobutakse neoliberaalsest utopiast, et vabal turul tegutsevad välisinvestorid ja nende tuules hiilivad kohalikud ettevõtjad toovad igal juhul esile positiivseid struktuurimuutusi majanduses. Sellest hetkest kui Eestist sai eurotsooni liige, kinnistus see utopia aga veelgi enam, eriti olukorras, kus EL laiemalt näeb senini kestvat kriisi eelkõige läbi riigieelarve prisma.

Eesti majanduspoliitika on seega ühest küljest täna samas kohas, kus ta oli IME debattide lõpuks: lootus liberaalse majanduskeskkonna arendavale jõule on endiselt majanduspoliitika keskmeks. Teisest küljest on täna Eesti majanduspoliitika oluliselt rohkem klotse, millega asuda struktuurimuutusteks vajalike valdkondlike poliitikaid ja eelkõige nende kujundamis- ja rakendamisprotsesse muutma. Selleks peab aga esmalt laiemalt poliitika kujundajate hulgas levima arusaam, et senisele makromajanduslikule ja horisontaalsele struktuuripoliitikale peab lisanduma sektorialne lähene mine nii välisinvesteeringutele, ekspordile kui ka olulisematele majandussektoritele. Sellist arusaama toetab täna Eesti majanduspoliitilisel institutsionaalsel maastikul ilmselt ainult Arengufond, ülejäänud institutsioonid toimivad rajasõltuvusest ja rahvusvahelise poliitikakujundajate toel tugevas inertsis, rajades majanduspoliitilisi lootusi üha rohkem 1990ndate algusest väljakujunenud neoliberaalsele utopiale.

KUIDAS EDASI?

Ülaltoodut kokku võttes saame väita, et Eesti majandus- ja innovatsioonipoliitika on viimase kümnendi jooksul kinnistunud selged arusaamad majandusarengu alustest Eestis:

- võrdlemisi ühetaoline ja stabiilne majanduskeskkond, kus riik sekub pigem mikrotasandil (ettevõtete, T&A tegevuse toetamine) kui makrotasandil (maksusüsteemide muudatused jms);
- majandusarengu edukriteeriumidena hinnatakse ennekõike konkurentsivõime ja ekspordivõime kasvu, mille alusena nähakse omakor-

da lisandväärtuse ja tootlikkuse kasvu (sh on näiteks tööhõive jms teisejärgulisema tähendusega);

- paljuski on siiani toimunud ka ELi tasandi ideede ja nägemuste emuleerimine/kopeerimine, mis on Eestisse kandunud ka teatud paradoksaalsete vastuoludena (nt ühisturu arendamine vs riiklik innovatsioonipoliitika ehk oma ettevõtete võimekuste arendamine).

Need arusaamad on väga selgelt piiritletud riigi potentsiaalsete tegevuste ja sekkumisviiside võimalikku ulatust ning tegelikult ka potentsiaali, et riik suudaks 5–10 aasta perspektiivis omal initsiatiivil või juhtimisel läbi viia radikaalseid muutusi majanduse struktuuris ja arengusuundades (nagu näiteks mõnede Aasia riikide edulugudes, mida Eestis üha enam esile tõstetakse). Võib ka arvata, et nende suundumuste ja olemasolevate käitumusmuutuste muutumine lähemate aastate jooksul on vähetõenäoline. Seetõttu peaks riik oma arenguvajadusi selgemalt sõnastama just nende raamide sees.

Lähtuvalt eelnevast võib Eesti majandusarengu suundumustes välja tuua järgnevad võtmeprobleemid või tekkinud takistused, millega riik peaks järgmisel kümnendil tegelema:

1) EKSPORDIVÕIMEKUSTE ARENDAMINE NING EKSPORDISEKTORI ENKLAAVISTUMISE VÄLTIMINE. Eesti ekspordimahud on jõudsalt kasvanud, kuid piisavalt ei ole kasvanud eksportivate sektorite väärtusahelas Eestist taritav osa, mis tegelikkuses vähendab ekspordi kui majandusarengu mootori potentsiaali. Riigi eesmärgiks ei ole seega mitte ainult ekspordi suurendamine, vaid ka eksportivate sektorite väärtusahelates impordi osakaalu vähendamine, seal kus võimalik ja mõistlik. Seda saab teha ennekõike juba edukate ekspordisektorite või väärtusahelate läheduses tegutsevate ettevõtete võimekuste arendamise ning sidususe suurendamise kaudu. Detailsema riiklike tegevuste planeerimise käigus saaks antud probleemistiku alusel liikuda ka riiklike tegevuste selgema prioritseerimise suunas (see ei tähenda, et riiklikud prioriteedid peaksid olema ainult täna eksportivad sektorid või väärtusahelad, vaid nende võimekuste arendamine oleks prioriteetide seadmise keskmes kas läbi kõrghariduspoliitika või innovatsioonipoliitika).

2) T&A SEKTORI SISEMAISE OLULISUSE ARENDAMINE JA T&A SEKTORI ENKLAAVISTUMISE VÄLTIMINE. Sarnaselt ekspordisektori problemaatikale on ka T&A sektoris nii rahastamise kui ka hõivatud teadustöötajate mahud pidevalt kasvanud. Seosed majandusprotsessidega on aga realiseerunud eelkõige teenuste pakkumise kaudu Eestist väljapoole, kuna Eesti ettevõtetel puuduvad tihti vastavad võimekused T&A sektori saavutusi rakendada. Täna on seega eesmärgiks eksporditavate T&A teenuste laiendamine kodumaistele ettevõtetele, mida saab tagada ennekõike kõrghariduse, ettevõtluse, teadus- ja arendustegevuse ning innovatsioonipoliitika meetmete ja

tegevuste koosplaneerimise kaudu, mis võiks olla ka T&A sektori prioriteetide selgema seadmise jaoks sobilik uuendus poliitika kujundamise süsteemis. T&A sektori enklaavistumise vältimine eeldab tasakaalu leidmist riiklike tegevuste vahel, mis on suunatud tippteaduse arendamisele ja ekspordisektorite võimekuse tõstmisele. Innovatsioonipoliitika peaks soodustama T&A sektori erinevate üksuste spetsialiseerumist kas tippteaduse või ettevõtluse arengu toetamisele selgemalt läbimõeldud rahastamissüsteemi abil, kus tänaste selgelt tippteadusele suunatud meetmete (institutionaalne toetus, tippkeskused jms) kõrval kasutatavad ELi rahastatavad meetmed (nt klastrid, TAKid) ei dubleeriks riiklike meetmeid, vaid oleksid selgelt suunatud (sh fookus, hindamine jms) ekspordisektorite võimekuse tõstmisele ja väärtusahelate laiendamisele ka Eesti sees.

3) TÖÖTAJATE OSKUSTE ARENDAMISE KIIRENDAMINE NING ASJA- JA AJAKOHASTAMINE. See on otseselt seotud kahe ülalmainitud probleemiga, ehk ekspordisektori ja T&A sektorite enklaavistumine on muutnud Eestis nende sektorite vahelise tagasiside pea olematuks, mis on kaasa toonud töötajate oskuste arendamise liiga aeglase dünaamika. Tegemist ei ole mitte otseselt T&A või ettevõtlussektorist tulenevate nõrkustega, vaid majanduse struktuursete probleemide (ülalmainitud enklaavistumised) võrdlemisi loomuliku tagajärjega. Riigi peamiseks eesmärgiks siin on valmistada ette kvalifitseeritud tööjõudu ekspordi- ja T&A sektori arenguteks, mida saab taas kord tagada ennekõike kõrghariduse, ettevõtluse, teadus- ja arendustegevuse ning innovatsioonipoliitika meetmete ja tegevuste koosplaneerimise kaudu (tagades nt selle, et teadustegevuse spetsialiseerumise profiil ja riikliku kõrghariduse rahastamise profiil oleksid sünkroniseeritud).

4) REGIONAALSELT ÜHTLASE ARENGU TAGAMINE EESTIS. Lõviosa Eesti majandustegevust on koondunud paari tõmbekeskusesse ning ülejäänud Eesti regioonid ääremaastuvad. Eesmärgiks peaks olema ekspordile suunatud sektorite arengu soodustamine ka väljaspool olulisi tõmbekeskusi, mis tõenäoliselt tähendab mitte ainult regionaalsete eelistuste seadmist erinevatesse poliitikakujundamise meetmetesse, vaid erinevate regioonide arengupotentsiaalide kaardistamist (sh eksportivate sektorite ettevõtete paiknemine, tööjõu kompetentside profiil jms) ning sellest tulenevaid regionaalseid lähenemisi riiklike arengusuundade sees, kas siis regioonidest tulenevate ettevõtete eelistamise näol või muude toetusmeetmete kaudu.

Eesti vajab uusi ettevõtteid, kes rakendavad võimalikult palju Eestis tehtavat T&A-d, värbavad Eestist pärit kvalifitseeritud tööjõudu ning tegutsevad olemasolevate või uute eksportööride väärtusahelas, paiknedes kasvavalt ka väljaspool seniseid tõmbekeskusi.

Need ettevõtted ei pea olema Eesti ettevõtted, vaid võivad olla ka välisinvesteeringud, millel on positiivne mõju nii Eesti tööhõivele, ekspordivõimekusele kui ka teadmiste ja oskuste arendamisele.

Sisuliselt on riigil kaks võimalust, kuidas antud probleeme lahendada:

1) TURUPÕHINE LAHENDUS, kus tänase majanduspoliitika rakendusmehhanismidele on vaja juurde luua mehhanisme, mis senisest oluliselt paremini tõlgivad ettevõtete vajadusi ja võimalusi. MKMi ja EASi vahele oleks vaja nende tegevuste koordineerimiseks (sh hõlmates ka HTMi seonduvaid tegevusi) luua ettevõtluskoda nendesamade eksportivate ja T&A-ga tegelevate ettevõtete baasil, andes sellele kojale piisavalt analüütilisi ressursse (nt Arengufondi seireüksuse toetav roll või koja iseseisva analüütilise võimekuse arendamise toetamine) ja poliitikakujunduslikku võimu (nt strateegiate, meetmete, tegevuskavade heakskiitmine), et olemasolevaid toetusmehhanisme järk-järgult muuta.

2) HIERARHILINE LAHENDUS, kus riik palju otsesemalt aitab mainitud ettevõtteid luua/arendada. Üheks mõeldavaks vahendiks on riigihanke mehhanism (innovatsioonile suunatud riigihanked), kus riik vastavalt eksportööride vajadustele tellib hankemehhanismi abil vajalike lahendusi (nt olemasolevatelt kompetentsi-, tehnoloogia- ja tippkeskustelt) (vt Lember, Kalvet, 2012).

Reaalne on ilmselt mõlema skeemi ühendamine, kus ettevõtluskoda hakkab kandma seda analüütilist kompetentsi, mis üritab arendusalaseid vajadusi ennustada ning neid olemasolevate toetusmehhanismide ja riigihanke võimaluste toel edendada. Oluline on aga seniste vahendite kontsentreerimine ja suunamine just nendele kahele valdkonnale.

Riikliku planeerimise tasandil tähendab see aga ennekõike paindlikkuse tagamist erinevate strateegiate ning planeerimistsüklite lõikes, kus nt maailmamajanduse muutusi või ka Eesti T&A sektoris toimuvaid läbimurdeid saaks operatiivselt ka poliitikatesse ja tegevustesse sisestada. Olulisel kohal peaks siin olema ka riiklike eesmärkide ja tulemusindikaatorite seadmine mitte lähtuvalt 'ideaalsetest' eesmärkidest, vaid ülalmainitud probleemide lahendamise edukusest (nt oluline on mitte ainult eksportivate ettevõtete arv, vaid ekspordisektorite enklaavistumise vähenemine sisemaiste koostöösidemete abil – nt allhanked – ja ekspordisektorite impordisõltuvuse vähenemine).

Tööjõu oskuste arendamisel on hierarhiline lahendus kõige lihtsam. Vastavalt eksportööride ja T&A sektori laias laastus selgele vajadusele tööjõu järele võib riik vajaliku arvu kvalifitseeritud inimesi enda palgale võtta, nt nende töötajate suunamisega haridussüsteemi, makstes stipendiume vms ning seejärel samad töötajaid ettevõtetesse praktikale suunata. Või vastupidi, kui eksportöörid tuvastavad spetsiifilise tööjõupuuduse mingis arenevas sektoris, milleks Eestis puudub vajalik koolitusbaas, siis riik tellib eksportööridelt vajalike töötajate koolitamise mahus, mis ületab eksportööri enda tuvastatud vajaduse, et tagada võimalik teadmiste ja oskuste

kiirem ülekanne ka ettevõtetesse, mis võimaldaks pakkuda eksportööridele sobilikke allhanke- jms teenuseid.

KOKKUVÕTE

POLIITILISE RUUMI TÜHJENEMINE JA JÄTKUV EBASTABIILSUS

Eesti taasiseseisvumisjärgne majanduspoliitika ja selle peamised institutsioonid on oma põhijoontes olnud silmatorkavalt stabiilsed kahekümne aasta jooksul. Majanduspoliitikat ja sellega tegelevate institutsioonide arengut määrav ideestik kujunes juba 1980ndate aastate lõpul Isemajandava Eesti (IME) debattides, mis päädis 1989ndal aastal seadusega “Eesti NSV isemajandamise alused”. Nii IME debattidest kui seadusest koorub välja Eesti hilisema majanduspoliitika peamine paradoks – kuidas riigi vähese sekkumise kaudu majanduspoliitikat sellisel moel teostada ja juhtida, et tekkivad struktuurimuutused ja arengud vastaksid majanduspoliitika eesmärkidele. Viimased on püsinud samuti märkimisväärselt stabiilsed: ühest küljest sätestas juba IME seadus majanduspoliitika peamiseks eesmärgiks ‘põlisrahvuse’ säilimise, teisest küljest pidi majanduspoliitika suutma esile kutsuda jätkusuutlikud struktuuraalsed muutused kõrgtehnoloogilise majanduse suunas. 2011. aastal ametisse asunud valitsuse majanduspoliitilised eesmärgid ei erinenud kuigi palju 1989. aasta IME seaduses toodud eesmärkidest. Märkimisväärne on ka see, et vahendidki olid suhteliselt sarnaseks jäänud: makromajanduslik stabiilsus ja riigi võimalikult vähene sekkumine erasektori tegevusesse; seega taolistes raamides peaks eelkõige välisinvesteeringute toel toimuma majanduse pidev uuenemine ja areng. Institutsioonide ja institutsionaalsete võimekuste areng on sõltuv mainitud vahendite rakendamiseks vajalike institutsioonide ja oskuste arendamisest. Nii on eriti makromajanduslikult olnud peamiseks eesmärgiks riigi sekkumisvõimaluste vähendamine (ilmekalt näitlikustab seda ligi kaks kümnendit toiminud valuutakomitee süsteem ja vahetuskursi jäik seotus saksa marga ja eruoga; samuti riigieelarve tasakaalustamine aastases arvestuses).

Samaaegselt tekkis allhoovusena eriti 2000ndatel Euroopa Liidu tugeval surveel innovatsioonipoliitika, mida nägi ette ka 1989. aasta IME seadus. Viimane – samuti laiemalt võttes struktuuripoliitika, hõlmates mh ka regionaalseid aspekte – on seni olnud võrdlemisi vähese tõhususega ning pigem süvendanud ülalnimetatud mittesekkumise paradoksi. Ka innovatsioonipoliitika meetmetes ja rakendusmehhanismides kohtame sarnast umbusaldust riigi sekkumise vastu, pigem otsiti turge imiteerivaid sekkumismehhanisme. Selle paradoksi tõttu – juhtida majandust ilma sinna sekkumata – on majanduspoliitikast saanud Eesti poliitilisel ja ideoloogilisel maastikul üks kõige tugevamaid, väljakujunenud ja kandvamaid utoopiaid (riigi sekkumise vähendamisega on peaaegu kõiki eesmärke ja vahendeid võimalik õigustada), mis pakub erakordselt efektiivseid ja vahedaid retoorilisi või-

malusi konkureerivate ideede kõrvaletõrjumiseks. Seda ilmestas väga selgelt valitsuse retoorika ja tegevus 2008–2010 majanduskriisi ajal.

Eesti valitud majanduspoliitilises mudelis, kus makromajanduslikul stabiilsusel (madal inflatsioon, stabiilne valuuta, madal riigivõlg ja -eelarve tasakaal) oli kõige olulisem positsioon, jäid muud majanduspoliitilised institutsioonid ja võimekused (eelkõige innovatsioonipoliitika ja regionaalselt tasakaalustatud areng) tahaplaanile. Just selle tõttu koges Eesti 2008–2010 majanduskriisi eelkõige kõrge tööpuuduse näol. Kriisi lahenduseks oli senise majanduspoliitilise mudeli forsseerimine euro kasutuselevõtuks vajalike fiskaalpoliitiliste sammude abil. Kuna majanduspoliitikas olid nõrgalt arenenud institutsioonid ja võimekused struktuurseid muutusi aktiivselt juhtida, siis ei ole Eesti majanduspoliitikas tänaseni tõhusaid vahendeid tugeva stabiilsuse varjus toimivale süsteemsele fragiilsusele, mis avaldub nii tõusude kui mõõnade võimendumises lühikese aja jooksul. Teisisõnu, Eesti majanduspoliitika on endiselt oma olemusliku mittesekkumise paradoksi küüsis, mille pahupooleks on asjaolu, et majanduspoliitilised debatilid on tugevasti ideologiseeritud ja opositsiooni ning eelkõige sotsiaalsete partnerite majanduspoliitiliste võimekuste areng on seetõttu peaaegu olematu.

KIRJANDUS

Berger, S. (2005). *How We Compete. What Companies Around the World Are Doing to Make It in Today's Global Economy*. Crown Business, New York.

Block, F., Keller, M. R. (eds.). (2010). *State of Innovation: The U.S. Government's Role in Technology Development*. Paradigm Publishers, Boulder, CO.

Eesti NSV seadus "Eesti NSV isemajandamise alused" (1989). Riigi Teataja, 18. mai, <https://www.riigiteataja.ee/akt/24003>.

Eesti Vabariigi välisinvesteeringuteseadus (1991). Riigi Teataja, 11. september, <https://www.riigiteataja.ee/akt/30532>.

Kallas, S. (2003). Remniscing with the 'Father of the Kroon': Interview with Siim Kallas. *Demokratizatsiya*, 11, 4, 509-516.

Karma, O. (1999). *Eesti Vabariigi majanduspoliitika. Kaks aastakümnet 1919-1939*. Umara, Tallinn.

Karo, E. (2011). Evolution of innovation policy governance systems and policy capacities in the Baltic States. *Journal of Baltic Studies*, 42, 4, 511-536.

Kattel, R. (2004). Governance of innovation policy: the case of Estonia. *Trames. Journal of the Humanities and Social Sciences*, 8, 4, 397-418.

- Kattel, R. (2009). The rise and fall of the Baltic States. *Development and Transition*, 13, 11-13.
- Kattel, R. (2012). Eesti taasiseseisvumisjärgne majanduspoliitika. Vetik, R. (toim). *Eesti poliitika ja valitsemine 1991–2011*. Tallinna Ülikooli Kirjastus, Tallinn, 389-410.
- Kattel, R. (2013). Eesti majandus ja majanduspoliitika 00ndatel: neo-liberaalse utopia tõus ja tõus. Trossek, A., Saar, J. (toim.). *Nullindad. Kaasaegse Kunsti Eesti Keskus*, Tallinn, ilmumas.
- Kattel, R., Suurna, M. (2008). The rise and fall of the Estonian genome project. *Studies in Ethics, Law and Technology*, 2, 2, <http://www.bepress.com/selt/vol2/iss2/art4/>.
- Kregel, J. A. (2004). External financing for development and international financial instability. G-24 Discussion Paper No. 32. October 2004.
- Kregel, J. A. (2008). The discrete charm of the Washington Consensus. The Levy Economics Institute of Bard College Working Paper No 533, http://www.levy.org/pubs/wp_533.pdf.
- Kõll, A.-M., Valge, J. (1998). *Economic Nationalism and Industrial Growth. State and Industry in Estonia 1934-39*. Almqvist & Wiksell International, Stockholm.
- Laar, M. (2002). Otsuse "Peaministri kandidaadile Mart Laarile volituste andmine valitsuse moodustamiseks" eelnõu (1 OE) arutelu. Riigikogu, http://web.riigikogu.ee/ems/stenograms/1999/03/t99032202-04.html#P61_8742.
- Lember, V., Kalvet, T. (2012). Riigihanked ja innovatsioon Eestis: milleks kulutada 11 miljonit päevas? *Riigikogu Toimetised*, 26, 110-126.
- Mjoset, L. (2000). The Nordic economies 1945-1980. ARENA Working Paper Series, no 6, http://www.arena.uio.no/publications/wp00_6.htm.
- Perez, C. (2002). *Technological Revolutions and Financial Capital: The Dynamics of Bubbles and Golden Ages*, Elgar, Cheltenham.
- Perez, C. (2006). Respecialisation and the deployment of the ICT paradigm: an essay on the present challenges of globalization. Compañó, R., Pascu, C., Bianchi, A., Burgelman, J.-C., Barrios, S., Ulbrich, M., Maghiros, I. (eds.). *The Future of the Information Society in Europe: Contributions to the Debate*, European Commission, Directorate General Joint Research Centre, Seville, Spain.
- Radosevic, S. (1998). The transformation of national systems of innovation in Eastern Europe: between restructuring and erosion. *Industrial and Corporate Change*, 7, 1, 77-108.
- Raudla, R., Kattel, R. (2011). Why did Estonia choose fiscal retrenchment after the 2008 crisis. *Journal of Public Policy*, 31, 2, 163-186.

- Reinert, E. S. (1980). *International Trade and the Economic Mechanisms of Underdevelopment*, Cornell University PhD thesis.
- Reinert, E. S. (2007). *How Rich Countries Got Rich and Why Poor Countries Stay Poor*, Constable & Robinson, London.
- Reinert, E. S., Kattel, R. (2007). European eastern enlargement as Europe's attempted economic suicide? The Other Canon and Tallinn University of Technology Working Papers in Technology Governance and Economic Dynamics, 14, www.technologygovernance.eu.
- Riigikontroll (2010). Riigi ettevõtlustoetuste mõju Eesti majanduse konkurentsivõimele. Kas riik toetab oma ettevõtteid parimal viisil? Riigikontrolli aruanne Riigikogule, http://www.prolog.ee/main/ee/files/283_RKTR_2148_2-1.4_1939_001-1.pdf.
- Rodrik, D. (2007). *One Economics, Many Recipes. Globalization, Institutions, and Economic Growth*, Princeton University Press, Princeton/Oxford.
- Savisaar, E. (1988). Intervjuu Edgar Savisaarega. Edasi, 24 mai.
- Suurna, M., Kattel, R. (2010). Europeanization of innovation policy in Central and Eastern Europe. *Science and Public Policy*, 37, 9, 646-664.
- Tiits, M. (2007). Technology-intensive FDI and economic development in a small country – the case of Estonia. *Trames : Journal of the Humanities and Social Sciences*, 11, 3, 324-342.
- Tiits, M., Kattel, R., Tarmo Kalvet, T., Kaarli, R. (2003). Eesti majanduse konkurentsivõime ja tulevikuväljavaated. Teadus- ja arendustegevuse ja innovatsioonipoliitika ülevaade. Eesti Vabariigi Teadus- ja Arendusnõukogu, <http://www.riigikantselei.ee/failid/TAYlevaade2003.pdf>.
- Varblane, U. (ed.) (2001). *Foreign Direct Investments in the Estonian Economy*. Tartu Ülikooli Kirjastus, Tartu, <http://infutik.mtk.ut.ee/www/kodu/RePEc/mtk/febpdf/febook09.pdf>.
- Varblane, U. (2004). Konvergensiprotsess Eesti ühinemisel Euroopa Liiduga. Ettekande Eesti sotsiaalteaduste V aastakonverentsil "Eesti Euroopas: uued väljakutsed sotsiaalteadlastele", http://www.sotsioloogia.ee/vana/esso3/plenaar/urmas_varblane.htm.
- Williamson, J. (2002). *What Washington Means by Policy Reform* (Updated version of the 1990 article), <http://www.iie.com/publications/papers/paper.cfm?ResearchID=486>.

*Teaduspreemia humanitaarteaduste alal
teadusmonograafia "The Migration Period, Pre-Viking Age and
Viking Age in Estonia" eest*



Andres Ivauri

Sündinud 15.10.1970 Tallinnas

- 1989 Tallinna Kopli Kunstigümnaasium
- 1995 Helsingi Ülikool, arheoloogia
- 2001 PhD arheoloogia, Tartu Ülikool
- 1990 Ålands Museibyro (Ahvenamaa muinsuskaitsebüroo), assistent
- 1990–1991 Friedebert Tuglas-seura (Helsingi), sekretär
- 1992 Museovirasto (Soome Muinsuskaitseamet), praktikant
- 1997–2003 Tartu Ülikooli teadur, alates 2003 vanemteadur, 2004–2006 filosoofiateaduskonna prodekaan
- 2001 TÜ Raefondi preemia
- 2003 Eesti Üliõpilaste Seltsi Dr Arthur Puksovi Fondi (Kanada) auhind

Avaldanud 84 teaduspublikatsiooni, sh 3 monograafiat

HIRMUS NÄLJAHÄDA EESTIS JA NAABERALADEL AASTATEL 536–537

SISSEJUHATUS

Kogumiku, milles käesolev artikkel ilmub, eesmärgiks on tutvustada 2013. aasta riigi teaduspreemia laureaatide uurimusi, mille eest nad selle tunnustuse pälvisid. Kuna minu uurimustöö tulemused on vormistatud mahuka monograafia kujul, ei pidanud ma võimalikuks kõike seda ühe artikli raamesse suruda. Tutvustan alljärgnevalt vaid ühte, minu arvates olulist teemat oma uurimistööst.

Arheoloogide võime näha arheoloogilise allikmaterjali abil konkreetseid ajaloosündmusi või seostada neid kirjalikest allikatest teada olevate andmetega, on olnud üpris vähene. Meie varasemat ajalugu käsitlevate ajalooteoste, nagu ka nende aluseks olnud kroonikate lehekülgi täidavad teated või-

muvahetustest ja sõjaretkedest. Väga raske on hinnata, kas ja kuidas need mõjutasid inimeste argielu ja selle kaudu kajastuvad arheoloogilises leiuaineses.

Võimusuhetest ja vägivallast olulisemad ajaloosündmused on olnud viljakaldused ja neist põhjustatud näljahädad, mille demograafilist ja kultuurilist mõju on minu arvates alahinnatud. Näiteks kroonik Dionysius Fabricius kirjeldas oma LIIVIMAA AJALOO LÜHIÜLEVAATES näljahäda, mis tabas Liivimaad 1601. aastal ja kus tema andmetel (neis arvudes tuleb kahelda) hukkus üle 600 000 talupoja – vaid 1/10 talurahvast olla ellu jäänud. Lisaks jubedatele kannibalismikirjeldustele andis ta edasi pärast näljahäda avanenud pildi: “... kui keegi Liivimaad mööda rändas, võis ta talupoegade hüttidest ja hurtsikuist, mis kõik olid tühjad, leida surnute konte ja kolpasid, ühes hoones umbes viis-kuus, kes nälja kätte olid surnud ja kelle kehad olid metsloomade ning koerte poolt lõhki kistud...” Seejärel tõdes kroonik: “küllalt nendest, pöördugem tagasi ajaloo juurde” (Fabricius, 2010: 297).

Ka ajaloolaste jaoks pole näljahädad olnud kuigi olulised sündmused – värskeimad selleteemalised uurimused on ilmunud juba 1920.–1930. aastatel. Otu Liiv on uurinud 1695.–1697. aasta näljahäda põhjustatud inimkaotusi (Liiv, 1938). Kuna epideemiade eelduseks oli enamasti näljahäda, võib samas kontekstis vaadelda ka 1710.–1711. aasta katkuepideemiat käsitlevaid Voldemar Milleri ja Johan Kõpu artikleid (Kõpp, 1929; Miller, 1938). Uuematest uurimustest võib mainida üksnes Marten Seppeli doktori-väitekirja näljaabist Eesti- ja Liivimaal 17. sajandist 19. sajandi alguseni (Seppel, 2008).

Eesti rauaaja uurijate tähelepanu pole ikaldused ja näljahädad aga seni hoopiski pälvinud. See on ka mõistetav, sest kuni viimase ajani puudusid sündmuste täpse ajandamise ja looduskeskkonale avaldunud inimõju muutusi näitavad loodusteaduslikud meetodid. Vaid numismaatik Ivar Leimus on mündiaarete ajalise jaotuse põhjal oletanud, et 10. saj keskpaigas võis Eesti ala ja naabermaid tabada näljahäda, mille käigus inimesi suri peredena ja maapõue jäi tavapärasest arvukamalt aardeid (Leimus, 2004).

NÄLJAHÄDADE MÕJU EESTIS VARAUUSAJA NÄITEL

On oletatud, et Eesti alal oli 13. sajandi alguses 150 000–180 000 elanikku (Tarvel, 1966). 15. sajand ja 16. sajandi esimene pool olid rahvastiku kasvu jaoks soodsad. Juhan Vasar on Eesti ala talurahva arvuks umbes aastal 1550 hinnanud 250 000–280 000 (Vasar, 1933: 927–928). Enn Tarvel on sama aja rahvaarvuks, mis sisaldab ka linnaelanike ja maal elanud sakslasi, pakkunud 250 000–300 000 (Tarvel, 1992: 144). Järgnenud Liivimaa sõda (1558–1583) ja Poola-Rootsi sõda (1601–1625) põhjustasid suurt rahvastikukadu, mida raskendas ka 16. sajandi teisel poolel jahenenud kliima

(algas nn väike jääaeg). Sellesse aega jäi eriti ränki näljaastaid. Eriti raske näljahäda haaras Eesti ala 1601.–1602. aastal.

16. sajandi teine ja 17. sajandi esimene pool oli üks pidev võitlus nälja, haiguste ja sõjakahjudega. Kui suur oli rahvastikukadu, selle kohta hinnangud erinevad. J. Vasara arvestuste kohaselt oli 1640. aastal eestlasi (talurahvast) 60 000–70 000 inimest (Vasara, 1933: 927). Sellele arvule tuleb lisada veel linlased, kelle osakaal oli varauusajal Eesti alal 5–6% rahvastikust (Palli, 2004: 21). Heldur Palli on Eesti rahvastiku koguhulgaks 1640. aastal saanud aga suurema arvu: 120 000–140 000 inimest (Palli, 1996: 14). Ajavahehemikul 1640–1695 toimus Eesti ala rahvastiku kiire kasv. O. Liivi hinnangul oli aastaks 1695 rahvaarv tõusnud 325 000–350 000 inimeseni (Liiv, 1935: 38), H. Palli arvutuste kohaselt oli see arv 350 000–400 000 (Palli, 1993: 34; 1996: 14).

Üks Eesti ajaloo raskem ebasoodsast ilmastikust põhjustatud ikaldus ja näljahäda tabas maad aastail 1695–1697. O. Liiv on järeldanud, et Eestis hukkus umbes 70 000–75 000 inimest, kellest suurem osa ei surnud küll otseselt nälga, vaid alatoidetud inimestele kergesti nakkavate haiguste läbi (Liiv, 1938). Paar aastat hiljem, 1700. aastal algas Põhjasõda, mille lahinguretked ja rüüstetegevus hõlmas kohe ka Eesti ala. 1708. aastal oli ikaldus Põhja-Eestis, 1709. aastal haaras see kogu Eesti. Näljahäda lõi soodsa pinnase haiguste levikule ja 1710.–1711. aastal puhkestki üks siinse ajaloo hirmsam katkuepidemia. 1712. aastaks oli järele jäänud vaid 150 000–170 000 elanikku, ehk umbes sama palju kui 13. sajandi alguses, pool aastatuhandet varem! Osa ohvritest hukkus sõjategevuse tulemusel, kuid nälja- ja võrreldes oli varauusaegsetel sõdadel palju vähesem hävitusjõud.

536.–537. AASTA KLIIMAKATASTROOFI 'AVASTAMINE'

536.–537. aastal toimus lühiajaline ja järsk kliima jähnenemine põhjapoolkeral, mis jõudis uurijate vaatevälja suhteliselt hiljuti. 1983. aastal avaldasid NASA Goddardi kosmoseuuringute instituudi teadlased Richard Stothers ja Michael Rampino ajakirjas *Journal of Geophysical Research* loetelu enne aastat 630 pKr toimunud vulkaanipursetest, mis kajastuvad kirjalikes allikates (Stothers, Rampino, 1983). Üks selles mainitud sündmuseks oli tolmuloor, mida mainiti mitmetes omaaegsetes tekstides ja mis olevat enam kui aasta jooksul aastatel 536–537 varjutanud päikese ja põhjustanud ikalduse. Kuna ajaloolased ja arheoloogid geofüüsika alaseid teaduspublikatsioone tavaliselt ei loe, ei pälvinud see teave tähelepanu.

Otsese tõendi selle sündmuse toimumise kohta leidis dendrokronoloog Mike Baillie Iirimaa tammede aastarõngaridadest (Baillie, 1994). Kuid alles pärast seda, kui aastal 1999 avaldasid nii Baillie, kui ka teadusajakirjanik David Keys 536.–537. aasta sündmusest ja selle mõjust ajaloole

laiale lugejaskonnale suunatud raamatud (Baille, 1999; Keys, 1999, eesti keeles 2002), sai see uurijatele laiemaltki teada.

2000. aastal ilmus esimene arheoloogia ja ajaloo alane mahukam uurimus sel teemal (Gunn, 2000). 2000. aastatest alates on 536.–537. aasta sündmuse avaldumist arheoloogilises leiuaineses, omaaegsetes kirjalikes allikates ning selle mõju ja tähendust ajaloole käsitlenud oma uurimustes paljud teadlased. Enim on sel teemal uurimusi avaldanud Skandinaavia ja Briti uurijad, nii loodus-, kui ka humanitaarteadlased, sh mitmed arheoloogid (nt Axboe, 1999, 2001a,b; Nielsen, 2006; Gräslund, 2007; Gräslund, Price, 2012). Alles viimastel aastakümnetel on uurijate käsutusse jõudnud varasemast suurema täpsusega loodusteaduslikud andmed ajaloolistest kliimamuutustest, mis teeb võimalikuks uurida nende muutuste demograafilist, majanduslikku ja kultuurilist mõju (Widgren, 2012: 126).

LOODUSTEADUSLIKUD TÕENDID 536.–537. AASTA KLIIMAKATASTROOFIST JA SÜNDMUSE PÕHJUS

Juhtunu kajastub selgelt ka põhjapoolkera puude, täpsemalt tamme ja männi, aastarõngasarjades, kus puidu juurdekasv on 536. ja järgnevatel aastatel pärsitud. See on aastarõngasarjade põhjal otsustades olnud kõige äkilisem jahenemine viimase 2300 aasta jooksul. Mõninga viivega, aasta 540 paiku, toimus sama lõunapoolkera puude aastarõngastega, nt Lõuna-Tšiilis ja Argentinas (Arjava, 2006; Baillie, 1999; Gunn, 2000; Jones, 2000; Young, 2000 ja neis esitatud allikad). Põhjapoolkera puude aastarõngastest nähtub, et juurdekasv oli pärsitud kahel perioodil. Pärast kasvu taastumist järgnes uus, kohati selgemgi langus 540. aasta paiku. Puude aastarõngaste põhjal võib järeldada, et ebatavaliselt külmad ilmad kestsid põhjapoolkeral kuni aastani 545 (Gräslund, Price, 2012: 430 ja seal viidatud allikad).

Sündmuse jäljed on näha ka Gröönimaa ja Antarktika liustikujääs. Sealjuures on erinevad uurimisrühmad leidnud 536. aastaga seostavatest jääkihtidest erinevaid anomaaliaid. Juba varasemad uurijad viitasid 540. aasta kanti dateeritavate Gröönimaa jääkihtide suurele väävlisisaldusele, mis peaks viitama sündmuse vulkaanilisele põhjusele (nt Stothers, Rampino, 1983; Stothers, 1999). Ka hiljem on vastavates Antarktika ja Gröönimaa jääkihtides leitud anomaalselt suuri sulfaadisisaldusi, mis pärinevat vulkaanidest atmorfääri sattunud osakestest (nt Traufetter jt, 2004; Larsen jt, 2008; Ferris jt, 2011). Alternatiivse tulemuse esitanud uurimisrühm on leidnud vastavatest kihtidest hoopis meteoriidiplahvatusele viitavaid magnetiidi ja silikaadikerakesi (Abbott jt, 2008).

Teoreetiliselt on käsitletava kliimakatastroofi põhjustajatena võimalikud kas hiidvulkaani purse või mingi taevakeha langemine maale. Stoters ja Rampino (1983) pidasid kirjalikest allikatest leitud teateid aastate 536.–537. kliimaanomaaliast tõendiks hiidvulkaani purske kohta. Enamus uuri-

jaid, kes kõnesoleva sündmuse põhjusi on uurinud, on järeldanud, et selle põhjustas Maa troopilises piirkonnas toimunud hiiglaslik vulkaanipurse (vt Larsen jt, 2008). Ka asjaolu, et põhjapoolkeral näib olevat olnud kaks kiiret jahenemist (536. ja 540. aasta paiku) on seletatud hilisemate hiidvulkaanipursete puhul täheldatud nähtusega, kus esimene kliima jahenemine toimub vahetult purske ajal või selle järel, teine aga mõned aastad pärast purset (Stothers, 2000). Seni pole veenvalt suudetud tõestada, kus 536. aasta eeldatav vulkaanipurse toimus. On pakutud erinevaid vulkaane ja paiku, nt Rabaul Paapua Uus-Guineas (Stoters, 1984), Krakatau Indoneesias (Keys, 1999; Wohletz, 2000) ja Ilopango vulkaan El Salvadoris (Dull jt, 2010).

Teised teadlased on jõudnud järeldusele, et põhjus on Maa väline, peamiselt on oletatud, et Maad tabas asteroid või komeet (Baillie, 1999; Rigby, 2004). Selle tõestuseks on esitatud magnetiit- ja silikaatkerakeste esinemist Gröönimaal 536.–537. aastal tekkinud liustikujääkihtides. Uurijad on leidnud samasuguseid osakesi Põhja-Austraaliast Carpentaria lahe meteoriidikraatrist, oletades et 536. aasta sündmus on selle kraatri tekitanud taeva-keha langemise tagajärg (Abbott jt, 2008). Seega näib, et loodusteadlased pole veel aastate 536.–537. kliimaanomaalia põhjustajas üksmeelele jõudnud.

536. AASTA SÜNDMUSE KIRJALIKUD ALLIKAD

Enne 536.–537. aasta sündmuse 'avalikustamist' loodusteadlaste poolt, polnud ajaloolased ja filoloogid vanu kirjalikke allikaid uurides selle sündmusele tähelepanu pööranud. Peagi selgus, et mainitud sündmuse ja selle mõju kohta on juba omal ajal nii mõndagi kirja pandud. Vahemeremaade hilisantiiksetes kirjalikes allikates leiduvaid teateid on põhjalikult uurinud klassikaline filoloog Antti Arjava. Alljärgnevalt esitan lühidalt olulisemad allikad põhiliselt tema artiklite ja alliktekstide tõlgete põhjal inglise keelde (Arjava, 2006).

Esmalt mainitagu patriarh Michael Süürialase poolt 12. sajandil kirja pandud kroonikat, milles on kasutatud allikana arvatavasti Efesose Johannese kaduma läinud käsikirja, mis kirjeldab 6. sajandi sündmusi: "Aastal 848 [536/7] - - - päike tumenes ja see varjutus kestis poolteist aastat, st kaheksateist kuud. Päeval see paistis umbes neli tundi, ka siis jättis päikesevalgus vaid kahvatu varju. Kõik kuulutasid, et päikesevalgus ei taastu enam kunagi endiseks. Viljad ei küpsenud ja veinil oli hapnenud viinamarjade maitse." (Arjava, 2006: 78–79)

Eelmisest sõltumatu allikas on idarooma ajaloolane Caesarea Procopius, kes oli sündmuse toimudes ise Aafrikas ja Itaalias. Ta mainib lühidalt, et päikesevalgus oli aasta aega tuhm keiser Justinianuse kümnendal valitsemisaastal [536/7] (Arjava, 2006: 79).

Kolmas tähtis iseseisev kirjalik allikas on anonüümne süüriakeelne kroonika, mis on kirja pandud arvatavasti 6. sajandil: “Ja [paavst Agapetus] tuli koos nendega Konstantinoopolisse märtsis aastal 14 [536] - - -. Agapetuse saabudes oli kogu linn hämmingus; maa liikus ja kõik, mis selle peal oli; ja päike hakkas tuhmuma päeval ja kuu öösel, samal ajal kui meri vahutas rahutult alates selle aasta 24. märtsist kuni järgmise, 15. aasta [537] juuni 24. päevani.” Arjava (2006: 79) märgib selle süüriakeelse teksti mitmetähenduslikkust ja tõlkimise keerukust: selles mainitud sõnad vahutavast merest võib tõlkida ka hoopis nii “niiskuse hägustatud” või “märgadesse pilvedesse mähitud”. Maa liikumine võis tähendada maavärinat või hoopis paavsti saabumisest põhjustatud rahvarahutusi. Samas kroonikas mainitakse veel, et aasta 15 [536/7] oli Mesopotaamias erakordselt külm (Arjava, 2006: 79)

Neljandaks olulisemaks allikaks on gootide kuningate teenistuses olnud kõrge Rooma ametnik Magnus Aurelius Cassiodorus. Ta kirjutas aastal 536 või 537, et päikesevarjutus on kestnud peaaegu aasta ja see on hävitanud saagi. Lõpuks autor tõdes: “Nõnda oli meil talv tormideta, kevad soojuseta, suvi kuumuseta”. Ta mainis ka, et tähed taevas ei paistnud enam, päike paistis sinisena ning et see ei vabanenud sumuloori tagant äkki, vaid tasapisi ja selleks kulus terve aasta (Cassiodorus: 179). Cassiodoruse tekstide hulgas leidub ka kuningas Theodahadi korraldus jagada nälgivatele itaallastele vilja Liguuria ja Veneetia provintsid (Arjava, 2006: 80).

Viienda põhjalikuma allikana on Arjava (2006: 80) esile toonud Bütsantsi ametniku ja kirjamehe Lüüdia Johannese kreeka keelse teose “Ennetest”, mille ta kirjutas Konstantinoopolis arvatavasti 540. aastatel. See on ainus omaaegne kirjutis, kus nähtuse olemust seletada püüti: Johannes pidas selleks pilvedesse kogunenud niiskust: “Euroopale ennustab suuri raskusi päikese tuhmumine, kui õhk küllastub niiskusest, nagu juhtus hiljuti lõppenud 14. indiktsiooninaastal [535/6], kui Belisarius oli konsul, mistõttu saak hävis halbade aegade tõttu. Seda on näidanud sündmused ise, sest palju sõdu puhkes läänes ja sealne hirmuvalitsus kukutati, samas nii India ja Pärsia riik, nagu ka kõik sisemaal paiknevad hommikumaad pääsesid raskustest. Polnud ka oodata, et see õnnetus puudutaks neid alasid, sest mainitud niiskus tekkis just Euroopas vee haihtudes ja pilvedeks kogunedes, mis peitsid päikesevalguse nõnda, et see ei paistnud ega pääsenud sellest tiheadast ainest läbi”.

Et päikesevalguse tuhmumine põhjustas näljahäda, selgub mitmetest allikatest. Paavstide elulugude kogumiku *Liber pontificalis* andmetel tabas hirmus näljahäda ‘kogu maailma’ aastal 537. Milano piiskopi andmetel olevat emad nälja pärast oma lapsi söönud (Arjava, 2006: 80).

Teated ikaldustes ja näljahädadest ei piirdunud üksnes Vahemeremaadega. Põhja-Hiina allikates mainitakse külmust, kuivust, ikaldusi ja näljahädasid aastate 535 ja 538 vahelisel ajal (Houston, 2000; Keys, 1999: 149–160, 281–284).

536.–537. AASTA KLIIMAKATASTROOFI JÄLJED EESTI PALÜNOLOOGILISES ALLIKMATERJALIS

Käsitletaval sündmusel pidi olema erakordne mõju ilmastikule ja seeläbi inimestele. See on jälgitav vaadeldaval perioodil vähenenud inimõhus loodusele peaaegu kõikides Eesti õietolmudiagrammides, mis katavad I aastatuhandet pKr, mida on uuritud piisava resolutsiooniga ja milles on jälgitud inimõhu indikaatoreid.

Tallinna lähedal Maardu järve setetes ja Saha-Loo rabaturbas on pärast tugevat ekspansiooni nooremal rooma rauaajal jälgitav selge inimõhu vähenemine rahvasterännuaja teisel poolel (Veski, 1996, 1998: 42; Veski, Lang, 1995). Harjumaa lõunaosas Keava linnuse ja Linnaaluste asulakoha kõrval oleva Verevainu soo õietolmudiagrammides saavutasid viljelusmajanduslikule püüasustusele osutavad märgid oma suurima osatähtsuse nooremal rooma rauaajal ja rahvasterännuajal ning kahanesid kiiresti eelviikingiajal (Heinsalu jt, 2003; Heinsalu, Veski, 2010: jn 4). Kagu-Eestis Rõuge Tõugjärve ümbruses on haritava maa osakaal rooma rauaaja lõpul ja rahvasterännuaja algul varasemaga võrreldes märgatavalt suurenenud, kuid umbes 6. sajandil see vähenes järsult, et pärast seda jälle kiiresti taastuda (Poska jt, 2008: 538, jn 4). Eesti kagunurgas asetseva Hino järve õietolmudiagramm näitab inimõhu vähenemist loodusele 7.–9. sajandil (Laul, Kihno, 1999). Põhja-Viljandimaalt Parika rabast saadud õietolmudiagrammi põhjal võib järeldada, et eelrooma rauaajast kuni viikingiaja algupooleni toimus siin üldise trendina aeglane inimõhu kasv, kuid kahel korral, 5. ja 9. sajandi paiku, on inimõhu märgatavalt vähenenud (Niinemets jt, 2002). Saaremaa Surusoo diagrammis võib inimõhu ajutist vähenemist märgata I at keskpaigas (vt Veski, 1996: jn 2).

Suiradiogrammide dateeringud on paratamalt ebatäpsed. Esmalt annab radiosüsiniku meetod dateeringuks umbes saja aasta pikkuse ajavahemiku, teiseks dateeritakse sel meetodil vaid osa kihte. See suurendab ebatäpsust, sest turba pealekasv või setteprotsessid ei pruugi olla toimunud ühtlase kiirusega. Seetõttu on täiesti võimalik, et kui inimõhu vähenemine erinevates õietolmudiagrammides näib toimuvat millalgi vahemikus 5.–7. sajand, on see kõigis neis põhjustatud ühest katastroofilisest sündmusest – teadaolevate andmete põhjal siis 536.–537. aasta ilmastikuanomaaliast ning selle põhjustatud ikaldusest, näljahädast ning nendega kaasnenud suurest suremusest.

EELVIIKINGIAJA LEIUTÜHJUS EESTIS

Kui vaadelda 536.–537. aasta sündmuse taustal arheoloogilist materjali, siis torkab esmalt silma kinnismuististe ja juhuleidude arvu suhteliselt järsk kahanemine kõikjal Eestis pärast rooma rauaaega. Ilmne on eelkõige kalmete hulga vähenemine: kui nooremast rooma rauaajast (200–450 pKr) on teada u 150 kalmet, siis rahvasterännuajast on neid alla 60 (Tvauri, 2012: jn 187). Kuid see tendents kattub sisuliselt tüüpiliste tarandkalmete ehitamise lõppemisega, mis ei pruukinud tuleneda rahvastiku vähenemisest, vaid muutustest matmiskombestikis (Lang, 1996: 270). Samas ilmuvad just rahvasterännuajal arheoloogilisse ainesesse varem peaaegu nähtamatud linnused ja asulakohtad, ehkki algul on neid teada ainult üksikuid. Mõnes piirkonnas, nt Põhja-Eesti rannikul Vihasoo ja Palmse ümbruses, teatakse rooma rauaaja järgsest ajast peamiselt põllujäänuseid (Lang, 2000: 221). Samas Saaremaal, kus rooma rauaajast on teada ainult kaks kalmet (vt Lang 2007: jn 116), rahvasterännuajal kalmete hulk suureneb. Samuti on Läänemaal, kus noorema rooma rauaaja kalmed seni üldse puuduvad, kuid rahvasterännuaegeid (450–550 pKr) on suhteliselt arvukalt. Oletus rahvarvu vähenemisest üleminekul rooma rauaajast rahvasterännuajale ei leia tuge ka palünooloogiast: Loode-Eesti õietolmudiagrammides on just rahvasterännuajal jälgitav tugev inimõju (Veski, Lang, 1996; Koot, 2004) ning ka Saaremaal on inimõju rahvasterännuajal tugevam kui eelneval perioodil (Veski, 1996).

Eelviikingiaegseid (550–800 pKr) matuseid on avastatud enam-vähem sama palju kui rahvasterännuaegeid – umbes 65 kohas (vt Tvauri, 2012: jn 188). Enamasti on tegemist üksikute tolleaegsete esemetega mõnes varasemas või hilisemas kalmes. Vaid Kagu-Eesti idaosas võib täheldada matmispaikade arvu kasvu: kui rahvasterännuajast neid teada ei ole, siis miljalgi 6. sajandi teisel poolel hakati rajama põletusmatustega kääpaid. Märke eelviikingiaegsest kasutusest on umbes tosinal linnusel ning reeglina on tegemist pelgalt sellesse ajastusse jäävate radiosüsinikudateeringute või/ja näiteks linnuste viikingiaegse kasutusperioodi leiurohkusega võrreldes väga väheste leidudega. Eelviikingiajal kasutatud asulakohti on seni teada neli, samas kui rahvasterännuaja asulakohti on kolm.

Eeltoodud numbrid näitavad, et rahvasterännuaja ja eelviikingiaja muististe arv on enam-vähem sama suur. Kui aga arvestada, et rahvasterännuaja pikkus käesolevas uurimuses kasutatava kronoloogia järgi on 100 aastat (450–550 pKr) ja eelviikingiaja pikkuseks 250 aastat (550–800), siis tuleb nentida, et eelviikingiaegseid muistiseid on Eestist teada suhteliselt vähem kui rahvasterännuaegeid. Eriti keeruline on esile tuua muistiseid ja isegi esemeid, mida saaks ajandada 6. sajandi teise ja 7. sajandi esimesse poolde: suurem osa eelviikingiaegseid kinnismuistiseid ja esemeleide pärineb 7. sajandi teisest poolest või 8. sajandist. Seega võib tõdeda, et õietolmudiag-

rammides avalduv inimõju vähenemine langeb laias laastus kokku muististe hulga vähenemisega rahvasterännuaja lõpul ja eelviikingiaja algul. Arvatavasti võib seda seletada rahvaarvu märgatava vähenemisega umbes 6. sajandi keskel.

Rahvaarvu taastumine katastroofieelseni näib Eesti alal kestvat vähemalt paarsada aastat. Sellega seoses tuleb mainida, et 536.–537. aasta tolmuloor sattus ajastusse, mil pärast nn Rooma kliimaoptimumi (umbes 100 eKr – 200 pKr) – suhteliselt sooja ja põllumajandusele soodsat perioodi Euroopas – kliima jahenes. Jahedam ajastu kestis kuni umbes aastani 800 (vt McCormick jt, 2012). See asjaolu võimendas kindlasti 536. aasta katastroofi mõju inimasustusele.

536.–537. AASTA KLIIMAKATASTROOFI MÕJU SKANDINAAVIAS

Rahvastikukadu 6. sajandil ilmneb selgelt Rootsi palünoloogilises ja arheoloogilises aineses. Asustuse taandumine on jälgitav Mälari ümbruses (Ambrosiani, 1964: 210; Sporrang, 1971: 197). Upplandi maakonna alal tühjeneb 6. sajandil elanikest umbes 75% asulakohtadest (Göthberg, 2007: 440), kusjuures hiljem uutesse kohtadesse asutatud uusi asulaid oli drastiliselt vähem. Tegemist oli suurima asustusmuutusega Rootsis 6000 aasta jooksul; paljudel juhtudel olid kohad, kus asustus nüüd kadus, olnud pidevas kasutuses üle 1000 aasta (Gräslund, Price, 2012: 431–432).

Kesk-Rootsi sisemaal paikneva Västmanlandi maakonna alal on 65st uuritud kalmest, kuhu hakati matma juba eelrooma rauaajal, valdavasse enamusse matmine lõpetatud 6. sajandil. Vaid viide kalmesse on matmine jätkunud (Löwenbourg, 2010: V).

Botnia lahe rannikul paiknevas Hälsinglandi maakonnas näitab õietolm selget inimõju vähenemist umbes aasta 500 paiku (Engelmark, Wallin, 1985). Mitmel pool Norrlandis jäeti asulad maha ja senine avatud kultuurmaastik kasvas suures osas kinni (Selling, 1979; Engelmark, Wallin, 1985; Badou, 1995).

Östergötlandi maakonna alal on 5.–6. sajandil jälgitav nii inimõju kahenemine õietolmudiagrammides kui ka kinnismuististe hulga vähenemine (Widgren, 1983; Ramqvist, 1990: 20).

Väga selgelt on rahvastikukadu jälgitav Ojamaal, kus 6. sajandil jäi igaveseks tühjaks 10–15% majapidamistest, mida tõestavad vähemalt 1900 hüljatud taluaset (Stenberger, 1955; Carlsson, 1979, 1983). Talude tühjenemine on rahvasterännuaja lõpul jälgitav ka Ölandil (Stenberger, 1933; Herschend, 1988: 64; Ramqvist, 1990: 20). Ühtlasi avaldub see Ölandi õietolmudiagrammides järsu inimõju vähenemisena 6. sajandil (Königsson, 1968: jn 103). Laial alal Rootsis, eriti aga Ojamaal, Ölandil ja Rootsi mandriosas Blekinge maakonnast lõunas kuni Hälsinglandi ja Medelpadini

põhjas on õietolmudiagrammides tõendeid lühiajalisest rohumaade metsastumisest (Pedersen, Widgren, 2011: 60–62)

Lõuna-Norras kukkus 6. sajandil kokku kogu senine asustusstruktuur ja ühiskonnakorraldus: arvukad talud jäeti maha, rikkad matused muutusid haruldaseks, lõppes keraamika valmistamine, rauatootmine vähenes märgatavalt ning senised kaubandussuhted katkesid (Solberg, 1998: 247). Mitmes piirkonnas Norras on 6. sajandi keskpaigale järgneva aja kalmeleide teada 90–95% vähem, kui sellele eelnevast perioodist (Solberg, 2000: 180–182, 197–198).

Taanis näitavad palünoloogilised andmed haritava maa vähenemist ja metsastumist I aastatuhande keskel, kusjuures samaaegselt kahanes järsult ka asulate ja kalmete hulk, kuid peitleidude hulk suurenes (Hamerow, 2002: 109–112). Ainelise kultuuri põhjal otsustades näivad 6. sajandi teisel poolel ja 7. sajandil Taani senised väliskontaktid täielikult katkevat, taastudes alles 8. sajandil (Nielsen, 2006: 48).

Muististe leviku jm põhjal tehtud hinnangu järgi võis Skandinaavia rahvaarv 6. sajandil väheneda umbes poole võrra (Gräslund, Price, 2012: 433). On isegi oletatud, et 6. sajandi katastroof kujundas Skandinaavias täiesti uue võimu- ja majandussüsteemi, uute asulate ja monumentaalsete kalmetega uutes kohtades. Lõpptulemusena oli 6. sajandi rahvastikukatastroof eelduseks skandinaavlaste hilisemaks ekspansiooniks viikingiajal (Gräslund, Price, 2012: 434).

536.–537. AASTA KLIIMAKATASTROOFI MÕJU LÄÄNEMERE LÕUNA JA KAGURANNIKU PIIRKONNAS

Läti ja Leedu puhul ei ole võimalikku 6. saj teisel poolel toimunud rahvaarvu vähenemist arheoloogiakirjanduses mainitud. Sellegipoolest paistab nii kinnismuististest kui ka esemelisest kultuurist selgelt välja, et ka balti hõimude alal oli 6. sajandi teine pool ja 7. sajand suurte asustus- ja kultuurimuutuse ajaks (vt Tautavičius, 1996; Asaris jt, 2008: 48). Ka näitavad palünoloogilised uuringud, et 6. sajandil jäi inimõju Leedu alal varasemast selgelt nõrgemaks (Simniškytė jt, 2003: 283; Stančikaitė jt, 2004: 27).

Põhja-Poolas, Läänemere lõunarannikul Stažki raba õietolmudiagrammist kaob inimõju 6. sajandi keskel lühikeseks ajaks täielikult, seda pärast umbes 3000 aastat pidevat inimõju avaldumist (Gałka jt, 2013: jn 3). Kirde-Poolas tehtud palünoloogilistest uuringutest ilmneb samuti inimõju ajutine vähenemine 6. sajandil (Kupryanowicz, 2007: 62).

Ka Põhja-Saksamaal Friisimaa põhjaosas ja Schleswig-Holsteinis on I at keskel arheoloogiliste jäänuste põhjal otsustades jälgitav selge asustuse taandumine (Hamerow, 2002: 112j).

536. AASTA KATASTROOFI MÕJU SOOMES JA PÕHJA-FENNOSKANDIAS

Huvitaval kombel näib, et 6. sajandi rahvastikukriisivööndist vahetult põhja ja ida pool püsis rahvaarv stabiilne või toimus isegi asustuse laienemine uutele aladele. Põhja-Norras, kus laialdaselt elatuti meresaadustest, näib majanduslik, ühiskondlik ja poliitiline olukord olevat stabiilne läbi kogu 6. sajandi (Myhre, 2000: 35; Gräslund, 2007: 112). Lõuna-Norras, kus rannikuasustust tabas 6. sajandi teisel poolel kollaps, jätkus mägedes ja metsastes piirkondades jaht, kalastus, mägikarjamaade kasutamine ning isegi rauatootmine (Myhre, 2000: 35).

Põhja-Rootsis Ångermanlandi maakonna põhjaosas Botnia lahe ranniku-piirkonnas tekkis just 6. sajandil põllumajanduslik püsiasiustus (Wallin, 2004; Pedersen, Widgren, 2004: 310j). Upplandi põhjaosas tehtud palünooloogiliste uuringute põhjal näib põlluharimine 6. sajandi keskpaigas küll vähenevat, kuid kõikidest õietolmudiagrammidest see siiski ei ilmne (Randheden, 2007: 117). Samas näiteks Vendeli piirkonnas hakkas inim-mõju loodusele tugevnema just vendeliajal, st 550–800 pKr (Karlsson, 1999). Ahvenamaal tekkis püsiasiustus alles umbes 600. aasta paiku, millele järgnes asustusekspansioon kuni 11. sajandi alguseni (Roeck Hansen, 1991: 54, 156j, 166).

Enamikul Soome alal pole 6. sajandil arheoloogilises ega palünooloogilises aineses rahvastikukriisi märgata. Edela-Soomes ilmuvad õietolmudiagrammidesse hoopis püsivad märgid alepõllundusest isegi sellistes piirkondades, kus varem oli maaharimisest ainult juhuslikke jälgi (vt Tolonen, 1983; Vuorela, 1985). Ka Sise-Soomes ilmuvad mitmes kohas Hämes ja Savos õietolmudiagrammidesse esimesed märgid järjepidevast alepõllundusest just 6.–7. sajandil (Tolonen, 1978; Simola jt, 1985). Tuleb aga arvestada, et Lõuna-Soomes sai maaharimisest põhielatusala alles rooma rauaaja lõpul ja ka siis kombineerituna karjakasvatuse ja püügimajandusega, sest kliimaatilised tingimused ei võimaldanud siin rauaaegse agrotehnika juures ainuüksi maaharimisest elatuda (Solantie, 2005). Ka näiteks eelviikingi- ja viikingiajal kasutusel olnud Eura Luistari kalmistule maetute hammaste seisukorra põhjal on järeldatud, et nende toidus leidis väga vähe süsivesikuid, mis viitab viljatoodete vähesele osakaalule toidus (Salo, 2005: 83, 112). Seega mõjutas viljaikaldus Soomes rahvastikku vähem kui lõuna pool, kus põlluharimine oli peaaegu ainsaks toidu tootmise viisiks.

Põhja-Fennoskandias, kus põlluharimisega üldse ei tegeletud, on võimatu 6. sajandi paiku mingit muutust märgata. Kui rooma rauaajal oli see piirkond lõimitud lõunapoolsete maaharijatega ühte kaubandussüsteemi, mis on arheoloogiliste leidude kaudu nähtav, siis juba nimetatud perioodi lõpul kadusid siit nii keraamika kui ka metallesemed, kuigi radiosüsinikudateeringute põhjal otsustades asustus täielikult ei hääbunud (Carpelan 2003, 60j). Võib arvata, et põllukultuure tabanud ikaldus mõjutas sealset püügi-

kultuuri vähem kui lõunapoolseid maaharijaid. Loode-Vene aladel on samuti I aastatuhande keskpaiga rahvastikukriisi võimatu tuvastada, sest ka I aastatuhande esimese poole leide on seal äärmiselt vähe.

Seega on 6. sajandil jälgitav äkiline rahvastikukadu Põhja-Euroopas võõndis, mis hõlmas vähemalt tänapäeva Eesti, Läti, Leedu, Ojamaa ja Ölandi, Rootsi kesk- ja lõunaosa, Lõuna-Norra, Taani, Põhja-Saksamaa ja Poola põhjaosa. Need olid I at keskpaigas kõige põhjapoolsemad alad Mandri-Euroopas, kus põllundus oli muutunud ainuvalitsevaks elatusalaks – olenevalt piirkonnast elatuti neil aladel intensiivsest ale- või söödiviljelusest või saadi suurem osa saagist juba väetatavatelt põlispõldudelt. Rahvastikukadu avaldub neil aladel asulate tühjenemises, põldude ja rohumaade metsastumises, matmispaikade või matuste arvu vähenemises, peitleidude arvu kasvus ning lõpuks ka olulistes muutustes ainelises kultuuris. Viimane väljendub kas või selles, et rahvasterännuaja lõpp on nii Rootsi, Norra kui ka Soome arheoloogilises kronoloogias paigutatud aasta 550 kanti.

KAS KA JUSTINIANUSE KATK JÕUDIS PÕHJALASSE?

Ajaloost on teada, et näljahädad sillutasid teed nakkushaiguste levikule. Eesti varauusaja puhul on selgelt nähtav, kuidas näljahädadadele järgnes katku- või muu epideemia, mis tappis massiliselt näljast nõrgestatud inimesi (vt Palli, 1996). Ka nt Soome 1866.–1868. näljahäda ohvrite otseseks surmapõhjuseks oli mõni nakkushaigus (Turpeinen, 1983).

Aastail 541–544 möllas Ida-Rooma aladel pandeemia, mis tappis suure osa elanikkonnast, sadu tuhandeid inimesi ainuüksi pealinnas Konstantinopolis, paljudes piirkondades suri katku üle poole inimestest (Little, 2006). Juba enne 536.–537. aasta kliimakatastroofi ilmsiktulekut on Põhja-Euroopas arheoloogilises allikmaterjalis 6. sajandil ilmneva rahvastikukriisi kohta oletatud, et selle põhjustas Justinianuse katk (nt Gräslund, 1973; Seger, 1982; Herschend, 1988: 64).

Teisalt on esitatud põhjendatud kahtlusi selle kohta, kas Justinianuse katk ikka võis Põhja-Euroopasse jõuda (nt Harrison, 1993). Kirjalike allikate põhjal on järeldatud, et kõnealuse pandeemia põhjustas bakter *Yersinia pestis* (Sallares, 2007). See elutseb rotikirbus (*Xenopsylla cheopis*), kelle peremeheks on troopilisest Aasiast pärit kodurott (*Rattus rattus*). Inimesele levib katkubakter kirbu vahendusel. Vanim tõend kodurotist Põhjalas on aga alles 11. sajandist (Bågenholm, 1999: 162j ja seal viidatud kirjandus). Viimane asjaolu teeb Justinianuse katku levimise Läänemeremaadesse ebatõenäoliseks, kuid pole siiski täielikult välistatud, et kodurott oli Põhjalas juba varem või et katku kandvad rotikirbud võisid levida koduloomade vahendusel (Seger, 1982: 192 ja seal viidatud kirjandus). Kui Justinianuse katku pandeemia ka Eesti alale ei levinud, võib siiski arvata, et 536. aasta

järgselt olid inimeste otseseks surma põhjuseks nakkushaigused, mille levikule näljahäda soodsa pinnase löi.

MAAILMALÕPP JA OHVRID JUMALATELE

Tõenäoliselt ei suuda me ette kujutada, mis mõju avaldas Põhja-Euroopas 1500 aastat tagasi elanud inimestele see, kui päikesest oli taevas näha vaid kuma ja öötaevast kadusid kuu ja tähed. Keegi ei võinud teada, millega on tegemist ja kas endine olukord kunagi taastub. Peagi saagid ikaldusid ja kätte jõudis tappev näljahäda, mis võis kesta mitmeid aastaid.

Sellele, milline võis paista tollal elanud skandinaavlastele 536.–537. aasta sündmus, näib leiduvat üllatavalt sarnane kirjeldus skandinaavlaste eelkristlikus usundis, mis kujutab maailmalõppu (*ragnarök*). Sellest on kirjutanud põhjalikult Rootsi arheoloog Bo Gräslund (2008). Islandil 13. sajandi alguses Snorri Sturlusoni poolt kirja pandud skaldikunsti käsiraamatus, mida tuntakse Noorema Edda nime all ja mis on üheks peamiseks allikaks Põhjala mütolooogia kohta, kirjeldatakse maailmalõpule eelnenud sündmuste hulgas igipikka talve (*fimbulvetr*). Rein Sepa tõlkes kõlab see nii: "... saabub talv, mida hüütakse igipikaks talveks, siis ajab lund kokku igast kaarest, maad võtab vali pakane ja tuuled on tugevad; ei ole kasu enam päikesest; neid talvesid tuleb kokku kolm ega ole suve nende vahel" (Noorem Edda, Gylfaginning: 51). Vanemas Eddas leidub laul "Nägija kuulutus" ("Völuspá"), milles sama sündmuse kirjelduses öeldakse: "... päike on must, - - - kaovad taevalaelt heledad tähed" (Vanem Edda, Völuspá: 56). Otsustavale lahingule, mille käigus hävivad nii inimesed, jumalad kui ka kõik muu olev, järgnes uskumustes maailma taassünd. Ka 6. sajandi keskel jätkus elu pärast katastroofi ja selle üle elanud inimesed kujundasid uue, vanast erineva asustus- ja kultuuriruumi. Skandinaavia eelkristlikes uskumustes kirjeldatava võimsa talve puhul on uurijad juhtinud tähelepanu asjaolule, et selles kirjeldatakse samalaadseid ilmastikunähtusi, mis on kirja pandud ka 536.–537. aasta sündmustega seoses. Oluline on ka asjaolu, et sellise ilmastikunähtuse kirjeldusele pole teada vasteid muude rahvaste mütolooiates. Oletust, et igipikk talv on 536.–537. aasta sündmuse kajastus, kinnitab ka tähelepanek, et "Völuspá" salmides kirjeldatud aineiline kultuur viitab just 6. sajandi kontekstile, seega võib kogu laulu ennast pidada põhiosas eelviikingiaegseks (Gräslund, Price, 2012: 437). Bo Gräslundi (2008: 99–101) hinnangul võib 536.–537. aasta sündmus kajastuda isegi Kalevalas, kus 47. runos Põhjala emand Louhi päikese ja kuu ära peidab, ülijumal Ukko aga uue päikese ja kuu taevasse paneb.

Õnnetus, nagu ikaldus ja epideemia, võis esile kutsuda tavapärasest suurema religioosse aktiivsuse. On oletatud, et arvukad Skandinaavia maades avastatud 6. sajandi ohvrileiud, eelkõige ohverdatud kuldesemed, on seotud 536.–537. aasta sündmusega ja sellega kaasnenud ulatusliku ikalduse ja

näljahädaga. Kuigi kuldesemeid ohverdati seal juba rahvasterännuaja algul, on eriti palju kuldohvreid teada just rahvasterännuaja lõpust. Taani arheoloog Morten Axboe (1999, 2001a,b) on oletanud, et 536.–537. a sündmus ja selle mõjud vallandasid Skandinaavias erakordse religioosse aktiivsuse, mille tulemusel enamik lagunevast Rooma riigist Skandinaaviasse toodud kullast sattus ohvritena veekogude põhja ja rabadesse. See tingiski Põhjala 'kuldse ajastu' lõppemise, nii et eelviikingiajale vastavaks perioodiks muutus kuld ülimalt haruldaseks.

Eesti eelkristlikest uskumustest kirjapanekud puuduvad, kuid sama nähtust, mida kirjeldab M. Axboe, võib väiksemas mõõtkavas täheldada ka Eesti alal. Ka siin äratub sellega seoses tähelepanu asjaolu, et 19-st 5.–8. sajandi peitvarast (vt Oras, 2009, 2010) tervelt 13 on selliseid, mille puhul on täiesti võimalik, et need on ohverdatud aastate 536–537 paiku (Tvauri, 2012: 297).

Baltimaade kõige suuremaks I aastatuhandest pKr pärinevaks ohvrileiuks on Kokumuiža leid Kuramaalt, mis leiti niiskelt madalikult turbast. Kokku saadi sealt enam kui 1100 raudeset: odaotsi, kirveid, kõplaid, mõõgakatkeid jm. Peale nende koguti sealt veel 40 pronks- ja hõbeehet ning umbes 60 kivieset (tuluskivid, luisud). Kokumuiža leid on ajandatud 5. saj lõppu (Moor, 1929: 71j; Urtāns, 1977: 138–145), see dateering võimaldab oletada, et need esemed ohverdati mingisse veekogusse 536. aasta sündmusega seoses.

536.–537. AASTA KLIIMAANOMAALIA MÕJU RUKKIKASVATUSELE

Rukis (*Secale cereale*) oli meie ajaarvamise alguseks levinud kogu Euroopas, kuid seda umbrohuna odra- ja nisupõldudel. Viljakasvatuse levides põhja poole hakkas rukki kui kõige külmakindlama kultuurkõrrelise osakaal saagis kasvama, kuni lõpuks hakati rukist kasvatama omaette kultuurina (Barker, 1985: 46; Behre, 1992; Lempiäinen, 2005: 110).

Seniste palünooloogiliste uuringute tulemused näitavad, et peaaegu kõikjal Eestis algas rukki kui omaette põllukultuuri kasvatamine 6. sajandi paiku pKr (Poska jt, 2004: 47), Loode-Eestis ehk ka pisut varem, rooma rauaajal (Veski, Lang, 1996; Heinsalu, Veski, 2010: 87, jn 4). Otepää kõrgustiku põhjaosas paikneva Ala-Pika järve õietolmuspektrisse ilmus rukis enam-vähem püsivalt aasta 600 paiku (Laul, Kihno, 1999: 12). Haanja kõrgustikul algas ulatuslik metsade taandumine ja rukkikasvatuse levik samuti I aastatuhande keskpaigas: Plaani Külajärve ümbruses umbes 500 pKr, Verijärve ümbruses 700 pKr (Niinemets, 2008: 66). Ka näiteks Skånes hakkas 8. sajandil rukki osatähtsus odra arvelt kiiresti suurenema (Pedersen, Widgren, 2004: 383).

Pole võimatu, et rukkikasvatuse levikut kiirendas 536.–537. aasta kliimakaastroof, mille tõttu võis põldudel ikalduda nii odra- kui ka nisusaak, samas

kui rukis vähenõudlikuma taimena vähemalt seemnevilja tootis. Nii saadi esmakordselt ulatuslikul alal puhas rukkiseeme. See hüpotees vajab siiski kontrollimist koostöös loodusteadlastega.

KOKKUVÕTE

536. aastal tabas Maad erakordne nähtus, mille käigus halvenes atmosfääri läbipaistvus. Vahemeremaades paistis päikesest päevalgi vaid kuma. Õhutemperatuuride languse ja vähese valguse tulemusel oli taimekasv pärsitud mitmel aastal. Sündmus kajastub nii looduses (sel aastal moodustunud puude aastarõngastes ja liustikujää kihtides) kui ka omaaegsetes kirjalikes allikates. Puude aastarõngastest võib järeldada, et puude juurdekasv oli pärsitud mitmel aastal, sh 540. aasta paiku. 541. aastal vallandus katkupandeemia, nn Justinianuse katk, mis tappis suure osa elanikkonnast Vahemeremaades ja Lääne-Euroopas.

Arheoloogilisest ja palünoloogilisest allikmaterjalist nähtub, et 536.–537. a sündmus põhjustas ka Eesti alal viljaikalduse, mis võis korduda mitme aasta jooksul. Sellest vallandus hirmus näljahäda, mis põhjustas rahvastiku-katastroofi, millest taastumiseks ja endise rahvaarvuni jõudmiseks kulus kogu eelviikingiaeg ja viikingiaja varasem pool vähemalt kuni 9. sajandi lõpuni.

Rahvastikukadu Eesti alal 6. sajandil on jälgitav nii palünoloogiliste kui ka arheoloogiliste tõendite abil. Mitmetes õietolmudiagrammides on näha oluline inimõju vähenemine loodusele vaadeldaval perioodil. Rooma rauaaja arvukate ja rahvasterännuaja suhteliselt arvukate kinnismuististe ja esemeleidude kõrval on eelviikingiaeg, eelkõige selle esimene pool peaaegu leiutuhi. Seda võib tõlgendada kui rahvaarvu drastilist vähenemist lühikese aja jooksul. Samaaegselt on jälgitav rituaalsete peitleidude kuhjumine just 6. sajandisse, mida võib seletada erakordselt ebasoodsa ilmastiku põhjustatud ohvriandidena.

Vaadeldaval sündmusel võis olla oluline mõju ka majandusele. Võimalik, et 536. aastal alanud ikalduse mõjul hävisid Eesti alal tollal peamise teraviljana kasvatatud odra saagid, kuid rukis külmakindlama liigina andis seemet. Seega võib oletada, et rukis sai Eesti alal I aastatuhande teisel poolel peamiseks kultuurkõrreliseks 536.–537. aasta sündmuse tagajärjel.

536. aasta katastroofi mõju oli sedavõrd suur, et seda võib pidada Eesti muinasaja periodisatsiooni oluliseks piirdaatumiks. Kuna olemasolevad ajandusmeetodid ei võimalda Eesti rauaaja muistiseid ja esemeleide reeglina dateerida täpsemalt kui umbes veerand sajandi täpsusega, võiks eelnevast lähtudes pidada vanema ja noorema rauaaja piirdaatumiks umbes aastat 550. See oleks sobilik ühtlasi seeteõttu, et nii muutuks ka Eesti rauaaja periodiseering sünkroonseks Skandinaaviamaades ja Soomes kasutatavaga.

KIRJANDUS

Abbott, D. H., Biscaye, P., Cole-Dai, J., Breger, D. (2008). Magnetite and Silicate Spherules from the GISP2 Core at the 536 A.D. Horizon. American Geophysical Union, Fall Meeting 2008, abstract#PP41B-1454.
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2008AGUFMPP41B1454A>

Ambrosiani, B. (1964). Fornlämningar och bebyggelse: studier i Attundalands och Södertörns förhistoria. Almqvist & Wiksell, Uppsala.

Ambrosiani, B. (1984). Settlement expansion – settlement contraction: a question of war, plague, ecology or climate? Mörner, N. A., Karlén, W. (eds.). Climate Changes on a Yearly to Millennial Basis. Reidel, Dordrecht, 241-247.

Arjava, A. (2006). The mystery cloud of 536 CE in the Mediterranean sources. Gerstel, S. E. J. (ed.). Thresholds of the Sacred: Architectural, Art Historical, Liturgical, and Theological Perspectives on Religious Screens, East and West. Dumbarton Oaks Research Library and Collection, Washington, DC, 73-94.

Asaris, J., Muižnieks, V., Rādiņš, A., Virse, J., Žeiere, J. (2008). Kurši senatnē = Couronians in Antiquity. Latvijas Nacionālais vēstures muzejs, Rīga.

Axboe, M. (1999). The year 536 and the Scandinavian gold hoards. *Mediev. Archaeol.*, 43, 186-88.

Axboe, M. (2001a). Amulet pendants and a darkened sun: on the function of the gold bracteates and a possible motivation for the large gold hoards. Magnus, B. (ed.). Roman Gold and the Development of the Early Germanic Kingdoms: Aspects of Technical, Socio-Political, Socio-Economic, Artistic and Intellectual Development, AD 1–550. Symp. in Stockholm 14–16 November 1997. Stockholm, 119-136. (KVHAA konferenser; 51).

Axboe, M. (2001b). Året 536. *Skalk*, 4, 28-32.

Badou, E. (1995). Norrlands forntid – ett historiskt perspektiv. (Kungl. Skytteanska samfundets handlingar; 45).

Baillie, M. G. L. (1994). Dendrochronology raises questions about the nature of the AD 536 dust-veil event. *The Holocene*, 4, 212-217.

Baillie, M. (1999). Exodus to Arthur: Catastrophic Encounters with Comets. B.T. Batsford, London.

Barker, G. (1985). Prehistoric Farming in Europe. Cambridge University Press.

Behre, K.-E. (1992). The history of rye cultivation in Europe. *Veg. Hist. Archeobot.*, 1, 3, 141-156.

- Bågenholm, G. (1999). Arkeologi och språk i Norra Östersjöområdet: en kritisk genomgång av de senaste årets försök att finna synteser mellan historisk lingvistik och arkeologi. Göteborg. (Gotarc Series B. Arkeologiska skrifter; 12).
- Carlsson, D. (1979). Kulturlandskapets utveckling på Gotland: en studie av jordbruks- och bebyggelseförändringar under järnåldern. Kulturgeografiska institutionen vid Stockholms universitet, Visby. (Meddelande, B49).
- Carlsson, D. (1983). Bygd och gård på Gotland under vikingatiden. Jansson, I. (red.). Gutar och vikingar. Statens Historiska Museum, Stockholm, 11-23.
- Carpelan, C. (2003). Inarilaisten arkeologiset vaiheet. Lehtola, V.-P. (toim.). Inari Aanaar: Inarin historia jääkaudesta nykypäivään. Inarin kunta, 28-95.
- Cassiodorus = The Variae of Magnus Aurelius Cassiodorus Senator. (1992). Translated with notes and introduction by S. J. B. Barnisch. Liverpool University Press, Liverpool.
- Dull, R., Southon, J. R., Kutterolf, S., Freundt, A., Wahl, D., Sheets, P. (2010). Did the TBJ Ilopango eruption cause the AD 536 event? American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, abstract #V13C-2370. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010AGUFM.V13C2370D>
- Engelmark, R., Wallin, J.-E. (1985). Pollen analytical evidence for Iron Age agriculture in Hälsingland, central Sweden. Backe, M. *et al.* (eds.). In honorem Evert Baudou. Umeå, 353-366. (Archaeology and Environment; 4).
- Fabricius, D. (2010). Dionysius Fabriciuse Viljandi kiriku praosti Liivimaa ajaloo lühiülevaade neljas osas aastast tuhat ükssada viiskümmend kaheksa kuni aastani 1610. Tõlk. Jaan Unt. Johannes Esto Ühing.
- Ferris, D. G., Cole-Dai, J., Reyes, A. R., Budner, D. M. (2011). South Pole ice core record of explosive volcanic eruptions in the first and second millennia A.D. and evidence of a large eruption in the tropics around 535 A.D. *J. Geophys. Res.*, 116, D17308.
- Gałka, M., Miotk-Szpiganowicz, G., Goslar, T., Ješko, M., van der Knaap W. O., Lamentowicz, M. (2103). Palaeohydrology, fires and vegetation succession in the southern Baltic during the last 7500 years reconstructed from a raised bog based on multi-proxy data. *Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol.*, 370, 209-221.
- Gräslund, B. (1973). Äring, näring, pest och salt. *Tor: tidskrift för nordisk fornkunskap*, XV, 274-293.

- Gräslund, B. (2007). Fimbulvintern, Ragnarök och klimatkrisen år 536–537 e.Kr. *Saga och Sed*, 93-123.
- Gräslund, B., Price, N. (2012). Twilight of the gods? The „dust veil event“ of AD 536 in critical perspective. *Antiquity*, 86, 428-443.
- Gunn, J. D. (2000). AD 536 and its 300-year aftermath. Gunn, J. D. (ed.). *The Years Without Summer: Tracing AD 536 and Its Aftermath*. Oxford, 5-20. (BAR, International Series; 872).
- Göthberg, H. (2007). Mer än bara hus och gårdar. – H. Göthberg (toim.). *Hus och bebyggelse i Uppland*. Uppland Museum, Uppsala, 403-447. (Arkeologi E4 i Uppland; 3).
- Hamerow, H. (2002). *Early Medieval Settlements: The Archaeology of Rural Communities in Northwest Europe 400–900*. Oxford University Press.
- Harrison, D. (1993). Plague, settlement and structural change at the dawn of the Middle Ages. *Scandia*, 59, 1, 15-48.
- Heinsalu, A., Veski, S. (2010). Palaeological evidence of agricultural activity and human impact on the environment at the ancient settlement centre of Keava, Estonia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 59, 1, 80-89.
- Heinsalu, A., Veski, S., Heinsalu, H., Koot, H. (2003). Turbakihiid Keava linnuse veerel mäletavad muistseid olusid. *Eesti Loodus*, 11, 38-42.
- Herschend, F. (1988). Bebyggelse och folkevandringstid på Öland. Näsman, U., Lund, J. (red.). *Folkevandringstiden i Norden: en krisetid mellem ældre og yngre jernalder. Rapport fra det bebyggelsearkæologisk forskersymposium i Degerhamn, Öland, d. 2.–4. oktober 1985*. Aarhus Universitetsforlag, Århus, 43-66.
- Houston, M. S. (2000). Chinese climate, history, and state stability in A.D. 536. Gunn, J. D. (ed.). *The Years Without Summer: Tracing AD 536 and Its Aftermath*. Oxford, 71-77. (BAR, International Series; 872).
- Jones, E. (2000). Climate, archaeology, history, and the Arthurian tradition: a multiple-source study of two Dark-Age puzzles. Gunn, J. D. (ed.). *The Years Without Summer: Tracing AD 536 and Its Aftermath*. Oxford, 25-34. (BAR, International Series; 872).
- Karlsson, S. (1999). Vegetation history and land use in the Vendel area, Uppland, eastern Sweden. *Laborativ Arkeologi*, 12, 11-24.
- Keys, D. (1999). *Catastrophe: An Investigation into the Origins of the Modern World*. Century, London.
- Keys, D. (2002). Katastroof: uurimus tänapäeva maailma tekkemehhanismidest. Tõlk. A. Reinvald. Sinisukk.

- Koot, H. (2004). Inimmõju ja looduse areng Linnaaluste viikingiaja asula ja Keava linnamäe ümbruses. Bakalaureusetöö. Tallinna Ülikool, Tallinn.
- Kupryanowicz, M. (2007). Postglacial development of vegetation in the vicinity of the Wigry Lake. *Geochronometria*, 27, 53-66.
- Köpp, J. (1929). Andmeid viimasest suurest katkust Lõuna-Eestis aastail 1710–1711. *Ajalooline Ajakiri*, 1, 15-25.
- Königsson, L.-K. (1968). The Holocene History of the Great Alvar of Öland. Uppsala. (*Acta Phytogeographica Suecica*; 55).
- Lang, V. (1996). Muistne Rävåla: muistised, kronoloogia ja maaviljelusliku asustuse kujunemine Loode-Eestis, eriti Pirita jõe alamjooksu piirkonnas, I–II. Eesti Teaduste Akadeemia Ajaloo Instituut, Tallinn. (Muinasaja teadus; 4. Töid arheoloogia alal; 4).
- Lang, V. (2000). Keskusest ääremaaks: viljelusmajandusliku asustuse kujunemine ja areng Vihasoo-Palmse piirkonnas Virumaal. Tallinn. (Muinasaja teadus; 7).
- Lang, V. (2007). The Bronze and Early Iron Ages in Estonia. Tartu University Press. (*Estonian Archaeology*; 3).
- Larsen, L. B., Vinther, B. M., Briffa, K. R., Melvin, T. M., Clausen, H. B., Jones, P. D., Siggaard-Andersen, M.-L., Hammer, C. U., Eronen, M., Grudd, H., Gunnarson, B. E., Hantemirov, R. M., Naurzbaev, M. M., Nicolussi, K. (2008). New ice core evidence for a volcanic cause of the AD 536 dust veil. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L04708.
- Laul, S., Kihno, K. (1999). Viljelusmajandusliku asustuse kujunemisjooni Haanja kõrgustiku kaguveerul. *Eesti Arheoloogia Ajakiri*, 3, 1, 3-18.
- Leimus, I. (2004). Finds of Cufic coins in Estonia: preliminary observations. *Wiadamosci Numizmatyczne*, 2, 178, 153-166.
- Lempiäinen, T. (2005). Ruis rautakauden Suomessa ja Katariinan Kirkkomäen ruisolkipunos. Immonen, V., Haimila, M. (toim.). *Mustaa valkoisella: ystäväkirja arkeologian lehtori Kristiina Korkeakoski-Väisäselle*. Turun yliopisto, 110-118.
- Liedgren, L. (1989). Bebyggelseutvecklingen i Forsa Hälsingland under den äldre järnåldern. *Arkeologi i norr*, 2, 45-81.
- Liiv, O. (1935). Die wirtschaftliche Lage des estnischen Gebietes am Ausgang des XVII. Jahrhunderts. Tartu. (*Õpetatud Eesti Seltsi Toimetised*; 27).
- Liiv, O. (1938). Suur näljaaeg Eestis 1695–1697. Tartu-Tallinn. (*Akadeemilise Ajaloo-Seltsi Toimetised*, IX. *Ajalooline Arhiiv*, III).
- Little, L. K. (ed.) (2006). *Plague and the End of Antiquity: the Pandemic of 541-750*. Cambridge University Press, Cambridge.

- Löwenborg, D. (2010). *Excavating the Digital Landscape: GIS Analyses of Social Relations in Central Sweden in the 1st Millennium AD*. University of Uppsala Press, Uppsala.
- Magnus, B., Myhre, B. (1986). *Forhistorien: fra jegergrupper til høvding-samfunn*. Bokklubben Nye Bøker. (Norges Historie; 1).
- Meinander, C. F. (1977). *Forntiden i svenska Österbotten*. Svenska Österbottens historia, I. Svenska Österbottens landskapsförbund, Vasa, 7-43.
- Miller, V. (1938). *Den stora pesten i Viru-Nigula socken år 1710–1711*. *Svio-Estonica* 1938, 199-207.
- Moora, H. (1929). *Bemerkungen über einige ostbaltische Schmucksachen der jüngeren Eisenzeit, I*. *Õpetatud Eesti Seltsi aastaraamat* 1928, 141-170.
- Myhre, B. (2000). *The early Viking Age in Norway*. Stummann Hansen, S., Randsborg, K. (eds.). *Vikings in the West*. Munksgaard, København. (*Acta Archaeologica*; 71. *Acta Archaeologica supplementa*, II).
- Nielsen, K. H. (2006). *Abundant gold and bad harvests: changes in southern Scandinavian society during the 5th to 7th centuries*. Bertašius, M. (ed.). *Transformatio mundi: The Transition from the Late Migration Period to the Early Viking Age in the East Baltic*. Kaunas University of Technology, Department of Philosophy and Cultural Science, 41-50.
- Niinemets, E., Saarse, L., Poska, A. (2002). *Vegetation history and human impact in the Parika area, central Estonia*. *Proc. Estonian Acad. Sci. Geol.*, 51, 4, 241-258.
- Noorem Edda. *Valik tekste*. Tõlk. Rein Sepp. Eesti Raamat, Tallinn, 1990.
- Näsman, U. (1988). *Den folkvandringstida krisen*. Näsman, U., Lund, J. (red.). *Folkevandringstiden i Norden: en krisetid mellem ældre og yngre jernalder*. Rapport fra det bebyggelsearkæologisk forskersymposium i Degerhamn, Öland, d. 2.–4. oktober 1985. Aarhus Universitetsforlag, Århus, 227-255.
- Näsman, U. (1991). *Det syvende århundrede – ett mørkt tidsrum i ny belysning*. Mortensen, P., Rasmussen, B. M. (red.). *Fra stamme til stat i Danmark, 2: høvdingesamfund og kongemagt*. Højbjerg, 165-180. (*Jysk Arkæologisk Selskabs skrifter*, 22: 2).
- Oras, E. (2009). *Eesti keskmise rauaaja peitvarad*. Magistritöö. Lund, Tartu.
- Oras, E. (2010). *Ritual wealth deposits in Estonian Middle Iron Age material*. *Estonian Journal of Archaeology*, 14, 2, 123-142.

- Palli, H. (1993). The population of Estonia in the last decades of the Swerdisch period. *Acta Universitatis Stockholmiensis. Studia Baltica Stockholmiensia*, 11, 195-208.
- Palli, H. (1996). Eesti rahvastiku ajalugu aastani 1712. Eesti Teaduste Akadeemia, Tallinn. (Academia; 6).
- Palli, H. (2004). Traditional Reproduction of the Population in Estonia in the 17th and 18th Centuries. Eesti Kõngkoolidevaheline Demouuringute Keskus / Interuniversity Population Research Centre. Argo TTP, Tallinn. (RU Series D; 4).
- Pedersen, E. A., Widgren, M. (2004). Järnålder 500 f.Kr.–1000 e.Kr. Jordbrukets första femtusen år 4000 f.Kr.–1000 e.Kr. *Natur och Kultur / LTs förlag*, 237-482. (Det svenska jordbrukets historia, I).
- Poska, A., Saarse, L., Veski, S. (2004). Reflections of pre- and early-agrarian human impact in the pollen diagrams of Estonia. *Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol.*, 209, 1-4, 37-50.
- Poska, A., Sepp, E., Veski, S., Koppel, K. (2008). Using quantitative pollen-based land-cover estimations and a spatial CA_Markov model to reconstruct the development of cultural landscape at Rõuge, south Estonia. *Veg. Hist. Archaeobot.*, 17, 5, 527-541.
- Ramqvist, P. H. (1990). Högom. Riksantikvarieämbetet, Stockholm.
- Randheden, H. (2007). Vegetationsförändringar: markpåverkan och odling-sutveckling i norra Uppland. Hjärthner-Holdar, E. *et al.* (red.). Land och samhälle i förändring: uppländska bygder i ett långtidsperspektiv. Riksantikvarieämbetet UV GAL, Uppsala, 17-117. (Arkeologi E4 Uppland. Studier; 4).
- Rigby, E., Symonds, M., Ward-Thompson, D. (2004). A comet impact in AD 536? *Astron. Geophys.*, 45, 1, 23-26.
- Roeck Hansen, B. (1991). Township and Territory: A Study of Rural Land-Use and Settlement Patterns in Åland c. AD 500–1550. Almqvist & Wiksell, Stockholm. (Acta Universitatis Stockholmiensis. Stockholm Studies in Human Geography; 6).
- Saarse, L., Köningsson, L.-K. (1992). Holocene environmental changes on the Island of Saaremaa, Estonia. Hackens, T. *et al.* (eds.). Estonia: Nature, Man and Cultural Heritage. Proc. of a Round Table Held at Tallinn, April 1991 at the Estonian Academy of Sciences. PACT Belgium, Rixensart, 97-131. (PACT, 37).
- Sallares, R. (2007). Ecology, evolution, and epidemiology of plague. Little, L. K. (ed.). *Plague and the End of Antiquity: The Pandemic of 541–750*. Cambridge University Press, Cambridge, 231-289.

- Salo, K. (2005). What ancient human teeth can reveal? Demography, health, nutrition and biological relations in Luistari. Pro gradu-työ. Helsingi Ülikool.
- Seger, T. (1982). The plague of Justinian and other scourges: an analysis of the anomalies in the development of Iron Age population in Finland. *Fornvännen*, 77, 3, 184-197.
- Selinge, K.-G. (1979). *Agrarian Settlements and Hunting Grounds: A Study of the Prehistoric Culture Systems in a North Swedish River Valley*. Akademilitteratur, Stockholm. (Theses and Papers in North-European Archaeology; 8).
- Seppel, M. (2008). Näljaabi Liivi- ja Eestimaal 17. sajandist 19. sajandi alguseni. Tartu Ülikooli Kirjastus, Tartu. (Dissertationes historiae Universitatis Tartuensis; 15).
- Simniškýtë, A., Stančikaitë, M., Kisilienë, D. (2003). Continuity and discontinuity in the Juodonys archaeological complex. Lang, V., Tamla, Ü. (koost. ja toim.) *Arheoloogiga Läänemere maades: uurimusi Jüri Seliranna auks*. Tallinn, Tartu, 267-286. (Muinasaja teadus, 13).
- Simola, H., Grönlund, E., Huttunen, P., Uimonen-Simola, P. (1985). Pollen analytical evidence for Iron Age origin of cup-stones in the Kerimäki area. *Iskos*, 5, 527-531.
- Solantie, R. (2005). Aspects of some prehistoric cultures in relation to climate in southwestern Finland. *Fennoscandia Archaeologica*, XXII, 28-42.
- Solberg, B. (1998). Settlement and social structure in Norway in the Migration Period (AD 400–550). *Archaeologia Baltica*, 3, 235-250.
- Solberg, B. (2000). *Jernalderen i Norge ca 500 f. Kr. – 1030 e. Kr.* Cappelen Forlag, Oslo.
- Sporrong, U. (1971). *Kolonisation, bebyggelseutveckling och administration: studier i agrar kulturlandskapsutveckling under vikingatid och tidig medeltid med exempel från Uppland och Närke*. Gleerup, Lund.
- Stančikaitë, M., Kisilienë, D., Strimaitienë, A. (2004). Vegetation response to the climatic and human impact changes during the Late Glacial and Holocene: case study of the marginal area of Baltija Upland, NE Lithuania. *Baltica*, 17, 17-33.
- Stenberger, M. (1955). *Vallhagar: A Migration Period Settlement on Gotland, Sweden*. Munksgaard, Copenhagen, Stockholm.
- Stothers, R. B. (1984). Mystery cloud of AD 536. *Nature*, 307, 344-345.
- Stothers, R. B. (1999). Volcanic dry fogs, climate cooling, and plague pandemics in Europe and the Middle East. *Climatic Change*, 42, 4, 713-723.

- Stothers, R. B. (2000). Climatic and demographic consequences of the massive volcanic eruption of 1258. *Climatic Change*, 45, 361-374.
- Stothers, R. B., Rampino, M. R. (1983). Volcanic eruptions in the Mediterranean before A.D. 630 from written and archaeological sources. *J. Geophys. Res.*, 88, 6357-6371.
- Tarvel, E. (1966). Adramaa XIII sajandil. *Eesti NSV Teaduste Akadeemia toimetised. Ühiskonnateadused*, 1, 39-40.
- Tarvel, E. (1992). Asustus ja rahvastik. Kahk, J. jt (toim.). *Eesti talurahva ajalugu, I. Eesti Teaduste Akadeemia Ajaloo Instituut, Olion, Tallinn*, 136-147.
- Tautavičius, A. (1996). Vidurinis geležies amžius Lietuvoje (V–IX a.). *Piliu tyrimu centras "Lietuvos pilys", Vilnius*.
- Tolonen, M. (1978). Palaeoecology of annually laminated sediments in Lake Ahvenainen, S. Finland, I: pollen and charcoal analyses and their relation to human impact. *Ann. Bot. Fenn.*, 15, 3, 177-208.
- Tolonen, M. (1983). Late Holocene vegetational history in Salo, Pukkila, SW Finland, with particular reference to human interference. *Ann. Bot. Fenn.*, 20, 2, 157-168.
- Traufetter, F., Oerter, H., Fischer, H., Weller, R., Miller, H. (2004). Spatio-temporal variability in volcanic sulphate deposition over the past 2 kyr in snow pits and firn cores from Amundsenisen, Antarctica. *J. Glaciol.*, 50, 137-146.
- Turpeinen, O. (1986). Nälkä vai tauti tappoi? Kauhunvuodet 1866–1868, Suomen historiallinen seura, Helsinki.
- Tvauri, A. (2012). *The Migration Period, Pre-Viking Age, and Viking Age in Estonia*. Tartu University Press. (Estonian Archaeology; 4).
- Urtāns, V. (1977). Senākie depoziiti Latvijā (līdz 1200. g.). *Latvijas PSR Vēstures muzejs, Zinātne, Rīga*.
- Vanem Edda. Islandi keelest tõlk. Rein Sepp. Tänapäev, Tallinn, 2008.
- Vasar, J. (1933). Talurahva asustus ja liiklemine hilisel Rootsi ajal. *Eesti rahva ajalugu, II. Tartu*, 927-948.
- Veski, S. (1996). History of vegetation and human impact in northern Saaremaa, Estonia, based on the biostratigraphy of the Surusoo Mire: preliminary results. Hackens, T. *et al.* (eds.). *Coastal Estonia: Recent Advances in Environmental and Cultural History. PACT Belgium, Rixensart*, 57-66. (PACT; 51).

- Veski, S. (1998). Vegetation History, Human Impact and Paleogeography of West-Estonia: Pollen Analytical Studies of Lake and Bog Sediments. *Societas Upsaliensis Pro Geologia Quaternaria*, Uppsala. (STRIAE; 38).
- Veski, S., Lang, V. (1995). Human impact in the surroundings of Saha-Loo, north Estonia, based on a comparison of two pollen diagrams from Lake Maardu and Saha-Loo bog. Robertsson, A.-M. *et al.* (eds.). *Landscapes and Life: Studies in Honour of Urve Miller*. PACT Belgium, Rixensart, 297-304. (PACT; 50).
- Veski, S., Lang, V. (1996). Prehistoric human impact in the vicinity of Lake Maardu, northern Estonia: a synthesis of pollen analytical and archaeological results. Hackens, T. *et al.* (eds.). *Coastal Estonia: Recent Advances in Environmental and Cultural History*. PACT Belgium, Rixensart, 189-204. (PACT; 51).
- Vuorela, I. (1985). On the vegetational and agricultural history of Perniö, SW Finland: results of pollen and ash residue analyses and ¹⁴C-datings. *Ann. Bot. Fenn.*, 22, 2, 117-127.
- Wallin, J.-E. (2004). History of sedentary farming in Ångermanland, northern Sweden, during the Iron Age and Medieval period based on pollen analytical investigations. *Veg. Hist. Archeobot.*, 5, 4, 301-312.
- Widgren, M. (1983). Settlement and Farming Systems in the Early Iron Age: A Study of Fossil Agrarian Landscapes in Östergötland, Sweden. Almquist & Wiksell, Stockholm. (*Acta Universitatis Stockholmiensis*. Stockholm Studies in Human Geography; 3).
- Widgren, M. (2012). Climate and causation in the Swedish Iron Age: learning from the present to understand the past. *Geografisk Tidskrift = Danish Journal of Geography*, 112, 2, 126-134.
- Wohletz K. H, 2000. Were the Dark Ages triggered by volcano-related climate changes in the 6th century? *EOS Trans Amer Geophys Union* 48(890), F1305.
- Ynglingite saaga (2003). Tõlk. ja komment. T. Jonuks. Tartu: Eesti Kirjandusmuuseum, Tartu.
- Young, B. K. (2000). Climate and crisis in sixth-century Italy and Gaul. J. D. Gunn, J. D. (ed.). *The Years Without Summer: Tracing AD 536 and Its Aftermath*. Oxford, 35-42. (BAR, International Series, 872).

RIIGI TEADUSPREEMIADE KOMISJONI KOOSSEIS

Kinnitatud Vabariigi Valitsuse korraldusega 08.11.2012 nr 466

ESIMEES

Richard Villems akadeemik, Eesti Teaduste Akadeemia president

LIIKMED

Ülle Jaakma Eesti Maaülikooli teadusprorektor

Jaak Järv akadeemik, Tartu Ülikooli professor

Valter Lang akadeemik, Tartu Ülikooli professor

Ülo Langel Stockholmi Ülikooli professor

Irja Lutsar Tartu Ülikooli professor

Lauri Mälksoo Tartu Ülikooli professor

Ergo Nõmmiste akadeemik, Tartu Ülikooli professor

Anu Realo Tartu Ülikooli psühholoogia instituudi osakonnajuhataja

Martin Zobel akadeemik, Tartu Ülikooli professor

Tõnis Timmusk Tallinna Tehnikaülikooli professor

Enn Tõugu akadeemik, TTÜ Küberneetika Instituudi juhtivteadur

Jaan Undusk akadeemik, Underi ja Tuglase Kirjanduskeskuse direktor

Rein Vaikmäe TTÜ Geoloogia Instituudi professor

Urmas Varblane akadeemik, Tartu Ülikooli professor

Andres Öpik Tallinna Tehnikaülikooli professor

EESTI VABARIIGI
TEADUSPREEMIAD

2013

TALLINN, 2013