

EESTI
VABARIIGI
TEADUSPREEMIA
2025





Riigi teaduspreemiate laureaadid 19. veebruaril 2025 Eesti esindushoones. Tagumises reas vasakult: Martin Klöker, René Mõttus, Marina Semtšenko, Kreete Lüll, Oliver Aasmets, teaduste akadeemia president Mart Saarma, Joosep Pata, Valdis Laan ja Kerli Mõtus. Esimeses reas vasakult: Kristi Viiding, Malle Krunks, Ilona Oja Acik, Elin Org, kultuuri- ja haridusminister Kristina Kallas, Kertu Liis Krigul, Nicolae Spalatu ja Atanas Katerski. Esireas: Leo Mõtus. Foto: Arno Mikkor

Koostajad Terje Tuisk, Krista Tamm
Keeletoimetaja Karol Rummi
Küljendaja Ulla Säre

ISSN 2674-3019

©Eesti Teaduste Akadeemia 2025

SISUKORD

Leo Võhandu LEO VÕHANDU MITMEKESINE ELU	4
Valdis Laan POOLRÜHMAD, RINGID JA KATEGOORIAD	14
Joosep Pata KUIDAS TEHISARU OSAKESTEFÜÜSIKA MÕÕTMISI TÄPSEMAKS JA EFEKTIIVSEMAKS TEEB	27
Marina Semtšenko TAIMEDE JA MULLAORGANISMIDE INTERAKTSIOONIDE MITMEKESISUS JA ROLL ÖKOSÜSTEEMIDE TOIMIMISES	42
Ilona Oja Açıık, Malle Krunks, Nicolae Spalatu, Atanas Katerski ANISOTROOPSETEL ÕHUKESKILELISTEL ABSORBER- MATERJALIDEL PÕHINEVAD PÄIKESEPATAREID: DISAIN JA SÄÄSTLIKE TEHNOLOOGIATE ARENDUS	56
Elin Org, Kreete Lüll, Oliver Aasmets, Kertu Liis Krigul SOOLE MIKROBIOOMI SEOSSED TERVISEGA – LIUS PERSPEKTIIV TERVISEUURINGUTES	76
Kerli Mõtus PIIMALEHMADE PRAAKIMINE JA HUKKUMINE KAASAEGSETES KÕRGETOODANGULISTES PIIMAKARJADES – MULTIDISTSIPLINAARNE UURING	95
René Mõttus ISIKSUSEPSÜHHOLOOGIA KASVAB SUUREMAKS	111
Kristi Viiding, Martin Klöker EESTI-, LIIVI- JA KURAMAA HILISHUMANISTLIK KIRJANDUS: TEEKOND VAIKIVATEST METSADEST POEETILISTE SALUDENI	124

LEO VÕHANDU MITMEKESINE ELLU

Leo Võhandu (Tallinna Tehnikaülikool)

Teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest

Alustuseks võib öelda, et minu elu on olnud väga mitmekesine. See võib tunduda uskumatu, kui inimene on töötanud peaaegu terve elu ainult ühes kohas. Aga nii see on.

Mitmekesisus algas juba lapsepõlves. Minu isa oli raudteeülem ja nii pidime elama nii Öötlas, Reolas kui Aiamaal, enne kui lõpuks Tartusse jõudsime. Selle juurde kuulus lisaks koolis käimisele loomulikult ka maatöö ning seente korjamine kokkuostu viimiseks. Seenel käimine on olnud minu hobi terve elu ja metsa on kaasa võetud nii oma poeg kui ka lapselapsed.

Sellest ajast pärineb ka üks imelik oskus, mida enamikul inimestest ei ole. Et rong Aiamaal ei peatunud, siis õpetas raudteelasest isa mulle, kuidas sõitvast rongist niimoodi maha hüpata, et pärast ninali ei kukuks. Ja nii me igal õhtul Tartust tulles sealt rongi pealt maha kalpsasime. See on küll oskus, millega tänapäeval enam midagi peale hakata ei ole.



Vasakul: Õnnelik lapsepõlv. Foto: erakogu

All: Leo koos väikevend Tiiduga. Foto: erakogu



Seenel käimine oli tekitanud armastuse metsa vastu ja nii kaalusin ma ka metsanduse õppimist. Aga et kooli lõpetasin hõbemedaliga, sest ainus neli minu tunnistusel oli algebra, siis tuli seda juurde õppima minna ülikooli matemaatikateaduskonda.

Tänu keskkoolis selgeks õpitud kiirkirjale käisin ma ülikooli õpetatud nõukogus väitekirjade kaitsmisi protokollimas. See suurendas minu erialast mitmekesisust oluliselt, sest siis nägin, millega tegelevad teised erialad. Sedasorti teadmine on minu hilisemas tegevuses tublisti kasuks tulnud.

Lõpetasin ülikooli 1952. aastal ja astusin kohe pärast seda aspirantuuri. Tõsi küll, minu juhendaja Gunnar Kangro pani mind dilemma ette, kas teha teadust või mängida malet. Kuigi males olin täiesti arvestataval tasemel ja tulnud ka koolinoorte meistriks, valisin siiski teaduse ja kaitsesin oma väitekirja 1955. aastal.

Informaatikuks saamise tee algas aga 1956. aasta kolmekuningapäeval, kui mind ja Ülo Kaasikut saadeti Moskvasse vaatama, mis asi on elektronarvuti ja mida sellega teha saab. Pärast Moskvast tagasitulekut asutati Tartu Riikliku Ülikooli (praegune Tartu Ülikool) juurde biofüüsika labor ja mina sain selle teaduslikuks juhendajaks. Hankisime sinna ka arvuti, et teha biofüüsika jaoks vajalikke arvutusi. Veel viiekümnendate lõpus sai ülikool ka arvuti Urall, mis võttis praeguses Eesti Üliõpilaste Seltsi majas enda alla terve saali ja mille elektronlambid lõbusalt vilkusid.

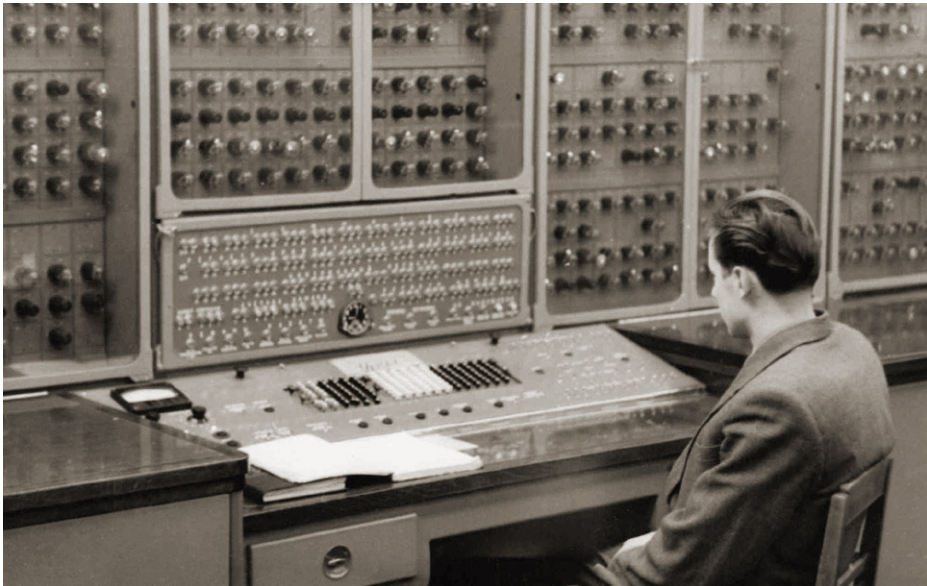


Meie tegevus biofüüsika laboris viis aga selleni, et meie juures hakkasid konsultatsioonis käima ka teiste valdkondade inimesed, eelkõige bioloogia, meditsiini ja spordi erialalt. Konsultatsioonid kasvasid kiiresti üle teadustööde juhendamiseks.

Leo Vöhandu noore õppejõuna 1950. aastatel. Foto: erakogu



Leo koolipõlves. Foto: erakogu



1959. aastal jõudis Tartu Riikliku Ülikooli esimene arvuti, mille valis Moskvast välja Leo Vöhandu. Foto: erakogu



Üleliiduline suvekool Elbil. Foto: erakogu

Esimene kaitsja oli Roman Nõvandi¹ ujumise stardihüppe optimeerimise teemaga. Tema töö tulemusel oleks stardihüppe arvelt saanud võita umbes pool sekundit. Spordikomitee ei pidanud seda eriliseks saavutuseks, sest arvati, et küll selle distantsil tasa ujub. Tänapäevase ujumise puhul aga oleks tegemist terve igavikuga. Järgnesid metsamees Toomas Frey², kes kahe nädala pärast kaitses sama tööga ka doktorikraadi, ning Hans Gross³, kelle klassikalise suusasammu mudeli järgi on treeninud kõik meie tipud ja loodud metoodika järgi töötas aastaid Tallinna Pedagoogilise Instituudi (praegune Tallinna Ülikool) juures sportliku kinesioloogia labor. Spordi teemadel kaitsesid väitekirjad veel Aadu Krevald (kettaheite matemaatiline mudel), Arved Vain⁴ (saltohüppe mudel), Ethel Kudu⁵ (naisvõimlemise rütmika) ja Heino Tiik⁶ (üliõpilaste kehaehitus ja tervis).

Loomulikult käisid meie juures ka meedikud, kellest kaitsesid kraadi Maidu Luts (laste EKG peendiagnostika), Jüri Saarma⁷ (insuliinravi remissiooni ennustamine skisofreenia puhul), Jüri Teras⁸ (algloomade kaudu leviv infektsioon), E. Hiie (vähiuuringud), Valve Erika Saarma⁹ (autoimmunoloogia),

¹ Nõvandi, R. 1964. Stardihüppe efektiivsuse määramise ja ujumisliigutuste õigeaegse alustamise kontrolli metoodikast. Kandidaadiväitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon. 3. köide, N–Sap, lk 172–173. TTEÜ, avaldatud elektrooniliselt 2013, <http://www.digar.ee/id/nlib-digar:258666>

² Frey, T. 1967. Taimekoosluste klassifitseerimise matemaatilis-fütotsöonoloogilistest meetoditest. Kandidaadiväitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon. 1. köide, A–Ki, lk 277. TTEÜ 2000.

³ Gross, H. 1967. Kandidaadiväitekiri käsitles libisammu modelleerimist suusatamisliigutuste efektiivsuse määramiseks ja tehnika täiustamiseks. (Käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon. 1. köide, A–Ki, lk 310. TTEÜ 2000.

⁴ Vain, A. 1970. Liigutuste biomehaanikast toeta olekus. Kandidaadiväitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon, 4. köide, Sar–Y. Lisa, lk 1005–1006. TTEÜ 2013, <http://www.digar.ee/id/nlib-digar:258668>

⁵ Kudu, E. 1963. Muusika osatähtsusest liigutusvilumuste kujunemisel kunstilises võimlemises. Kandidaadiväitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon. 2. köide, KJ–M, lk 132–133. TTEÜ 2005.

⁶ Tiik, H. 1964. Eesti NSV üliõpilaste kehalisest arengust ja tervise seisundist. Kandidaadiväitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon. 4. köide, Sar–Y. Lisa, lk 753–754. TTEÜ 2013, <http://www.digar.ee/id/nlib-digar:258668>

⁷ Saarma, J. 1964. О действии инсулинового лечения на анимальную и вегетативную нервную систему больных шизофренией. Meditsiinidoktori väitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon. 3. köide, N–Sap, lk 1355–1357. TTEÜ, avaldatud elektrooniliselt 2013, <http://www.digar.ee/id/nlib-digar:258666>

⁸ Teras, J. 1964. Eksperimentaalne uurimus *Trichomonas vaginalis*'e patogeensusest. Kandidaadiväitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon. 4. köide, Sar–Y. Lisa, lk 732–733. TTEÜ 2013, <http://www.digar.ee/id/nlib-digar:258668>

⁹ Saarma, V. E. 1971. Роль аутоиммунологических механизмов в патогенезе заболеваний щитовидной железы. Meditsiinidoktori väitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon. 3. köide, N–Sap, lk 1360–1361. TTEÜ, avaldatud elektrooniliselt 2013, <http://www.digar.ee/id/nlib-digar:258666>

Toomas Karu¹⁰ (individuaalne korrelatsioonitee) ja Vootele Meipalu¹¹ (müoomi mudel).

Pääsu polnud ka juristidest – Ilo Sildmäe¹² (Eesti mõisamajanduse mudel), Ando Leps¹³ (kuritegevuse analüüs ja ennustamine), Hillar Randalu¹⁴ (juriidiline infosüsteem ja noorte kuritegevuse analüüs).

Arvutiasjanduse tudeerimine Moskvast ei jäänud viimaseks stažeerimiseks. Hoolimata sellest, et küberneetika oli Nõukogude Liidus kuulutatud ebateaduseks, saadeti meid 1964. aastal koos Ülo Kaasikuga õppima Ameerika Ühendriikidesse (!). Täiendasin end Chicago ülikoolis bioloogilise matemaatika komitees.



1966. aastal tulin tööle tollasesse Tallinna Polütehnilisse Instituuti (praegu Tallinna Tehnikaülikool).

Rein Pikati šarž Leo Vöhandust (1965–1966). Erakogu

Instituudi majandusteaduskonda loodi majandusliku informatsiooni mehhaniseeritud töötlemise organiseerimise kateeder. Keeruline nimi ja kuulumine majandusteaduskonna alla olid uudse struktuuriüksuse loomise põhjendamiseks vältimatud. See oli aeg, mil oli palju kõikvõimalikke piiranguid, reegleid ja muud bürokraatiat, kuid nendega õnnestus üsna hästi hakkama saada. Hankisime nii

¹⁰ Karu, T. 1967. Приложение корреляционного анализа при изучении воздействия повторных силовых нагрузок на гемодинамику у юных спортсменов. Kandidaadväitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon. 1. köide, A–Ki, lk 578–579. TTEÜ 2000.

¹¹ Meipalu, V. 1964. Emakamüoomi kliinik ja steroidhormoonide ainevahetus. Kandidaadväitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon. 2. köide, KJ–M, lk 577. TTEÜ 2005.

¹² Sildmäe, I. 1968. Разложение феодализма и генезис капитализма в Эстонии XVIII века. Doktoriväitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon, 4. köide, Sar–Y. Lisa, lk 241–242, TTEÜ 2013, <http://www.digar.ee/id/nlib-digar:258668>

¹³ Leps, A. 1982. Имитационное моделирование социальной обусловленности преступности в крупном регионе. Kandidaadväitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon. 2. köide, KJ–M, lk 370–371. TTEÜ 2005.

¹⁴ Randalu, H. 1978. Эффективность применения информационно-поисковых систем в предупреждении правонарушений несовершеннолетних. Kandidaadväitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon. 3. köide, N–Sap, lk 977–978. TTEÜ, avaldatud elektrooniliselt 2013, <http://www.digar.ee/id/nlib-digar:258666>



Leo Võhandu jõudu katsumas
Tartu Riikliku Ülikooli ja
Tallinna Polütehnilise Instituudi
arvutuskeskuste vahelistel spordi-
võistlustel. Foto: erakogu



Tallinna Polütehnilises Instituudis toimusid regulaarsed bridživõistlused.
Foto: erakogu

Eestist kui tervest Nõukogude Liidust lepingulisi töid, mis andsid õppejõududele tuntava palgalisa ja tugevdasid seost praktiliste vajadustega ning millest kasvas välja ka hulk teadustöid. Nende vajaduste põhjal loodi ka aruannete generaator-süsteem SHODI ja monotoonsete süsteemide teooria klasteranalüüsiks¹⁵, mis olid aluseks järgmiste lepinguliste tööde täitmiseks.

Bürokraatiaga toimetulemisel oli veel üks suur roll. Pärast Ameerikast tagasi-tulekut hakkasin korraldama bridžiturniire. Kuuekümnendate lõpus kuulutati mäng kodanlikuks igandiks ja keelati ära. Käisin siis partei keskkomitee propa-gandaosakonna juhatajaga rääkimas, mille tulemus oli see, et Eestis võis bridži mängida, samal ajal kui mujal Nõukogude Liidus oli see keelatud. Bridž on tore mäng, mis õpetab mittetäieliku informatsiooni olukorras mõistlike otsuste tegemist. Sellest on kasu nii elus kui teaduses. Mängisin pikalt ka ise ja võitsin peotäie medaleid, nende hulgas ka Eesti meistritiitli.

Loomulikult jätkus teadustööde juhendamine. Infosüsteemide alal kaitsesid kraadi Jaak Tepandi¹⁶, Toomas Mikli¹⁷ ja Jüri Laast-Laas, translaatorite loomisest Aare Vooglaid, Hanno Rohtla (süntaksi vigade töötlemine translaatorite loomise süsteemis), Marge Lepp¹⁸ ja Donald Liib. Neile lisandusid Jossif Mullat¹⁹ (monotoonset süsteemid), Peeter Kitsnik (loogiline projekteerimine), Ahto Lõhmus²⁰ (kõrgkooli õppeedukuse ennustamine), Kuldev Ääremaa²¹ (juriidiline infosüsteem Jurios).

¹⁵ Võhandu, L., Kuusik, R., Lind, G. 2018. Monotoonset süsteemid ja nende rakendused. Tallinna Tehnikaülikool, <https://www.digar.ee/arhiiv/et/raamatud/128945>

¹⁶ Tepandi, J. 1982. Võrk-andmebaasisüsteemidel põhinevate probleem-orienteeritud andme-töötlussüsteemide uurimine ja väljatöötamine. Kandidaadiväitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon, 4. köide, Sar–Y. Lisa, lk 730–731, TTEÜ 2013, <http://www.digar.ee/id/nlib-digar:258668>

¹⁷ Mikli, T. 1978. Исследование и разработка структур данных для информационных систем административного типа. Kandidaadiväitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon. 2. köide, KJ–M, lk 623, TTEÜ 2005.

¹⁸ Lepp, M. 1991. Инструментальные средства производства проблемно ориентированного программного продукта. Kandidaadiväitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon. 2. köide, KJ–M, lk 365, TTEÜ 2005.

¹⁹ Mullat, J. 1973. Самообучение машин как задача выделения эталонов в образах. Kandi-daadiväitekiri, <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/641f1de4-df67-44f1-a255-19ac183b273f>

²⁰ Lõhmus, A. 1974. Комплекс методов сбора и обработки информации для решения некоторых задач управления учебно воспитательным процессом ВТУЗа. Kandidaadi-väitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon. 2. köide, KJ–M, lk 481–482, TTEÜ 2005.

²¹ Ääremaa, K. 1981. Размытая модель документального информационного поиска. Kandidaadiväitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon, 4. köide, Sar–Y. Lisa, lk 1439, TTEÜ 2013, <http://www.digar.ee/id/nlib-digar:258668>

Majandusteaduste kraadi kaitsesid Teodor Lutškovski²², Enn Õunapuu²³, Ilmar Pärtelpoeg (majandusliku informatsiooni organiseerimise põhimõtted tootmise automatiseeritud juhtimissüsteemi tingimustes), Rein Kuusik ja Aare Renzer²⁴.

Koos Eesti vabanemisega tekkisid uued võimalused. Euroopa Liidu kõrgharidusprogrammi TEMPUS toel tegime koostööd paljude Lääne-Euroopa ülikoolidega, lõime uusi õppekavu ning täiendasime olemasolevaid uute ainetega. Samuti tuli käima lükata Tiigrihüpe, mille nõukogus olin. Aastatuhande alguses vedasin Euroopa Liidu projekti THINK, mis oli mõeldud puuetega inimeste väljaõppeks ja töölerakendamiseks.

Loomulikult jätkus ka juhendamine, kus uues kaitsjate laines olid Lea Elmik²⁵, Ahto Buldas²⁶, Tanel Alumäe²⁷, Toomas Kirt²⁸, Tarmo Veskioja²⁹, Karin Lindroos³⁰.



Tiigri Tegija autasu 2009. aastast.
Foto: Krista Tamm

²² Lutškovski, T. 1984. Использование структурных методов для создания информационных систем. Doktoriväitekiri, <https://www.etis.ee/portal/mentorships/display/c543a768-cac1-41dd-868c-08cc82786b01>

²³ Õunapuu, E. 1984. Sotsiaal-majanduslike seoste selgitamise interaktiivsete statistiliste meetodite väljatöötamine. Doktoriväitekiri, <https://www.etis.ee/portal/mentorships/display/7ab92829-83bd-4d4c-937c-9d319bde4ef1>

²⁴ Renzer, A. 1988. Информационные аспекты интерактивного анализа хозяйственной деятельности предприятия“. Doktoriväitekiri (käsikiri). Vt ka Eesti teaduse biograafiline leksikon. 3. köide, N–Sap, lk 1151, TTEÜ, avaldatud elektrooniliselt 2013, <http://www.digar.ee/id/nlib-digar:258666>

²⁵ Elmik, L. 1992. Informational Modelling of a Communication Office. Kandidaadväitekiri. Tallinna Tehnikaülikool, infotehnoloogia teaduskond, informaatikainstituut, <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/e3c393ce-ab93-4c32-ada0-32097e7e52a3>

²⁶ Buldas, A. 1999. Graafi struktuuri algebraline käsitus. Doktoriväitekiri. Tallinna Tehnikaülikool, <https://www.etis.ee/portal/mentorships/display/e8e9d4e5-91e3-4a80-b0be-e17f8f8f4691>

²⁷ Alumäe, T. 2006. Suure sõnavaraga eestikeelse kõnetuvastuse meetodid. Doktoriväitekiri. Tallinna Tehnikaülikool, <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/4633ad51-572c-4d07-90c6-1e52ed8180bb>

²⁸ Kirt, T. 2007. Concept formation in exploratory data analysis: case study of linguistic and banking data. Doktoriväitekiri. Tallinna Tehnikaülikool, <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/15f52287-d95b-4d6d-83af-885781abe97b>

²⁹ Veskioja, T. 2005. Stable marriage problem and college admission. Doktoriväitekiri. Tallinna Tehnikaülikool, <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/858db251-ba1c-4360-b62c-1cee8ddb7f9a>

³⁰ Lindroos, K. 2008. Mapping Social Structures by Formal Non-Linear Information Processing Methods: Case Studies of Estonian Islands Environments. Doktoriväitekiri. Tallinna Tehnikaülikool, <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/cbcl1a5dd-9ddf-451c-8a84-26018507afe0>



Leo Võhandu Tallinna Tehnikaülikooli infotehnoloogia kateedris koos selle juhataja Rein Jürgensoniga. Foto: erakogu

Lisaks sellele pidasin loenguid nii Tallinna Tehnikaülikoolis kui ka mitmel pool mujal, sh välismaal. Seda tegevust pandi ilmselt tähele ja nii antigi mulle Valgetähe IV klassi teenetemärk (2001) ja ka Eesti teaduse populariseerimise auhind (2007).

Töötaja lõpupoole ma enam loenguid ei pidanud, kuid kord nädalas olid doktori-seminarid, kus doktorandid tegid ettekandeid ja probleeme arutasime üheskoos. Sealt tuli ka hulk uusi kaitsjaid – Kenneth Geers³¹ (küberturvalisus), Andre Veski³² (territooriumi õiglase jagamise meetodid), Ottokar Tilk³³ (närvivõrgud), Kairit Sirts³⁴ (arvutuslik morfoloogia), Ahti Lohk³⁵ (testmustrite süsteem).

³¹ Geers, K. 2011. Strategic Cyber Security: Evaluating Nation-State Cyber Attack Mitigation Strategies with DEMATEL. Doktoriväitekiri. Tallinna Tehnikaülikool, <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/2202efb5-39c2-4b83-8e54-08eedf8a6297>

³² Veski, A. 2017. Agent-Based Computational Experiments in Two-Sided Matching Markets. Doktoriväitekiri. Tallinna Tehnikaülikool, infotehnoloogia teaduskond, tarkvarateaduse instituut, <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/21176382-0859-4053-a234-1c114fae67ab>

³³ Tilk, O. 2018. Neural Networks for Language Modeling and Related Tasks in Low-Resourced Domains and Languages. Doktoriväitekiri. Tallinna Tehnikaülikool, infotehnoloogia teaduskond, tarkvarateaduse instituut, <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/a71a4968-c060-4645-a0cc-eb385d84d1e1>

³⁴ Sirts, K. 2015. Non-parametric Bayesian Models for Computational Morphology. Doktoriväitekiri. Tallinna Tehnikaülikool, infotehnoloogia teaduskond, informaatikainstituut, <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/37ba5aeb-ca87-483c-973f-e70d8be4cf00>

³⁵ Lohk, A. 2015. A System of Testpatterns to Check and Validate the Semantic Hierarchies of WordNet-type Dictionaries. Doktoriväitekiri. Tallinna Tehnikaülikool, infotehnoloogia teaduskond, informaatikainstituut, <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/9bce1dc4-e072-4592-9fd0-990dc88f7b4e>

Oma teadustegevuse lõpupäevil tegelesin usinalt arvutuslingvistikaga ja viimased tööd ongi sellest vallast. Viimane doktorant kaitses oma töö 2018, kui olin juba 89-aastane.

Need mitmekesised tööd on aidanud minu elu põnevaks teha. Nüüd olen küll süvapensionär, kuid sellelgi pole viga.



Leo Võhandu

Foto: Arno Mikkor

Sündinud 2. septembril 1929 Tartus

1947 Tartu 6. Keskkool (hõbemedal)

1952 Tartu Riiklik Ülikool, matemaatika (BSc, *cum laude*)

1955 Tartu Riiklik Ülikool, matemaatika (PhD)

Töötas 1955–1966 erinevatel ametikohtadel ja kateedrites Tartu Riiklikus Ülikoolis ja 1966–1997 Tallinna Polütehnilise Instituudi (alates 1989 Tallinna Tehnikaülikool) informaatikainstituudis (kateedrijuhataja, vanemteadur, dotsent, professor). Instituudi infotöötluste kateedri rajajaid ja vastava eriala väljakujundajaid, 1981–1987 samas majandusteaduskonna prodekaan. Alates 1997 Tallinna Tehnikaülikooli infotehnoloogia teaduskonna emeriitprofessor. Ühiskondlikult aktiivne juba varasest noorusest – Tartu Riikliku Ülikooli Üliõpilaste Teadusliku Ühingu (ÜTÜ) nõukogu esimees 1959–1961 ja üleliidulise ÜTÜ nõukogu liige 1960–1961, hiljem sihtasutuse Tiigrihüpe asutajaliige ja nõukogu liige. Pälvinud hulgaliselt tunnustusi, sealhulgas Gerhard Rägo nimeline mälestusmedal 1998, Valgetähe IV klassi teenetemärk 2001, Eesti teaduse populariseerimise preemia 2007. Juhendanud ligi 40 kandidaadi- ja doktoritööd, aga ka õpilaste teadustöid.

POOLRÜHMAD, RINGID JA KATEGOORIID

Valdis Laan (Tartu Ülikool)

*Teaduspreemia loodusteaduste valdkonnas tööde tsükli
„Poolrühmad, ringid ja kategooriad“ eest*

Teaduspreemia pälvinud artiklite seerias (viited 1–13) olen uurinud erinevaid algebralisi struktuure. Käesolevas artiklis annan lühikese ülevaate sellest, millega tegeleb algebra üldiselt ja milliseid probleeme on käsitletud mainitud seerias. Artikkel on jagatud kolme ossa. Esimeses osas selgitan lihtsustatult, millega tegeleb abstraktne algebra. See peaks olema loetav keskharidusega inimesele. Teises osas lähen natuke täpsemaks, see osa peaks olema arusaadav inimesele, kes on ülikooli tasemel natuke matemaatikat õppinud. Kolmandas osas kirjeldan täpsetes terminites, kuid definitsioone andmata, mida artiklite seerias tehtud on.

Algebrast väga üldiselt

Algebra võib laias laastus jagada kaheks suureks osaks: lineaaralgebraks ja abstraktseks algebraks. Kuigi rakenduste seisukohalt on lineaaralgebra väga oluline, siis selles artiklis jõuan rääkida ainult abstraktsest algebrast. Kõige lühemalt öeldes on abstraktne algebra selline matemaatika valdkond, mis tegeleb sümbolitega arvutamiseга. Arvutamisreeglid ei pruugi selle juures olla täpselt samasugused nagu arvudega arvutamisel. Näiteks $a + b$ ei pruugi olla sama mis $b + a$. Tulemus sõltub sellest, mida me mõtleme a , b ja tehte $+$ all. Igaks juhuks rõhutan veel kohe alguses, et tegelikult on matemaatikute töö mitte arvutamine, vaid teoreemide tõestamine.

Natuke täpsemalt öeldes uuritakse abstraktses algebras algebralisi struktuure, st tõestatakse teoreeme nende kohta. *Algebraline struktuur* on hulk, mille elementidel on defineeritud üks või mitu tehet, mis peavad rahuldama teatud tingimusi, nii-öelda arvutusreegleid. *Kahekohaline tehe* hulgal A on eeskiri, mis igale hulga A elementide järjestatud paarile (a, b) seab vastavusse mingi elemendi hulgast A . Kui seda tehet tähistada näiteks märgiga $*$, siis paarile (a, b) vastavusse seatavat elementi tähistatakse $a * b$. Näiteks kui A on kõigi värvide hulk ja $*$ on värvide segamise tehe, siis

kollane $*$ sinine = roheline.

Ühel ja samal hulgal võib vaadelda erinevaid tehteid, millel on erinevad omadused. Näiteks võib rääkida tehte kommutatiivsusest ja assotsiatiivsusest. Öeldakse, et kahekohaline tehe $*$ hulgal A on *assotsiatiivne*, kui hulga A kõigi elementide a, b ja c korral

$$(a * b) * c = a * (b * c).$$

Tehet $*$ nimetatakse *kommutatiivseks*, kui kõigi A elementide a ja b korral

$$a * b = b * a.$$

Näiteks täisarvude hulgal võime vaadelda liitmis-, korrutamise- ja lahutamistehtet. Kui liitmis- ja korrutamistehte on nii assotsiatiivsed kui ka kommutatiivsed, siis lahutamistehtel ei ole kumbagi omadust, sest näiteks

$$(9 - 3) - 5 = 1 \neq 11 = 9 - (3 - 5) \quad \text{ja} \quad 5 - 2 = 3 \neq -3 = 2 - 5.$$

Hulka S koos kahekohalise assotsiatiivse tehtega $*$ nimetatakse *poolrühmaks* (ingl *semigroup*). Näiteks täisarvude hulk Z on poolrühm liitmis- ja korrutamistehte suhtes, aga ei ole poolrühm lahutamistehte suhtes. Neid poolrühmi võib kirja panna paaridena: $(Z, +)$ ja (Z, \cdot) .

Kui poolrühmas $(S, *)$ leidub selline element e , et iga S elemendi a korral $a * e = a$ ja $e * a = a$, siis öeldakse, et e on selle poolrühma *ühikelement*. Poolrühma, milles leidub ühikelement, nimetatakse *monoidiks*. Näiteks naturaalarvude hulk $N = \{1, 2, 3, \dots\}$ on monoid korrutamistehte suhtes, kus ühikelemendiks on arv 1. Samas naturaalarvude hulk ei ole monoid liitmisestehte suhtes, sest selles hulgas ei leidu sellist elementi e , et $1 + e = 1$.

Kui tehe $*$ juhtub olema kommutatiivne, siis räägitakse *kommutatiivsest poolrühmast* või *monoidist*. Seega praeguseks oleme tutvunud nelja tüüpi algebraliste struktuuridega: poolrühm, kommutatiivne poolrühm, monoid ja kommutatiivne monoid. Kõiki neid struktuure võib põhimõtteliselt eraldi uurida, aga üldiselt loetakse nende uurimiseiga seotud tegevus poolrühmateooria alla kuuluvaks.

Üks olulisemaid algebralisi struktuure on rühm. Monoidi $(S, *, e)$ nimetatakse *rühmaks*, kui S iga elemendi a jaoks leidub selline element b , et $a * b = e$ ja $b * a = e$. *Abeli rühmaks* (norra matemaatiku Niels Henrik Abeli järgi) nimetatakse rühma, mille tehe on kommutatiivne. Näiteks täisarvude hulk on Abeli rühm liitmisestehte suhtes, kus ühikelemendiks on arv 0.

Algebras vaadeldakse ka selliseid struktuure, kus on mitu kahekohalist tehet. *Ringiks* (täpsemalt *ühikelemendiga ringiks*) nimetatakse hulka R koos kahe kahekohalise tehtega, mida harilikult tähistatakse märkidega $+$ ja \cdot ning kutsutakse selle ringi liitmis- ja korrutamistehteks, ning mis rahuldavad järgmisi tingimusi:

1. $(R, +)$ on Abeli rühm,
2. (R, \cdot) on monoid,
3. hulga R kõigi elementide a, b ja c korral

$$a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c \quad \text{ja} \quad (a + b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c.$$

Kahte viimast võrdust kutsutakse *distributiivsuse seadusteks*. Näiteks täisarvude hulk on ring täisarvude liitmise ja korrutamise suhtes. Samamoodi on ratsionaalarvude hulk ja reaalarvude hulk ringid. Aga näiteks naturaalarvude hulk ei ole ring hariliku liitmise ja korrutamise suhtes, sest ta ei ole liitmise suhtes Abeli rühm (ülejäänud kaks omadust siiski kehtivad).

Mainime veel ära ka selle, et lisaks kahekohalistele tehetele, st tehetele, mida saab rakendada kahele kindlas järjekorras vaadeldavale elemendile, kasutatakse algebras ka nullkohalisi, ühekohalisi, kolmekohalisi jne tehteid.

Kui poolrühm S on lõplik (st temas on lõplik arv elemente), siis on võimalik tema tehe anda niinimetatud *Cayley tabeli* (briti matemaatiku Arthur Cayley järgi) abil, mis on põhimõtteliselt sarnane algklassides õpitava naturaalarvude korrutamistabeliga. Selle tabeli read ja veerud on märgendatud S elementidega. Elemendile a vastava rea ja elemendile b vastava veeru lõikekohta kirjutatakse element $a * b$. Näiteks võime vaadelda poolrühmi $S = \{a, b, c\}$ ja $T = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}\}$, mille tehete $*$ ja \cdot Cayley tabelid on

*	a	b	c
a	a	a	a
b	a	b	c
c	a	c	b

ja

\cdot	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$
$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$
$\bar{1}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$
$\bar{2}$	$\bar{0}$	$\bar{2}$	$\bar{1}$

Esimesest tabelist on näiteks näha, et $a * c = a$ ja $b * b = b$. Samuti on sellest näha, et tehe $*$ on kommutatiivne. Kes on midagi kuulnud modulaarsest aritmeetikast, tunneb teises tabelis ära mooduli 3 järgi vaadeldavate jäägiklasside korrutamistehte Cayley tabeli. Need kaks tabelit on väga sarnased. Kui esimeses tabelis asendada element a $\bar{0}$ -ga, b $\bar{1}$ -ga ja c $\bar{2}$ -ga, siis saame teise tabeli. Sellises olukorras kasutatakse algebras terminit *isomorfism*. Täpsemalt öeldes on poolrühm $(S, *)$ isomorfne poolrühmaga (T, \cdot) .

Poolrühmade Morita teooriast natuke lähemalt

Järgnevalt kirjeldan natuke detailsemalt ühte osa oma teadustööst, nimelt seda, mis puudutab poolrühmade Morita teooriat. See on olnud viimase 15 aasta

jooksul mu põhiline uurimisvaldkond ja sellel alal olen teinud tihedat koostööd László Márkiga Ungari Teaduste Akadeemia Rényi instituudist ja Ülo Reimaaga Tartu Ülikoolist. Teooria on oma nime saanud jaapani matemaatiku Kiiti Morita järgi, kes 1958. aastal avaldas artikli, milles käsitleti esimest korda ekvivalentsuse probleeme ringide jaoks.

Tuleme tagasi poolrühmade isomorfisuse mõiste juurde. Matemaatiliselt täpne definitsioon on järgmine. Poolrühmi $(S, *)$ ja (T, \cdot) nimetatakse *isomorfseteks*, kui leidub bijektiivne kujutus (ehk funktsioon) f hulgast S hulka T nii, et

$$f(a * b) = f(a) \cdot f(b)$$

hulga S kõigi elementide a ja b korral. Teiste sõnadega: kujutus f peab säilitama tehete. Eespool kirjeldatud eeskiri $a \mapsto \bar{0}$, $b \mapsto \bar{1}$, $c \mapsto \bar{2}$ on isomorfism. Isomorfsetel algebralistel struktuuridel on samad algebralised omadused. Poolrühmade isomorfisuse seos on ekvivalentsiseos, sest

- a) iga poolrühm on isomorfne iseendaga (refleksiivsus),
- b) kui poolrühmad $(S, *)$ ja (T, \cdot) on isomorfsed, siis ka poolrühmad (T, \cdot) ja (U, \circ) on isomorfsed (sümmeetria),
- c) kui poolrühmad $(S, *)$ ja (T, \cdot) on isomorfsed ning poolrühmad (T, \cdot) ja (U, \circ) on isomorfsed, siis ka poolrühmad $(S, *)$ ja (U, \circ) on isomorfsed (transitiivsus).

Algebras püstitatakse uurimisprobleem tihti sellisel kujul: kirjeldada isomorfismi täpsuseni ära kõik algebralised struktuurid, mis on mingite etteantud meid huvitavate omadustega. Seda tüüpi tulemus võib kõlada umbes nii: struktuur A on omadustega X , Y ja Z parajasti siis, kui ta on isomorfne hästi tuntud struktuuriga T või hästi tuntud struktuuriga U . Üks kuulsamaid sellist tüüpi tulemusi on lõplike lihtsate rühmade kirjeldus (ingl *classification of finite simple groups*). See teoreem ütleb, et rühm on lõplik ja lihtne parajasti siis, kui ta on isomorfne mingi rühmaga neljast hästi tuntud lõpmatust seeriast või siis ühe rühmaga 26-st niinimetatud sporaadilisest rühmast. Selle ühe kõige silmapaistvama algebrateoreemi tõestamiseks kirjutas umbes sada matemaatikut mitusada teadusartiklit, mille kogumaht on kümneid tuhandeid lehekülgi.

Samas kõigi rühmade jaoks sellist kirjeldust anda ei õnnestu, sest rühmi on liiga palju ja liiga erinevaid. Kõigi poolrühmade kirjeldamine isomorfismi täpsuseni on samuti võimatu, sest neid on veelgi rohkem kui rühmi (iga rühm on ka poolrühm, kuid mitte vastupidi). Siit tekib mõte, et äkki saab kõigi poolrühmade kogumil defineerida mingi ekvivalentsiseose nii, et see oleks nõrgem kui isomorfisuse seos, kuid et samasse klassi kuuluvatel poolrühmadel oleks siiski mingid sarnased omadused. Üheks selliseks seoseks ongi Morita ekvivalentsuse seos, mis defineeritakse poolrühmade esituste ehk polügoonide abil.

Olgu S poolrühm. Parempoolseks S -polügooniks (ingl *right S-act*) nimetatakse hulka A koos eeskirjaga, mis igale paarile (a, s) , kus a on A element ja s on S element, seab vastavusse hulga A mingi elemendi, mida enamasti tähistatakse tähisega as , ning mistahes A elemendi a ja S elementide s, t korral kehtib võrdus

$$(as)t = a(st).$$

Sellist eeskirja nimetatakse poolrühma S *toimeks* (ingl *action*) hulgal A .

Näide. Naturaalarvude hulk N on poolrühm liitmistehte suhtes. See poolrühm toimib täisarvude hulgal Z samuti liitmistehte abil, st paarile (z, n) kus z on täisarv ja n on naturaalarv, seatakse vastavusse täisarv $z + n$.

Näide. Olgu m ja n mingid naturaalarvud. Kõigi n -ndat järku reaalarvuliste elementidega ruutmatriksite hulk \mathbf{Mat}_n on poolrühm matriksite korrutamise suhtes. See poolrühm toimib $(m \times n)$ -matriksite hulgal $\mathbf{Mat}_{m,n}$ samuti matriksite korrutamise abil, st paarile (X, Y) , kus X on $(m \times n)$ -matriks ja Y on $(n \times n)$ -matriks, seatakse vastavusse $m \times n$ -matriks XY .

Nii nagu mistahes teistegi algebraliste struktuuride korral võib rääkida ka polügoonide vahelistest homomorfismidest. Kui A ja B on kaks parempoolset S -polügooni, siis kujutust $f: A \rightarrow B$ nimetatakse homomorfismiks polügoonist A polügooni B , kui ta säilitab poolrühma S toimet, mis tähendab seda, et iga A elemendi a ja iga S elemendi s korral

$$f(as) = f(a)s.$$

Kui S on fikseeritud poolrühm, siis kõik parempoolsed S -polügoonid koos nende vaheliste morfismidega moodustavad kategooria. Kategooria täpset definitsiooni selle artikli maht ei võimalda anda. Kategooria tekib tänu sellele, et kui $f: A \rightarrow B$ ja $g: B \rightarrow C$ on parempoolsete S -polügoonide homomorfismid, siis ka kujutuste f ja g korrutis $gf: A \rightarrow C$ on homomorfism, selliste homomorfismide korrutamine on assotsiatiivne ja iga polügooni samasusteisendus on samuti homomorfism.

Morita ekvivalentsuse mõiste defineeritakse kategooriate ekvivalentsuse mõiste abil. Ka seda viimast ei jõua me siin detailselt selgitada. Hästi jämedalt öeldes on kaks kategooriat ekvivalentsed, kui neil on sarnased omadused. Kui nüüd S ja T on kaks poolrühma ja kõigi parempoolsete S -polügoonide kategooria \mathbf{Act}_S on ekvivalentne kõigi parempoolsete T -polügoonide kategooriaga \mathbf{Act}_T , siis tuleb välja, et poolrühmad S ja T on isomorfsed. Seega me ei saa poolrühmade jaoks uut huvipakkuvat ekvivalentsuseost. Viimase saamiseks peame vaatama nende kategooriate mingeid alamkategooriaid, mis koosnevad ainult teatud omadustega polügoonidest. Sobivaks selliseks omaduseks on polügooni püsivus. Viimase defineerimiseks on vaja polügoonide tensorkorrutise mõistet.

Mõnevõrra lihtsustatult öeldes on parempoolse S -polügooni A ja poolrühma $(S, *)$ *tensorkorrutis* selline hulk, mis koosneb sümbolitest $a \otimes s$, kus a on A element ja s on S element, kusjuures poolrühma S iga elemendi z korral loetakse, et sümbolid $az \otimes s$ ja $a \otimes zs$ on võrdsed. Seda tensorkorrutist tähistatakse

$A \otimes S$. On olemas loomulik kujutus $A \otimes S \rightarrow A$ mis viib elemendi $a \otimes s$ elemendiks as . Kui see kujutus on bijektiivne, siis öeldakse, et polügoon A on *püsiv* (ingl *firm*).

Poolrühmi S ja T nimetatakse *Morita ekvivalentseteks*, kui kõigi püsivate parempoolsete S -polügoonide kategooria \mathbf{Fact}_S on ekvivalentne kõigi püsivate parempoolsete T -polügoonide kategooriaga \mathbf{Fact}_T .

Kuna kategooriate ekvivalentsuse seos on ekvivalentsiseos, siis tuleb sellest definitsioonist kohe välja, et ka poolrühmade Morita ekvivalentsuse seos on ekvivalentsiseos. Tuleb välja, et see seos on nõrgem kui isomorfisuseos, st leidub Morita ekvivalentseid poolrühmi, mis ei ole isomorfsed (ühe sellise näite esitame edasises tekstis). Samas on Morita ekvivalentsetel poolrühmadel siiski mingid omadused samasugused.

Üldiselt ei pruugi kahe kategooria ekvivalentsust olla lihtne kontrollida ja samuti on sellest lähtuvalt keeruline tõestada mingeid tulemusi poolrühmade S ja T omaduste kohta. Seetõttu on otstarbekas püüda leida mingeid Morita ekvivalentsusega samaväärseid tingimusi, mis ei sisalda kategooria mõistet. Selliseid tingimusi ongi erinevate matemaatikute poolt leitud päris mitmeid. Neist üks olulisemaid on Morita kontekstidega seotud tingimus. Oma Morita teooriat käsitlevates artiklites olengi põhilise tehnilise töövahendina kasutanud just Morita kontekste (need koosnevad kahest bipolügoonist ja kahest bipolügoonide homomorfismist, mis rahuldavad teatud kooskõla tingimusi). Selles artiklis ma bipolügoone ja Morita kontekste siiski käsitlema ei hakka.

Üks teine Morita ekvivalentsusega samaväärne tingimus on seotud poolrühmade laienditega ja sellest räägin veidi lähemalt. Kõigepealt pean defineerima alampoolrühma.

Poolrühma $(R, *)$ alamhulka S nimetatakse *alampoolrühmaks*, kui ta on kinnine tehte $*$ suhtes, st iga $s, s' \in S$ korral ka korrutis $s * s'$ kuulub hulka S .

Näide. Naturaalarvude hulk on poolrühm korrutamise suhtes. Kõigi positiivsete kordarvude hulk on selle poolrühma alampoolrühm, sest mistahes kahe kordarvu korrutis on kordarv. Aga algarvude hulk ei ole selle poolrühma alampoolrühm, sest näiteks algarvude korrutis $3 \cdot 7 = 21$ on kordarv.

Poolrühma $(R, *)$ nimetatakse oma alampoolrühma S *laiendiks* (ingl *enlargement*), kui $R = RSR$ ja $S = SRS$, kus

$$RSR = \{r * s * r' \mid r, r' \in R, s \in S\}$$

ja

$$SRS = \{s * r * s' \mid s, s' \in S, r \in R\}.$$

Laiendite ja Morita ekvivalentsuse seostest rääkimiseks on vaja anda veel mõned definitsioonid. Poolrühma $(S, *)$ elementi e nimetatakse *idempotendiks*, kui

$e * e = e$ ehk lühidalt $e^2 = e$. Idempotentidel on nii poolrühmateoorias kui ka ringiteoorias väga oluline roll, muuhulgas on nad tähtsal kohal Morita teoorias.

Näide. Täisarvude multiplikatiivses poolrühmas (st et poolrühma tehteks on täisarvude harilik korrutamine) on kaks idempotenti: arvud 1 ja 0. Naturaalarvude aditiivses poolrühmas (st et poolrühma tehteks on naturaalarvude harilik liitmine) ei ole ühtegi idempotenti.

Öeldakse, et poolrühmas $(S, *)$ on *lokaalsed ühikelemendid* (ingl *local units*), kui iga elemendi $s \in S$ jaoks leiduvad sellised idempotendid $e, f \in S$, et $s = e * s$ ja $s = s * f$.

Poolrühma nimetatakse *faktoriseeruvaks* (ingl *factorizable*), kui selle poolrühma iga element on esitatav kahe elemendi korrutisena. On selge, et iga monoid on lokaalsete ühikelementidega poolrühm (lokaalseteks ühikuteks e ja f võib võtta monoidi ühikelemendi). Samuti on ilmne, et kui poolrühmas on lokaalsed ühikelemendid, siis see poolrühm on faktoriseeruv. Skemaatiliselt

$$\text{monoid} \Rightarrow \text{lokaalsed ühikelemendid} \Rightarrow \text{faktoriseeruv.}$$

Saab näidata, et need implikatsioonid ei ole pööratavad, mis tähendab, et lokaalsete ühikelementidega poolrühmade klass on suurem kui monoidide klass ja faktoriseeruvate poolrühmade klass on suurem kui lokaalsete ühikelementidega poolrühmade klass.

Oma 2011. aastal ilmunud artiklis „Morita equivalence of semigroups with local units“ tõestas briti matemaatik Mark Lawson muuhulgas järgmise teoreemi.

Teoreem. *Lokaalsete ühikelementidega poolrühmad S ja T on Morita ekvivalentsed parajasti siis, kui neil leidub ühine laiend.*

Ühise laiendi leidumine tähendab täpsemalt seda, et leidub mingi poolrühm R (ühine laiend), milles leidub S -ga isomorfne alapoolrühm S' ja T -ga isomorfne alampoolrühm T' nii, et R on nende alampoolrühmade S' ja T' laiend. Lühemalt öeldes: poolrühmad S ja T saab teatud kenal viisil sisestada mingisse poolrühma R .

See teoreem on väga tähelepanuväärne. Ühise laiendi leidumise tingimus on võrreldes paljude teiste tehniliste tingimustega väga lihtsasti sõnastatav, mõistetav ja enamasti ka kontrollitav. Ta on sõnastatud puhtalt algebralistes terminites ja ei sisalda selliseid mõisteid nagu „kategooria“ või „funktor“.

Ei ole teada, kas seda teoreemi õnnestub üldistada lokaalsete ühikelementidega poolrühmade klassilt faktoriseeruvate poolrühmade klassile. Siiski on suhteliselt lihtne veenduda, et kehtib järgmine lause.

Lause. *Olgu poolrühm R oma alampoolrühma S laiend, kusjuures R ja S on faktoriseeruvad. Siis on R ja S Morita ekvivalentsed poolrühmad.*

See lause annab ühe piisava tingimuse Morita ekvivalentsuse kontrollimiseks.

Näide. Vaatleme kolmeelemendilist poolrühma $R = \{a, b, c\}$, mille tehe $*$ on antud Cayley tabeliga

*	a	b	c
a	a	a	a
b	a	b	b
c	a	c	c

Tabelist on näha, et selle poolrühma alamhulk $S = \{a, b\}$ on alampoolrühm. Lisaks sellele näeme, et nii R kui S on faktoriseeruvad. Veendume, et R on alampoolrühma S laiend. Selleks tuleb kontrollida võrdusi $S = SRS$ ja $R = RSR$. Kuna S on faktoriseeruv, siis $S = SS = SSS \subseteq SRS$. Veendume, et kehtib ka sisalduvus $SRS \subseteq S$. Vaatleme korrutisi $s * r * s'$, kus $s, s' \in S$ ja $r \in R$. Kui üks neist kolmest elemendist on a , siis ka korrutis on a ja seega kuulub S -i. Kui ükski neist ei ole a , siis $s = s' = b$ ja $r \in \{b, c\}$. Ka sellisel juhul $s * r * s' = b \in S$. Sellega on tõestatud võrdus $S = SRS$.

Teise võrduse puhul on selge, et $RSR \subseteq RRR \subseteq R$. Kuna $a = a * a * a \in RSR$, $b = b * b * b \in RSR$ ja $c = c * b * c \in RSR$, siis kehtib ka sisalduvus $R \subseteq RSR$. Kokkuvõttes $R = RSR$.

Niisiis R on S laiend. Tänu eelmisele lausele võib öelda, et need poolrühmad on Morita ekvivalentsed, kuid samas mitteisomorfsed, sest neis on erinev arv elemente.

Kui üks poolrühm on teise laiend, siis tuleb välja, et neil on mitmeid sarnaseid omadusi. Näitena selle kohta toome idempotendi leidumise.

Lause. Olgu R faktoriseeruva poolrühma S laiend. Siis S sisaldab idempotenti parajasti siis, kui R sisaldab idempotenti.

Tõestus. Kui S sisaldab idempotenti e , siis on see ka poolrühma R idempotent, sest S sisaldub R -s.

Eeldame nüüd, et R sisaldab mingit idempotenti f ja tõestame, et ka poolrühmas S leidub vähemalt üks idempotent. Kuna $R = RSR = RSSR$ (sest S -i faktoriseeruvus on samaväärne võrdusega $S = SS$), siis leiduvad $r, r' \in R$ ja $s, s' \in S$ nii, et $f = rss'r'$. Viimase võrduse paremas pooles oleme poolrühma R tehte märgi elementide vahelt ära jätnud. See muudab avaldised lühemaks ja on poolrühmateoorias levinud praktika.

Vaatleme elementi

$$e = s'r'f r s \in SRRRS \subseteq SRS = S.$$

See element on idempotent, sest

$$e^2 = (s' r' f r s)(s' r' f r s) = (s' r') f (r s s' r') f (r s) = (s' r') f f f (r s) = s' r' f r s = e,$$

kus eelviimase võrduse juures kasutasime seda, et $fff = ff = f$. ■

Kasutades Morita kontekste, saab näidata, et kui kaks faktoriseeruvat poolrühma on Morita ekvivalentsed ja ühes neist leidub idempotent, siis ka teises peab leiduma idempotent. Selliseid omadusi, mis on ühised kõigile poolrühmadele samas Morita ekvivalentsi klassis, nimetakse *Morita invariantideks*. Nii võib näiteks öelda, et idempotendi leidumine on Morita invariant kõigi faktoriseeruvate poolrühmade klassis. Morita invariante oleme muuhulgas uurinud artiklites 13 ja 5. Ringide laiendeid käsitlevad artiklid 7 ja 8.

Artiklite seeria tulemustest täpsemalt

Selgitame nüüd täpsemalt, mida on tehtud preemia saanud artiklite seerias. Siin ma kasutatavate mõistete definitsioone ei anna, sest see ei mahuks käesoleva artikli raamidesse. Definitsioonid võib leida viidatud artiklitest.

Need 13 aastatel 2021–2024 ilmunud artiklit on valminud koostöös Tartu noorte algebraistidega (Ülo Reimaa, Lauri Tart, Kristo Väljako, Alvin Lepik, Marilyn Kutti, Elery Teor) ja välismaiste kolleegidega, kelleks on Ganna Kudryavtseva (Sloveenia), Leandro Marín (Hispaania), Xia Zhang ja Jianjun Feng (Hiina). Artiklid jagunevad kolme suurema teema vahel.

a) Poolrühmad ja polügoonid. Siia alla kuuluvad artiklid 1, 2, 3, 5, 6, 10. Poolrühmade ja nendega seotud polügoonide omaduste uurimine on olnud mu põhiline uurimisvaldkond juba alates magistrantuurist. Viimasel ajal on mu eriliseks huviobjektiks olnud poolrühmade Morita teooria, millest eespool ka natuke pikemalt juttu oli. Artikkel 10 on esimene artikkel, kus uuritakse lõplikke poolrühmi Morita ekvivalentsuse vaatepunktist. Kõige olulisem tulemus on see, et lõplike poolrühmade Morita ekvivalentsuse probleem on lahenduv, st et leidub algoritm, mis lõpliku arvu sammude abil suudab kindlaks teha, kas kaks etteantud lõplikku poolrühma on Morita ekvivalentsed või mitte. Ülo Reimaa on kirjutanud ka arvutiprogrammi, mis seda algoritmi realiseerib.

Artiklis 5 vaadeldakse esimest korda poolrühmade perfektsust. Varem on uuritud monoidide perfektsust. Selles artiklis on leitud 9 poolrühma parempoolse perfektsusega samaväärset tingimust, mõned neist on sarnased monoidide jaoks teada olnud tingimustega, mõned on täiesti uued. Lisaks näitasime, et nii parempoolne kui ka kahepoolne perfektsus on Morita invariantid faktoriseeruvate poolrühmade klassi jaoks.

Artiklis 3 on tõestatud, et üle lineaarselt järjestatud Abeli rühma vaadeldavate teist järku ruutmaatriksite poolrühmas troopilise korrutamise suhtes on kõigi idempotentide järjestatud hulgal võre (ingl *lattice*) struktuur.

Artiklis 6 on süstemaatiliselt uuritud üle poolrühmade vaadeldavate polügoonide lamedusomadusi. Varem on selliseid omadusi vaadeldud ainult polügoonide korral üle monoidide.

Artiklis 1 on tõestatud, et teatud omadustega osalisi polügoone (ingl *partial act*) üle poolrühmade on võimalik kahel erineval, kuid samas loomulikul viisil globaliseerida. Ühel juhul on kasutatud tensorsorrutise konstruktsiooni, teisel juhul vaadeldakse teatud osaliste kujutuste (ingl *partial mapping*) hulki.

Artiklis 2 on uuritud teatud unaarsete operatsioonidega varustatud poolrühmade (nn Ehresmanni poolrühmade) struktuuri.

b) Ringid ja moodulid. Selle teema alla kuuluvad artiklid 7, 8, 9 ja 13. Neist kolm artiklit (7, 8 ja 13) on seotud ühikelemendita ringide Morita ekvivalentsusega, mis defineeritakse teatud moodulite kategooriate ekvivalentsuse abil.

Artiklis 7 on tõestatud, et kaks idempotentset ringi on Morita ekvivalentsete parajasti siis, kui neil leidub ühine laiend. Poolrühma laiendi mõiste võttis aastal 1996 ilmunud artiklis „Enlargements of regular semigroups“ kasutusele Mark Lawson ja mainitud teoreem on üks vähestest näidetest, kus poolrühmateoreetiline teoreem on tõestatud enne kui tema ringiteoreetiline analoog. Ringi idempotentsus on poolrühma faktoriseeruvusega sarnane mõiste. See tähendab, et ringi iga elementi saab esitada korrutiste lõpliku summana.

Artiklis 13 on tõestatud, et idempotentsete Morita ekvivalentsete ringide unitaarsete ideaalide kvantaalid on isomorfsed. Sellest järeldeb, et kõik idempotentsete ringide omadused, mis on sõnastatavad unitaarsete ideaalide sisalduvusseose ja korrutamise abil, on Morita invariandid.

Artiklis 8 on näidatud, et involutsiooniga ringide vahel leidub teatud omadustega Morita kontekst parajasti siis, kui neil ringidel leidub ühine laiend.

Artiklis 9 on tõestatud, et kahe püsiva (ingl *firm*) ringi vaheliste püsivate homomorfismide hulk on üksühises vastavuses teatud kooskõlaliste funktorite paaride hulga teatud moodulite kategooriate vahel. Samuti on tõestatud selle teoreemi analoog poolrühmade jaoks.

c) Järjestatud universaalalgebrate injektiivsus ja täiendid. Selle teema alla kuuluvad artiklid 4, 11 ja 12.

Artiklis 12 on näidatud, et järjestatud universaalalgebrate injektiivsete katete (ingl *injective hull*) konstrueerimisel tuleb unaarsete polünoomfunktsioonide asemel kasutada lineaarseid funktsioone.

Artiklis 4 antakse konstruktsioon, mis lubab moodustada järjestatud universaalalgebra täiendi (ingl *completion*) niinimetatud D-ideaalide abil. See üldistab mitmeid varem vaadeldud konstruktsioone erinevate järjestatud algebrate jaoks.

Artiklis 11 on tõestatud, et järjestatud universaalalgebra injektiivsel kattel on omadused, mis sarnanevad järjestatud hulga Dedekindi-MacNeille'i täiendi omadega.

Tänu

Lõpetuseks soovin tänada kõiki oma kaasautoreid meeldiva ja viljaka koostöö eest, oma kolleege Tartu Ülikooli matemaatika ja statistika instituudist mõnusa tööhkkonna eest ning algebra emeritprofessoreid Mati Kilpi ja Kalle Kaarlit, kes on mulle pikkade aastate jooksul igati toeks ja eeskujuks olnud ning tänu kellele minust üldse algebraist sai. Soovin ära märkida ka seda, et enamik mainitud seeria artiklitest ning ka käesolev artikkel on valminud Eesti Teadusagentuuri grandil PRG1204 toel.

VIITED

1. Kudryavtseva, G., Laan, V. 2023. Globalization of partial actions of semigroups. *Semigroup Forum*, 107, 200–217, doi: 10.1007/s00233-023-10364-z
2. Kudryavtseva, G., Laan, V. 2023. Proper Ehresmann semigroups. *Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society*, 66, 758–788, doi: 10.1017/S0013091523000391
3. Kutti, M., Laan, V. 2024. Idempotent 2×2 matrices over linearly ordered abelian groups. *Categories and General Algebraic Structures with Applications*, 2, 1–17, doi: 10.48308/cgasa.2023.232266.1412
4. Laan, V., Feng, J., Zhang, X. 2023. Admissible subsets and completions of ordered algebras. *Algebra Universalis*, 84, 19, doi: 10.1007/s00012-023-00813-9
5. Laan, V., Lepik, A. 2023. Perfection for semigroups. *Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society*, 66, 259–287, doi: 10.1017/S0013091523000159
6. Laan, V., Reimaa, Ü., Tart, L., Teor, E. 2021. Flatness properties of acts over semigroups. *Categories and General Algebraic Structures with Applications* 15, 59–92, doi: 10.52547/cgasa.15.1.59
7. Laan, V., Väljako, K. 2021. Enlargements of rings. *Communications in Algebra*, 49, 1764–1772, doi: 10.1080/00927872.2020.1851702
8. Laan, V., Väljako, K. 2024. Enlargements and Morita contexts for rings with involution. *Glasgow Mathematical Journal*, 1–32, doi: 10.1017/S0017089524000302

9. Marín, L., Laan, V. 2023. Firm homomorphisms of rings and semigroups. *Theory and Applications of Categories*, 39, 625–666.
10. Reimaa, Ü., Laan, V., Tart, L. 2021. Morita equivalence of finite semigroups. *Semigroup Forum*, 102, 842–860, doi: 10.1007/s00233-020-10153-y
11. Zhang, X., Laan, V., Feng, J. 2024. Injective hulls are completions of ordered algebras. *Order*, 41, 539–550, doi: 10.1007/s11083-023-09645-7
12. Zhang, X., Laan, V., Feng, J., Reimaa, Ü. 2021. Correction to: Injective hulls for ordered algebras. *Algebra Universalis*, 82, 65, doi: 10.1007/s00012-021-00749-y
13. Väljako, K., Laan, V. 2021. Morita contexts and unitary ideals of rings. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 70, 122–134, doi: 10.3176/proc.2021.2.02



Valdis Laan

Foto: Arno Mikkor

Sündinud 16. mail 1972 Tartus

1990 Põlva Keskkool

1995 Tartu Ülikool, matemaatika (MSc)

1999 Tartu Ülikool, matemaatika (PhD)

Alates 1997. aastast töötanud Tartu Ülikooli õppejõuna, kusjuures alates 2016. aastast algebra professorina. Uurinud põhiliselt poolrühmi ja nende esitusi, aga ka kategooriaid, ringe ja järjestatud algebralisi struktuure. Juhendanud 4 doktoriväitekirja. Aastatel 2015–2018 Eesti Matemaatika Seltsi president. Aastast 2019 teadusajakirja Acta et Commentationes Universitatis Tartuensis de Mathematica peatoimetaja.

KUIDAS TEHISARU OSAKESTEFÜÜSIKA MÕÕTMISI TÄPSEMAKS JA EFEKTIIVSEMAKS TEEB

Joosep Pata (Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut)

*Teaduspreemia loodusteaduste valdkonnas tööde tsükli
„Masinõppel põhinev suurandmete rekonstrueerimine
osakestefüüsikas“ eest*

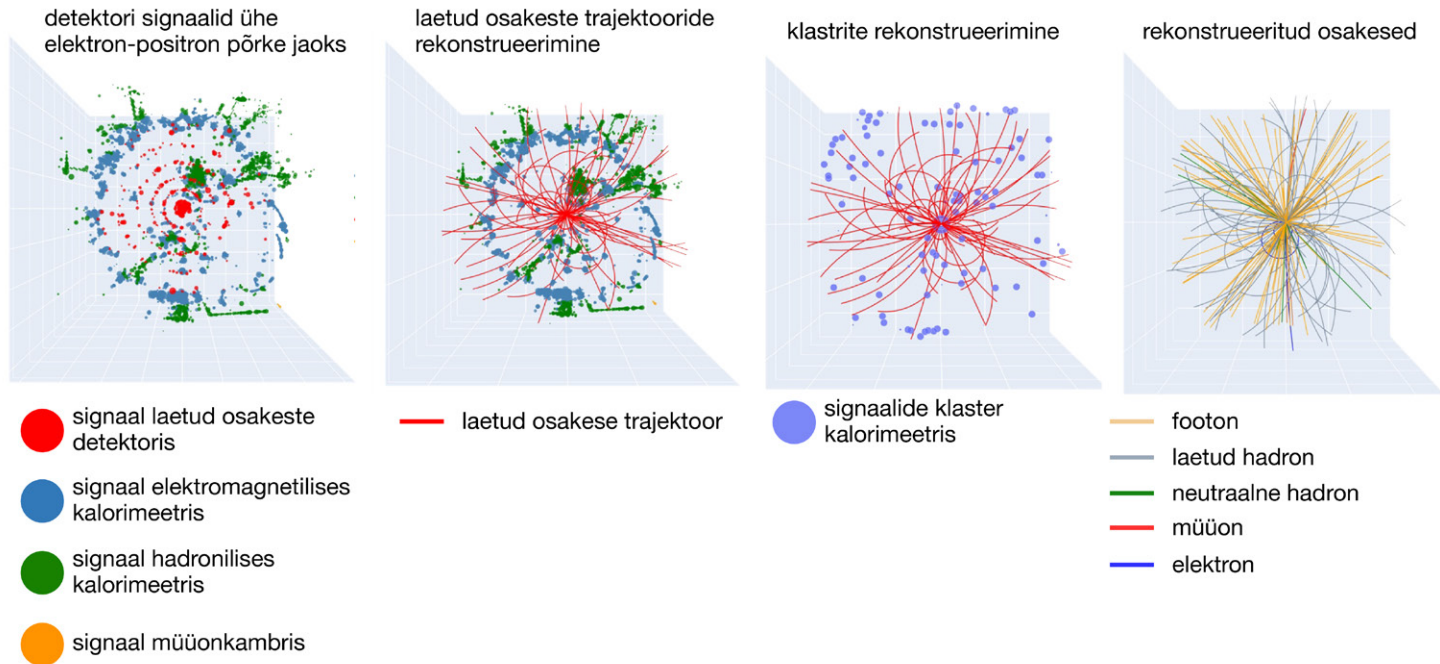
Mis on Higgsi boson ja miks see oluline on?

Kuidas töötab röntgenaparaat või tuumareaktor, millistest tükkidest koosneb Universum ja kuidas need tükid omavahel seostuvad? Kas on veel avastamata loodusjõude ja kuidas need meie elu võivad mõjutada? Nende küsimuste uurimiseks tegeleb osakestefüüsika ehk kõrge energia füüsika. Osakestefüüsika on katseline teadus, mis tähendab, et küsimustele tulevad vastused pärismaailmast ehk katsetest. Selline katseaparaat on ehitatud Euroopasse, Šveitsi-Prantsuse piiril asuvasse teaduskeskusse CERN, kus asub maailma suurim ja võimsaim osakeste kiirendi Large Hadron Collider (LHC). Selle aparaadiga avastati aastal 2012 Higgsi boson, täiesti uut tüüpi algosake, mis erineb senimaani avastatud osakestest.

Osakestefüüsikas on praegu üheks peamiseks küsimuseks Higgsi bosoni ja teiste algosakeste vaheliste vastastikmõjude mõõtmine. Higgsi boson on senimaani ainus fundamentaalselt ilma spinnita osake, mis hüpoteesi kohaselt annab läbi Higgsi mehhanismi massi teistele osakestele. Kuivõrd tegu on täiesti uut tüüpi osakesega, on seda mehhanismi tarvis katseliselt täielikult kontrollida, st mõõta Higgsi bosoni vastastikmõju massiivsete osakestega ning iseendaga. Higgsi bosoni vastastikmõju iseendaga ehk eneseinteraktsiooni määramine on CERN-i suure hadronpõrguti LHC üks põhieesmärkidest, kuna see kannab ka informatsiooni Universumi varase arenguetapi kohta ja võimaldab seeläbi katseliselt uurida tumeainet ja tumeenergiat, kuna nad on jätnud jälje Universumi varases etapis toimunud kiiresse paisumisse ehk inflatsiooni.

Kuidas kasutatakse CERN-i kiirendeid osakeste uurimiseks?

Higgsi bosoni eneseinteraktsiooni mõõtmiseks on kavandatud CERN-i LHC kiirendi kõrghelendusfaasi uuendus, kus prootonkiirte pörkes ehk ühes sündmu-



Joonis 1. Osakeste rekonstrueerimise sammud, alustades detektoris registreeritud signaalidest vasakul kuni rekonstrueeritud osakesteni paremal. Andmed on visualiseeritud ühe elektron-positron põrke jaoks tulevikukiirendis CLIC.

ses toimunud interaktsioonide arvu ehk kiire heledust suurendatakse kuni viis korda, et koguda võimalikult palju andmeid LHC eluea jooksul. Heledusfaasi uuendus käivitub plaani järgi aastal 2030, seega käib juba praegu kibekiire töö selle ettevalmistamiseks.

See tähendab, et ühe prootonpõrke käigus võib tekkida kuni sadu tuhandeid osakesi. Nende osakeste omadusi, st trajektoore ja laenguid, mõõdetakse mitmekihiliste detektoritega, mis meenutavad kolmemõõtmelisi kaameraid. Detektorisse tekkinud keerukast kolmemõõtmelisest pildist on vaja korruga rekonstrueerida võimalikult paljude osakeste omadused. Seda probleemi on võimalik käsitleda pöördülesandena, kus sisendiks on osakeste poolt jäetud mõõteandmed kui suur punkt pilv, ja väljundiks on kõikide osakeste omadused. Niisugust ülesannet on vaja lahendada arvutuslikult efektiivselt, et oleks võimalik analüüsida suuri andmehulki, ning füüsikaliselt võimalikult täpselt, et rekonstrueeritud andmetega oleks võimalik läbi viia täppismõõtmisi.

Miks on andmete analüüsimine keeruline?

Sellise ülesande lahendamiseks kasutatakse osakestefüüsika eksperimentides rekonstrueerimisalgoritme. Tänapäeval kasutusel olevad algoritmid on koostatud üldiselt LHC algusperioodil, st rohkem kui 15 aastat tagasi, ja nii, et neid oleks arvutis lihtne kirja panna.

See tähendab, et praegused algoritmid põhinevad praktilistel reeglitel ja nn retseptidel, kuidas pörkeandmeid rekonstrueerida. Seal on tehtud olulisi lihtsustusi, et arvutus oleks tehtav. Praegused algoritmid kombineerivad osakeste poolt jäetud signaalid igas detektori kihis eraldi ning hiljem korreleerivad ühe pörke käigus registreeritud signaalid omavahel, et mitmekihilises detektoris kokku panna ühe pörke osakeste terviklik pilt.

Niisugune lähenemine töötab hästi väikese heledusega katsefaasis, st kui osakesi ei ole ühes pörkes korruga liiga palju, kuid suure osakeste arvu korral muutub see kombinatoorselt keerukaks. See tähendab, et kõiki ühes pörkes mõõdetud andmepunkte tuleb potentsiaalselt omavahel võrrelda, mille tõttu kasvab vajalike arvutuste hulk proportsionaalselt osakeste arvu ruuduga.

Samuti ei ole selliste heuristiliste meetodite täpsus alati parim, kuna keerukate ja osaliselt kattuvate või puudulike signaalide rekonstrueerimise korral ei pruugi lihtsad retseptid töötada kuigi efektiivselt. LHC kõrgeledusfaasis suureneb iga prootonpörke andmehulk kuni viis korda, kogutud andmete hulk suureneb kokku kuni kümme korda.

Lisaks paigaldatakse uued, kõrgema lahutusvõime ja rohkemate kanalitega detektorid, et füüsikaprotsesse veelgi täpsemalt mõõta. Nende granulaarsete detektorite andmete rekonstrueerimine on oluliselt keerukam, seni kasutusel olevad algoritmid tuleb selle jaoks kohandada või luua uued algoritmid.

Mis on tehisaru ja mis on sellest kasu osakestefüüsika andmete analüüsimisel?

Masinõpet ja tehisnärvivõrke on CERN-i eksperimentides rakendatud juba 1990-ndatest, kuid ligipääs kõrgjõudlusarvutusele ja suurtele andmestikele on toonud võimalike ülesannete keerukusse ja lahenduste täpsusesse arenguhüppe, mida ma oma tööde seerias ära kasutasin.

Masinõpe võimaldab piisavalt suurte andmehulkade korral keerukaid pöörd-ülesandeid lahendada uudsel moel. Selle asemel, et käsitsi luua võimalikult täpset heuristilist mudelit, kasutatakse suurte vabade parameetrite arvuga üldiseid mudeleid ehk tehisnärvivõrke, mida sobitatakse suurtel andmehulkadel, kasutades optimeerimiseks arvutuslikke väakriteeriume. Teadustööde seeria sisuks on uudsete masinõppel põhinevate rekonstrueerimisalgoritmide loomine ja juurutamine CERN-i eksperimentides. Need algoritmid on varasematest täpsemad, taaskasutatavad uute katsetingimuste ja detektorite jaoks ning võimaldavad ära kasutada uudseid arvutussüsteeme, sh graafikaprotsessoreid ja superarvuteid.

Osakestefüüsika andmeanalüüsis tuleb suurte mahtude tõttu kasutada kõiki olemasolevaid arvutusressursse, sh graafikakiirendeid ja superarvuteid, kuid praeguste heuristiliste algoritmide ümberkirjutamine on töömahukas ja vajab uudset lähenemist. Samaaegselt on arenduses uued kiirendid, nagu Future Circular Collider (FCC), International Linear Collider (ILC) või müüonpõrguti Muon Collider, ja uused detektoritehnoloogiad, mis vajavad vastavalt innovatsiooni ja uut lähenemist andmeanalüüsis. Siin on üks võimalikke lahendusi masinõpe, mis sobib hästi superarvutitele ja võimaldab paindlike ja üldiste algoritmide arendamist.

Senimaani on masinõpet peamiselt kasutatud konkreetsete hästidefineeritud klassifikatsiooniülesannete lahendamiseks, näiteks b-kvarkidest tekkinud osakeste kaskaadide ehk jugade eristamiseks. Antud juhtudel on optimeerimisülesande sisuks kindla fikseeritud struktuuriga sisendist ehk joas olevatest osakestest jah-ei tüüpi otsuse tegemine, mis on masinõppes küllaltki lihtsalt lahenduv ülesanne. Sellist tüüpi masinõppemeetodite optimeerimiseks kasutatakse tehisandmeid, enamasti juba laialdaselt läbi uuritud jugadel põhinevaid näidisandmestikke.

Kuidas õpib tehisaru andmetest uusi mustreid ära tundma?

Tehisaru ehk masinõppe eripära seisneb selles, et käsitsi koostatud reeglite ja programmide asemel õpib arvuti matemaatilise optimeerimise abil andmetest ise sobivaid reegleid. Need võivad olla oluliselt detailsemad ja täpsemad, kui oskab kirja panna inimene. Vaja on aga andmestikke, kus masinõppe mudeleid optimeerida ehk treenida. Osakestefüüsikas kasutatakse selleks tehisandmeid, mida tekitame omakorda spetsiaalsete arvutiprogrammidega.

Nimelt on võimalik praegu teadaolevad füüsikaseadused, st osakeste tekkimise, ainega interakteerumise ja lagunemise tõenäosused kirja panna võrranditena,

mis on katseandmetega detailselt kontrollitud. Neid võrrandeid on võimalik lahendada Monte Carlo meetodil ehk arvuti abil pseudojuhuslikke arve genereerides ja seeläbi tekitada üpriski realistlikke tehisandmeid, kus meil on kõik toimunud protsessid detailselt teada.

Kõik osakestefüüsika mõõtmised on sisuliselt mõõteandmete ja tehisandmete võrdlused, kus nende kahe erinevusest järeldatakse midagi pärismaailmas toimunud protsesside kohta. Praegusel ajal on tehisandmete täpsus väga suur ja seetõttu on osakestefüüsika eelisolukorras masinõppe mudelite arendamisel, kuna meil on võimalik kasutada ülimalt täpseid ja realistlikke tehisandmestikke, et masinõppe mudeleid arendada ja testida.

Osakestefüüsika andmestike eripära seisneb selles, et igas osakeste pörkes tekib juhuslik arv uusi osakesi, samuti tekib iga osakese lagunemisel või ainega interakteerumisel jällegi juhuslik arv madalama energiaga osakesi. Kui seda võrrelda näiteks pildiandmetega, kus igal pildil on fikseeritud arv pikseleid, siis osakestefüüsikas on igal järgneval mõõdetud pörkel eelnevast erinev arv tekkinud ja seega ka mõõdetud osakesi. See tähendab, et osakestefüüsikas tuleb kasutada selliseid masinõppe algoritme, mis suudavad töödelda varieeruva arvuga sisendeid ja väljundeid. Seda tüüpi algoritmid on näiteks punktipilvede või keele jaoks loodud mudelid, mida on võimalik osakestefüüsika ülesannete lahendamiseks kohandada.

Pörkes tekkinud kõrge energiaga osakesed lagunevad ja tekitavad palju madala energiaga osakesi. Seda protsessi nimetatakse hadroniseerumiseks ehk osakeste jugade tekkimiseks. See tähendab, et tekkinud algosakese omadused määratakse temast tekkinud madala energiaga osakeste vahel laiali. Kui soovime määrata algosakese omadusi, näiteks kas tekkis kolmanda põlvkonna kvark ehk b-kvark või esimese põlvkonna kvark ehk u-kvark, siis tuleb vaadata tekkinud osakeste joa komponente ja nende omavahelist jaotust. Nii on võimalik laguproduktide jaotusest statistiliselt välja lugeda, mis tüüpi algosake joa tekitas. Seda analüüsi nimetatakse jugade klassifitseerimiseks ja siin on masinõppe olnud väga kasulik tööriist, mis on oluliselt suurendanud analüüsides täpsust. Sellisel juhul on ülesandeks joa muustrist jah-ei tüüpi klassifikatsiooniülesande lahendamine, mis on masinõppe abil kergelt lahendatav probleem.

Kui soovime aga lihtsalt jugade klassifitseerimise jah-ei tüüpi ülesande lahendamisest edasi liikuda tervete pörgete täielikule rekonstrueerimisele, siis on vaja uut tüüpi meetodeid. Masinõppe peab andma mitte ainult ühe väljundi, vaid varieeruva arvu väljundeid iga rekonstrueeritava osakese kohta. Veelgi enam, iga osakese kohta on meil vaja rekonstrueerida mitmeid erinevaid mõõdetavaid: energia, mass ja teised relativistliku impulsvекtori komponendid, osakese tüüp (näiteks kas tegu oli elektroni või footoniga), osakese laeng jt. Seega tõuseb masinõppeülesande keerukus oluliselt, kuna ühe väljundi asemel tuleb õigesti rekonstrueerida kuni kümneid tuhandeid mõõdetavaid suuruseid, millel igapähele on oma iseärane jaotus.

Ülesande lahendamiseks tuli rakendada optimeerimiskriteeriumi, mille vastu masinõppe mudelit treenitakse. Nimelt on võimalik tehisanndmete korral leida ideaalpilt kõikidest osakestest, mis meil tuleks antud mõõteandmete korral rekonstrueerida. Masinõppe mudel üritab vastavalt sisendist seda ideaalpilti taastoota ning optimeerimiskriteerium mõõdab, kui kaugel on konkreetne rekonstrueeritud põrge ideaalpildist.

Miks anti 2024. aasta Nobeli preemiad füüsikas ja keemias tehisaru avastuste eest?

2024. aasta Nobeli preemia füüsikas anti tehisnärvivõrkudega seotud avastuste eest biofüüsikule John Hopfieldile ja arvutiteadlasele Geoffrey Hintonile. Mõlema teadlase töö kasutas teadmisi füüsikast, et arendada välja täiesti uut tüüpi andmetöötluse algoritm ehk tehisnärvivõrk.

Hopfield kasutas statistilise füüsika meetodeid, et luua algoritm, mis suutis eelnevalt nähtud andmeid meelde jätta, kodeerides need enda sisestruktuuri ja siis hiljem neid andmeid näidete varal uuesti meelde tuletada. Statistiline füüsika tegeleb paljudest väikestest osadest koosnevate süsteemide kirjeldamisega. Selline statistiline süsteem on näiteks väikestest magnetitest koostatud võre, mille iga element mõjutab oma naabreid. Hopfield näitas, et kui sisendandmed kodeeritakse võresõlmedevahelistesse seostesse ja nendest lähtuvasse võre energiatasemetesse, siis mõnevõrra kahjustunud sisendandmete korral suudab võre siiski taastoota esialgse mustri, kuna võres tekkinud energiatasemed suunavad võre vigaste või osaliste andmete korral esialgsesse olekusse ehk treeningandmetest tekitatud mustrisse tagasi. Niimoodi oli võimalik luua statistilise füüsika meetodite abil mälu omadustega algoritm, mis suutis salvestada keerukaid andmeid võre ehk tehisnärvivõrgu struktuuri.

Hinton omakorda täiendas seda lähenemist juhule, kus võre elementidel on pidevad väärtused. Seda süsteemi kirjeldab Boltzmanni jaotus, mida kasutatakse ka statistilises füüsikas gaasi omaduste kirjeldamiseks. Hintoni arendatud närvivõrk ehk Boltzmanni masin suutis ära tunda samast objektist uusi, seni nägemata pilte, mis näitas, et tehisnärvivõrgud suudavad lahendada keerukaid pärismaailma ülesandeid, nagu objektituvastus. Edasi arendas ta välja meetodi, kus tehisnärvivõrgule lisati mitmeid peidetud kihte, mis võimaldasid varasemast keerukamat andmetöötlust. Samuti arendas ta meetodi, kus närvivõrgu omadusi optimeeriti matemaatilisel efektiivse gradientlaskumise meetodi abil, mida oli vaja, et mitme kihiga ehk paljude vabade parameetritega närvivõrke pärismaailma ülesannetega treenida. Füüsikateadmised võimaldasid seega Hopfieldil, Hintonil ja teistel välja arendada täiesti uusi andmeanalüüsi algoritme.

Läbimurre paljude kihtidega närvivõrkude kasutamises toimus aastal 2012, kui AlexNeti-nimeline tehisnärvivõrk ületas esmakordselt suure, pärismaailma piltide klassifitseerimise ülesande lahendamisel ImageNeti senised tulemused. Kuna sellel tehisnärvivõrgul oli umbes 60 miljonit vaba parameetrit, siis tuli

modeli treenimiseks kasutada uudseid arvutusmeetodeid, nimelt graafikakaarte, mis võimaldavad kiiresti ja paralleelselt läbi viia väga suure arvu operatsioone ja seeläbi selliseid massiivseid tehisnärvivõrke suurtel andmetel treenida.

Praeguseks oleme jõudnud meetodite arenguga sinnamaale, et närvivõrke võib kasutada uue teadmise loomiseks. Hea näide on siin 2024 välja antud Nobeli preemia keemias, mis anti uudse, närvivõrkudel ja suurandmetel põhineva valkude struktuuri määramise algoritmi AlphaFold loojatele John Jumperile ja Demis Hassabisele ning arvutusmeetodite abil uute valkude loojale David Bakerile.

Valkude struktuuri määramine on arvutuslikult keerukas ülesanne, kus tuleb leida valkude ehituskivide ehk aminohapete jadast valgu kolmemõõtmeline ehitus. Suurtest andmehulkadest välja kaevatud närvivõrgul põhinev mudel osutus siin oluliselt täpsemaks senimaani käsitsi arendatud mudelitest, kuna teisendusnärvivõrkude ehk *transformer*-tüüpi algoritmi kasutamine võimaldas algoritmil kõikide seni tuntud valkude struktuuri andmebaasis leida seaduspärad, mida varem ei osatud näha.

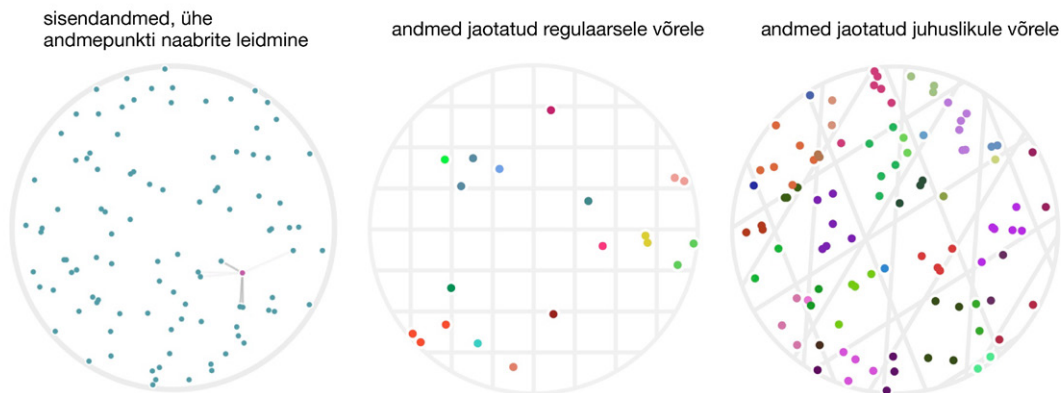
Siit ilmneb muster teaduses: ühe valdkonna väikesed avastused võivad tuua suuri avastusi teistes, esmapilgul mitteseotud valdkondades. Mõnikord tuleb edasiminekuks siis, kui olemasolevale probleemile lähenetakse uuel moel.

Mis on graafidel põhinevad ja *transformer*-tüüpi võrgud?

Kõikide pörkes olevate osakeste üheaegseks rekonstrueerimiseks on tarvis luua uus kontseptuaalne lähenemine, kus on võimalik tehisandmetes seostada pörkes tekkinud stabiilsed osakesed, nende poolt jäetud signaalid ja nende omavahelised seosed ühtses, ilma ette fikseeritud suuruseta andmestruktuuris.

Selliste määramata arvuga, kuid omavaheliste seostega pörkeandmete töötlemiseks masinõppe abil oli vaja rakendada uudseid meetodeid, sh graafidel põhinevaid närvivõrke ja teisendusnärvivõrke (*transformer*), mida kasutavad ka tänapäevased keelemudelid, nagu ChatGPT või eelmainitud valkude voltija AlphaFold. Peamiseks uuenduseks minu töös oli senimaani keele, molekulide ja osakeste jugade töötlemiseks kasutatud tehisnärvivõrkude edukas kohandamine tervete pörkesündmuste üheaegseks töötlemiseks.

Kuna ühe töödeldava andmepunkti ehk pörke detailsus kasvas sellega seoses kuni 50 korda, oli vaja rakendada uudseid arvutusmeetodeid graafide konstrueerimisel ja analüüsimisel, et arvutusi praktikas suures mahus läbi viia saaks. Siin rakendasime Google'i teadlaste poolt välja töötatud lokaaltundlikku räsimit, mis oli antud meetodi üks esmakordseid rakendamisi osakestefüüsikas. Lokaaltundlik räsimine tähendab, et suur arv sisendandmepunkte pakitakse vastavalt nende omavahelisele matemaatilisele kaugusele või lähedusele mitmemõõtmelise võre peal asuvasse kastidesse.



Allikas: https://unboxresearch.com/articles/lsh_post1.html

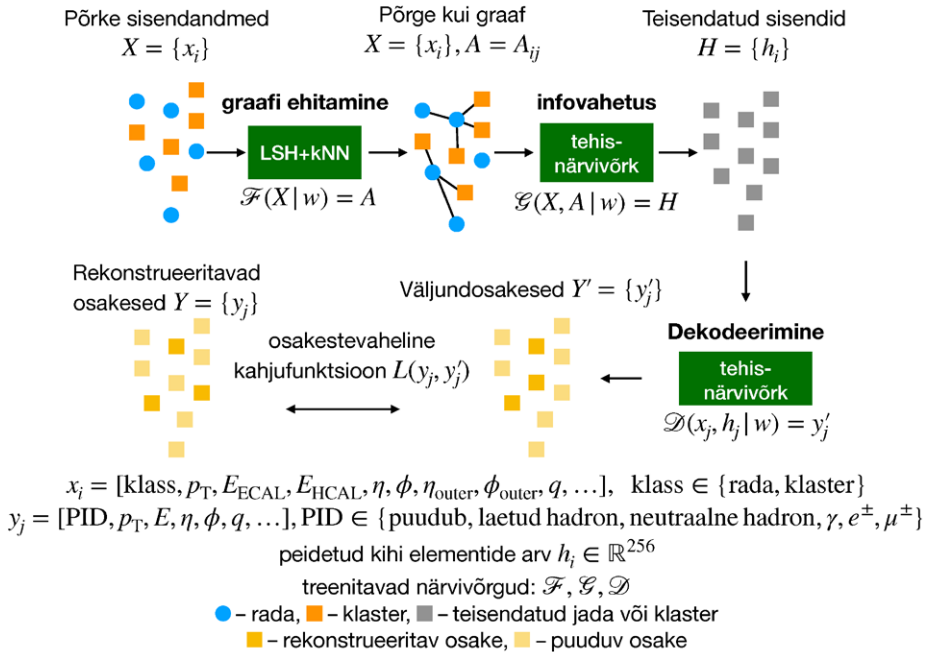
Joonis 2. Lokaaltundliku räsamise abil suurandmetel efektiivsete arvutuste läbiviimise skeem. Andmepunktid jagatakse räsifunktsiooni alusel lähedaste punktidega samasse võrekaсти. Paaridevahelised arvutuslikult keerukad tehted viiakse läbi ainult ühes kastis olevate andmepunktide vahel. Väga suurte sisendmõõtmete korral on võimalik kasutada juhuslikku võret, mis annab andmepunktide jaotamisel hea tulemuse.

Arvutuslikult keerulised tehted tehakse nüüd ainult nende andmepunktide vahel, mis on lähestikku ehk langevad ühte kasti, samas kui ilma selle meetodita peaks arvutuslikult keerukaid tehteid tegema üle kõigi andmepunktide paaride, mis võib olla arvutuslikult väga kallis. Nüüd on meetod leidnud osakestefüüsikas laiemat rakendust selliste arvutuslikult keerukate ülesannete lahendamiseks. Seega olime ühed esimestest, kes näitasid, kuidas osakestefüüsika keerukaid ja väga suuri sisendandmeid analüüsida masinõppega arvutuslikult efektiivselt.

Kuidas arendatakse Eestis närvivõrkudel põhinevat andmetööstlust?

Aastatel 2020–2024 on minu loodud ja juhitud rahvusvaheline (CERN, Caltech, UCSD jt) meeskond välja töötanud ja juurutanud uudse, masinõppel põhineva lähenemise osakeste rekonstrueerimiseks detektorites ja seeläbi loonud Eestis uue uurimissuuna, mis on rahvusvahelisel tasemel edukas. Oleme loonud uue analüüsimeetodi, mis asendab suurandmete analüüsis käsitsi kirjutatud heuristilised algoritmid hästidefineeritud, efektiivsete ja testitud tehisnärvivõrkudega.

Järgnevaks uuenduseks on närvivõrgu väljundi kompleksuse tõstmine pörgete rekonstrueerimiseks vajalikule tasemele. Senimaani saadi närvivõrgust tüüpiliselt ühe sisendandmepunkti, näiteks ühe osakeste joa kohta üks kvantitatiivne väljund, kuid pörke rekonstrueerimiseks oli vajalik töödelda korruga kogu pörkes registreeritud signaalide kogum ning väljastada korruga kõikide rekonstrueeritud osakeste omadused. Siin lõime aluse oluliselt keerukamate osakestefüüsika ülesannete lahendamiseks masinõppe abil.



Joonis 3. Meie poolt välja arendatud graafidel põhinevat närvivõrku kasutatav osakeste rekonstrueerimise skeem. Ühes põrkes rekonstrueeritud signaalid moodustavad sisendandmed. Andmete vahel koostatakse lokaaltundliku räsamise ja lähimate naabrite algoritmi abil graaf, mida kasutatakse graafidel põhineva tehisnärvivõrgu abil andmepunktide vahel info vahetamiseks. Niimoodi kodeeritakse andmepunktidesse nende naabrite informatsioon. Edasi dekodeerib järgmine tehisnärvivõrk andmed rekonstrueeritud osakesteks, mida võrreldakse soovitud osakestega tehisandmetes, kasutades osakestepõhist kahjufunktsiooni. Kõiki tehisnärvivõrke treenitakse üheaegselt miljonitel põrgetel.

Rekonstrueeritud ja tõeliste osakeste arvutuslikuks võrdlemiseks oli vaja luua optimeerimiskriteerium ehk nn kahjufunktsioon, mida saaks kasutada närvivõrkude treenimisel sellel uudse ülesande puhul. Tööde seerias lõime ja juurutasime uut tüüpi kriteeriumi, mis põhineb füüsikalisel ideel, kus igale rekonstrueeritavale osakesele seatakse tehisandmete alusel vastavusse peamine sisendsignaal. Uudne meetod võimaldab optimeerida osakeste rekonstrueerimise närvivõrgu väljundit väga suurtes andmestikes praktiliselt ja kiirelt.

Miks on tehisarul põhinevad meetodid paremad olemasolevatest algoritmidest?

Tehisnärvivõrkudel põhineva algoritmi eeliseks on suur paindlikkus, st sama algoritmi on võimalik väikeste muudatustega taaskasutada uute detektorite jaoks. Tavapäraseid, käsitsi programmeeritud ehk reeglitel põhinevaid algoritme on

keerukas kohandada, kui detektori ehitus või struktuur peaks muutuma, kuid närvivõrke saab kergesti uut andmestikel uuesti optimeerida ehk treenida. See võimaldab juba praegu välja arendatud metoodikat kasutada tulevikus planeeritud detektorite arendamiseks ja annab võimaluse panustada LHC asenduseks välja pakutud tulevikupõrguti FCC, lineaarkiirendite või ka müüonpõrguti arendusse.

Põhiline uudne tulemus tööde seerias on uudse masinõppeülesande püstitamises ja edukas lahendamises, kus varasem reeglitel põhinev rekonstrueerimisalgoritm asendatakse masinõpitud algoritmiga, mis on täpsem, arvutuslikult efektiivsem ja paindlikum.

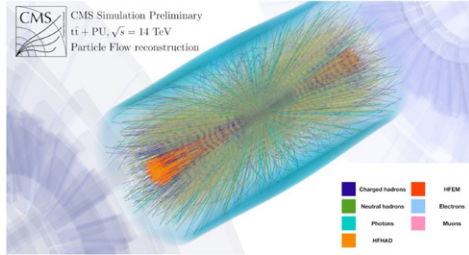
Aastal 2021 avaldatud artiklis (3) saavutas minu juhitud meeskond esmased tulemused osakeste rekonstrueerimises masinõppega uudsel tehisandmestikul. Masinõppemudelil olid olemas põhilised olulised ja uudsed komponendid: terve hadronpõrke sündmuste osakeste rekonstrueerimine varieeruva osakeste arvu korral, arvutuslik skaleeruvus suurtele andmestikele ja heuristilisest algoritmist suurem täpsus. Tulemuse olulisus seisnes seda tüüpi mudeli esmakordses rakendatavuse tõestamises.

Samaaegselt testib ja arendab meie meeskond uut metoodikat CERN-i kompaktses müüonsolenoidi CMS (Compac Muon Solenoid) detektoris, kus on võimalik antud lähenemist katsetada päriselu tingimustes, sh CMS-i katseandmetes. Tulemused on avaldatud rahvusvahelisel konverentsil ACAT 2021 ja 2022 (4–5). Selle tööga seoses olin aastatel 2020–2022 CMS-i rekonstrueerimistarkvara meeskonna koordinaator. See tähendas igapäevast tööd kogu detektori osade tarkvaraarenduse koordineerimisel, et tükid sobiksid omavahel loogiliseks tervikuks ning et detektor oleks võimeline aastal 2022 taaskäivitatud LHC kiirendi poolt tekitatud põrked piisava täpsuse ja efektiivsusega üles võtta. Seoses andmetöötluse optimeerimisega saavutatud tulemustega tunnustati minu panust ka CMS-i kollaboratsiooni (CMS Collaboration – CERN-is CMS-i eksperimenti läbi viiv konsortsium) auhinnaga.³⁶

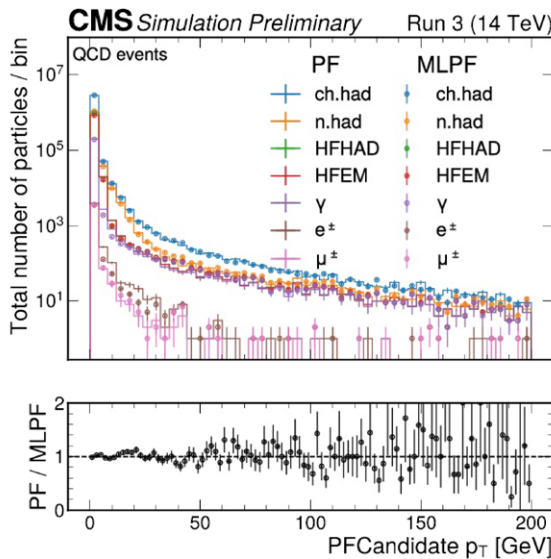
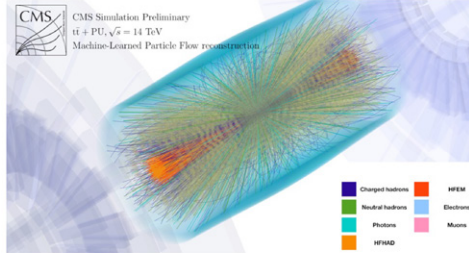
Tavapäraselt arendatakse ja testitakse osakestefüüsikas selliseid masinõppe meetodeid ainult lihtsustatud tehisandmetel. Meie meeskond arvab, et meetodit tuleb rakendada pärismaailmas võimalikult realistlikel andmetel, sest ainult nii saab veenduda, et tegemist on ka tegelikult töötava lahendusega. Oleme näidanud, et metoodikat saab edukalt integreerida CMS-i katseseadmesse ja see annab olemasolevast meetodist täpsemaid tulemusi. Esialgsed tulemused on ette kantud rahvusvahelistel konverentsidel, mille eelduseks oli CMS kollaboratsiooni sisese retsensiooni läbimine. Praegu on ettevalmistamisel CMS kollaboratsiooni artikkel, mille valmimisel on tegu esmakordse ja uudse tulemusega osakestefüüsika andmeanalüüsis.

³⁶ <https://cms.cern/news/cms-award-2021>

tava-algoritm: PF



masinõpitud algoritm: MLPF



Joonis 4. CERN-i CMS-i detektoris saavutatud esialgsed tulemused masinõpitud osakeste rekonstrueerimise algoritmi MLPF jaoks võrdluses tavaalgoritmiga PF. Tulemused on samaväärsed, mis tähendab, et meie poolt arendatud algoritmi on võimalik päriselu tingimustes rakendada.

Joonise terminite tõlked: CMS simulation preliminary – CMS-i simulatsioon, esmased tulemused; Particle Flow reconstruction – osakestevoo algoritm ehk tava-algoritm; Machine-Learned Particle Flow reconstruction – masinõpitud osakestevoo algoritm; QCD events – QCD põrked; Total number of particles / bin – osakeste arv; charged hadron ehk ch.had – laetud hadron; neutral hadron ehk n.had – neutraalne hadron; photon – footon; electron – elektron; muon – müüon.

Järgnevas, aastal 2024 avaldatud artiklis (2) näitasime, et meetodi täpsust ja tõepärasust saab oluliselt suurendada, kuna kasutasime esimest korda tulevikudetektor CLIC jaoks välja arendatud detailset kiirguse-materjali simulatsioonitarkvara. Näitasime, et meie loodud käsitusviisi saab kasutada paljude erinevate praeguste ja tulevikudetektorite põrgete täpseks ja paindlikuks rekonstrueerimiseks. See on väga oluline, kuna tuleviku tarbeks planeeritud detektorite arendusel on vaja kiiresti testida, kas konkreetne detektoritehnoloogia võimaldab simulatsioonides paremaid rekonstrueerimise tulemusi saada. Käsitsi kirjutatud tarkvara optimeerimine uutes tingimustes on aga äärmiselt aeganõudev. Samas on võimalik masinõppel põhinevaid meetodeid kiiresti uute andmete peal treenida ja saada nii peaaegu optimaalsed tulemused.

Millised on Eesti digitiigri võimalused CERN-i täisliikmena?

Arvestades 2024. aasta Nobeli preemiat füüsikas (tehnärvivõrkude alusmeetodite arendamine) ja keemias (masinõppe rakendamine valgustruktuuride määramisel), on masinõppe rakendamine osakestefüüsika andmete analüüsis äärmiselt ajakohane. Võttes arvesse Eesti liitumist CERN-iga ning Eesti kui digiriigi strateegilist arengusuunda, on masinõppel ja tehisintellektil põhinevate meetodite arendamine CERN-i teadusrakendusteks Eestile oluline võimalus rahvusvahelisel teadusmaastikul.

Oleme loonud Eestis uue, rahvusvahelisel tasemel oskusteabe ja ka tööühma masinõppel põhinevate osakestefüüsika rekonstrueerimisalgoritmide arenduseks. Oleme laiendanud tegevust tau leptonite rekonstrueerimisalgoritmide arendamise (1, 6). Tau leptonid on kui hästi massiivsed elektronid, mis lagunevad kiiresti spetsiifilise mustriga osakeste jugadeks. Nad on eriti olulised Higgsi bosoni eneseinteraktsioonide uurimisel, kuna Higgsi boson laguneb küllaltki arvestataval määral massiivseteks tau leptoniteks, samas on need osakesed nii harvad, et neid on võimalik muudest tekkinud osakestest üsna kergesti eristada.

Varem rekonstrueeriti ka tau leptoneid peamiselt käsitsi kirjutatud reeglipõhiste algoritmidega. Need algoritmid ei ole tingimata väga kiired ega ka väga täpsed. Meie välja arendatud meetod võtab sisendiks otse joas olevad osakesed ja nende mõõdetud omadused ning lahendab korraka ära mitmetahulise masinõppeülesande. Nimelt määrame *transformer*-tüüpi mudeliga korraka ära, kas antud juga pärines tau leptonist või mitte (jah-ei tüüpi klassifikatsiooniülesanne), mis tüüpi tau leptoni lagunemisega oli tegu (mitmikklassifikatsiooni ülesanne) ning mis oli joa tekitanud tau leptoni esialgne energia (regressioon- ehk lähendusülesanne).

Seega on minu juhitud rahvusvahelise meeskonna uudne lähenemine ja edukas teostus avanud uue arengusuuna osakestefüüsika andmete rekonstrueerimises ning masinõppel põhineva uudse teadusarvutuse meetodikas. Meetodika on eriti oluline seoses CERN-i tulevaste uuendustega ja annab Eesti teadlastele võimaluse panustada CERN-i teadustegevusse rahvusvahelisel tasemel. Meetodikat saab edasi arendada, et luua üldine osakestefüüsika põrgete rekonstrueerimise

alusmudel, mida saab taaskasutada paljude ülesannete jaoks. Arvestades masinõppe ja tehisintellekti kiiret arengut, on seda tüüpi ülesannete püstitamise ja lahendamise oskus oluline ka pädeva tööjõu koolitamisel tehisintellekti alal.

Millised võimalused on Eesti noortel CERN-i tegevustes osaleda?

CERN on Euroopas ja maailmas osakestefüüsika eesliiniteaduse lipulaev. Seal töötavad oma valdkonna tipud, infovahetus on vaba ja vahetu. Seega on CERN suurepärase koht, kus oma oskusi proovile panna ja ennast arendada nii füüsika, arvutiteaduse kui ka üldiselt suurte projektide ja rahvusvahelise koostöö toimimise vallas.

Eriti saab rõhutada masinõppe praegust ja järjest kasvavat olulisust CERN-i tegevustes nii eesliiniteaduses kui ka üldiselt protsesside optimeerimisel. Tehisintellekti meetodite arendamiseks on vaja väga suuri andmehulkasid ja oskust nendega ümber käia. Üldiselt on sellised andmestikud ainult suurettevõtetel, nagu Meta, Google, Microsoft jne, kes on kogunud need oma kasutajatelt ega anna nendele ligipääsu just igähele.

Samas on CERN-il maailma suurimad avaandmestikud, mis on vabalt kasutada kõikidele soovijatele koos väga detailsete metaandmetega. Kuna need andmed on kogutud füüsikaeksperimentidest, siis ei kaasne nendega selliseid privaatsusega seotud eetilisi küsimusi, mis paratamatult on olulised isiklike andmete puhul. Samuti on füüsikaseaduste näol olemas täpne arvutuslik mudel, mis oskab neid andmeid küllaltki täpselt seletada. Me suudame teadaoleva füüsika alusel luua ka väga täpseid tehisandmeid, mida saab kasutada tehisaru mudelite treenimiseks ja testimiseks. Seega on CERN suurepärase kasvulava tehisaru tehnoloogiale ja teadmisele, kus osavõtt ei ole kuidagi piiratud.

Milliseid teadmisi oleks vaja, et CERN-i andmeanalüüsis ja masinõppe arenduses panustada?

Kõige olulisem on oskus loogiliselt mõelda ja oma ideid praktiliselt rakendada. Tänapäeval tähendab see programmeerimise ja andmete analüüsimise oskust.

Siin tuleb juba praegu appi tehisaru, mis oskab üpriski hästi tõlkida inimkeelsed juhised masinkeelde, näiteks laialdaselt kasutatavasse Pythoni programmeerimiskeelde. Küll aga ei tea tehisaru, mis ülesannet on vaja lahendada, samuti ei oska ta sõnastada piisava täpsusega soovitud küsimusi ega analüüsida võimalikke vigu või tekkivaid probleeme. Seega soovitatakse harjutada loogilist mõtlemist ning küsimuste täpset ja detailset sõnastamist, samuti praktilist programmeerimist koos tehisaruga konkreetsete probleemide lahendamise jaoks. Lisaks on vaja harjutada oskust, kuidas saada aru, kas tehisaru ajab sulle pada nii, et suu suitseb.

Oluline on teada, kuidas püstitada küsimusi ja leida neile andmetest vastuseid. Enamasti on kõige keerulisem küsida õige küsimus, millele vastuse leidmine nihutab teadmiste piiri veidi edasi. Piisavalt täpses küsimuses on tihti juba ka vastuse leidmise alge, aga see vajab ka täpset mõtlemist.

Kuna Eestis on käivitumas tehisintellekti ehk TI-hüpe, siis on siin väga hea võimalus ära kasutada ka Eesti ligipääsu CERN-ile ja sealsetele eesliiniarendustele rakendusliku tehisaru valdkonnas. Eesti teadlased ja tudengid saavad osaleda projektides, samuti kandideerida CERN-i töökohtadele IT, andmeteaduse ja tehisintellekti valdkondades. See on võimalus koolitada uue põlvkonna tehisarutsinere ja rakendada neid omakorda kõrgetehnoloogilise tööstuse arendamises.

VIITED

1. Lange, T., Nandan, S., Pata, J., Tani, L., Veelken, C. Tau lepton identification and reconstruction: a new frontier for jet-tagging ML algorithms. *Computer Physics Communications* 298 (2024), doi: 10.1016/j.cpc.2024.109095
2. Pata, J., Duarte, J., Mokhtar, F., Wulff, E., Yoo, J., Vlimant, J-R., Pierini, M., Girone, M. CMS kollaboratsiooni nimel. Machine Learning for Particle Flow Reconstruction at CMS. – 20th International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research, ACAT 2021. *J. Phys. Conf. Ser.* 2438 012100, doi: 10.1088/1742-6596/2438/1/012100
3. Pata, J., Duarte, J., Vlimant, J-R., Pierini, M., Spiropulu, M. MLPF: efficient machine-learned particle-flow reconstruction using graph neural networks. *Eur. Phys. J. C* 81, 381 (2021), doi: 10.1140/epjc/s10052-021-09158-w
4. Pata, J., Mokhtar, F., Duarte, J., Wulff, E., Pierini, M., Vlimant, J-R. CMS kollaboratsiooni nimel. Progress towards an improved particle flow algorithm at CMS with machine learning. – 21st International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research, ACAT 2022. CMS Detector Performance Note 2022, URL: <http://cds.cern.ch/record/2842375>
5. Pata, J., Wulff, E., Mokhtar, F., Southwick, D., Zhang, M., Girone, M., Duarte, J. Improved particle-flow event reconstruction with scalable neural networks for current and future particle detectors. *Nature Commun Phys* 7, 124 (2024), doi: 10.1038/s42005-024-01599-5
6. Tani, L., Seeba, N-N., Vanaveski, H., Pata, J., Lange, T. A unified machine learning approach for reconstructing hadronically decaying tau leptons. *Computer Physics Communications* 307 (2024), doi: 10.1016/j.cpc.2024.109399



Foto: Arno Mikkor

Joosep Pata

Sündinud 24. mail 1990 Tartus

2008 Miina Härma Gümnaasium

2012 Tartu Ülikool, füüsika (BSc)

2014 Tartu Ülikool, füüsika (MSc, *cum laude*)

2018 ETH Zürich, füüsika (PhD, ETH medal)

Pärast doktoriõpinguid töötas aastatel 2018–2020 USA-s Caltechis järel doktorina. Aastast 2021 töötab Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudis kõrge energia ja arvutusfüüsika laboris vanemteadurina. Aastatel 2020–2022 oli CERN-i CMS-i kollaboratsiooni rekonstruktsioonitarkvara koordinaator.

TAIMEDE JA MULLAORGANISMIDE INTERAKTSIOONIDE MITMEKESISUS JA ROLL ÖKOSÜSTEEMIDE TOIMIMISES

Marina Semtšenko (Tartu Ülikool)

*Teaduspreemia loodusteaduste valdkonnas tööde tsükli
„Taimede ja mullaorganismide interaktsioonide mitmekesisus ja roll
ökosüsteemide toimimises“ eest*

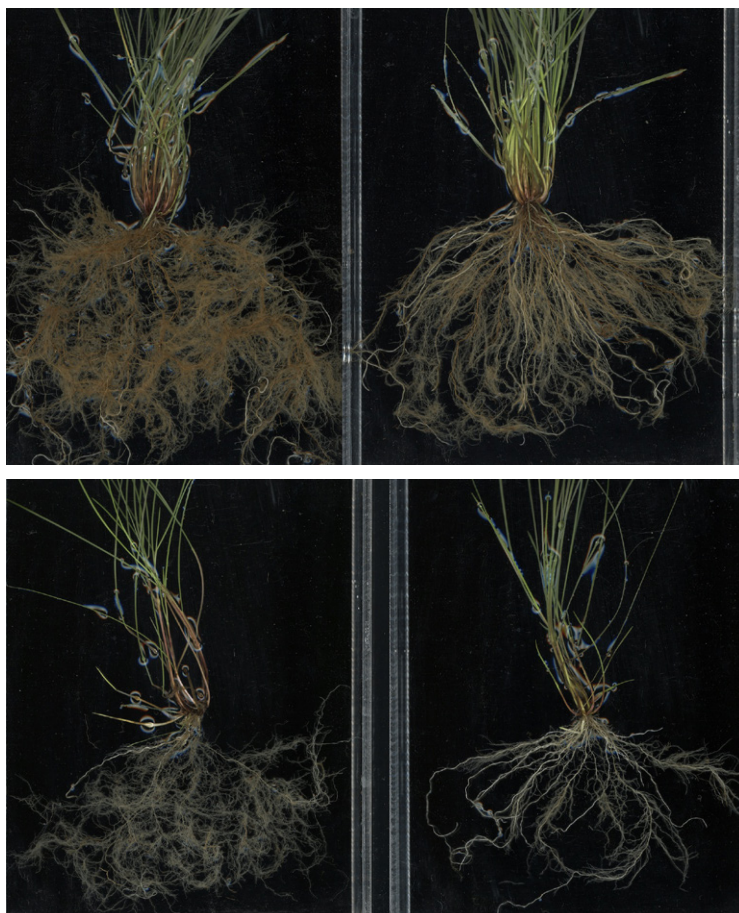
Taimed on maismaa ökosüsteemide energiavoo alustalad ning mullaorganismid on aineringluse ja taimede kasvu kesksed reguleerijad. Taimede elustrateegia määrab ära, kui kiiresti ja kui efektiivselt aineringe toimib ning kuidas ökosüsteem tervikuna globaalmuutustele reageerib. Seega on taimede elustrateegiate ja mullaprotsesside tundmine keskse tähtsusega loodusteaduslike teadmiste integreerimisel ja meie võimekuse kasvatamisel ennustamaks, kuidas ökosüsteemid tulevikus muutuvad. See temaatika on eriti aktuaalne käimasolevate globaalmuutuste valguses.

Taimede põhilised elustrateegiad

Kuigi taimi saab kirjeldada lõpmatu hulga eri parameetrite abil, paistab nende maapealset elu vaadeldes silma kaks olulist seaduspära. Esiteks on taimed nagu loomadki väga varieeruvad oma suuruse poolest. See erinevus on kõigile selgelt nähtav – kohtame looduses nii mitmekümnemeetriseid puid kui pisikesi rohundeid. Miks see nii on? Kuigi esmapilgul tundub suur olemine olevat edu võti, on looduses palju olukordi, kus suur kehamass ei pruugi olla hea strateegia. Näiteks kehasuurus ja kõrgus annavad eelise konkurentsis valguse pärast, kui vett ja toitaineid on külluses, samas on veenappuse korral väikesena lihtsam ellu jääda. Teine oluline taimestrategie aspekt paistab silma, kui katsume taimede lehti. Mõnel taimel on lehed väga haprad ja õhukesed, teisel aga nahkjad ja jäigad. Teadlased on lehtede ülesehitust pikalt uurinud ja avastanud, et lehtede lämmastiku- ja veesisaldust kasutades saab üsna edukalt kirjeldada taime üleüldist kasvustrateegiat: kiire strateegiaga liigid kasvatavad odavaid lehti, mille kõrge veesisaldus ja efektiivne lämmastikukasutus tagavad kiire süsiniku püüdmist (Wright jt, 2004; Reich, 2014). Siiski peavad sellised taimed maksma lõivu lehe

lühikese eluea arvelt. Samas panustavad aeglase strateegiaga taimed lehtede kaitseks igasuguste välismõjude (liigne valgus, põud, haigused ja taimesööjad) eest. Fotosüntees on selle võrra vähem efektiivne, aga see-eest on lehe eluiga pikem. Taimlehtede ülesehituse strateegiat võib kirjeldada majandusterminitega: taimed eelistavad kas kiiret või aeglast investeringutasuvust. Lõplik tasuvus (fotosünteesis fikseeritud süsiniku hulk) on sama, aga kiire tasuvus tuleb koos riskidega ning on hea strateegia vaid seal, kus elutingimused on taimele soodsad.

Lisaks taimede maapealsele ülesehitusele on loomulikult olulised ka juurte tunnused (joonis 1). Kui teadmised taimede maapealsete tunnuste kohta on suhteliselt heal järjel, siis taimejuurte omaduste andmed on seni väga lünklikud. Juureomaduste teoreetiline käsitus, kaasa arvatud maapealsete ja -aluste omaduste omavaheline sidumine, on selgelt ebapiisav. Vähesed teadmised on seotud mullas aset leidvate protsesside keerukuse ja ka sellega, et taimejuurte



Joonis 1. Taimejuurte mitmekesisus. Isegi ühe taimeliigi piires näeme suurt varieeruvust juurte jämeduses, harunemises ja tiheduses. Pildil on näidatud punase aruheina juured.

eraldamine mullast on juba puhtfüüsiliselt väga töömahukas. Selle teadmiste lünga täitmiseks tuli rahvusvaheline teadlaste rühm kokku 2019. aastal Leipzigi, kus asub Saksamaa integreeritud biodiversiteedi uuringute keskus. Keskus oli ideaalne platvorm maailma eri otstest ja eri komplementaarsete oskuste ja teadmistega teadlaste koostööks. Järgneva kolme aasta jooksul toimus järjepidev koostöö – olemasolevate andmebaaside ja üksikute teadlaste andmekogude sõelumine, süstematiseerimine ja ühtlustamine. Tulemuseks saime uue ja võimalikult täiusliku andmebaasi juure omadustest (Guerrero-Ramírez jt, 2021).

Saabus kauaoodatud hetk, kui saime nende andmete abil heita pilku juurte maailma ja kontrollida meie teoreetilisi eeldusi sellest, millised on juurte põhilised elustrateegiad ning kuidas nad sarnanevad sellega või erinevad sellest, mida me juba teame maapealse elu kohta. Juurte põhiliseks ülesandeks on toitainete ja vee võimalikult efektiivne hankimine mullast. Leidsime, et nii nagu lehtede, kehtib ka juurte puhul kiire ja aeglase investeringutasuvuse printsiip (Bergmann jt, 2020). Odavalt kasvatatud juured, kus kudedes on vähe kuivainet, on keskkonnamõjude eest nõrgalt kaitstud, aga see-eest võimaldavad kiiret toitainete hankimist väheste kulutustega. Samas jäävad tiheda koega juured alla toitainete hankimise kiiruse poolest, kuid on pikemaajalised.

Siiski seisavad taimed silmitsi oluliselt erinevate väljakutsete ja võimalustega maa peal ja maa all. Maa peal ammutavad taimed energiat päikesekiirgusest ja talletavad selle abil süsihappegaasi oma kudedes, redutseerides seda esialgu suhkruks, mida siis saab edasi kasutada kui ehituskive eri otstarveteks. Kui päikesekiirgust tuleb Maa peale kogu aeg juurde ennustataval moel, siis maa all on olukord palju dünaamilisem. Uued toitained, mis on taimejuurtele sobivas keemilises vormis, tekivad enamjaolt mulda mulla mikroorganismide elutegevuse tõttu. Mullaorganismide mitmekesisus on meeletu. Paljud neist on surnud taimejäänuste lagundajad. Just tänu neile vabanevad mulda lagunemisprotsesside tagajärjel uued toitained, mida taimejuured saavad omastada. Seega käib mullas pidev uute toitainete vabanemine mullaorganismide poolt ja nende ammutamine taimejuurte poolt. Sõltuvalt ökosüsteemi asukohast ja vastavalt kliima ning aluskivimi omadustele on need protsessid kas aeglased või kiired ning määravad ära, milline juurte elustrategia on kõige sobilikum.

Lisaks lagundajatele on taimede käekäigus tähtis osa ühel mullaseente rühmal. Need on mükoriissed seened (joonis 2). Arvatakse, et mükoriissed seened mängivad määravat rolli taimede maismaa asustamisel rohkem kui 400 miljonit aastat tagasi. Tegu on iidse kooselu vormiga, kus taim varustab seent süsinikuühendite kui peamise energiallikaga, samas kui seen kogub keskkonnast oma hüüfide (niiditaolised seenestruktuurid) abil toitaineid ja vett ning varustab nendega taime. Selline kaubavahetus on mõlemale poolele kasulik, kuna hüüfid on väga peenikesed ja seega on nende tootmine energeetiliselt odavam kui taimejuurte kasvatamine. Kuna aga seenel puudub võime ise süsinikuühendeid hankida, siis on taime poolt pakutav vastutasu talle kriitilise tähtsusega. Seega toimivad mükoriissed seened kui taimejuurte tõhusad pikendused.



Joonis 2. Mükoriissed seemed on aidanud taimedel maismaad vallutada, abistades taimi toitainete hankimisel. Seeniidistik on väga peenike ja seetõttu saab seda üles ehitada väiksema kuluga kui taimejuuri. Seega on toitainete puudumisel otstarbekam delegeerida toitainete otsimist mullas seenele, mis saab taimelt vastutasuks fotosünteesis toodetud orgaanilist süsinikku. Vasakul: arbuskulaarmükoriisse seene struktuurid taimejuures (tumedad kogud) ja juurest väljuvad seeneniidid. Paremal: ektomükoriissed seeneniidid männijuure ümbruses. Pane tähele juurte ja seeneniitide jämeduse erinevusi.

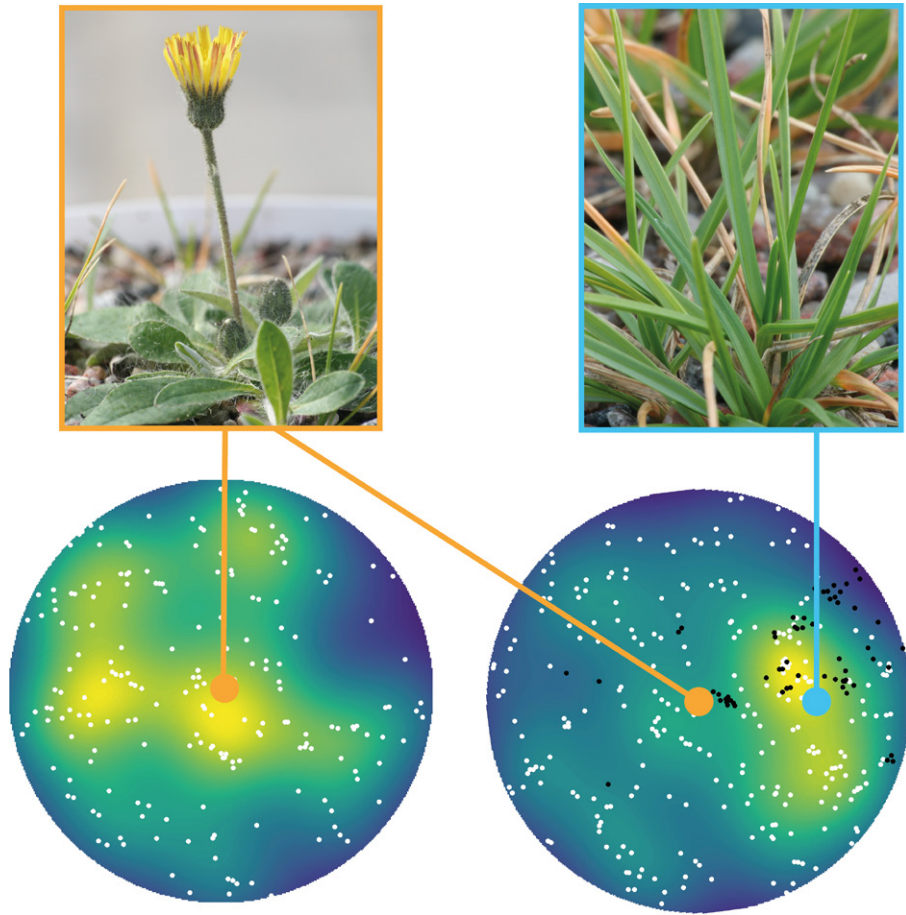
Kuigi ka tänapäeval on koostöö mükoriissete seentega taimeriigis väga laialt levinud, võib siiski täheldada, et maismaataimede evolutsioon on viinud muutusteni juurte morfoloogias (Ma jt, 2018). Hiljuti evolutsioonis tekkinud taimerühmad toodavad peenemaid juuri. Mis on sellise muutuse taga? Teadlased on püstitanud hüpoteesi, et koostöö mükoriissete seentega nõuab jämedat juurt ja selliste juurte tootmine on taimele kulukas. Kui vaatame juure sisse, siis näeme kahte selgelt erinevat kude. Keskul on juhtkude, mis vastutab toitainete, vee ja muude ühendite transpordi eest juurte ja maapealsete taimeosade vahel. Selle ümber on mitu kihti rakke, mille peamiseks ülesandeks peetakse just mükoriissete seente majutamist. Just nendes rakkudes toimub aktiivne kaubavahetus ja see kude pakub seentele välismõjude eest kaitstud pelgupaika. Tänapäeval leiab nii looduslike protsesside kui inimtegevuse (nt väetamise, õhusaaste) tagajärjel maakeral järjest rohkem selliseid kasvukohti, kus toitaineid on mullas küllaldaselt ja mükoriissete seente abi pole enam vajalik. Sellistes tingimustes saavad eelise taimeliigid, kes kasvatavad peenikesi juuri ja ei paku enam koostööd seentele (Zobel jt, 2024).

Teooria testimisel oli keskse tähtsusega vaadata, kas juure transpordikudet ümbritsevad rakukihid tõepoolest määravad mükoriissete seente ohtruse eri taimeliikide juurtes. Kahjuks on nende parameetrite mõõtmine juurtes ülimalt ajamahukas ning leidsime ka, et juure kudede vahelkordade andmeid oli olemasolevates andmestikes äärmiselt vähe. Koostasime vajalike taimeliikide nimekirjad. Igauks otsis oma kodumaalt neid liike nii palju kui sai, järgnes mikroskopeerimine ja saime andmestiku paremaks. Meie kogutud andmesti-

kust nägime, et tõepoolest on lisaks kiire ja aeglase strateegiaga juurtele maa all selgelt eristatav seentega koostöö tegemise telg (Bergmann jt, 2020). Elava arutelu tulemusena panime nendele värskest kirjeldatud strateegiatele nimed: osta-sisse-strateegia (ingl *outsourcing*) kirjeldamaks liike, kes panustavad koostöösse mükoriisaseentega, ja tee-ise-strateegia (ingl *do-it-yourself* ehk DIY) kirjeldamaks liike, kes saavad hakkama ilma seeneta.

Järgmiseks suureks küsimuseks oli, kas kirjeldatud strateegiad taimede ressursside omastamises ja kasutuses maa peal ja maa all on omavahel seotud. Maapealsete ja -aluste tunnuste võrdlusi oli tehtud väiksemates kohalikes uurin-gutes ja tulemused olid üsna kirevad. Alustasime taas teooriast, et selgitada, kust me tegelikult eeldaks koordinatsiooni maa peal ja all. Teoreetiliselt on koordinatsioon vajalik, kuna taim ei saa kasvada suureks maa peal ja toota suurel hulgal lehti ilma adekvaatse juuresüsteemita, mis varustaks maapealseid osi hulga vee ja toitainetega. Tõepoolest leidsime uuest globaalsest andmesti-kust, et lehtede ja juurte lämmastiku ja fosfori kontsentratsioonid on üldjoontes positiivselt omavahel seotud. Sama kehtib ka lehtede ja juurte kudede tiheduse puhul (Weigelt jt, 2022). Samas pole teoreetilist põhjust oodata seoseid lehte-de paksuse ja juurte jämeduse vahel, kuna esimese funktsiooniks on valguse püüdmise strateegia ja teise funktsiooniks on hoopis koostöö mullaseentega. Siiski on taimed pidanud kohastuma väga erinevate keskkonnanatingimustega, et asustada kogu maailma, ning need tingimused ei pruugi olla tugevalt seotud maa peal ja all ning ka evolutsioonilised „lahendused“ võivad olla mitmekesised. Maapealsete ja -aluste tunnuste seoste uurimine on alles algjärgus, erinevad statistilised käsitlused toovad esile järjest uusi aspekte ja arutelu selle üle, kuidas maapealsete ja -alused taimede tunnused koos varieeruvad, alles käib (Bueno jt, 2023; Weigelt jt, 2023). Näiteks kombineerisime sama autorite grupiga juurte tunnuste andmestiku teise andmebaasiga, mille abil saab kindlaks teha, mis kliimaatilistes oludes eri taimeliigid maailmas esinevad. Leidsime, et teoreeti-liselt oodatud lõivsuhted, kus iga juure üleshituse strateegia on edukas ühes, aga mitte teises keskkonnas, ei pea paika (Laughlin jt, 2021). Leidsime, et eriti kuivas kliimas on soodne omada hästi kaitstud juuri. Samas ei tähendanud see, et odavad ja nõrgalt kaitsud juured on ainuke soodne strateegia niiskes kliimas. Niiskes kliimas said sama hästi hakkama nii tugevalt kui ka nõrgalt kaitstud juurtega taimeliigid. Tundub, et soodsamates kliimatingimustes on taimedel vähem survet omada kindlat strateegiat ja edukaks püsijäämiseks on palju erinevaid lahendusi.

Lisaks kergesti mõõdetavatele juureomadustele on taime edukaks kasvuks mulla-keskkonnas olulised ka muud aspektid, mille mõõtmine on metodoloogiliselt keeruline ning takistab selle eriala edasist arengut. Näiteks lisaks juure ülesehitu-sele on oluline ka see, kui efektiivselt suudab taim juuri mullas paigutada, et tagada maksimaalne võimalik toitainete omastamine. Selle mõõtmine on ülimalt keeru-line, kuna mulla sisse me ei näe. Katsetasime mulla koos juurtega külmutamist ja külmunud mulla lõikamist eri sügavustel. Seejärel sulatasime mulla, skanee-risime lõigatud pinda ja kaardistasime juurte ruumilisi koordinaate (joonis 3). Saime maa-alused kaardid, mille põhjal oli võimalik arvutada, kus ja mil



Joonis 3. Taimejuurte maa-alused kaardid. Punktidega on märgitud juurte asukohad mullas ja eri värvid tähistavad eri taimeliikidele kuuluvaid juuri. Paremalt kasvab harilik karutubakas üksi rõnga keskel ning tema valgega märgitud juured jaotuvad ruumis suhteliselt ühtlaselt, aga mõnevõrra koondunult juurdumispunkti lähedusse. Vasakul on karutubakas taas istutatud ala keskele, aga seekord kasvab ta kõrval harilik lubikas, mille juurte asukohad on tähistatud mustade täppidega. Antud juhul koondab karutubakas juuri just naabri ümbrusesse. (Kohandatud Semchenko, 2020 illustratsioonist.)

määral juured ruumis kuhjuvad ning kuidas juured reageerivad naabertaimede kohalolule (Semchenko, 2020; Lepik jt, 2021). Teiseks ülioluliseks aspektiks on juureeritised. Nimelt eritavad taimejuured olulise osa fotosünteesis toodetud orgaanilist süsinikku mulda, mis kujundab juurte ümbruses elutsevat mikroobi-kooslust. Vaatamata juureeritiste olulisusele teame nende rollist mullaprotsesside juhtimises veel väga vähe. Meie uurimistöö näitab selgelt, et juureeritised reguleerivad olulisel määral surnud taimekudede lagunemist ja toitainete ringlust

mullas (Semchenko jt, 2021; Heredia-Acuña jt, 2023). Mõju toitainete ringlusele võib olla nii positiivne (juureeritised panustavad kiiremasse ringlusesse) kui negatiivne (kõdu lagunemine aeglustub). Miks nii, on alles selgitamisel. Ka siin mängib olulist rolli taime elustrateegia ja keskkonnatingimused, mis loovad kas sünergiat või vastasseisu taime ja mulla mikroobioomi huvide vahel.

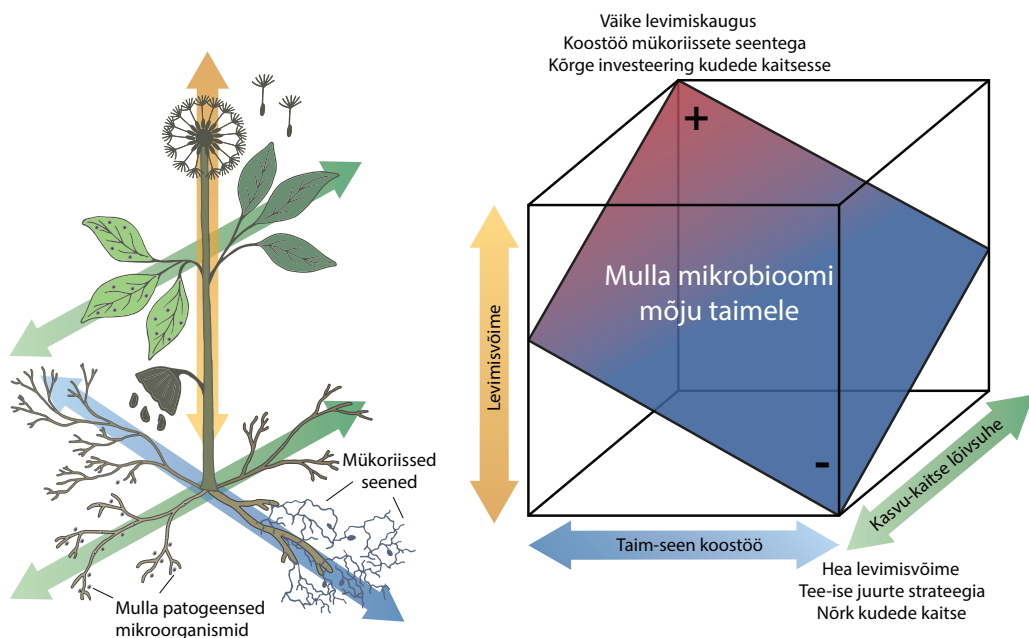
Taimede ja mulla vaheline tagasiside

Kuidas täpsemalt taimed ja mullamikroobid teineteist vastastikku mõjutavad? Kas saame ka siin leida seaduspärasid, mis aitaks meil loodusprotsesse paremini mõista ja vajadusel suunata? Üldiselt näeme, et taimede elustrateegiad mängivad olulist rolli selles, kuidas taimestik mõjutab mullakeskkonda. Taimede põhjustatud muutused mulla keemias ja mikroobioomis mõjutavad omakorda järgmiste taimepõlvkondade käekäiku ning kogu ökosüsteemi toimimist. Sellised taimede ja mulla vahelised tagasisidestatud protsessid on osutunud ülioluliseks, selgitamiseks ökosüsteemide aineringlust ja taimestiku dünaamikat ning on muutunud omaette teadusharuks (van der Putten jt, 2013).

Taime-mulla tagasiside mõju ökosüsteemile määrab suuresti ära taimede ja mulla vaheliste interaktsioonide spetsiifilisus. Tihtipeale näeme, et sama taimeliik ei suuda pikalt samal kohal kasvada ehk taim mõjutab mullas toimuvat enda suhtes negatiivselt. Need muutused mullas suruvad samas alla spetsiifiliselt vaid antud taimeliigi kasvu. Teiste liikide kasv sel mullal ei pruugi olla tugevalt mõjutatud. Ilmselt avastasid põlluharijad selle nähtuse veel enne teaduse arengut ning ka tänapäeval on saagikuse hoidmiseks oluline põllukultuuride vaheldus – samal põllul ei kasvatata järjepanu sama vilja, vaid eri aastatel külvatakse eri kultuure. Hiljutised uuringud näitavad, et ka looduses seisavad taimed silmitsi sama probleemiga, ning teadlased pakkusid, et selle nähtuse põhjuseks on taimeliigile spetsiifiliste looduslike vaenlaste kuhjumine ruumis. Nii on seda lihtne tuvastada näiteks maapealsete putukatega, kes toituvad kindlatest taimeliikidest. Võib oletada, et ka mullaorganismide seas on selliseid kindla taime-eelistusega haigustekitajaid. Need võiksid olla peamisteks taimede mitmekesisuse alalhoidjateks ökosüsteemides, põhjustades sõltuvust nn negatiivsest sagedusest ja tihedusest – nii kui üks liik muutub taimestikus domineerivaks, surub tema edasist levikut spetsiifiliste haigustekitajate rünnak. Teooria töötati algselt välja maapealsete organismide uuringute põhjal, samas kui taimeliigi spetsiifilisuse olemasolu mullaorganismide seas ja selle roll taime-mulla tagasiside kujundamisel on alles avastamisjärgus.

Kuna aeg oli küps vahekokkuvõtte tegemiseks, kutsusin kokku rahvusvahelise töörühma, ehitamaks üles selgem teoreetiline raamistik taime-mulla tagasisidet põhjustavate mehhanismide kohta ja ka selgitamaks, milline on mullaorganismide tegelik taimeliigi spetsiifilisus olemasolevate andmete põhjal (Semchenko jt, 2022). Vastandina varasemale ettekujutusele leidsime, et nii haigusi põhjustavad kui mükoriissed seened mullas on suhteliselt madala peremeesspetsiifilisusega – seened nakatavad paljusid erinevaid taimeliike. Siiski ei tähenda see, et nende

seente mõju taime kasvule on igal pool sama. Spetsiifiline tagasiside mulla ja taime vahel võib siiski kujuneda taimede endi elustrateegiatega mitmekesisuse tulemusena. Kuna kiire kasvustrateegiaga taimeliikidel on nõrgalt kaitstud juured ja lehed, siis on haigustekitajate seente mõju nendele taimedele ka tugevam (ja seega on tagasiside taimekasvule negatiivsem) kui aeglase investeeringutasuvusega taimede puhul. Jämedate juurtega liikidele on oluline koostöö mükoriisete seentega, mis tingib positiivsema tagasiside mulla mikrobioomiga, võrreldes peenejuureliste liikidega, kelle jaoks on mükoriisid pigem parasiidid (joonis 4).



Joonis 4. Taimede põhilised elustrateegiad ja nende roll taimede ja mullaorganismide vaheliste suhete kujundamises. Taimede elustrateegiad varieeruvad mööda kolme põhilist telge. Esiteks seisavad taimed silmitsi valikuga, kas kaitsta oma kudesid, mis nõuab suurt investeeringut, kuid pikendab kudede eluiga, või panustada kiire kasvu, tootes odavaid kudesid, mis on aga patogeenide ja muude välismõjude eest nõrgalt kaitstud. Teiseks saavad taimed toota kas palju peenikesi juuri, millega mullast toitaineid otsida (tee-ise-strateegia), või osta see töö sisse, investeerides koostöösse mükoriisete seentega. Kolmandaks sõltub nende valikute tasuvus suuresti levimisvõimest. Kui seemned kukuvad emataime lähedusse, tasub investeerida kudede kaitse ja koostöösse seentega, mis peaks tagama positiivsed suhted mulla mikrobioomiga. Kui aga taim on võimeline oma seemneid kaugemale levitama, siis võib seda kombineerida tee-ise-strateegiaga ja panustada vähem kaitsele. (Kohandatud Semchenko jt, 2022 artiklist.) Sellisel juhul kujuneb suhe mulla mikrobioomiga pigem negatiivseks patogeenide suure mõju tõttu.

Lisaks peab teoreetiliselt olema oluline ka taime levimisstrateegia, mis pole veel siin artiklis tähelepanu pälvinud (joonis 4). Taimedel on põhimõtteline valik paljunemises ja oma järglaste levitamises – kas teha palju väikeseid seemneid või vähe suuri seemneid. Seda valikut on juba pikalt vaadeldud nii taimede kui loomade puhul ning käsitletud kui lõivsuhet järglaste arvu ja kvaliteedi vahel. Mõnes keskkonnas on otstarbekam toota palju järglasi, mis tuleb iga järglase kvaliteedi arvelt. Samas teises keskkonnas on jällegi soodsam toota vähe järglasi, aga varustada nad hulga toitainetega (ehk toota suuri seemneid) paremaks varases elus ellujäämiseks. Lisaks aga on seemne suurusel tagajärjed ka levimisvõimele. Suured seemned kukuvad paratamatult emataime vahetusse lähedusse, samas kui väikesed seemned saavad lihtsasti tuulega levida emataimest kaugemale. Mis on sellel pistmist mullamikroobidega? Kuna mullamikroobid ei jaotu ruumis ühtlaselt ja emataime elustrateegia kujundab olulisel määral tema ümbruses olevat mikrobioomi, siis satub emataime läheduses idanev seeme emataime mikrobioomi mõjuvälja. See on kasulik, kui antud taimeliik sõltub tugevasti koostööst mükoriissete seentega – emataime kõrval on neid kindlasti saada, seega annab suur seeme ja puudulik levimine siin eelise. Kui aga emataim on kiire elustrateegiaga ja tema lähedusse kuhjub haigustekitajaid, siis tasub seemneid kaugemale levitada, et idandid pääseks emataime ebasoodsast mõjuväljast. Vähe- sed andmed, mida on siiani kogutud, toetavad seda teooriat – suureseemnelistel taimedel kipub mulla tagasiside olema positiivsema mõjuga taime kasvule kui väikeste seemnetega liikidel (Semchenko jt, 2022). Seega annab taime elustrateegiate tundmine võimaluse ennustada ka suhteid mulla mikrobioomiga.

Kliimamuutuste ajastul on oluline ennustada ka seda, kuidas taime-mulla tagasiside muutub uutes tingimustes ning mis on selle potentsiaalsed tagajärjed taimestiku produktiivsusele ja mitmekesisusele. Koos eriala parimate ekspertidega arendasime teooria, mis võtab arvesse taimede elustrateegiaid ja ökosüsteemide eelnevat kliimaatilist ajalugu taimede põuataluvuse ennustamisel (de Vries jt, 2023). Olulise aspektina toob see töö välja taimede ja mullaorganismide vahelise ko-evolutsioneerumise rolli ökosüsteemi põuataluvuse kindlustamisel. Kuigi andmeid veel napib, on põuased kohad, kus taimed ja mullamikroobid said pikka aega koos kasvada, sobilikuks keskkonnaks, kus aja jooksul kujunevad välja üksteisele kasulikud suhted taimede ja mulla mikrobioomi vahel. Need peaksid tagama ökosüsteemi stabiilsuse. Samas võib parasniiskes kliimas kujunenud taimestik olla ootamatust põuast tugevasti mõjutatud ja muuta taimede ja mullamikroobide vahelised suhted negatiivsemaks. Seega võib ennustada, et kliimamuutustega seotud järsk põudade sagenemine võib parasniiskes kliimas kaasa tuua suuri muutusi.

Kuigi enamik töid keskendub puhtalt mikroorganismidele kui taime ja mulla tagasiside vahendajatele, on mullaprotsesside toimimisele oluline ka keemiline keskkond. Taimed eritavad mulda mitmekesise koostisega orgaanilisi ühendeid, mis mulda kuhjades mõjutavad taimi erineval moel. Keemilised interaktsioonid on olulised nii otseses taimedevahelises konkurentsisis kui ka taimede ja mullas elutsevate haigustekitajate ning taimedele kasulike mikroobide vahelistes interaktsioonides. Koostöös kaasautoritega töötasime välja uue teoreetilise raamistiku,

mille eesmärk on siduda olemasolevad teadmised taimede elustrateegiast mulla keemiliste protsessidega (Delory jt, 2024). Nimelt pakub see raamistik välja, et taimede kasvustrateegia, levimisvõime ja toitainete hankimise strateegia määravad, kui kiiresti ja kui ulatuslikult taim enda mullakeskkonda keemiliselt muudab ning kui tundlik on see taim teiste eritatud keemiliste ühendite suhtes.

Taime-mulla tagasiside printiipi võib rakendada ka ajaliselt ja ruumiliselt suurekskaalaliste protsesside mõtestamiseks. Koostöös Tartu Ülikooli kolleegidega töötasime välja üldpõhimõtted, kuidas tagasisidestatud protsessid võiksid kujundada taimestikku makroevolutsioonilisel skaalal (Zobel jt, 2023). Selle kohaselt domineerib pikemalt ja suuremal alal püsinud ökosüsteemides taimede ja keskkonna vahel negatiivne tagasiside, mis kindlustab selliste ökosüsteemide kõrge elurikkuse. Samas nooremates ja häiringutele avatud ökosüsteemides kohtab tugeva positiivse tagasisidega liike, mis kujundavad keskkonda endale sobivaks. Selliste noorte ja häiringute poolt kujundatud ökosüsteemide näideteks, kus üks taimeliik tugevalt domineerib ja enda keskkonda kujundab, on pilliroo-väljad või männimets. Selle vastandiks on liigirikas troopiline vihmamets, mis sai miljoneid aastaid häirimatult kujuneda. Evolutsiooni jooksul toimub ringlus liigirohkete ja liigivaeste ning negatiivse ja positiivse tagasisidega ökosüsteemide vahel. Sellise ringluse üheks peamiseks põhjuseks on taimede ja nende looduslike vaenlaste võidujooks. Toimub pidev teineteisega kohastumine – tekib uusi liike, mille toksiline keemiline koostis või muud kohastumused teevad need olemasolevatele haigustekitajatele või taimesööjatele ebasobivaks. Kuid aja jooksul tekib evolutsioonis uusi looduslikke vaenlasi, kes suudavad siiski sellest taimest toituda või teda nakatada. Seega nihutavad tagasisidestatud protsessid algselt liigivaest süsteemi suurema bioloogilise mitmekesisuse suunas.

Lisaks võivad tagasisidestatud protsessid viia eri strateegiate evolutsioonini taimeriigis. Kui seni oli juttu taimede fikseeritud strateegiast, kus igal liigil on kindel ja muutumatu viis oma keskkonnas ellu jääda, siis tegelikkuses on looduses ka selliseid olukordi, kus on väga kasulik olla paindliku strateegiaga. Üks paindlikkuse näitajaid taimede ja mullamikroobide suhete vallas on taime võime reguleerida kooselu mikroobidega. Näiteks võib mõni taimeliik panustada mükoriisete seentega koostösse vaid sattudes toitainetevaesse kasvukohta, kuid lülitada tee-ise-strateegiale, kui seentest pole enam kasu. Selline paindlikkus mikroobsetes suhetes võib olla keskne strateegia, mis võimaldab muutuv maailmas edukaks saada (Zobel jt, 2024). Inimese poolt tugevasti mõjutatud maastikes, kus sobilik keskkond on killustatud või on hoopis tekkinud uus keskkond kliimamuutuste või saaste tagajärjel, saavad eelise sellised taimeliigid, kes suudavad reguleerida enda interaktsioone mikroobioomiga nii, et selle kulud ja tulud on optimeeritud. Stabiilses keskkonnas evolutsioneerunud liigid, kel selline võime puudub, osutuvad tugevate inim mõjudega maastikes aga kaotajateks.

Tulevikuväljavaated

Taimede elustrateegiate parem mõistmine rikastab meie baasteadmisi ning võimaldab paremini hinnata ökosüsteemide seisundit ja nende tundlikkust kliimamuutuste ja muude häiringute suhtes. Selle järgi saame teadlikult seada looduskaitse prioriteete ja tõhustada ökosüsteemide taastamist. Looduslike protsesside uurimine annab ka uusi rakenduslikke ideid sellest, kuidas saaksime suunata mulla mikrobioomi paremale järjele. Saame otsida ja leiutada uusi põllukultuure, mille elustrategia tagab positiivsemaid suhteid mullamikroobidega ja tõhusat toitainete ringlust ning süsiniku talletamist mulda. Kindlasti on tähtis ka kliimamuutustega arvestamine, kus taime elustrateegiates orienteerumine on taas väga olulisel kohal. See ülesanne ei saa olema kerge, kuid sügav arusaam looduses kehtivatest lõivuhettest ja eri tunnuste kombinatsioonide võimalikkusest on kindlasti abiks parima võimaliku kompromissi leidmiseks toidu tootmises ja looduskeskkonna hoidmises.

VIITED

Bergmann, J., Weigelt, A., van der Plas, F., Laughlin, D. C., Kuyper, T. W., Guerrero-Ramirez, N. R., Valverde-Barrantes, O. J., Bruelheide, H., Freschet, G. T., Iversen, C. M., Kattge, J., McCormack, M. L., Meier, I. C., Rillig, M. C., Roumet, C., Semchenko, M., Sweeney, C. J., van Ruijven, J., York, L. M., Mommer, L. 2020. The fungal collaboration gradient dominates the root economics space in plants. *Science Advances*, 6, eaba3756 <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba3756>

Bueno, C. G., Toussaint, A., Träger, S., Díaz, S., Moora, M., Munson, A. D., Pärtel, M., Zobel, M., Tamme, R., Carmona, C. P. 2023. Reply to: the importance of trait selection in ecology. *Nature*, 618(7967), E31–E34, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06149-7>

Delory, B. M., Callaway, R. M., Semchenko, M. 2024. A trait-based framework linking the soil metabolome to plant-soil feedbacks. *New Phytologist*, 241, 1910–1921, <https://doi.org/10.1111/nph.19490>

Guerrero-Ramírez, N. R., Mommer, L., Freschet, G. T., Iversen, C. M., McCormack, M. L., Kattge, J., Poorter, H., van der Plas, F., Bergmann, J., Kuyper, T. W., York, L. M., Bruelheide, H., Laughlin, D. C., Meier, I. C., Roumet, C., Semchenko, M., Sweeney, C. J., van Ruijven, J., Valverde-Barrantes, O. J., Aubin, I., Catford, J. A., Manning, P., Martin, A., Milla, R., Minden, V., Pausas, J. G., Smith, S. W., Soudzilovskaia, N. A., Ammer, C., Butterfield, B., Craine, J., Cornelissen, J. H. C., de Vries, F. T., Isaac, M. E., Kramer, K., König, C., Lamb, E. G., Onipchenko, V. G., Peñuelas, J., Reich, P. B., Rillig, M. C., Sack, L., Shipley, B., Tedersoo, L., Valladares, F., van Bodegom, P., Weigelt, P., Wright, J. P. Weigelt, A. 2021. Global root traits (GRooT) database. *Global Ecology and Biogeography*, 30, 25–37, <https://doi.org/10.1111/geb.13179>

Heredia-Acuña, C., Semchenko, M., de Vries, F. T. 2023. Root litter decomposition is suppressed in species mixtures and in the presence of living roots. *Journal of Ecology*, 111, 2519–2531, <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14207>

Laughlin, D. C., Mommer, L., Sabatini, F. M., Bruelheide, H., Kuyper, T. W., McCormack, T. W., Bergmann, J., Freschet, G. T., Guerrero-Ramírez, N. R., Iversen, C. M., Kattge, J., Meier, I. C., Poorter, H., Roumet, C., Semchenko, M., Sweeney, C. J., Valverde-Barrantes, O. J., van der Plas, F., van Ruijven, J., York, L. M., Aubin, I., Burge, O. R., Byun, C., Custerovska, R., Dengler, J., Forey, E., Guerin, G. R., Hérault, B., Jackson, R. B., Karger, D. N., Lenoir, J., Lysenko, T., Meir, P., Niinemets, U., Ozinga, W. A., Peñuelas, J., Reich, P. B., Schmidt, M., Schrod, F., Velázquez, E., Weigelt, A. 2021. Root traits explain plant species distributions along climatic gradients yet challenge the nature of ecological trade-offs. *Nature Ecology & Evolution*, 5, 1123–1134, <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01471-7>

Lepik, A., Abakumova, M., Davison, J., Zobel, K., Semchenko, M. 2021. Spatial mapping of root systems reveals diverse strategies of soil exploration and resource contest in grassland plants. *Journal of Ecology*, 109, 652–663, <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13535>

Ma, Z. Q., Guo, D. L., Xu, X. L., Lu, M. Z., Bardgett, R. D., Eissenstat, D. M., McCormack, M. L., Hedin, L. O. 2018. Evolutionary history resolves global organization of root functional traits. *Nature*, 555, 94–97, <https://doi.org/10.1038/nature25783>

van der Putten, W. H., Bardgett, R. D., Bever, J. D., Bezemer, T. M., Casper, B. B., Fukami, T., Kardol, P., Klironomos, J. N., Kulmatiski, A., Schweitzer, J. A., Suding, K. N., van de Voorde, T. F. J., Wardle, D. A. 2013. Plant-soil feedbacks: the past, the present and future challenges. *Journal of Ecology*, 101, 265–276, <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12054>

Reich, P. B. 2014. The world-wide ‘fast–slow’ plant economics spectrum: a traits manifesto. *Journal of ecology* 102: 275–301, <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12211>

Semchenko, M. 2020. Constraints on selfish behavior in plants. *Science*, 370, 1167–1168, <https://doi.org/10.1126/science.abf2785>

Semchenko, M., Barry, K. E., de Vries, F. T., Mommer, L., Moora, M., Maciá-Vicente, J. G. 2022. Deciphering the role of specialist and generalist plant-microbial interactions as drivers of plant-soil feedback. *New Phytologist*, 234, 1929–1944, <https://doi.org/10.1111/nph.18118>

Semchenko, M., Xue, P. A., Leigh, T. 2021. Functional diversity and identity of plant genotypes regulate rhizodeposition and soil microbial activity. *New Phytologist*, 232, 776–787, <https://doi.org/10.1111/nph.17604>

Zobel, M., Koorem, K., Moora, M., Semchenko, M., Davison, J. 2024. Symbiont plasticity as a driver of plant success. *New Phytologist*, 241, 2340–2352, <https://doi.org/10.1111/nph.19566>

Zobel, M., Moora, M., Pärtel, M., Semchenko, M., Tedersoo, L., Öpik, M., Davison, M. 2023. The multiscale feedback theory of biodiversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 38, 171–182, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.09.008>

de Vries, F., Lau, J., Hawkes, C., Semchenko, M. 2023. Plant-soil feedback under drought: does history shape the future? *Trends in Ecology & Evolution*, 38, 708–718, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.03.001>

Weigelt, A., Mommer, L., Andrzejek, K., Iversen, C. M., Bergmann, J., Bruelheide, H., Fan, Y., Freschet, G. T., Guerrero-Ramírez, N. R., Kattge, J., Kuyper, T. W., Laughlin, D. C., Meier, I. C., van der Plas, F., Poorter, H., Roumet, C., van Ruijven, J., Sabatini, F. M., Semchenko, M., Sweeney, C. J., Valverde-Barrantes, O. J., York, L. M., McCormack, M. L. 2021. An integrated framework of plant form and function: the belowground perspective. *New Phytologist*, 232, 42–59, <https://doi.org/10.1111/nph.17590>

Weigelt, A., Mommer, L., Andrzejek, K., Iversen, C. M., Bergmann, J., Bruelheide, H., Freschet, G. T., Guerrero-Ramírez, N. R., Kattge, J., Kuyper, T. W., Laughlin, D. C., Meier, I. C., van der Plas, F., Poorter, H., Roumet, C., van Ruijven, J., Sabatini, F. M., Semchenko, M., Sweeney, C. J., Valverde-Barrantes, O. J., York, L. M., McCormack, M. L. 2023. The importance of trait selection in ecology. *Nature*, 618, E29–E30, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06148-8>

Wright, I. J., Reich, P. B., Westoby, M., Ackerly, D. D., Baruch, Z., Bongers, F., Cavender-Bares, J., Chapin, T., Cornelissen, J. H. C., Diemer, M., Flexas, J., Garnier, E., Groom, P. K., Gulias, J., Hikosaka, K., Lamont, B. B., Lee, T., Lee, W., Lusk, C., Midgley, J. J., Navas, M-L., Niinemets, Ü., Oleksyn, J., Osada, N., Poorter, H., Poot, P., Prior, L., Pyankov, V. I., Roumet, C., Thomas, S. C., Tjoelker, M. G., Veneklaas, E. J., Villar, R. 2004. The world-wide leaf economics spectrum. *Nature*, 428, 821–827, <https://doi.org/10.1038/nature02403>



Foto: Arno Mikkor

Marina Semtšenko

Sündinud 8. mail 1982 Tallinnas

2000 Laagna Gümnaasium

2004 Tartu Ülikool, bioloogia (BSc, *cum laude*)

2005 Tartu Ülikool, taimeökoloogia ja ökofüsioloogia (MSc)

2008 Tartu Ülikool, taimeökoloogia ja ökofüsioloogia (PhD)

Aastatel 2005–2007 tegi doktoriõpingute ajal teadustööd Inglismaal Sussexi Ülikoolis. Aastatel 2007–2015 töötas teadurina Tartu Ülikooli ökoloogia- ja maateaduste instituudis ning seejärel 2015–2020 teaduri ja lektorina Manchesteri Ülikooli mulla- ja ökosüsteemiökoloogia laboris. 2020. aastal pälvis ta Marie Skłodowska-Curie individuaalgrandi, misjärel naasis Tartu Ülikooli ning asus tööle esialgu vanemteaduri ja seejärel kaasprofessorina. 2022. aastast on Marina Semtšenko evolutsioonilise taimeökoloogia professor. Oma praeguses teadustöös keskendub ta taimede kohastumisele eri keskkonnatingimustega, taimede ja mullamikroobide suhetele ning taimejuurtest eralduvate keemiliste ühendite rollile nende suhete kujundamisel.

ANISOTROOPSETEL ÕHUKESEKILELISTEL ABSORBERMATERJALIDEL PÕHINEVAD PÄIKESEPATAREID: DISAIN JA SÄÄSTLIKE TEHNOLOOGIATE ARENDUS

Ilona Oja Açık, Malle Krunk, Nicolae Spalatu, Atanas Katerski
(Tallinna Tehnikaülikool)

*Teaduspreemia tehnika ja tehnoloogia valdkonnas tööde tsükli
„Anisotroopsetel õhukeselekilelistel absorbermaterjalidel põhinevad
päikeseelementid: disain ja säästlike tehnoloogiate arendus“ eest*

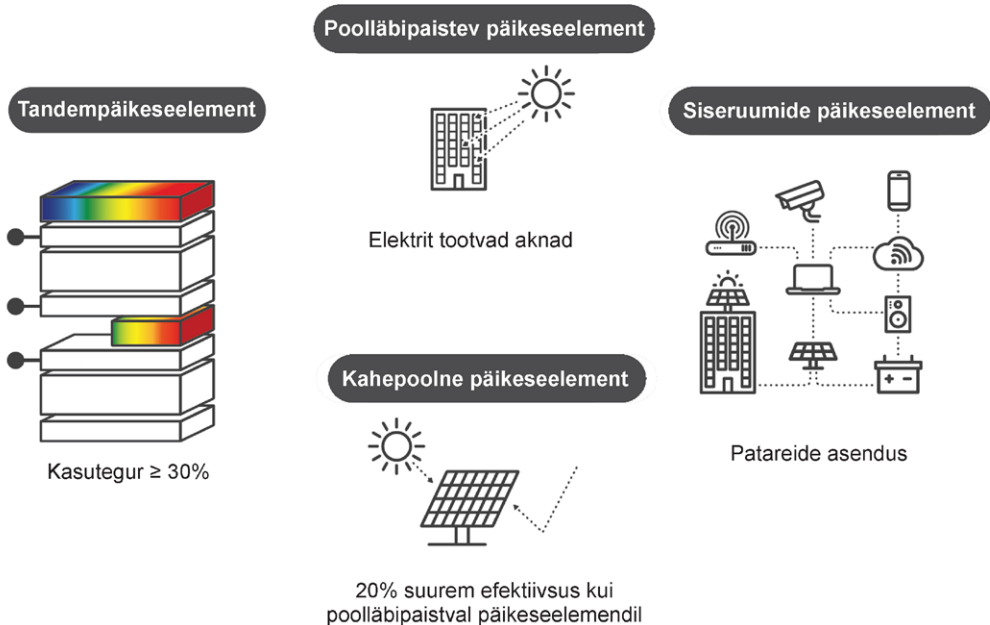
Taastuvenergia ja koos sellega ka päikeseenergia osakaal energiatootmises kasvab iga aastaga. 2024. aastal moodustas päikesepaneelide poolt toodetud elekter umbes 10% Euroopas toodetavast elektrienergiast. Päikesepaneel koosneb fotogalvaanilistest (ingl *photovoltaics*, PV) elementidest, mis neelavad päikesekiirgust ja muudavad selle elektrienergiaks. Erinevalt teistest taastuvenergia lahendustest on päikeseenergiale iseloomulik suur paindlikkus ja seda nii PV materjalide, tehnoloogiate kui rakenduste osas. Lisaks päikesepeakidele saab neid rakendada veel väga paljudes erinevates elektrienergia tootmise lahendustes.

Tänapäeval on enam kui 95% päikesepaneelidest toodetud ränist ja ränitehnoloogia jääb peamiseks päikesevalgusest elektri tootmise tööriistaks veel paljudeks aastateks. Samas on aastakümneid otsitud ja arendatud lahendusi, mis oleksid väiksema materjali- ja energiakuluga ning seega ka väiksema süsiniku jalajäljega kui Si-tehnoloogiad. Õhukeselekilelised PV tehnoloogiad on siin perspektiivne lahendus. Huvi anisotroopse struktuuriga absorbermaterjalidel põhinevate päikeseelementide vastu on stimuleerinud teiste õhukeselekileliste tehnoloogiate, nagu $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ tüüpi materjalide toorme limiteeritus ja kulukus, CdTe pidamine keskkonnaohtlikuks Cd sisalduse tõttu, kesteriitsete $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ tüüpi materjalide koostise keerukus ja seadiste efektiivsuse stabiliseerumine keskpärasel tasemel. Perovskiitsete päikeseelementid on saavutanud suhteliselt lühiajalise arenduse tulemusena kõrge sünteesijärgse efektiivsuse umbes 25%, kuid nende põhiline puudus on seadiste lühike eluiga.

Sb- ja Bi-kalkogeniididel põhinevate materjalide esiletõus ja rakendusala

Sb- ja Bi-kalkogeniidide karakterseteks omadusteks ja eeliseks teiste PV materjalide ees on koostise lihtsus (binaarsed anorgaanilised ühendid), ühendite stabiilsus ja mürgiste elementide (Cd, Pb) puudumine koostises. Need ühendid omavad kõrget valguse neeldumisvõimet ($> 10^5 \text{ cm}^{-1}$), mis on üle 1000 korra suurem kui ränil. See võimaldab kasutada päikeseelemendi struktuuris üliõhuke kihte ($< 100 \text{ nm}$), mis tagab lühema valmistamise aja ja väiksema materjalikulu. Sb- ja Bi-kalkogeniidid omavad ortorombilist struktuuri, kus metalli (Sb, Bi) aatomid on kovalentselt seotud S või Se aatomitega, moodustades [001] suunas orienteeritud (Sb_4S_6)_n nanoriba, nanoribad hoiavad koos Van der Waalsi jõud. Kristallide unikaalne ühedimensionaalne nanoribaline ehitus on põhjus, miks materjalidel on anisotroopsed omadused. Seadiste valmistamisel nendest materjalidest tuleb arvestada asjaoluga, et fotogenereeritud laengukandjate liikumine piki nanoriba on oluliselt lihtsam kui nanoribade vahel.

Sb- ja Bi-kalkogeniididel on otseste üleminekutega keelutsoon, mis on materjali koostise kaudu varieeritav vahemikus 1,1–1,8 eV ja on üks oluline parameeter, rakendamaks neid materjale erineva konfiguratsiooniga PV seadistes. Nende materjalide valmistamisel kasutatavad madalad sünteesitemperatuurid (nt $\text{Sb}_2\text{S}_3 < 300 \text{ }^\circ\text{C}$) võimaldavad valmistada päikeseelemente nii tavapärasele klaasalustele kui ka polümeersetele pindadele, et saada ülikergeid ja painduvaid päikeseplatte. Madalad sadestustemperatuurid tagavad väiksema energia-kulu tootmisel ja vähendavad tootmise CO_2 jalajälge.



Joonis 1. Sb-kalkogeniid-päikeselementide perspektiivsed kasutusala (952509-5GSOLAR pildikogu).

Sb-kalkogeniide peetakse üheks tõenäoliseks absorbermaterjaliks tuleviku õhukesekilelistes PV seadistes, mis annavad võimaluse päikeseelementide kasutamiseks valdkondades, kus Si-põhised patareid ei ole rakendatavad. Uudsete materjalide perspektiivsed kasutusalaad on erinevates ehitis- ja seadisintegreeritud lahendustes, tandempäikeseelementide struktuurides, poolläbipaistvates elektrit tootvates akendes, kahepoolsetes päikeseelementides, IoT seadiste energiavarustuses (joonis 1).

Uurimistöo antud materjalide vallas loob aluse PV tehnoloogia täiesti uue turusegimenti tekkele. Oluline on siinkohal märkida, et uued tehnoloogilised lahendused ei võistle olemasolevate tehnoloogiatega mitte niivõrd kasuteguri, kuivõrd igale uuele rakendusele optimeeritud väljundparameetrite osas. Uus tehnoloogia peab olema keskkonnasõbralikum ja lihtsalt masstootmisesse rakendatav, seadised peavad põhinema maakoos piisavalt leiduvatel elementidel ja olema ümbertöödeldavad.

Esimesed teadustööd Sb-kalkogeniidide õhukeste kilede kohta on tehtud juba eelmise sajandi lõpus, kuid päikeseelementide süsteemsemad uuringud algasid alles hiljuti, 10–15 aastat tagasi. Tänapäevaks on Sb-kalkogeniide uurivate ja rakendavate uurimisrühmade hulk kasvanud hüppeliselt ja uurimiskogukond suureneb pidevalt. Võrreldes ränil põhinevate päikesepaneelide (mida on järjepidevalt uuritud ja täiustatud juba viimased 75 aastat) väljaarendamisega, on Sb-kalkogeniid-päikeseelementide arendus alles väga varajases staadiumis.

Muidugi saab iga järgmine põlvkond uue materjali ja seadise väljatöötamisel tugineda eelnevatele teadmistele ja seeläbi kiirendada innovatsiooni arengut. Samas pakub iga uus materjal uusi lahendamist vajavaid ülesandeid. Näiteks Sb-kalkogeniidide puhul on tänu materjali kõrgele neeldumistegurile ja eksperimentaalsete meetodite suurele varieeritavusele võimalik valmistada üliõhukestel poolläbipaistvatel kihtidel (alates 50 nm) põhinevaid päikeseelemente, kus materjali kogus võrreldes klassikaliste õhukesekileliste päikeseelementidega (CdTe päikeseelementis on kihi paksus umbes 2000 nm) on üliväike. Need omadused aga piiravad omakorda materjalide standardsete karakteriseerimismeetodite kasutamist ning viivad selleni, et samaaegselt materjalide eksperimentaalse väljatöötamisega toimub ka karakteriseerimismeetodite kohandamine uutele materjalidele. Ühelt poolt pärsib karakteriseerimismeetodite piiratus materjalide kiiret arengut, teisalt pakub uusi meetodikaid materjalide uurimiseks, mida iga järgnev teadlaste põlvkond saab rakendada ja edasi arendada.

Tallinna Tehnikaülikooli õhukesekileliste energiamaterjalide teaduslabori teadlastel on oskusteave ja pikaajaline kogemus uudsete tööstuses rakendatavate PV tehnoloogiate arendamisel, sh on väga oluline ka põlvest põlve edasikantud teave ja oskused. Uurimisrühm rakendab päikeseelementide struktuuri komponenti kihtide valmistamiseks peamiselt kahte tehnoloogilist-eksperimentaalset meetodit: keemilist ultraheli pihustuspürolüüsi (ingl *ultrasonic spray pyrolysis*, USP) meetodit ja füüsikalist lähidistantsilt sublimeerimise (ingl *close space sublimation*, CSS) meetodit. Mõlemad meetodid on jätkusuutlikud ja ressursisäästlikud tööstuslikud tehnoloogiad.

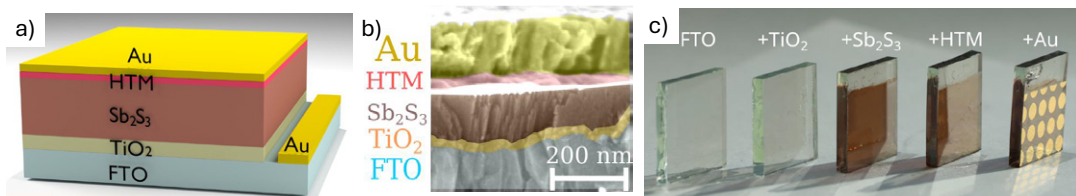
Pihustuspürolüüsi ja selle edasiarenduses ultrahelipihustuspürolüüsi meetod on uurimisrühmas kasutusel materjalide ja seadiste väljatöötamisel juba 30 aastat. Keemilise pihustuspürolüüsi meetodil sadestatakse lähteainete lahus kuumale aluspinnale, kus lähteainete lagunemise tulemusena moodustub õhuke kile. USP meetodi eelis teiste vedeliksadestuse keemiliste meetodite ees on sadestuskiirus ja võimalus katta suuri pindasid. Oluline aspekt selle meetodi juures on pihustuslahuses toimuvate protsesside keemia ja lähteainete termilise lagunemise tundmisel, et tagada seadiskõlbulike materjalide valmistamine. Siinkohal on kindlasti oluline ära märkida, et lisaks materjalide väljatöötamisele oleme paralleelselt arendanud ka meetodit ennast ja praegu saame uurimisrühmas kasutada seadiste väljaarendamisel antud materjalide süsteemile kohandatud automatiiseeritud aparatuuri, mis võimaldab katta aluspinna suurusega 20 cm × 20 cm.

Teine oluline eksperimentaalne meetod uurimisrühmas õhukesekilelise päikeseelementide koostiskihtide valmistamisel on lähidistantsilt sublimeerimise (CSS) meetod. CSS meetod on füüsikaline sadestusmeetod, kus lähteaine ja aluspind, millele õhuke kile sadestatakse, paiknevad üksteisele väga lähedal (umbes 2 mm), protsess viiakse läbi vaakumkambris. Enamasti pulbri kujul olev lähteaine kantakse läbi aurufaasi aluspinnale, kus see kondenseerub ja moodustab õhukesekile. Selline konfiguratsioon annab CSS meetodile suure eelise, nimelt on CSS meetodil saavutatav õhukesekile kasvu kiirus umbes 1 µm/min, mis on ülikiire võrreldes teiste füüsikaliste aurufaasist sadestamise meetoditega. CSS meetodil õhukeste kilede väljatöötamine uurimisrühmas sai alguse 2010. aastal. Esimesel kümnendil oli põhifookus CdTe õhukeste kilede ja nendel põhinevate päikeseelementide väljaarendamisel. Alates 2019. aastast hakkasime uurimisrühmas välja arendama Sb-kalkogeniididel põhinevaid õhukesi kilesid ka füüsikalisel CSS meetodil.

Ultraheli pihustuspürolüüsi (USP) meetodil valmistatud Sb₂S₃ absorberkihil põhinevad päikeseelemendid

Päikeseelement on mitmekihiline struktuur, mille koostisosad on klaasalusele kantud valgust läbilaskev ja elektrit juhtiv metallioksiidi kiht (TCO), millele on sadestatud elektronide transportkiht (ETL), järgneb absorbermaterjali kiht ja aukude transportkiht (HTL), millele on omakorda kantud metallkontakt. Päikeseelemendi klaas/TCO/ETL/Sb₂S₃/HTM/Au struktuur, skaneeriva elektronmikroskoobi (SEM) ristlõike foto ja fotod päikeseelemendist erinevate tehnoloogiliste etappide järel on toodud joonisel 2.

ETL materjalina kasutame TiO₂ ja absorberina Sb₂S₃, mõlemad kihid valmistatakse USP meetodil paksusega vastavalt umbes 30 ja umbes 90 nm, HTL materjalina kasutatakse polütiofeeni (poly(3-hexylthiophene), P3HT) kihti. See varasemas uurimistöös tsüklis väljatöötatud tehnoloogia võimaldas valmistada päikeseelemente, mille valguse elektriks muundamise efektiivsus (PCE) oli 4,67% ja keskmine optiline läbipaistvus (AVT) 26% lainepikkuste vahemikus 400–800 nm (Eensalu jt, 2019).



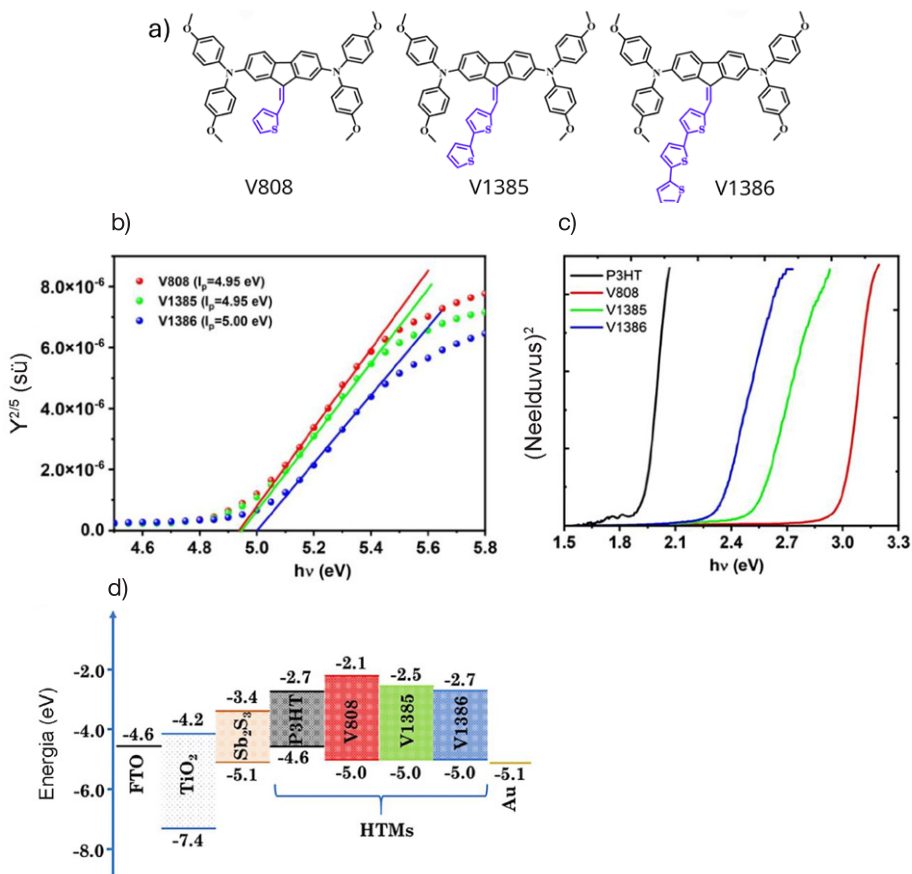
Joonis 2. a) Päikeseelemendi struktuuri skeem; b) päikeseelemendi ristlõike SEM pilt; c) fotod päikeseelemendi struktuurist erinevate tehnoloogiliste etappide järel.

Uudsed orgaanilised aukjuhtmaterjalid poolläbipaistvate Sb_2S_3 päikeselementide arenduseks

Kuna Sb_2S_3 keelutsooni laius on 1,7 eV ja kihi paksus seadises ≤ 100 nm, siis sellisel absorberkihil põhinev seadis on optiliselt poolläbipaistev, mis võimaldab seda kasutada elektrit tootvate akende valmistamiseks. Küll aga tuleb kriitiliselt suhtuda P3HT kasutamisse aukjuhi materjalina. Nimelt limiteerib P3HT keelutsooni laius 1,8 eV seadise optilist läbipaistvust, kihi valmistamise tehnoloogia on mitmeastmeline ja arvesse tuleb võtta ka materjali enda suhteliselt kõrget hinda (Juneja jt, 2022; Mandati jt, 2023).

Antud uurimistööde tsüklis uurisime võimalusi P3HT asendamiseks poolläbipaistvate seadiste jaoks sobivamate materjalidega. Kaunase Tehnoloogiaülikooli teadlased töötasid välja suhteliselt lihtsa, seega ka odavama fluoreenipõhiste orgaaniliste ühendite sünteesi tehnoloogia, meie uurimisrühm katsetas uusi ühendeid esmakordselt Sb_2S_3 päikeseelemendi struktuurides (Juneja jt, 2022; Mandati jt, 2023; Juneja jt, 2024a,b). Sünteesiti kolme erinevat tüüpi fluoreenipõhiseid ühendeid – erineva pikkusega alifaatset ahelat sisaldavad (V1275, V1235, V1236, V1461), erinevat arvu tiofeenrühmi sisaldavad (V808, V1385, V1386) ja läbi tiofeenrühma sidestatud dimeerid (V1422, V1423, V1454, V1455) – ja karakteriseeriti nende füüsiko-keemilisi omadusi. Töötasime välja HTM kihi valmistamise tehnoloogia pindvurritamise meetodil uudsete fluoreenipõhiste ühendite kandmiseks õhukese pideva kihina absorberkihi pinnale ja uurisime valmistatud päikeselementide füüsikalisi omadusi, hindamaks uudsete materjalide võimekust kasutamiseks poolläbipaistvates seadistes.

Esmalt hinnati fluoreenipõhiste materjalide sobivust päikeseelemendi struktuuri seadise tsoonidiagrammi alusel. Fotoelektronide saagise spektroskoopia (ingl *photoelectron yield spectroscopy*, PYS) meetodil mõõdeti päikeseelemendi kõigi komponentkihtide ionisatsioonipotentsiaal (I_p), et määrata anorgaaniliste ühendite valentstsooni lae (VBM) ja orgaaniliste ainete HOMO (ingl *highest occupied molecular orbital*) nivoo energiad. Materjalide optiliste neeldumisspektrite mõõtmistest arvutati keelutsooni laiused, mis võimaldas määrata vastavalt juhtivustsooni põhja (CBE), orgaanilistel ainetel LUMO (ingl *lowest unoccupied molecular orbital*) nivoo energiad. Joonisel 3 on toodud tiofeenrühmi sisaldavate

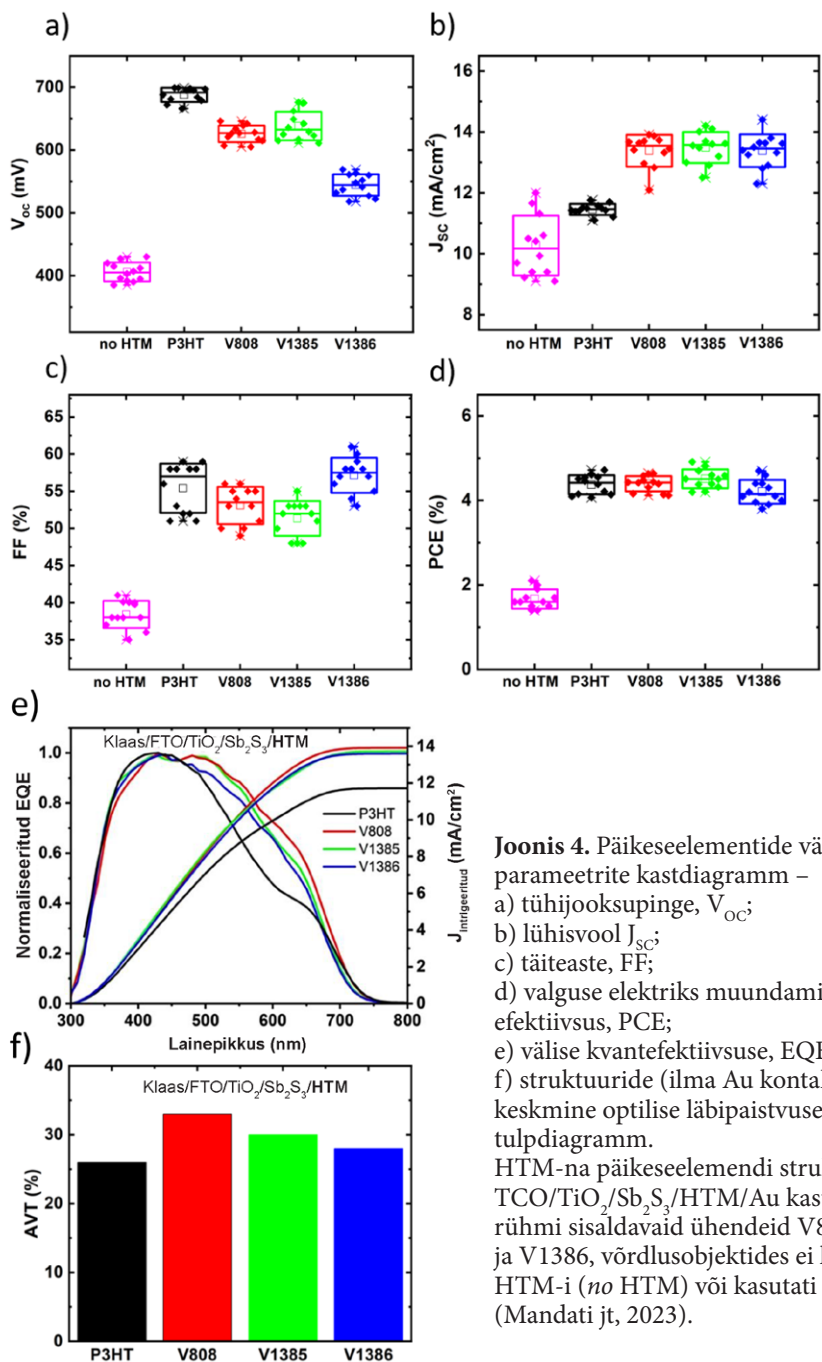


Joonis 3. a) Tiofeenrühmi sisaldavate fluoreenipõhiste molekulide struktuur; b) materjalide ionisatsioonipotentsiaali ja c) keelutsooni väärtuste määramine; d) päikeseelemendi tsoonidiagramm, kui HTM-na kasutatakse P3HT ja tiofeenrühmi sisaldavaid ühendeid V808, V1385, V1386 (Mandati jt, 2023).

molekulide struktuur, ionisatsioonipotentsiaali ja keelutsooni (E_g) määramise graafikud ja seadise tsoonidiagramm, kui HTM-na kasutatakse P3HT-d ja tiofeenrühmi sisaldavaid ühendeid – V808, V1385, V1386.

Mõõtmised näitasid, et nii alifaatseid ahelaid kui tiofeenrühmi sisaldavatel orgaanilistel ühenditel on HOMO tase umbes -5 eV juures (vaakumnivoos suhtes), mis võimaldab fotogenereeritud aukude liikumist Sb_2S_3 absorberkihist (VBM -5.1 eV) HTM kihti ja sealt välisele metallelektroodile. Kõigi alifaatset ahelat sisaldavate molekulide ja V808 keelutsooni väärtus on vahemikus $2,8$ – $2,9$ eV, seega LUMO tase on $-2,1$ eV juures ja fotogenereeritud elektronide liikumine Sb_2S_3 kihist (CBE $-3,4$ eV allpool vaakumnivoos) HTM kihti on efektiivselt blokeeritud (Juneja jt, 2022; Juneja jt, 2024a; Mandati jt, 2023). Kui tiofeenrühmade arv molekulis suureneb ühest (V808) kolmeni (V1386),

väheneb keelutsooni laius ja vastavalt muutub ka LUMO nivoo asukoht -2.1 eV kuni -2.7 eV (joonis 3d), kuid on piisav, et blokeerida elektronide liikumist HTM kihti. Tsoonidiagrammide järgi sobivad kõik sünteesitud ained kasutamiseks aukjuhtkihina Sb_2S_3 absorberiga seadises (Juneja jt, 2022; Mandati jt, 2023; Juneja jt, 2024a,b).



Joonis 4. Päikeseelementide väljundparameetrite kastdiagramm –

- a) tühijooksupinge, V_{oc} ;
- b) lühisvool J_{sc} ;
- c) täiteaste, FF;
- d) valguse elektri muundamise efektiivsus, PCE;
- e) välise kvantefektiivsuse, EQE spekter ja
- f) struktuuride (ilma Au kontaktita) keskmine optilise läbipaistvuse, AVT, tulpdiagramm.

HTM-na päikeseelemendi struktuuris $\text{TCO}/\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{HTM}/\text{Au}$ kasutati tiofeenrühmi sisaldavaid ühendeid V808, V2385 ja V1386, võrdlusobjektides ei kasutatud HTM-i (*no HTM*) või kasutati P3HT-d (Mandati jt, 2023).

Joonisel 4 (a–d) on toodud tiofeenrühmi sisaldavate fluoreenipõhiste ühendite kasutamisel HTM-na valmistatud päikeseelementide väljundparameetrite (V_{oc} – tühijooksu pinge, J_{sc} – lühisvoolu tihedus, FF – täiteaste, PCE – valguse elektriks muundamise efektiivsus) kastdiagramm, kvantefektiivsuse (EQE) spektrid ja struktuuride (ilma Au kontaktita) keskmine optiline läbipaistvus (AVT) tulpdiagrammina (Mandati jt, 2023). Väljundparameetrite mõõtmised näitavad, et HTM kiht on nõutav struktuurielement üliõhukese absorberkihiga seadistes, sest vähendab oluliselt rekombinatsiooni tagakontaktil, vähendab šunte, tõstab V_{oc} väärtust umbes 400 mV-lt umbes 650–690 mV-ni ja kokkuvõttes PCE-d 2%-lt 4,9%-ni. Ühe või kahe tiofeenrühmaga molekulide (vastavalt V808 või V1385) kasutamisel HTM kihina saadi V_{oc} väärtused 640–680 mV, mis on lähedased P3HT-ga seadistes mõõdetud väärtusele umbes 690 mV. Küll aga võimaldab fluoreenipõhiste HTM kihtide kasutamine saada tunduvalt suuremaid J_{sc} väärtusi, kui saadakse P3HT-ga seadistes, 14 mA/cm² vs 11,5 mA/cm². P3HT ja fluoreenipõhiste HTM-de kasutamisel on seadiste PCE-d suhteliselt sarnased, jäädes vahemikku 4,7–4,9%. Küll aga mõõdeti alifaatset ahelat ja tiofeenrühma sisaldavate fluoreenipõhiste HTM kihtide puhul seadise AVT väärtuseks kuni 33% (joonis 4f), mis on umbes 20% kõrgem kui P3HT kasutamisel HTM-na. EQE mõõtmised kinnitasid parasitset absorptsiooni puudumist lainepikkustel 550–680 nm, kui HTM-dena kasutati P3HT (Eg 1,8 eV) asemel suurema keelutsooniga alifaatset ahelat sisaldavaid aineid (Eg umbes 2,9 eV) või tiofeenrühma sisaldavaid kihte (Eg 2,3 kuni 2,8 eV).

Alifaatset ahelat sisaldavate ühendite kasutamisel HTM-na olid V_{oc} väärtused vahemikus 560–570 mV (Juneja jt, 2022; Juneja jt, 2024a), mis on umbes 100 mV vähem kui seadistes, kus HTM-na kasutatakse tiofeenrühmi sisaldavaid materjale. Röntgenkiire fotoelektronspektroskoopia (ingl *X-ray photoelectron spectroscopy*, XPS) mõõtmised näitasid, et tiofeenrühma sisaldava HTM kihi sadestamisel Sb_2S_3 absorberi kihi pinnale toimub interaktsioon tiofeenrühma kuuluva S aatomi ja absorberi molekuli kuuluva Sb aatomi vahel (Juneja jt, 2024b). Selline interaktsioon võib kaasa aidata laengute ülekandmisele Sb_2S_3 absorberist HTM-i ja seekaudu seadise kõrgemate näitajate saavutamise võimalusele.

Näitasime, et HTM molekuli struktuur ja HTM kihi paksus omavad olulist mõju päikeseelementide efektiivsusele. Tõestasime, et fluoreenipõhised ühendid, mille struktuuris on alifaatsed ahelad (V1275, V1235, V1236 ja V1461) või tiofeenrühm (V808, V1385 ja V1386), on perspektiivsed.

Antimonetüülksandaat kui alternatiivne prekursoraine Sb_2S_3 kilede sadestamiseks: termilise lagunemise uurimine

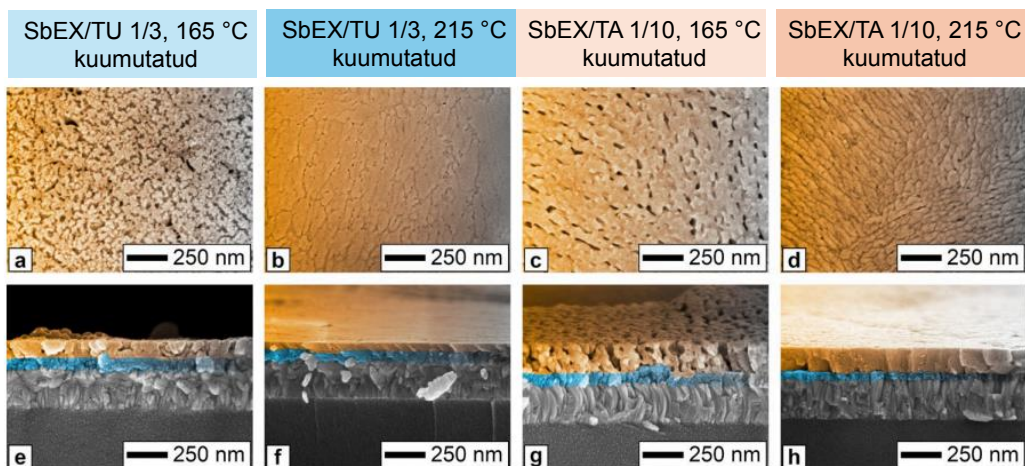
Sb_2S_3 absorberkihtide valmistamiseks USP meetodil on senini kasutatud $SbCl_3$ ja tioureat moolsuhtes 1/3 sisaldavat lahust, mis võib viia Sb_2S_3 mustumisele kloori ioonidega. Viisime läbi antimonetüülksantaadi, $Sb(S_2COC_2H_5)_3$ (SbEX) termilise lagunemise uuringu TG/DTA-EGA-MS meetodil (Eensalu jt, 2021), hindamaks ühendi sobivust prekursoraineks. SbEX sulab 85 °C juures, termiline

lagunemine algab 120 °C juures, DTG piik on 135 °C juures, reaktsioon on endotermiline. Inertkeskkonnas saab eraldada temperatuuride vahemikus 90–800 °C kolme lagunemise etappi ning hapnikku sisaldavas keskkonnas neljaetapilist protsessi temperatuuride piirkonnas 90–950 °C. Amorfse Sb_2S_3 faas tekib SbEX lagunemise esimeses etapis 170 °C juures nii inertgaasis kui õhus. Peamised gaasilised laguproduktid EGA-MS analüüsi järgi on CS_2 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, CO , CO_2 , COS , H_2O . Protsessi teine etapp toimub temperatuuridel 170–250 °C. Moodustub kristalliline Sb_2S_3 , õhus tekib lisaks Sb_2O_3 faas, kuid inertkeskkonnas on Sb_2S_3 faas stabiilne kuni sulamiseni 550 °C juures. Protsessi läbiviimisel õhus toimub Sb_2S_3 oksüdatsioon ning 590 °C juures on lõpp-produkt Sb_2O_4 . Termilise analüüsi tulemused näitasid, et põhimõtteliselt saab SbEX kasutada Sb_2S_3 lähteainena, protsessi läbiviimisel õhus tuleb rakendada meetmeid materjali oksüdatsiooni vältimiseks.

Sb_2S_3 kiled USP meetodil antimonetüülksandaadist ja päikeseelement selle baasil

Toetudes termilise analüüsi tulemustele Sb_2S_3 moodustumise temperatuuri kohta ja vajadusele hoida ära oksüdatsiooni, uurisime kile kasvatamise temperatuuri mõju vahemikus 200–260 °C kile omadustele, kasutades lähtelahuses TU/SbEX moolsuhet 3 (Eensalu jt, 2023). Uurimistöö tulemused näitasid, et kilede kasvatamisel temperatuuridel 200–260 °C õhus saadakse Sb_2S_3 kristallilised kiled juba kasvatamise protsessis. Temperatuuri tõstmisel 200–260 °C muutub kile morfoloogia oluliselt – ühtlase sileda pinnaga kile transformeerub eraldiseisvatest 0,5–1,0 μm suurustest kristallidest koosnevaks kihiks. XRF andmed näitavad, et sadestatud kihtides on väavli defitsiit (S/Sb väärtus on umbes 1,3 sadestustemperatuurist olenemata) ja XPS analüüsi järgi sisaldavad kiled oksiidi faasi, kuigi XRD ei tuvasta kristallilise Sb_2O_3 faasi olemasolu. Päikeseelemendi V_{oc} on umbes 500 mV, olenemata kile kasvatamise temperatuurist, J_{sc} ja FF vähenevad temperatuuri tõustes, mis võib olla tingitud kihi teralisest struktuurist, ja PCE langeb 2,5%-lt 1,7%-le, kui kile kasvatamise temperatuur tõuseb 200–260 °C. Saadud tulemused näitavad, et üheetapiline sadestusprotsess õhus ei võimalda valmistada morfoloogia ja koostise seisukohast päikeseelemendiks sobilike omadustega absorberkihte.

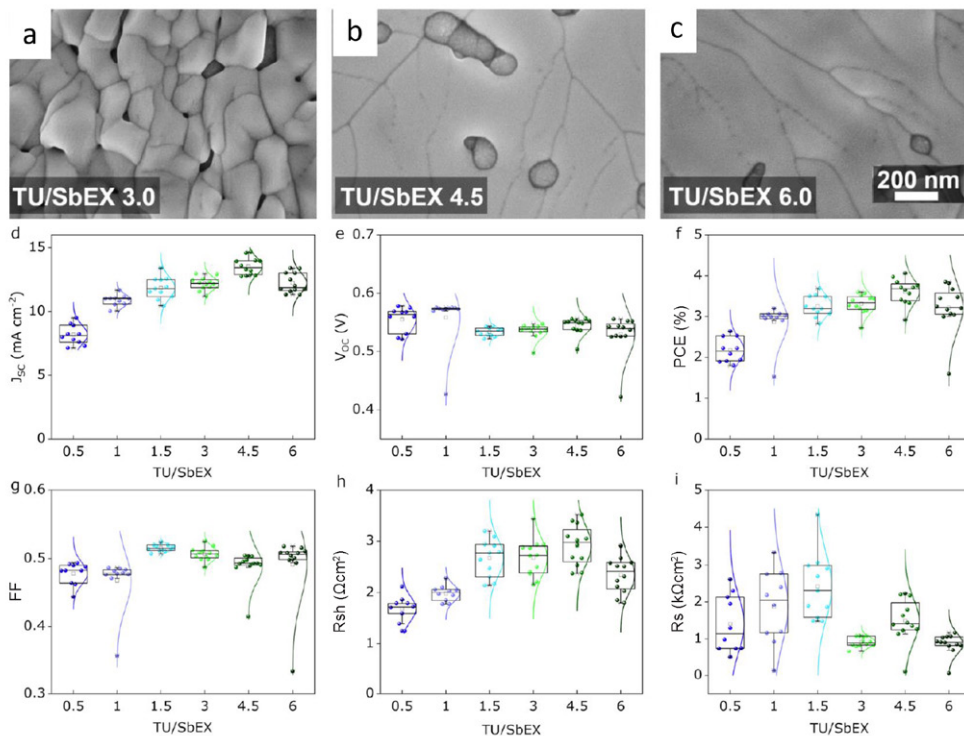
Järgnevalt rakendasime kristalliliste kilede saamiseks kaheastmelist protsessi, kus esmalt sadestati amorfseid Sb_2S_3 kiled õhus temperatuuril 165–215 °C, seejärel kiled kristalliseeriti, kuumutades temperatuuril 225 °C (Eensalu jt, 2022). Vastavalt SbEX termilise analüüsi tulemusele kasutasime Sb_2S_3 õhukeste kilede valmistamiseks lahuseid, millesse lisasime tioureat (TU) või tioatsetamiidi (TA) ülehulgas, *viz.* TU/SbEX ja TA/SbEX moolsuhteid vastavalt 3 ja 10. SEM analüüsi tulemuste kohaselt (joonis 5) saadakse tihedad ühtlased kiled juhul, kui kilede kasvatamise temperatuur on piisav lähteaine lagunemiseks. Kilede kristalliseerumiseks osutus sobivaks neid kuumutada vaakumis temperatuuril 225 °C. Kristalliseerunud Sb_2S_3 kiledele arvutati Eg väärtuseks 1,8 eV ja aatom-suhe S/Sb = 1,5 (TU-põhine) või S/Sb = 1,4 (TA-põhine). Saadud tulemus näitab,



Joonis 5. Skaneeriva elektronmikroskoobi (SEM) pildid Sb_2S_3 kilede pinnast ja ristlõikest. Sb_2S_3 kiled valmistati USP meetodil, pihustuslahuses SbEX/TU moolsuhe 1/3 ja SbEX/TA moolsuhe lahuses 1/10. Kiled sadestati temperatuuridel 165 °C (a, c, e, g) ja 215 °C (b, d, f, h); kilede järelkuumutus viidi läbi 225 °C juures vaakumis (2×10^{-1} Pa), kuumutamise aeg 30 min (Eensalu jt, 2022).

et Sb_2S_3 oksüdatsiooni ärahoidmiseks kilede kasvatamise protsessis USP meetodil õhus on TU efektiivsem kui TA.

Toetudes (Eensalu jt, 2022) saadud tulemustele, jätkasime uuringuid, kasutades TU oksüdeerimist pärssiva agendina, ja uurisime TU kontsentratsiooni mõju SbEX lahuses (TU/SbEX = 0,5; 1; 3; 4,5; 6) Sb_2S_3 kilede koostisele ja seadise omadustele. Kiled valmistati kaheastmelise tehnoloogia järgi, kus sadestamine toimus 200 °C juures ja seejärel kristalliseerimine 260 °C juures lämmastikus. Töös kasutasime kilede iseloomustamiseks XPS, XRF ja DLTS meetodeid lisaks tavapärastele XRD, Raman, SEM, EDX, UV-Vis tehnikatele (Eensalu jt, 2023). XPS uuringud näitasid, et TU kontsentratsiooni tõustes pihustuslahuses väheneb Sb-O hulk nii kile mahus kui pinnal. XRF analüüs näitas, et pärast termilist töötlemist on kristallilised Sb_2S_3 kiled stöhhiomeetrilise koostisega, kui TU/SbEX moolsuhe pihustuslahuses on 3 kuni 6. Seega tuleb faasipuhaste stöhhiomeetrilise koostisega Sb_2S_3 absorberkihtide kasvatamiseks õhus USP meetodil kasutada lahuseid, milles TU/SbEX > 3. SbEX prekursorainest valmistatud Sb_2S_3 absorberkihi baasil valmistati päikeseelement, mille struktuur on TCO/TiO₂/Sb₂S₃/P3HT/Au. Seadise väljundparameetrite mõõtmised näitasid, et J_{sc} kasvab 11 mA/cm² kuni 15 mA/cm² korreleeruvalt TU/SbEX moolsuhte muutmisel 1 kuni 6 pihustuslahuses ja sellega kaasneva kile puhtuse tõusuga. Samas V_{oc} ja FF praktiliselt ei sõltu kile kasvatamiseks kasutatud lahuse koostisest ja nende väärtused jäävad vastavalt 560 mV ja 50% tasemele (joonis 6).



Joonis 6. Skaneeriva elektronmikroskoobi fotod Sb_2S_3 kile pinnast, kui kile on sadestatud lahusest, kus a) $\text{TU}/\text{SbEX} = 3.0$; b) $\text{TU}/\text{SbEX} = 4.5$, c) $\text{TU}/\text{SbEX} = 6.0$; d–i) päikeseelemendi TCO/ TiO_2 / Sb_2S_3 /P3HT/Au väljundparameetrite kastdiagrammid, Sb_2S_3 on valmistatud USP meetodil SbEX lahusest, milles TU/SbEX moolsuhe on 0.5 kuni 6.0 (Eensalu jt, 2023).

Päikeseelemendi kõrgeim PCE 4,1% saadi, kui absorberkihi kasvatamiseks kasutati lahust, milles TU/SbEX moolsuhe oli 4.5. Kokkuvõtlikult tõestasime, et SbEX on perspektiivne kloorivaba lähteaine Sb_2S_3 absorberkihtide valmistamiseks USP meetodil õhus, kui rakendada kaheastmelist tehnoloogiat ja kasutada modifitseeritud koostisega pihustuslahust.

NiO õhukesed kiled pihustussadestuse meetodil kui tuleviku aukjuhid päikeseelementides

Sb-kalkogeniidi õhukese absorberkihiga päikeselementides kasutatakse praegusel ajal HTM-na peamiselt orgaanilisi ühendeid. Pikemas perspektiivis on anorgaanilised p-tüüpi juhtivusega metalli oksiidide kihid (NiO , MoO_3 , V_2O_5 jt) siiski jätkusuutlikumad tänu nende suuremale stabiilsusele, laiemale keelutsoonile, suuremale elektronide väljumistööle ja parematele laengukandjate transportomadustele, võrreldes orgaaniliste HTM-dega. Uurimisgrupp uuris õhukeste p-tüüpi juhtivusega NiO kilede sadestamise võimalusi pihustussadestuse meetoditel.

NiO õhukesed kiled valmistati pneumaatilise pihustuspürolüüsi meetodiga temperatuuridel 300–420 °C, kasutades lähteainena nikkelatsetaati ning erinevaid lahusteid (vesi, alkohol). NiO moodustumist kinnitasid XRD ja Ramani meetodid; kilede puhtust uuriti FTIR ja XPS meetoditel. Leiti, et sadestustemperatuur ja lahusti tüüp mõjutavad pihustatud NiO kilede struktureid ja optilisi omadusi ning kilede keemilist koostist (Chen jt, 2021). Vesilahusest valmistatud NiO kiled on polükristalsed, kristalliidi suurusega 4–10 nm, samas kui alkoholilahusest sadestatud kiled on amorfseid. Vesi- ja alkoholilahustest valmistatud NiO kilede keelutsooni laius on vastavalt 3,4 eV ja 4,0 eV, sõltumata sadestustemperatuurist. XPS ja FTIR analüüsi tulemused näitavad, et sadestustemperatuur on peamine tehnoloogiline parameeter, mis kontrollib OH⁻, C-O ning O-C = O funktsionaalsete rühmade sisaldust kiledes. NiO kihi O1s elektronorbitaali mõõtmistest saadud OH⁻/NiO suhe väheneb umbes 10 korda (1,35st 0,13-le), kui kile kasvatamise temperatuuri tõsta 300–420 °C.

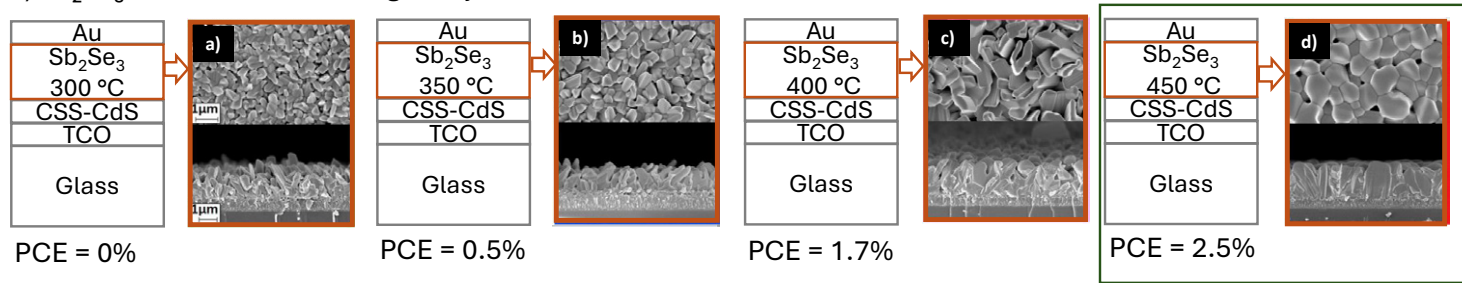
Kasutades lähteainena nikkelatsetüülsetonaati ja lahustajana etanooli, valmistati USP meetodil polükristallilised NiO kiled, mille Eg on 3,7 eV, kilede paksus on 30–70 nm sõltuvalt sadestustemperatuurist vahemikus 350–500 °C (Chen jt, 2022). Kelvini sondi mõõtmistest määrati Fermi nivoo energia 4,70 eV ja PYS mõõtmistest ionisatsiooni energia 5,41 eV. Kuna keelutsooni laius on 3,70 eV, siis Fermi nivoo asub 0,71 eV valentstsooni põhjast ülevalpool, mis kinnitab, et USP meetodil sadestatud NiO kile on p-tüüpi pooljuht.

Saadud tulemused näitavad, et pihustusmeetodil on võimalik valmistada erinevatest lähteainetest optiliselt läbipaistvaid p-tüüpi juhtivusega NiO kilesid kui potentsiaalseid HTM kihte. Samas tuleb arvestada, et kasutatud lähteainete puhul tuleb saasteainetest vabade NiO kilede saamiseks sadestuse protsess viia läbi 400 °C kõrgematel temperatuuridel.

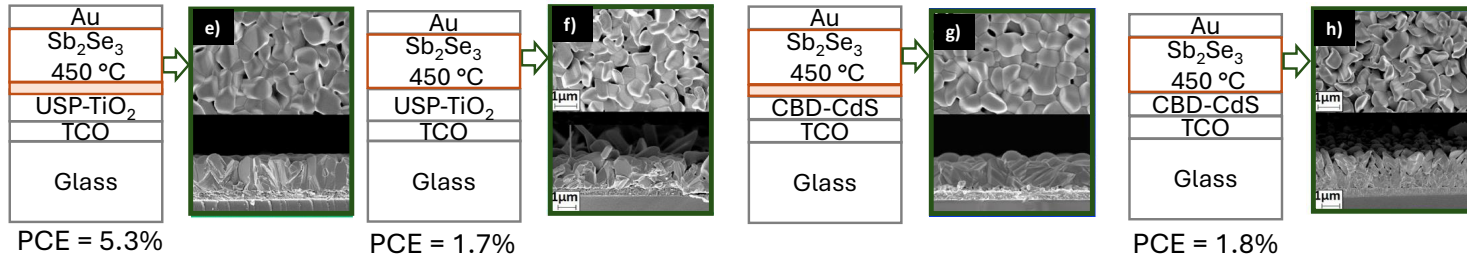
Lähidistantsilt sublimatsiooni (CSS) meetodil valmistatud Sb₂Se₃ absorberkihil põhinevad päikeseelemendid

CSS meetodil õhukesekilise materjali sadestamisel on oluline lähteaine sulamistemperatuur ja aururõhk. Sb₂Se₃ sulamistemperatuur 608 °C ja kõrge aururõhk (~1200 Pa 550 °C juures) teevad Sb₂Se₃ sobilikuks kongruentseks sublimatsiooniks CSS meetodil. CSS meetodil valmistatud Sb₂Se₃ päikeseelement koosneb järgmistest kihtidest: klaasalusele kantud valgust läbilaskev ja elektrit juhtiv metallioksiidi kiht (TCO), elektronide tansportkiht (ETL), absorbermaterjali kiht ja metallkontakt. Päikeseelemendi klaas/TCO/ETL/Sb₂Se₃/Au struktuur on toodud joonisel 7. Uuringutes kasutasime kolme erinevat ETL kihti: CSS meetodil sadestatud CdS (CSS-CdS), keemiliselt lahusest sadestatud CdS (CBD-CdS) ja keemilise pihustuspürolüüsi meetodil sadestatud TiO₂ (USP-TiO₂). Väga olulise osa Sb₂Se₃ väljaarendustööst moodustas sadestusparameetrite optimeerimine, erinevate elektrontransportkihtide testimine, Sb₂Se₃ defektide ja seadises domineerivate rekombinatsioonimehhanismide analüüs (Spalatu jt, 2021; Krautmann jt, 2021; Koltsov jt, 2022; Gopi jt, 2023).

a) Sb_2Se_3 sadestamise strateegia väljatöötamine



b) Elektrontransportkihi ja idukihi mõju Sb_2Se_3 kasvule



Joonis 7. Sb_2Se_3 õhukese kile ja päikeseelemendi väljaarendus CSS meetodil, sõltuvalt a) Sb_2Se_3 sadestustemperatuurist, b) elektrontransportkihist ja Sb_2Se_3 idukihist (Spalatu jt, 2021).

Sb_2Se_3 õhukesekilelise absorbermaterjali ja päikeseelementide arendamise alfaasis keskendusime CSS sadestusstrateegia väljatöötamisele. Eesmärk oli leida optimaalsed sadestustingimused õhukeste konformsete kilede kasvuks ja mõista nende seost päikeseelemendi väljundparameetritega. Sadestusprotsessi optimeerimisel valisime Sb_2Se_3 lähteaine temperatuuriks 490 °C ja alustemperatuuri varieerisime vahemikus 300–450 °C. Temperatuurid olid valitud nii, et tagada õhukese kile kasvukiirus 1 $\mu\text{m}/\text{min}$. Tulemused näitavad (joonis 7), et saadud Sb_2Se_3 kile morfoloogia sõltub valitud sadestustemperatuurist. Kui 300–350 °C juures sadestatud Sb_2Se_3 kiledes on terad väiksemad ja nende paigutus pigem ebakorrapärane, siis 450 °C juures kasvatatud kiledes olid terad suuremad, ühtlasema suurusega ja kasvanud kolumnaarselt. Ühtlasem kile kasv väljendus ka päikeseelemendi kasuteguris, mis 450 °C juures sadestatud Sb_2Se_3 korral oli 2,5%. Järgmises etapis võrdlesime erinevate elektrontransportkihtide mõju 450 °C juures sadestatud Sb_2Se_3 kasvule ja leidsime, et USP- TiO_2 ja CBD- CdS ETL kihid ei taganud korrapärase mikrostruktuuriga Sb_2Se_3 moodustumist ja päikeseelemendi kasutegur jäi kõigest 2% juurde. Järgmises etapis kasutasime idukihi strateegiat, kus Sb_2Se_3 idukiht sadestati ETL kihile enne Sb_2Se_3 põhikihi sadestamist. ETL TiO_2 korral saavutasime kõrgeima kasuteguri 5,3%, mis tugines Sb_2Se_3 tihedale mikrostruktuurile. Lisaks sellele näitasid tagasihajuvate elektronide difraktsioon- ja röntgendifraktsioonanalüüsid, et Sb_2Se_3 kolumnaarsed kristalliterad joonduvad püstisemalt, kui materjalikiht sadestatakse eelnevalt valmistatud idukihi peale (Krautmann jt, 2021). TiO_2 kasutamine ETL kihina tagas ka kõrgema kvantefektiivsuse, mis on tingitud TiO_2 suuremast keelutsooni laiusest (3.2 eV) võrreldes CdS (2.4 eV) ETL-ga. Lisaks eeltoodule pärssis CdS kasutamist ETL-na päikeseelemendis veel Cd ja Se difundeerimine vastavalt CdS ja Sb_2Se_3 kihtidest, moodustades ETL ja absorberkihi piirpinnale CdSe vahekihi, mis oluliselt vähendab päikeseelemendi kasutegurit võrreldes TiO_2 kasutamisega.

Sb -kalkogeniididel põhinevatel materjalidel on keeruline defektstruktuur. Materjalis olevaid sügavaid defekte analüüsisime temperatuurist sõltuva kompleksjuhtivusspektroskoopia (TAS) meetodil ning mahtuvus-pinge mõõtmiste abil. TAS analüüsi tulemusena tuvastasime Sb_2Se_3 päikeseelemendis kolm aktivatsioonienergiat, mis on 0,4 eV, 0,5 eV ja 0,6–0,7 eV valentssooni maksimumi suhtes, kus madalamat energianivood seostasime sügavate aktseptordefektidega, nagu V_{Sb} või Se_{Sb} defekt. Mahtuvus-pinge mõõtmised Sb_2Se_3 seadistele viitavad defektide suurele tihedusele suurusjärgus 10^{17}cm^{-3} , samas kui vabade laengukandjate tihedus Sb_2Se_3 on umbes 10^{14}cm^{-3} . I-V kõverate temperatuursõltuvuse analüüsisist leiti, et peamiseks rekombinatsioonimehhanismiks päikeseelemendis on piirpinna rekombinatsioon.

Lisaks töötasime välja kasvuprotokollid ka Sb_2S_3 , Bi_2S_3 kilede sadestamiseks lähidistantsilt sublimatsiooni (CSS) meetodil ja tuvastasime materjalide ja nendel põhinevate seadiste kitsaskohad, uurides nii 1D kristalliterade kasvu kui ka materjalide defektstruktuure (Krautmann jt, 2023; Koltsov jt, 2023).

Edasine uurimistöö Sb-kalkogeniidide õhukesekileliste päikeseelementide valdas on suunatud materjali ja seadiste optimeerimisele, sealhulgas piirpindade optimeerimisele. Eesmärk on vähendada absorberkihis olevaid defekte erinevate järeltöötluste ja/või legeerimise kaudu ja seadise piirpindadel olevat laengu kandjate rekombinatsiooni, rakendades päikeseelementi struktuuris erinevaid vahekihte. Uurimistöö jätkub päikeseelementide rakendamise osas kahes peamises valdkonnas – poolläbipaistvad elektrit tootvad pinnad ja siseruumides tehisvalguses elektrit tootvad elemendid näiteks IoT seadiste toiteks.

Tänuõnad

Meie suurim tänu kuulub uurimisrühma endistele ja praegustele liikmetele ning Eesti ja rahvusvahelistele koostööpartneritele. Uurimistööd on finantseerinud EMP ETAG21014 „Poolläbipaistvate kahepoolsete õhukesekileliste päikeseplatade arendus uuenduslikeks rakendusteks“ S-BMT-21-1(LT08-2-LMT-K-01-003); ETAG PRG627 „Antimon-kalkogeniid õhukesed kiled järgmise põlvkonna pool-läbipaistvatele päikeseelementidele kasutamiseks elektrit tootvates akendes“; ETAG PSG689 „Õhukesekilelised vismutkalkogeniidid murrangulisele tulevase põlvkonna päikeseenergiatehnoloogiale“; teaduse tippkeskuse projektid TAR16016EK „Uudsed materjalid ja kõrgtehnoloogilised seadmed energia salvestamise ja muundamise süsteemidele“, TK210/TK210U8 „Jätkusuutliku rohevesiniku ja energiatehnoloogia tippkeskus“. Teadustööd on toetanud 952509-5GSOLAR ja CA21148-RENEW-PV.

VIITED

Chen, Z., Dedova, T., Oja Acik, I., Danilson, M., Krunks, M. 2021. Nickel oxide films by chemical spray: Effect of deposition temperature and solvent type on structural, optical, and surface properties. *Applied Surface Science*, 548, 1–9, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149118>

Chen, Z., Dedova, T., Spalatu, N., Maticiuc, N., Rusu, M., Katerski, A., Oja Acik, I., Unold, T., Krunks, M. 2022. ZnO/NiO heterostructures with enhanced photocatalytic activity obtained by ultrasonic spraying of a NiO shell onto ZnO nanorods. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 648, 129366, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129366>

Eensalu, J. S., Katerski, A., Kärber, E., Weinhardt, L., Blum, M., Heske, C., Yang, W., Oja Acik, I., Krunks, M. 2019. Semitransparent Sb₂S₃ thin film solar cells by ultrasonic spray pyrolysis for use in solar windows. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 10, 2396–2409. DOI: 10.3762/bjnano.10.230

Eensalu, J. S., Mandati, S., Don, C., Finch, H., Dhanak, V., Major, J., Grzibovskis, R., Tamm, A., Ritslaid, P., Josepson, R., Käämbre, T., Vembris, A., Spalatu, N., Krunks, M., Oja Acik, I. 2023. Sb₂S₃ thin film solar cells fabricated

from an antimony ethyl xanthate based precursor in air. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15 (36), 42622–42636, <https://doi.org/10.1021/acsami.3c08547>

Eensalu, J. S., Tõnsuaadu, K., Adamson, J., Oja Acik, I., Krunks, M. 2022. Thermal decomposition of tris(O-ethylthiocarbonato)-antimony(III) – a single source precursor for antimony sulfide thin films. *J. Thermal Analysis and Calorimetry*, 147 (8), 4899–4913, <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10885-1>

Eensalu, J. S., Tõnsuaadu, K., Oja Acik, I., Krunks, M. 2022. Sb₂S₃ thin films by ultrasonic spray pyrolysis of antimony ethyl xanthate. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 137, 106209, <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106209>

Gopi, S. V., Spalatu, N., Basnayaka, M., Krautmann, R., Katerski, A., Josepson, R., Grzibovskis, R., Vembris, A., Krunks, M., Oja Acik, I. 2023. Post deposition annealing effect on properties of CdS films and its impact on CdS/Sb₂Se₃ solar cells performance. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1162576, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1162576>

Juneja, N., Daskeviciute-Geguziene, S., Spalatu, N., Mandati, S., Katerski, A., Grzibovskis, R., Vembris, A., Karazhanov, S., Getautis, V., Krunks, M., Oja Acik, I. 2024, a. Employment of dopant-free fluorene-based enamines as innovative hole transport materials to boost the transparency and performance of Sb₂S₃ based solar cells. *Materials Science in Semiconductor Processing* 169, 107934, <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.107934>

Juneja, N., Jegorove, A., Grzibovskis, R., Katerski, A., Daskeviciene, M., Malinauskas, T., Vembris, A., Karazhanov, S., Spalatu, N., Getautis, V., Krunks, M., Oja Acik, I. 2024, b. Dopant-free fluorene based dimers linked with thiophene units as prospective hole transport materials for Sb₂S₃ solar cells. *Sustainable Energy & Fuels*, 8 (18), 4324–4334, DOI: 10.1039/d4se00472h

Juneja, N., Mandati, S., Katerski, A., Spalatu, N., Daskeviciute, S., Vembris, A., Karazhanov, S., Getautis, V., Krunks, M., Oja Acik, I. 2022. Sb₂S₃ solar cells with cost-effective and dopant-free fluorene-based enamine as hole transport material. *Sustainable Energy & Fuels*, 6, 3220–3229, DOI: 10.1039/d2se00356b

Koltsov, M., Gopi, S. V., Raadik, T., Krustok, J., Josepson, R., Grzibovskis, R., Vembris, A., Spalatu, N. 2023 Development of Bi₂S₃ thin film solar cells by close-spaced sublimation and analysis of absorber bulk defects via in-depth photoluminescence analysis. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 254, 112292, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112292>

Koltsov, M., Krautmann, R., Katerski, A., Maticiu, N., Krunks, M., Oja Acik, I., Spalatu, N. 2022. A post-deposition annealing approach for organic residues control in TiO₂ and its impact on Sb₂Se₃/TiO₂ device performance. *Faraday Discussions*, 239, 273–286, <https://doi.org/10.1039/D2FD00064D>

Krautmann, R., Josepson, R., Nedzinskas, R., Kondrotas, R., Gržibovskis, R., Vembris, A., Krunks, M., Oja Acik, I., Spalatu, N. 2023. Low processing temperatures explored in Sb_2S_3 solar cells by close-spaced sublimation and analysis of bulk and interface related defects. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 251, 112139, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.112139>

Krautmann, R., Spalatu, N., Gunder, R., Abou-Ras, D., Unold, T., Schorr, S., Krunks, M., Oja Acik, I. 2021. Analysis of grain orientation and defects in Sb_2Se_3 solar cells fabricated by close-spaced sublimation. *Solar Energy*, 225, 494–500, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.022>

Mandati, S., Juneja, N., Katerski, A., Jegorove, A., Grzibovskis, R., Vembris, A., Getautis, V., Dedova, T., Magomedov, A., Spalatu, N., Karazhanov, S., Krunks, M., Oja Acik, I. 2023. 4.9 % efficient Sb_2S_3 solar cells from semi-transparent absorbers with fluorene-based thiophene terminated hole conductors. *ACS Applied Energy Materials*, 6 (7), 3822–3933, <https://doi.org/10.1021/acsaem.2c04097>

Spalatu, N., Krautmann, R., Katerski, A., Kärber, E., Josepson, R., Hiie, J., Oja Acik, I., Krunks, M. 2021. Screening and optimization of processing temperature for Sb_2Se_3 thin film growth protocol: Interrelation between grain structure, interface intermixing and solar cell performance. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 225, 111045, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111045>



Vasakult: Nicolae Spalatu, Malle Krunks, Ilona Oja Açık ja Atanas Katerski.
Foto: Arno Mikkor

Ilona Oja Açık

Sündinud 17. novembril 1977

2001 Tallinna Tehnikaülikool, keemia- ja materjalitehnoloogia (BSc)

2003 Tallinna Tehnikaülikool, keemia- ja materjalitehnoloogia (MSc)

2007 Tallinna Tehnikaülikool, keemia- ja materjalitehnoloogia (PhD)

Töötanud Tallinna Tehnikaülikoolis alates 2002. aastast. Rahvusvaheline teadustöö kogemus mitmetes Euroopa ülikoolides ja uurimisasutustes. Teadustöö on suunatud uute materjalide väljatöötamisele, rakendades keemilisi sadestusmeetodeid, materjalide omaduste kujundamisele ning protsessi keemia uuringutele, sh termoanalüütika valdkonnas, ning õhukeste kilede rakendamisele päikeseelementides.

Malle Krunks

Sündinud 23. mail 1949 Tallinnas

1967 Tallinna Reaalkool

1972 Tallinna Polütehniline Instituut, diplomeeritud elektroonikainsener

1985 Uurali Polütehniline Instituut, teaduste kandidaat, füüsikaline keemia

Töötanud Tallinna Tehnikaülikoolis aastast 1972, olnud kõigil ametipostidel insenerist juhtivteaduri ja tenuuri täisprofessorini, 2006–2008 Eesti Teaduste Akadeemia uurija-professor. Töötanud külalisteadurina Helsingi tehnikaülikoolis, Hannoveri päikeseenergeetika instituudis ja Kieli tehnikaülikoolis. Keemiliste kiletehnoloogiate uurimisgrupi asutaja ja uurimissuuna algataja Eestis, töötanud dekaani ja instituudi direktorina. Riigi teaduspreemiad tehnikateadustes 1985, 1998, 2009, Tallinna Tehnikaülikooli teenetemärk 2018, Valgetähe IV klassi teenetemärk 2018.

Praegune uurimisvaldkond hõlmab uudsete absorbermaterjalide õhukeste kilede tehnoloogiate ja seadiste struktuuri arendust poolläbipaistvate ja madalatel valguse intensiivsustel töötavate päikeseplatade loomiseks. Uurimistöö fookuses on materjalide sünteesi keemia teaduslikult põhjendatud sünteesiprotokollide koostamiseks, seadise koostekihtide füüsiko-keemiliste omaduste analüüs, orgaaniliste ja anorgaaniliste aukjuhtkihtidega päikeseplatade arendus ja omaduste analüüs.

Atanas Parashkevov Katerski

Sündinud 18. veebruaril 1969 Sofias

1987 Sofia Vasil Levski nimeline Keskkool

1994 Keemilise Tehnoloogia ja Metallurgia Ülikool, keemia tehnoloogia ja mikroelektronika materjalid (Msc)

2011 Tallinna Tehnikaülikool, keemia ja materjalitehnoloogia (PhD)

Töötanud Tallinna Tehnikaülikoolis alates 2003. aastast teadurina, 2023. aastast vanemteadurina. Aastatel 1994–2003 töötas Bulgaaria Teaduste Akadeemia üldise ja anorgaanilise keemia instituudis keemikuna. Täiendanud ennast MaxLabis Lundis ja Vilniuse Ülikoolis.

Viimaste aastate uurimistöö hõlmab uudsete absorbermaterjalide õhukeste kilede sadestamise keemiliste tehnoloogiate (ultraheli pihustamine, keemiline

sadestamine lahusest, pindvurritamine, hüdrotarmaalne sadestamine) arendust efektiivsete poolläbipaistvate päikeseelementide jaoks, elektron- ja aukjuhtkihtide valmistamise ja pooljuhtkilede kiire kristalliseerimise tehnoloogiate väljatöötamist. Ta on oluliselt panustanud ultrahelipihustuse unikaalse seadmepargi konstrueerimisse ja automatiseerimisse, et tagada tehnoloogiliste protsesside korratavus ja edasine skaleeritavus.

Nicolae Spalatu

Sündinud 26. veebruaril 1986 Chişinăus

2008 Moldovaavia Riiklik Ülikool, pooljuhtide füüsika (*Licentiate*)

2010 Moldovaavia Riiklik Ülikool, teoreetiline füüsika (Msc)

2017 Tallinna Tehnikaülikool, keemia ja materjalitehnoloogia (PhD)

Töötanud Tallinna Tehnikaülikoolis alates 2014. aastast nooremteaduri ja teadurina, 2021. aastast vanemteaduri ja 2024. aastast nooremprofessori ametikohal. 2009–2013 töötas Moldovaavia Riikliku Ülikooli füüsika ja tehnikateaduste fakulteedis nooremteadurina.

2017. aastal III preemia üliõpilaste teadustööde riiklikul konkursil loodusteaduste ja tehnika valdkonnas, Taltech'i 2019. aasta arendustöö konkursil II koht. COST Renew-PV võrgustiku koordinaator ja mitmete rahvusvaheliste T&A projektide juht.

Viimaste aastate peamine uurimissuund on olnud lähidistantsilt sublimeerimise (CSS) tehnoloogia väljaarendamine ja optimeerimine Sb_2S_3 ja Sb_2Se_3 , Bi_2S_3 õhukesekileliste absorbermaterjalide sadestamiseks ja nende baasil päikeseelementide valmistamiseks. Uurimistöö hõlmab materjalide ja seadiste füüsiko-keemiliste omaduste, piirpindadel toimuvate protsesside ja defektstruktuuri uuringuid, tulemuste analüüsi ning seadiste väljundparameetrite interpretatsiooni.

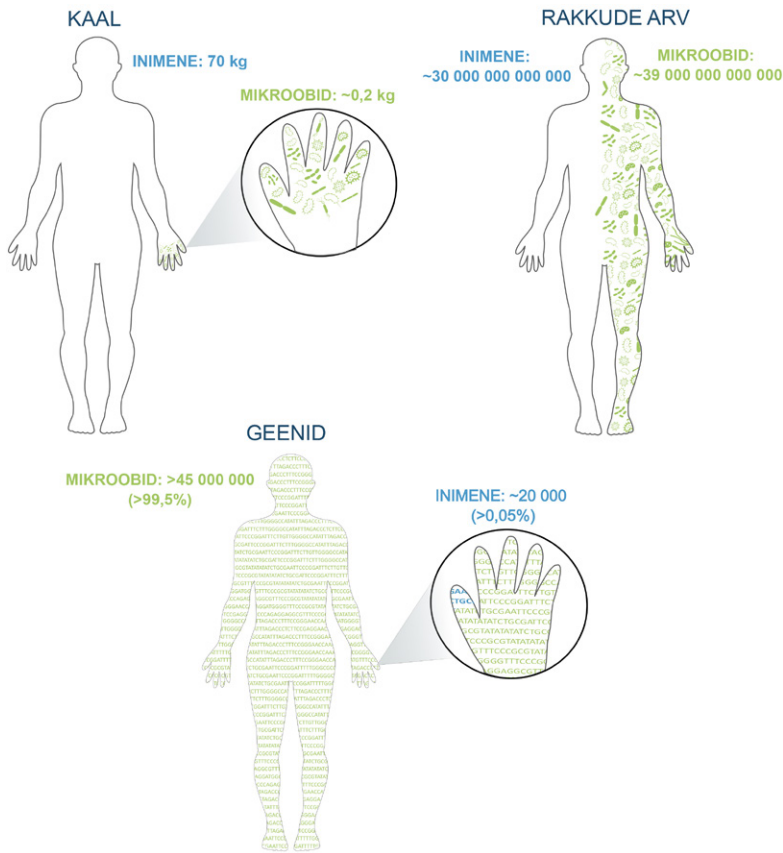
SOOLE MIKROBIOOMI SEOSSED TERVISEGA – UUS PERSPEKTIIV TERVISEUURINGUTES

Elin Org (töörühma juht), Kreete Lüll, Oliver Aasmets,
Kertu Liis Krigul (Tartu Ülikool)

*Teaduspreemia arsti- ja terviseteaduste valdkonnas tööde tsükli
„Soole mikrobioomi seosed tervisega – uus perspektiiv
terviseuuringutes“ eest*

Sõna „mikrobioom“ viitab mikroorganismide kogumile, mis elab inimese (või muu organismi) kehas ja selle pinnal. Mikroorganismid – bakterid, viirused, seened ja arhed – moodustavad keerulise ökosüsteemi, mis mõjutab märkimisväärselt inimese tervist. Mikrobioomikooslus on seotud seedimise, immuunsüsteemi, ainevahetuse ja isegi vaimse terviseiga.

Mikrobioomi uurimine sai alguse juba 17. sajandil, kui Antoni van Leeuwenhoek vaatas mikroskoobi all oma hambakaabet ning kirjeldas seal olevaid objekte, mida ta nimetas sõnaga *animalcules*, mida võiks tõlkida kui „väikesed loomakesed“. Leeuwenhoek kirjeldas, et mõned isendid olid liikuvad, ning märkis, et osa neist olid pulgasarnased, osa spiraalsed. Mikrobioomika ehk mikroorganismi kogumite pärilikkusaine (DNA) uurimine sai uue hoo sisse 21. sajandi alguses seoses sekveneerimise tehnoloogiate arenguga, mis võimaldas hakata mikrobioomi uurima täpsemalt ja süsteemsemalt. Neist tehnoloogilistest edusammudest lähtuvalt olemegi saanud teada mikroobide kriitilisest rollist nii inimese tervises kui ka globaalsetes ökosüsteemides. 2007. aastal algatas USA National Institute of Health ambitsioonika inimese mikrobioomi projekti (Human Microbiome Project, HMP), mille eesmärk oli kaardistada inimkeha mikrobioomid ja hakata lahti harutama nende rolli tervises ja haigustes. Tänu sellele ja teistele sarnastele projektidele on mikrobioomist saanud üks olulisemaid ja juhtivamaid uurimisvaldkondi kaasaegses biomeditsiinis, millel on potentsiaal muuta arusaama inimese tervisest, haiguste väljakujunemisest ning ravist. Öeldakse, et inimese mikrobioomi koosseis võib olla sama isikupärane kui sõrmejalg. Mikrobioomi mõjutavad eluea jooksul dünaamiliselt toitumine, keskkond, eluviis, ravimid (eriti antibiootikumid) ning eelnimetatud faktorite mõju on sageli kahesuunaline. Näiteks mõjutab toitumine meie mikrobioomi koosseisu, aga samas mõjutab mikrobioom ka seda, kui hästi (või halvasti) inimene suudab toitaineid lagundada. Samasugune kahesuunalisus on näha ka



Joonis 1. Inimese erinevate tunnuste, nagu kaalu, rakkude ning geenide arvu suhe mikroobide vastavate parameetritega (modifitseeritud Krigul, 2024).

ravimite puhul: ravimite tarbimine võib viia muutusteni soolestiku mikrobioomi koosluses, kuid samal ajal võivad erinevad bakterid meie soolestikus mõjutada ravimite metabolismi.

Mikrobiomika uurimine on kaasa toonud ka uusi ravivõimalusi. Näiteks kasutatakse soolebakterite siirdamist (FMT – fekaalmikrobioota siirdamine) raskete sooleinfektsioonide, nagu *Clostridium difficile*, raviks. Samuti uuritakse, kuidas mikrobioomi kasutada ülekaalu, diabeedi, autoimmuunhaiguste ja isegi depressiooni raviks ja ennetamiseks. Kuigi mikrobioomi uurimine on alles arenemisjärgus, kasvab valdkond kiiresti. Uute tehnoloogiate abil suudetakse järjest paremini mõista, kuidas mikroobid suhtlevad nii omavahel kui ka peremeesorganismiga. Tulevikus võib mikrobioomi analüüs saada tavameditsiini lahutamatuks osaks, pakkudes personaalseid toitumis- ja ravisoovitusi ning aidates kaasa tervise hoidmisele.

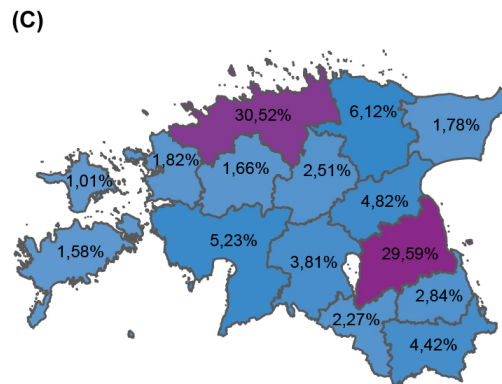
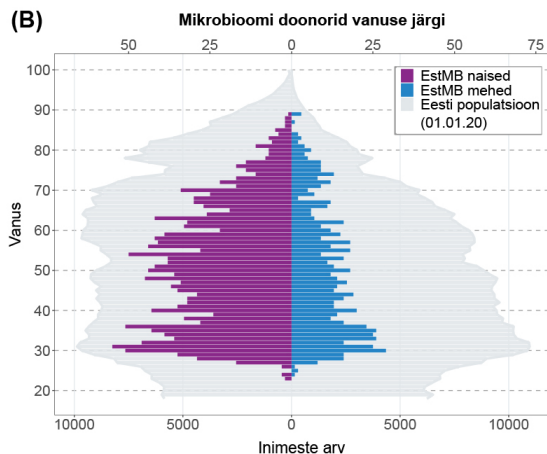
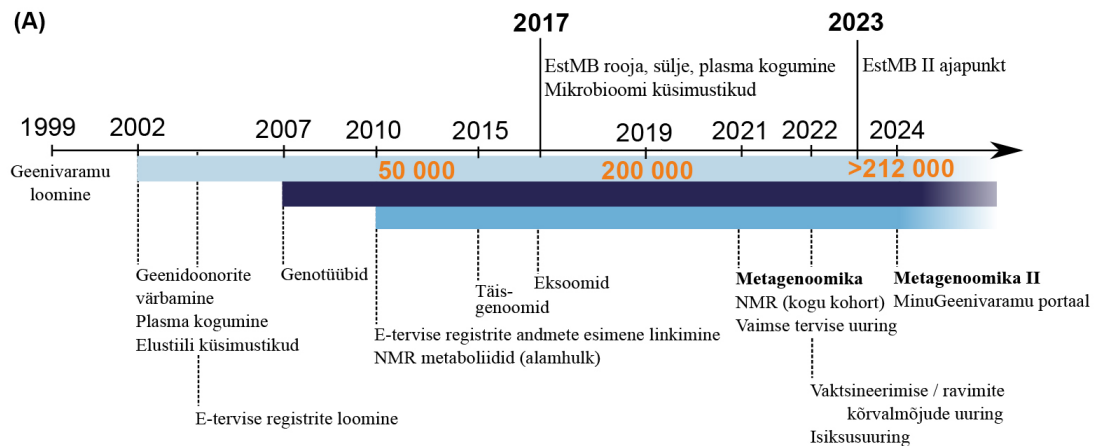
Mikrobioomi roll inimese tervises

Kuigi kaalult pole inimese mikrobioom väga kogukas, on mikroorganismide arv ning geneetiline potentsiaal üüratu. Hinnanguliselt on inimese kehas iga raku kohta 1,3 mikroobirakku, ületades sellega inimese enda rakkude hulga. Erinevaid geene võib mikroobidel olla inimkehas aga enam kui 100 korda rohkem inimeste geenidega võrreldes (joonis 1). Kõige mitmekesisem mikrobioomikooslus inimkehas asub seedetrakti jämesoole osas.

Need mikroskoopilised kaaslased ei aita ainult toidu seedimisel, vaid mõjutavad meie immuunsüsteemi, ainevahetust ning haiguste teket ja kulgu. Tartu Ülikooli genoomika instituudi mikrobioomi töögrupi teadustöö fookuseks on mikrobioomi muustrite abil inimese tervisliku seisundi hindamine, haiguste riski prognoosimine ja ravimite tarvitamise mõjude kirjeldamine. Nende küsimuste lahendamine eeldab mitmekihilise andmestiku olemasolu. Soolestiku mikrobioomi kirjeldamiseks kogutakse ja analüüsitakse peamiselt väljaheiteproove. Täiendav vereproovi võtmine võimaldab lisaks uurida mikrobioomi elutegevuse käigus tekkinud ainevahetusprodukte (metaboliite) ning määrata erinevaid tervist hindavaid biomarkereid (nt põletiknäitajad, immuunvastused jne). Mikrobioomi ja tervise vaheliste seoste analüüs eeldab rikkalikku andmestikku, mis sisaldab teavet nii inimese tervise (nt meditsiiniline ajalugu, haigusseisundite info, ravimikasutus, vanus, kehamassiindeks) kui ka elustiili ning keskkonnategurite (nt toitumine, füüsiline aktiivsus, elukoht, kokkupuude lemmikloomadega, stressitase, suitsetamine, alkoholitarbimine) kohta. Kõigi nende andmetüüpide integreeritud analüüs loob teadlastele võimaluse uurida kompleksseid mikrobioomi ja tervise vahelisi keerukaid seoseid.

Eesti mikrobioomi kohort

2016. aastal lõi vastsetl Los Angelesest California Ülikooli järel doktorantuurist naasnud Elin Org Tartu Ülikooli genoomika instituudi mikrobioomi uurimisgrupi, mille esimesteks liikmeteks olid doktorandid Kreete Lüll, Oliver Aasmets ja Kertu Liis Krigul. Töögrupp asutati eesmärgiga uurida soolestiku mikroobikoosluste mõju inimese tervisele. See oli Eestis seninägematu lähene mine, mis nõudis uut tüüpi andmestikku – põhjalikku kogu Eesti elanikkonda hõlmavat mikrobioomi kohorti, mis ühendaks mikroobikoosluste suurandmed inimeste terviseandmetega. Mikrobioomi valdkonna arendamiseks Eestis koguti teekaardi projekti raames aastatel 2017–2019 kokku 2509 Eesti geenivaramu geenidoonori vere, suu ja soolestiku mikrobioomi proovid, pannes sellega aluse Eesti mikrobioomi kohordile (EstMB) (joonis 2). Kõigepealt määrati soolestiku mikrobioom väljaheiteproovidest, kasutades sügava kogu proovi DNA kaardistamise ehk metagenoomi sekveneerimise meetodit. Lisaks proovide andmisele täitsid kõik uuritavad põhjaliku uuringuküsimustiku, mis kajastas nii geenidoonorite elustiili (nt toitumisharjumusi, füüsilist aktiivsust, stressitaset jm) kui ka elukeskkonda. Tänu osalusele Eesti geenivaramus on võimalik iga uuritava kohta kasutada ka elektroonilisi registriandmeid, mis võimaldavad detailselt

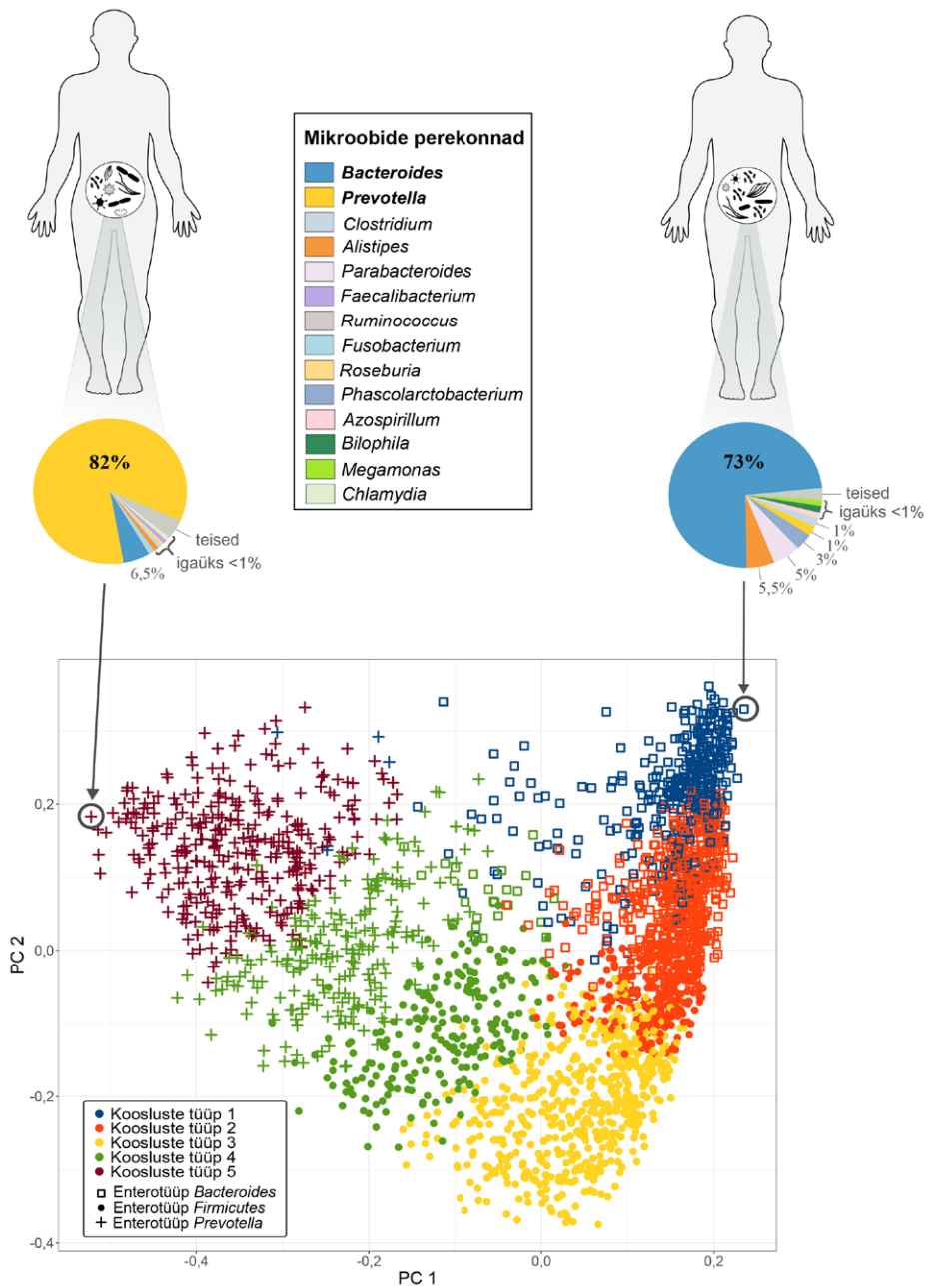


Joonis 2. Eesti mikrobioomi (EstMB) kohort. (A) Geenivaramu ja mikrobioomi kohordi ajatelg. (B) Eesti mikrobioomi kohordi vanusegrupid võrreldes Eesti üldpopulatsiooniga. (C) EstMB projektis osalejate elukoht maakondade lõikes, lilla värviga on tähistatud uuringukeskused.

jälgida inimese tervist ja ravimite tarbimist nii proovi kogumise hetkel kui ka tagasiulatuvalt ning tulevikus. Just rikkalik terviseandmestik on tugevaks eeliseks võrreldes seniste suuremate mikrobioomi kohortide ja uuringutega, mis tihti võimaldavad analüüsida vaid küsimustikel põhinevaid andmeid. Kasutades mahukat tervise- ja elustiiliandmestikku, analüüsisime kokku 252 erinevat tunnust, mis hõlmasid inimese elustiili kirjeldavaid tunnuseid, nagu suitsetamine ja alkoholitarbimine, haiguste esinemist, tarvitatavaid ravimeid, toidueelistusi ning muid inimest kirjeldavad tunnuseid, nagu sugu, vanus ning kehamassiindeks. Sarnaselt mitmes varem publitseeritud töös näidatuga olid enim mikrobioomi varieeruvust kirjeldavad tunnused Eesti kohordis soole tühjendamise sagedus, kehamassiindeks, suitsetamine ning inimese sugu. Samuti nägime, et märkimisväärselt mitmekesisem soole mikrobioomi kooslus esines inimestel, kes järgisid tervislikku eluviisi – toitusid teadlikult ning olid füüsiliselt aktiivsed. Lisaks tuvastasime olulisi muutusi soole mikrobioomis 50 haigusdiagnoosi (nt erinevad kardiometaboolsed haigused, soolehaigused, närvisüsteemiga seotud haigused) ning 47 ravimi tarvitamise korral.

Kõige märkimisväärsem leid oli antibiootikumide pikaajalise kasutamise akumuleeruv mõju mikrobioomi kooslusele. Traditsiooniliselt on arvatud, et antibiootikumid mõjutavad mikrobioomi koosseisu ainult lühiajaliselt, kuid meie analüüs näitas, et juba kolm-neli antibiootikumikuuri viimase kümne aasta jooksul viib oluliste muutusteni, isegi kui viimasel kuuel kuul antibiootikume tarbitud ei ole. Võrreldes inimestega, kes antibiootikume tarvitanud ei ole, on antibiootikume kasutanud isikutel mikroobsete liikide arv oluliselt väiksem ja nende mikroobikooslus on muutunud. Lisaks näitasime, et analüüsides pikaajalise antibiootikumide mõju arvesse võtmine võimaldab omakorda täpsustada haiguspetsiifilisi muutusi mikrobioomis. Eesti mikrobioomi kohorti kirjeldav töö ning mikrobioomi mõjutavate tunnuste analüüs publitseeriti ajakirjas *Nature Communications* (Aasmets, Krigul jt, 2022). Eesti mikrobioomi kohordi andmetega oleme täiendavalt uurinud, kas inimeste grupeerimine mikrobioomi sarnasuse põhjal oleks kliiniliselt kasulik. On tõendatud, et soolestiku mikrobioomi põhjal võib inimesed domineerivate bakteriperekondade alusel jagada laias laastus kolme gruppi, n-õ enterotüüpi, mis on ajas võrreldes liigilise kooslusega võrdlemisi stabiilsed (joonis 3). Ajakirjas *Frontiers in Genetics* (Aasmets jt, 2022) avaldatud töös näitasime, et kuigi selline grupeerimine oli erinevate tervisefaktoritega seotud, siis haiguste diagnostikat ning ennetust taoline lähenemine siiski ei võimalda.

Loodud mikrobioomi kohort on samuti võimaldanud luua kõrgetasemelisi koostöid mikrobioomi valdkonna ekspertidega ning oluliselt laiendada rahvusvahelisi võimalusi Eesti teadlastele. Eesti mikrobioomi kohordi andmeid on kasutatud muuhulgas mainekas ajakirjas *Cell* avaldatud artiklis, mille eesmärk oli luua sekveneerimisel põhinevate soolestiku mikrobioomi andmetel masinõppe mudel, mis võimaldaks hinnata mikroobide hulka (Nishijima jt, 2024). Töös näidati muuhulgas, et mikroobide hulga arvesse võtmine on oluline haiguste ja mikrobioomi seoste mõistmiseks.



Joonis 3. Entero- ja koosluste tüübid ning inimestevahelised mikrobiomikoosluse erinevused (Krigul, 2024; Aasmets jt, 2022 alusel).

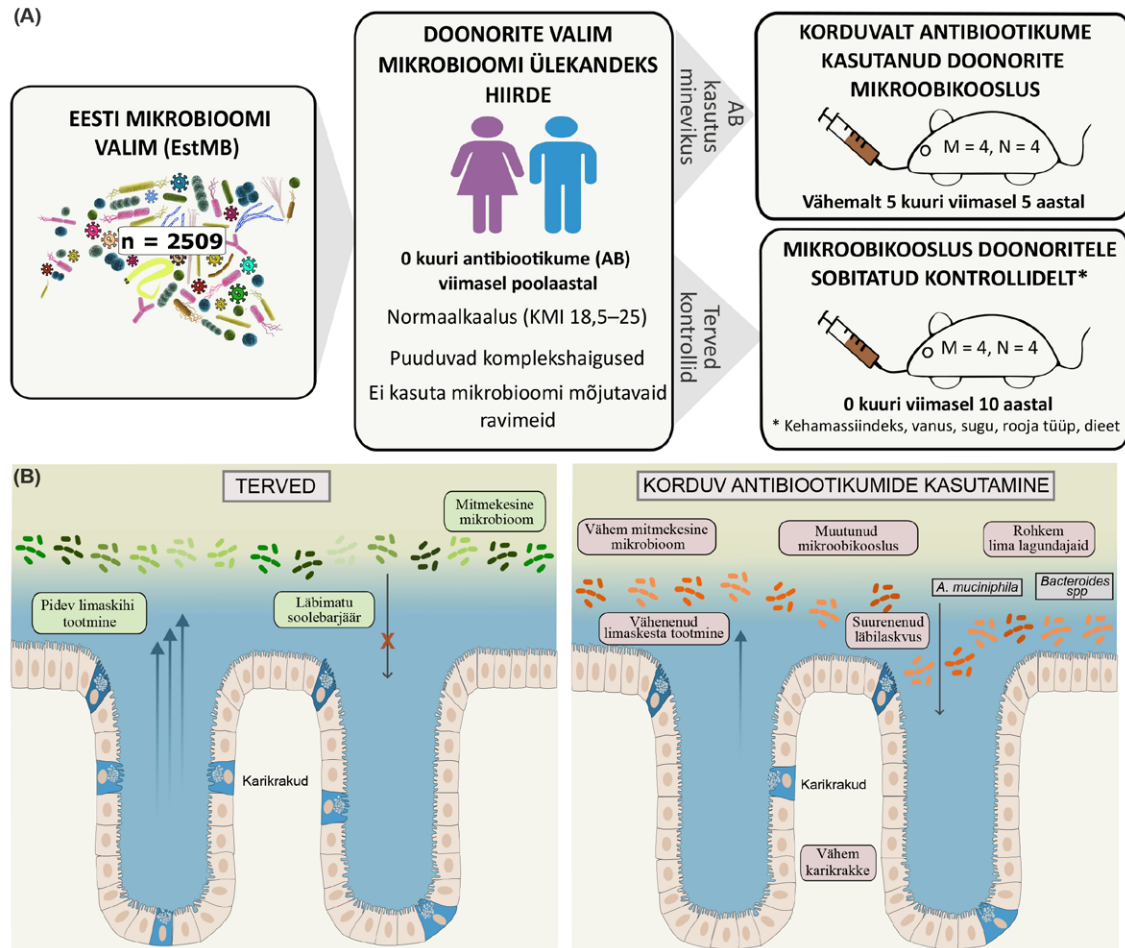
Pikaajaline antibiootikumide kasutamine mõjutab mikrobioomi kaudu soole kaitsebarjääri

Lähtudes meie varasematest tulemustest, mis näitasid, et korduv antibiootikumide kasutamine muudab soole mikrobioomi koostlust, soovisime edasi uurida, millist mõju võivad need muutused avaldada soole olulisele kaitsebarjäärile – soole limaskestale, mis hoiab baktereid eemal soolestiku seina epiteelist. Tegime katse, kus valisime kindlate kriteeriumide järgi Eesti mikrobioomi kohordist välja kaks gruppi inimesi: 1) geenidonorid, kes on viimase viie aasta jooksul läbinud üle viie antibiootikumikuuri, kuid ei ole antibiootikume tarvitanud viimasel kuuel kuul enne proovi andmist; 2) kontrollgrupi, kes pole viimase kümne aasta jooksul antibiootikumikuuri läbi teinud. Seejärel viisime läbi nende kahe grupi mikrobioomi siirdamise hiiremudelisse (joonis 4A). Erinevate mõõtmiste ja analüüside tulemused näitasid, et kui antibiootikume tarvitanud inimeste mikrobioom kanda üle hiirtele, tekivad neil soolestikus limakihi toimimise häired. Näitasime, et inimeselt pärit antibiootikumide tarvitamise poolt mõjutatud mikrobioom põhjustab hiirtel lima tootvate karikrakkude arvu vähenemist, aeglasemat limakihi kasvu ja suurendab selle läbilaskvust (joonis 4B). Peale selle esines nende hiirte mikrobioomikoosluses sagedamini soole limakihti lagundavaid bakteriliike, mis omakorda mõjutab limakihi läbilaskvust. Lisaks muutustele soole limaskestas ja mikrobioomis oli antibiootikumide rühmas olevatel hiirtel ka kõrgem kõhurasva protsent, viidates ka muudele füsioloogilistele muutustele (Krigul, Feenery, 2024). Meie töö näitas esmakordselt, et antibiootikumide varasem korduvkasutamine on seotud füsioloogiliste muudatustega.

Mikrobioomi võimalused vähidiagnostika parandamiseks

Vähki haigestumine on kahjuks kogu maailmas kasvutrendis ning viimastel aastatel on eriti suurenenud jämesoolevähi juhtumite arv, olles kolmas kõige sagedamini diagnoositud vähivorm maailmas ning mõjutades enam kui viit miljonit inimest (Xi jt, 2021).³⁷ Epidemioloogiliste andmete põhjal hinnatakse, et jämesoolevähi uute diagnooside hulk kasvab 2030. aastaks 60% ning haiguse leviku kasv on eriti märkimisväärne just nooremate (< 50-aastaste) täiskasvanute seas (Sung jt, 2020). Seetõttu on oluline tuvastada uusi varajasi biomarkereid, mis võimaldaks täpsemat ning varasemat diagnoosimist, viies omakorda varasema sekkumise ja tõhusama ravini. Jämesoolevähi kujunemine on astmeline protsess, mil soolestiku healoomulistest kasvajatest ehk polüüpidest ja adenoomidest arenevad ajapikku pahaloomulised kasvaja ehk kartsinoomid. Haiguse varajane diagnoos on kriitilise tähtsusega, et parandada patsientide elulemust. Jämesoolevähi tekke tõenäosust saab vähendada polüüptide varase tuvastamise ja eemaldamise abil ning sel põhjusel on kogu Euroopas ning üle maailma käivitatud sõeluuringuprogrammid, mille käigus skriinitakse jämesoolevähi haigestumise riski üle 50 aasta vanustel inimestel. Sõeluuringus määratakse proovidest silmaga märkamatuks jäävaid vere jääke ning peitvere leiu korral tehakse invasiivne koloskoopia analüüs, tuvastamaks sooleseinal võimalikke

³⁷ <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34243011/>



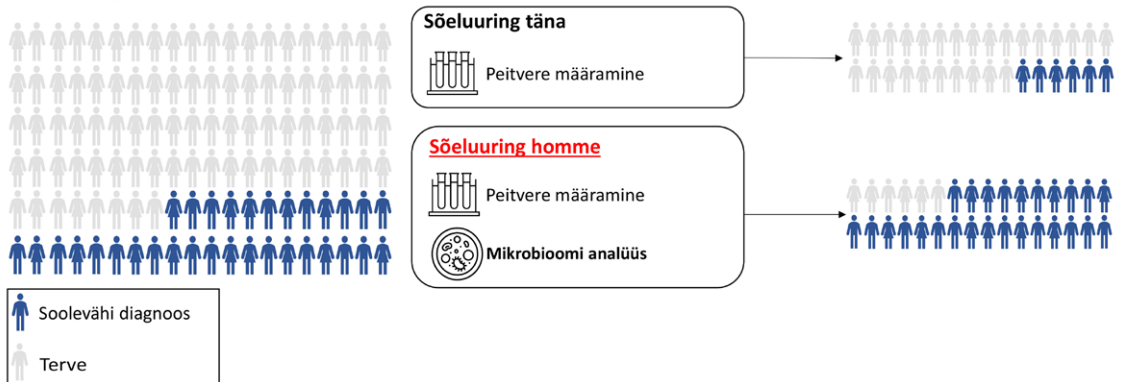
Joonis 4. Korduva antibiootikumide tarvitamise mõju soolestiku limasihile. (A) Uuringuplaan inimeselt hiirele tehtava mikroobikoosluse siirdamise kohta. (B) Jämesoole limaskesta barjääri ja soole mikroobioomi kahepoolsed koostoimed (modifitseeritud Krigul, 2024).

kasvajaid. Kuigi sõeluuringu käigus tuvastatakse Eestis igal aastal üle 100 uue vähijahu ja ligikaudu 600 vähieelset polüüpi, jäävad paljud haigusjuhud avastamata. Seetõttu otsitakse võimalusi, kuidas diagnostikat parandada.

Viimaste aastate teadustööd on selgelt kinnitanud, et jämesoolevähi kujunemisega kaasnevad muutused soole mikroobioomis, mis arvatakse mängivat olulist rolli nii vähi tekkes kui ka progresseerumises (White jt, 2024). Varem oli näidatud, et peitvere analüüsiks kasutuses olevaid proovide kogumise katsuteid on võimalik kasutada ka mikroobioomiproovide kogumiseks täiendavate uuringute tarbeks. Seetõttu soovisime välja selgitada, kas Eestis sõeluuringus kasutatavatest peitvere analüüsi tarbeks võetud väljaheiteproovidest on võimalik määrata ka mikrobioomi. See looks väärtusliku võimaluse tuvastada lisaks peitverele ka mikrobioomi muutusi ning integreerida mikrobioomi analüüs soolevähi sõeluuringusse. Selline integreeritud test aitaks muuta vähieelsete seisundite diagnoosimine täpsemaks ning võimaldaks senisest paremini suunata tervishoiuresse. Ajakirjas Scientific Reports avaldatud töös (Krigul jt, 2021) demonstreerisime, et Eesti jämesoolevähi sõeluuringu peitvere testi proovidest on võimalik edukalt analüüsida ka mikrobioomi, avades uusi võimalusi varajaseks diagnostikaks. See võimaldab kasutada riiklikus sõeluuringus kogutud proove täiendavateks uuringuteks ilma lisakoormuseta patsiendile. Järgmise sammuna oleme alustanud koostööd Tartu Ülikooli sisekliiniku ja hematoloogia-onkoloogia kliinikuga, kus viime läbi pilootprojekti, mille eesmärk on tulevikus parendada soolevähi sõeluuringu efektiivsust mikrobioomi analüüsi abil (joonis 5).

Riiklik jämesoolevähi sõeluuring

Iga-aastaselt enam kui 50 000
sõeluuringus osalejat



Joonis 5. Mikrobioomi kaasamine riiklikusse jämesoolevähi sõeluuringu programmi.

Rahvusvaheline koostöö

Mikrobioomi uurimises ja teaduses laiemalt on äärmiselt olulisel kohal rahvusvaheline koostöö, mis aitab teadlastel jagada oma teadmisi, andmeid ja tehnoloogiaid. Rahvusvahelised projektid võimaldavad uurida mitmekesisemat populatsiooni ja suuremaid valimeid, mis kõik soodustab uute avastusteni jõudmist ning nende võimalikku rakendamist meditsiini. Mikrobioomi uurimisgrupiga oleme osalenud ning osaleme aktiivselt mitmetes rahvusvahelistes koostööprojektides.

Enne EstMB valimi kogumist Eesti geenivaramus oli meil võimalik koostöös professor Markku Laaksoga Soome Kuopio Ülikoolist analüüsida Soomes kogutud METabolic Syndrome In Men (METSIM) kohordi mikrobioomi andmeid. METSIM-i kohorti kuulub enam kui 10 000 Soome meest ning erinevaid proove (k.a mikrobioomi) on kogutud ligi 20 aasta jooksul mitmest ajapunktist (Laakso jt, 2017). Selle andmestikuga osalesime näiteks rahvusvahelise MiBioGen konsortsiumi töös, kus analüüsiti inimese geneetilise varieeruvuse mõju soole mikrobioomile, kasutades selleks 18 340 inimese mikrobioomi andmeid kokku 24 erinevast kohordist ja 11 riigist. Töö tulemused avaldati ajakirjas Nature Genetics (Kurilshikov jt, 2021). Töös tuvastati sooles esinevate bakterite perekondade ja inimese genoomi erinevate piirkondade vahelisi seoseid ning kinnitati muuhulgas seos *LCT* geeni ning bakteriperekonna *Bifidobacterium* vahel. *LCT* vastutab ensüümi laktaasi tootmise eest, mis on inimorganismis vajalik laktoosi lagundamiseks. Leitud seos oli tugevam populatsioonides, kellel esineb laktoositalumatust, viidates sellele, et neil inimestel on suurenenud *Bifidobacterium*'i arvukus soolestikus, mis on vähemalt osaliselt võimaline üle võtma laktoosi lagundamise soolestikus. Lisaks leiti uuringus *Oxalobacteraceae* perekonna potentsiaalne kaitsev toime reumatoidartriidi vastu. Samas näitas see töö ka seda, et kuna inimese geneetilise varieeruvuse mõju soole mikrobioomile on väike, siis vajaliku uuringuvõimsuse saavutamiseks on vaja märkimisväärselt suuremat andmestikku. Veel näitas uuring selgelt, et mikrobiomivaheliste seoste valideerimiseks teistes andmestikes ja populatsioonides on oluline ühtlustada standardid mikrobioomi proovide kogumiseks ja analüüsimiseks. METSIM-i kohordiga oleme läbi viinud ka diabeedi uuringuid. Ajakirjas mSystems avaldatud töös (Aasmets jt, 2021) näitasime, et mikrobioomi muutused aitavad prognoosida teist tüüpi diabeedi arengut, kasutades mikrobioomi analüüsi mitmest erinevast ajapunktist. Soome METSIM-i kohordi andmeid analüüsid suudeti ennustada diabeediga seotud muutusi insuliinitundlikkuses. See avab uusi võimalusi diabeedi varajaseks tuvastamiseks ja ennetamiseks.

Oleme uurinud soolestiku mikrobioomi seoseid naistehaigustega, nagu polütsüstiliste munasarjade sündroom (PCOS) ja endometriooos. Mõlemad haigused on tänapäeval naiste seas väga laialdaselt levinud, mõjutades nii nende elukvaliteeti kui ka viljakust. Koostöös professor Terhi Piltoneniga analüüsisime Põhja-Soome 1966. aasta sünnikohordi (Northern Finland Birth Cohorts, NFBC1966) mikrobioomi andmeid, et uurida võimalikke seoseid PCOS-i ja soolestiku mikrobioomi vahel. Artikkel ilmus ajakirjas The Journal of Clinical Endocrinology & Metabo-

lism (Lüll jt, 2021) ning selle töö põhitulemusena leidsime, et PCOS-iga naistel on mikrobioomi muutused suuresti seotud kaasnevate ainevahetushäiretega, nagu näiteks eel- ehk prediabeet ja rasvumine. Artikli publitseerimise ajal oli tegemist seni suurima PCOS-i valimiga mikrobioomi uuringutes. Lisaks tõstis ajakiri uurimistööd esile kui üht olulisemat endokriinsüsteemi ja mikrobioomi seoseid käsitlevat uurimust. Naiste tervise teemadel oleme uurinud veel ka endometriooosi. Ajakirjas BMC Medical (Pérez-Prieto jt, 2024) ilmunud teadustöö eesmärk oli välja selgitada, kas ja kuidas erineb soolestiku mikrobioomi koosseis endometriooosiga inimestel võrreldes tervete kontrollisikutega. Uuringus ei leitud endometriooosiga ja tervete naiste soolestiku mikrobioomis statistiliselt olulisi erinevusi mitmekesisusanalüüsid ega eristatud ühtegi liiki, mis gruppide vahel erineks. Sellest järeldati, et puudusid piisavad tõendid, toetamaks soolestiku mikrobioomist sõltuva mehhanismi olemasolu, mis on otseselt seotud endometriooosi patogeneesiga.

Tulevikusuunad mikrobioomiteaduses

Mikrobioomi valdkonnas võib esile tõsta kolme suuremat arengusuunda, mis aitavad mikrobioomiteadust tervise edendamiseks ning ravi ja toitumise personaliseerimiseks praktikasse viia. Esiteks on jätkuvalt oluline mõista, mis on need bioloogilised mehhanismid, mille kaudu mikrobioom mõjutab haiguse teket või mislābi muudab mikrobioom näiteks ravimi efektiivsust. Teiseks – praegu teame, et muutused mikrobioomi koosluses on seotud mitmete haiguste esinemisega. See loob võimaluse mikrobioomil põhinevate testide loomiseks, mis võimaldaksid senisest efektiivsemalt haigusi diagnoosida või haiguste teket prognoosida. Samal põhimõttel on võimalik mikrobioomi põhjal ette näha, milline on kasutatava ravimi efektiivsus või toitumise mõju inimese organismile. Kolmas suurem valdkond on seotud mikrobioomi koosluse muutmise, mille eemärk on parandada inimese tervist (Gilbert jt, 2025). Kōiki arengusuundi iseloomustab omakorda liikumine soolestiku mikrobioomilt laiemale holistlikule vaatele, mis arvestab samaaegselt erinevate kehapaikade mikrobioomikooslust, interaktsioone keskkonna ja teiste kooslustega ning nende mõju tervisele.

Selleks et mõista mehhanisme, mille kaudu mikrobioom meie tervist toetab, käib töö omakorda mitmel suunal. Oluline on märkida, et kuigi on teada antud seostest mikrobioomikoosluse ja paljude haiguste, sh diabeedi, depressiooni, soolehaiguste ja erinevate vähivormide vahel, siis teame praegu üsna vähe haiguste teket põhjustavatest muutustest. On teada, et seose taga võib olla näiteks haigusega kaasnev ravimite tarvitamine, mistõttu ei pruugi mikrobioomil haiguse tekkele mõju olla. Et leida põhjuslikke seoseid ning täpsemini mõista mehhanisme, kasutatakse loomudeleid ning üha enam ka süsteeme, mis võimaldavad mikrobioomikooslust laboritingimustes kasvatada ja mõõta. Teisalt aga on teada, et replitseeruvate haiguse ja mikrobioomi seoste leidmine on keeruline puhtalt andmeanalüüsi poolest. Selle probleemi lahendamiseks on käimas mitmeid algatusi, mille eesmärk on andmeanalüüsi praktikate standardiseerimine ja parimate praktikate väljaselgitamine (nt Human Microbiome Action). Lisaks on oluline tulemuste replitseerimine erinevates kohortides ja populatsioonides,

mis saab võimalikuks uute suurte andmekogude loomise teel. Mikrobioomi uurimisgrupis tegeleme aktiivselt andmeanalüüsi metoodika arendamisega (Karwowska, Aasmets jt, 2025) ja oleme osalised suurtes koostööprojektides, mis andmeanalüüsi metoodikat standardiseerivad. Oleme panustanud ka statistilise metoodika arendusse, mis võimaldaks otse andmete põhjal mikrobioomi põhjuslikke mõjusid hinnata (Taba jt, 2025).

Kuigi põhjuslike mõjude ja toimemehhanismide mõistmine on oluline haiguste raviks, siis nähtud seoseid mikrobioomi ja haiguste vahel on võimalik rakendada haiguste diagnostikaks ning prognostikaks olenemata sellest, kas nad on põhjuslikud või mitte. Seetõttu tegeletakse aktiivselt mikrobioomi andmete põhjal diagnostiliste ja prognostiliste meetmete väljatöötamisega. Enim on uuritud mikrobioomi kasutamist soolevähi diagnostikaks, mis võimaldaks keerukat diagnostikat lihtsustada. Sarnaselt uuritakse mikrobioomi kasutamist näiteks pankreasevähi diagnostikaks. Meie tööühm on praegu seotud EU Horizon programmi projektiga, mille eesmärk on kolme raskesti mõistetava vähi (jämesoole-, pankrease- ja neeruvähk) põhjuste avastamine Euroopas.³⁸ Sellegipoolest on praegusel ajal mikrobioomil põhinevate diagnostiliste testide arendused alles algusjärgus ning kliinilisse praktikasse jõudmine eeldab edasist tööd nii andmete kogumise, analüüsimise kui ka tulemuste replitseeritavuse tagamisega. On oluline märkida, et n-ö „tervet mikrobioomi“ ei ole praegu võimalik üheselt defineerida ning puuduvad referentsvahemikud bakterite arvukusele, mistõttu saame rääkida vaid haigusspetsiifilisest diagnostikast, mitte üldisest „tasakaalustamata mikrobioomist“ või „düsbioosist“ (Porcari jt, 2025). Oluline arengusuund on ka mikrobioomi kasutamine haiguse tekke prognoosimiseks. On juba tõestatud, et mikrobioomis esinevad muutused, mis aitavad ennustada näiteks teist tüüpi diabeedi teket tulevikus (Aasmets jt, 2021; Ruuskanen jt, 2022). Täna on maailmas üksikuid mikrobioomi andmestikke (sh Eesti mikrobioomi kohort), mis võimaldavad sellist tüüpi analüüsi läbi viia. Analüüsi eeldusteks on, et mikrobioomi proov oleks kogutud aastaid enne haiguse teket ja et inimese tervis on tulevikus jälgitav. Võib eeldada, et mikrobioomil põhinevate prognostiliste mudelite loomine areneb lähiaastatel jõudsalt, sest mikrobioomi andmestike hulk Põhjamaades, kus on terviseandmed elektrooniliselt jälgitavad, on järsult kasvanud.

Lisaks haigusseoste teada, et mikrobioom aitab metaboliseerida mitmeid ravimeid ning ka toitumise efekt inimesele sõltub mikrobioomi kooslusest (Zeevi jt, 2015; Zimmermann jt, 2021). Nendest teadmistest lähtuvalt arendatakse viise, kuidas saaksime mikrobioomi põhjal hinnata, milline ravim on inimesele personaalselt sobivaim. On teada näiteid, kus sõltuvalt soolestiku mikrobioomi kooslusest võib sama ravim olla inimesele efektiivne või hoopiski toksiline (Zimmermann jt, 2021). Töötatakse selle nimel, et seda efekti oleks võimalik andmetelt prognoosida mitmete ravimite kohta. Näeme, et ka Eesti geenivaramu andmetele tuginedes saame sinna panustada oma mikrobioomi uurimisgrupiga. Eesmärk on tulevikus anda personaalseid ravimisoovitusi, mis võtavad arvesse nii inimese enda genoomi kui ka mikrobioomi eripärasid.

³⁸ <https://discern.iarc.who.int/>

Oluline arendussuund on ka mikrobioomi muutmine ja mikrobioomil põhinevad teraapiad. Praeguseks on turul kolm mikrobioomil põhinevat teraapiat, mille on ravimina heaks kiitnud Ameerika ravimiamet, neist esimese aastal 2022. Kõik kolm ravimit on mõeldud *Clostridium difficile* raviks, kuid käimasolevate uuringute põhjal võib eeldada, et erinevate haiguste hulk, mille vastu toimib mikrobioomil põhinev ravim, lähiajal kasvab.

Sinna alla käib lisaks probiootikumide, prebiootikumide, postbiootikumide ja sünbiootikumide arendus. Uue generatsiooni probiootikumide ning modifitseeritud probiootikumide tulekuga võib eeldada, et turule jõuavad tooted, millel on senisest suurem efektiivsus haiguse raviks või ennetuseks ning mis on määratletud kui ravimid. Aina olulisemaks kujuneb uute antibiootikumide ning antimikroobsete toodete arendus. On selge, et koos antibiootikumide kasutamise kasvuga kaasneb antibiootikumiresistentsete mikroobide arv. Seetõttu pannakse suurt rõhku lahendustele, mis võimaldaksid patogeene või infektsiooni põhjustajaid mõjutada, jättes mõjutamata ülejäänud koosluse. Eesti mikrobioomi kohordi andmestik annab võimaluse analüüsida ka antibiootikumide resistentsusega seotud küsimusi.

Kokkuvõtteks saab öelda, et mikrobioomi kui keeruka ökosüsteemi uurimine on viimasel aastakümnel olnud väga kiirelt arenev teadusvaldkond. Järjest suurenev teadustööde hulk, andmete maht ning uute analüüsimetodite kasutuselevõtt on aidanud meil üha selgemini mõista mikrobioomi ja tervise vahelisi seoseid. Need teadmised loovad aluse mikrobioomi rakendamiseks meditsiinis, võimaldades tulevikus senisest efektiivsemalt haiguste diagnoosimist, haigusriskide prognoosimist ja ravimi mõju hindamist. Geenivaramu ning personaalmeditsiini programm on seni keskendunud inimese genoomi uuringutele, kuid mikrobioomialaste teadmiste kiiret arengut arvestades võib arvata, et mikrobioomi rakendamine personaalmeditsiinis on vaid aja küsimus.

VIITED

1. Aasmets, O., Krigul, K. L., Lüll, K., Org, E. 2021. Gut metagenome associations with extensive digital health data in a volunteer-based Estonian microbiome cohort. *Nature Communications*, 18(869), doi: 10.1038/s41467-022-28464-9
2. Aasmets, O., Krigul, K. L., Org, E. 2022. Evaluating the clinical relevance of the enterotypes in the Estonian Microbiome cohort. *Frontiers in Genetics*, Aug 17; 13:917926, doi: 10.3389/fgene.2022.917926
3. Aasmets, O., Lüll, K., Lang, J. M., Pan, C., Kuusisto, J., Fischer, K., Laakso, M., Lusi, A. J., Org, E. 2021. Machine learning reveals time-varying microbial predictors with complex effects on glucose regulation. *mSystems*, doi: 10.1128/mSystems.01191-20

4. Gilbert, J. A., Azad, M. B., Bäckhed, F., Blaser, M. J., Byndloss, M., Chiu, C. Y., Chu, H., Dugas, L. R., Elinav, E., Gibbons, S. M., Gilbert, K. E., Henn, M. R., Ishaq, S. L., Ley, R. E., Lynch, S. V., Segal, E., Spector, T. D., Strandwitz, P., Suez, J., Tropini, C., Whiteson, K., Knight, R. 2025. Clinical translation of microbiome research. *Nature Medicine*, Apr 11, doi: 10.1038/s41591-025-03615-9. Epub ahead of print. PMID: 40217076
5. Karwowska, Z., Aasmets, O. 2025. Estonian Biobank research team; Kosciolk T, Org E. Effects of data transformation and model selection on feature importance in microbiome classification data. *Microbiome*, 13(1): 2, doi: 10.1186/s40168-024-01996-6
6. Krigul, K. L. 2024. The gut microbiome at the interface of human health and disease. Tartu. (Dissertationes biologicae Universitatis Tartuensis; 439), <https://hdl.handle.net/10062/102892>
7. Krigul, K. L., Aasmets, O., Lüll, K., Org, T., Org, E. 2021. Using fecal immunochemical tubes for the analysis of the gut microbiome has the potential to improve colorectal cancer screening. *Scientific Reports*, 11, 19603, doi: 10.1038/s41598-021-99046-w
8. Krigul, K. L., Feeney, R. H., Wongkuna, S., Aasmets, O., Holmberg, S. M., Andreson, R., Puértolas-Balint, F., Pantiukh, K., Sootak, L., Org, T., Tenson, T., Org E., Schroeder, B. O. 2024. A History of repeated antibiotics usage leads to microbiota-dependent mucus defects. *Gut Microbes*, 16(1), doi: 10.1080/19490976.2024.2377570
9. Kurilshikov, A., Medina-Gomez, C., Bacigalupe, R., Radjabzadeh, D., Wang, J., Demirkan, A., Le Roy, C. I., Raygoza Garay, J. A., Finnicum, C. T., Liu, X., Zhernakova, D. V., Bonder, M. J., Hansen, T. H., Frost, F., Rühlemann, M. C., Turpin, W., Moon, J. Y., Kim, H. N., Lüll, K., Barkan, E., Shah, S. A., Fornage, M., Szopinska-Tokov, J., Wallen, Z. D., Borisevich, D., Agreus, L., Andreasson, A., Bang, C., Bedrani, L., Bell, J. T., Bisgaard, H., Boehnke, M., Boomsma, D. I., Burk, R. D., Claringbould, A., Croitoru, K., Davies, G. E., van Duijn, C. M., Duijts, L., Falony, G., Fu, J., van der Graaf, A., Hansen, T., Homuth, G., Hughes, D. A., Ijzerman, R. G., Jackson, M. A., Jaddoe, V. W. V., Joossens, M., Jørgensen, T., Keszthelyi, D., Knight, R., Laakso, M., Laudes, M., Launer, L. J., Lieb, W., Lusi, A. J., Masclee, A. A. M., Moll, H. A., Mujagic, Z., Qibin, Q., Rothschild, D., Shin, H., Sørensen, S. J., Steves, C. J., Thorsen, J., Timpson, N. J., Tito, R. Y., Vieira-Silva, S., Völker, U., Völzke, H., Vösa, U., Wade, K. H., Walter, S., Watanabe, K., Weiss, S., Weiss, F. U., Weissbrod, O., Westra, H. J., Willemssen, G., Payami, H., Jonkers, D. M. A. E., Arias Vasquez, A., de Geus, E. J. C., Meyer, K. A., Stokholm, J., Segal, E., Org, E., Wijmenga, C., Kim, H. L., Kaplan, R. C., Spector, T. D., Uitterlinden, A. G., Rivadeneira, F., Franke, A., Lerch, M. M., Franke, L., Sanna, S., D'Amato, M., Pedersen, O.

2021. A Large-scale association analyses identify host factors influencing human gut microbiome composition. *Nature Genetics*, 53(2), 156–165, doi: 10.1038/s41588-020-00763-1
10. Laakso, M., Kuusisto, J., Stančáková, A., Kuulasmaa, T., Pajukanta, P., Lusi, A. J., Collins, F. S., Mohlke, K. L., Boehnke, M. 2017. The Metabolic Syndrome in Men study: a resource for studies of metabolic and cardiovascular diseases. *Journal of Lipid Research*, 58(3):481–493, doi: 10.1194/jlr.O072629
 11. Lüll, K., Arffman, R. K., Sola-Leyva, A., Molina, N. M., Aasmets, O., Herzig, K-H., Plaza-Díaz, J., Franks, S., Morin-Papunen, L., Tapanainen, J. S., Salumets, A., Altmäe, S., Piltonen, T. T., Org, E. 2021. The gut microbiome in polycystic ovary syndrome and its associations with metabolic traits. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 106(3), 858–871, doi: 10.1210/clinem/dgaa848
 12. Nishijima, S., Stankevic, E., Aasmets, O., Schmidt, T. S. B., Nagata, N., Keller, M. I., Ferretti, P., Juel, H. B., Fullam, A., Robbani, S. M., Schudoma, C., Hansen, J. K., Holm, L. A., Israelsen, M., Schierwagen, R., Torp, N., Telzerow, A., Hercog, R., Kandels, S., Hazenbrink, D. H. M., Arumugam, M., Bendtsen, F., Brøns, C., Fonvig, C. E., Holm, J-C., Nielsen, T., Pedersen, J. S., Thiele, M. S., Trebicka, J., Org, E., Krag, A., Hansen, T., Kuhn, M., Bork, P., GALAXY and MicroLiver Consortia. 2024. Fecal microbial load is a major determinant of gut microbiome variation and a confounder for disease association. *Cell*, 188(1), 222–236.e15, doi: 10.1016/j.cell.2024.10.022
 13. Pérez-Prieto, I., Vargas, E., Salas-Espejo, E., Lüll, K., Canha-Gouveia, A., Pérez, L. A., Fontes, J., Salumets, A., Andreson, R., Aasmets, O., Estonian Biobank research team, Whiteson, K., Org, E., Altmäe, S. 2024. Gut microbiome in endometriosis: a cohort study on 1000 individuals. *BMC medicine*, 22(1), 294, doi: 10.1186/s12916-024-03503-y
 14. Porcari, S., Mullish, B. H., Asnicar, F., Ng, S. C., Zhao, L., Hansen, R., O’Toole, P. W., Raes, J., Hold, G., Putignani, L., Hvas, C. L., Zeller, G., Koren, O., Tun, H., Valles-Colomer, M., Collado, M. C., Fischer, M., Allegretti, J., Iqbal, T., Chassaing, B., Keller, J., Baunwall, S. M., Abreu, M., Barbara, G., Zhang, F., Ponziani, F. R., Costello, S. P., Paramsothy, S., Kao, D., Kelly, C., Kupcinskas, J., Youngster, I., Franceschi, F., Khanna, S., Vehreschild, M., Link, A., De Maio, F., Pasolli, E., Miguez, A. B., Brigidi, P., Posteraro, B., Scaldaferrri, F., Stojanovic, M. R., Megraud, F., Malfertheiner, P., Masucci, L., Arumugam, M., Kaakoush, N., Segal, E., Bajaj, J., Leong, R., Cryan, J., Weersma, R. K., Knight, R., Guarner, F., Shanahan, F., Cani, P. D., Elinav, E., Sanguinetti, M., de Vos, W. M., El-Omar, E., Dorè, J., Marchesi, J., Tilg, H., Sokol, H., Segata, N., Cammarota, G., Gasbarrini, A., Ianiro, G. 2025. International consensus statement on microbiome testing in clinical practice. *The Lancet Gastroenterology & Hepatology*, 10(2):154–167, doi: 10.1016/S2468-1253(24)00311-X

15. Ruuskanen, M. O., Erawijantari, P. P., Havulinna, A. S., Liu, Y., Méric, G., Tuomilehto, J., Inouye, M., Jousilahti, P., Salomaa, V., Jain, M., Knight, R., Lahti, L., Niiranen, T. J. 2022. Gut Microbiome Composition Is Predictive of Incident Type 2 Diabetes in a Population Cohort of 5,572 Finnish Adults. *Diabetes Care*, 45(4):811–818, doi: 10.2337/dc21-2358
16. Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Laversanne, M., Soerjomataram, I., Jemal, A., Bray, F. 2021. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 71(3):209–249, doi: 10.3322/caac.21660
17. Zeevi, D., Korem, T., Zmora, N., Israeli, D., Rothschild, D., Weinberger, A., Ben-Yacov, O., Lador, D., Avnit-Sagi, T., Lotan-Pompan, M., Suez, J., Mahdi, J. A., Matot, E., Malka, G., Kosower, N., Rein, M., Zilberman-Schapira, G., Dohnalová, L., Pevsner-Fischer, M., Bikovsky, R., Halpern, Z., Elinav, E., Segal, E. 2015. Personalized Nutrition by Prediction of Glycemic Responses. *Cell*, 163(5):1079–1094, doi: 10.1016/j.cell.2015.11.001
18. Zimmermann, M., Patil, K. R., Typas, A., Maier, L. 2021. Towards a mechanistic understanding of reciprocal drug-microbiome interactions. *Molecular Systems Biology*, 17(3):e10116, doi: 10.15252/msb.202010116
19. Taba, N., Fischer, K., Estonian Biobank Research Team, Org, E., Aasmets, O. 2025. A novel framework for assessing causal effect of microbiome on health: long-term antibiotic usage as an instrument. *Gut Microbes*, 17(1):2453616, doi: 10.1080/19490976.2025.2453616
20. White, M. T., Sears, C. L. 2024. The microbial landscape of colorectal cancer. *Nature Reviews Microbiology*, 22(4):240–254, doi: 10.1038/s41579-023-00973-4
21. Xi, Y., Xu, P. 2021. Global colorectal cancer burden in 2020 and projections to 2040. *Translation Oncology*. Oct;14(10):101174, doi: 10.1016/j.tranon.2021.101174



Vasakult: Kreete Lüll, Elin Org, Kertu Liis Krigul ja Oliver Aasmets.
Foto: Arno Mikkor

Elin Org

Sündinud 5. märtsil 1974 Tartus

1992 Tartu Tamme Gümnaasium (hõbemedal)

1992 Tartu Ülikool, bioloogia-geograafia teaduskond, bioloogia eriala

1996 Tartu Ülikool, biomeditsiin (BSc)

2000 Tartu Ülikool, biotehnoloogia ja biomeditsiin (MSc)

2006 Tartu Ülikool, biomeditsiin (PhD)

2011–2015 Los Angeles, California Ülikool (UCLA), järel doktorantuur

Doktoritöö raames uurinud inimese genoomi varieeruvusi ja seost tervisega, töötanud külaliste adlasena Münchenis Helmholtz Zentrumis professor Thomas Metingeri uurimisgrupis. Olnud aastast 2011 Marie Curie IOF stipendiumiga järel doktor UCLA ülikoolis Los Angeleses professor Aldons J. Lusise uurimisgrupis. Pärast järel doktorantuuri pöördus 2015. aastal tagasi Eestisse, kus rajas EMBO installatsioonigrandi ja ETAG-i stardigrandi toetustel Tartu Ülikooli genoomika instituuti uue uurimissuuna, mille fookuses on inimese mikrobioomi ja tervise vaheliste seoste uurimine. Aastatel 2021–2023 töötas Tartu Ülikooli

genoomika-mikrobiomika kaasprofessorina ning alates 2023. aastast on Tartu Ülikooli mikrobiomika professor. On osalenud mitmetes rahvusvahelistes koostööprojektides (Human Microbiome Action, Million Microbiome of Human Project, COST). Valitud naissoost tippteadlaste portaali AcademiaNet liikmeks ning olnud mitmel aastal Clarivate Analyticsi andmetel maailma 1% enim viidatud teadlaste hulgas.

Kreete Lüll

Sündinud 21. oktoobril 1992 Kuressaares

2005 Mustjala Põhikool

2008 Ardu Kool

2011 Noarootsi Gümnaasium (kuldmedal)

2014 Tartu Ülikool, bioloogia (BSc)

2016 Tartu Ülikool, geenitehnoloogia (MSc)

2021 Tartu Ülikool, geenitehnoloogia (PhD)

Alustas tööd Tartu Ülikoolis spetsialistina 2019. aastal. Pärast doktorantuuri lõppu 2022. aastal viibis vanemapuhkusel, mille järel naasis tööle Tartu Ülikooli genoomika instituuti mikrobiomika nooremteaduri kohale. On osalenud rahvusvahelistes konsortsiumide koostööprojektides nii geneetika (GIANT konsortsium) kui mikrobiomi (MiBioGen konsortsium) teemadel. Praegu keskendunud naiste tervise ning mikrobiomi vaheliste seoste uurimisele.

Oliver Aasmets

Sündinud 17. septembril 1993 Kosel

2012 Gustav Adolfi Gümnaasium (kuldmedal)

2015 Tartu Ülikool, matemaatiline statistika (BSc)

2018 Tartu Ülikool, matemaatiline statistika (MSc)

2022 Tartu Ülikool, biomeditsiin (PhD)

Eelnevalt töötanud kindlustuse ning ravimiuuringute valdkonnas. Aastatel 2018–2022 töötas Tartu Ülikoolis spetsialistina ning alates 2023. aastast statistilise metagenoomika teadurina. Oliver Aasmetsa uurimustöö keskendub mikrobiomi

valdkonna andmeanalüüsi metoodikate hindamisele ja väljatöötamisele ning mikrobioomi andmetel põhinevate riskimudelite loomisele ja valideerimisele. Osalenud mitmetes rahvusvaheliste koostööprojektides, mille eesmärk on analüüsistandardite loomine (COST, Human Microbiome Action).

Kertu Liis Krigul

Sündinud 9. detsembril 1992 Tallinnas

2006 Tabasalu Ühisgümnaasium

2009 Rocca al Mare Kool

2012 Vanalinna Hariduskolleeegium

2016 Tartu Ülikool, bioloogia (BSc)

2018 Norra Teadus- ja Tehnoloogiaülikool (MSc)

2024 Tartu Ülikool, geenitehnoloogia (PhD)

2018–2025 töötas Tartu Ülikooli genoomika instituudis mikrobioomika nooremteadurina. Doktoritöö raames uuris ravimite mõju mikrobioomile ning mikrobioomi kasutusvõimalusi jämesoolevähi sõeluuringus. Pälvinud 2017. aastal Vikipeedia aasta teadusfotograafi ja koos kaaslastega 2020. aastal riiklikult tunnustatud teaduse populariseerija tiitli, 2021. aastal Tartu Ülikooli aumärgi, 2023. aastal Eesti Teaduste Akadeemia „Teadus 3 minutiga“ laureaadi tiitli, L'Oréal-UNESCO noorte talentide Baltikumi programmi „Naised teaduses“ auhinna ning aastal 2024 Artur Linnu stipendiumi. Praegu jätkab tööd Tartu Ülikooli genoomika instituudis, kus keskendub jämesoolevähi mikrobioomile ning soolestiku mikrobioomis esinevate antibiootikumide resistentsusgeenide uuringutele.

PIIMALEHMADE PRAAKIMINE JA HUKKUMINE KAASAEGSETES KÕRGETOODANGULISTES PIIMAKARJADES – MULTIDISTSIPLINAARNE UURING

Kerli Mõtus (Eesti Maaülikool)

*Teaduspreemia põllumajandusteaduste ja veterinaaria valdkonnas
tööde tsükli „Piimalehmade praakimine ja hukkumine kaasaegsetes
kõrgetoodangulistes piimakarjades – multidistsiplinaarne uuring“ eest*

Sissejuhatus

Piimatootmine on olnud inimkonna ajaloos keskne põllumajandusala sajandeid. Kuigi kõrget piimatoodangut soosiv aretustöö, tõhusam loomade söötmine, teadlik karja igapäevane juhtimine, tehnoloogiate areng ning uute innovaatiivsete lahenduste rakendamine on võimaldanud piimakarjakasvatuse efektiivsuse kasvu, on sellega kaasnenud ka olulised probleemid, mis on seotud loomade tervise ja üldise heaoluga (Barkema jt, 2015).

Iga produktiivlooma elutee lõpeb kord tema karjast väljaviimise ehk praakimisega. Lehmade eluea pikkus tähistab looma elu kestust alates sünnist kuni praakimiseni. Viimase all mõistetakse karjast väljaminekut mistahes põhjusel – näiteks surma, müügi, tapamajja saatmise või hädatapu tõttu (Fetrow jt, 2006; Schuster jt, 2020). Kuigi lehmade praakimismäär ei ole viimastel aastakümnetel kogu maailmas märkimisväärselt suurenenud, on vabatahtliku ehk majandusliku praakimise osakaal vähenenud ja lehma praagitakse rohkem haiguste ja sigimisprobleemide tõttu (Compton jt, 2017). Samal ajal on koos piimatoodangu kasvuga piimalehmade eluea pikkus oluliselt vähenenud (Dallago jt, 2021). Kui varasematel aegadel oli tavaline, et piimalehmad elasid ja tootsid piima vähemalt kümme aastat või enam, siis tänapäeval on paljude kõrgetoodanguliste lehmade eluiga märkimisväärselt lühem. Keskmiselt lahkuvad lehmad karjast juba pärast kolme kuni viit laktatsiooni (Dallago jt, 2021; De Vries ja Marcondes, 2020). Need trendid on paraku tõestuseks loomade tervise ja heaolu halvenemisele. Lisaks loomade heaolu aspektidele ja majanduslikele probleemidele toob loomsete ressursside ebatõhus kasutamine kaasa ka negatiivseid

keskkonnamõjusid ega vasta ühiskonna ootustele eetilise piimatootmise osas (De Vries ja Marcondes, 2020; Knaus, 2009).

Selleks et mõista lehmade praakimise kompleksset problemaatikat, analüüsi-sime oma teadustöös lehmade karjast väljamineku põhjuseid, erinevate farmi keskkonda ja tootmistingimusi iseloomustavate tegurite ning tegurirühmade mõju lehmade praakimisele ja eluea pikkusele ning farmijuhtide hoiakute ja isikuomaduste mõju. Meie uurimistööde tulemusi integreerides püüab käesolev ülevaade esile tuua kriitilisi valdkondi, kus oleks mõistlik teha parandusi, et suurendada piimatootmise jätkusuutlikkust ning tagada piimaveiste tervis ja heaolu.

Piimalehmade praakimise põhjused

Lehmade praakimise, sealhulgas suremuse põhjuste mõistmine annab kasulikku teavet farmis valitsevate tingimuste ja protsesside mõju kohta loomadele, võimaldades teha karjapõhiseid otsuseid loomade tervise ja heaolu tagamiseks (McConnel ja Garry, 2017). Kuigi lehmade praakimispõhjuste registreerimisel on pikk ajalugu, kasutatakse neid andmeid harva usaldusväärsete allikatena farmerite ja veterinaararstide poolt juhtimisotsuste tegemisel. Esiletoodud põhjusteks on asjaolu, et praakimine toimub sageli mitme (võimalik, et üksteisega seotud) terviseprobleemi tagajärjel (Bascom ja Young, 1998). Valdav osa registreid võimaldavad aga farmeritel registreerida ainult ühe praakimispõhjuse iga karjast väljaläinud lehma kohta ega ole mõeldud hõlmama terviseprobleemide ahelat, mis on seotud looma karjast väljaviimisega. Probleemiks on ka see, et teatud praakimispõhjused on koondatud laiematesse kategooriatesse (nt ainevahetushaigused, jäsemehaigused, traumad jm), mis on liialt üldised, et pakkuda väärtuslikku sisendit probleemide täpseks tuvastamiseks ja sihipäraseks ennetustööks (McConnel ja Garry, 2017).

Meie uuringud põhinevad andmetel, mis on kogutud aastatel 2019–2020 külastatud 120 Eesti suurest piimaveisefarmist (üle 100 lehma). Nendes karjades praagiti aastas keskmiselt 33% lehma, samas kui optimaalseks peetakse 25–27% suurust praakimismäära (Rogers jt, 1988). Praagitud lehmade keskmine eluea pikkus oli ligikaudu viis aastat (Mõtus jt, 2023), mis on võrreldav kõrge piimatoodanguga riikide lehmade elueaga. Siiski varieerus praagitud lehmade eluiga meie uuringukarjades märkimisväärselt – 4 aastast kuni 7,5 aastani. Huvitav ja samal ajal murettekitav oli asjaolu, et vaid väike osa praakimistest toimus farmeri teadliku valiku tulemusena, mis oleks arvestanud loomade piimatoodangut ehk lähtunud majanduslikust kaalutlusest (Mõtus ja Niine, 2022). Arvestades suhteliselt kõrgeid karjataseme praakimismäärasid ning tõsiasi, et enamik praakimistest on tingitud haigustest või muudest probleemidest, võib eeldada, et farmeritel on piiratud võimalused selektiivseks, toodangupõhiseks praakimiseks. Viimane peaks aga moodustama suurema osa praakimisotsustest, kuna see võimaldaks tõsta karja tootmispotentsiaali ja majanduslikku väärtust. Sunnitud praakimise suur osakaal Eesti piimafarmides on murettekitav, viidates lehmade haprale

tervisele ja heaolu probleemidele, mis omakorda pärsvivad piimakarjakasvatuse majanduslikku tasuvust (De Vries, 2017; Rogers jt, 1988; Weigel jt, 2003).

Oma uuringus püüdsime välja selgitada, kas farmides esineb kindlaid haiguste ja probleemide mustreid, mis viivad lehmade praakimiseni. Selleks analüüsisime praagitud lehmade terviseandmeid, et tuvastada iga looma puhul nn päästikprobleem ning sellele järgnev haiguste ja probleemide ahel, mis viis lõpuks looma karjast lahkumiseni. Analüüs näitas, et praagitud lehmadel esines väga erinevaid terviseprobleemide kombinatsioone, mistõttu ei olnud võimalik tuvastada isegi ühe farmi lõikes üht kindlat domineerivat probleemi, mille sihipärane ennetamine võimaldaks oluliselt vähendada soovimatute praakimiste osakaalu (Mõtus ja Niine, 2022).

Farmis surnud lehmade haiguslugude analüüs näitas, et enamiku surmapõhjuste juured peituvad poegimisjärgsel perioodil ilmnenud terviseprobleemides. Kõige sagedasemaks surmapõhjuseks olid jäsmevigastused ja muud traumad. Paljud lehmad said vigastada libedatel kõnniteedel, jäid kinni asemepiiretesse või kukkusid. Poegimisjärgsel perioodil esines sageli ka sünnitusest tingitud närvikahjustusi, mis põhjustasid liikumisvõime kaotuse ning tingisid looma eutanaasia. Olulisteks surmapõhjusteks olid ka ainevahetushaigused, näiteks poegimishalvatus ja maksakahjustused. Lisaks esines märkimisväärselt seedetrakti haigusi, sealhulgas libediku paigaltnihkumist ja soolepõletikke. Kõigi nende haiguste tekkerisk on suurim just poegimisjärgsel perioodil, mil lehma ainevahetuskooormus suureneb järsult ja organism on muutustega kohanemisel haavatav (Jorritsma jt, 2003). Mõned lehmad surid ka traumaatilise retikuliidi tagajärjel – haigusseisundi tõttu, mille põhjustavad sööda sisse sattunud võõrkehad, mis läbibistavad võrkmiku seina ja kahjustavad siseorganeid. Mõnel juhul jäi surmapõhjus tuvastamata kas seetõttu, et looma ei lahatud, või seetõttu, et lahkamine ei andnud üheselt selget diagnoosi. Huvitaval kombel selgus, et ligikaudu pooled farmis surnud lehmadest olid eutaneeritud. See viitab sellele, et farmides tehakse rasketes ja halva prognoosiga terviseolukordades sageli heaolu kaalutlustel otsus loom hukata. Lahkamise viidi sagedamini läbi nende loomade puhul, kes surid ootamatult või ilma nähtava põhjuseta, mis omakorda näitab farmipidajate huvi saada paremat ülevaadet karjas esinevatest terviseprobleemidest. Surmapõhjuste selgitamist nähakse võimalusena koguda väärtuslikku teavet karja tervise parandamiseks ja juhtimisotsuste toetamiseks (Mõtus ja Niine, 2022).

Tapamajja saadetud lehmade kõige sagedasemaks praakimispõhjuseks olid erinevad viljatusega seotud probleemid. Enamasti oli ainus praakimispõhjus ahtrus³⁹ – lehm ei jäänud tiineks hoolimata korduvatest seemendustest⁴⁰ või ei olnud teda võimalik seemendada innatunnuste⁴¹ puudumise tõttu. Mõnel juhul jäi viljatuse täpne põhjus teadmata, kuid sageli oli see seotud varem esinenud günekoloogi-

³⁹ Tiinuse puudumine sigimiskõlblikul emasloomal. Allikas: Eesti Keele Instituudi sõnaveeb.

⁴⁰ Isaslooma seemnerakkude juhtimine emaslooma suguelunditesse (ja emaslooma tiinestamine). Allikas: Eesti Keele Instituudi sõnaveeb.

⁴¹ Innaajal tekkinud muutused emaslooma suguelundites ja käitumises. Allikas: Eesti Keele Instituudi sõnaveeb.

liste haigustega, nagu emakapõletik, või varasema abordiga⁴². Viimati nimetatud juhtudel eelistasid farmerid sellised lehmad karjast praakida, kuna nende uuesti tiinestumine oli ebatõenäoline või ei oleks loomad enam saavutanud varasemat toodangupotentsiaali.

Teiseks väga levinud praakimispõhjuste rühmaks olid erinevad jäsemehaigused, mis väljendusid lonkamises. Kui lehm ei suuda valu tõttu normaalselt liikuda, väheneb tema söömus, piimatoodang ja tiinestumisvõime, mistõttu muutub looma pidamine majanduslikult ebamõistlikuks. Uuringust ilmnes, et lonkamise korral ei olnud sageli täpset jäsemehaiguse diagnoosi registreeritud. Samas oli märkimisväärse osa juhtude puhul haigusdiagnoos siiski terviseandmete registris dokumenteeritud. Praakimispõhjuste registreerimisel ei ole aga võimalik jäsemehaiguse täpset diagnoosi eraldi märkida, mis toob kaasa olulise infokao. Selle tulemusel ei ole kogutud andmed lõppkasutajate – näiteks loomapidajate või nõustajate – jaoks piisavalt detailsed, et toetada täpseid otsuseid või sihipärast ennetustööd.

Kolmanda olulise lehmade tapamajja saatmise põhjuste grupi moodustasid erinevad udarahaigused, eeskätt krooniline udarapõletik ehk mastiit. Kui lehma piima kvaliteet halvenes püsivalt kõrge somaatiliste rakkude arvu tõttu või kui põletik ei allunud ravile, langetasid farmerid otsuse loom karjast eemaldada. See toimus sagedamini juhtudel, kui põletik haaras mitu udaraveerandit ning piimatoodang oli juba oluliselt langenud (Mõtus ja Niine, 2022).

Uuringust ilmnes, et farmerite poolt registritesse kantud praakimispõhjused ei langenud sageli kokku terviseandmete põhjal tuvastatud tegelike praakimispõhjustega. Sageli jäi ametlikult märgitud väljamineku põhjus varjutama seda terviseprobleemi, mis tegelikult käivitas praakimise protsessi. Arvestades, et päästikprobleemi ennetamine võib aidata vältida praakimist, on selle täpne tuvastamine äärmiselt väärtuslik. Selle eesmärgi toetamiseks võiks välja töötada rakenduse, mis juhendab loomapidajaid registreerima kõiki haigusi ja probleeme võimalikult detailselt. See võimaldaks kogutud andmeid automaatselt analüüsida ja tuvastada praakimise päästikprobleemid. Usaldusväärne ja detailne andmekogumine ning nende tõlgendamine on oluline eeldus teadlike karjapõhiste juhtimisotsuste tegemisel (Mõtus ja Niine, 2022).

Nakkushaiguste mõju piimalehmade praakimisele

Eesti piimakarjad on teadaolevalt endeemiliselt nakatunud mitmete laialdaselt levinud veiste patogeenidega, sealhulgas veiste herpesviiruse 1 (BHV-1), veiste viirusdiarröa viiruse (BVDV), veiste respiratoorsüntsütsiaalviiruse (BRSV), *Mycoplasma bovis* (*M. bovis*) ja *Salmonella enterica* serotüübi Dublin (*S. Dublin*) põhjustatud nakkustega. Samuti on Eestis aeg-ajalt tuvastatud veiseid, kes on

⁴² Raseduse või tiinuse katkemine või katkestamine enne loote ellujäämisvõime saavutamist. Allikas: Eesti Keele Instituudi sõnaveeb.

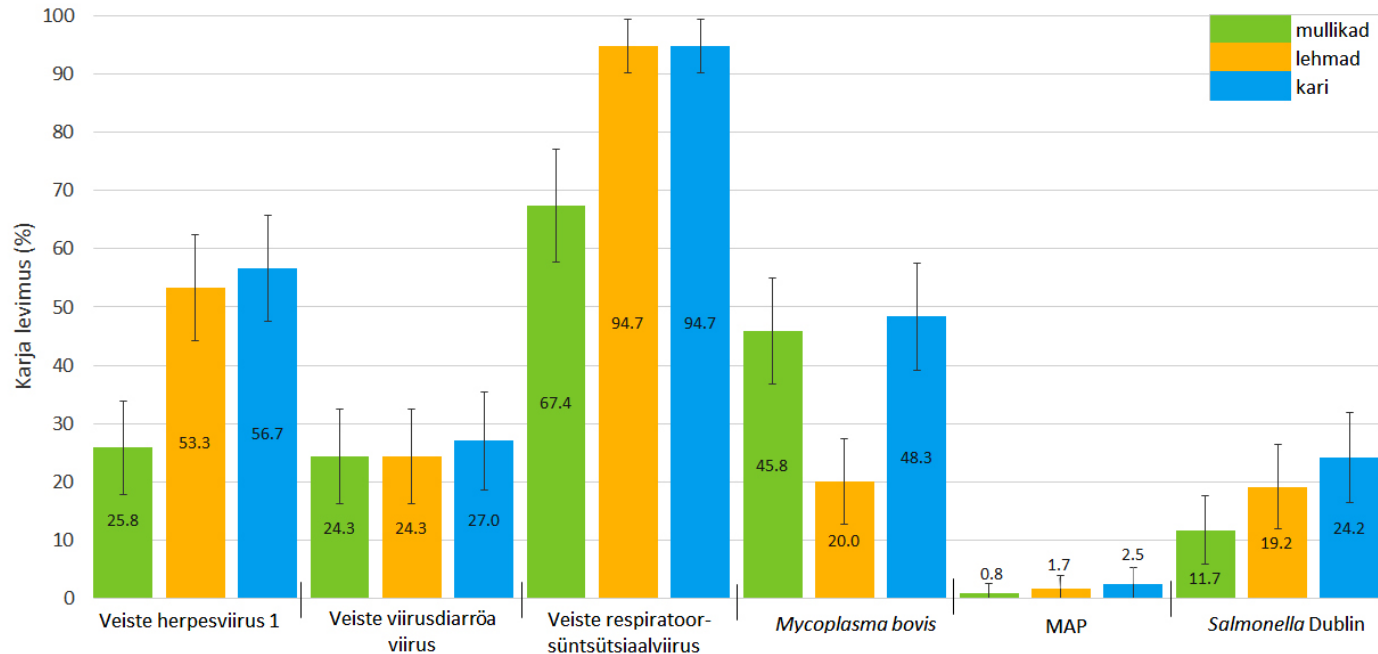
nakatunud *Mycobacterium avium*'i alamliigi *paratuberculosis*'e (MAP) põhjustatud infektsiooniga (Raaperi jt, 2012; Riigi Laboriuuringute ja Riskihindamise Keskus, 2023; Timonen jt, 2020). On teada, et need nakkused põhjustavad veistel hingamisteede ja seedetrakti põletikke, vähendavad viljakust ning langetavad piimatoodangut (Holschbach ja Peek, 2018; Lanyon jt, 2014; Tiwari jt, 2007). Seni puudusid uuringud, mis analüüsiksid seoseid mitme samaaegselt esineva endeemilise nakkushaiguse (koos)esinemise ning lehmade praakimismäära ja eluea pikkuse vahel. Selline info aitaks paremini mõista nende mõju loomade tervisele, heaolule ja farmi üldisele tootlikkusele. Lisaks aitaks see teadmine tõsta teatud nakkushaigused riikliku tähelepanu alla ning võiks olla aluseks tõrjeprogrammide algatamisele ja bioohutusmeetmete sihipärasele rakendamisele.

Tulemused näitasid, et kõige enam oli uuritud nakkustest levinud BRSV, mida esines lausa 94,7% uuritud farmides. Samuti olid kõrge levimusega BHV-1 (56,7%) ja *Mycoplasma bovis* (48,3%). Ligikaudu veerand uuritud karju olid nakatunud *S. Dublini* (24,2%) ja BVDV (27,0%) infektsioonidega. MAP-infektsioone, mis põhjustab veistel kroonilist ja ravimatut kõhulahtisust, kurnatust ning toodangu langust (paratuberkuloos), esines oluliselt harvemini – seda tuvastati vaid 2,5% farmidest (joonis 1).

Uuritud infektsioonhaiguste ja lehmade eluiga iseloomustavate parameetrite vahel ilmnnes mitmeid statistiliselt olulisi seoseid. Näiteks oli BRSV-positiivsetes farmides lehmade keskmine eluiga madalam ning praakimiskordaja kõrgem. Samuti oli BVDV-positiivsetes farmides praakimismäär kõrgem kui nakkusvabades karjades, mis võib olla seotud viiruse mõjuga sigivusele ja immuunsüsteemile – viimane suurendab põletikuliste haiguste riski (Lanyon jt, 2014). Positiivse tendentsina ilmnnes, et BVDV-vastane vaktsineerimine aitas vähendada lehmade praakimissagedust. MAP-i esinemise korral oli lehmade eluiga mõnevõrra lühem, mis võib viidata haiguse varjatud kulgemisele ja selle mõjude avaldumisele täiskasvanueas.

Uuringus ilmnunud haiguspõhised mustrid annavad väärtusliku ülevaate patogeene levikust ja käitumisest suurtes piimakarjades ning pakuvad olulist sisendit haiguste ennetus- ja tõrjeprogrammide väljatöötamiseks. Arvestades BVDV, BRSV ja MAP-i negatiivset mõju lehmade elueale, karjade praakimismäärale ning viimase puhul ka potentsiaalset zoonooset⁴³ ohtu, oleks põhjendatud nende nakkuste sihipärase tõrje ja likvideerimise soodustamine riiklikul tasandil.

⁴³ Zoonoos on loomade ja inimeste nakkushaigus, mida levitavad loomad. Allikas: Eesti Keele Instituudi sõnaveeb.



Joonis 1. Kuue uuritud haigustekitaja vastaste antikehade levimus 120 Eesti piimaveisefarmis: kümne 8–16 kuu vanuse mullika individuaalproovides, lüpsikarja koondpiimaproovides ning mõlemas proovitüübis (karjatasandil).

MAP = *Mycobacterium avium* spp. *paratuberculosis*.

Piimalehmade karjaspüsivuse riskitegurid ja -tegurirühmad

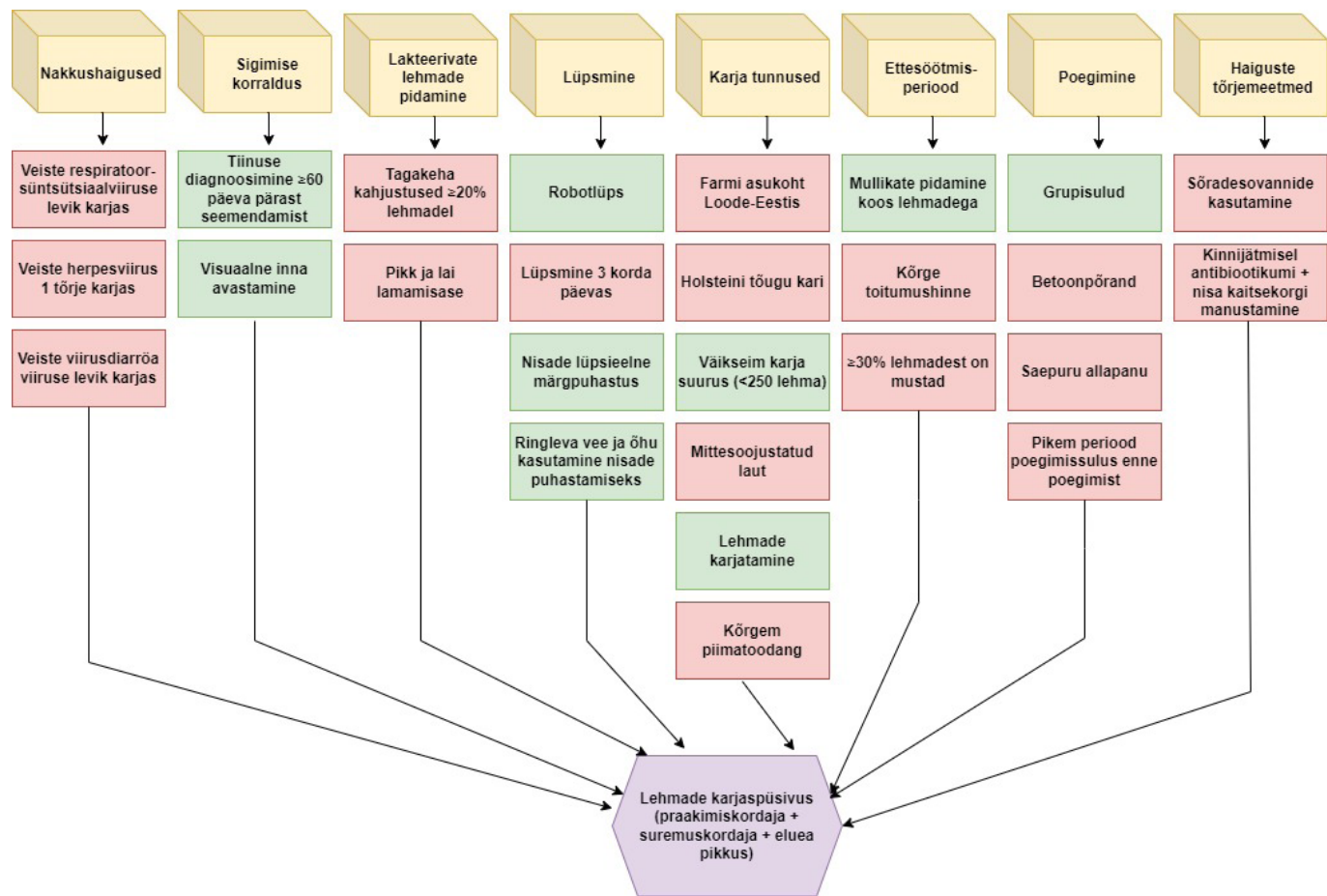
Varasemate uuringute põhjal on teada, et piimalehmade praakimis- ja suremusmäärased ning eluea pikkust mõjutavad mitmed karjataseme riskitegurid, sealhulgas farmitingimused ja keskkonnategurid. Siiski on seni puudunud uurinud, mis hindaksid terviklikult erinevate riskitegurite rühmade üldist mõju ning panust lehmade karjaspüsivust iseloomustavatele näitajatele. Selline teadmine oleks väärtuslik sisend karjatervisealasesse töösse, aidates nii loomapidajatel kui ka veterinaararstidel suunata tähelepanu just neile valdkondadele, mis avaldavad loomade tervisele ja farmi tootlikkusele suurimat mõju.

Meie uuring annab põhjaliku ülevaate teguritest, mis mõjutavad lehmade eluiga, praakimismäära ja suremust suurtes Eesti piimafarmides. Mõtuse jt (2023) uuring on mitmes mõttes unikaalne, eeskätt kasutatud meetodika ja lähenemisi viisi poolest. Uuringu peamiseks eripäraks on innovaatilise multiplokk-osalise vähimruutude (*multiblock partial least squares* – mbPLS) analüüsi rakendamine, mis võimaldas käsitleda lehmade karjaspüsivust mõjutavaid tegureid komplekselt ja mitmetasandiliselt. Analüüs põhines 120 piimakarjast kogutud andmestikul, kus 172 muutujat jaotati 14 temaatilisse plokki, et selgitada välja riskitegurid ja tegurirühmad, millel on suurim mõju lehmade karjaspüsivusele. Kasutatud statistiline meetod võimaldas ühtses analüüsiraamistikus ühendada kolm lehmade karjaspüsivust iseloomustavat näitajat – praakimismäära, suremusmäära ja eluea pikkuse –, et hinnata riskitegurite mõju sellele komplekssele probleemile tervikuna.

Analüüsi tulemused näitasid, et lehmade karjaspüsivust mõjutasid enim järgmised riskitegurite rühmad: karjas levivad nakkushaigused, sigivuse juhtimise praktikad, lüpsilehmade pidamistingimused ja -praktikad ning lehmade poegimiseelne ja -aegne hooldus (joonis 2). Parandused nendes valdkondades võivad märkimisväärselt pikendada lehmade karjaspüsivust, aidates seeläbi parandada farmide tootlikkust, loomade heaolu ja majanduslikku tasuvust.

Kõigist testitud teguritest osutus karjaspüsivuse seisukohalt kõige mõjukamaks lehmade tagakeha- ja udarapiirkonna nahakahjustuste esinemine enamal kui 20% lüpsikarjast. See viitab sellele, et lamamisaseme mõõtmed, kattematerjali kvaliteet ja allapanu tüüp – mis on teadaolevalt olulised jäsemehaiguste riskitegurid (Weary ja Taszkun, 2000) – omavad ulatuslikku ja süsteemset mõju loomade tervisele ning karjaspüsivusele.

Lehmade sigivuse juhtimisega seotud praktikad kujunesid samuti üheks võtmevaldkonnaks, mis mõjutab oluliselt loomade karjaspüsivust. Farmides, kus tiinuse kontroll algas hiljem (alates 60. seemendamisjärgsest päevast), täheldati madalamat suremus- ja praakimismäära. Tõenäoliselt ei ole see lähenemine otsene karjaspüsivuse parandamise põhjus, vaid pigem viitab sellele, et nendes karjades oli lehmade sigivus ja üldine tervislik seisund parem. Samuti selgus, et ainult visuaalse innavaatlusmeetodi kasutamine oli seotud madalama praakimismääraga. See viitab võimalusele, et tihedam inimesepoolne jälgimine võimaldab



Joonis 2. Lehmade karjaspüvisust mõjutavad peamised riskitegurid ja nende rühmad. Punase värviga on tähistatud riskitegurid, rohelisega kaitsva mõjuga faktorid.

varasemat terviseprobleemide avastamist ja kiiremaks sekkumiseks vajaliku teabe kogumist. See omakorda tõstatab küsimuse, kas farmides laialdaselt kasutatavad tehnoloogilised lahendused, näiteks aktiivsuseandurid, on piisavad inna ja terviseprobleemide tuvastamiseks või oleks otstarbekam neid kombineerida inimesepoolsete jälgimismeetoditega. Selline integreeritud lähenemine võiks toetada täpsemat sigivuse hindamist ja paremat loomade tervise jälgimist.

Robotlüpsisüsteemide kasutamine oli seotud parema lehmade karjaspüsivusega. See tulemus on kooskõlas varasemate uuringutega (Alvåsen jt, 2012; Bugueiro jt, 2019), mis viitavad, et robotfarmidele omased paindlikumad ja individuaalsemad lüpsiajad, farmisese liikluse vähenemine, lühem ootamisaeg lüpsijärjekorras ning täppisõõtmine – kus sööda kogus vastab täpselt iga looma vajadustele – aitavad paremini rahuldada kõrge toodanguga piimalehmade füsioloogilisi ja käitumuslikke vajadusi. See omakorda võib toetada nende paremat tervist, heaolu ning pikemat karjaspüsivust. Lehmade lüpsimine kolm korda päevas oli seotud lühema eluea ja kõrgema praakimismääraga, võrreldes kahekordse lüpsiga. See viitab sellele, et intensiivsem piimatootmine võib suurendada lehmade ainevahetuslikku koormust ja vähendada nende vastupidavust. Tähtsaks osutus ka nisade puhastamise viis: vesi-õhkpuhastus, mida kasutatakse sageli robotlüpsisüsteemides, seostus madalama lehmade suremusemääraga, samas kui kuivpuhastus või nisade puhastamata jätmine suurendas seda. See näitab, et nisade puhastamisel on oluline roll mitte üksnes mastiidi ennetamises, vaid ka lehmade üldise tervise ja eluea säilitamisel.

Pidamistingimuste osas ilmnes, et lehmade eluiga sõltub suurel määral nii lauda tüübist kui ka poegimisjärgsest hooldusest. Poolisolatsiooniga lautades oli lehmade suremus madalam kui täielikult soojustamata lautades, mis viitab sellele, et stabiilsem sisekliima toetab loomade tervist ja vastupanuvõimet. Poegimistingimused mängisid samuti olulist rolli: sügavallapanuga grupibokside kasutamine parandas lehmade karjaspüsivust, samas kui betoonpõrandaga poegimiskohtade kasutamine seostus kõrgema suremusemääraga. Tulemused kinnitavad, et looduslähedasemad ja mugavust arvestavad poegimistingimused, kus lehmadel on võimalus vabalt liikuda ja loomulikku käitumist väljendada, aitavad vähendada sünnitusjärgsete tüsistuste riski ning toetavad kiiremat taastumist.

Kokkuvõttes rõhutab käesolev uuring, et lehmade eluea pikendamiseks ja suremuse vähendamiseks on võtmetähtsusega nakkushaiguste sihipärane tõrje, tõhus sigivuse juhtimine ning loomadele sobivate pidamistingimuste tagamine. Uuring toob esile tervikliku farmihalduse olulisuse – üksikute meetmete, näiteks vaid tehnoloogiliste lahenduste rakendamine sigivuse jälgimiseks või ühe nakkushaiguse tõrjumine ilma laiemate hügieeni- ja bioohutusmeetmeteta, ei pruugi anda soovitud tulemusi. Lehmade lühenev eluiga on kompleksne probleem, mida mõjutab hulk omavahel seotud tegureid alates pidamiskeskonnast ja juhtimispraktikatest kuni vaktsineerimise ja terviseandmete kasutamiseni. See rõhutab vajadust süsteemse, tõendus põhise ja andmetel põhineva juhtimisviisi järele, mis aitab parandada nii loomade heaolu kui ka farmide majanduslikku jätkusuutlikkust.

Farmijuhatajad ja lehmade praakimine

Eestis peetakse enamikku piimalehmadest suurtes tootmisettevõtetes, mida igapäevaselt juhivad palgatud farmijuhid, mitte ettevõtete omanikud. Just farmijuhid langetavad igapäevased juhtimisotsused, mis mõjutavad otseselt ja kaudselt karja tervist, tootlikkust ning loomade heaolu. Seni on lehmade praakimist ja eluea pikkust käsitlevad uuringud keskendunud peamiselt bioloogilistele ja farmikeskkonda puudutavatele teguritele. Vähem on aga uuritud, kuidas farmijuhtide isikupära, hoiakud, väärtused ja varasemad kogemused kujundavad nende otsuseid – eriti seoses praakimise ja lehmade pikaalisuse tagamisega.

Varasemad uuringud on näidanud, et näiteks lüpsilehmade udarapõletike esinemissagedus ja vasikate suremus võivad olla seotud farmerite hoiakute, väärtuste ja suhtumisega (DeLong jt, 2017; Kielland jt, 2010; Santman-Berends jt, 2014). Siiski on enamik varasemaid uuringuid keskendunud väiksematele farmidele, mida iga päev juhivad omanikud ise. Suurtes tootmisfarmides täidavad aga igapäevase juhtimise rolli palgatud farmijuhid. Kuigi neil ei pruugi olla tihedat igapäevast kontakti loomadega, mõjutavad nende otsused farmi tootmiseesmärkide, personali, söötmise, aretuse ja tervisejuhtimise osas loomade heaolu ja karjaspüsivust otseselt. Seetõttu on oluline uurida, kas ja kuidas farmijuhatajate hoiakud, väärtused ning isiksuseomadused on seotud lehmade praakimise ja eluea näitajatega. Selline teadmine võimaldab hinnata, kas senised juhtimispraktikad vajavad kohandamist ning millist rolli mängivad individuaalsed inimesest tulenevad faktorid loomade heaolu ja farmi tootmistulemuste kujundamisel. Inimkeskne lähenemine loob aluse täpsemate nõustamis- ja tugistrateegiate väljatöötamiseks, mis lisaks objektiivsetele tootmisandmetele arvestavad ka farmijuhtide käitumismustreid ja juhtimisstiili.

Rilanto jt (2022) uuring tõi esile, et farmijuhtide hoiakutel ja juhtimisstiilil on oluline mõju lehmade elueale ja praakimismääradele Eesti suurtes piimafarmides. Üheks olulisemaks järelduseks oli, et paljud farmijuhid ei olnud rahul oma karjade praakimismäärade ega lehmade eluea pikkusega. Eriti nendes farmides, kus lehma praagiti rohkem ja nooremas eas, tunnetasid juhid probleemina asjaolu, et noored loomad lahkuvad karjast enneaegselt. Samuti ei oldud rahul oma rolliga praakimise korraldamisel. Märkimisväärne oli, et need farmijuhid väärtustasid sageli kõrgemat piimatoodangut rohkem kui lehmade pikaalisust. Madalaima praakimismääraga farmide juhid ei seadnud aga esikohale kuulumist kõrgeima toodangutasemega farmide hulka ning nende juhtimisstiil oli vähem tulemuslikkusele keskendunud. See viitab võimalusele, et kõrge piimatoodangu saavutamisele suunatud juhtimisstiil võib kaasa tuua kõrgema praakimise ja sellega seotud majanduslikud kulud, mida juhid alati ei taju. Nende trendide üks võimalikke põhjuseid võib olla piiratud teadlikkus intensiivse piimatootmise mõjust lehmade heaolule ja vastupidavusele. Lisaks soosib Eestis kehtiv piima hinnastamise süsteem pigem tootmismahtu, mis on juurdunud ka farmijuhtide mõtteviisi ja prioriteetidesse. Avalikus meediakuvandis seatakse sageli esikohale kõrge toodang, samal ajal kui lehmade karjaspüsivus jääb tagaplaanile. Selgelt sõnastatud aretus- ja tootmiseesmärgid, mille keskmes oleks ka lehmade

karjaspüsivuse majanduslik väärtus, võiksid aidata juhtidel seda näitajat rohkem teadvustada ja hinnata (Rushen ja de Passillé, 2013).

Farmijuhtide isiksuseomaduste analüüs näitas, et ekstravertsus ja emotsionaalne stabiilsus olid seotud kõrgema lehmade praakimismääraga. See tähendab, et juhid, kes olid avatumad suhtlemisele ning tundsid end otsusekindlamalt, võisid olla altimad lehma kiiremini välja vahetama. Tulemused viitavad võimalikule psühholoogilisele komponendile farmijuhtide otsustusprotsessis: juhid, kes tunnevad end kindlalt ja kogevad vähem stressi, võivad olla enam suunatud tootlikkuse kiirele optimeerimisele, nähes praakimises strateegilist juhtimisvõtet farmi põhieesmärkide saavutamiseks. Selline lähenemine võib vältida suuremat valmisolekut teha ratsionaalseid, kuid loomade karjaspüsivust vähendavaid otsuseid, lähtudes eelkõige lühiajalistest majanduslikest kaalutlustest (DeNeve ja Cooper, 1998; Robbins jt, 2010).

Huvitava leiuna ilmnes, et farmides, kus juhid olid uuendusmeelsed ja avatud uute tehnoloogiate kasutuselevõtule, oli lehmade keskmine eluiga lühem. Esmalt pilgul võib see tunduda vastuoluline, kuna innovaatilised farmipraktikad võiksid eelduslikult toetada loomade paremat tervist ja pikaeaalisust. Tõenäolisemalt peegeldab see aga tänapäevaste, tehnoloogiliselt arenenud farmide toimimismudelit, kus fookus on kõrgel toodangul ning kiirel karja uuendamisel. Selline lähenemine võib küll tagada lühiajalises vaates kõrgema piimatoodangu, ent viib kiirema lehmade käibeni ning lühema karjaspüsimiseni.

Kokkuvõte

Eesti suurtes tootmisfarmides on piimalehmade eluiga lühike ning enamik praakimistest toimub pigem sundpõhjustel – näiteks tervise- ja sigimisprobleemide tõttu –, mitte vabatahtlikel, tootlikkusel põhinevatel kaalutlustel. Käesolev uuring kinnitas, et farmijuhtide hoiakutel ja juhtimisstiilil on oluline mõju nii lehmade elueale kui ka praakimiskriteeriumide kujunemisele. Kuigi teoreetiliselt peetakse lehmade suuremat karjaspüsivust majanduslikult kasumlikuks, ei ole see praktikas alati farmijuhtide prioriteet. Paljud juhid keskenduvad ennekõike kõrge piimatoodangu saavutamisele ega pruugi teadvustada, et lehmade lühike eluiga ja kõrge praakimismäär võivad kaasa tuua märkimisväärsed kulused.

Tulemused viitavad, et farmijuhtide teadlikkuse suurendamine võiks aidata parandada karja pikaeaalisust ja vähendada majanduslikke kaotusi. Näiteks võiks farmidele pakkuda paremaid analüüsitööriistu, mis võimaldavad visuaalselt ja arusaadavalt seostada looma eluiga, tootlikkust ja praakimiskulusid. Samuti on oluline rõhutada, et pikem eluiga ei tähenda tingimata madalamat piimatoodangut, vaid võib vastupidi toetada stabiilsemat ja jätkusuutlikumat tootmist.

Piimalehmade varajane praakimine on tänapäevase intensiivse piimatootmise kontekstis mitmetahuline probleem, mille lahendamiseks on vaja terviklikku ja

süsteemset lähenemist. See hõlmab tõhusamat tervisejälgimist, nakkushaiguste ennetust, sigimisvõimekuse parandamist ning juhtimispraktikate teadlikku kujundamist. Lisaks võivad olulist rolli mängida välised motivaatorid, nagu sektorisisesed kokkulepped tootmiseesmärkides, karjaspüsivuse suurem väärtustamine ning aretusstrateegiad, mis lisaks toodangu suurendamisele keskenduvad uue põlvkonna tervise ja vastupidavuse parandamisele. Taolised tegurid võivad aidata muuta farmide juhtimisstrateegiaid – just mõtteviisi muutus on sageli eeltingimus sisuliste ja kestvate muudatuste elluviimiseks. Kui piimatootjad suudavad tagada oma loomade parema tervise ja heaolu, on võimalik pikendada nende eluiga, parandada farmi majanduslikku jätkusuutlikkust ning vähendada piimatootmise keskkonnajalajälge.

Tänuavaldused

Olen südamest tänulik oma uurimisrühma liikmetele, eeskätt doktorantidele Dagni-Alice Viidule ja Triin Rilantole, kelle energia ja pühendumine on olnud selle projekti kandvaks jõuks. Eriline tänu kuulub minu headele õpetajatele, professor Arvo Viltropile ja professor Toomas Orrole. Teie järjepidev toetus ja valmisolek minuga alati kaasa mõelda on andnud julgust teadusmaastikul edasi liikuda ning uusi algatusi ette võtta. Suur tänu, Tanel Kaart, oma statistilise taiplikkuse ja teadmiste jagamise eest! Aitäh EMÜ ühendlabori meeskonnale abi eest! Tänan Põllumajanduse Registrite ja Informatsiooni Ametit ning Eesti Põllumajandusloomade Jõudluskontrolli AS-i väärtuslike andmete eest. Südamlik tänuavaldus kuulub uuringutes osalenud farmide kollektiividele ja headele kolleegidele, kes andsid projekti jaoks kõige olulisema – kuldaväärt andmed. Sügav tänu kõigile kaasautoritele! Uuringuid toetas Eesti Teadusagentuuri personaalne uurimistoetus PSG268.

VIITED

Alvåsen, K., Jansson Mörk, M., Hallén Sandgren, C., Thomsen, P. T., Emanuelson, U. 2012. Herd-level risk factors associated with cow mortality in Swedish dairy herds. *Journal of Dairy Science*, 95(8), 4352–4362, <https://doi.org/10.3168/jds.2011-5085>

Barkema, H. W., von Keyserlingk, M. A. G., Kastelic, J. P., Lam, T. J. G. M., Luby, C., Roy, J. P., LeBlanc, S. J., Keefe, G. P., Kelton, D. F. 2015. Invited review: Changes in the dairy industry affecting dairy cattle health and welfare. *Journal of Dairy Science*, 98(11), 7426–7445, <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9377>

Bascom, S. S., Young, A. J. 1998. A summary of the reasons why farmers cull cows. *Journal of Dairy Science*, 81(8), 2299–2305, [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(98\)75810-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(98)75810-2)

Bugueiro, A., Fouz, R., Camino, F., Yus, E., Diéguez, F. J. 2019. Robot milking and relationship with culling rate in dairy cows. *Animal*, 13(6), 1304–1310, <https://doi.org/10.1017/S1751731118002896>

Compton, C. W. R., Heuer, C., Thomsen, P. T., Carpenter, T. E., Phyn, C. V. C., McDougall, S. 2017. Invited review: A systematic literature review and meta-analysis of mortality and culling in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 100(1), 1–16, <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11302>

Dallago, G. M., Wade, K. M., Cue, R. I., McClure, J. T., Lacroix, R., Pellerin, D., Vasseur, E. 2021. Keeping dairy cows for longer: A critical literature review on dairy cow longevity in high milk-producing countries. *Animals*, 11(10), 2958, <https://doi.org/10.3390/ani11030808>

DeLong, K. L., Lambert, D. M., Schexnayder, S., Krawczel, P., Fly, M., Garkovich, L., Oliver, S. 2017. Farm business and operator variables associated with bulk tank somatic cell count from dairy herds in the southeastern United States. *Journal of Dairy Science*, 100(11), 9298–9310, <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12767>

DeNeve, K. M., Cooper, H. 1998. The happy personality: A meta-analysis of 137 personality traits and subjective well-being. *Psychological Bulletin*, 124(2), 197–229, doi: 10.1037/0033-2909.124.2.197

De Vries, A. 2017. Economic trade-offs between genetic improvement and longevity in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 100(5), 4184–4192, <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11847>

De Vries, A., Marcondes, M. I. 2020. Review: Overview of factors affecting productive lifespan of dairy cows, *Animal*, 14(S1), S155–S164, <https://doi.org/10.1017/S1751731119003264>

Fetrow, J., Nordlund, K. V., Norman, H. D. 2006. Invited review: Culling: nomenclature, definitions, and recommendations. *Journal of Dairy Science*, 89(6), 1896–1905, [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72257-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72257-3)

Holschbach, C. L., Peek, S. F. 2018. Salmonella in Dairy Cattle. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 34(1), 133-154, <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2017.10.005>

Jorritsma, R., Wensing, T., Kruip, T. A. M., Vos, P. L. A. M., Noordhuizen, J. P. T. M. 2003. Metabolic changes in early lactation and impaired reproductive performance in dairy cows. *Veterinary Research*, 34(1), 11–26, doi: 10.1051/vetres:2002054

Kielland, C., Skjerve, E., Østerås, O., Zanella, A. J. 2010. Dairy farmer attitudes and empathy toward animals are associated with animal welfare indicators. *Journal of Dairy Science*, 93(7), 2998–3006, <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2899>

Knaus, W. 2009. Dairy cows trapped between performance demands and adaptability. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(7), 1107–1114, <https://doi.org/10.1002/jsfa.3657>

Lanyon, S. R., Hill, F. I., Reichel, M. P., Brownlie, J. 2014. Bovine viral diarrhoea: Pathogenesis and diagnosis. *Veterinary Journal*, 199(2), 201–209, <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2013.07.024>

McConnel, C., Garry, F. 2017. Dairy cow mortality data management: the dairy certificate of death. *The Bovine Practitioner*, 51(1), 64–72, <https://doi.org/10.21423/bovine-vol51no1p64-72>

Mõtus, K., Niine, T. 2022. Cow culling patterns in eight commercial Estonian dairy herds and farmers' behaviour in reporting culling reasons. *Research in Veterinary Science*, 152, 190–206, <https://doi.org/10.1016/J.RVSC.2022.08.011>

Mõtus, K., Viidu, D-A., Rilanto, T., Niine, T., Orro, T., Viltrop, A., Bougeard, S. 2023. Application of multiblock analysis to identify key areas and risk factors for dairy cow persistence. *Preventive Veterinary Medicine*, 222, 106081, <https://doi.org/10.1016/J.PREVETMED.2023.106081>

Raaperi, K., Bougeard, S., Aleksejev, A., Orro, T., Viltrop, A. 2012. Association of herd BRSV and BHV-1 seroprevalence with respiratory disease and reproductive performance in adult dairy cattle. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 54(1), 4, <https://doi.org/10.1186/1751-0147-54-4>

Riigi Laboriuuringute ja Riskihindamise Keskus. 2023. Loomahaiguste uuringute aruanne, https://labris.agri.ee/sites/default/files/documents/2024-08/Aastaaruanne_2023_loomahaigused.pdf

Robbins, M., Francis, L. J., Edwards, B. 2010. Happiness as stable extraversion: Internal consistency reliability and construct validity of the oxford happiness questionnaire among undergraduate students. *Current Psychology: A Journal for Diverse Perspectives on Diverse Psychological Issues*, 29(2), 89–94, <https://doi.org/10.1007/S12144-010-9076-8>

Rogers, G. W., Van Arendonk, J. A. M., McDaniel, B. T. 1988. Influence of production and prices on optimum culling rates and annualized net revenue. *Journal of Dairy Science*, 71(12), 3453–3462, [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(88\)79951-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(88)79951-8)

Rushen, J., de Passillé, A. M. 2013. The importance of improving cow longevity. – Cow Longevity Conference, august 2013, Tumba, Sweden, 3–21, <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20143006787>

Santman-Berends, I. M. G. A., Buddiger, M., Smolenaars, A. J. G., Steuten, C. D. M., Roos, C. A. J., Van Erp, A. J. M., Van Schaik, G. 2014. A multidisciplinary approach to determine factors associated with calf rearing practices and calf mortality in dairy herds. *Preventive Veterinary Medicine*, 117(2), 375–387, <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2014.07.011>

Schuster, J. C., Barkema, H. W., De Vries, A., Kelton, D. F., Orsel, K. 2020. Invited review: Academic and applied approach to evaluating longevity in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 103(12), 11008–11024, <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19043>

Timonen, A. A. E., Autio, T., Pohjanvirta, T., Häkkinen, L., Katholm, J., Petersen, A., Mötus, K., Kalmus, P. 2020. Dynamics of the within-herd prevalence of *Mycoplasma bovis* intramammary infection in endemically infected dairy herds. *Veterinary Microbiology*, 242, 108608, <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2020.108608>

Tiwari, A., VanLeeuwen, J. A., Dohoo, I. R., Keefe, G. P., Haddad, J. P., Tremblay, R., Scott, H. M., Whiting, T. 2007. Production effects of pathogens causing bovine leukosis, bovine viral diarrhea, paratuberculosis, and neosporosis. *Journal of Dairy Science*, 90(2), 659–669, [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(07\)71548-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(07)71548-5)

Weary, D. M., Tazskun, I. 2000. Hock lesions and free-stall design. *Journal of Dairy Science*, 83(4), 697–702, [https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302\(00\)74931-9](https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302(00)74931-9)

Weigel, K. A., Palmer, R. W., Caraviello, D. Z. 2003. Investigation of factors affecting voluntary and involuntary culling in expanding dairy herds in Wisconsin using survival analysis. *Journal of Dairy Science*, 86(4), 1482–1486, [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73733-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73733-3)



Foto: Arno Mikkor

Kerli Mõtus

Sündinud 22. septembril 1982 Tartus

2001 Tartu Karlova Gümnaasium (hõbemedal)

2006 Eesti Maaülikool, veterinaarmeditsiin (*cum laude*)

2012 Eesti Maaülikool, veterinaarmeditsiin ja toiduteadus (PhD)

2018 Rootsi Põllumajandusülikool, järel doktorantuur

Töötanud Eesti Maaülikoolis (EMÜ) 2006. aastast veterinaarmeditsiini ja loomakasvatuse instituudis (VLI) EMÜ loomakliiniku suurloomaarstist karjatervise kaasprofessorini. 2025. aastast on EMÜ nõukogu liige. Läbis aastatel 2016–2018 järel doktorantuuri Rootsi Põllumajandusülikoolis. Eesti Loomaarstide Koja liige aastast 2006, Eesti Noorte Teaduste Akadeemia asutajaliige, aastatel 2011–2018 Eesti Loomaarstliku Ringvaate toimetaja ja peatoimetaja. Õpetab EMÜ-s veterinaarmeditsiini üliõpilastele mäletsejaliste kliinilist meditsiini ja veisekarja tervishoiu korraldust. Juhendanud 3 kaitstud doktoritööd ja 14 veterinaarmeditsiini lõputööd. Avaldanud 39 teadusartiklit (WoS). 2019. aastal pälvis Kerli Mõtus EMÜ rakendusteaduse auhinna.

ISIKSUSEPSÜHHOOGIA KASVAB SUUREMAKS

René Mõttus (Tartu Ülikool)

*Teaduspreemia sotsiaalteaduste valdkonnas tööde tsükli
„Täpsemad vastused isiksusepsühholoogia Suurtele Küsimustele“ eest*

Proloog

Enamikule meist meeldib, kui meie töö vastu huvi tuntakse. Psühholoogid on selles mõttes heas olukorras, kuna nende tegemised on üldsuse jaoks vägagi köitvad – inimesi huvitavad nemad ise ja teised nende ümber. See võib näida natuke ebaaus, sest psühholoogia on suhteliselt noor teadus ning ei ole veel ligilähedaseltki võrreldav paljude küpsemate teadusharudega selle osas, kui palju usaldusväärseid, üldkehtivaid ja teoreetiliselt organiseeritud leide on teadlastel ette näidata. Samas on ka psühholoogia sees erinevaid valdkondi, millest mõni tegeleb üldsust rohkem huvitavate küsimustega kui teised. Vabandan juba ette oma taju, teadvuse ja muude põnevate teemadega tegelevate kolleegide ees, aga minu valdkond, isiksusepsühholoogia, on ilmselt eriti heas olukorras, sest paljud meie teemad on avalikkusele eriti südamelähedased. Kui tavainimesed räägivad psühholoogiast, siis peavad nad tihti silmas just isiksusepsühholoogide töövaldkonda kuuluvaid küsimusi. Kui palju ja miks on igaüks iseäralik? Kui sarnased oleme oma vanematega? Mis teeb meid õnnelikuks? Kui palju suunavad meie elukäiku välised tegurid ning mil määral oleme ise oma saatuse sepad? Kui erinevad on teistes kohtades elavad inimesed? Mitmete selliste küsimuste kohta on isegi vanasõnad, nagu näiteks „igaüks on oma õnne sepp“ või „käbi ei kuku kännust kaugel“.

Täiskasvanuliku psühholoogia suunas

Ühtedele seostub psühholoogia näiteks Sigmund Freudi või Carl Jungi põnevate ning kõikeseletavate teooriatega inimloomuse kohta. Teistele tähendab psühholoog teleekraanil või leheveergudel kindlasõnaliste nõuannete pakkujat. Kolmandad on teinud populaarseid psühholoogilisi teste ning saanud teada, et nad on üht või teist tüüpi inimesed (nt „advokaat“, „protagonist“, või „lõvisüda“) ning just see seletabki kõike nende elu ja saatuse kohta. (Muidugi puutuvad inimesed psühholoogiaga kõige sagedamini kokku nõustamise käigus. Aga jätan

siin klientidega tööd tegevad psühholoogid tähelepanuta, sest nende tehtav on väga oluline ja tänuväärne töö päris inimeste ja päris probleemidega, aga ei püüa seletada inimloomust üldiselt.) Enamikul sellisest avalikkuseni jõudvast psühholoogiast on väga tagasihoidlik kokkupuude psühholoogia kui tänapäevase teadusega, aga arusaadavalt on tavainimestel enamasti raske ebateaduslikku teaduslikust eristada. Enamgi veel, tihti on ka psühholoogidel endil raske seda piiri näha.

Nagu eespool öeldud, on psühholoogia noor teadus ja seetõttu on meil veel vähe „tugevaid“ teadmisi. On juba omajagu üksikuid leide, aga pole veel päris selge, mis neist on päris ja mis müra ning mida see kõik kokku suures pildis üldse tähendab. Tegelikult me isegi ei tea veel, kui hästi on võimalik inimesi seletada üldkehtivate teaduslike teooriatega. See on andnud psühholoogidele vabaduse spekuleerida ja teoretiseerida, eelistada mõningaid leide ja ignoreerida nende eelistustega mittesobivat ning segada seda kõike tavaarusaamadel põhinevate intuitsioonidega – või vastupidi, püüda sensatsiooni nimel tahtlikult tavaarusaamasid üle trumbata, sest mõne üksiku teadusuuringu tulemus võib ikka appi tulla. Tihti on psühholoogidele olnud kasulik avaldada uurimusi ja teooriaid, mis näivad pakkuvat lihtsaid ning tihti isegi ootamatuid seletusi. Enamasti aga pole selliste uuringute tulemused korratavad või vajuvad pärast n-ö haibi möödumist unustuse hõlma. Näiteks oli mõnda aega tagasi populaarne uskuda, et võimuka positsiooni võtmine suurendab enesekindlust (*powerposing*), ent tänaseks on see ümber lükatud ja loodetavasti unustatud. Sellised ideed ja tulemuste metsik lääs on ilmselt noore teaduse paratamatu tunnus. Küpsemad teadused, nagu näiteks füüsika, keemia või bioloogia, mille praktiseerijad on aastakümneid või isegi aastasadu hoolega tähelepanekuid dokumenteerinud ja süstematiseerinud, seavad tugevamad piirangud sellele, millest ja kuidas teoretiseerida, millised seisukohad ja tulemused on tõenäolised ning milliseid võib lihtsalt ignoreerida kui müra.

Ent nüüd on ka paljude psühholoogide hulgas tekkinud arusaam, et meie valdkonnal on aeg suureks kasvada. Laiakaareliste teooriate ja sensatsioonide püüdmise asemel on meil tarvis astuda mitu sammu tagasi ning püüda süstemaatiliselt ja hoolika metodoloogiaga dokumenteerida inimeste käitumise, mõtlemise ja tundmise pisimadki detailid. Teisisõnu on meil esmalt tarvis inimesi põhjalikult ja usaldusväärse metodoloogiaga kirjeldada ning alles siis tasub hakata ehitama teooriaid inimloomuse kohta, mis neist tähelepanekutest lähtuksid ning oleksid seega ankurdatud tegelikkuse, mitte teadlaste fantaasialennu külge. Paraku tähendab see tihti suhteliselt igavat, ehkki väga vajalikku faktikogumist. Teadusajakirjades või avalikkusega suheldes peaksid psühholoogid suurejooneliste teooriate ja seletuste pakkumise asemel esmalt taanduma oma laboritesse, või vastupidi – minema päris inimeste juurde nende igapäevase elu kontekstis ning hoolega ja erinevate meetoditega kõike inimestesse puutuvat mõõtma, kategoriseerima ja süstematiseerima. Paralleelina võib mõelda Charles Darwinist, kes veetis palju aastaid hoolega loodust uurides ning oma tähelepanekuid süstematiseerides, enne kui tuli välja evolutsiooniteooriaga.

Tabel 1. Suur viisik

Suure viisiku omadus	Seletus
Neurootilisus	Üldine kalduvus tunda ärevust, kurbust, solvumist, ebakindlust ja otsustamatust
Ekstravertsus	Üldine kalduvus olla positiivne teiste inimeste suhtes ja nautida nende seltskonda ning tunda ennast energilisena
Avatus	Üldine kalduvus olla uudishimulik, loov, hea kujutlusvõimega ja intellektuaalsete huvidega
Sotsiaalsus (leplikkus)	Üldine kalduvus tunda ennast teistega võrdsena, võistlemise ja domineerimise asemel soovida teha koostööd ning püüda teisi mõista
Meelekindlus	Üldine kalduvus olla organiseeritud, töökas, usaldusväärne, täpne ja püüelda täiuslikkuse poole

Ka isiksusepsühholoogia kasvab suuremaks

Isiksusepsühholoogia tegeleb kõigepealt inimeste erinevuste kirjeldamise ning seejärel nende erinevuste põhjuste, võimalike muutuste ja tagajärgede kindlakstegemisega.

Kirjeldamine. Et kirjeldada inimeste isiksusi, on meil tarvis kaardistada nende tüüpilised käitumise, mõtlemise ja tundmise mustrid. Üks võimalus on seda teha eksperimentidega. Näiteks võime inimeste tahtekindluse mõõtmiseks paluda neil hoida kätt jääkülmas vees ning mõõta seda, kaua nad vastu peavad. Kes peab kauem vastu, selle tahtekindlus on eeldatavasti suurem. Aga selliste eksperimentaalsete mõõtmistega on rida probleeme, mis vähendavad nende kulutõhusust. Esiteks on seos mõõtmistulemuse (nt käe vees olemise aeg) ja eeldatavasti mõõdetava omaduse (tahtekindlus) vahel väga kaudne ning sageli küsitav. Võib-olla mõõdab käe vees hoidmine samavõrd või isegi hoopis enam (käe) külmataluvust. Teiseks on sel viisil raske mõõta mitut isiksuseomadust korraga, sest see nõuaks järjest paljude eksperimentide tegemist. Kolmandaks on keeruline niimoodi piisavalt suurt hulka inimesi uurida, sest see nõuab inimestelt kohaletulemist ja suurt ajakulu ning pühendumist. Teine võimalus oleks küsida inimestelt endilt nende tüüpilise käitumise, mõtete ja tunnete kohta. Seda on lihtne ja odav teha kasvõi interneti vahendusel ning see võimaldab korraga väga paljusid isiksuse aspekte mõõta, samuti on seos küsimuste ja eeldatavasti hinnatavate isiksuseomaduste vahel otsesem. Kui inimene ütleb, et tal on raske ennast vajalike tegevuste juures hoida, siis küllap ongi tal madal tahtekindlus.

Niimoodi enese kohta käivate küsimustikega isiksuseomaduste mõõtmine näis nii lihtne ja töökindel, et paljud isiksusepsühholoogid läksid selle meetodi raken-

damisega lausa liiale. Näiteks tekkis sajandivahetuse paiku järk-järgult arusaam, et sel viisil isiksuseomadusi mõõtes saame inimeste erinevused pea täiel määral ära kaardistada viie üldise omaduse – nn suure viisiku dimensiooni (tabel 1) – keeles ning iga omaduse mõõtmiseks piisab, kui inimestelt küsida vaid käputäis küsimusi. Teisisõnu hakkas tunduma, et kui omistame igale inimesele mõne küsimuse teel vastuse viis numbrit, mis väljendavad nende suhtelist paiknemist suure viisiku dimensioonidel, siis olemegi nende isiksuse ära kaardistanud.

Muidugi said paljud uurijad kiiresti aru, et iga suure viisiku omadus võib inimestel väljenduda erinevalt ning püüdsid iga omaduse juures selle umbes kolme kuni kuute erinevat alatahku (nn fassetti) mõõta. Meie viimase kümmekonna aasta uurimistöo, mis põhines kümnete tuhandete inimeste andmetel üle kogu maailma ning kaasas kümneid teadlasi, on aga näidanud, et tegelikult saab eristada veelgi suuremat hulka isiksuseomadusi (nt Mõttus jt, 2020). Ehkki väga üldisel tasemel võime tõesti inimesi kirjeldada vaid viie numbriga, on iga suure viisiku omaduse sees veel kümneid kitsamaid omadusi, milles inimesed erinevad sama usaldusväärselt ja tähendusrikkalt. Lisaks on uurijad lihtsustades mõned huvitavad isiksuseomadused (nt võistluslikkus, kadedus, naljameel) suurest viisikust üldse välja jätnud.

Sellest võib mõelda nii: kujutage ette, et meil on linn, kus kõigil inimestel on täpselt identsed suure viisiku skoorid. Lihtsustatud suure viisiku keskse käsitluse järgi võiks arvata, et need inimesed käituvad, mõtlevad ja tunnevad üsna ühtemoodi. Aga nüüdseks hästi korratud ja mitmekülgselt uurimistulemuste põhjal erinevad isegi need suure viisiku „kloonid“ tegelikult paljude – hinnanguliselt vähemalt saja – isiksuseomaduse osas: nad ise näevad enda erinevusi, teised näevad nende erinevusi ning need erinevused püsivad suhteliselt stabiilsena isegi paljude aastate lõikes (nt Mõttus jt, 2019). Enamgi veel, geneetiliselt sarnasemad suure viisiku kloonid oleksid ikka üksteisele sarnasemad – st nende isiksuseerinevused oleksid osaliselt pärilikud (Mõttus jt, 2019) – ning nende erinevad isiksuseomadused mõjutaksid ikka nende elukäiku nii, et nad eelistaksid erinevaid rolle, oleksid erineval määral oma eluga rahul või kalduksid erineval määral seadust rikkuma (Stewart jt, 2024). Teisisõnu on need suure viisiku kloonid tegelikult isiksuse osas pea samavõrra erinevad kui mistahes muu linna elanikud. Võib-olla ei saaks sinna linna juhuslikult sattunud turist arugi, et seal on midagi teisiti.

Seega tuleb isiksuseomaduste põhjalikuks kaardistamiseks hinnata neid palju mitmekülgsemalt. Viie numbri ja käputäie küsimustega saab küll väga lihtsustatud pildi, aga väga palju jääb tähelepanuta. Igast inimesest korraliku pildi saamiseks on vaja kümneid ja võib-olla isegi sadakonda numbreid ning küsida neilt vähemalt sama palju küsimusi. Kui me niisuguse sõnumiga kümmekond aastat tagasi välja tulime, tekitas see paljudes kolleegides hämmingut ja mõnes isegi vastumeelsust; nüüdseks näib aga suur osa isiksuseuurijatest seda tunnustavat.

Teine oluline sõnum, mida oleme püüdnud isiksusepsühholoogia „üles kasvatamiseks“ levitada ning millele teadusandmed veenvat tuge pakuvad, puudutab

vajadust isiksuseomadusi mõõta korruga vähemalt kahe meetodiga (McCrae ja Mõttus, 2019). Iga üksik meetod on omal moel vigane. Näiteks pole keeruline ette kujutada, et kui paluda inimestel nende endi käitumist kirjeldada, ei saa me nende vastuseid täiesti tõe pähe võtta. Inimesed tõlgendavad küsimusi natuke isemoodi, mõtlevad endast natuke isemoodi ja alati mitte tegelikkusega kooskõlas, ning annavad ka vastuseid natuke isemoodi. See tähendab, et nende vastustes on korruga natuke tõde ja natuke valet. Oleme lausa välja arvutanud, et laias laastus on kumbagi umbes pooleks. Aga kui samu omadusi mõõta ka teise, sõltumatu meetodiga ning tulemusi kombineerida, siis tõuseb tõe osakaal märkimisväärselt ning vale osakaal väheneb – tõenäosus, et mõlemad meetodid annavad täpselt samamoodi vigase vastuse, on pigem väike. Teisisõnu paraneb kahe sõltumatu mõõtmise kombineerimisel märgatavalt mõõtmiste valiidsus. Mis see teine meetod oleks? Nagu ütlesin, isiksuseomaduste eksperimentaalne mõõtmine on keeruline, aga õnneks on olemas ka teine, käepärane meetod. Nimelt saame paluda igal mõõdetaval inimesel kutsuda appi mõne nende tuttava – näiteks hea sõbra, sugulase või partneri –, kes samuti nende kohta sarnaselt küsimustele vastab, seda siiski omaette ning seega hinnatavast inimesest sõltumatult. See on kulutõhus meetod, sest võimaldab korruga ja odavalt mõõta paljusid inimesi ning paljusid isiksuseomadusi. Ka partnerid, sugulased või sõbrad võivad küsimustikule vastata interneti vahendusel ning tavaliselt ei võta see üle paarikümne minuti.

Põhjused ja tagajärjed. Muidugi peab isiksuseomaduste põhjalikum ja valiidssem mõõtmine täitma mingit eesmärki ehk aitama meil muuhulgas paremini mõista inimeste erinevuste põhjuseid, kujunemist ja tagajärgi. Ka selles osas oleme viimasel kümnendil aastal eri maade kolleegidega teinud rea uurimusi ning sealjuures näidanud, et isiksuseomaduste geneetiline taust (Henry jt, 2024) ja arengulised muudatused (Mõttus ja Rozgonjuk, 2021) on seni arvatust tunduvalt mitmekesisemad. Samuti oleme tõestanud, et isiksuse soolised erinevused on tunduvalt nüansirohkemad ja mitte seletatavad lihtsakoeliste teooriatega, nagu näiteks paljusid teadlasi ja avalikkust köitnud nn evolutsiooniliste rollide teooria, mille kohaselt vaid käputäis evolutsiooniliselt väljakujunenud mehhanisme seletaksid ära sugudevahelised isiksuseerinevused (Hofmann jt, 2025). Tagajärgede osas oleme paljudes töödes näidanud, et ilmselt mängivad isiksuseomadused seni arvatust suuremat rolli inimeste tervise ja muude elu aspektide juures, aga nende roll on samas palju nüansirikkam ning mitte alati seletatav näiteks suurt viisikut kasutades (Stewart jt, 2022). Teisisõnu võivad väga erinevad isiksuseomaduste kombinatsioonid vastata näiteks samale haridustasemele, kehakaalule või tõenäosusele saada hakkama millegi ebaseaduslikuga.

Selliste muustrite põhjalikuks ja usaldusväärseks uurimiseks on muuhulgas vaja uurida korruga paljusid inimesi. Sellest võib mõelda nii: kui on väga palju erinevaid isiksuseomaduste kombinatsioone, mis võivad viia sama tulemuseni (nt karjäärivalikuni), siis kõigi nende usaldusväärseks eristamiseks statistilisest müra peab iga kombinatsiooni uuritavate inimeste hulgas esinema piisaval hulgal kordadest. Väikesemahuliste uuringute aeg on läbi.

Pane oma raha sinna, kus su on su suu

Need uuringuid said valdavalt tehtud andmetega, mis me erinevatest muudel eesmärkidel tehtud projektidest kokku laenasime. Näiteks kasutati neis küsimustikke, mis olid siiski ennekõike just suure viisiku ja selle üksikute alatahkude mõõtmiseks mõeldud ning seetõttu kogu isiksuseomaduste spektrit ei katnud. Samuti oli harva hinnatud isiksuseomadusi korraga kahe meetodiga ning tihti polnud uuritavate inimeste valimidki teab mis suured.

Nii tekkis meil ühel hetkel arusaam vajadusest panna ise kokku üks suur uuring, kus paljude inimeste isiksuseomadusi oleks väga põhjalikult ning kahe meetodiga mõõdetud. Lisaks oli ilmne, et uuritavate inimeste valim peaks olema demograafiliselt mitmekesine ealiste, sooliste, hariduslike ja muude variatsioonide põhjalikuks kaardistamiseks ja arvesse võtmiseks. Samuti oli ilmne, et uuritavate kohta peaks oleks olema palju muud informatsiooni, mis võimaldaks uurida isiksuseomaduste võimalikke põhjuseid ja tagajärgi. Ingliskeelne idioom ütleb: „Put your money where your mouth is“ ehk tee ära, mida sa ütled, et peaks tegema. Samas näis niivõrd ambitsioonika uuringu korraldamine väga keeruline...

Õnneks on aga Eesti teadusmaastikul üks maailmas unikaalne ja äärmiselt tänuväärne ressurss, Eesti geenivaramu, millega on juba liitunud üle 20% täiskasvanud Eesti elanikkonnast. Suur osa liitunuist ehk geenidoonoritest on andnud loa olla kutsutud erinevatesse tervise ja geneetikaga seotud uuringutesse ning nende kohta on aastate jooksul tekkinud palju muid andmeid, mida saab samuti kasutada tervise ja geneetikaga seotud uuringuteks. Tänu akadeemikute Jüri Alliku, Anu Realo, Andres Metspalu jt koostööle osales hulk geenidoonoreid aastatel 2008–2018 juba väikesemahulises isiksuseomaduste uuringus, mille käigus kogutud andmete põhjal on valminud kümneid teadusartikleid, paljud neist seotud vaimse ja kehalise tervise ning geneetikaga (Vaht jt, 2024). Seoses Eesti Vabariigi 100. sünnipäevaga laienes geenivaramu jõuliselt ning tänu heale koostööle selle juhtkonnaga sündis ka kokkulepe isiksuseuuringut laiendada, kutsudes kõiki geenidoonoreid üles täitma põhjalikumat küsimustikku ning paludes neil omakorda kutsuda ka mõni hea tuttav nende kohta samadele küsimustele vastama.

Uuringumaterjalide koostamiseks ning logistiliste, eetiliste ja muude küsimuste selgeks rääkimiseks kulus umbes kolm aastat. Näiteks ainuüksi isiksuseküsimustiku koostamine võttis ligi kaks aastat väga pingelist ja tehnilist tööd. Ent 2021. aasta lõpu- ja 2022. aasta alguskuudel leidis uuring lõpuks aset. Selles osales 77 400 geenidoonorit, kellest ligi 22 000 isiksuseomadusi hindas lisaks neile endile ka mõni hea tuttav. See on maailmas ainulaadne uuring oma mahu, detailsuse ja mõõtmise põhjalikkuse osas ning võimaldab paljudele isiksuse, tervise ja geneetikaga seotud küsimustele anda senisest detailsemaid ja usaldusväärsemaid vastuseid. Oleme kõigile uuringus osalenud inimestele siiralt ja südamest tänulikud. Nende abiga olemegi saanud panna oma raha sinna, kus on olnud meie suu.

Selle rikkaliku andmestiku väärtustamine võtab aga aastaid: iga teadustöö kokkupanek on – ja peabki olema – väga põhjalik ja aeganõudev protsess, kus uurimisprobleem on vaja igakülgsest selgeks vaielda, analüütilise metodoloogia detailid läbi rääkida, seejärel andmeid korduvalt analüüsida ning tulemused kokku kirjutada. Koos avaldamise protsessiga, milles retsensentide ülesandeks on artikkel võimalikult auklikuks tulistada ning autorite ülesandeks see iga kord uuesti ja loodetavasti paremana kokku panna, kulub iga analüüsi avaldamisele keskmiselt ligi aasta. Paljud tulemused saavad olema suhteliselt tehnilised, detailsed ning avalikkusele ilmselt mitte kõige kõitvamad, mis on üks küpse(maks saava) teaduse tunnuseid. Näiteks aitab see andmestik kirjeldada sadu krüptiliste nimetustega lõike genoomis – nn ühenukleotiitideid polümorfisme –, mis ühel või teisel moel mängivad rolli isiksuseomaduste avaldumises ning nende seostes tervisenäitajatega. Vähihimagi kahtlusega aitavad need tulemused üheskoos paljude muude tulemustega ühel hetkel inimloomust ja tervist paremini mõista ja vajadusel ka suunata. Aga sinna jõudmiseks on vaja tulemused enne dokumenteerida.

Samas on vahel võimalik teha ka põhjalikke ja tehnilisi uuringuid üldhuvitavatel teemadel ja neid selgitada moel, mis ei nõua lugejailt või kuulajailt erialast ettevalmistust. Järgnevalt jagan lühidalt nelja põneva Eesti geenivaramu isiksuseuuringu põhjal avaldatud teadustöö tulemusi, jättes kõrvale tehnilised detailid ning tuues välja vaid kõige olulisema.

Põnevaid sõnumeid Eestist

Kui palju on inimesed ise oma rahuolu sepad? Eluga rahulolu on psühholoogia olulisemaid uurimisteemasid ning ühel või teisel moel mõtlevad ja räägivad inimesed sellest tihti ka väljaspool akadeemilist psühholoogiat. Muuhulgas on eluga rahulolu üks põhilistest vaimse tervise väljendusvormidest. Mõned inimesed on oma eluga palju enam rahul kui teised, samas kui enamiku inimeste rahulolu tase on pigem suhteliselt keskmise lähedal. Ent neid erinevusi põhjustavad tegurid on teada vaid osaliselt. Näiteks on sissetulekul, suhtel, tervisel ja elusündmustel küll teatud roll rahulolu tasemes, aga see on väiksem ja lühiajalisem, kui tavalise intuitsiooni põhjal võiks arvata. Seetõttu on paljud uuringud püüdnud hinnata, mil määral peegeldab inimeste eluga rahulolu nende püsivaid isiksuseomadusi.

Ent isegi vaatamata sadadele uuringutele ning mitmetele metaanalüüsidele (st uuringuid kokkuliitvatele uuringutele) on see küsimus jäänud veenva vastuseta ühel põhjusel: hinnates nii isiksuseomadusi kui eluga rahulolu sarnasel moel (enesekohaste küsimustikega), on nende seosed teadmata määral moonutatud. Mõnda tüüpi mõõtmisvead näitavad neid seoseid tegelikest nõrgematena, teised aga võivad neid näidata liiga tugevatena. Nii võivad pea kõik senised teadustulemused rahulolu seoseid isiksusega tugevasti nii üle- kui alahinnata. Muide, sel põhjusel olen mina vältinud selle teema käsitlemist loengutes. Liiasi on enamik siiani tehtud uuringutest isiksuseomadusi käsitletud vaid suure viisiku ning selle üksikute alatahkudena, riskides mõned rahuloluga seotud omadused tähelepanuta jätta.

Meie geenidoonorite andmestikul põhinev uuring (Mõttus jt, 2024) pööras aga selle teema uurimises uue lehekülje. Nimelt näitasime, et enda ja tuttavate poolt antud hinnanguid isiksuseomaduste ja eluga rahulolu kohta kombineerides on võimalik arvutada nende vahelised seosed ilma levinuimate mõõtmisvigadeta. Kuna enam kui 20 000 geenidoonori isiksuseomaduste ja eluga rahulolu kohta on olemas nii nende enda kui nende lähedase hinnangud, andis uuring meile enneolematu võimaluse hinnata neid seoseid mõõtmisveavabalt. Lisaks saime vaadata isiksuseomadusi detailsemalt kui vaid suue viisiku vaates. Tulemustest selgus, et eluga rahulolu on isiksuseomadustega seotud seni arvatust tunduvalt tugevamalt. Nimelt võib ligi 80% rahulolu hajuvusest populatsioonis taandada isiksuseomadustele. Huvitav oli seegi, et rahulolu erinevate spetsiifiliste eluvaldkondadega, nagu töö, suhted, toimetulek, elukoht, tervis ja väljanägemine tundsid käivat ühte sammu: üldiselt rahul olevad inimesed kaldusid mistahes asjadega enam rahul olema. Seegi viitab, et rahulolu on tihti rohkem sisemine omadus kui spetsiifiliste elutingimuste peegeldus. Kõige selgemalt eristas eluga vähem rahul olevaid inimesi rohkem rahul olevatest kalduvus tunda ennast mittemõistetuna. Samas kaldusid rahulolevamad inimesed olema otsusekindlamad, entusiastlikumad, vähem igavust tundvad ja kadedad ning tundma suuremat kontrolli oma saatuse üle. Suur viisik seostus rahuloluga natuke vähem.

Tulemused seletavad, miks on isiksuseväliste tegurite roll eluga rahulolus tavaliselt väikesepoolne. Ühte kodanikku parafraaseerides on elu ilusaks või koledaks mõtlemine ennekõike oskuse, mitte objektiivsete asjaolude küsimus. Samas on oluline meeles pidada, et tavapärane pole vältimatu. See, et enamasti on rahulolu tugevas kooskõlas isiksuseomadustega, ei tähenda, et seda seost poleks soovi korral võimalik murda – lihtsalt tavaliselt seda ei tehta.

Mil määral antakse rahulolu ja isiksuseomadused meile vanemate poolt kaasa? *Nature vs. nurture* ehk pärilike ja keskkondlike tegurite vastandus psühholoogiliste tunnuste väljakujunemisel on üks psühholoogia klassikalisemaid probleeme. Meenub, kuidas käisin kunagi Šotimaal kinnipeetavatele isiksuseomadustest loengut pidamas. Veel enne, kui jõudsin alustada, küsis üks kinnipeetav: „So, we gonna talk about nature versus nurture then, huh?“ Ka isiksuseomaduste pärilikkuse teemal on juba tehtud sadu uuringuid, ent mõne väga üksiku erandiga põhinevad need kõik vaid uuritavate enesekirjeldustel. Nagu aga eespool öeldud, on enesekirjeldustes tõde umbes pooleks valega ning seetõttu on enamiku uuringute tulemused ilmselt tugevasti moonutatud.

Kuna geenidoonorite hulgas, kelle isiksuseomadusi on mõõdetud kahe meetodiga – nende enda ja teiste kirjeldused –, on väga palju erineva sugulusastmega inimesi, siis saime uurida isiksuseomaduste pärilikkuse määra mõõtmisveavabalt ehk *mitte* valega pooleks. Nagu me ootasime, oligi sugulaste mõõtmisveavabalt hinnatud sarnasus isiksuseomaduste osas umbes 30–40% suurem kui tavapärasel moel hinnatud sarnasus (Mõttus jt, 2025). Seega on isiksuseomadused tavapäraselt leitud omajagu rohkem pärilike tegurite poolt mõjutatud. Küsite, kui pärilikud on siis isiksuseomadused? Vastan tehniliselt: umbes 40% kuni üle 70% inimeste erinevustest isiksuseomaduses võib tavaliselt kirjutada nende-

vaheliste geneetiliste tegurite arvele. Pigem 40% kehtib siis, kui vaatame vaid neid geneetilisi tegureid, mis lihtsalt ja ennustatavalt geneetiliselt sarnaseid inimesi isiksuse osas sarnaseks teeb. Pigem üle 70% kehtib siis, kui vaatame kõiki geneetilisi tegureid, sh ka neid, mille sugulastel sarnaselt avaldumise tõenäosus on madalpoolne. Mõelge näiteks keskkooli bioloogias õpitud dominantsuseletsessiivsusele ja sellele, et siniste silmadega vanematel võivad olla ainult sinisilmised lapsed, aga pruunide silmadega vanematel võivad olla nii sini- kui pruunisilmised lapsed.

Lisaks isiksuseomadustele uurisime selles töös ka eluga rahulolu ning leidsime, et see on umbes sama palju pärilike tegurite poolt mõjutatud kui isiksuseomadused. Liiasi võis suuremat osa – ehkki mitte kõiki! – isiksuseomaduste ja eluga rahulolu omavahelistest seostest seletada sellega, et samad geneetilised tegurid mängisid rolli mõlema puhul. Eluga rahulolu on seega sama palju ja suuresti samadel põhjustel geenides kui iseloom laiemalt.

Psühhopaatoloogia seosed isiksuseomadustega. Aastakümneid on halba vaimset tervist ehk psühhopaatoloogiat käsitletud nn meditsiinilise mudeli järgi, kus inimesed on kas terved või on neil üks või mitu häiret. Samas on selle lähenemise erinevad puudused olnud teada juba aastakümneid. Need häiresildid ei kirjelda kedagi väga hästi ning ei ole ühtegi teoreetilist põhjust arvata, et vaimse tervise probleemid on sarnased luumurrule või viirushaigusele. Seetõttu on viimastel aastatel üha enam kogunud hoogu lähenemine, mille järgi on halb vaimne tervis kirjeldatav niisamuti kui isiksuseomadused ehk dimensionaalsete tunnustena.

Kui aga vaimse tervise tunnuste mudel sarnaneb paljuski isiksuseomaduste mudelile, on loomulik küsida, kui palju on need kaks lihtsalt sama asja kaks külge. Paraku on aga vaimse tervise ja isiksuseomaduste dimensioonide otsese kattuvuse

Tabel 2. Kõige enam ja vähem ekstravertsete ja avatud inimestega ametid.

Ekstravertsus	
Kõrge	Madal
Reklaami- ja suhtekorraldusjuhid	Elektroonikainsenerid
Näitlejad	Tarkvaraarendajad
Ürituste korraldajad	Veebiarendajad
Fitness- ja vabaajatreenerid	Elektriseadmete koostajad
Spordi- ja kultuurikeskuste juhid	Muud tarkvaraarendajad
Avatus	
Kõrge	Madal
Kunstnikud	Kraanajuhid
Keeleõpetajad	Santehnikud
Kirjanikud	Autojuhid
Psühholoogid	Puutöölised
Ülikoolide õppejõud	Tööstustöölised

uurimist takistanud ainult ühele mõõtmisviisile (enesekohased küsimustikud) keskendumine ning tihti ka nappide hindamisvahendite kasutamine – niisamuti kui isiksuseomaduste ja eluga rahulolu seoste puhul. Geenidonorite abiga õnnestus meil sellele küsimusele anda senisest täpsem vastus (Soodla jt, 2025). Kasutades enam kui 16 000 Eesti geenidoonori andmeid, kelle isiksuseomadusi oli lisaks neile endale detailselt kirjeldanud mõni lähedane ning kes olid mõnd aega varem osalenud ka põhjalikus vaimse tervise uuringus, hindasime isiksuseomaduste ja psühhopatoloogia põhidimensioonide seoseid mõõtmisveavabalt ning senisest täpsemalt. Leidsime, et isiksuseomaduste ja vaimse tervise vahelised seosed on seni leitud tugevamad, aga samas ka mitmekesisemad: erinevatel vaimse tervise probleemidel on üsna erinevad isiksuseomaduste „signatuurid“. Samas polnud vaimne tervis täiel määral isiksuseomadustele taandatav. Paljuski peegeldab meie vaimse tervise tase mistahes ajahetkel meie isiksuseomadusi – aga mitte ainult.

Kes teeb mis tööd? Isiksusepsühholoogia üks olulisemaid kasutusalasid on kutsenõustamine ja värbamine ehk inimeste ja tööde sobitamine. On näidatud, et psühholoogiliselt sobivaid töid tegevad inimesed kalduvad enam rahul olema. Hinnanguliselt on isiksuseomaduste töölases kontekstis kasutamise äri aastane maht miljardeid dollareid. Samas puudusid põhjalikud ja avalikud andmed selle kohta, millised tavapäraste isiksuseomaduste profiilid vastavad levinuimatele ametitele. Selle üheks põhjuseks on see, et niisugused uuringud nõuavad väga suuri valimeid, sest ameteid on palju ning iga ameti esindajaid peab uuringus olema piisavalt. Teine põhjus on, et selliseid andmeid omavad ettevõtted kasutavad neid raha teenimiseks ning pole huvitatud nende avalikku kasutusse andmisest.

Geenidonorite kohta nende enda ja nende tuttavate poolt antud isiksusehinnanguid kasutades kaardistasime üle 250 levinuima ameti isiksuseomaduste profiilid ning muutsime tulemused veebirakendusena avalikult kättesaadavaks.⁴⁴ Loodetavasti muudab see andmebaas psühholoogilisel hindamisel põhinevad teenused laiemalt kättesaadavaks ja alandab barjääre uutele ettevõtetele, kes soovivad selles vallas turule tulla. Uuringu andmeid kasutades koostasime ka veebirakenduse, mis võimaldab inimestel kiiresti, tasuta ja anonüümselt hinnata enda isiksuseomaduste vastavust erinevatele töödele ning pakub samuti personaalset tagasisidet põhilistele isiksuseomadustele. Samuti võimaldab see rakendus koguda täiendavaid andmeid teadustulemuste veelgi põhjalikumaks muutmiseks. Tänu kolleegide entusiasmile on see juba tõlgitud 15 keelde. Tasuta kõigile kättesaadavad andmed (praegu juba üle 140 000 inimese kohta) loovad võimaluse kultuuriti võrdlevateks teadusuuringuteks.

Aga et jutt liiga kuivaks ei jääks, on tabelis 2 toodud kõige enam ja vähem ekstravertsete ja avatud inimestega ametid. Suure viisiku omadustest eristasid just need kaks ameteid kõige selgemalt. Mis puudutab aga spetsiifilisemaid isiksuseomadusi, siis näiteks kõrgemate juhiambitsioonidega ametite hulgas domineerivad koolide ja lasteaedade juhid, kõige paremate mõjutajate hulgas on personalijuhid ja psühholoogid, kõige erilisemaks peavad ennast erinevad autorid ja kõige otsusekindlamad on kohtunikud, poliitikud ja piloodid.

⁴⁴ <https://apps.psych.ut.ee/JobProfiles>; Anni jt, 2025.

Epiloog

Ainult küps psühholoogia, mis põhineb hoolikalt dokumenteeritud faktidel, mitte tavateadmiste ja teadlaste fantaasialendude kompotil, viib meid lõpuks tõetruu arusaamiseni inimloomusest ning annab meile hoopis soovi korral inimeste paremaks aitamiseks. Selline küps psühholoogia on keeruline. Küpse psühholoogia üleskasvatamine on kulukas. Ja vahel on see ka igav, sest enne usaldusväärsete arusaamade tekkimist on tarvis teha palju nüri eeltööd. Õnneks on psühholoogiateadlaste valmidus seda rasket ja rutiinset tööd teha paranenud ning on tekkimas ka selleks vajalikud põhjalikud ja metodoloogiliselt mitmekesised uuringud, mille üheks näiteks on Eesti geenivaramu isiksuseuuring. Selle abil on meil vahend liikumaks küpsema psühholoogia suunas – vahel igavalt, aga vahel ka põnevalt. Ja muuhulgas kinnitab see Eesti isiksusepsühholoogia senisest veelgi tugevamalt maailmakaardile.

VIITED

Anni, K., Vainik, U., Möttus, R. 2025. Personality profiles of 263 occupations. – *Journal of Applied Psychology*, 110, 481–511, <https://doi.org/10.1037/apl0001249>

Henry, S., Baker, W., Bratko, D., Jern, P., Kandler, C., Tybur, J. M., de Vries, R. E., Wesseldijk, L. W., Zapko-Willmes, A., Booth, T., Möttus, R. 2024. Nuanced HEXACO: A Meta-Analysis of HEXACO Cross-Rater Agreement, Heritability, and Rank-Order Stability. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 01461672241253637, <https://doi.org/10.1177/01461672241253637>

Hofmann, R., Rozgonjuk, D., Soto, C. J., Ostendorf, F., Möttus, R. 2025. There are a million ways to be a woman and a million ways to be a man: Gender differences across personality nuances and nations. *Journal of Research in Personality*, 115, 104582, <https://doi.org/10.1016/j.jrp.2025.104582>

McCrae, R. R., Möttus, R. 2019. What Personality Scales Measure: A New Psychometrics and Its Implications for Theory and Assessment. *Current Directions in Psychological Science*, 28, 415–420, <https://doi.org/10.1177/0963721419849559>

Möttus, R., Kandler, C., Luciano, M., Esko, T., Vainik, U. 2025. Familial similarity and heritability of personality traits and life satisfaction are higher than shown in typical single-method studies. *Journal of Personality and Social Psychology*, <https://doi.org/10.1037/pspp0000550>

Möttus, R., Realo, A., Allik, J., Ausmees, L., Henry, S., McCrae, R. R., Vainik, U. 2024. Most people's life satisfaction matches their personality traits: True correlations in multitrait, multirater, multisample data. *Journal of Personality and Social Psychology*, 126, 676–693, <https://psycnet.apa.org/doiLanding?doi=10.1037%2Fpspp0000501>

Möttus, R., Rozgonjuk, D. 2021. Development is in the details: Age differences in the Big Five domains, facets, and nuances. *Journal of Personality and Social Psychology*, 120, 1035–1048, <https://doi.org/10.1037/pspp0000276>

Möttus, R., Sinick, J., Terracciano, A., Hrebickova, M., Kandler, C., Ando, J., Mortensen, E. L., Colodro-Conde, L., Jang, K. 2019. Personality characteristics below facets: A replication and meta-analysis of cross-rater agreement, rank-order stability, heritability and utility of personality nuances. *Journal of Personality and Social Psychology*, 117, e35–e50.

Möttus, R., Wood, D., Condon, D. M., Back, M. D., Baumert, A., Costantini, G., Epskamp, S., Greiff, S., Johnson, W., Lukaszewski, A., Murray, A., Revelle, W., Wright, A. G. C., Yarkoni, T., Ziegler, M., Zimmermann, J. 2020. Descriptive, Predictive and Explanatory Personality Research: Different Goals, Different Approaches, but a Shared Need to Move beyond the Big Few Traits. *European Journal of Personality*, 34, 1175–1201, <https://doi.org/10.1002/per.2311>

Soodla, H. L., Lehto, K., Kõiv, K., Vainik, U., Akkermann, K., Möttus, R. 2025. Assessing the overlap of personality traits and internalizing psychopathology using multi-informant data: Two sides of the same coin? *Journal of Psychopathology and Clinical Science*, <https://doi.org/10.1037/abn0000967>

Stewart, R., Diaz, A., Hou, X., Liu, X. (Shirley), Vainik, U., Johnson, W., Möttus, R. 2024. The ways of the world? Cross-sample replicability of personality trait-life outcome associations. *Journal of Research in Personality*, 112, 104515, <https://doi.org/10.1016/j.jrp.2024.104515>

Stewart, R. D., Möttus, R., Seeboth, A., Soto, C. J., Johnson, W. 2022. The finer details? The predictability of life outcomes from Big Five domains, facets, and nuances. *Journal of Personality*, 90, 167–182, <https://doi.org/10.1111/jopy.12660>

Vaht, M., Arumäe, K., Realo, A., Ausmees, L., Allik, J., Henry, S., Metspalu, A., Esko, T., Möttus, R., Vainik, U. 2024. Cohort profile: Personality Measurements at the Estonian Biobank of the Estonian Genome Center, University of Tartu, <https://doi.org/10.31234/osf.io/2aey6>



René Mõttus

Foto: Arno Mikkor

Sündinud 22. novembril 1979 Kuressaares

- | | |
|-----------|---------------------------------------|
| 1998 | Kuressaare Gümnaasium |
| 2003 | Tartu Ülikool, psühholoogia (BSc) |
| 2005 | Tartu Ülikool, psühholoogia (MSc) |
| 2009 | Tartu Ülikool, psühholoogia (PhD) |
| 2010–2013 | Edinburghi Ülikool, järeldoktorantuur |

Töötab alates 2005. aastast Tartu Ülikooli psühholoogia instituudis, alates 2023 isiksusepsühholoogia professor. Alates 2013 oli Edinburghi Ülikoolis kaasprofessor, 2019. aastast individuaalsete erinevuste magistriõppekava juht ja 2019–2023 kraadiõppe direktor. Alates 2020 ajakirja European Journal of Personality peatoimetaja. Tegeleb isiksuse ja heaolu uurimisega, peab blogi „People Unexplained“ portaalil Psychology Today ja toimetab taskuhäälingut „Personality Psychology Podcast“. Pälvinud mitmeid auhindu, sh Euroopa Isiksusepsühholoogia Assotsiatsiooni noore teadlase auhind 2018. aastal. Juhendanud 42 magistri- ja 10 doktoritööd.

EESTI-, LIIVI- JA KURAMAA HILISHUMANISTLIK KIRJANDUS: TEEKOND VAIKIVATEST METSADEST POEETILISTE SALUDENI

Kristi Viiding, Martin Klöker
(Eesti Teaduste Akadeemia Underi ja Tuglase Kirjanduskeskus)

*Teaduspreemia humanitaarteaduste ja kunstide valdkonnas tööde
tüüklil „Eesti- ja Liivimaa varauusaja mitmekeelse kirjanduskultuuri
empiirilise rekonstrueerimine, kontekstualiseerimine
ja mõtestamine“ eest*

1. Kirjandusliku variatiivsuse ja muutuse paradigma

1631. aastal trükkis ilmunud esimene läti- ja 1637. aastal esimene eestikeelne ilmalik luuletus tähistavad 400 aasta tagust kirjanduslikku pöördepunkti, mis tänapäeva vaatenurgast näib eesti ja läti ilmaliku rahvuskirjanduse loomuliku algustähisena. Ent need luuletused ei seisa kaugeltki siinse regiooni kirjandusloo kui terviku alguses, vaid moodustavad murdosa luterlikule reformatsioonile järgnenud sajandite Eesti-, Liivi- ja Kuramaa mitmekeelsest ilmalikust kirjandusest.⁴⁵ Eesti- ja lätikeelne mittekiriklik kirjandus võrsus paljude žanride, vormide ning kirjanduspraktikatega rikkast kultuurist, mis erinevalt varasemast keskaegsest valdavalt imporditud ja religioosest kirjanduskultuurist oli varauusajal juba katkematult toimiv kohalik nähtus.

Asjaolu, et need esimesed eesti- ja lätikeelsed luuletused on meie kirjanduslugudes endiselt kontekstualiseerimata kurioossed üksikjuhtumid või üksikjuhtumite rida, mitte laiema mitmekeelse kirjanduskultuuri orgaaniline osa, on tingitud Eesti ja Läti kirjandusloo senisest ajuti tugevalt ideologiseeritud, valdavalt lingvistilise lähenemisega ja fragmenteeritud uurimisloost. Aastail 1920–1940, II maailmasõja järgses paguluses ning uuesti alates 1990-ndatest on varauusaegset ilmalikku kirjandust väärtustatud eeskätt eesti ja läti keele ajaloo osana või eeletapina rahvakeelse kirjanduse kujunemisel. Iseloomulik on Ants Järve väide, et „tegemist on eelkõige keelehuviga, mis eesti kirjanduse loomist ei tähendanud“

⁴⁵ Läti ja Eesti varane muukeelne trükkis on kataloogitud rahvusbibliograafiates, vastavalt Šiško, 2013 ning Kannik, Maasik, Reimo, Vösa, 2025.

(Järv, 2001, 3; vt juba ka Saarest, Cederberg, 1925–1931, 3).⁴⁶ See näitlikustab, et algselt juba ainuüksi meetrilistel põhjustel selgesti kirjandusliku ambitsiooniga tekste on käsitletud teetähisena pelgalt eesti keele tänapäevastumise protsessis, st need on taandatud järjest nüüdisaegsema keelekuju esindajateks. Teiseks äärmuseks on varase eestikeelse ilmaliku kirjanduse käsitlemine mõne religioosse või poliitilise süsteemi ideaalide propagandana (Altoa, Valmet, 1973, 9–21). Seejuures on uurijad kasutanud suuremal või vähemal määral väärtushinnangulisi ja emotsionaalseid väljendeid, nagu „areng“, „edulugu“, „baltisaksa kirjanduse vähetähelepanuvääriv lisavõrse“ (Altoa, Valmet, 1973, 10), „protestantlik optimism“ (Lukas, 2021, 256) jt. Ent just varauusaja, s.o 16.–18. sajandi kirjanduslugu ei ole oma kultuurilis-keelises ja seisuslikus läbipõimituses, poliitilises tingituses, paljufunktsioonilisuses ning trükitehnilistel põhjustel aeglase levikuprotsessi tõttu allutatav arusaamale pidevast arengust, milles iga teos oleks kirjanduslikus mõttes uuenduslik, kvaliteetsem ja parem kui eelmine. Sarnaselt varauusaja kirjanduse keelise variatiivsusega (Hasselblatt, 2016, 104) iseloomustab tollast kirjandust ka vormi (värsimõõt, riimiskeemid) ja kujundite variatiivsus (Urmet, 2022, 263). Nõustudes Cornelius Hasselblattiga, ei erinenud „17. sajandi, aga ka varasemate sajandite poeetikaõpetus (ja kirjandusmaailm laiemalt) suuremat 21. sajandi globaliseerunud maailmast“ (Hasselblatt, 2016, 104).

Variatiivsuse mõiste kasutamine ei tähenda, et tollast kirjandusloomet poleks iseloomustanud muutused, teisenemised või üleminekud. Kasutades varauusaegse Eesti-, Liivi- ja Kuramaa kirjanduselu kui terviku kirjeldamiseks ja analüüsimiseks katusmõistet „kirjanduslik muutus“, on meie uurimistöõ eesmärk neutraalselt ning keeleajaloolist aspekti esile seadmata käsitleda fookuste ja praktikate muutusi. Lähtume hüpoteesist, et just empiiriline, üksiktekstide ja -žanride põhine lähenemine aitab selle mõiste täita varauusaegse kirjanduskultuuri mõtestamiseks relevantse sisuga. Empiiriline lähenemine aitab esiteks kriitiliselt analüüsida ja vajadusel vältida muudest kultuuriruumidest ja ajastutest mehaaniliselt laenatud kontseptsioone (nt koloniaalkultuur) ning võimaldab teiseks uurida kirjanduslikku muutust kui rea mikrotasandi tegevuste ja muutuste tulemit. Millal, miks ja kuidas tekkis paljudest väikestest, sageli märkamatuist muutustest žanrides, ühe autori või ühe piirkonna autorite loomingus suur epohhi rajav kirjanduslik muutus, millal mitte? Kas kirjanduslikud muutused võisid toimuda ka perifeerias? Et neile ja veel paljudele küsimustele vastuseid leida, oleme oma meetodika rajanud võtmetekstide ja žanride võrdlemisele ja erinevuste kindlakstegemisele. Loomulikult kaasneb erinevuste leidmise ja süstematiseerimisega nii ammuste kirjanduslike tekstide analüüsimisel ka sotsiaalajalooline ja institutsioonilooline kontekstualiseerimine (Klöker, 2023, 15–17).

⁴⁶ Ehkki 2022. aastal kritiseeris olukorda põhjendatult Jaak Urmet („Suundumus eesti luule algust mitte pidada päris luuleks on pigem olnud juhuslikult väljakujunenud tava – mitte asjade õige, loomupärane, läbikaalutud seis“, 2022, 264), jätkub nende luuletuste puhul varasem keelekeskne käsitlus ka 2025. aastal eesti raamatu 500. aasta tähistamiseks Tallinna Linna-teatri Riina Roose ja Paavo Piigi lavastuses „Alguses oli laul“. Ehkki pealkiri viitab pigem muusikaajaloolisele lähenemisele, peegeldub kavaleheltki (Roose, Piik, Sinissaar, 2025) taas traditsiooniline keeleajalooline käsitlusviis.

2. Põimumised ja konfliktid kirjandusliku muutuse lähtekohana

Hiljemalt 15.–16. sajandi vahetusel, veel enne luterlikku reformatsiooni hakkas Liivimaal tekkima püsiv kohalik ilmalik humanistlik kirjandus (Klõker, 2014, 88–103; Viiding, 2020, 33–37). Üheks mõjuteguriks oli põimumine tollase Euroopa kirjandus- ja kultuuripraktikatega, teiseks konfliktid kirjandusnähtuste ja kirjandust mõjutavate tegurite piiriladel.

Põimumine ei tähendanud mehaanilist tüüpiliste varauusaegsete žanride ülevõttu kohaliku kirjanduskultuuri, vaid esmalt humanistliku kirjandusloome tekkeks vajaliku koolisüsteemi ja -programmi kujundamist, mis sarnaneb humanismideedest kantud Lääne-, Lõuna- ja Kesk-Euroopa omadega (Viiding, 2021; Klõker, 2022). Põimumiste (sotsiaal)ajalooliseks taustaks oli muuhulgas ka eri päritolu põgenike tulv Eesti-, Liivi- ja Kuramaale (vt nt Böömi põgenike kirjakultuuri alase tegevuse kohta Eestimaal Vaculínová, Viiding, 2024).

Põimumiste tulemusena üle võetud kirjanduspraktikate näiteid on rohkesti nii kirjandusliku mainekujunduse kui ka kirjandusorganisatsioonilise tegevuse vallas ning paljud neist seostuvad kogu regiooni esimese trükikoja rajamisega Riiga 1588. aastal. Võtmeisikuks oli juristi haridusega humanist David Hilchen (1561–1610), kes vastutas alates 1585. aastast Riia raesekretäri ja 1589. aastast sündikuna koolide ja trükikoja eest ning keda peetakse regiooni esimese trükikali Claes Mollyni kutsujaks Liivimaale (Kraus, 2005, 323–327). Kirjandusliku mainekujunduse algatas just Hilchen 16.–17. sajandi vahetusel teadliku isikliku mitmekülgse kirjaniku- ja luuletajaprofililoomise ja selle eest hoolitsemisega. Tema profiilid olid esindatud mitmesuguse sisuga kõned poliitilistest kuni pidu- ja leinakõnedeni, ajalooline monograafia, koos ladinakeelsete kirjade raamatut, värss-satiir ning arvukalt juhuluulet, kõik ladina keeles. Hilcheni eelkäijad ja vanemad kaasaegsed kirjamehed olid olnud kõik ühe žanri viljelejad: kroonika-kirjutajad, eepilised või lüürilised luuletajad, religioossete tekstide autorid. Mitmekesine kirjanikukuvand kodunes regioonis lõplikult alles 17. sajandi 20.–30. aastatel, eeskätt Tallinna gümnaasiumi ja Tartu ülikooli õppejõudkonnas, olgu siis Reiner Brockmanni (1609–1647), Friedrich Meniuse (1593–1659) või Timotheus Poluse (1599–1642) mitmežanrilises trükis avaldatud loomingus.

Teiseks tekkiva kirjandusliku mainekujunduse näiteks oli algatus tekitada teiste Euroopa maade autorite seas huvi kajastada oma kirjandusteostes Eesti-, Liivi- ja Kuramaa sündmusi. Hilcheni kirjavahetuses leidub rida näiteid, kui lugupidavalt, kuid ometi enesekindlalt ta selle eesmärgi nimel juhtivate Kesk- ja Lääne-Euroopa humanistidega, nt Justus Lipsiuse (1547–1606), Johannes Caseliuse (1533–1613) või Isaac Casauboniga (1559–1614) suhtles, isegi kui ta ei saanud mõnele oma ettepanekule vastust või koges hoopis kriitikat. Eriti vajalikuks pidas Hilchen Eesti-, Liivi- ja Kuramaa sündmuste ja olude väärikat kajastamist ajalookroonikates, sest nendest ilmus sageli kordustrukke või ka tõlkeid ladina keelest rahvakeeltesse ja vastupidi. Näitena sellest mainekujunduslikust tegevusest võib tuua Hilcheni kirjavahetuse ja kohtumise Rostocki ülikooli professori ja krooniku David Chytraeusega, mille mõjul kohandas Chytraeus

Liivimaa, eriti Riia kalendrirahutuste kujutamise oma „Saksimaa kroonikas“ alates 1596. aasta väljaandest Riia rae seisukohtadega. 17. sajandi avakümnendil jõudis Hilchen kritiseerida ka mõjuka Prantsuse humanisti Jacques de Thou maailma ajaloo väljaannet „Minu aja lugu“ („Historia mei temporis“, 1604–1614), õieti selle mõneleheküljelist Eesti-, Liivi- ja Kuramaa käsitlust, ning ehkki tema parandused ja märkmed jõudsid Prantsusmaale, ei lubanud de Thou peatne surm neid enam uutesse täiendatud väljaannetesse lõimida (Viiding, 2023a, 52–56).

Riia trükikoja avamine 1588. aastal tekitas selgemini kui varasem käsikirjalise kirjanduse periood vajaduse avaldatavat kirjandust keeleliselt ja sisuliselt toimetada. Selle kirjandusloomet kujundava tegevuse algus 1580. aastate Liivimaal on teada tänu Hilcheni kõne „Ristiinimeste armastusväärsest üksmeelest“ („De amabili civium Christianorum concordia paraenetica oratio“) käsikirjale Riias Läti Ajalooarhiivis. Mahuka – rohkem kui 10 000 sõna pikkuse – kõne korrigeeris 1587. aasta hilissuvel humanistliku ladina keele väljenduslaadile, täpsemalt selle tsitseronianalikule moesuunale vastavamaks Itaalia humanist, hereetik ja ajalookirjanik Gian Michele Bruto (1517–1592), kes oli Poola kuninga Stephan Báthory valitsusajal kuni 1587. aastani Poola õukonna historiograaf Varssavis. Hilchen viibis Varssavis samal ajal uue kuninga valimisel ning tutvus Brutoga ilmselt Poola suurskantsleri ja suurhetmani Jan Zamoyski (1542–1605) vahendusel – kuulusid ju mõlemad mehed Zamoyski patroneeritavate hulka. Tõenäoliselt oli nii kõrgetasemelise keelekorrektuuri tellimise põhjuseks soov alustada Riia trükikoja toodangut just selle kõnega, ent kalendrirahutused ei jõudnud trükikoja avamisajaks veel oodatud rahumeelse lahenduseni, mistõttu kodanikkonna ja rae üksmeelt kiitev kõne ei sobinud kirjastuse avaldamisprogrammi. Rohkem kui 200 Bruto tehtud tekstiparandust ei peegelda üksnes Euroopa ühe juhtiva humanisti arusaamu heast stiilist, vaid sellega seotult ka sisulistes küsimustes (näiteks religioonist), muuhulgas suhtumises hereetikutesse (Viiding, 2024b, 700–710). Kui trükikoda sai lõpuks 1591. aastal privileegid, oli Riias keeleteoimetaja koht juba ametlikult ette nähtud (Buchholtz, 1890, 20, 314) ja kirjanduselu muutus hakkas kinnistuma.

Olulist muutust tähendas veel rea põimumisel põhinevate kirjanduspraktikate levik ja kinnistumine 16. sajandi lõpus, näiteks loeti Frankfurdi ja Leipzigi raamatumessi katalooge, et saada infot värskest trükis ilmunud raamatute kohta ja neid tellida. David Hilcheni kirjadest nähtub, et tellimine toimus vahetult pärast kataloogide ilmutist. Näiteks soovis Hilchen 1608. aasta alguses hankida Helmstedti kolleegilt Johannes Angelius von Werdenhagenilt (1581–1652) 1607. aasta sügisese kataloogi põhjal tolle noorusluuletuste raamatut („Varia Poëmata Iuvenilia“, 1607), mille kolmandas osas oli avaldatud eeleogia Hilcheni tütre Leonora surma puhul (Viiding, 2024a, 128).⁴⁷

Ent varauusaegse Eesti-, Liivi- ja Kuramaa kirjandusnähtuste teket ja muutumist mõjutasid tollase Euroopa kirjandus- ja kultuuripraktikatega põimumisest isegi enam kohalikud ja regionaalsed konfliktid ja kriisid. Kirjanduslike muutuste

⁴⁷ Teiste varauusaegsete kirjanduslike praktikate ülevõtmise kohta Läänemere idakaldal vt Viiding, 2024a, 129–142.

lähtekohana tõusevad Eesti-, Liivi- ja Kuramaal esile eeskätt (naaber)kuultuuri-ruumide, konfessioonide, žanride ja seisuste piiril toimunud vastandumised ja vastasseisud.

Kultuuriruumide piiridel toimunust on kirjanduslike muutuste lähtekohana olulisim 16.–17. sajandi vahetuse vastuoluline Poola-Leedu võimuperiood Põhja-Baltikumis. Siin oli üheks konfliktide tekkepõhjuseks liiga kiire poliitiline, halduslik ja usuline muutus, mis põhjustas hirmu kultuurilise kokkusulamise ees naabrite, kirjandusliku „teise“ keele ja usutunnistusega (Viiding, 2023a, 57–58). Vastasseisu ägenemine viis suurte kirjanduslike kujundite tekkeni. Näiteks Kuramaa aadli ja hertsogite konflikti ja võimukriisi ajal 1615–1617 loodi pseudonüümide Aretinus Philaletes ja Agatho all ilmunud ajakajalises satiirilises värssdialoogis antiteetilised allegooriad Poolast kui Valetamise maast ja Kuramaast kui Tõerääkimise maast ning Poola kuningast kui kuradist (Viiding, 2026). Riia kujutati liialt poolameelsete hoiakute tõttu 16. sajandi lõpukümneni humanistlikus satiiris põrguna, selle elanikke põrgukoerte ja -poegadena (Viiding, 2019, *passim*). Ilmselt oli 16. sajandi lõpu Liivimaa lüürilistele luuletajatele vahetuks värsitehniliseks eeskujuks 1585–1592 Limbažis elanud Poola aadlikust diplomaadi ja kuningliku sekretäri, katoliku vaimuliku ja luuletaja Sebastian Grabowiecki (1540–1607) kaks vaimulikku luuleraamatut „Setnik rymów duchownych“ ja „Setnik rymów duchownych wtóry“. Ehkki need trükiti 1590. aastal Krakowis, mitte Riias, ja olid sügavast katoliiklikust õpetusest ajendatuna pühendatud Jeesuse, pühakute ja Neitsi Maarja ülistamisele, oli Grabowiecki esimene sonettide ja petrarkismi viljeleja poolakeelses luules ning see ei saanud olla luuletuste loomisajal teadmata Riia ja Liivimaa haritlasringkondadele, kes temaga vahetult lävisid (Hanusiewicz-Lavallee, 1994; teema on Liivimaa kirjakuultuuri aspektist täiesti uurimata). Kirjanduslike muutusi ei põhjustanud üksnes poola päritolu haridus- ja kirjanduslembese eliidi, näiteks Jan Zamoyski või tema humanistidest lähikonna mõju ja eeskuju Zamościs (Viiding, 2022b), vaid Poola-Leedu aadlivabariigi kaudu jõudsid Eesti-, Liivi- ja Kuramaale ka Itaalia hereetikute ning Madalmaade katoliiklaste ja kalvinistide humanistlikud kirjanduslikud praktikad (Viiding, 2022c).

Kirjanduslikeks muutusteks olid alid ka žanride piiri- ja üleminekualad. Üks sellistest varauusaegsel Eesti-, Liivi- ja Kuramaal muutumises olnud proosažanridest oli tänase tavajaotuse järgi tarbetekstide hulka kuuluv protokoll. Varauusajal oli protokoll nii ülesehituselt kui ka tekstielementidelt palju mitmekesisem, sarnanedes enam tõsielujutustusega. Protokoll (nagu ka aruande) kui žanri muutumise taga oli varauusajale iseloomulik üldine suulise kultuuri asendumine kirjalikuga ja oma tegevust kirjalikult jäädvustada soovivate ametkondade hulga suurenemine (kohtud, raed, maapäevad jpt). Varauusaegne protokoll ei tähendanud pelgalt istungite, koosolekute, lähetuste jms käigus tehtud kiretuid märkmeid, kuid ei põhinenud ka fiktsioonil, vaid kujutas endast kombinatsiooni eri tekstidest, sealhulgas narratiividest. Protokoll võis faktidel põhineva tõsielujutustusena moodustada seega institutsiooni, regiooni või mõnikord kogu maa ajaloo tuuma (Klöker, 2024).

Kolmandaks kirjandusmuutuste seisukohast eriti viljakaks kokkupuutealaks oli varauusaja Eesti-, Liivi- ja Kuramaal seisusepiiride ületamist püüelnud autorikond. Vana-Liivimaa lagunemine 1561. aastal ning poliitiline jagunemine eri riikide vahel tõi kaasa uutele võimudele (Poola-Leedu aadlivabariik, Rootsi ja Taani kuningriik) alluvate lojaalsete ametnike ja literaatide järjepideva aadeldamise. Uus teenistus- ja haridusaadel ning nende järeltulijad segunesid seejärel vana pärusaadliga nii abielude kaudu kui ka koduõpetajatena aadlinoorukite haridust ja hoiakuid kujundades. Samm-sammult tunnustas vana pärusaadel vastse teenistus- ja haridusaadli kirjanduslikke ja teaduslikke ideaale ja praktikaid, võttes need omaks (Viiding, 2024c). Tüüpiliseks näiteks on seisuslikult tõusev autorkond satiirižanris: kui Liivimaa esimese ladinakeelse aadlikriitilise värss-satiiri autoriks 1548. aasta paiku oli Riia kooli- ja kirikuõpetaja Rötger Becker (Viiding, 2023b), siis 16. sajandi teisel poolel ning 17. sajandi algul on see pigem uue teenistusaadli, näiteks Kuramaa hertsogi õukonnaga liitunud juristi Jost Clodti ja Riia sündiku David Hilcheni žanriks (Viiding, 2019); pilamiseks on aadli kõrval nüüd ka ühiskonna madalamad seisused, näiteks haritlased või linnakodanikud, ning ühiskonda laiemalt puudutavad poliitilised sündmused. 17. sajandi teises pooles viljeles alamsaksakeelset värss-satiiri aga juba põlisaadlik Gustav von Mengden ja nagu satiiri pealkiri „Viis kuradilast. Alamsaksakeelne satiir mõisate reduktsioonikomisjoni kohta Liivimaal“ ilmestab, on selle teemaks Rootsi keskvoimu kriitika (Viiding, 2025b).

3. Kirjandusliku muutuse estetiseerimine: Liivimaa vaikivad metsad hakkavad kõnelema

Hiljemalt 1580. aastate keskpaigas, veel enne regiooni esimese trükikoja avamist Riias, sai kirjanduslikust muutusest juba ka kirjanduslik motiiv. Märgates regiooni kirjanduspraktikate mahajäämust teiste Euroopa maade humanistlikust kirjandusdiskursusest ning Liivimaa vähest poeetilist kuulsust, muretses Liivi sõja ajal sündinud ja mujal Euroopa ülikoolides õppinud põlvkond regiooni kirjandusliku identiteedi kujundamise pärast. Näiteks kirjutas David Hilchen kaaslinlasele ja Heidelbergi studiumi aegsele õpingukaaslasele Heinrich von Bergile (1574–1626) doktorikraadi kaitsmise puhul ladinakeelse õnnitlusluuletuse ning kasutas värsket juuradoktori päritolu kirjeldades mitmetähenduslikku kujundit seni vaikinud metsarohkest Liivimaast (Hilchen, 2021, 56–59):

Prima tibi exhibit communes luminis auras,
Inter, quae, Prussos media inter et inclyta Russos
Et Lithuana, tacet nemorosa Liuonia, regna,
Terra potens duri studiisque asperrima belli:
Illa tuum postquam coepit sentire vigorem
Rupisse hac fertur taciturna silentia voce.

(„Metsaderikas Liivimaa oli esimene maa, mis andis sulle tavapärase eluvalguse – kuulus maa, mis on vakka preislaste ja venelaste ja kuulsa Leedu kuningriigi

vahel. Võimas maa, mis on oma karmides sõjapüüdlustes ägedaim. Pärast seda, kui talle sai teatavaks sinu vägevus, olevat ta oma täieliku vaikimise katkestanud sellisel häälel.“)

Vaikiva maa ja vaikivate metsade motiivis põimusid tollase ühiskonna kogemused ja hoiakud ajastu kujutava kunsti ja kirjandusteostega. Metsamotiivi inspiratsiooniallikate hulka kuulusid tollased maakaardid, näiteks Sebastian Münsteri Skandinaavia uus kaart (1540) või Gerardus Mercatori Euroopa kaart (1554), mis kujutasid Kirde-Euroopat maailmajao metsarikkaimana („Livoniae descriptio“, 2024, 88–89, 98–99). Metsamotiivis on peidus muudki: Liivimaa oli juba keskajast alates tuntud kunstitarvete tegemiseks vajalike metsasaaduste tootmise poolest. Uuemate materjaliuuringute järgi on teada, et paljud Euroopa kirikute renessansiaja altariretaablid ja ilmalike valitsejate tellitud õlimaalid olid tehtud liivimaist päritolu tammepuidule. Samuti imporditi just siinsete alade oravate karvu Lääne- ja Lõuna-Euroopasse kunstnikupintslite valmistamiseks (nt Sargent-Noyes, 2022). Kahtlemata teadis Riia kaupmehepoeg Hilchen viieaastase stuudiumi ning akadeemilise õppereisi lõpus (läbi Leedu, Poola, Saksamaa kuni Straßburgi ja Baselini) seda Liivimaa funktsiooni Euroopa kunstikaubanduses.

Lisades Liivimaa ja selle metsade kohta vaikimise epiteedi *taciturna*, aktiveeris Hilchen kohaspetsiifilise ettekujutuse oma eelkäijatest kaasmaalaste materiaalselt rikkast, kuid kirjanduskaugest elust. Kolm korda rõhutatud vaikus (*tacet, taciturna, silentia*) viitab sellele, et tema igatsuseks olid materiaalselt kasu toovate metsade asemel hoopis poetilised, muusade laulust vastu kajavad salad kui Orpheuse looming antiikses tähenduses (vt Ovidius „Metamorfoosid“ 10.90–106). Vaikus, st laulude ja luule puudumine Liivimaal oli Hilcheni arvates 1580. aastatel minevikku jäämas, sest just põlvkonnakaaslaste ülikooliõpingud, doktorereerumine ja sellega kaasnev õpetatus tõid kaasa aktiivse luuletamise ja sellega ühe suurima kirjandusliku muutuse kogu regioonis (Viiding, 2025a, *sine pag.*)⁴⁸

VIITED

Alttoa, V., Valmet, A. 1973. XVII sajandi ja XVIII sajandi alguse eestikeelne juhuluule. Tallinn.

Buchholtz, A. 1890. Geschichte der Buchdruckerkunst in Riga 1588–1888. Riga.

Hanusiewicz-Lavallee, M. 1994. Świat podzielony: o poezji Sebastiana Grabowieckiego. Rzym, Lublin.

Hasselblatt, C. 2016. Eesti kirjanduse ajalugu (tõlge saksa keelest). Tallinn–Tartu.

⁴⁸ Tänapäevane metsa kirjeldamine eestlaste vaimse maastiku ja mälupaigana (Mikita, 2020) on taasloomud 450 aasta taguse humanistliku vaate metsale. Seevastu antiikkirjandusest tuntud kohutavate, metsikute ja ohtlike metsade motiiv Liivimaa humanistlikus kirjanduses ei levinud.

- Hilchen, D. 2021. Sub velis poeticis. Lateinische Gedichte. – Viiding, K., Klöker, M., Lotman, M-K. (koost, tõlk., komm-d). Berlin, Münster.
- Järv, A. 2001. Eestikeelne kirjasõna 16.–18. sajandil. – Annus, E., Epner, L., Järv, A., Olesk, S., Süvalep, E., Velsker, M. (koost.). Eesti Kirjanduslugu. Tallinn, 24–38.
- Kannik, H-L., Maasik, K., Reimo, T., Vösa, A. 2025. Eesti võõrkeelne raamat ja Estonica 1494–1830. Kronoloogiline nimestik. I kd (1494–1710). Tallinn.
- Klöker, M. 2014. Tallinna kirjanduselu 17. sajandi I poolel (1600–1656). Haridusinstituutsioonid ja juhuluuletamine. Tallinn (täienduste ja parandustega tõlge eesti keelde).
- Klöker, M. 2022. Schule und Kirche. Heinrich Vestring als Reformier des Revaler Schulwesens. – Pasewalck, S., Eidukevičienė, R., Johanning-Radžienė, A., Klöker, M. (koost.). Baltische Bildungsgeschichte(n). Berlin, Boston, 241–263.
- Klöker, M. 2023. Literarischer Wandel und Verflechtungsgeschichte der Literatur. Die Leistungsfähigkeit eines Modells auf dem exemplarischen Prüfstand der baltischen Literaturen in vornationaler Zeit. – Klöker, M. (koost.). Literarischer Wandel in der Geschichte der baltischen Literaturen. Münster, Berlin, 15–48.
- Klöker, M. 2024. Faktijutustus XVII sajandil. Eestimaa rüütelkonna protokollide narratoloogiline struktuur. – Keel ja Kirjandus 5, 432–448.
- Kraus, A. 2005. Eine Medienrevolution in der ‘Peripherie’: Nicolaus Mollyn und die Anfänge des Rigaer Buchdrucks. – Zeitschrift für Ostmitteleuropa-Forschung 24(3), 317–349.
- Livoniae descriptio. Eesti ja Liivimaa vanadel kaartidel. 2024. Raid, T., Kruup, T. (koost.). Tallinn.
- Lukas, L. 2021. Balti kirjakuultuuri ajalugu I. Keskused ja kandjad. Tartu.
- Mikita, V. 2020. Forestonia = Estwald = Mine metsa!. Tartu.
- Roose, R., Piik, P., Sinissaar, T. 2025. Alguses oli laul. Pühendatud eestikeelse trükisõna 500. aastapäevale. Tallinn.
- Saareste, A., Cederberg, A. R. 1925–1931. Valik eesti kirjakeele vanemaid mälestisi A. 1524–1739. Tartu.
- Sargent Noyes, R. 2022. Furs, slaves, and wax. Perspectives on globalizing the art of the Baltic region before modernity. *Venia legendi* Tartu Ülikoolis 15. novembril 2022 (avaldamata käsikiri).

Šiško, S. 2013. Latvian catalogue of foreign language ancient prints 1588–1830. (= The Union Catalogue of foreign language ancient prints in Latvia 1588–1830). Riga.

Urmet, J. 2022. Eesti luule algus: juhtmõtteid. – Pruut, kuningas ja muusapoeeg. Eesti luule alus. Eestikeelne luule 1637–1721 transpoetiseerituna 21. sajandi kirjakeelde. Reval (Tallinn), 261–276.

Vaculinová, M., Viiding, K. 2024. Exiles from Bohemian Lands in Estonia after 1620 and Their Publishing Activities. – *Knihy a dějiny / Books and History* 31, nr 1/2, 8–23.

Viiding, K. 2019. Gefährliche Bücher, gefährliche Gattungen, gefährliche Vorlagen: Die Geburt der Satire in Livland. – Merisalo, O. (koost.). Book in context. *Renaissanceforum. Journal of Renaissance Studies* 15, 73–99. (http://www.renaissanceforum.dk/rf_15_2019.htm)

Viiding, K. 2020. The Humanist occasional Poetry in the Early Modern Estonia and Livonia. – Möller, D., Lindgärde, V., Vetushko-Kalevich, A., Jönsson, A. (koost.). *Att dikta för livet, döden och evigheten: Tillfällesdiktning under tidigmodern tid*. Göteborg, 33–47.

Viiding, K. 2021. *Veluti academiae Livonicae principium futurum*: kõrgkooli rajamise plaanid Liivimaal enne Rootsi aega. – Lotman, P. (koost.). Kirik, keel ja kool. Haridusideed varauusaegsel Liivi- ja Eestimaal. Eesti Rahvusraamatukogu Toimetised 17. Allseeria Raamat ja aeg 6. Tallinn, 63–89.

Viiding, K. 2022a. David Hilchen und seine Expertenkorrespondenz. – Viiding, K., Siimets-Gross, H., Hoffmann, T., Klöker, M. (koost.). *Briefe, Recht und Gericht im polnischen Livland am Beispiel von David Hilchen / Letters, Law and Court in Polish Livonia. The Case of David Hilchen*. Berlin-Münster, 17–69.

Viiding, K. 2022b. *Academiae voluntas mihi potior est...* Letters by the Livonian humanist and lawyer David Hilchen to the professors of the Academy of Zamość 1603–1609. – *Terminus. Czasopismo Poświęcone Literaturze I Kulturze Dawnej*. 2/2022, 159–213.

Viiding, K. 2022c. Libastunud Lipsius? Flaami humanist Justus Lipsius varauusaegsel Eesti- ja Liivimaal. – *Tuna. Ajalookultuuri ajakiri* 3, 2022, 65–78.

Viiding, K. 2023a. Wandel durch Verflechtung, Wandel durch Konflikt. David Hilchen und die literarische Blüte in Riga 1585–1600. – Klöker, M. (koost.). *Literarischer Wandel in der Geschichte der Baltischen Literaturen*. Münster, Berlin, 49–58.

Viiding, K. 2023b. Rötger Beckeri värss-satiir „Eleegia aadlike tõelisest päritolust ja nende pahelistest kommetest“: humanistlik kirjandusuuendus Liivimaa ühiskonnakriitika teenistuses. – Seppel, M., Maasing, M. (koost.). *Muutused*,

ümberkorraldused, uuendused: Varauusaja arengujooned Eesti- ja Liivimaal, 1520–1800. Tallinn, 579–603.

Viiding, K. 2024a. Arranging the learned literary and book culture around the Baltic Sea in the early 17th century: the case of the Livonian-Polish humanist David Hilchen. – Kallio, K.; Lehtonen, T.; Lahtinen, A.; Leskelä, I. (koost.). Networks, Poetics and Multilingual Society in the Early Modern Baltic Sea Region. Leiden, 118–143.

Viiding, K. 2024b: Improving Humanist Latin in the Periphery of North-Eastern Europe. – Schaffenrath, F., Sacre, D. (koost.): Acta Conventus Neo-Latini Lovaniensis II. Proceedings of the Eighteenth International Congress of Neo-Latin Studies (Leuven 2022). Leiden, 700–710.

Viiding, K. 2024c. Eesti- ja Liivimaa haritlaste nobiliteerumisprotsessi kajastusi 1630.–1640. aastate luules ja kunstis. – Lotman, P. (koost.). Pildikeel kirjakultuuris. The Language of images in literary culture. Eesti Rahvusraamatukogu Toimetised 18. Allseeria Raamat ja aeg 7. Tallinn, 2024, 74–100.

Viiding, K. 2025a. Aus *taciturna nemora* in *silvae sonantes*: Pragmatik und Ästhetik der livländischen Gelegenheitsdichtung. – Laureys, M., De Smet, I. (koost.): Well-wrought Snapshots: Balancing Aesthetics and Pragmatics in Neo-Latin Occasional Poetry (1450–1800). Turnhout [ilmumas].

Viiding, K. (koost.) 2026. Pro domo sua: valik Eesti-, Liivi- ja Kuramaa aadlike luulet 1561–1730. – Viiding, K (koost.); Viiding, K., Lotman, M-K. (tõlge); Dāboliņš, V., Jānes, M., Klöker, M., Lotman, M-K., Vanamölder, K., Viiding, K., Vōsa, A. (tekstieditsioon ja kommentaarid). Tallinn [ilmumas].



Martin Klöker ja Kristi Viiding. Foto: Arno Mikkor

Kristi Viiding

Sündinud 24. mail 1972 Viljandis

1990 Viljandi 5. Keskkool

1995 Tartu Ülikool, eesti filoloogia (BA), klassikaline filoloogia (BA)

1997 Tartu Ülikool, klassikaline filoloogia (MA)

2022 Tartu Ülikool, klassikaline filoloogia (PhD)

Latinisti ja kirjandusloolase Kristi Viidingu peamiseks uurimisvaldkonnaks on varauusaegne ladinakeelne kirjandus Läänemere regioonis, ilmaliku eestikeelse kirjasõna teke 17. sajandil ning ladina epigraafika Läänemere regioonis. Ta on olnud ametis Eesti Teaduste Akadeemia Underi ja Tuglase Kirjanduskeskuse juhtivteadurina ja alates 1. septembrist 2025 direktori kohusetäitjana. Lisaks on ta rahvusvahelise uuslatinistide assotsiatsiooni IANLS peasekretär. Ta on avaldanud üle 100 teaduspublikatsiooni ning tõlkinud nii saksa kui ka klassikalisest, keskaegsest ja uusladina keelest.

Kristi Viiding juhib teadusprojekti „Kokkupuuted, üleminek, muutus: *nobilitas haereditaria ac litteraria* varauusaegse kirjanduse väljakujunemisel Poola ja Rootsi Liivimaal“ (Eesti Teadusagentuuri grant PRG1926).

Martin Klöker

Sündinud 2. septembril 1966 Wuppertalis

1986 Osnabrücker Carolinumi Gümnaasium

1993 Osnabrücker Ülikool, üldine ja võrdlev kirjandusteadus ning üldine ja võrdlev keeleteadus (MA)

2004 Osnabrücker Ülikool, germanistika (PhD)

Kirjandusteadlane ja germanist Martin Klöker uurib saksa kirjanduse ja kultuuri ajalugu Baltimaadel selle rahvusvahelises kontekstis. Tema huvi on suunatud eriti varauusaja kirjakultuurile, kuid hõlmab ka raamatulugu, hariduse ja mentaliteediajalugu, kirjanduslike väikevormide (juhuluule) ja argikirjanduse (protokollid) valdkondi. Ta on Eesti Teaduste Akadeemia Underi ja Tuglase Kirjanduskeskuse juhtivteadur ning ühingu Balti Ajaloo Komisjon eestseisuse liige. Ta on avaldanud arvukalt publikatsioone saksa, aga ka eesti ja inglise keeles ning tema algatusel ja koostamisel ilmub sari „Baltische literarische Kultur“ (LIT Verlag), mis sisaldab teaduslikke käsitlusi ja allikpublikatsioone peamiselt Eesti ja Läti ala saksakeelsest kirjakultuurist.

Martin Klöker osaleb teadusprojekti „Kokkupuuted, üleminek, muutus: *nobilitas haereditaria ac litteraria* varauusaegse kirjanduse väljakujunemisel Poola ja Rootsi Liivimaal“ (Eesti Teadusagentuuri grant PRG1926) täitmisel.