EESTI VABARIIGI TEADUSPREEMIAD 2026

ACADEMIA SCIENTIARUM ESTONIAE

Riigi teaduspreemiate laureaadid 18. veebruaril 2026 Eesti esindushoones.
Tagumises reas vasakult: Hannes Keernik, Heido Trofimov, Jorma Rahu, Sten Hansson, Karsten Staehr, Martin Zobel, teaduste akadeemia president Mart Saarma, Targo Kalamees, Martti Raidal, Kristjan Kannike, Kaido Tammeveski, Heiki Erikson ja Marek Mooste.
Esimeses reas vasakult:Velle Toll, Piia Post, Evelin Loit-Harro, Liina Talgre, Kati Orru, haridus- ja teadusminister Kristina Kallas, peaminister Kristen Michal, Mario Kadastik, Triin Laisk, Helle Metslang, Ave Sarapuu ja Jaana Lilloja-Lensment. Foto: Erlend Štaub

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

ISSN 2674-3019
©Eesti Teaduste Akadeemia 2026

SISUKORD

Martin Zobel
ELURIKKUSE MUSTRITE UURIMINE 4

Mario Kadastik, Kristjan Kannike ja Martti Raidal
HIGGSI BOSONI AVASTAMISE LUGU 20

Velle Toll, Hannes Keernik, Jorma Rahu,
Heido Trofimov, Piia Post ja Tanel Voormansik
SUURIM TUNDMATU INIMTEGEVUSE KLIIMAMÕJUS 31

Kaido Tammeveski, Ave Sarapuu, Heiki Erikson, Marek Mooste,
Jaana Lilloja-Lensment ja Srinu Akula
UUDSED NANOSTRUKTUURSED ELEKTRO-KATALÜSAATORID MADALATEMPERATUURSETELE KÜTUSEELEMENTIDELE JA TSINK-ÕHK AKUDELE 41

Targo Kalamees
KORTERELAMUTE TERVIKRENOVEERIMISE ARENDUSTÖÖ EESTIS VIIMASE 20 AASTA JOOKSUL – PANEELMAJA VUUKIDE TIHENDAMISEST KUNI NAABRUSKONNA TEHASELISE RENOVEERIMISENI 70

Triin Laisk
NAISTE TERVISE GENEETIKA 97

Evelin Loit-Harro ja Liina Talgre
KVALITEETNE SAAK KESKKONNASÕBRALIKULT JA EESTI MAAD HOIDES 111

Kati Orru ja Sten Hansson
KUIDAS MÄRGATA JA VÄHENDADA INIMESTE HAAVATAVUST HÄDAOLUKORDADES? 126

Karsten Staehr
EUROOPA MUUTUMISE MAKROÖKONOOMILISED PÕHJUSED JA TAGAJÄRJED: VALITUD UURIMUSED 138

Helle Metslang
KUUS VAADET KEELELE 154

https://doi.org/10.3176/evp.2026.01

ELURIKKUSE MUSTRITE UURIMINE

Martin Zobel (Tartu Ülikool)

Teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest

Sissejuhatus

Taimekoosluste ökoloogia kirjeldab liikide koosesinemise mustreid ning selgitab mustrite tekkemehhanisme. Looduslikud taimekooslused võivad olla bioloogiliselt väga mitmekesised, st koosneda paljudest liikidest (genotüüpidest), samas leidub kooslusi, mis on silmapaistvalt ühetaolised. Mitmekesisus on eelkõige arvuline näitaja, mis iseloomustab liikide üldist hulka ja proportsioone koosluses. Mõnel juhul on biomass liikide vahel jaotunud ühtlaselt, teisel juhul esinevad koosluses suure osakaaluga dominandid.

Liike saab iseloomustada ka nende omaduste põhjal, hinnates või mõõtes liikide tunnuseid. Kvantitatiivne (liikide arv) ja kvalitatiivne (funktsionaalne eripalgelisus) mitmekesisus kujundavad koosluse ülesehituse, ruumilise struktuuri ja dünaamika.

Pärast bioloogilise mitmekesisuse konventsiooni allkirjastamist 1992. aastal Rio de Janeiros on elurikkus (eestikeelne vaste ingliskeelsele terminile *biodiversity*, kasutatakse ka vastet *bioloogiline mitmekesisus*) olnud suuremal või vähemal määral ühiskonna huviorbiidis. See on ühelt poolt hoogustanud koosluseökoloogia arengut, teisalt aga on poliitiline mõõde kohati hakanud varjutama sisu.

Käesolevas ülevaates keskendun eelkõige taimede elurikkuse uurimise teaduslikele aspektidele, mitte poliitikale. Rõhuasetus on nendel teemadel, millega olen Tartu Ülikoolis tegelnud. Kirjutan aga meie-vormis, sest lõviosa tööst on tehtud minu heade kolleegide ja õpilaste poolt või nende kaasabil.

Taimekoosluste elurikkuse mustrid

Globaalses skaalas kasvab elurikkus poolustelt ekvaatori suunas, geoloogiliselt noorematelt aladelt vanemate piirkondade suunas, absoluutse kõrguse kasvades kaasneb tavaliselt mitmekesisuse vähenemine (Kier jt, 2005). Globaalsed elurikkuse kontrastid võivad olla küllalt suured – kui näiteks tundras on tõenäoline

leida ühelt hektarilt 20–30 soontaime liiki, siis troopilise vihmametsa hektarilt on mõnikord raske leida kaht sama liiki puud ja taimeliikide koguarv hektaril küündib tuhandeni.

Ühetaolise kliimaga alal varieerub elurikkus seoses mullaparameetritega, sõltudes näiteks mullaviljakusest või reaktsioonist (pH). Seoste iseloom aga võib regiooniti erineda. Näiteks kui parasvöötme Euraasias taimede liigirikkus üldjuhul kasvab koos mulla pH tõusuga, siis troopika puhul on see seos tihti vastupidine (Pärtel, 2002). Juhul kui tegemist oleks funktsionaalse seosega, ei tohiks see geograafiliselt varieeruda. Paratamatult tekib küsimus, mis sellise omapärase olukorra kujundab.

Hoolimata oma väiksusest paistab Eesti silma taimekoosluste elurikkuse suure varieerumise poolest. Vähendades ruumiskaalat hektarilt ruutmeetrile, on taimede liigirikkuse kontrast võrreldav globaalse kontrastiga tundra ja troopilise vihmametsa vahel. Näiteks kui kanarbikunõmmel leiame ruutmeetrilt mõnel juhul ainult 2–3 liiki, siis lubjarikka mullaga puisniidul võib ühel ruutmeetril kasvada 60–70 liiki (Pärtel jt, 1996). Ka selline muster tekitab küsimuse, mis tingib elurikkuse nii suure variatsiooni väikeses samalaadse ajaloo ja kliimaga piirkonnas.

Mullaprofiili kirjeldamine ja proovide kogumine rabastuvas männikus.
Hiljem määratakse mulla füüsikalised ja keemilised parameetrid ning uuritakse mullast eraldatud DNA-d. Esiplaanil on molekulaarse ökoloogia professor akadeemik Maarja Öpik ja Martin Zobel. Foto: erakogu

Elurikkust seletavad teooriad ja nende areng

Elurikkuse globaalse varieerumise põhjuseid on biogeograafias põhjalikult analüüsitud (Mittelbach jt, 2007). Liikide mitmekesisus mingis regioonis on positiivses seoses vastava piirkonna geograafilise ulatuse ja geoloogilise vanusega, aga olulist rolli mängivad ka muud elurikkust kujundavad mehhanismid, näiteks on keskmine temperatuur positiivses seoses mutatsioonide sagedusega.

Erinevalt biogeograafiast töötab koosluseökoloogia lokaalses skaalas ning keskendub organismidevahelistele suhetele kui koosluste elurikkuse kujundajatele (Chesson, 2018). Liikide pikaajalise kooselu eelduseks on omavahelise konkurentsi minimeerimine, mis hoiab ära ühtede liikide väljatõrjumise teiste poolt. Näiteks kui liigid tarvitavad erinevaid ressursse või hangivad samu ressursse erinevatest ruumipunktidest eri ajahetkedel, ei konkureeri nad omavahel. Stressirohkes keskkonnas keskenduvad liigid pigem raskete tingimuste üleelamisele kui omavahelisele võitlusele. Seetõttu võib keskkonnatingimustest põhjustatud stress soodustada liikide kooselu.

Klassikaline koosluseökoloogia ei seleta piisavalt paljusid lokaalseid mustreid, näiteks Eesti taimekoosluste elurikkuse suurt varieerumist. Teooria edasine kontseptuaalne areng on toimunud peamiselt kahes suunas. Esiteks, kui varem seletati suureskaalalisi elurikkuse mustreid suureskaalaliste protsessidega ja väikeseskaalalisi mustreid väikeseskaalaliste protsessidega, siis nüüd toimub justkui skaalade kombineerimine – väikeseskaalalisi mustreid seletatakse suureskaalaliste protsessidega.

Teiseks on taimekoosluste mitmekesisuse seletamisel hakatud arvesse võtma heterotroofsete organismide mõju, olgu need siis imetajad, linnud, putukad või koguni mikroobid. Olgugi et fookuses on taimede elurikkus, ei järeldu sellest kuidagi, et seda varieerumist saab seletada ainult taimedest lähtudes.

Taimekoosluse elurikkus sõltub paljuski sellest, milliste organismide arvukust taim alla surub või soodustab. Kui taim soodustab enda ümber patogeensete mikroobide kogunemist, siis lõppkokkuvõttes surub ta alla iseennast. Kui aga taim soodustab endale kasulikke organisme, näiteks mükoriisaseeni, siis võib see talle pakkuda kaitset patogeenide eest. Seega võib taimede mitmekesisuse mustri selgitus (vähemalt teatavates piirides) tulla sealt, kust seda oodatagi ei osata – mikroobiökoloogiast (Bever jt, 2010).

Oma uurimistöödes olemegi tegelnud nende kahe elurikkuse kujunemist seletava suuna arendamisega. Skaalade kombineerimise raames oleme rakendanud elurikkuse suureskaalalise mustri kujunemist seletavaid teooriaid lokaalsete elurikkuse mustrite seletamiseks. Tähistame seda osa oma uurimistööst koondnimetusega „liigifondi teooria“.

Teiseks oleme taimeliikide kooselu seletamisel sisse toonud uue dimensiooni – positiivsed interaktsioonid taimede ja seente vahel. Konkreetselt oleme pühendu-

nud mükoriisa ehk seenjuure rolli uurimisele. Valdavalt oleme tegelnud kõige levinumale mükoriisatüübile (arbuskulaarne mükoriisa, AM) omaste krohmseente leviku, ökoloogia ja biogeograafiaga. Tähistame seda osa koondnimetusega „mükoriisa ökoloogia“.

Liigifondi teooria

Elurikkuse lokaalset mustrit kirjeldavad teooriad piirduvad mõne- kuni mõnesajaaastase ajaskaalaga ning indiviidide mõõtmetele enam-vähem vastava ruumiskaalaga. Sellises skaalas saab uurida taimeliikide konkurentsi mehhanisme, mis viivad mõne liigi kadumisele ning tagavad edu teistele. Kogu varasem teooria keskendus sellele, kuidas juba olemasolev elurikkus säilib, aga vaatas mööda küsimusest, kuidas elurikkus kujunes.

Samas oli ja on elurikkuse mustrite kujunemine biogeograafia fookuses. Seega oli tekkinud olukord, et liigirikkuse kujunemist käsitleti biogeograafias suures skaalas, elurikkuse püsimist aga koosluseökoloogias väikeses skaalas. Paraku side ökoloogiliste ja biogeograafiliste teooriate vahel praktiliselt puudus.

Vajadus skaalasid kombineerida leidis laiemat kõlapinda tänu Ricklefsi (1987) teoreetilisele artiklile. Taylor jt (1990) sõnastasid esimesena nn liigifondi hüpoteesi, väites, et lokaalset elurikkust määravad suureskaalalised protsessid. Viimase all mõistetakse antud tingimustele kohastunud ning piirkonnas kättesaadavat liikide hulka. Zobel (1992) arendas liigifondi hüpoteesiga seotud teooriat edasi ja esitas üldistatult loetelu neist protsessidest, mis liigifondi – mingit elupaika potentsiaalselt asustavate liikide kogumit – kujundavad. Nendeks on evolutsioon, migratsioon (liikide liikumine mandrite ja regioonide vahel) ning liikide lähilevi maastikus ja ka koosluste piires.

Järgnenud empiirilised uurimused näitasid, et taimekoosluste elurikkuse muster kannab endas alati tugevat ajaloo jälge (Pärtel jt, 1996; Zobel jt, 2011). Taimeliikide peamised kohastumused kujunesid välja juba kunagistes liigitekkepiirkondades. Seetõttu peegeldab nüüdisaegne elurikkus vastavust praeguste ja kunagiste liigitekkepiirkondade tingimuste vahel. Kui need tingimused kestsid ajaloos pikka aega ja esinesid suurel pindalal, siis tekkis rohkem ka vastavate kohastumustega liike. Lisaks peegeldab praegusaegne kohalik elurikkuse muster edukaid ajaloolisi migratsioone. Elurikkamad on need paigad, kuhu liigid kergemini kohale jõudsid.

Ülemaailmselt kogunev info liikide ökoloogia ja leviku kohta lubas teha järgmise arenguhüppe ja välja töötada meetodid konkreetsesse piirkonda ja keskkonda sobiva liigifondi ennustamiseks (Carmona, Pärtel, 2021). Kui liik on piirkonnas olemas, võib maastike struktuur tema jõudmist kohalikku kooslusesse kas soodustada või takistada. Näiteks erinevate kasvukohtade rohkus, aga samuti veekogude ja mägede olemasolu võivad olla levimise looduslikuks takistuseks. Üha olulisemaks saab tänapäeval aga inimese mõju, mis maastike kujundamise kaudu oluliselt mõjutab liikide levikut.

Elurikkuse inimtekkelised muutused

Inimtegevuse negatiivset mõju elurikkusele on kirjeldatud ammu. Bioloogilise mitmekesisuse konventsiooni ellukutsumise peamiseks põhjuseks 1992. aastal oligi vajadus negatiivset mõju vähendada ja võimalusel protsess tagasi pöörata.

Suures plaanis on inimese negatiivne mõju elurikkusele suhteliselt hästi nähtav, sest vähemalt suuremate organismide (imetajad, linnud, soontaimed) liikide väljasuremine on enamasti piisavalt hästi dokumenteeritud. Praktika aga näitab üllataval kombel, et hinnata inimtegevuse mõju lokaalsele elurikkusele on tunduvalt raskem. See kehtib isegi siis, kui jätame vaatluse alt välja olukorrad, kus inimtegevus on kooslusi „rikastanud“ muudest piirkondadest pärit võõrliikidega (Ronk jt, 2017). Nii mõnedki globaalsed uurimused on veidi üllataval kombel järeldanud, et inimese mõju lokaalsele taimede elurikkusele kas ei ole statistiliselt oluline või on mingis osas positiivne (Vellend jt, 2013; Dornelas jt, 2014).

Sellistele järeldustele viib metoodika, mis ei suuda eristada elurikkuse looduslikku ja inimtekkelist varieerumist. Adekvaatse hinnangu inimtegevuse mõju kohta saab anda ainult siis, kui on olemas piisav info liigifondi kohta. Pärtel jt (2013) näitasid, et reaalselt looduses mõõdetaval elurikkusel on alati kaks komponenti – regionaalne (liigifondi suurusest tulenev) ja lokaalne (kohalike protsesside poolt kujundatud).

Liigifondide suuruse erinevust arvestades tuleks elurikkust alati hinnata suhtelises skaalas, arvutades koosluse täielikkuse (*community completeness*). Viimane näitab, kui palju antud tingimustele sobivast liigifondist on vaadeldaval alal esindatud.

Eelnevast järeldub, et kui me suudame adekvaatselt ennustada liigifondi suurust ja koosseisu, saame sisuliselt ettekujutuse maksimaalsest looduslikust elurikkusest antud ruumipunktis. Teades reaalset elurikkust samas punktis, saame selle põhjal välja arvutada koosluse täielikkuse, mis näitab, kui suur osa potentsiaalsest elurikkusest on reaalselt kohal. Täielikkus võib vähesel määral sõltuda ka looduslikest protsessidest, aga arvestades inimmõju ulatuslikkust tänapäeva maastikes, võib eeldada, et täielikkus on suuresti siiski hinnang inimmõju tugevusele. Juhul kui see loogika kehtib, oleks ökoloogide käsutuses esimest korda selline tööriist, mis lubab öelda, et antud ökosüsteemis on elurikkus suhteliselt madal või kõrge, pidades silmas võrdlust loodusliku, inimtegevusest vähe mõjutatud olukorraga.

Dark Diversity Network

Ülalkirjeldatud põhimõtete kontrollimiseks kutsus professor Meelis Pärtel 2019. aastal ellu taimeökoloogide rahvusvahelise võrgustiku DarkDivNet eesmärgiga koguda globaalseid andmeid taimekoosluste täielikkuse hindamiseks ja selle seostamiseks inimmõju tugevusega. Võrgustiku liikmed kogusid taimede elurikkuse andmeid kokku 5415 proovipunktist, töö tulemused avaldati ajakirjas

Nature (Pärtel jt, 2025). Vähese inimmõjuga kooslustes oli keskmiselt kohal 35% liigifondist. Seega piiravad lokaalset elurikkust oluliselt ka mitmesugused looduslikud protsessid, nagu levimisbarjäärid maastikes, frugivooria (viljade söömine loomsete organismide poolt), taimedevaheline konkurents jms. Sellistes piirkondades, kus inimese ökoloogiline jalajälg oli tugev, oli esindatud vähem kui 20% liigifondist. Inimese mõju elurikkusele avaldub seega koosluse täielikkuse vähenemise kaudu.

Metoodilisest seisukohast väga oluline tulemus oli see, et elurikkuse absoluutne väärtus ei seondunud ökoloogilise jalajäljega. Seega ilma liigifondi arvesse võtmata oleks käesolev uurimus andnud varasemast juba tuttava tulemuse – inimtegevus ei mõjuta kohalikku elurikkust. Arvestades reaalset elurikkuse potentsiaali – liigifondi –, oli aga võimalik eristada looduslikku variatsiooni ja inimmõju poolt põhjustatud elurikkuse kadu.

Kas suhted organismide vahel mõjutavad elurikkust?

Kui regionaalses liigifondis esinevad liigid levivad potentsiaalselt sobivasse kasvukohta, puutuvad nad kokku erinevate organismidega. Liigi lõplik püsimajäämine sõltub kohapealsetest suhetest teiste organismidega. Varem on koosluseökoloogia pööranud eriti suurt tähelepanu just taimedevahelise konkurentsi uurimisele, pidades nimelt seda suhet peamiseks kooslust kujundavaks teguriks.

Lisaks konkurentsile toimivad taimekoosluses aga veel mitmed muud suhted. Paljud loomsed organismid kasutavad taimi toiduks, selline suhe on kasulik sööjale ja kahjulik söödavale. Suhe võib aga olla mutualistlik, st kasulik mõlemale osapoolele. Näiteks on viimastel aastatel pööratud suurt tähelepanu taime ja seene vastastikku kasuliku kooselu vormile – seenjuurele ehk mükoriisale. Lisaks seentele mängivad taimede elukäigu kujundamisel olulist rolli ka paljud muud mutualistlikud mikroobid, kelle hulgas on vetikaid, baktereid, viirusi. Peremeesorganismi koos kõigi seotud mikroorganismidega nimetatakse Margulise (1991) eestvõttel holobiondiks ehk tervikorganismiks. Holobiont toimib ühtse ökoloogilise ja evolutsioonilise üksusena.

Kui taimede kooselu mikroobsete organismidega oli teada juba ammu, siis mikroobide mõju taimekoosluste struktuurile ja dünaamikale on tänu uutele meetoditele hakatud nägema alles üsna hiljuti. Mikroobide olemasolu ja osalus ökosüsteemides on tohutult mitmekesine ja paljuski veel tundmatu (Tedersoo jt, 2020).

Mükoriisa ökoloogia

Mükoriisa ehk seenjuur on vastastikku kasulik kooselu taime ja seene vahel: seen aitab taimel omandada mullast toitaineid ja vett ning kaitseb patogeenide

eest, saades taimelt vastutasuks elutegevuseks vajalikke süsivesikuid. Looduses imabki suur osa taimi toitaineid just mükoriisaseente mullas olevate seeneniitide, mitte oma juurte kaudu. Mükoriisaseente hüüfid eritavad mulda aineid, mis tõstavad mullaosakeste sidusust ja parandavad mulla struktuuri.

Eristatakse mitut mükoriisatüüpi. Enim levinud ja evolutsiooniliselt vanim on (vesikulaar-)arbuskulaarne mükoriisa (AM), mida moodustavad seened hõimkonnast *Glomeromycota* ligikaudu 80% taimeliikidega enamikus maismaaökosüsteemides. Ektomükoriisa on mitmete kott- ja kandseente rühmade kooselu peamiselt puittaimedega valdavalt parasvöötme metsades, aga ka mujal. Erikoidne mükoriisa kottseente ja kanarbikulaadsete taimede vahel on valdav mükoriisatüüp nõmmedel, tundras ning mägedes; orhidoidset mükoriisat moodustavad kandseened käpalistega, monotropoidset mükoriisat kandseened ja klorofüllita kanarbikulaadsed taimed jne.

Taimeliigid on kohastunud eluks kindlates keskkonnatingimustes. Nii ei üllata meid see, et angerpist kasvab loopealsel ja jänesekapsas laanekuusikus. Samuti teame, et need liigid ei kasva Amazonase vihmametsas, nii nagu Amazonase liigid ei kasva Eesti metsades. Paraku ei võimalda arusaam taimede ja keskkonna suhetest seletada kogu bioloogilist mitmekesisust. Angerpisti võime leida kõigist loometsadest, mägitarna aga vaid mõnest. Jänesekapsas kasvab peaaegu kõigis laane- ja salukuusikuis, ent koldnõges on märksa hõredama levikuga.

Põhjuseid võib olla mitmesuguseid. Killustatud maastikes on mõnede taimeliikide seemned levimisel edukamad kui teised. Maastikus võib puududa taimele vajalik tolmeldaja või tegutseb seal just sellele taimeliigile iseloomulik kahjur. Aga tihti ei ole taime esinemisele või puudumisele lihtsat selgitust. Võib küsida, kas taime levikut ja ohtrust võib mõjutada ka sobivate mükoriisaseente olemasolu antud kasvukohas.

Idee, et mükoriisa võib mõjutada mitte ainult taimeisendite kasvu ja paljunemist, vaid selle kaudu ka taimede edukust konkurentsis ja lõppkokkuvõttes koosluse elurikkust, ütlesid selgelt välja Grime jt (1987). Nad näitasid oma teedrajavas eksperimendis, et taimede kooselu sõltub seenjuure esinemisest või puudumisest. Kui koos kasvanud katsetaimedel esines mükoriisa, leevendus konkurents taimede vahel ning ükski liik ei saavutanud sellist võimekust, et oleks teised välja tõrjunud. Ilma mükoriisata süsteemis väljendus selgelt tugevamate liikide domineerimine, mis pikas ajaskaalas viib nõrgemate liikide väljatõrjumisele.

Arendasime Tartu töögrupis Grime'i ideed edasi, püüdes muuta eksperimendi tingimusi looduslähedasemaks. Seetõttu nakatasime taimejuuri mitte laboris kasvatatud seenekultuuridega, vaid erinevate loodusest pärinevate AM-seenekooslustega. Sellise eksperimendi ülesehituse puhul tekib aga õigustatud küsimus, milliseid seeneliike need looduslikud kooslused sisaldavad?

Suurt osa juurtes elavaid AM-seeni ei saa paraku määrata välimuse järgi, liikide (genotüüpide) äratundmine on võimalik vaid molekulaarseid meetodeid

appi võttes. Viimase aja molekulaarbioloogia edusammud on loonud võimaluse määrata mikroobseid organisme looduslikust keskkonnast nende pärilikkusaine järjestuste alusel kiiresti ja efektiivselt (Öpik jt, 2009). Nii saab mulla- või juureproovist määrata kõik seal leiduvad seened, ilma et neid peaks tingimata palja silmaga nägema. Et määrata liigi täpsusega, tuleb teada otsitavate liikide geneetilist varieeruvust kasutatavas markerregioonis.

Meie poolt kasvuhoones läbi viidud katsed näitasid, et katsetaimede kasv sõltus väga oluliselt sellest, millise seenekooslusega olid nende juured nakatatud. Ilma mükoriisata kasvanud katsetaimed jäid küll ellu, aga nende biomass oli väga väike. Kui kasutasime palumännikust pärinevat madala mitmekesisusega seenekooslust, kasvasid katsetaimed märgatavalt paremini kui ilma mükoriisata variandis. Kasutades aga kuiva rohumaa elurikast seenekooslust, kasvasid katsetaimed veel oluliselt paremini (Moora jt, 2004).

Selline näivalt lihtne tulemus – seenekoosluste erinev mõju katsetaimede kasvule – muutis oluliselt arusaama taimekoosluste mitmekesisuse kujunemisest. Taimede edukus ja sellest sõltuv kooselu teiste taimedega sõltub seega lisaks abiootilisele keskkonnale (muld, kliima) ja makroorganismidele (teised taimed, loomad) olulisel määral ka ökosüsteemi nähtamatust komponendist – mikroobikooslusest. Taimele sobivate mükoriisaseente esinemine või puudumine antud kohas võib olla taime edukusele kriitilise tähtsusega.

Et selgitada seenjuure mõju taime elukäigule, kasvatatakse katsetaimi koos erinevate mükoriisaseentega kasvuhoones. Fotol paremalt teine on koosluseökoloogia professor Mari Moora. Foto: erakogu

Saadud tulemustest järeldus, et taimede elurikkuse mustrite seletamiseks vajame infot ka selle kohta, kus levivad neile sobivad seenpartnerid. Meie üllatuseks olid meid huvitavate AM-seente levikut ja mitmekesisust puudutavad andmed väga lünklikud. Kuna uue põlvkonna sekveneerimisplatvormid lubasid seente molekulaarset määramist mulla- ja juureproovidest oluliselt kiirendada, tuli algselt välja töötada metoodiline baas uuringute teostamiseks, mis päädis AM-seente elurikkuse globaalse andmebaasi loomisega (Öpik jt, 2010). Järgmiseks sammuks sai AM-seente globaalse elurikkuse mustri uuring (Davison jt, 2015), mida hiljem täiendasime (Pärtel jt, 2017; Davison jt, 2018). Leidsime, et paljud seeneliigid on globaalse levikuga, kuid siiski peegeldub ka nende jaotuses ajaloo jälg ning lisasime ka info teiste mikroobsete organismide kohta (Vasar jt, 2022).

AM-seente toel püsib taimekoosluste elurikkus suurem, sest konkurents erinevate taimeliikide vahel on tänu mükoriisale paremini tasakaalustatud (Zobel jt, 2023). Eksperimentaalsetes süsteemides õnnestub küllalt tihti luua olukord, kus seenjuure olemasolu tasakaalustab liikidevahelist konkurentsi, võimendades samal ajal liigisisest konkurentsi. Looduslikes kooslustes tagab sellise mehhanismi töötamine kahtlemata lokaalses skaalas tunduvalt suurema taimeliikide mitmekesisuse, kui seda võiks oodata ilma mükoriisata kooslustes. Ektomükoriissete puude puhul, milleks on ka meie tavalised okaspuud kuusk ja mänd,

Väliksperimendi rajamine kuusiku ökosüsteemis. Uuritakse mükoriisaseente mõju metsa alustaimestiku liikide kasvule ja uuenemisele. Esiplaanil vasakul on molekulaarse ökoloogia professor akadeemik Maarja Öpik ja paremal koosluseökoloogia professor Mari Moora. Foto: erakogu

samuti enamik lehtpuid, võib aga olukord olla vastupidine – mükoriisa parandab nimetatud liikide hakkamasaamist sedavõrd, et kujuneb välja mingite puuliikide lausaline domineerimine.

Meie edasised uurimused on suunatud taimede ja seente kooselu paremale mõistmisele ja seeläbi paremale arusaamisele AM-seente rollist taimepopulatsioonide ja koosluste kujundamisel (Zobel jt, 2024; Moora jt, 2025). Ühtaegu püüame ka kirjeldada AM-seeneliikide ökoloogiat (Davison jt, 2021) ja seenekoosluste struktuuri ning elurikkust kujundavaid mehhanisme (Davison jt, 2024; Hiiesalu jt, 2025).

Kokkuvõtteks – kuidas kujuneb taimekoosluste elurikkus

Klassikaline koosluseökoloogia keskendus pikka aega lokaalsete protsesside uurimisele. Selle põhjal kujunes välja arusaam, kuidas elurikas kooslus toimib ja püsib. Biogeograafia omakorda keskendus elurikkuse globaalsete mustrite seletamisele. Tänu sellele teame näiteks, miks on troopika liigirikkam kui parasvööde. Samas ei seletanud ökoloogia seda, miks lokaalses skaalas esineb niivõrd suur elurikkuse variatsioon – samas kliimavööndis esinevad kõrvuti looduslikult väga elurikas ja väga eluvaene kooslus.

Oleme elurikkuse seletamisel kasutanud skaalade kombineerimist, seletades suureskaalaliste protsesside kaudu väikeseskaalalisi mustreid. Elurikkuse kujunemine mingis koosluses on evolutsiooniliste ja ajalooliste protsesside, liikide levimise ja kõikvõimalike biootiliste suhete kogutulemus.

Elurikkuse seletamine annab olulist taustainformatsiooni ka elurikkuse kaitsjatele ja looduse majandajatele. Kaitsealuse koosluse seisundi hindamisel tuleks eelkõige kirjeldada tema täielikkust, st kui palju potentsiaalsetest asukatest on reaalselt kohal. Taimekoosluse taastamisel on vaja teada, kas maastikus on olemas lokaalne liigifond, mis toetaks sobivate liikide saabumist. Kui sellist fondi enam pole, saab kooslusi taastada vaid populatsioonide kunstliku taasasustamise kaudu. Ilma liigifondi kui taustsüsteemi arvesse võtmata ei saa teha kaalukaid prognoose elusloodusе tuleviku kohta.

Meie teiseks eesmärgiks on olnud mikroobidega arvestamine taimede elurikkuse seletamisel. Kaua aega jäid need silmale nähtamatud organismid ökoloogia huviorbiidist täielikult välja. Seoses molekulaarsete meetodite arenemisega tekkis võimalus uurida mikroobide elurikkuse mustreid ja kõrvutada neid makroorganismide mustritega. Meie erihuviks kujunesid mikroskoopilised seened, mis elavad vastastikku kasulikus suhtes taimejuurtega. Kuivõrd mõjutavad sellised seened taimekoosluste struktuuri ja elurikkust, on paljuski veel lahtine.

Teame vähe ka sellest, millisel määral mõjutab inimtegevuse surve mükoriisaseente populatsioone. Praeguseks on kirjeldatud olukordi, kus seenekooslused vaesustuvad. Sellisel juhul võib kujuneda olukord, kus taim ei leia omale sobivat

seenpartnerit. On ka vastupidiseid näiteid – inimese poolt sihipäraselt ümber asustatud taimeliigid võivad tänu nendele kaasa pandud mükoriisale tunda ennast uues elukohas liigagi turvaliselt, levida kontrollimatult ja oluliselt muuta kohalikku loodust.

Järgmise sammuna koosluste ökoloogias tuleks ühendada nn klassikaline ökoloogia, mis on välja kujunenud makroorganismide uurimise põhjal, ja nüüdisaegne mikroobiökoloogia. On ju taimed ja loomad oma olemuselt holobiondid – süsteemid, mis koosnevad makroorganismist ja sellega assotsieerunud mikroobidest. Ehitades nüüdisaegse ökoloogia üles holobiontide ökoloogiana, aitab see meil näha taimekoosluste ja ökosüsteemide ajaloolist kujunemist, tänapäevast toimimist ja tuleviku protsesse täiesti uue nurga alt. Paljulubavaid arengusuundi näeme muuhulgas mitte ainult ökoloogias endas, vaid ka rakenduslikes tegevustes, nagu seda on põllumajandus (Niinemets, Zobel, 2025) ja meditsiin (Pärtel, 2026).

Laelatu puisniit Lääne-Eestis paistab silma oma erakordse väikeseskaalalise liigirikkusega – ühelt ruutmeetrilt on leitud üle 70 soontaimeliigi. Sellise ebaharilikult kõrge elurikkuse seletamine on koosluseökoloogiale paras proovikivi. Fotol külastavad niitu 2008. aastal (vasakult) taimeökoloogia professor Bryan Foster Ameerika Ühendriikidest, Martin Zobel ning Tartu Ülikooli botaanikaprofessor Meelis Pärtel.
Foto: erakogu

VIITED

Bever, J. D., Dickie, I. A., Facelli, E., Facelli, J. M., Klironomos, J., Moora, M. jt. 2010. Rooting theories of plant community ecology in microbial interactions. Trends in Ecology & Evolution, 25(8), 468–478.

Carmona, C. P., Pärtel, M. 2021. Estimating probabilistic site-specific species pools and dark diversity from co-occurrence data. Global Ecology and Biogeography, 30(1), 316–326.

Chesson, P. 2018. Updates on mechanisms of maintenance of species diversity. Journal of Ecology, 106(5), 1773–1794.

Davison, J., Gerz, M., Hiiesalu, I., Moora, M., Semchenko, M., Zobel, M. 2024. Niche types and community assembly. Ecology Letters, 27(1):e14327.

Davison, J., Moora, M., Semchenko, M., Adenan, S. B., Ahmed, T., Akhmetzhanova, A. A. jt. 2021. Temperature and pH define the realised niche space of arbuscular mycorrhizal fungi. New Phytologist, 231(2), 763–776.

Davison, J., Moora, M., Öpik, M., Adholeya, A., Ainsaar, L., Bâ, A. jt. 2015. Global assessment of arbuscular mycorrhizal fungus diversity reveals very low endemism. Science, 349(6251), 970–973.

Davison, J., Moora, M., Öpik, M., Ainsaar, L., Ducousso, M., Hiiesalu, I. jt. 2018. Microbial island biogeography: isolation shapes the life history characteristics but not diversity of root-symbiotic fungal communities. Isme Journal, 12(9), 2211–2224.

Dornelas, M., Gotelli, N. J., McGill, B., Shimadzu, H., Moyes, F., Sievers, C. jt. 2014. Assemblage Time Series Reveal Biodiversity Change but Not Systematic Loss. Science, 344(6181), 296–299.

Grime, J. P., Mackey, J. M. L., Hillier, S. H., Read, D. J. 1987. Floristic diversity in a model system using experimental microcosms. Nature, 328(6129), 420–422.

Hiiesalu, I., Doležal, J., Moora, M., Öpik, M., Pärtel, J., Vahter, T. jt. 2025. Latitudinal and Elevational Trends in Arbuscular Mycorrhizal Community Niche Structure. Ecology Letters, 28(11):e70241.

Kier, G., Mutke, J., Dinerstein, E., Ricketts, T. H., Kuper, W., Kreft, H. jt. 2005. Global patterns of plant diversity and floristic knowledge. Journal of Biogeography, 32(7), 1107–1116.

Margulis, L. 1991. Symbiosis as a source of evolutionary innovation: speciation and morphogenesis. – Margulis, L., Fester, R. (eds). Symbiogenesis and Symbionticism. Cambridge: MIT Press, 1–14.

Mittelbach, G. G., Schemske, D. W., Cornell, H. V., Allen, A. P., Brown, J. M., Bush, M. B. jt. 2007. Evolution and the latitudinal diversity gradient: speciation, extinction and biogeography. Ecology Letters, 10(4), 315–331.

Moora, M., Davison, J., Kohout, P., Zobel, M. 2025. The importance of the plant mycorrhizal collaboration niche across scales. Nature Reviews Biodiversity, 1(4), 262–273.

Moora, M., Öpik, M., Sen, R., Zobel, M. 2004. Native arbuscular mycorrhizal fungal communities differentially influence the seedling performance of rare and common *Pulsatilla* species. Functional Ecology, 18, 554–562.

Niinemets, Ü., Zobel, M. 2025. Ecological intensification index: reducing global footprint of agriculture. Trends in Plant Science, 30(4), 373–381.

Pärtel, M. 2002. Local plant diversity patterns and evolutionary history at the regional scale. Ecology, 83, 2361–2366.

Pärtel, M., Degtjarenko, P., Davison, J., Helm, A., Jõks, M., Kõljalg, U., Kook, E., Mander, Ü., Niinemets, Ü., Org, E., Peet, A., Tillmann, V., Vasar, M., Voor, T., Võsaste, M., Zárate Martínez, O., Zobel, M. 2026. Urban soil Gammaproteobacteria diversity, shaped by biodiverse land use, predicts a lower risk of developing allergy in children. Urban Forestry & Urban Greening 122: 129514, https://doi.org/10.1016/j.ufug.2026.129514

Pärtel, M., Zobel, M., Zobel, K., van der Maarel, E. 1996. The species pool and its relation to species richness: Evidence from Estonian plant communities. Oikos, 75(1), 111–117.

Pärtel, M., Tamme, R., Carmona, C. P., Riibak, K., Moora, M., Bennett, J. A. jt. 2025. Global impoverishment of natural vegetation revealed by dark diversity. Nature, 641(8064), 917–924.

Pärtel, M., Öpik, M., Moora, M., Tedersoo, L., Szava-Kovats, R., Rosendahl, S. jt. 2017. Historical biome distribution and recent human disturbance shape the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. New Phytologist, 216(1), 227–238.

Ricklefs, R. 1987. Community diversity: relative roles of local and regional processes. Science, 235, 167–171.

Ronk, A., Szava-Kovats, R., Zobel, M., Pärtel, M. 2017. Observed and dark diversity of alien plant species in Europe: estimating future invasion risk. Biodiversity and Conservation, 26(4), 899–916.

Zobel, M. 1992. Plant species coexistence – the role of historical, evolutionary and ecological factors. Oikos, 65, 314–320.

Zobel, M., Koorem, K., Moora, M., Semchenko, M., Davison, J. 2024. Symbiont plasticity as a driver of plant success. New Phytologist, 241(6), 2340–2352.

Zobel, M., Moora, M., Pärtel, M., Semchenko, M., Tedersoo, L., Öpik, M. jt. 2023. The multiscale feedback theory of biodiversity. Trends in Ecology & Evolution, 38(2), 171–182.

Zobel, M., Otto, R., Laanisto, L., Naranjo-Cigala, A., Partel, M., Fernandez-Palacios, J. M. 2011. The formation of species pools: historical habitat abundance affects current local diversity. Global Ecology and Biogeography, 20(2), 251–259.

Taylor, D. R., Aarssen, L. W., Loehle, C. 1990. On the relationship between r/K selection and environmental carrying capacity: a new habitat templet for plant life history strategies. Oikos, 58, 239–250.

Tedersoo, L., Bahram, M., Zobel, M. 2020. How mycorrhizal associations drive plant population and community biology. Science, 367(6480), 867–+.

Vasar, M., Davison, J., Sepp, S. K, Mucina, L., Oja, J., Al-Quraishy, S. jt. 2022. Global soil microbiomes: A new frontline of biome-ecology research. Global Ecology and Biogeography, 31(6), 1120–1132.

Vellend, M., Baeten, L., Myers-Smith, I. H., Elmendorf, S. C., Beausejour, R., Brown, C. D. jt. 2013. Global meta-analysis reveals no net change in local-scale plant biodiversity over time. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 110(48), 19456–19459.

Öpik, M., Vanatoa, A., Vanatoa, E., Moora, M., Davison, J., Kalwij, J. M. jt. 2010. The online database MaarjAM reveals global and ecosystem distribution patterns in arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). New Phytologist, 188, 223– 241.

Foto: Erlend Štaub

Martin Zobel

Sündinud 25. veebruaril 1957 Tallinnas

1975 Tallinna 1. Keskkool (praegu Gustav Adolfi Gümnaasium)

1980 Tartu Ülikool, bioloog

1984 Tartu Ülikool, bioloogiakandidaat (vastab PhD-le)

Töötanud Tartu Ülikoolis erinevatel ametikohtadel, alates 1992 taimeökoloogia professor, alates 2026 emeriitprofessor

1996 uurija Uppsala Ülikoolis

1999 külalisprofessor Kopenhaageni Ülikoolis

2010 Eesti Teaduste Akadeemia liige

2026 EMBO (European Molecular Biology Organization) liige

2007–2011 International Association for Vegetation Science asepresident

2000–2004 Ecography peatoimetaja

2005–2006 Restoration Ecology toimetaja

2007–2022 Journal of Vegetation Science toimetaja

Professor Martin Zobel on Eesti taimeteaduse ja ökoloogia valdkonna silmapaistvaim teadlane, kelle elutöö tulemusena on Eesti ökoloogiakoolkond saavutanud suure rahvusvahelise tunnustuse. Zobel kaitses teaduskraadi Tartu Ülikoolis

1984. aastal professor akadeemik Hans-Voldemar Trassi juhendamisel, keskendudes Eesti loopealsete taimekoosluste ökoloogiale. Tema järgnev teaduslik tegevus on keskendunud taimeliikide kooseksisteerimise mehhanismidele, liigirikkuse kujunemisele ja poollooduslike koosluste dünaamikale. Zobeli poolt arendatud liigifondi kontseptsioon on oluliselt mõjutanud ökoloogilise teooria arengut globaalses teadusruumis. Zobel on tuntud kui teadlane, kes ei pelga esitada uusi ja julgeid teooriaid. Tema käsitlus taimede ja nende mikroobsete partnerite – eelkõige mükoriisaseente – koosmõjust on avanud uusi vaatenurki taimekoosluste mõistmisel. Ta on üks esimesi, kes rakendas molekulaarseid meetodeid mükoriisaseente uurimisel koosluste tasandil, sidudes mikrobioloogia ja klassikalise taimeteaduse.

https://doi.org/10.3176/evp.2026.02

HIGGSI BOSONI AVASTAMISE LUGU

Mario Kadastik, Kristjan Kannike ja Martti Raidal
(Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut)

Teaduspreemia väljapaistva avastuse eest ehk panuse eest Higgsi bosoni avastamisse ja selle omaduste mõõtmisesse

Standardmudeli viimase osakese avastamine

Osakestefüüsika püüab vastata lihtsana kõlavatele, kuid erakordselt keerulistele küsimustele: millest maailm koosneb ja millised jõud seda koos hoiavad? 1897. aastal avastas J. J. Thomson elektroni. Sellest hetkest alates hakkas selguma, et aatom ei ole looduse kõige väiksem ehituskivi. Tänaseks teame, et meile tuttav aine koosneb kvarkidest ja leptonitest, mille vastastikmõjusid vahendavad jõuosakesed.

Selle teadmise koondab osakestefüüsika standardmudel. Nime poolest on see mudel, kuid täpsuse ja ulatuse poolest on ta üks inimkonna kõige edukamaid loodusteaduslikke teooriaid. Standardmudel kirjeldab elektroni ja teisi leptoneid, kvarke ning jõuosakesi footonit, gluuoneid ja nõrga vastastikmõju kandjaid W- ja Z-bosoneid. Selle abil saab arvutada tohutul hulgal mõõdetavaid suurusi ning neid on katsetes kinnitatud väga suure täpsusega.

2012. aasta 4. juulil kuulutati Euroopa Tuumauuringute Keskuses CERN-is välja tulemus, mida osakestefüüsikud olid oodanud peaaegu pool sajandit. LHC (Large Hadron Collider) kiirendi kahe suure eksperimendi, ATLAS-e (A Toroidal LHC Apparatus) ja CMS-i (Compact Muon Solenoid) andmetest oli leitud uus osake massiga umbes 125 gigaelektronvolti (GeV). Kõik märgid viitasid, et tegemist on Higgsi bosoniga – osakesega, mis oli standardmudeli viimane katseliselt kinnitamata nurgakivi.

See avastus ei olnud ühe inimese ega ühe labori saavutus. Selle taga oli aastakümneid kestnud teoreetiline ja eksperimentaalne töö, laiaulatuslik rahvusvaheline tehnoloogia ja andmeanalüüsi arendamine ning tuhandete teadlaste omavaheline koostöö. Oma osa selles loos oli ka Eesti teadlastel. Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi (KBFI) töörühm – Martti Raidal, Mario Kadastik ja Kristjan Kannike – osales CERN-i CMS-i eksperimendi Higgsi bosoni analüüsides, aitas kaasa avastuse jaoks olulise nelja leptoniga lõppseisundi uurimisele ning hiljem Higgsi bosoni omaduste täpsele mõõtmisele.

Higgsi bosoni avastamine vastas ühele osakestefüüsika kõige sügavamale küsimusele: miks elementaarosakestel üldse on mass? Samal ajal avas see ukse uutele küsimustele: kas avastatud osake on täpselt standardmudeli Higgsi boson? Kas tema omadustes peitub jälgi uuest füüsikast, nagu näiteks tumeaine, täiendavad skalaarosakesed või veel tundmatud loodusseadused? Just nende küsimuste valguses algas pärast avastust töö, milles Eesti teadlased samuti osalesid.

Standardmudel – aineosakesed ja vastastikmõjud

Standardmudel kirjeldab seda osa universumist, mis suhtleb meiega piisavalt tugevasti, et seda laboris mõõta. Ta ei sisalda gravitatsiooni, tumeainet ega tumeenergiat. See ei ole standardmudeli nõrkus. Ta kirjeldab väga täpselt kindlat looduse osa – mikromaailma osakesi ja nende kolme vastastikmõju – elektromagnetilist, nõrka ja tugevat.

Elektromagnetilist vastastikmõju vahendab footon. Selle tõttu näeme valgust, toimivad elektriseadmed ja tekib keemiline side. Tugevat vastastikmõju vahendavad gluuonid. See seob kvarke prootoniteks ja neutroniteks ning hoiab tuumajõu kaudu koos aatomituumi. Nõrka vastastikmõju vahendavad W- ja Z-bosonid. Nõrk vastastikmõju vastutab näiteks teatud radioaktiivsete lagunemiste eest ning mängib olulist rolli tähtede tuumaprotsessides.

Vastastikmõjude kandjad on bosonid. Bosonid on osakesed, mille spinn on täisarvuline. See omadus lubab paljudel bosonitel olla samas kvantolekus, mis teeb võimalikuks näiteks laseri, kus tohutu hulk ühesuguseid footoneid liigub ühes koherentses valguslaines.

Aineosakesed on teistsugused. Elektronid, müüonid, neutriinod ja kvargid on fermionid, millel on poolarvuline spinn. Fermionid ei saa kõik korraga samas kvantolekus olla. Just see printsiip annab aatomitele struktuuri, sest elektronid täidavad aatomis eri energiatasemeid ega kuku kõik korraga kõige madalamale astmele.

Higgsi mehhanism – nähtamatu väli, nähtav tagajärg

Ometi oli standardmudeli südames pikka aega üks tühi koht. Teooria sümmeetriad seletasid hästi vastastikmõjude kuju, kuid sama sümmeetria justkui keelas osakestel massi omada. Tegelik maailm ütleb aga vastupidist, sest elektronil on mass, prootonil on mass ning W- ja Z-bosonid on lausa väga rasked. Kui osakestel massi ei oleks, ei moodustuks aatomid, molekulid ega tähed ning ei oleks keemiat, planeete ega meid endid.

Selle vastuolu lahenduseks pakuti 1964. aastal välja mehhanism, mida nüüd tunneme Higgsi mehhanismina. François Englert ja Robert Brout, Peter Higgs ning Gerald Guralnik, Carl Hagen ja Tom Kibble näitasid sõltumatult, kuidas

sümmeetriat saab spontaanselt rikkuda nii, et jõuosakesed omandavad massi, kuid teooria jääb matemaatiliselt kooskõlaliseks. Peter Higgs rõhutas, et mehhanismiga peab kaasnema uus osake. Julge idee järgi on tühi ruum ehk vaakum tegelikult täidetud Higgsi väljaga. Osakesed, mis on selle väljaga tugevamalt seotud, käituvad nii, nagu neil oleks suurem mass, samal ajal kui osakesed, mis sellega ei vastastikmõjustu, jäävad massituks. Selle välja kvant, väike võnkumine, on osake nimega Higgsi boson. Kui Higgsi väli on meri, siis Higgsi boson on selle mere laine.

Higgsi väli ei anna kõigile osakestele massi ühtemoodi. Footon jääb massituks, mistõttu elektromagnetväli ulatub lõpmata kaugele ja valgus saab liikuda vaakumis valguse kiirusel. Ka gluuonid on massitud, kuigi tugeva vastastikmõju eripära tõttu ei näe me üksikuid vabu gluuoneid igapäevaselt. W- ja Z-bosonid saavad aga Higgsi väljalt suure massi, mistõttu nõrk vastastikmõju on väga lühikese ulatusega. Meie igapäevane mass ei tule siiski ainult Higgsi väljast. Prootoni ja neutroni massist suurem osa tekib tugeva vastastikmõju energiast – kvarkide ja gluuonite liikumisest ning omavahelisest sidumisest. Higgsi väli annab massi elementaarsetele kvarkidele ja laetud leptonitele, kuid nähtava aine kogumass sünnib mitme mehhanismi koosmõjus.

Nii sai Higgsi bosonist standardmudeli kõige otsitum osake. Kui teda ei oleks leitud, oleks tulnud ümber mõelda kogu arusaam sellest, kuidas elementaarosakesed massi saavad.

LEP, Tevatron ja LHC – pikk tee avastuseni

Otsingud muutis raskeks asjaolu, et Higgsi boson on ebastabiilne. Ta tekib kõrge energiaga osakeste kokkupõrkes ja laguneb peaaegu kohe teisteks osakesteks. Detektor ei näe Higgsi bosonit ennast, vaid tema lagunemise jälgi. Seetõttu ei tähenda Higgsi bosoni otsimine ühe osakese pildistamist, vaid tohutu hulga kokkupõrgete tulemuste salvestamist, lagunemissaaduste mõõtmist ja taustprotsesside mõistmist.

Esimesed Higgsi bosoni otsingud algasid ammu enne LHC käivitamist. CERN-i LEP-kiirendis (Large Electron-Positron Collider) põrgatati kokku elektrone ja positrone. Selline masin võimaldas teha erakordselt puhtaid mõõtmisi ning määrata standardmudeli parameetreid väga täpselt. LEP ei leidnud Higgsi bosonit, kuid tema tulemus oli oluline, sest ta näitas, et standardmudeli Higgs pidi olema raskem kui umbes 114 GeV.

Ameerika Ühendriikides Fermilabis töötanud Tevatron põrgatas kokku prootoneid ja antiprootoneid peaaegu 2 teraelektronvoldi (TeV) energiaga. Ka Tevatron ei jõudnud Higgsi bosoni kindla avastuseni, kuid kitsendas võimalikke massivahemikke ning nägi andmetes hiljem mõistetavaks saanud vihjeid. LEP-i ja Tevatroni kaudsed andmed osutasid, et kui standardmudeli Higgs olemas on, ei tohiks ta olla väga raske.

LHC ehitati just selleks, et minna palju kaugemale. See on 27 kilomeetri pikkune prooton-prooton kiirendi Genfi lähedal CERN-is. Prootonid liiguvad peaaegu valguse kiirusega vastassuunalistes kimpudes ja põrkuvad detektorite keskmes. LHC maksimaalne kokkupõrkeenergia on 14 TeV, kuid Higgsi bosoni avastus tehti esimese tööperioodi andmetega, kus prootonite kokkupõrgete massikeskmeenergia oli 7 ja 8 TeV.

Prooton on liitosake, tema sees on kvargid ja gluuonid. Seetõttu ei põrku kokkupõrkes tavaliselt kokku kaks tervet prootonit kui kõvad kuulid, vaid nende koostisosad. Just gluuonite ühinemine on üks peamine viis, kuidas LHC-s Higgsi bosoneid tekitatakse. Haruldane sündmus tuleb aga välja sõeluda miljardite tavalisemate sündmuste seast.

Kui LHC käima pandi, oli selge, et vastus tuleb. Kui standardmudeli Higgs on olemas, peab LHC selle leidma, kui mitte, peab LHC näitama, mis mehhanism standardmudeli asemel töötab. Mõlemal juhul oleks tulemus muutnud fundamentaalfüüsika pilti.

Kuigi footon ja gluuon Higgsi väljalt massi ei saa, on Higgsi boson kaudselt, kvantparanduste kaudu, ometi seotud ka footonite ja gluuonitega. Näiteks võib Higgs laguneda kaheks footoniks ning LHC-s tekib suur osa Higgsi bosoneid gluuonite ühinemisel. Sellised pealtnäha väikesed kvantprotsessid osutusid Higgsi bosoni avastamisel ja omaduste mõõtmisel väga tähtsaks. Just Higgsi bosoni lagunemine kaheks footoniks võimaldas täpselt ära mõõta tema massi – 125 GeV.

Meenutame, et elementaarosakeste maailmas on massi mugav mõõta energiaühikutes. Einsteini valem $E = mc^2$ ütleb, et mass ja energia on sama nähtuse kaks kuju. Osakestefüüsikud kasutavad ühikut elektronvolt (eV). Üks GeV on miljard eV. Prootoni mass on ligikaudu 1 GeV, W- ja Z-bosonite massid on kümneid GeV ning Higgsi bosoni mass umbes 125 GeV ehk umbes sama mis joodi aatomil.

CMS-i eksperiment ja Eesti

CMS on üks LHC neljast suurest eksperimendist. Nimi on mõnevõrra petlik, sest detektor ei ole inimlikus mõõtkavas sugugi kompaktne. See on mitmekorruselise maja suurune seade, mis ümbritseb prootonite kokkupõrkepunkti nagu kihiline sibul. Iga kiht mõõdab kokkupõrkest välja lendavaid osakesi omal viisil. Nii registreerib jäljedetektor laetud osakeste trajektoore, kalorimeetrid mõõdavad energiat ning välised müüonikambrid tuvastavad müüoneid.

Müüonid on Higgsi bosoni avastamise loos eriti tähtsad. Need on laetud osakesed, elektroni raskemad sugulased. Tänu elektronist 200 korda suuremale massile läbivad müüonid detektori kihte suhteliselt hõlpsasti ja jätavad hästi mõõdetava jälje. CMS-i nimi rõhutabki müüonite mõõtmise võimekust. Nelja müüoniga sündmus on seetõttu üks puhtamaid, mida hadronkiirendi kaootilises keskkonnas otsida saab.

Eesti teadlaste töörühm töötas CMS-i Higgsi bosoni rühmas alates 2007. aastast. Alguses uuriti kahekordse laenguga Higgsi bosoni võimalikke lagunemisi neljaks leptoniks. See uue füüsika otsing andis töörühmale väga vajaliku oskuse, kuidas käsitleda nelja leptoniga lõppseisundeid, kuidas hinnata taustu ja rekonstrueerida sündmusi, milles võivad peituda Higgsi bosoni jäljed.

Kui LHC andmeid hakati analüüsima, jätkus töö standardmudeli Higgsi bosoni otsingul. KBFI töörühm osales kahes Higgsi lagunemiskanali uuringus. Neist avastuse seisukohalt keskne oli $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$, kus Higgs laguneb kaheks Z-bosoniks ja need omakorda neljaks leptoniks. Teine uuritud kanal oli $H \rightarrow Z\gamma$. See oli füüsikaliselt huvitav, kuid avastusartikli tundlikkuse mõttes ei olnud ta võrreldav peamiste kanalitega. Higgsi avastuse CMS-i artiklisse ja hilisemasse ATLAS-e ja CMS-i ühisesse massimõõtmisse läks sisse just $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ kanali tulemus.

Eesti rühma töö ei olnud üldine osalemine suures koostöös, vaid konkreetne andmeanalüüs. Töörühm tegeles leptonite energia kalibreerimisega, Z-bosoni invariantse massi rekonstrueerimisega, nelja müüoni signaali otsimisega CMS-i andmetest, taustprotsesside simuleerimisega ning saadud tulemuste kombineerimisega teiste Higgsi otsingukanalitega. Selline töö on avastuse puhul sama tähtis kui detektori ehitamine, sest ilma täpse analüüsi ja usaldusväärse statistilise tõlgenduseta ei muutu haruldane signaal avastuseks.

Nelja müüoni signaali analüüs

Higgsi bosoni üks kuulsamaid otsingukanaleid on $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$, mida nimetatakse sageli kuldseks kanaliks. Põhjus ei ole selles, et see kanal oleks kõige sagedasem. Vastupidi, selliseid sündmusi on vähe, kuid need on väga puhtad. Kui detektoris nähakse nelja hästi mõõdetud leptonit, mille paarid sobivad Z-bosonite lagunemistega ja mille kogu invariantne mass koguneb umbes 125 GeV juurde, on see kindel jälg uuest osakesest.

Nelja müüoni lõppseisund on selle kuldse kanali üks puhtamaid variante. Iga müüon jätab CMS-is jälje nii sisemises jäljedetektoris kui ka välimistes müüonikambrites. Nende trajektoori kõveruse järgi saab määrata impulsi ning nelja müüoni andmetest saab arvutada, millise massiga osake võinuks nad tekitada.

Analüüs algab aga ammu enne seda, kui valmib ilus joonis. Kõigepealt tuleb aru saada, millised tavalised standardmudeli protsessid võivad anda samasuguse või sarnase lõppseisundi. Näiteks võib tekkida kaks Z-bosonit ilma Higgsi bosonita, mõni osake võib jäljendada leptonit ning samuti tuleb arvestada detektori mõõtevigade ja valikukriteeriumidega. Tausta tuleb simuleerida, kontrollida sõltumatute andmevalimitega ja lõpuks statistiliselt võrrelda päris andmetega.

KBFI teadlaste panus seisneski selle töö tegemises. Nad simuleerisid nelja müüoni signaali taustu, otsisid CMS-i andmetest nelja müüoni sündmusi ning

osalesid tulemuse kombineerimises teiste kanalitega. Kombineerimine oli vältimatu, sest Higgsi boson ei ilmunud ühes kanalis üksi suure ja vaieldamatu tipuna. Avastuse usaldusväärsus sündis paljude kanalite kooskõlast, sest footon-footon, WW, ZZ, $\tau\tau$, bb ja teised kanalid pidid koos andma sama loo.

Kui andmetes hakkas 125 GeV juures paistma uus osake, oli just nelja leptoniga kanal üks neist, mis andis väga puhta pildi. CMS-i avastusartikkel näitas, et uus boson on olemas. Kuid sõna „Higgs“ kasutamiseks tuli veel kontrollida, kas uus osake on tõepoolest standardmudeli ennustatud Higgsi boson, mitte mõni muu uus osake.

Standardmudeli Higgsi boson või uus füüsika?

Uue osakese avastamine oli suur hetk, kuid teaduslikult oli see alles järgmise töö algus. Kui detektorites ilmub osake massiga 125 GeV, tuleb küsida, millised on tema omadused. Kas ta laguneb osakesteks õigete tõenäosustega? Kas ta tekib prootonite põrgetes nii sageli, nagu standardmudel ennustab? Kas tema vastastikmõjud W- ja Z-bosonite ning aineosakestega on seotud nende massidega just nii, nagu Higgsi mehhanism nõuab?

Standardmudelis on Higgsi boson eriline, tema interaktsioonid teiste osakestega ei ole juhuslikud. Mida raskem on osake, seda tugevamalt ta Higgsi väljaga interakteerub. Seetõttu on Higgsi omaduste mõõtmine omamoodi massi päritolu kontrollkatse. Kui mõõdetud vastastikmõjud erineksid standardmudeli ennustusest, oleks see märk uuest füüsikast.

KBFI töörühma liikmed osalesid pärast avastust mitme Higgsi lagunemiskanali tulemuste kombineerimises ja statistilises analüüsis. Martti Raidal ja Kristjan Kannike koos rahvusvaheliste kaastöölistega analüüsisid kiiresti kättesaadavaid LHC ja Tevatroni andmeid ning küsisid, kas 125 GeV resonants on tõepoolest Higgsi boson. Need tööd olid ajastuse mõttes erilised, sest teoreetikud said avalike mõõtmistulemuste põhjal kiiresti uurida, millised Higgsi vastastikmõjud on andmetega kooskõlas ja millised uue füüsika stsenaariumid on välistatud.

Analüüsides lubati Higgsi vastastikmõjudel W- ja Z-bosonite ning fermionitega varieeruda. Eraldi uuriti ka vaid silmuste tasemel tekkivaid protsesse, näiteks Higgsi tekkimist kahe gluuoni ühinemisel ning lagunemist kaheks footoniks. Lisaks arvestati võimalusega, et Higgs võib mõnikord laguneda nähtamatult, näiteks tumeaine osakesteks või muudeks osakesteks, mis detektorist jälge jätmata läbi lendavad.

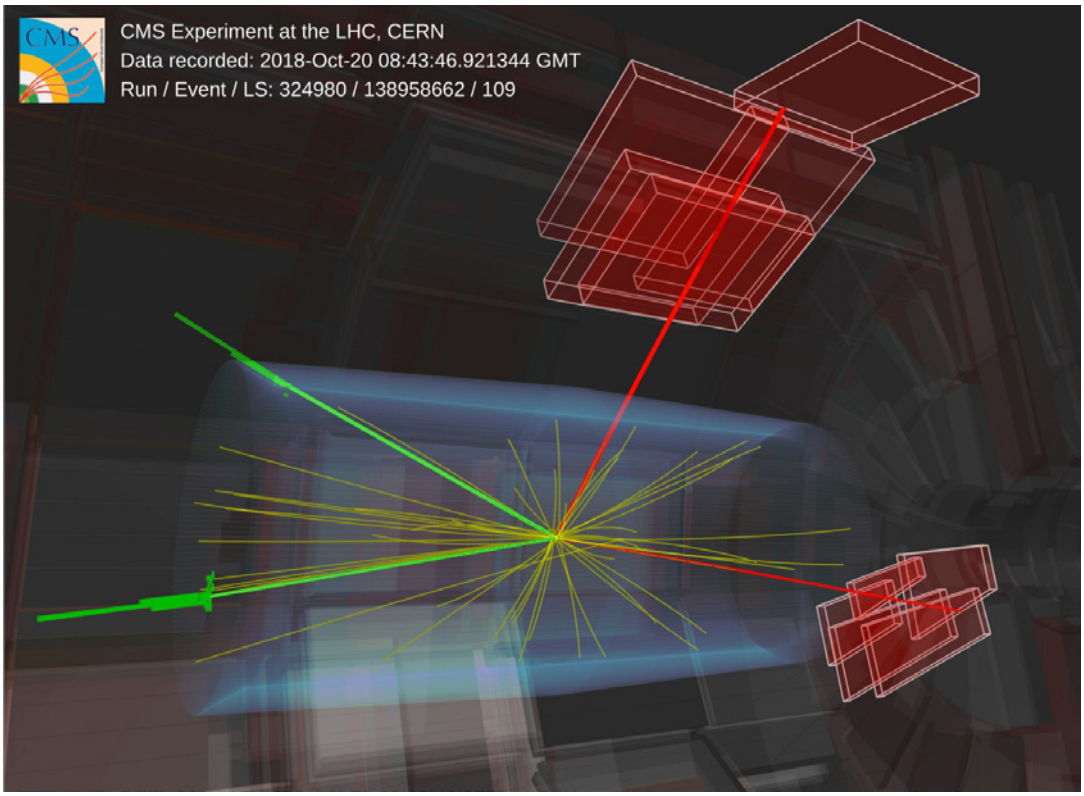
Varastes andmetes leidus põnevaid kõikumisi. Näiteks kahe footoni kanalis paistis signaal mõnel hetkel standardmudeli ootusest suurem. Sellised kõikumised on uute avastuste järel tavapärased, sest andmeid on vähe ja statistiline ebakindlus suur. Hilisemad mõõtmised on pilti täpsustanud ning Higgsi bosoni mõõdetud omadused on liikunud üha lähemale standardmudeli ennustustele.

Oluline järeldus jäi siiski samaks ja uus 125 GeV osake käitub väga suure täpsusega nagu Higgsi boson.

Higgsi boson ja t-kvark

Pärast avastust oli üks olulisemaid puuduvaid eksperimentaalseid andmeid Higgsi bosoni interaktsiooni tugevus kõige raskema tuntud elementaarosakese, t-kvargiga. Standardmudelis peaks t-kvark Higgsi väljaga eriti tugevasti interakteeruma, sest ta on erakordselt raske. Selle sidestuse otsene mõõtmine on seetõttu Higgsi mehhanismi üks rangemaid teste.

Seda saab uurida protsessis, kus Higgs tekib koos t-kvargi ja t-antikvargiga. Seda nimetatakse ttH kanaliks ja see on üks huvitavamaid eksperimentaalseid uurimissuundi. Sellised sündmused on haruldased ja keerulised, sest lõppseisundis võib olla palju osakesi, sealhulgas b-kvarke, leptoneid, tau-leptoneid ja puuduva energia jälgi. Taustprotsesse on palju ning nende eristamine signaalist nõuab väga nutikat andmeanalüüsi.



Reaalne Higgsi bosoni lagunemisprotsess kuldses kanalis CMS-i eksperimendis.

Mario Kadastik panustas CMS-is ttH mõõtmistesse ning maatrikselementidel põhinevate ja masinõppe meetodite kasutamisse Higgsi analüüsides. Maatrikselementide meetod kasutab teoreetilise füüsika arvutusi selleks, et hinnata, kui tõenäoline on iga konkreetne detektoris nähtud sündmus signaali või tausta korral. Masinõpe aitab omakorda leida keerulistest andmetest mustreid, mida lihtsad lõiked ei suuda ära kasutada.

Need meetodid parandasid analüüside tundlikkust ja aitasid jõuda tulemusteni, millega CMS kinnitas Higgsi bosoni tootmist koos t-kvarkidega. See oli oluline samm, sest nüüd ei olnud Higgsi boson ainult avastatud osake, vaid üha täpsemalt mõõdetud standardmudeli osa.

Eesti teadlaste roll suures koostöös

Suurtes osakestefüüsika eksperimentides on artiklitel sageli tuhandeid autoreid. See võib väljastpoolt vaadates tekitada küsimuse, kuidas eristada ühe väikese rühma panust. Vastus on, et avastus sünnibki paljudest täpsetest töödest. Keegi ehitab ja kalibreerib detektori osi, keegi arendab rekonstrueerimistarkvara, keegi hindab taustprotsesse, keegi koostab statistilist kombinatsiooni. Ükski neist sammudest ei ole üksi piisav, kuid ilma nendeta ei tule ka avastust.

KBFI töörühma roll oli mitmekihiline. Martti Raidal panustas $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ analüüsi ja tulemuste kombineerimisse ning juhendas nooremaid kaastöölisi hilisemates CMS-i analüüsides. Mario Kadastik panustas nii nelja leptoniga avastuskanali analüüsi kui ka hilisematesse ttH mõõtmistesse ning oli CMS-is masinõppe ja maatrikselementide meetodite juurutajate hulgas. Kristjan Kannike panustas Higgsi bosoni omaduste statistilisse analüüsi ja eri otsingukanalite kombineerimisse, mille abil määrati Higgsi bosoni vastastikmõjude tugevusi.

Töö väärtus ei seisne ainult selles, et Eesti teadlased olid suure avastuse autorite nimekirjas. Olulisem on, et nende panus oli seotud just nende analüüsidega, mis avastuse ja hilisema tõlgenduse seisukohalt loevad: puhta nelja leptoniga signaali otsimine, tulemuste kombineerimine, Higgsi sidestuste statistiline määramine ning t-kvargiga seotud tootmise uurimine.

Nii on Eesti teadlaste osalus Higgsi bosoni loos hea näide tänapäevasest teadusest. Suur avastus vajab hiiglaslikke seadmeid, kuid see vajab ka väikeseid tugevaid rühmi, kes oskavad väga konkreetset probleemi sügavuti lahendada.

Lõppsõna – avastus, mis avas uue ajastu

Higgsi bosoni avastamine ei olnud standardmudeli lõpp-punkt, vaid selle keskse mehhanismi katseline kinnitamine. See näitas, et tühjus ei ole füüsikas tühi ja vaakumit täidab Higgsi väli, mille kaudu elementaarosakesed saavad massi. See muutis nähtavaks looduse ühe kõige varjatuma mehhanismi.

Samas ei vastanud avastus kõigile küsimustele. Standardmudel ei ütle, mis on tumeaine. Ta ei seleta tumeenergiat ega gravitatsiooni kvantteooriana. Ta ei seleta lõpuni, miks osakeste massid on just sellised, nagu nad on, miks on looduses kolm aineosakeste põlvkonda või miks universumis on ainet palju rohkem kui antiainet. Seetõttu on Higgsi bosonist saanud ka teeviit standardmudelist kaugemale.

Kui tumeaine suhtleb tavalise ainega Higgsi bosoni kaudu, võivad väga täpsed Higgsi mõõtmised seda paljastada. Kui looduses on rohkem skalaarosakesi kui üks, võib Higgsi bosoni omadustes näha väikeseid kõrvalekaldeid. Kui Higgsi boson on seotud veel sügavama struktuuriga, võivad selle jäljed ilmneda tulevaste LHC andmete või järgmise põlvkonna kiirendite mõõtmistes.

KBFI-s jätkub Higgsi bosoni ja sellega seotud uue füüsika uurimine. Pärast avastust on töö muutunud veelgi täpsemaks. Küsimus ei ole enam ainult selles, kas Higgs on olemas, vaid selles, kui täpselt ta vastab standardmudelile ja kas tema kaudu paistab välja midagi uut. Seetõttu on Higgsi bosoni lugu korraga lõpp ja algus – ühe suure otsingu lõpp ning uue, veel täpsema uurimisajastu algus.

KIRJANDUS

CMS Collaboration. Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV with the CMS Experiment at the LHC. 2012. Physics Letters B 718 30–61, https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021

Giardino, P. P., Kannike, K., Raidal, M., Strumia, A. 2012. Is the resonance at 125 GeV the Higgs boson? Physics Letters B 718 269–474, https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.10.042

Vasakult: Kristjan Kannike, Mario Kadastik ja Martti Raidal. Foto: Erlend Štaub

Mario Kadastik

Sündinud 5. novembril 1981 Tallinnas

2004	Tallinna Tehnikaülikool, bakalaureuseõpe
2005	Tallinna Tehnikaülikool, magistrikraad
2008	Tallinna Tehnikaülikool, füüsika (PhD)
2004–2026	Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi insener, teadur, vanemteadur
2016–2023	Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi asedirektor
2019–2026	Tallinna Tehnikaülikooli kaasatud professor

Põhilised uurimisteemad: kõrge energia osakestefüüsika, CMS-i eksperimendi andmeanalüüs, Higgsi bosoni otsingud ja omaduste mõõtmine CMS-i eksperimendis, leptonilised lõppolekud, masinõppe ja maatrikselementide meetodid osakestefüüsika andmeanalüüsis ning hajusarvutus.

On olnud topeltlaetud Higgsi alarühma juht ja artiklite peatoimetaja CMS-i eksperimendis ning CMS-i esindaja LHC Higgsi ristlõike standardmudelist väljapoole jääva füüsika (Beyond the Standard Model) alarühmas.

Kristjan Kannike

Sündinud 27. oktoobril 1978 Tartus

1996	Kohila Gümnaasium
2000	Tallinna Tehnikaülikool, keemia (BSc)
2003	Tartu Ülikool, füüsika (BSc)
2005	Tartu Ülikool, füüsika (MSc)
2008	Tartu Ülikool, füüsika (PhD)
2010–2013	järeldoktor Scuola Normale Superiore di Pisas (Itaalia)
2007–2026	Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi teadur, vanemteadur

Põhilised uurimisteemad: standardmudeli sümmeetriarikkumine, Higgsi boson ja skalaarsed osakesed uues füüsikas, tumeaine. Kirjutab regulaarselt populaarteaduslikke artikleid ajakirja Horisont.

Martti Raidal

Sündinud 26. veebruaril 1968 Türil

1992	Tartu Ülikool, füüsika, diplom *cum laude*
1995	Helsingi Ülikool, teoreetiline füüsika (PhD)
1996–1997	järeldoktor Valencia Ülikoolis
1998–1999	Humboldti stipendiaat DESY-s Hamburgis
2000–2001	järeldoktor California Ülikoolis Riverside'is
2001–2003	Euroopa Liidu Marie Curie stipendiaat CERN-is Genfis
1995–2026	Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi teadur, vanemteadur, juhtivteadur
2012–2017	Tartu Ülikooli kõrge energia füüsika professor
2026–...	Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi direktor

Põhilised uurimisteemad: kõrge energia füüsika, Higgsi bosoni füüsika, tumeaine otsesed ja kaudsed otsingud, uus füüsika LHC-s, kosmoloogia, neutriino massid ja leptogenees, tumeenergia ja gravitatsioonilained.

https://doi.org/10.3176/evp.2026.03

SUURIM TUNDMATU INIMTEGEVUSE KLIIMAMÕJUS

Velle Toll, Hannes Keernik, Jorma Rahu, Heido Trofimov, Piia Post ja Tanel Voormansik

Teaduspreemia loodusteaduste valdkonnas tööde tsükli „Inimtekkelise õhusaaste põhjustatud pilvede lumestumise avastamine“ eest

Globaalne soojenemine kui köievedu

Globaalne soojenemine on justkui köievedu kahe vastandliku inimmõju vahel (joonis 1). Fossiilkütuste põletamisest tekib nii kliimat soojendav kasvuhooneefekt kui ka õhusaasteosakeste jahutav mõju. Kui inimtekkeliste kasvuhoonegaaside kliimat soojendavat mõju on väga põhjalikult uuritud ja hästi mõistetud, siis õhusaasteosakeste mõju pilvedele on endiselt seotud väga suure määramatusega (Bellouin jt, 2020; Quaas jt, 2024). Koostamaks senisest veelgi usaldusväärsemaid tulevikukliima projektsioone, on parem arusaam inimtekkeliste õhusaasteosakeste mõjust pilvedele ja Maa kliimale võtmetähtsusega. Professor Velle Tolli juhtimisel uuritakse Tartu Ülikooli füüsika instituudi kliimauuringute keskuses inimtekkeliste õhusaasteosakeste kliimamõju tugevust.

Joonis 1. Kliima soojenemine kui köievedu: inimtekkeliste õhusaasteosakeste kliimat jahutav mõju kompenseerib teadmata osa inimtekkeliste kasvuhoonegaaside kliimat soojendavast mõjust.

Õhusaasteosakeste mõju pilvedele – suurim tundmatu inimtegevuse kliimamõjus

Inimtekkeliste õhusaasteosakeste mõju pilvedele on suurim tundmatu inimtegevuse kliimamõjus (Bellouin jt, 2020). Nimelt tasakaalustab antropogeensete õhusaasteosakeste jahutav kliimamõju teadmata ulatuses kasvuhoonegaaside põhjustatud inimtekkelist kliima soojenemist. Temperatuurid maailmas kerkisid 2023. ja 2024. aastal murettekitavatesse rekordilistesse kõrgustesse, tuues kaasa seninägematuid kuumalaineid, põudasid ja paduvihmasid. Võimalik, et just välisõhu puhastamine saasteosakestest on viimastel aastatel kliima soojenemist märkimisväärselt kiirendanud.

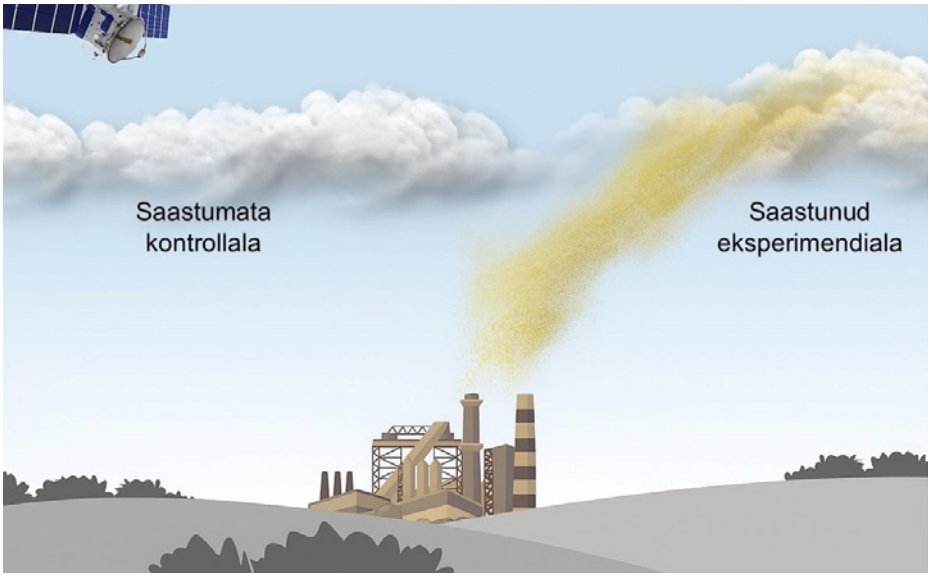
Kui õhusaasteosakeste jahutav mõju kliimale on seni arvatust tugevam, siis on kliima seni arvatust tundlikum ka inimtekkeliste kasvuhoonegaaside atmosfääri lisandumisele (Andrae jt, 2005). Kiirem kliima soojenemine on võimalik, kuna inimtekkeliste kasvuhoonegaaside heitkogused endiselt kasvavad, aga õhusaasteosakeste hulka on oluliselt vähendatud, et säästa inimeste tervist ja elusid. Meie uurimisteravik kliimauuringute keskuses ongi keskendunud õhusaasteosakeste tugevalt kliimat jahutava mõju võimalikkuse väljaselgitamisele. Juba aastakümneid on teada, et õhusaasteosakesed käituvad kondensatsioonituumadena

Joonis 2. Heledad jooned pilvedest tehtud satelliidipildil on laevade õhusaastest heledamaks muutunud pilved. Laevakütuse põlemisel on lisandunud saasteosakesi ja vesi on jaotunud suurema arvu pilvepiiskade vahel. Saastunud alas on pilvepiiskade kogupindala suurem võrreldes ümbritsevate saastumata pilvedega. Seetõttu hajutatakse rohkem päikesekiirgust tagasi maailmaruumi ehk saastunud pilved ongi heledamad.

vedelas faasis pilvepiiskade tekkimisel ja et inimtekkeliste õhusaasteosakeste mõjul on pilvepiisku rohkem ning pilved on seetõttu heledamad (joonis 2; Quaas jt, 2024). Kuidas mõjutavad kondensatsioonituumadena käituvad õhusaasteosakesed pilvede paksust ja hulka ning kas inimtekkelised saasteosakesed käituvad ka jäätekke tuumadena? Küsimused on seni selgete vastusteta (Bellouin jt, 2020) ja meie eesmärk ongi need leida.

Loomulikud eksperimendid

Olulisim põhjus, miks inimtegevuse mõju pilvedele on endiselt seotud suure määramatusega, on asjaolu, et atmosfäärisaaste ja pilvede mõõtmistulemuste vahelised statistilised seosed on järjepanu osutunud mittepõhjuslikeks (Christensen jt, 2022). Üldjuhul on signaal müraga võrreldes liiga nõrk. Selguse võiksid tuua laborikatsega sarnased eksperimendid Maa atmosfääris, kus pilvedesse pihustatakse kontrollitud suuruse ja keemilise koostisega saasteosakesi. Sellised eksperimendid võivad paraku olla kahjulikud elusloodusele, tõstatada hulgaliselt eetikaküsimusi ja olla kulukad. Oleme kliimauuringute keskuses probleemi leidlikult lahendanud, võttes kasutusele loomulikud eksperimendid, kus laborikatsega sarnased tingimused on tagatud ilma teadlaste sekkumiseta (Toll jt, 2017; Toll jt, 2019; Toll jt, 2024). Oleme esimesena maailmas süsteemselt uurinud üksikute suurte tehaste mõju pilvedele, võrreldes õhusaasteosakeste poolt mõjutatud pilvede omadusi vahetus läheduses asuvate saastumata pilvede omadega (Trofimov jt, 2020; Rahu jt, 2022; Trofimov jt, 2022; Toll ja Rahu, 2023).



Joonis 3. Üksiku tehase poolt saastatud pilveala kui loomulik eksperiment inimtekkelise õhusaaste mõjust pilvedele (Toll jt, 2019; Toll jt, 2024). Ilmatingimused on kõrvuti asuvatel saastunud eksperimendialal ja saastumata kontrollalal ühesugused ning ainus erinevus alade vahel on õhusaaste hulk.

Saastunud ja saastumata pilvede ruumiline lähedus tagab, et meteoroloogilised tingimused on mõlemas piirkonnas ühesugused. Õhusaaste hulk on ainus erinevus saastunud ja saastumata alade vahel (Toll jt, 2019). See tagabki eksperimendilaadsed tingimused, mis viisid ka alljärgneva avastuseni.

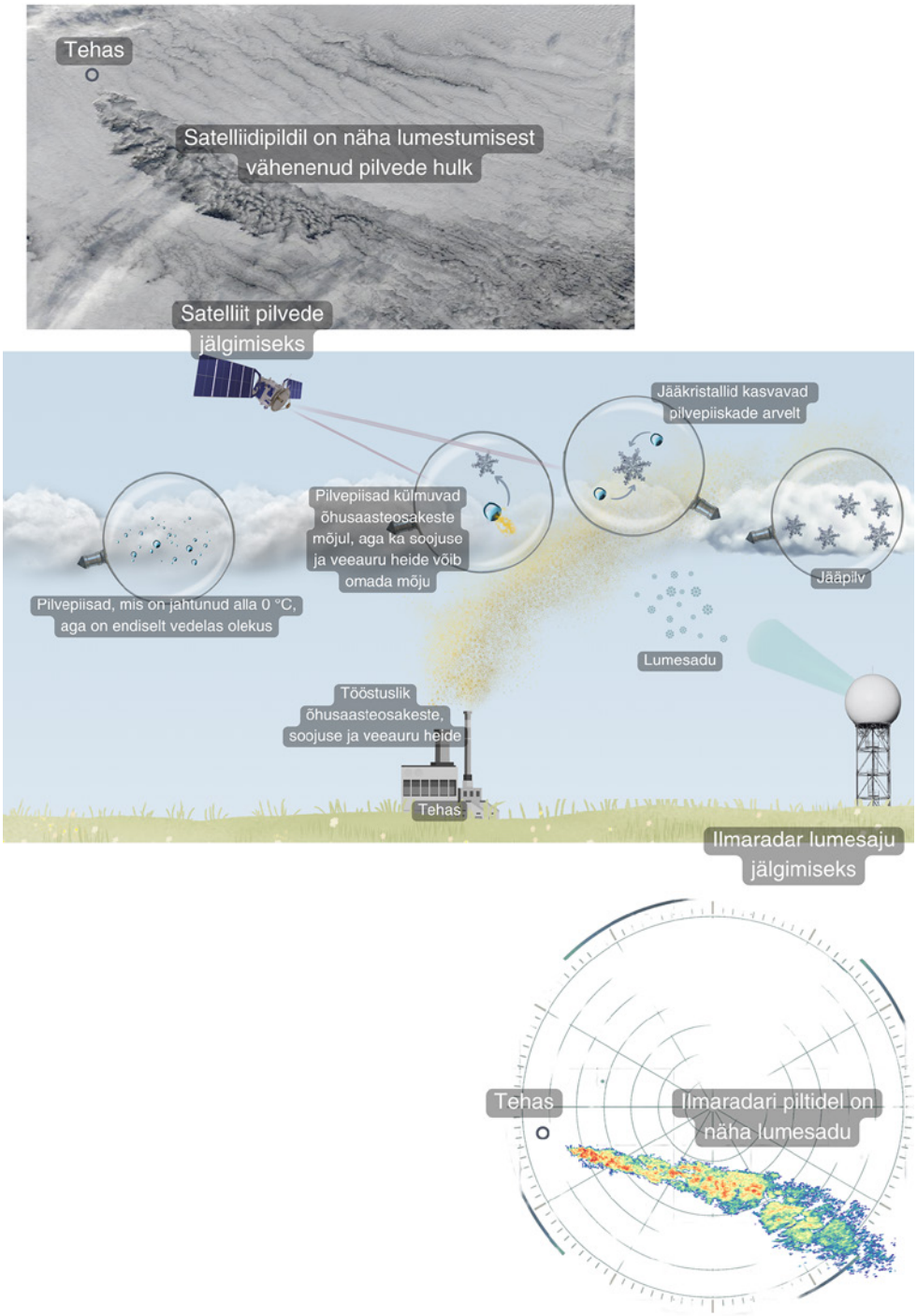
Läbimurdeline avastus: pilvede inimtekkeline lumestumine

Töörühm näitas esimesena maailmas, et inimtekkelised õhusaasteosakesed käituvad atmosfääris ka jäätekke tuumadena, põhjustavad pilvede lumestumist ja vähendavad seeläbi pilvede hulka ning mõjutavad päikese- ja soojuskiirguse voogusid (joonis 4; Toll jt, 2024). Samas on oluline märkida, et lisaks õhusaasteosakestele võib ka tööstuslik soojuse ja veeauru heide tööstusallikate läheduses mõjutada jääpilvede teket (joonis 4). Avastus inimtekkelistest jäätekke tuumadest laiendab paradigmat, mis kirjeldab inimtegevuse mõju pilvedele ja Maa kliimale.

Avastasime satelliidiandmetest, et tugevate tööstuslike õhusaasteallikate läheduses tekivad teatud tingimustel veepilvedest jääpilved ja pilvede hulk kahaneb (Toll jt, 2024). Lisaks avastasime maapealsete sademeradarite andmetest lumesaju alad, mis kattusid veepilvede jäätumise aladega. Satelliidi- ja radariandmeid kombineerides uuriti füüsikalisi protsesse, mis algavad jää tekkega vedelal kujul pilvepiiskadest ja lõppevad lumesaju tõttu kahanenud pilvisusega. Niimoodi panime kokku tervikliku füüsikalise arusaama inimtekkelise õhusaaste põhjustatud pilvede lumestumisest (joonis 4). Kõigepealt tekivad allajahtunud pilvepiiskadest õhusaasteosakeste mõjul jääkristallid. Seejärel kasvavad jääkristallid ümbritsevate vedelas faasis pilvepiiskade arvelt, sest samal temperatuuril on küllastav veeauru rõhk jää kohal madalam kui vee kohal. Edaspidi kasvavad jääkristallid üksteisega liitumise teel nii rasketeks, et sajavad lumena maapinnale – pilved lumestuvad ja pilvede hulk kahaneb (joonis 4).

Pilved, mille temperatuur on 0 °C kuni –40 °C, sisaldavad sageli ka allajahtunud vedelaid pilvepiisku, sest puhas vesi ei jäätu alati temperatuuril 0 °C. Veepiiskade külmumiseks temperatuuridel 0 °C kuni –40 °C on vaja jäätekke tuumasid, mis põhjustavad jääkristallide tekke, kuna lisaks faasisiirdele mõjutab vabaenergia hulka ka tekkiv piirpind tahke ja vedela faasi vahel. Teadmised jäätekke tuumade päritolust ja täpsetest omadustest on senini väga puudulikud, kuid on teada, et jääd tekitavad õhusaasteosakesed on Maa atmosfääris ülimalt haruldased. Otsesed vaatluslikud tõendid kinnitasid, et inimtekkeline õhusaaste põhjustab allajahtunud pilvepiiskade jäätumist. Näitasime, et jäätekke tuumadena toimivad väga erineva keemilise koostisega õhusaasteosakesed, mis pärinevad naftatöötlemisest, kivisöeelektrijaamadest, metalli-, tsemendi- ja paberitööstusest ning mujaltki. Lisaks rõhutasime, et tööstused emiteerivad ka soojust ja veeauru, mis võivad samuti mõjutada jää teket vedelal kujul pilvepiiskadest.

Tulevikukliima projektsioonides pole arvesse võetud inimtekkeliste õhusaasteosakeste võimalikku mõju allajahtunud veepilvede jäätumisele, ehkki kliimateadlased on varem pikalt diskuteerinud, kas ja missugused inimtekkeli-



Joonis 4. Kontseptuaalne ülevaade Tartu Ülikooli füüsika instituudi kliimauuringute keskuse teadlaste poolt avastatud vaatluslikest tõenditest inimtekkelise õhusaaste põhjustatud pilvede lumestumise kohta ja loodud füüsikaline arusaam lumestumise nähtusest (Toll jt, 2024). Õhusaasteosakesed käituvad jäätekke tuumadena, tekitavad pilvede lumestumise ja vähendavad seetõttu pilvisust.

sed õhusaasteosakesed soodustavad pilvedes jääkristallide moodustumist. Siin täidame suure lünga teadmistes kogutud vaatluslike tõenditega, mis näitavad, et jäätekke tuumadena toimivate inimtekkeliste õhusaasteosakeste kliimamõju tugevust tuleks täpsustada ja arvesse võtta (Toll jt, 2024).

Uue uurimissuuna tekkimine: loomulike eksperimentide kasutamine kliimauuringuteks

Kliimateadus on üks paljudest teadusharudest, kus tahtlikud laborikatsetega sarnased eksperimendid ei ole lihtsasti teostatavad ja oleks enamasti selgelt ebaeetilised (Christensen jt, 2022). Üksikute tehaste saaste mõjust pilvedele on kliimauuringute keskuses välja kasvanud süsteemne loomulike eksperimentide kasutus. Tänu meie töödele (Toll jt, 2019; Toll jt, 2024; Trofimov jt, 2020; Rahu jt, 2022; Trofimov jt, 2022) on loomulikud eksperimendid muutunud ka kliimateaduses omaette uurimissuunaks (Christensen jt, 2022), mis loodetavasti tagab tulevikus usaldusväärsed vastused mitmetele küsimustele inimtekkeliste õhusaasteosakeste mõjust pilvedele ja Maa kliimale.

VIITED

Andreae, M. O., Jones, C. D., Cox, P. M. 2005. Strong present-day aerosol cooling implies a hot future. Nature, 435(7046), 1187–1190, https://doi.org/10.1038/nature03671

Bellouin, N., Quaas, J., Gryspeerdt, E., Kinne, S., Stier, P., Watson-Parris, D., ... Stevens, B. 2020. Bounding global aerosol radiative forcing of climate change. Reviews of Geophysics, 58(1), e2019RG000660, https://doi.org/10.1029/2019RG000660

Christensen, M., Gettelman, A., Cermak, J., Dagan, G., Diamond, M., Douglas, A., ... Yuan, T. 2022. Opportunistic experiments to constrain aerosol effective radiative forcing. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022, 22, 641–674, https://doi.org/10.5194/acp-22-641-2022

Quaas, J., Andrews, T., Bellouin, N., Block, K., Boucher, O., Ceppi, P., ... Wall, C. J. 2024. Adjustments to climate perturbations – mechanisms, implications, observational constraints. AGU Advances, 5(5), e2023AV001144, https://doi.org/10.1029/2023AV001144

Rahu, J., Trofimov, H., Post, P., Toll, V. 2022. Diurnal evolution of cloud water responses to aerosols. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 127(10), https://doi.org/10.1029/2021JD035091

Toll, V., Christensen, M., Gassó, S., Bellouin, N. 2017. Volcano and ship tracks indicate excessive aerosol-induced cloud water increases in a climate

model. Geophysical Research Letters, 44(24), 12492–12500, https://doi.org/10.1002/2017GL075280

Toll, V., Christensen, M., Quaas, J., Bellouin, N. 2019. Weak average liquid-cloud-water response to anthropogenic aerosols. Nature, 572(7767), 51–55, https://doi.org/10.1038/s41586-019-1423-9

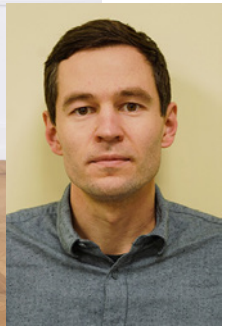
Toll, V., Rahu, J. 2023. Strong anthropogenic cloud perturbations can persist for multiple days. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 128(9), https://doi.org/10.1029/2022JD038146

Toll, V., Rahu, J., Keernik, H., Trofimov, H., Voormansik, T., Manshausen, P., ... Bellouin, N. 2024. Glaciation of liquid clouds, snowfall, and reduced cloud cover at industrial aerosol hot spots. Science, 386(6723), 756–762, https://www.science.org/doi/10.1126/science.adl0303

Trofimov, H., Bellouin, N., Toll, V. 2020. Large-scale industrial cloud perturbations confirm bidirectional cloud water responses to anthropogenic aerosols. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125(14), https://doi.org/10.1029/2020JD032575

Trofimov, H., Post, P., Gryspeerdt, E., Toll, V. 2022. Meteorological conditions favorable for strong anthropogenic aerosol impacts on clouds. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 127(4), https://doi.org/10.1029/2021JD035871

Vasakult: Heido Trofimov, Jorma Rahu, Piia Post, Hannes Keernik ja Velle Toll. Foto: Erlend Štaub



Tanel Voormansik
Foto: erakogu

Velle Toll

Sündinud 14. detsembril 1987 Saaremaal

2007 Saaremaa Ühisgümnaasium (kuldmedal)

2013 Tartu Ülikool, füüsika (MSc, *cum laude*)

2016 Tartu Ülikool, füüsika (PhD)

Velle Toll töötab Tartu Ülikoolis kliimafüüsika professorina. Professor Toll on rahvusvahelistes kliimauuringutes üks loomulike eksperimentide uurimissuuna rajajatest ja tema teadusrühm on ainuke maailmas, kes on keskendunud loomulike eksperimentide kasutamisele inimtekkeliste õhusaasteosakeste kliimamõju tugevuse täpsustamiseks. Professor Toll on pannud aluse inimtegevuse kliimamõju uuringutele Eestis, rajades 2019. aastal Tartu Ülikoolis inimtegevuse kliimamõju uuriva töörühma ja juhtides mitmeid teadusprojekte. Lisaks on Velle Toll aktiivne kliimauuringute populariseerija.

Hannes Keernik

Sündinud 21. aprillil 1986 Pärnus

2005 Pärnu Koidula Gümnaasium (hõbemedal)

2011 Tartu Ülikool, keskkonnatehnoloogia (MSc, *cum laude*)

2015 Tartu Ülikool, füüsika (PhD)

Hannes Keernik töötab Tartu Ülikoolis kliimafüüsika kaasprofessorina. Ta on osalenud mitmetes rahvusvahelistes teadusprojektides, uurides atmosfääri niiskussisalduse ajalist ja ruumilist muutlikkust nii kaugseire kui kohapealsete vaatlusandmete abil. Samuti on tema varasem teadustöö keskendunud aerosoolide keemilise koostise analüüsimisele ja nende rolli mõistmisele kliimasüsteemis. Praegu arendab dr Keernik uudseid arvutuslikke vahendeid, mis võimaldavad täpsemalt hinnata inimtegevusest pärinevate aerosoolide mõju pilvede omadustele ja kliimale.

Jorma Rahu

Sündinud 27. märtsil 1992 Võrus

2011 Miina Härma Gümnaasium

2018 Tartu Ülikool, füüsika (MSc)

2025 Tartu Ülikool, füüsika (PhD)

Jorma Rahu töötab Tartu Ülikoolis kliimafüüsika spetsialistina ja Keskkonnaagentuuris radarmeteoroloogia peaspetsialistina. Dr Rahu uurib inimtekkeliste õhusaasteosakeste mõju pilvedele, ühendades mõõteandmeid nii satelliitinstrumentidelt kui ka maapealsetelt meteoroloogilistelt radaritelt. Eriilmeliste andmete kasutus on andnud uudse vaatenurga inimtekkelistest aerosoolidest põhjustatud pilvehäiringute uurimisele, andes ka laiema panuse inimtegevuse kliimamõju tugevuse hinnangutesse.

Heido Trofimov

Sündinud 22. veebruaril 1993 Viljandis

2012 Vanalinna Hariduskolleegium

2018 Tartu Ülikool, füüsika (MSc)

2022 Tartu Ülikool, füüsika (PhD)

Heido Trofimov töötab Tartu Ülikoolis kliimafüüsika teadurina ja ettevõttes KappaZeta OÜ tarkvaraarendajana satelliidipiltide töötlemise alal. Dr Trofimov uurib inimtekkeliste õhusaasteosakeste mõju pilvedele ja seeläbi kliimale, kasutades selleks satelliidiandmeid ja statistilisi meetodeid. Tema töö on aidanud täpsustada õhusaasteosakeste jahutava kliimamõju ulatust ja loonud seeläbi eeldused täpsemate kliimaprojektsioonide koostamiseks tulevikus.

Piia Post

Sündinud 10. juulil 1963 Rõuges

1981 Võru I Keskkool (kuldmedal)

1986 Tartu Ülikool, füüsik-füüsikaõpetaja (geofüüsika)

1993 Tartu Ülikool, geofüüsika (PhD)

Piia Post töötab Tartu Ülikoolis kliimateaduste professorina ja juhib kliimauuringute keskust. Tema teadustöö on aidanud paremini mõista atmosfääri tsirkulatsiooni mõju Läänemere piirkonna atmosfääri ja merekeskkonna muutustes. Ta on juhtinud mitmeid olulisi tulevikukliimaga kohanemise projekte, sealhulgas LIFE-SIP AdaptEST raames Eesti uute kliimaprojektsioonide koostamist. Professor Post on kogenud õppejõud, kes on õpetanud nii üldfüüsikat kui ka atmosfääri- ja kliimateadusi tuhandetele üliõpilastele, panustanud bakalaureuse- ja magistriõppekavade arendamisse ja koordineerinud mitmeid doktorikoole.

Tanel Voormansik

Sündinud 15. novembril 1989 Viljandis

2009 Suure-Jaani Gümnaasium (kuldmedal)

2014 Tartu Ülikool, keskkonnatehnoloogia (MSc)

2023 Tartu Ülikool, keskkonnatehnoloogia (PhD)

Tanel Voormansik töötab Tartu Ülikoolis radarkaugseire teadurina ja Keskkonnaagentuuris radarmeteoroloogia peaspetsialistina. Tema teadustöö keskendub kaksikpolarimeetriliste ilmaradarite andmetest kvantitatiivsete sajuhinnangute arvutuste parendamisele ning ekstreemsadude ja konvektiivsete tormide klimatoloogiale. Esmakordselt maailmas pikaajaliste kaksikpolarimeetriliste radariandmete kasutamine kvantitatiivseteks sajuhinnanguteks on näidanud dr Voormansiku teadustöö tulemuste olulist rolli ka kliimauuringutes.

https://doi.org/10.3176/evp.2026.04

UUDSED NANOSTRUKTUURSED ELEKTRO-KATALÜSAATORID MADALATEMPERATUURSETELE KÜTUSEELEMENTIDELE JA TSINK-ÕHK AKUDELE

Kaido Tammeveski, Ave Sarapuu, Heiki Erikson, Marek Mooste, Jaana Lilloja-Lensment ja Srinu Akula (Tartu Ülikool)

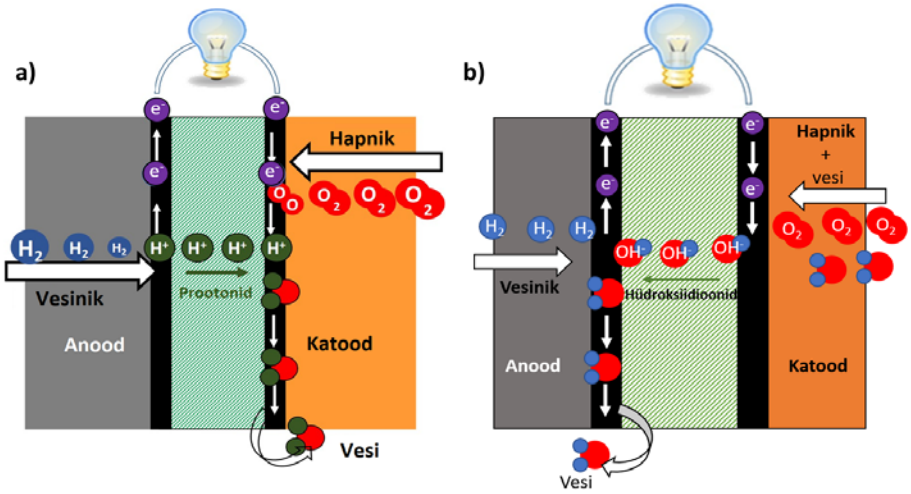
Teaduspreemia loodusteaduste valdkonnas tööde tsükli „Uudsed nanostruktuursed elektrokatalüsaatorid madalatemperatuursetele kütuseelementidele ja tsink-õhk akudele“ eest

Sissejuhatus

Kliima soojenemine ja vajadus vähendada sõltuvust fossiilkütustest on seadnud inimkonna ette vältimatu ülesande minna üle taastuvatele ja süsinikuneutraalsetele energiaallikatele. Tuule- ja päikeseenergia tootmine on viimastel aastakümnetel jõudsalt kasvanud ja see on toonud kaasa üha suurema vajaduse tõhusate energia salvestamise ja muundamise tehnoloogiate järele, mis suudaksid tasandada tootmise ja tarbimise vahelisi ebakõlasid.

Oluline roll tuleviku taastuvenergial põhinevas majanduses on vesinikul kui mitmekesisel energiakandjal [1, 2]. Vesinik võimaldab taastuvenergia ülejäägi salvestada keemilise energiana: päikeselistel ja tuulistel päevadel toodetakse seda vee elektrolüüsi teel ja seejärel hoiustatakse, et see vajadusel uuesti elektrienergiaks muuta. Lisaks saab vesinikku kasutada mitmete oluliste ainete, näiteks ammoniaagi ja metanooli sünteesil, mis võimaldab muuta ka keemiatööstuse süsinikuneutraalseks ja vähendada selle sektori sõltuvust fossiilsest toormest [2].

Vesinikust elektrienergia saamiseks on kõige efektiivsemad seadmed kütuseelemendid, kus elektrivool tekib kütuse reageerimisel hapnikuga ilma põlemisprotsessita [3]. Kütuseelementide kasutegur on seetõttu kõrge ja jääkproduktiks vaid puhas vesi. Kütuseelemente on mitut tüüpi, vastavalt konkreetsele rakendusele on neis kasutusel erinevad elektroodimaterjalid, elektrolüüdid ja töötemperatuur. Transpordisektoris ja lokaalsetes energeetikalahendustes on kõige perspektiivsemad madalatemperatuursed (< 100 °C) kütuseelemendid (joonis 1), millest kõige küpsem tehnoloogia on prootonivahetusmembraaniga kütuseelemendid (ingl *proton-exchange membrane fuel cell*, PEMFC), mis on praeguseks kasutusel näiteks vesinikuautodes. Viimastel aastakümnetel on palju



Joonis 1. a) Prootonivahetusmembraaniga kütuseelemendi ja b) anioonivahetusmembraaniga kütuseelemendi ehitus ja tööpõhimõte.

tähelepanu pööratud ka anioonivahetusmembraaniga kütuseelementide (ingl *anion-exchange membrane fuel cell*, AEMFC) arendamisele. Mõlemas seadmes on keskne roll katalüsaatoriga kaetud elektroodidel: anoodil toimub vesiniku oksüdeerumine ja katoodil hapniku redutseerumine. Neid elektroode eraldab ioonivahetusmembraan, kust saavad läbi minna PEMFC puhul vesinikioonid ja AEMFC puhul hüdroksiidioonid [4].

Kütuseelementide laiemat levikut piirab eelkõige katoodil toimuv hapniku elektrokeemiline redutseerumisreaktsioon, mis on väga aeglane ja kõrge aktivatsioonienergiaga protsess [5]. Selle reaktsiooni kiirendamiseks on vajalik tõhus katalüsaator, mis vähendab reaktsiooni ülepinget ja sellega aitab saavutada piisavalt kõrget kütuseelemendi väljundpinget ja võimsustihedust. Lisaks peab katalüsaator suunama hapniku redutseerumisreaktsiooni läbi neljaelektronilise reaktsioonitee, mis tagab maksimaalse energiatõhususe:

$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$ (happelises lahuses) või $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ (aluselises lahuses).

Vähem efektiivse kaheelektronilise redutseerumise puhul tekib saadusena vesinikperoksiid:

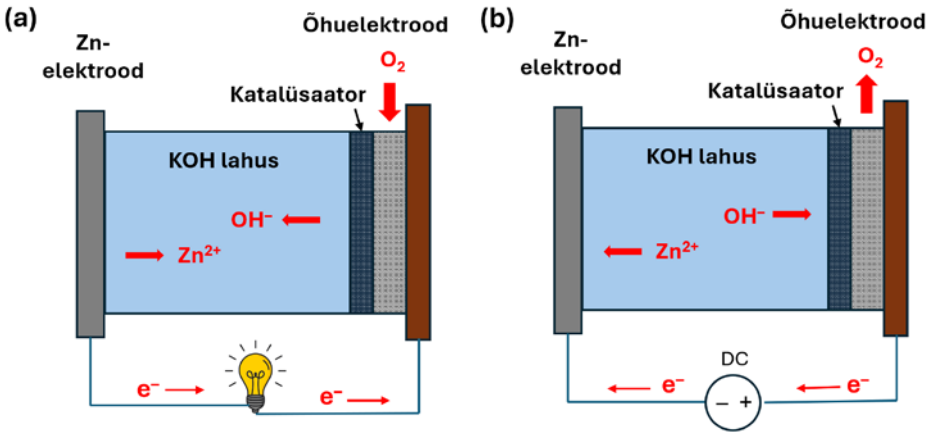
$O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O_2$ (happelises lahuses) või $O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow HO_2^- + OH^-$ (aluselises lahuses).

Ehkki vesinikperoksiid saab katalüsaatorikihis edasi veeks redutseeruda, võib see vaheproduktina oma oksüdeerivate omaduste tõttu kahjustada kütuseelemendi komponente, eelkõige polümeerset ioonivahetusmembraani ja katalüsaatormaterjali.

Lisaks kütuseelementidele on hapniku elektrokeemilised reaktsioonid olulised uue põlvkonna salvestusseadmetes – metall-õhk akudes, näiteks tsink-õhk akudes (ingl *zinc-air battery*, ZAB) (joonis 2) [6–8]. Võrreldes tänapäeval levinud liitiumioonakudega on need ohutumad, hinnalt soodsamad ja suurema energiatihedusega, sest hapnik ammutatakse otse välisõhust. Tsink-õhk aku tühjenemisel toimub õhuelektroodil hapniku redutseerumine, sama elektrood peab aga olema laadimistsükli vältel võimeline katalüüsima ka vastupidist reaktsiooni – hapniku eraldumisreaktsiooni:

$4OH^- \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e^-$ (aluselises lahuses).

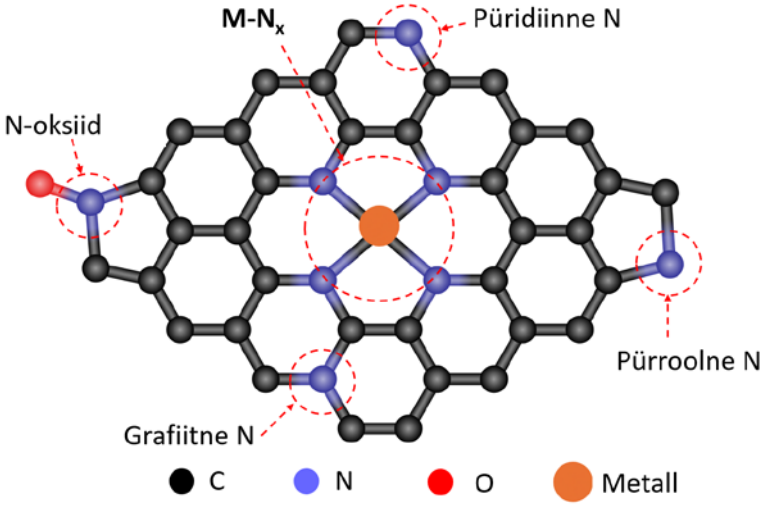
See tähendab, et õhuelektroodi katalüsaatorid peaksid olema bifunktsionaalsed, mis seab neile materjalidele veelgi kõrgemad nõudmised.



Joonis 2. Tsink-õhk aku ehitus ja tööpõhimõte (a) tühjenemistsüklis ning (b) laadimistsüklis.

Ajalooliselt on kõige efektiivsemad hapniku redutseerumisreaktsiooni katalüsaatorid põhinenud plaatinarühma metallidel, peamiselt plaatinal endal. Kuna need metallid on kallid ja nende varud maakoores on piiratud, hoiab see ka madalatemperatuursete kütuseelementide hinna kõrge ja takistab nende laialdasemat rakendamist. Seetõttu on elektrokeemias üks olulisemaid teadustöö fookuseid olnud odavamate, kättesaadavamate ja jätkusuutlikumate katalüsaatormaterjalide arendamine. Siin on AEMFC tehnoloogial suur eelis PEMFC ees: kuna hapniku redutseerumisreaktsioon toimub aluselises keskkonnas kiiremini kui happelises, on AEMFC katoodil võimalik kasutada mittevääriismetallkatalüsaatoreid. Kõige paremaid tulemusi on saadud siirdemetalle (nt rauda või koobaltit) sisaldavate lämmastikuga dopeeritud süsinikmaterjalidega – M-N-C tüüpi katalüsaatoritega [9, 10]. Peamisteks aktiivtsentriteks on neis üksikud metalli aatomid, mis on koordineeritud süsinikvõrestikus paiknevate lämmastiku aatomitega ($M\text{-}N_x$ tsentrid) (joonis 3). Esmalt mainiti $M\text{-}N_x$ tsentrite olulisust juba 1964. aastal, mil Jasinski kasutas koobaltftalotsüaniini hapniku redutseerumise katalüsaatorina [11].

Viimasel kümnendil on M-N_4 makrotsüklitel põhinevad katalüsaatorid leidnud laialdast rakendust madalatemperatuursete kütuseelementide katoodimaterjalina [12]. Lisaks M-N_x tsentritele on aluselises keskkonnas üsna aktiivsed ka metallivabad lämmastikuga dopeeritud süsinikmaterjalid, mille elektrokatalüütilist aktiivsust seostatakse erinevate lämmastiku vormidega. Hapniku eraldumisreaktsiooni elektrokatalüüsiks on samuti olulised M-N_x tsentrid, aga lisaks parandavad katalüsaatormaterjali aktiivsust hapniku eraldumise jaoks ka siirdemetallide oksiidid ja nanoosakesed [13, 14].



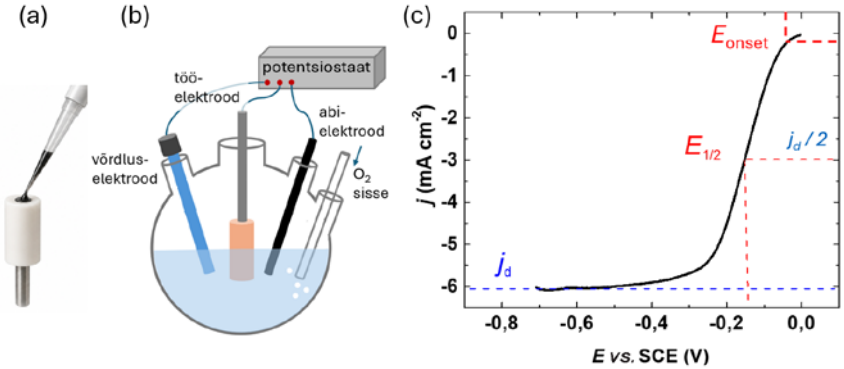
Joonis 3. Võimalikud hapniku redutseerumise aktiivtsentrid M-N-C katalüsaatoris.

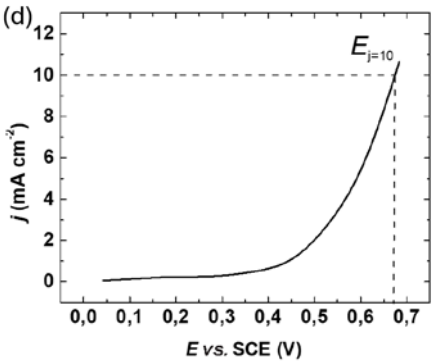
Katalüsaatori efektiivsus kütuseelemendis sõltub seega aktiivtsentrite hulgast ja nende loomusest. Lisaks on väga oluline, et need tsentrid oleksid hästi ligipääsetavad – sel juhul jõuab hapnik nendeni piisavalt kiiresti ja reaktsioonil tekkinud vesi pääseb minema. Seetõttu tuleb katalüsaatorite väljatöötamisel pöörata tähelepanu ka materjalide poorsusele. Kasuks tuleb eelkõige hierarhiline poorne struktuur – mikropoorid (läbimõõduga < 2 nm) ja väikesed mesopoorid annavad katalüsaatoritele suure eripinna, mis on vajalik kõrge aktiivtsentrite tiheduse saavutamiseks, suuremad mesopoorid ja makropoorid (> 50 nm) aga tagavad reagentide ja produktide kiire massiülekande. Katalüsaatorite valmistamisel on alusmaterjalina kasutatud erineva poorsusega kommertsiaalseid süsinikmaterjale, näiteks suurepinnalisi süsinikpulbreid, süsiniknanotorusid, grafeeni jne. Lisaks on erineva poorsuse ja muude vajalike omadustega nanostruktuurseid süsinikmaterjale võimalik saada orgaaniliste lähteainete pürolüüsimisel kõrgel temperatuuril. Lähteaineteks sobib seejuures kõikvõimalik orgaaniline materjal, näiteks tselluloos, ligniin või isegi tööstusjäätmed. Sobiva poorsuse saavutamine nõuab aga spetsiaalseid meetodeid, üks võimalustest on lisada nende pürolüüsimisel erinevaid matriitse või poorimoodustajaid.

Süsinikmaterjalist aktiivsete M-N-C katalüsaatorite valmistamiseks on üks enim levinud meetodeid nende kõrgtemperatuurne pürolüüs lämmastiku ja siirdemetalli allikate juuresolekul. Orgaaniliste lähteainete puhul saab sünteesi läbi viia ka ühes etapis, kus pürolüüsil toimub samaaegselt nende karboniseerimisega ka lämmastikuga dopeerimine ja M-N_x tsentrite teke. Siirdemetall võib lisaks M-N_x tsentrite moodustamisele koguneda ka metalli sisaldavateks nanoosakesteks, mis aluselises keskkonnas võivad samuti katalüüsida nii hapniku redutseerumis- kui ka eraldumisreaktsiooni.

Lisaks kõrgele aktiivsusele on kütuseelementides ja metall-õhk akudes kasutatavate katalüsaatorite puhul väga oluline ka see, et need oleksid seadmete töötamisel pikaajaliselt stabiilsed. Praktikas on see just süsinikmaterjalidel põhinevate katalüsaatorite puhul üsna suur probleem: mitmed protsessid, näiteks süsinikkandja korrosioon, aktiivtsentrite degradatsioon ja metallide väljaleostumine, põhjustavad katalüsaatorite aktiivsuse olulist langust.

Katalüsaatorite arendamisel on peamine eesmärk saada materjale, mis oleksid samaaegselt kõrge elektrokatalüütilise aktiivsusega, stabiilsed ja mida oleks võimalik piisavalt odavalt toota. Katalüsaatori aktiivsuse esmaseks hindamiseks kasutatakse tsüklilist voltamperomeetriat või pöörleva ketaselektroodi meetodit, kus pulbrilisest materjalist valmistatakse suspensioon, mis kantakse tilkhaaval süsinikelektroodi pinnale ja lastakse kuivada (joonis 4a). Saadud elektroodi testitakse kolme-elektroodilises süsteemis hapnikuga küllastatud elektrolüüdilahuses (joonis 4b) ja registreeritakse voolutugevuse sõltuvus potentsiaalist (E) (joonis 4c ja 4d). Potentsiaali mõõdetakse ja väljendatakse erinevate võrdluselektroodide, näiteks küllastunud kalomelelektroodi (ingl *saturated calomel electrode*, SCE) või pöörduva vesinikelektroodi (ingl *reversible hydrogen electrode,* RHE) suhtes. Materjali elektrokatalüütilise aktiivsuse iseloomustamiseks hapniku elektroredutseerumisel kasutatakse poollainepotentsiaali ($E_{1/2}$) ja lainealguspotentsiaali (E_{onset}) väärtusi (joonis 4), eelkõige väärismetallkatalüsaatorite puhul ka eriaktiivsust (ingl *specific activity*, SA) ja massaktiivsust (ingl *mass activity*, MA), mis väljendavad voolutugevust teatud potentsiaalil vastavalt katalüsaatori pindala- või massiühiku kohta. O_2 eraldumisreaktsiooni aktiivsust väljendatakse potentsiaali väärtusega $E_{j=10}$, kus voolutihedus (j) saavutab väärtuse 10 mA/cm^2. Bifunktsionaalset aktiivsust näitab parameeter $\Delta E = E_{j=10} - E_{1/2}$, mis peaks olema võimalikult madal. Kui pöörleva ketaselektroodi meetodiga saadud tulemused näitavad, et katalüsaator on piisavalt aktiivne, siis testitakse seda edasi kütuseelemendi või ZAB testsüsteemis, kus olulist rolli mängib katalüsaatori poorne struktuur. Kütuseelemendi jõudlust väljendatakse maksimaalse võimsustihedusega (P_{max}) ja voolutugevuse väärtusega teatud pingel, kuid tuleb silmas pidada, et neid parameetreid mõjutavad lisaks katalüsaatori omadustele ka teised kütuseelemendi komponendid (eelkõige ioonivahetusmembraan ja anoodkatalüsaator) ning muud tingimused. ZAB eksperimentaalse arendustöö puhul kasutatakse õhuelektroodi kirjeldamiseks peamiste näitajatena maksimaalset tühjakslaadimise võimsustihedust (P_{max}) ja tühjaks-täislaadimise tsükleeritavust võimalikult kõrgel voolutihedusel.





Joonis 4. (a) Elektroodi katmine katalüsaatoriga; (b) mõõterakk kolmeelektroodilises süsteemis katalüsaatorite elektrokatalüütilise aktiivsuse määramiseks; (c) hapniku redutseerumisreaktsiooni polarisatsioonikõver Pt/C katalüsaatoriga kaetud elektroodil; (d) hapniku eraldumisreaktsiooni polarisatsioonikõver RuO_2 katalüsaatoriga kaetud elektroodil 0,1 M KOH lahuses. Näidatud on elektrokatalüütilist aktiivsust kirjeldavate parameetrite (E_{onset}, $E_{1/2}$ ja $E_{j=10}$) väärtuste määramine.

Meie töörühma tegevus ongi valdavalt olnud seotud hapniku elektrokeemilise redutseerumisreaktsiooni uurimisega erinevatel materjalidel – nii metallide nanoosakestel kui ka M-N-C tüüpi katalüsaatormaterjalidel. Saadud teadmisi oleme rakendanud katalüsaatorite väljatöötamiseks AEMFC, PEMFC ja ZAB jaoks.

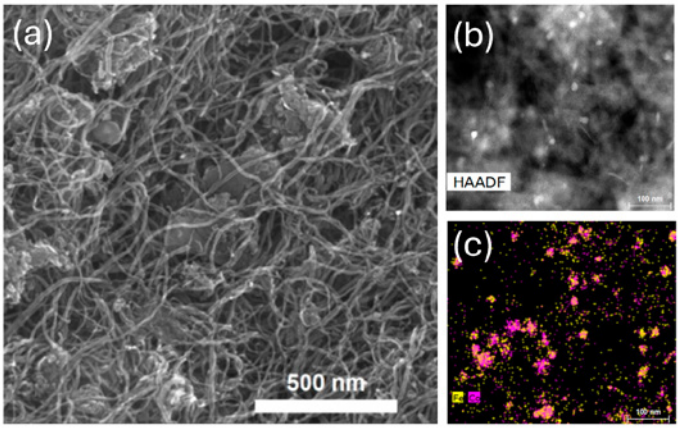
Katalüsaatormaterjalid anioonivahetusmembraaniga kütuseelemendile

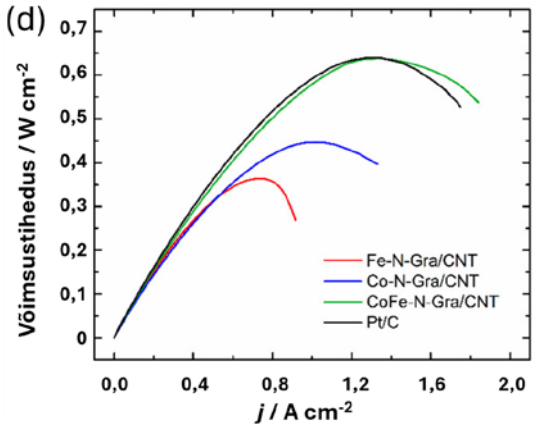
Anioonivahetusmembraaniga kütuseelemendis liiguvad läbi membraani hüdroksiidioonid ning katalüsaatorikihi koostises kasutatakse samuti hüdroksiidioone juhtivat ionomeeri (joonis 1b). Seega toimub hapniku redutseerumine seal aluselises keskkonnas ning uuritavaid katalüsaatoreid testitakse seetõttu tavaliselt leeliselises lahuses, näiteks 0,1 M KOH-is.

Kuigi aluselises keskkonnas on ka dopeerimata süsinikmaterjalid teatud määral aktiivsed O_2 redutseerumisel, suureneb nende aktiivsus oluliselt heteroaatomitega dopeerimisel. Kõige tüüpilisem dopant on lämmastik, kuid mõned uurimused näitavad, et mitme heteroaatomi koosmõju võimaldab saavutada veelgi kõrgemat elektrokatalüütilist aktiivsust. Meie töödes andis samuti metallivabadest katalüsaatoritest parima tulemuse karbiidset päritolu süsiniku (ingl *carbide-derived*

carbon, CDC) ja süsiniknanotorude (ingl *carbon nanotubes,* CNT) komposiidi lämmastiku ja fosforiga koosdopeerimisel saadud materjal, saavutades AEMFC-s P_{max} väärtuseks 538 mW/cm^2, mis on maailmas üks parimaid metallivaba katoodkatalüsaatoriga saadud tulemusi [15].

Kõige paljulubavamad mittevääriismetallkatalüsaatorid O_2 redutseerumise jaoks on siirdemetalli ja lämmastikuga dopeeritud süsinikmaterjalid (M-N-C), kus olulisteks aktiivtsentriteks on lisaks lämmastikurühmadele ka aatomdispergeeritud M-N_x tsentrid [9]. Siirdemetallidest on O_2 redutseerumisel kõrge aktiivsusega raud, koobalt ja mangaan ning kõiki neid, nii üksi kui mitut samaaegselt, kasutasime ka oma tööde tsükli jooksul, et uurida eri metallilisandite mõju kütuseelemendi jõudlusele. Kui pöörleva ketaselektroodi mõõtmistel on enamasti aktiivseimad rauda sisaldavad materjalid, siis AEMFC testides on kõrgemat jõudlust näidanud bimetalsed, rauda ja koobaltit sisaldavad katalüsaatorid. Nii saime grafeeni/CNT komposiidi dopeerimisel nende kahe siirdemetalliga katalüsaatori CoFe-N-Gra/CNT, mis AEMFC-s andis P_{max} väärtuseks 638 mW/cm^2, mis oli *ca* 1,5 korda kõrgem kui ainult ühte metalli, rauda või koobaltit, sisaldavate katalüsaatoritega saavutatu (joonis 5) [16].





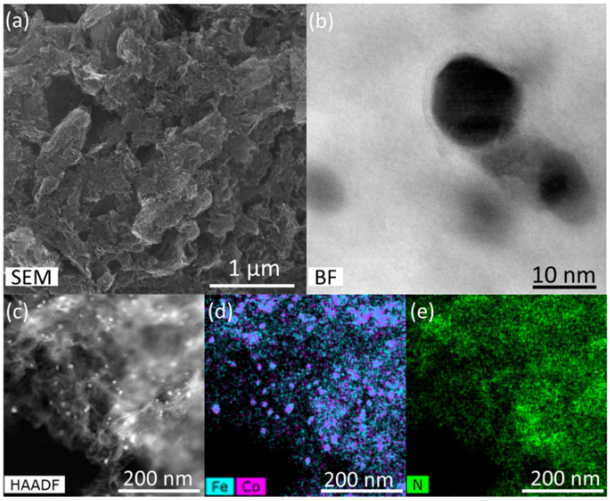
Joonis 5. (a) Skaneeriva elektronmikroskoopia kujutis CoFe-N-Gra/CNT katalüsaatormaterjalist;
(b) HAADF-STEM kujutis CoFe-N-Gra/CNT materjalist koos energiadispersiivse röntgenspektroskoopia elementkaardistamisega (c);
(d) katalüsaatorite võimsustiheduse kõverad H_2/O_2 AEMFC-s [16].

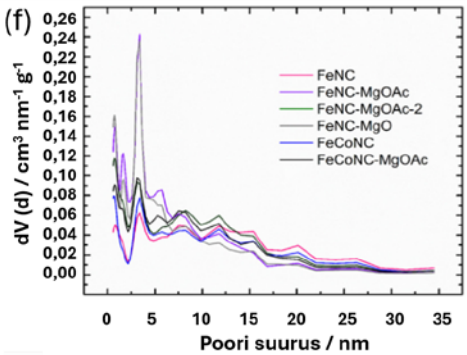
Kuigi koobalti lisamine tõstab kütuseelemendi jõudlust, on koobaltit sisaldavate katalüsaatorite puuduseks see, et O_2 redutseerumine nende pinnal toimub osaliselt kaheelektronilise protsessina ja tekib vesinikperoksiid, mis võib kahjustada kütuseelemendi komponente. Seda kinnitasid kommertsiaalsest mesopoorsest süsinikust valmistatud raua, koobalti, mangaani ja bimetalsete M-N-C katalüsaatoritega saadud tulemused, kus koobaltit sisaldavatel katalüsaatoritel saadi HO_2^- tekkeprotsendiks 10–36% [17]. Rauda ja FeMn sisaldavate katalüsaatorite puhul tekkis HO_2^- alla 10% ning need katalüsaatorid olid aktiivsed nii pöörleva ketaselektroodi mõõtmistel kui ka AEMFC testides, kuid FeMn katalüsaator oli potentsiaali tsükleerimisel veidi stabiilsem [17]. Meie tööde tsükli tulemustest selgus seega, et aktiivse O_2 redutseerumise katalüsaatori saamiseks tuleb süsinikmaterjalidele lisada lämmastikku ning kahte siirdemetalli, eelistatult rauda ja koobaltit, mis juba väikeses koguses (*ca* 1 massiprotsent) annavad suure efekti.

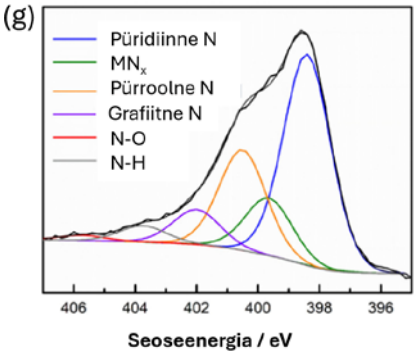
Oluline fookus meie uurimistöödes on olnud katalüsaatorite poorse struktuuri varieerimisel ja selle mõju uurimisel kütuseelemendi jõudlusele. Kütuseelemendi jaoks on vajalik, et materjal oleks hierarhilise poorsusega – rohkete mesopooride ja suure eripinnaga. Kui katalüsaatorite valmistamisel lähtuda kommertsiaalsetest süsinikmaterjalidest, on sobiva struktuuri saavutamiseks võimalik kasutada erinevate omadustega nanomaterjalide segusid. Seetõttu oleme alusmaterjalina kasutanud CNT/grafeeni [16] või CNT/CDC komposiite [15], kus süsiniknanotorude võrgustik moodustab mesopoorse struktuuri ning grafeen või CDC tagavad suure eripinna rohkete mikropooridega. Nende komposiitidega saime AEMFC testides väga häid tulemusi [15, 16].

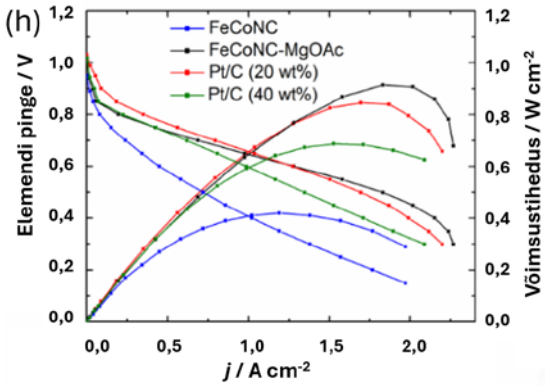
Lisaks kommertsiaalsetel süsiniknanomaterjalidel põhinevate katalüsaatorite uurimisele oli tööde tsükli fookuses ka sobiva struktuuriga süsiniknanomaterjalide valmistamine orgaanilistest lähteainetest. Kontrollitud poorsuse saavutamiseks on üks enim levinud meetod matriitside kasutamine. „Kõva“ matriitsina rakendatakse peamiselt anorgaaniliste ainete nanoosakesi, mis jäävad pärast lähteainete pürolüüsimist moodustuva süsinikmaterjali sisse, seejärel need lahustatakse ning moodustuvad vastava suurusega poorid. Kõige sagedamini on matriitsina kasutatud ränidioksiidi nanoosakesi, kuid nende eemaldamiseks on vaja materjali töödelda vesinikfluoriidhappe või kontsentreeritud leelise lahusega [18]. Meie oleme oma töödes matriitsina kasutanud magneesiumoksiidi, mille lahustamiseks piisab lahjast happelahusest. MgO võib pürolüüsisegusse lisada nanoosakestena, aga teine võimalus on lisada magneesiumisooli, näiteks magneesiumatsetaati, mille lagunemisel pürolüüsi käigus tekib MgO ning lämmastikurikaste lähteainete juuresolekul ka muud magneesiumiühendid [19]. Oleme näidanud, et selle meetodiga saab poorset süsinikku valmistada väga erinevatest lähteainetest: Viru Keemia Grupi toodetud alküülresortsinoolide segust [19], ligniinist [20] ja rapsiõli tootmisel jääkproduktina moodustuvast rapsikoogist [21]. Saadud katalüsaatormaterjalid olid ilma matriitsita valmistatud materjalidega võrreldes suurema eripinnaga ja ka pöörleva ketaselektroodi testides veidi kõrgema elektrokatalüütilise aktiivsusega hapniku redutseerumisel. Suurem mõju oli matriitside kasutamisel aga materjalide AEMFC tulemustele: alküülresortsinoolidest valmistatud FeCoNC-MgOAc katalüsaatoriga saadi P_{max}

väärtuseks 920 mW/cm^2, mis oli üle kahe korra kõrgem kui ilma matriitsita valmistatud materjalil (joonis 6) [19]. Sarnane efekt saadi ka ligniinist [20] ja rapsikoogist [21, 22] valmistatud katalüsaatormaterjalidega, näidates seega, et katalüsaatorite poorsel struktuuril on kütuseelemendis oluline roll.









Joonis 6. FeCoNC-MgOAc materjali (a) skaneeriva elektronmikroskoopia kujutis; (b) skaneeriva läbistuselektronmikroskoopia heleväljakujutis; (c) HAADF-STEM kujutis ja (d, e) energiadispersiivse röntgenspektroskoopia element-kaardistamine; (f) materjalide pooride suurusjaotused; (g) FeCoNC-MgOAc katalüsaatori N1s röntgenfotoelektronspektrid; (h) H_2-O_2 AEMFC polarisatsiooni- ja võimsustiheduse kõverad ilma matriitsita (FeCoNC) ja magneesiumipõhise matriitsiga (FeCoNC-MgOAc) valmistatud M-N-C katalüsaatoritel ja kommertsiaalsel Pt/C katalüsaatoril [19].

Alternatiivina „kõvadele“ matriitsidele saab süsinikmaterjalide valmistamisel orgaanilistest polümeersetest lähteainetest kasutada ka n-ö „pehmeid“ matriitse, milleks on pindaktiivsetest ainetest või kopolümeeridest moodustunud iseorganiseerunud struktuurid ehk mitsellid [23]. Pürolüüsi käigus need lagunevad, jättes tekkinud süsinikmaterjali vastava suurusega poorid. Kuigi need matriitsid on hinna poolest kallimad, on selle meetodi eeliseks see, et ei ole vaja täiendavat töötlemist matriitsi eemaldamiseks. Saadud materjalides (ingl *ordered mesoporous carbon*, OMC) on pooride suurusjaotus väga kitsas ja määratud kasutatava matriitsiga, näiteks Pluronic F127 kasutamisel on nende läbimõõt *ca* 7 nm. Pooride suurusjaotuse mõju uurimiseks valmistasime lisaks katalüsaatormaterjalid OMC ja CNT ning OMC ja CDC komposiitidest, tuues materjali sisse vastavalt rohkem makro- või mikropoore. Neist kõrgeimat AEMFC jõudlust võimaldas OMC/CNT komposiitmaterjal [23]. See näitab, et kütuseelemendis kasutamisel on reagentide ja saaduste efektiivseks massitranspordiks vajalik ka suuremate pooride olemasolu. Teine võimalus suuremate pooride lisamiseks on kasutada korraga kaht matriitsi, näiteks lisaks „pehmele“ matriitsile veel MgO nanoosakesi (diameeter > 40 nm). Sel viisil valmistatud süsinikust saadud koobaltit ja rauda sisaldava N-dopeeritud materjaliga saime AEMFC-s P_{max} väärtuseks 513 mW/cm^2, mis oli lähedane kommertsiaalse mesopoorse Fe-N-C katalüsaatoriga saadud väärtusele [24].

Süstemaatiliselt oleme uurinud O_2 redutseerumist leeliselises lahuses M-N-C katalüsaatoritel, mis valmistati lähtudes melamiin-floroglutsinool-formaldehüüdi (MPF) polümeersest võrestikust, mida seejärel dopeeriti siirdemetallidega (Fe, Co, Mn ja Cu) [25]. Pärast kuumtöötlemist olid need materjalid hierarhilise poorse struktuuriga. Kõige aktiivsemad katalüsaatorid $E_{1/2}$ väärtuse alusel olid MPF/Fe (0,81 V *vs.* RHE) ja MPF/Co (0,80 V *vs.* RHE). Ka elektrokeemilise stabiilsuse testis osutusid need katalüsaatorid kõige vastupidavamateks ($E_{1/2}$ vähenes kõigest 10 mV pärast 10 000 tsüklit potentsiaalide vahemikus 0,6–1,0 V). Kõigi uuritud materjalidega olid võimsustihedused 300–350 mW/cm^2 [25]. Seega õnnestus polümeersest võrestikust sünteesida vajalike omadustega katalüsaatormaterjalid AEMFC jaoks.

Poorseid süsinikmaterjale on orgaanilistest lähteainetest võimalik valmistada ka ionotermilisel meetodil, pürolüüsides neid sulasoolade keskkonnas. Hapniku redutseerumise katalüsaatorite valmistamiseks sobib selleks soolaks eriti hästi $Mg(NO_3)_2$, mille lagunemisel tekkivate gaaside toimel saadakse väga poorne ja juba lämmastikuga dopeeritud süsinikmaterjal. Lagunemisel tekivad ka MgO nanoosakesed, mis toimivad „kõva“ matriitsina ja selle lahustamisel saadakse mesopoorsed materjalid, mille poorne struktuur sõltub $Mg(NO_3)_2$ ja orgaanilise lähteaine massisuhtest. Need materjalid sisaldavad rohkelt lämmastikuga koordineeritud magneesiumi ioone, millest on ioonivahetuse käigus võimalik saada O_2 redutseerumisel aktiivsed Fe-N_x tsentrid [26].

Samas võib sel viisil saadud süsinikku kasutada ka alusmaterjalina järgneval siirdemetallide ja lämmastikuga dopeerimisel. Tsüklodekstriinist ionotermilisel meetodil saadud süsinikust valmistatud Fe-N-C katalüsaatorid olid väga aktiiv-

sed O_2 redutseerumisel leeliselises lahuses ($E_{1/2}$ = 0,9 V *vs.* RHE) ning AEMFC testides saavutasid kõrge jõudluse (P_{max} = 600 mW/cm^2) [27].

Tööde tsükli tulemuste põhjal võib öelda, et M-N-C materjalid on väga perspektiivikad ja jätkusuutlikud AEMFC katoodkatalüsaatorid, mida saab toota küllaltki lihtsate meetoditega odavatest lähteainetest ja mis võiksid asendada plaatinapõhiseid katalüsaatoreid. Leidsime, et nende arendamisel on aga lisaks katalüsaatori koostisele väga oluline disainida ka katalüsaatori poorset struktuuri.

Lisaks mitteväärismetallkatalüsaatoritele oleme uurinud ka pallaadiumi ja hõbeda nanoosakestel põhinevate katalüsaatorite rakendamise võimalusi AEMFC-s. Pallaadium on sarnaselt plaatinaga aktiivne O_2 redutseerumise katalüsaator, kuid maakoores on seda *ca* 50 korda rohkem [28]. Kuna pallaadium, nagu ka plaatina, on kallis väärismetall, siis vähendamaks selle vajaminevat kogust uurisime pallaadiumi sulameid plii, tina ja vismutiga, et leida võimalusi selle koguse vähendamiseks [29]. Võrdluses puhta Pd/C katalüsaatoriga saavutasime valmistatud pallaadiumisulamitega kõrgemad eriaktiivsused. Kahekordne massaktiivsuse kasv saavutati pallaadiumi ja vismuti sulamiga ja ka PbPd/C katalüsaator näitas suuremat massaktiivsust kui samal meetodil valmistatud Pd/C [29].

Hõbe on võrreldes plaatina ja pallaadiumiga väga odav metall ja sobib aluselises keskkonnas hapniku redutseerumise elektrokatalüsaatoriks. Sellest tulenevalt valmistasime pallaadiumiga kaetud hõbeda nanoosakesed, kasutades galvaanilist vahetusreaktsiooni [30]. Selle käigus osa hõbedat lahustus ja pallaadium sadenes nanoosakeste pinnale ning tulemuseks olid poorsed kuukujulised osakesed. Selliselt valmistatud katalüsaatorite eriaktiivsus kasvas osakeste suurenedes, massaktiivsus aga kasvas osakeste suuruse ja pallaadiumi sisalduse vähenemisel [30].

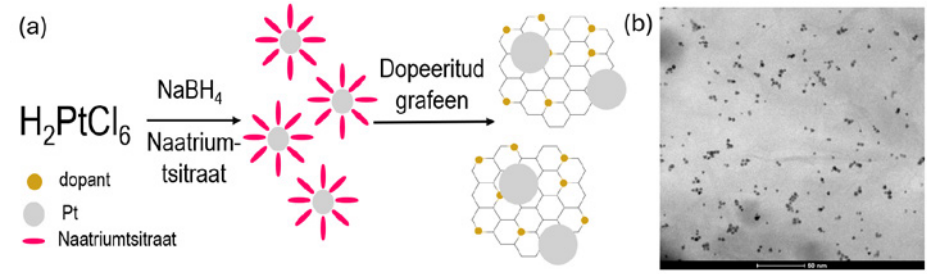
Oleme uurinud ka katalüsaatorikandja mõju hõbedal põhinevate katalüsaatorite omadustele [31]. Selleks valmistasime hõbeda nanoosakesi erinevatele süsinikmaterjalidele (mesopoorne süsinik, süsiniknanotorud, süsinikpulber Vulcan XC-72R) nii süsiniku juuresolekul kui ka lisades osakesed süsinikule pärast sünteesi. Elektrokeemiline testimine näitas, et süsiniknanotorudele sadestamisel on kriitilise tähtsusega see hetk, millal süsinikmaterjal lisada, sest umbes kolm korda suurem massaktiivsus saavutati juhul, kui esmalt valmistasime hõbeda nanoosakesed ja seejärel lisasime katalüsaatorikandja. Olulised on ka katalüsaatorikandja omadused: suurim aktiivsus saavutati mesopoorsele süsinikule sadestatud hõbeda katalüsaatoriga [31]. Katalüsaatorikandja mõjutab ka seda, kuivõrd hõbe katalüsaatorist välja lahustub: mesopoorsele süsinikule sadestatud hõbeda stabiilsus oli *ca* 2–3 korda suurem kui Vulcan XC-72R kandjale sadestatud hõbedal [32]. Ka nanoosakeste valmistamisel kasutatud redutseerija mõjutab katalüsaatori aktiivsust, sest tekkivate metalliosakeste suurus sõltub metalliioonide redutseerumise kiirusest [33]. AEMFC testides jäi Ag/C katalüsaatori P_{max} veidi alla Pt/C väärtusele, kuid hõbeda madalam hind teeb sellel metallil põhinevad katalüsaatorid igati sobivaks kütuseelemendis kasutamiseks [33].

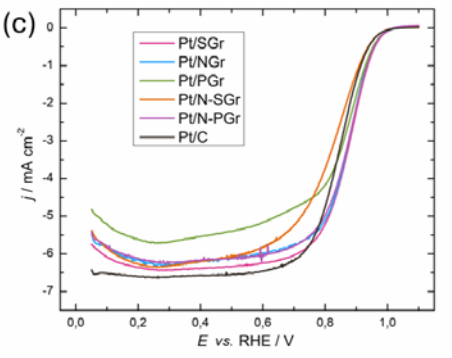
Katalüsaatormaterjalid prootonivahetusmembraaniga kütuseelemendile

Erinevalt anioonivahetusmembraaniga kütuseelementidest on prootonivahetusmembraaniga kütuseelemendid tänapäeval juba tootmises ja kasutusel, näiteks vesinikusõidukites. Kahjuks on need seadmed üsna kallid, kuna sisaldavad väärismetallkatalüsaatoreid. Seega toimub ka PEMFC alal aktiivne uurimistöö eesmärgiga vähendada katalüsaatorites kasutatavat väärismetallide kogust või leida sobivaid mittevääriismetallkatalüsaatoreid. Kuna PEMFC ioonivahetusmembraan ja katalüsaatorikihis sisalduv ionomeer juhivad vesinikioone, on sealne keskkond happeline ja elektrokatalüsaatoreid uuritakse seetõttu happelises lahuses. PEMFC testimisega seotud metoodiliste aspektide parendamiseks viisime läbi uurimistöö kommertsiaalsete Fe-N-C katalüsaatoritega (Pajarito Powder LLC, USA), mille mesopooride suurus on 7–8 nm [34]. Nende materjalide suurim P_{max} väärtus oli 837 mW/cm^2 ja edaspidi saime võrrelda omavalmistatud katalüsaatormaterjalide ning kommertsiaalselt saadaval olevate materjalide kasutamisel saadud tulemusi.

Esimene võimalus väärismetalli koguse vähendamiseks katalüsaatoris on metalli nanoosakeste suuruse optimeerimine. On leitud, et kõrgeim massaktiivsus on 2–3 nm plaatinaosakestel [35]. Teisalt on oluline ka osakeste kuju, millest sõltuvalt võib osakeste optimaalne suurus varieeruda. Koostöös Alicante Ülikooli teadlastega leidsime, et süsinikule kantud kuubikujuliste plaatina nanoosakeste O_2 redutseerumise eriaktiivsus on suurim katalüsaatoril, mille keskmine osakeste suurus oli 4,6 nm [36]. Teiseks mõjutab katalüsaatorite aktiivsust ja stabiilsust alusmaterjali struktuur ja koostis. Erinevate heteroaatomitega (lämmastik, väävel, fosfor, boor) dopeeritud grafeeni liistakute kasutamine katalüsaatorikandjana plaatinapõhiste katalüsaatorite valmistamisel tsitraadi meetodil võimaldas 2–3 korda suurendada plaatina eriaktiivsust võrreldes dopeerimata kommertsiaalsest süsinikpulbrist alusmaterjaliga (joonis 7) [37]. Lämmastiku ja väävliga koosdopeeritud grafeeni kasutamisel katalüsaatorikandjana saadi lausa viis korda kõrgem eriaktiivsus kui Pt/C katalüsaatoril [37]. Plaatinakatalüsaatorite aktiivsus sõltub ka nende valmistamismeetodist: võrreldes tsitraadi meetodil valmistatud katalüsaatoritega saadi elektrokeemiliselt plaatina sadestamisel mõnevõrra väiksema eriaktiivsusega materjalid [38]. Saadud tulemused näitavad, et süsinikalusmaterjali modifitseerimisega on võimalik muuta Pt/C katalüsaator märkimisväärselt aktiivsemaks ja seega vähendada kütuseelemendis vajamineva plaatina kogust.

Lisaks plaatina koguse vähendamisele püütakse leida ka täiesti väärismetallivabu katalüsaatoreid PEMFC jaoks. Happelises keskkonnas on peamisteks elektrokatalüütiliselt aktiivseteks tsentriteks lämmastikuga koordineeritud aatomdispergeeritud metallitsentrid (M-N_x). M-N-C katalüsaatorite väljatöötamisel PEMFC jaoks oleme optimeerinud nii materjalide koostist kui ka poorset struktuuri. Sobiva poorse struktuuri saavutamiseks kasutati dopeerimisel süsiniknanomaterjalina CDC/CNT komposiiti [39] ja elektrokedratud süsiniknanofiibreid [40]. Uudsel keemilise aurufaasist sadestamise (ingl *chemical vapor deposition*, CVD) meetodil valmistati Fe-N-C katalüsaator koostöös tead-



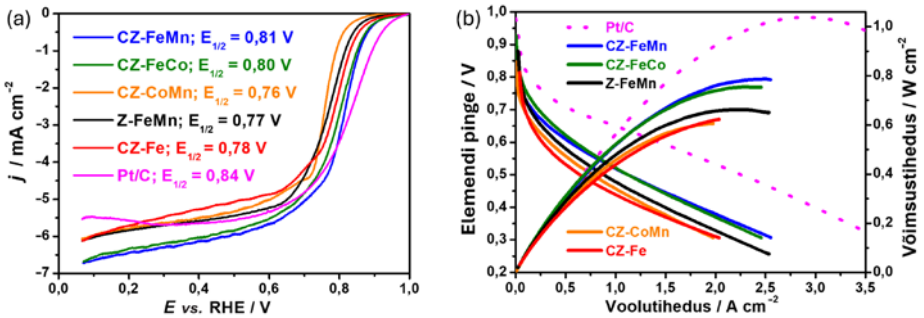


Joonis 7. (a) Sünteesiskeem plaatina nanoosakeste valmistamiseks ja sadestamiseks heteroaatomitega dopeeritud grafeeni pinnale; (b) skaneeriva läbistuselektronmikroskoopia kujutis Pt/N-PGr materjalist; (c) hapniku redutseerumise polarisatsioonikõverad erinevate heteroaatomitega dopeeritud grafeenidele sadestatud plaatina nanoosakestel O_2-küllastatud 0,1 M $HClO_4$ lahuses elektroodi pöörlemiskiirusel 1900 p/min [37].

lastega Max Plancki Instituudist (Saksamaa). Rakendades madalat rõhku CVD puhul, mis võimaldas vältida metalliklastrite või nanoosakeste teket, saadi selles materjalis väga kõrge aatomdispergeeritud Fe-N_x aktiivtsentrite tihedus. Mitmesuguste füüsikaliste meetodite kombineeritud kasutamisega näidati, et tõepoolest on tegemist üksikaatomiliste katalüsaatoritega. Sellest tulenevalt osutusid need materjalid väga aktiivseteks katalüsaatoriteks O_2 redutseerumisel happelises lahuses ($E_{1/2}$ = 0,84 V), mis on üks kõrgemaid, mida on saavutatud Fe-N-C katalüsaatoriga. Parim katalüsaator andis ka PEMFC testis suurepärase võimsustiheduse 870 mW/cm^2 [41].

Kõrgtemperatuurse pürolüüsi meetodil valmistati efektiivseid tseoliitse imidasoolvõrestiku (ingl *zeolitic imidazolate framework*, ZIF) põhiseid M-N-C katalüsaatoreid, eriti kasulik oli lisada ZIF-ist saadud süsinikule CNT-sid, muutes materjali poorse struktuuri hierarhilisemaks [42]. ZIF-8 impregneeriti kahe siirdemetalli kombinatsiooniga (Fe-Mn, Fe-Co ja Co-Mn). Need bimetalsed katalüsaatorid näitasid küllaltki kõrget aktiivsust O_2 redutseerumisel 0,5 M H_2SO_4 lahuses (CZ-FeMn ja CZ-FeCo materjalide $E_{1/2}$ väärtused olid 0,81 ja 0,80 V), mida võib põhjendada sünergilise efektiga bimetalse süsteemi komponentide vahel (joonis 8a). Samas oli H_2O_2 tekkeprotsent nendel materjalidel väga madal (1–2%). Nende katalüsaatoritega saadi suur PEMFC jõudlus (787 ja 754 mW/cm^2), mis jääb ikkagi alla Pt/C jõudlusele (joonis 8b).

Katalüsaatori hierarhilise poorse struktuuri olulisust kõrge PEMFC jõudluse saavutamiseks näidati alküülresortsinoolidest valmistatud katalüsaatorite puhul,



Joonis 8. (a) Hapniku redutseerumise polarisatsioonikõverad mitteväärismetall- ja Pt/C katalüsaatoril O_2-küllastatud 0,5 M H_2SO_4 lahuses elektroodi pöörlemiskiirusel 1900 p/min; (b) PEMFC polarisatsiooni- ja võimsustiheduse kõverad mitteväärismetall- ja Pt/C katoodkatalüsaatoritel [42].

kus magneesiumil põhineva matriitsi abil valmistatud Fe-N-C katalüsaatoriga saadi kaks korda kõrgem maksimaalne võimsustihedus kui ilma matriitsita valmistatud materjaliga [43]. Lisaks selgus, et mangaani lisamine Fe-N-C materjalile suurendab katalüsaatormaterjali jõudlust ning parendab stabiilsust [43]. Tööde tulemustest saab järeldada, et sarnaselt AEMFC-ga on ka PEMFC-s kõrge jõudluse saavutamiseks lisaks katoodkatalüsaatori koostisele oluline ka selle poorne struktuur.

Tsink-õhk aku (ZAB) õhuelektroodi katalüsaatorid

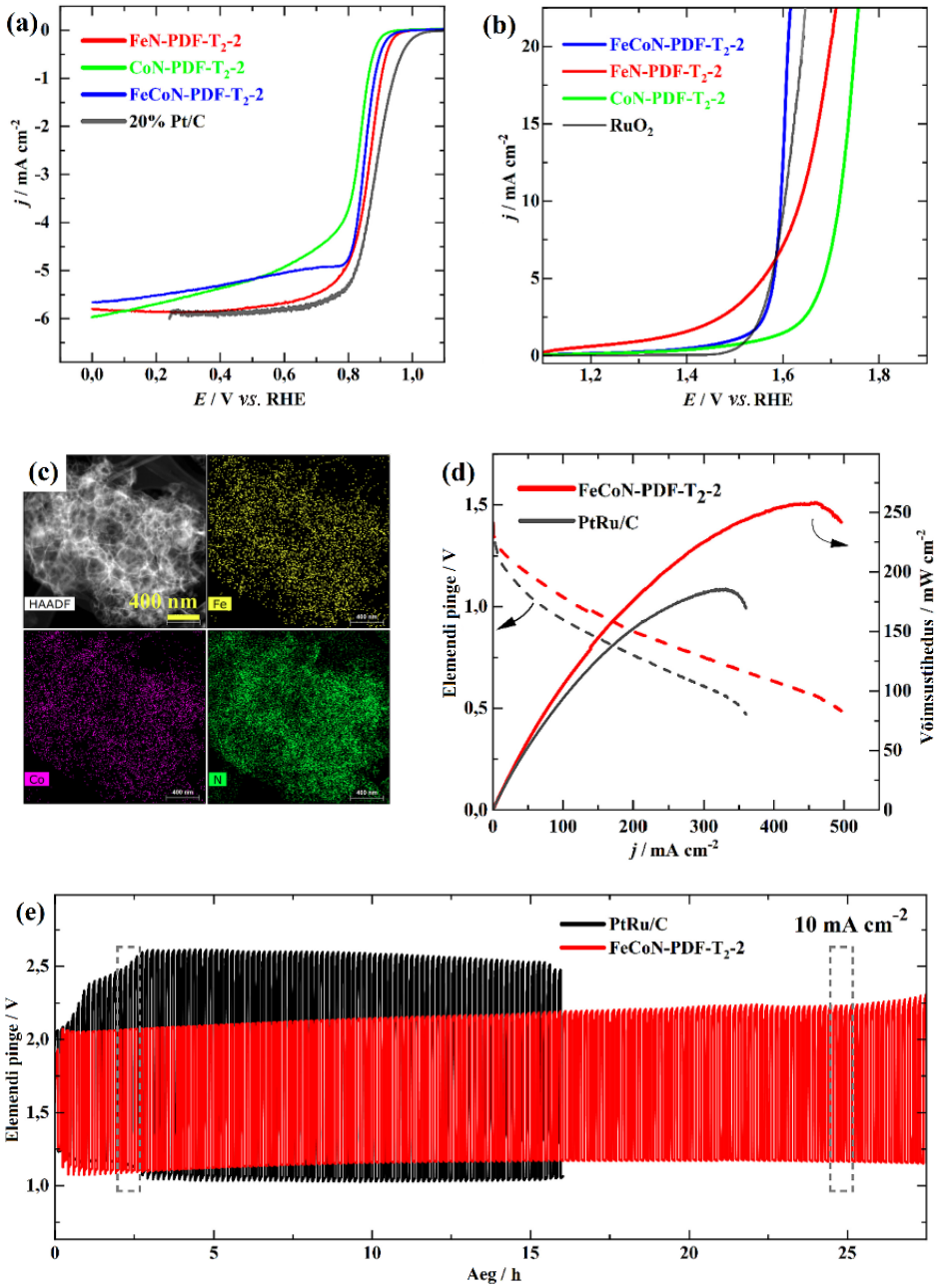
Tsink-õhk akude praktiliseks kasutuselevõtuks on vajalik välja töötada väärismetallivabu õhuelektroodi katalüsaatoreid, mis oleksid bifunktsionaalsed, st katalüüsiks nii hapniku redutseerumis- kui ka eraldumisreaktsiooni. Mitmed kütuseelemendi katoodkatalüsaatorite tarbeks arendatud sünteesimeetodid on hõlpsalt kohandatavad, et tekitada lisaks ka hapniku eraldamisreaktsiooniks vajalikud aktiivtsentrid, näiteks raua, koobalti ja nikli nanoosakesed. Kuna ZAB-s on elektrolüüdiks kontsentreeritud leelise lahus, testitakse bifunktsionaalseid katalüsaatoreid samuti leeliselises lahuses.

Meie uurimisrühmas on ZAB õhuelektroodi materjalide arendustöö üks põhisuundi olnud mitme siirdemetalli kombinatsiooni koosmõju uurimine M-N-C katalüsaatorites. Parimad tulemused on saadud rauda ja niklit sisaldavate erinevat tüüpi süsinikkandjatega katalüsaatoritega, mille ΔE väärtused olid vahemikus 0,70–0,78 V ning samuti näitasid need materjalid väga head pikaajalist stabiilsust [44]. ZAB õhuelektroodil rakendades saadi P_{max} väärtus 80 mW/cm^2 ja aku tsükleeritavus j = 1 mA/cm^2 puhul kuni 290 tsüklit [44]. Lisaks mitme siirdemetalliga M-N-C tüüpi katalüsaatorite valmistamisele uurisime USA-s Oak Ridge'i riiklikus laboris valmistatud Fe-N-C katalüsaatoreid [45]. Nende materjalidega saavutati seni uuritud Fe-Ni kaasdopeeritud nanosüsinikel põhinevate katalüsaatoritega võrreldes kõrgem P_{max} väärtus (150 mW/cm^2)

ZAB õhuelektroodil. Ka pikaajalisel tsükleerimisel ZAB seadmes näitasid need Fe-N-C materjalid juba märkimisväärset vastupidavust j = 5 mA/cm^2 puhul kuni 1000 tsüklit [45]. Kannustatuna Fe-N-C edust uurisime koostöös Tallinna Tehnikaülikooli teadlastega grafeeniga kaetud Al_2O_3 nanokiududest kandjal põhinevat katalüsaatorit, mis oli kaasdopeeritud raua ja koobaltiga. Selles töös saavutati eelmiste Fe-N-C katalüsaatoritega sarnane P_{max} väärtus (150 mW/cm^2) ja samaväärne pikaajaline tsükleeritavus: j = 5 mA/cm^2 juures kuni 900 tsüklit [46]. Uuriti ka rauda ja koobaltit sisaldavaid M-N-C katalüsaatoreid, mille süsinikkandja põhines polümeersel võrestikul [47]. Need katalüsaatorid sisaldasid kõrge elektrokatalüütilise aktiivsusega aatomdispergeeritud aktiivtsentreid ning olid kõrge bifunktsionaalse aktiivsusega (ΔE = 0,75 V). ZAB õhuelektroodil rakendamisel saadi võrreldes seniste tulemustega nii erakordselt kõrge P_{max} väärtus 258 mW/cm^2 kui ka hea aku tsükleeritavus: kõrge j = 10 mA/cm^2 puhul kuni 275 tsüklit (joonis 9) [47].

Kuna senised uurimistulemused olid näidanud, et Fe-Ni kombinatsioon andis parimaid tulemusi erinevat tüüpi nanosüsinikkandjaga M-N-C katalüsaatorite puhul, sai edasi uuritud uudset grafeenipõhist nanostruktuurset rauda ja niklit sisaldavat katalüsaatorit. Seekord kasutati Fe-N_x aktiivtsentrite valmistamiseks raudftalotsüaniini kombineeritult Ni-Fe nanoosakestega, et saavutada kõrge bifunktsionaalne aktiivsus hapnikureaktsioonides. Saadud katalüsaator näitas tagasihoidlikku bifunktsionaalset aktiivsust (ΔE = 0,81 V), aga samas ZAB-d õhuelektroodil rakendades saadi senisest kõrgem P_{max} väärtus 171 mW/cm^2 ja märkimisväärne pikaajaline aku tsükleeritavus 1080 tsüklit kasutades j = 5 mA/cm^2 [48]. Lisaks valmistasime ka analoogseid Fe-Ni põhiseid M-N-C katalüsaatoreid, kus uuriti lisaks poorimoodustajast metallorgaanilise võrestiku ZIF-8 mõju materjali poorsuse optimeerimisele [49]. Antud töö tulemused näitasid nii alusuuringutes kui ka ZAB õhuelektroodil madalamat jõudlust (ΔE = 0,86 V, P_{max} = 152 mW/cm^2) võrreldes ilma ZIF-8 lisandita valmistatud materjalidega. See on näide sellest, et vaatamata teoreetilistele eeldustele parema materjali saavutamiseks poorimoodustaja kaasamisega ei pruugi katalüsaatorite sünteesi teadustöö alati soovitud sihile viia. ZAB puhul võrdlesime ka kolme erineva siirdemetalli kombinatsiooniga (Fe-Co, Fe-Mn, Fe-Cu) M-N-C materjale, kasutades katalüsaatorikandjana uudset kõrge keemilise ja termilise vastupidavusega ränioksükarbiidi [50]. Parimad tulemused saadi Fe-Co katalüsaatoriga. Lisaks leidsime, et ZAB mõõteraku disainil ja mõõteparameetritel oli oluline mõju aku elueale ja P_{max} väärtusele.

Eeltoodud uurimistöö põhjal saame järeldada, et oluline roll on M-N-C materjalides kasutatud nanosüsinikkandjal – peamiselt mesopoorne struktuur parandab võimsustihedust ning suurem alusmaterjali grafiitsus (nt kasutades süsiniknanotorusid) parandab stabiilsust. Parimate väärismetallivabade katalüsaatoritega saavutatud maksimaalne võimsustihedus tsink-õhk akus oli pea poolteist korda kõrgem kui Pt-Ru/C katalüsaatoril [47]. Veelgi olulisem tulemus on, et Fe-Co ja Fe-Ni bimetalsed materjalid olid pikaajaliselt stabiilsed ZAB rakenduses, võimaldades tsükleerimise käigus 2–3 korda pikemat aku kestvust, kui oli võimalik Pt-Ru/C materjaliga [44, 46, 49]. Uurimused näitavad, et on



Joonis 9. (a) Hapniku redutseerumisreaktsiooni ja (b) hapniku eraldumisreaktsiooni polarisatsioonikõverad erinevate katalüsaatoritega kaetud elektroodidel 0,1 M KOH lahuses; (c) HAADF-STEM kujutis ja EDX kaardistamine raua, koobalti, lämmastiku elementidele FeCoN-PDF-T_2-2 katalüsaatoril; (d) ZAB polarisatsioonikõverad ja arvutatud võimsustiheduse kõverad ning (e) järjestikused 10-minutilised aku täis- ja tühjakslaadimine tsüklid erinevate katalüsaatoritega [47].

võimalik valmistada odavaid ja jätkusuutlikke väärismetallivabasid elektrokatalüsaatoreid tsink-õhk aku õhuelektroodi jaoks, mis töötavad paremini kui praegu rakendatav Pt-Ru/C. See loob eeldused ZAB tehnoloogia laialdasemaks kasutuselevõtuks energia salvestamisel ja seda taskukohasema hinnaga võrreldes laialt levinud liitiumioonaku ja pliiaku tehnoloogiatega.

Töörühma tööde tsükkel päädis 40 teaduspublikatsiooni avaldamisega nelja aasta vältel (2022–2025). Tehti viljakat teaduskoostööd mitmete töörühmadega eri riikides (prof Steven Holdcrofti rühmaga Simon Fraseri Ülikoolis (Kanada), prof Dario R. Dekeli rühmaga Technionis (Iisrael), prof Jose H. Zagali rühmaga Santiago Ülikoolis (Tšiili) ja dr Alexey Serovi rühmaga Oak Ridge'i riiklikus laboris (USA)).

Tulevikuperspektiivid

Võib arvata, et tulevikus keskendutakse madalatemperatuursete kütuseelementide ja tsink-õhk akude valdkonnas jätkuvalt eelkõige mitteväärismetallkatalüsaatorite täiustamisele, et suurendada nende aktiivsust ja stabiilsust sedavõrd, et neid saaks rakendada praktilistes seadmetes. Praegu tehakse üleilmselt väga intensiivset uurimistööd sel eesmärgil, et jõuda juba lähiajal tulemusteni, mis võimaldaks asendada väärismetallkatalüsaatoreid odavamate alternatiividega. Tegemist on väga konkurentsitiheda valdkonnaga ja ka meie töörühm annab oma panuse, et täita need eesmärgid elektrokeemilise energiatehnoloogia edendamise alal. Heaks näiteks on kõrgtemperatuurse AEMFC testimisel hiljuti saadud tulemused, mis osutavad meie poolt arendatud katalüsaatormaterjalide rakendatavusele ka selles seadmes [51].

VIITED

1. Nazir, H., Louis, C., Jose, S., Prakash, J., Muthuswamy, N., Buan, M. E. M., Flox, C., Chavan, S., Shi, X., Kauranen, P., Kallio, T., Maia, G., Tammeveski, K., Lymperopoulos, N., Carcadea, E., Veziroglu, E., Iranzo, A., Kannan, A. M. Is the H2 economy realizable in the foreseeable future? Part I: H2 production methods. Int. J. Hydrogen Energy 45 (2020), 13777–13788, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.092

2. Nazir, H., Muthuswamy, N., Louis, C., Jose, S., Prakash, J., Buan, M. E. M., Flox, C., Chavan, S., Shi, X., Kauranen, P., Kallio, T., Maia, G., Tammeveski, K., Lymperopoulos, N., Carcadea, E., Veziroglu, E., Iranzo, A., Kannan, A. M. Is the H2 economy realizable in the foreseeable future? Part III: H2 usage technologies, applications, and challenges and opportunities. Int. J. Hydrogen Energy 45 (2020), 28217–28239, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.256

3. Hossen, Md. M., Hasan, Md. S., Sardar, Md. R. I., Haider, J. B., Mottakin, Tammeveski, K., Atanassov, P. State-of-the-art and developmental trends in

platinum group metal-free cathode catalyst for anion exchange membrane fuel cell (AEMFC). Appl. Catal. B Environ. 325 (2023), 121733, https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.121733

4. Hyun, J., Kim, H-T. Powering the hydrogen future: current status and challenges of anion exchange membrane fuel cells. Energy Environ. Sci. 16 (2023), 5633–5662, https://doi.org/10.1039/D3EE01768K

5. Shao, M., Chang, Q., Dodelet, J-P., Chenitz, R. Recent Advances in Electrocatalysts for Oxygen Reduction Reaction. Chem. Rev. 116 (2016), 3594–3657, https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00462

6. Ahmed, Z., Mooste, M., Tammeveski, K. Transition metal MN4 macrocycle-derived bifunctional ORR/OER electrocatalysts for air electrodes in rechargeable zinc-air batteries. Curr. Opin. Electrochem. 55 (2026), 101783, https://doi.org/10.1016/j.coelec.2025.101783

7. Li, J., Miao, D., Guo, X., Luo, D., Ren, J., Chen, Z. Sustainable Zinc–Air Batteries: Innovations, Challenges, and Pathways to Commercialization. Small 21 (2025), e08482, https://doi.org/10.1002/smll.202508482

8. Kumar, Y., Mooste, M., Tammeveski, K. Recent progress of transition metal-based bifunctional electrocatalysts for rechargeable zinc–air battery application. Curr. Opin. Electrochem. 38 (2023), 101229, https://doi.org/10.1016/j.coelec.2023.101229

9. Sarapuu, A., Lilloja, J., Akula, S., Zagal, J. H., Specchia, S., Tammeveski, K. Recent Advances in Non-Precious Metal Single-Atom Electrocatalysts for Oxygen Reduction Reaction in Low-Temperature Polymer-Electrolyte Fuel Cells. ChemCatChem 15 (2023), e202300849, https://doi.org/10.1002/cctc.202300849

10. Sarapuu, A., Kibena-Põldsepp, E., Borghei, M., Tammeveski, K. Electrocatalysis of oxygen reduction on heteroatom-doped nanocarbons and transition metal–nitrogen–carbon catalysts for alkaline membrane fuel cells. J. Mater. Chem. A 6 (2018), 776–804, https://doi.org/10.1039/C7TA08690C

11. Jasinski, R. A New Fuel Cell Cathode Catalyst. Nature 201 (1964), 1212–1213, https://doi.org/10.1038/2011212a0

12. Ahmed, Z., Muñoz-Becerra, K., Akula, S., Zagal, J. H., Tammeveski, K. Recent progress on MN4 macrocycle-derived oxygen reduction reaction electrocatalysts for polymer electrolyte fuel cell applications. Chem. Commun. 62 (2026), 7680–7697, https://doi.org/10.1039/D5CC07438J

13. Qiu, D., Wang, H., Ma, T., Huang, J., Meng, Z., Fan, D., Bowen, C. R., Lu, H., Liu, Y., Chandrasekaran, S. Promoting Electrocatalytic Oxygen Reactions

Using Advanced Heterostructures for Rechargeable Zinc–Air Battery Applications. ACS Nano 18 (2024), 21651–21684, https://doi.org/10.1021/acsnano.4c02289

14. Zhang, W., Chao, Y., Zhang, W., Zhou, J., Lv, F., Wang, K., Lin, F., Luo, H., Li, J., Tong, M., Wang, E., Guo, S. Emerging Dual-Atomic-Site Catalysts for Efficient Energy Catalysis. Adv. Mater. 33 (2021), 2102576, https://doi.org/10.1002/adma.202102576

15. Palm, I., Kibena-Põldsepp, E., Mooste, M., Kozlova, J., Käärik, M., Kikas, A., Treshchalov, A., Leis, J., Kisand, V., Tamm, A., Holdcroft, S., Atanassov, P., Tammeveski, K. Nitrogen and Phosphorus Dual-Doped Silicon Carbide-Derived Carbon/Carbon Nanotube Composite for the Anion-Exchange Membrane Fuel Cell Cathode. ACS Appl. Energy Mater. 5 (2022), 2949–2958, https://doi.org/10.1021/acsaem.1c03627

16. Lilloja, J., Kibena-Põldsepp, E., Sarapuu, A., Konovalova, A., Käärik, M., Kozlova, J., Paiste, P., Kikas, A., Treshchalov, A., Aruväli, J., Zitolo, A., Leis, J., Tamm, A., Kisand, V., Holdcroft, S., Tammeveski, K. Transition-Metal and Nitrogen-Doped Carbon Nanotube/Graphene Composites as Cathode Catalysts for Anion-Exchange Membrane Fuel Cells,. ACS Appl. Energy Mater. 6 (2023), 5519–5529, https://doi.org/10.1021/acsaem.3c00613

17. Lilloja, J., Kibena-Põldsepp, E., Sarapuu, A., Käärik, M., Kozlova, J., Paiste, P., Kikas, A., Treshchalov, A., Leis, J., Tamm, A., Kisand, V., Holdcroft, S., Tammeveski, K. Transition metal and nitrogen-doped mesoporous carbons as cathode catalysts for anion-exchange membrane fuel cells. Appl. Catal. B Environ. 306 (2022), 121113, https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.121113

18. Gianola, G., Cosenza, A., Roiron, C., Pirri, C. F., Specchia, S., Atanassov, P., Zeng, J. Effect of silica leaching treatment during template-assisted synthesis on the performance of FeNC catalysts for oxygen reduction reaction. Electrochim. Acta 525 (2025), 146085, https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.146085

19. Kisand, K., Sarapuu, A., Douglin, J. C., Kikas, A., Treshchalov, A., Käärik, M., Piirsoo, H.-M., Paiste, P., Aruväli, J., Leis, J., Kisand, V., Tamm, A., Dekel, D. R., Tammeveski, K. Templated Nitrogen-, Iron-, and Cobalt-Doped Mesoporous Nanocarbon Derived from an Alkylresorcinol Mixture for Anion-Exchange Membrane Fuel Cell Application. ACS Catal. 12 (2022), 14050–14061, https://doi.org/10.1021/acscatal.2c03683

20. Sajjad, U., Sarapuu, A., Douglin, J. C., Kikas, A., Treshchalov, A., Käärik, M., Kozlova, J., Aruväli, J., Leis, J., Kisand, V., Kukli, K., Dekel, D. R., Tammeveski, K. Lignin-Derived Precious Metal-Free Electrocatalysts for Anion-Exchange Membrane Fuel Cell Application. ACS Catal. 14 (2024), 9224–9234, https://doi.org/10.1021/acscatal.4c02136

21. Juvanen, S., Sarapuu, A., Kisand, K., Käärik, M., Kikas, A., Kozlova, J., Treshchalov, A., Aruväli, J., Leis, J., Kisand, V., Kukli, K., Tammeveski, K. Templated Rapeseed-Press-Cake-Based Materials as Efficient Oxygen Reduction Reaction Electrocatalysts. ACS Sustain. Resour. Manage. 2 (2025), 446–454, https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.4c00444

22. Juvanen, S., Sarapuu, A., Mooste, M., Käärik, M., Mäeorg, U., Kikas, A., Kisand, V., Kozlova, J., Treshchalov, A., Aruväli, J., Leis, J. Tamm, A., Tammeveski, K. Electroreduction of oxygen on iron- and cobalt-containing nitrogen-doped carbon catalysts prepared from the rapeseed press cake. J. Electroanal. Chem. 920 (2022), 116599, https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116599

23. Lilloja, J., Mooste, M., Kibena-Põldsepp, E., Sarapuu, A., Kikas, A., Kisand, V., Käärik, M., Kozlova, J., Treshchalov, A., Paiste, P., Aruväli, J., Leis, J., Tamm, A., Holdcroft, S., Tammeveski, K. Cobalt-, iron- and nitrogen-containing ordered mesoporous carbon-based catalysts for anion-exchange membrane fuel cell cathode. Electrochim. Acta 439 (2023), 141676, https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.141676

24. Piir, J. K., Lilloja, J., Käärik, M., Kozlova, J., Kikas, A., Treshchalov, A., Aruväli, J., Kisand, V., Leis, J., Kukli, K., Tammeveski, K. Mesoporous carbon materials doped with Co, Fe and nitrogen as oxygen reduction reaction electrocatalysts for anion-exchange membrane fuel cell. Electrochim. Acta 527 (2025), 146226, https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.146226

25. Akula, S., Mooste, M., Kozlova, J., Käärik, M. Treshchalov, A., Kikas, A., Kisand, V., Aruväli, J., Paiste, P., Tamm, A., Leis, J., Tammeveski, K. Transition metal (Fe, Co, Mn, Cu) containing nitrogen-doped porous carbon as efficient oxygen reduction electrocatalysts for anion exchange membrane fuel cells. Chem. Eng. J. 458 (2023), 141468, https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141468

26. Kisand, K., Sarapuu, A., Douglin, J. C., Kikas, A., Käärik, M., Kozlova, J., Aruväli, J., Treshchalov, A., Leis, J., Kisand, V., Kukli, K., Dekel, D. R., Tammeveski, K. Hierarchically Porous Fe−N−C Single-Atom Catalysts via Ionothermal Synthesis for Oxygen Reduction Reaction. ChemSusChem 18 (2025), e202401332, https://doi.org/10.1002/cssc.202401332

27. Ibrahim, F. O., Kisand, K., Douglin, J. C., Sarapuu, A., Kikas, A., Käärik, M., Kozlova, J., Aruväli, J., Treshchalov, A., Leis, J., Kisand, V., Kukli, K., Yassin, K., Dekel, D. R., Tammeveski, K. Ionothermal synthesis of mesoporous FeNC electrocatalysts for high-performance anion-exchange membrane fuel cells. Chem. Eng. J. 510 (2025), 161560, https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.161560

28. Antolini, E. Palladium in fuel cell catalysis. Energy Environ. Sci. 2 (2009), 915–931, https://doi.org/10.1039/B820837A

29. Lüsi, M., Erikson, H., Piirsoo, H-M., Paiste, P., Aruväli, J., Kikas, A., Kisand, V., Tamm, A., Tammeveski, K. Oxygen reduction reaction on PdM/C (M = Pb, Sn, Bi) alloy nanocatalysts. J. Electroanal. Chem. 917 (2022), 116391, https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116391

30. Lüsi, M., Erikson, H., Piirsoo, H-M., Aruväli, J., Kikas, A., Kisand, V., Tamm, A., Tammeveski, K. Oxygen reduction reaction on AgPd nanocatalysts prepared by galvanic exchange. Appl. Surf. Sci. 636 (2023), 157859, https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.157859

31. Linge, J. M., Erikson, H., Kozlova, J., Kukli, K., Tammeveski, K. Oxygen reduction reaction on Ag nanocatalysts prepared by the microemulsion method. Electrochim. Acta 507 (2024), 145098, https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.145098

32. Linge, J. M., Briega-Martos, V., Hutzler, A., Fritsch, B., Erikson, H., Tammeveski, K., Cherevko, S. Stability of Carbon Supported Silver Electrocatalysts for Alkaline Oxygen Reduction and Evolution Reactions. ACS Appl. Energy Mater. 6 (2023), 11497–11509, https://doi.org/10.1021/acsaem.3c01717

33. Linge, J. M., Erikson, H., Mooste, M., Piirsoo, H-M., Kaljuvee, T., Kikas, A., Aruväli, J., Kisand, V., Tamm, A., Kannan, A. M., Tammeveski, K. Ag nanoparticles on mesoporous carbon support as cathode catalyst for anion exchange membrane fuel cell. Int. J. Hydrogen Energy 48 (2023), 11058–11070, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.138

34. Akula, S., Mooste, M., Zulevi, B., McKinney, S., Kikas, A., Piirsoo, H-M., Rähn, M., Tamm, A., Kisand, V., Serov, A., Creel, E. B., Cullen, D. A., Neyerlin, K. C., Wang, H., Odgaard, M., Reshetenko, T., Tammeveski, K. Mesoporous textured Fe-N-C electrocatalysts as highly efficient cathodes for proton exchange membrane fuel cells. J. Power Sources 520 (2022), 230819, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230819

35. Shao, M., Peles, A., Shoemaker, K. Electrocatalysis on Platinum Nanoparticles: Particle Size Effect on Oxygen Reduction Reaction Activity. Nano Lett. 11 (2011), 3714–3719, https://doi.org/10.1021/nl2017459

36. Erikson, H., Antoniassi, R. M., Solla-Gullón, J., Torresi, R. M., Tammeveski, K., Feliu, J. M. Oxygen electroreduction on small (< 10 nm) and {100}-oriented Pt nanoparticles. Electrochim. Acta 403 (2022), 139631, https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.139631

37. Chambers, R., Piirsoo, H-M., Tamm, A., Kozlova, J., Kukli, K., Ritslaid, P., Treshchalov, A., Erikson, H., Tammeveski, K. Heteroatom-Doped Graphene-Supported Pt Nanoparticles as Electrocatalysts for Proton Exchange Membrane Fuel Cells. ACS Appl. Nano Mater. 7 (2024), 5943–5955, https://doi.org/10.1021/acsanm.3c05713

38. Chambers, R., Hussain, S., Kozlova, J., Kukli, K., Ritslaid, P., Kikas, A., Kisand, V., Erikson, H., Tammeveski, K. Pt Nanoparticles Electrochemically Deposited onto Heteroatom-Doped Graphene Supports as Electrocatalysts for ORR in Acid Media. J. Electrochem. Soc. 171 (2024), 096506, https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad7296

39. Lilloja, J., Fetuga, O. E., Kibena-Põldsepp, E., Kikas, A., Käärik, M., Aruväli, J., Kozlova, J., Treshchalov, A., Kisand, V., Leis, J., Kukli, K., Tammeveski, K. Iron- and Nitrogen-Containing Carbon Nanotube/Carbide-Derived Carbon-Based Electrocatalysts for Oxygen Reduction Reaction in Acidic Conditions. ChemElectroChem 11 (2024), e202400341, https://doi.org/10.1002/celc.202400341

40. Muuli, K., Mooste, M., Akula, S., Gudkova, V., Otsus, M., Kikas, A., Aruväli, J., Treshchalov, A., Kisand, V., Tamm, A., Krumme, A., Cavaliere, S., Tammeveski, K. Electrospun Carbon Nanofibre-Based Catalysts Prepared with Co and Fe Phthalocyanine for Oxygen Reduction in Acidic Medium. ChemElectroChem 10 (2023), e202300131, https://doi.org/10.1002/celc.202300131

41. Al-Hilfi, S. H., Jiang, X., Heuer, J., Akula, S., Tammeveski, K., Hu, G., Yang, J., Wang, Hai. I., Bonn, M., Landfester, K., Müllen, K., Zhou, Y. Single-Atom Catalysts through Pressure-Controlled Metal Diffusion. J. Am. Chem. Soc. 146 (2024), 19886–19895, https://doi.org/10.1021/jacs.4c03066

42. Akula, S., Piirsoo, H-M., Kikas, A., Kisand, V., Käärik, M., Leis, J., Treshchalov, A., Aruväli, J., Kukli, K., Tammeveski, K. ZIF-8-derived nanocarbon composite-based highly active platinum group metal-free bimetallic electrocatalysts for oxygen reduction reaction in proton exchange membrane fuel cells. Electrochim. Acta 498 (2024), 144691, https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144691

43. Kisand, K., Sarapuu, A., Akula, S., Kikas, A., Treshchalov, A., Käärik, M., Piirsoo, H-M., Kozlova, J., Aruväli, J., Leis, J., Kisand, V., Kukli, K., El Chawich, G., Jaouen, F., Cavaliere, S., Tammeveski, K. Iron and manganese co-doped mesoporous carbon-based catalysts via template-assisted synthesis for proton exchange membrane fuel cells. J. Power Sources 618 (2024), 235166, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235166

44. Kumar, Y., Kibena-Põldsepp, E., Mooste, M., Kozlova, J., Kikas, A., Aruväli, J., Käärik, M., Kisand, V., Leis, J., Tamm, A., Holdcroft, S., Zagal, J. H., Tammeveski, K. Iron and Nickel Phthalocyanine-Modified Nanocarbon Materials as Cathode Catalysts for Anion-Exchange Membrane Fuel Cells and Zinc-Air Batteries. ChemElectroChem 9 (2022), e202200717, https://doi.org/10.1002/celc.202200717

45. Muuli, K., Lyu, X., Mooste, M., Käärik, M., Zulevi, B., Leis, J., Yu, H., Cullen, D. A., Serov, A., Tammeveski, K. Outstanding platinum group metal-free bifunctional catalysts for rechargeable zinc-air batteries. Electrochim. Acta 446 (2023), 142126, https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142126

46. Mooste, M., Ahmed, Z., Kapitulskis, P., Ivanov, R., Treshchalov, A., Piirsoo, H-M., Kikas, A., Kisand, V., Kukli, K., Hussainova, I., Tammeveski, K. Bifunctional oxygen electrocatalyst based on Fe, Co, and nitrogen co-doped graphene-coated alumina nanofibers for Zn-air battery air electrode. Appl. Surf. Sci. 660 (2024), 160024, https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160024

47. Kumar, Y., Akula, S., Kozlova, J., Kikas, A., Aruväli, J., Käärik, M., Treshchalov, A., Leis, J., Kisand, V., Kukli, K., Kibena-Põldsepp, E., Tammeveski, K. Zinc-assisted synthesis of polymer framework-based atomically dispersed bimetal catalysts for efficient oxygen electrocatalysis in rechargeable zinc-air batteries. J. Energy Storage 86 (2024), 111164, https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111164

48. Ahmed, Z., Kozlova, J., Kukli, K., Kikas, A., Kisand, V., Treshchalov, A., Käärik, M., Leis, J., Aruväli, J., Tammeveski, K. Boosting bifunctional oxygen electrocatalysis by integrating Fe–Nx moieties and FeNi nanoparticles for highly efficient and long-life rechargeable zinc–air batteries. Sustain. Energy Fuels 9 (2025), 2098–2108, https://doi.org/10.1039/D5SE00072F

49. Ahmed, Z., Kozlova, J., Kikas, A., Kisand, V., Treshchalov, A., Käärik, M., Leis, J., Aruväli, J., Kukli, K., Tammeveski, K. Iron phthalocyanine assisted bifunctional oxygen electrocatalyst for high-performance and long-life rechargeable zinc–air batteries. Mater. Chem. Front. 9 (2025), 3149–3160, https://doi.org/10.1039/D5QM00589B

50. Mooste, M., Kumar, R., Juvanen, S., Kozlova, J., Kikas, A., Treshchalov, A., Käärik, M., Aruväli, J., Leis, J., Kisand, V., Kukli, K., Schonvogel, D., Wagner, P., Wilhelm, M., Tammeveski, K., Friedrich, K. A. Binary Transition Metal and Nitrogen Functionalised Silicon Oxycarbide Electrocatalysts for Zn–Air Battery Air Electrode Application. Int. J. Energy Res. 2025 (2025), 4252866, https://doi.org/10.1155/er/4252866

51. Zahan, S. M., Baranov, A. A., Yassin, K., Zhong, J., Douglin, J. C., Willdorf-Cohen, S., Bhowmick, S., Lilloja, J., Tammeveski, K., Tsur, Y., Dekel, D. R. Can Anion-Exchange Membrane Fuel Cells Operate with Ambient Air? ACS Energy Lett. 11 (2026), 1688–1695, https://doi.org/10.1021/acsenergylett.5c03124

Vasakult: Kaido Tammeveski, Jaana Lilloja-Lensment, Marek Mooste, Ave Sarapuu ja Heiki Erikson. Foto: Erlend Štaub

Srinu Akula. Foto: erakogu

Kaido Tammeveski

Sündinud 13. märtsil 1964 Tartus

1982	Antsla Keskkool
1989	Tartu Ülikool, keemia
1993	Tartu Ülikool, keemia (MSc)
1998	Tartu Ülikool, keemia (PhD)
1999–2000	järeldoktor Liverpooli Ülikoolis (Ühendkuningriik)

Alates 2001 Tartu Ülikooli keemia instituudi kolloid- ja keskkonnakeemia õppetooli juhataja.

2001–2021	kolloid- ja keskkonnakeemia kaasprofessor, aastast 2021 professor.

2014 pälvinud riigi teaduspreemia keemia ja molekulaarbioloogia alal, 2026 riikliku teaduspreemia loodusteaduste valdkonnas.

2024. aastal saanud Tartu ülikooli medali.

Juhendanud 29 magistri- ja 16 doktoritööd.

Avaldanud üle 260 teaduspublikatsiooni (Web of Science'i andmebaasides indekseeritud ajakirjades).

Peamised uurimisvaldkonnad: hapniku redutseerumis- ja eraldumisreaktsioon, elektrokatalüüs, anioonivahetus- ja prootonivahetusmembraaniga kütuseelemendid, tsink-õhk akud, vee elektrolüüs.

Elektrokatalüüsi alal on uurinud mitmesuguseid katalüsaatormaterjale: õhukesekilelised metallelektroodid (Au, Pt, Pd, Ag), metalli nanoosakesed (Au, Pt, Pd, Ag), keemiliselt modifitseeritud elektroodid, süsiniknanotorud ja grafeen, heteroaatomitega dopeeritud süsiniknanomaterjalid ja grafeenipõhised materjalid ning süsinikmaterjalidele kantud metalli nanoosakesed. Viimasel ajal on põhilist tähelepanu pälvinud siirdemetallide ja lämmastikuga dopeeritud süsiniknanomaterjalid (M-N-C tüüpi katalüsaatorid). Töö eesmärk on olnud uudsete väärismetallivabade katalüsaatorite väljatöötamine elektrokeemilise energiatehnoloogia seadmete jaoks, eelkõige madalatemperatuursetele kütuseelementidele ja tsink-õhk akudele.

Ave Sarapuu

Sündinud 21. detsembril 1975 Viljandis

1994	Nõo Reaalgümnaasium
1998	Tartu Ülikool, keemia
2001	Tartu Ülikool, keemia (MSc)
2008	Tartu Ülikool, keemia (PhD)
2006–2013	Tartu Ülikool, kolloid- ja keskkonnakeemia teadur, 2013–2020 vanemteadur, alates 2021 kaasprofessor.

2026 riiklik teaduspreemia loodusteaduste valdkonnas.

Juhendanud 4 magistri- ja 3 doktoritööd.

Avaldanud 60 teaduspublikatsiooni (Web of Science'i andmebaasides indekseeritud ajakirjades).

Peamised uurimisvaldkonnad: elektrokatalüüs, hapniku elektrokeemiline redutseerumine, nanostruktuursete süsinikmaterjalide valmistamine, madalatemperatuursed kütuseelemendid.

Põhiliselt on Ave Sarapuu tegelenud hapniku redutseerumise elektrokatalüüsi uurimisega eri tüüpi materjalidel, nii väärismetallidel (Pt, Pd, Au) kui ka mitmesugustel dopeeritud süsiniknanomaterjalidel. Viimastel aastatel on fookuses olnud eelkõige uute meetodite väljatöötamine mittevääriismetallkatalüsaatorite valmistamiseks polümeerelektrolüütmembraaniga kütuseelementide jaoks, kasutades odavaid ja jätkusuutlikke lähteaineid, näiteks biomassi.

Heiki Erikson

Sündinud 12. oktoobril 1986 Uuemõisas

2003	Kiltsi Põhikool
2006	Väike-Maarja Gümnaasium
2009	Tartu Ülikool, keemia (BSc)
2011	Tartu Ülikool, keemia (MSc)
2015	Tartu Ülikool, keemia (PhD)
2019–2021	järeldoktor Alicante Ülikoolis (Hispaania)

Alates 2015 Tartu Ülikooli keemia instituudi kolloid- ja keskkonnakeemia teadur.

Heiki Eriksoni on mitmeid kordi tunnustatud üliõpilaste teadustööde riiklikul konkursil loodusteaduste ja tehnika valdkonnas: 2009. aastal diplomiga bakalaureusetöö, 2011. aastal I preemiaga magistritöö ning 2015. aastal I preemiaga doktoritöö eest.

2026. aastal pälvis ta riikliku teaduspreemia loodusteaduste valdkonnas.

Juhendanud 2 magistri- ja 3 doktoritööd.

Avaldanud 53 teaduspublikatsiooni (Web of Science'i andmebaasides indekseeritud ajakirjades).

Peamine uurimistöö fookus on olnud hapniku redutseerumisreaktsiooni uurimine metallkatalüsaatoritel (Au, Pd, Ag ja Pt). On uurinud metalli nanoosakeste kuju mõju elektrokatalüütilisele aktiivsusele ja katalüsaatorikandja mõju. Viimastel aastatel on nendele lisandunud hapniku eraldumisreaktsiooni uurimine nii prootonivahetusmembraaniga elektrolüüseri jaoks kui ka anioonivahetusmembraaniga elektrolüüserile. Töö eesmärk on olnud nii fundamentaalne, kirjeldamaks katalüsaatorikandja ja metalli nanoosakeste vahelisi vastastikmõjusid, kui ka praktiline, et vähendada väärismetallide kasutust nii madalatemperatuursetes kütuseelementides kui ka vee elektrolüüserites.

Marek Mooste

Sündinud 24. juulil 1990 Pärnus

2009	Pärnu Ühisgümnaasium
2012	Tartu Ülikool, keemia (BSc)
2014	Tartu Ülikool, keemia (MSc)
2019	Tartu Ülikool, keemia (PhD)
2022–2025	järeldoktor Saksamaa Kosmoseagentuuris (DLR) (Saksamaa)

Alates 2019 Tartu Ülikooli keemia instituudi kolloid- ja keskkonnakeemia teadur.

2014 üliõpilaste teadustööde riiklikul konkursil 1. preemia loodusteaduste ja tehnika valdkonnas (magistriõppe astmes).

2019 üliõpilaste teadustööde riiklikul konkursil valdkondade ülene peapreemia (doktoriõppe astmes).

2022 DLR-DAAD järeldoktori stipendium.

2026 riiklik teaduspreemia loodusteaduste valdkonnas.

Juhendanud 4 bakalaureuse- ja 1 magistritööd.

Avaldanud 43 teaduspublikatsiooni (Web of Science'i andmebaasides indekseeritud ajakirjades).

Uurimistöö põhisuunaks on siirdemetallide ja lämmastikuga dopeeritud süsiniknanomaterjali (M-N-C) tüüpi Pt-rühma metallivabade elektrokatalüsaatorite arendamine hapniku katoodseks redutseerumiseks anioonivahetusmembraaniga kütuseelemendis ja hapniku elektrokeemiliste reaktsioonide jaoks tsink-õhk aku õhuelektroodil, sealhulgas nende praktilise rakendamise uurimine laboriskaala seadmetes. Lisaks on tsink-õhk aku puhul üks uurimistöö eesmärke tehniliste lahenduste väljatöötamine praktiliselt kasutatava tsink-õhk aku prototüübi loomiseks. Paralleelselt on viimastel aastatel arendanud M-N-C tüüpi katoodkatalüsaatoreid kõrgtemperatuurse prootonivahetusmembraaniga kütuseelemendi jaoks.

Jaana Lilloja-Lensment

Sündinud 20. augustil 1994 Võrus

2013 Nõo Reaalgümnaasium

2016 Tartu Ülikool, materjaliteadus

2018 Tallinna Tehnikaülikool, puidu-, plasti- ja tekstiilitehnoloogia (MSc, *cum laude*)

2022 Tartu Ülikool, keemia (PhD)

Alates 2022 Tartu Ülikooli keemia instituudi kolloid- ja keskkonnakeemia teadur.

Alates 2024 Rahvusvahelise Elektrokeemiaühingu (International Society of Electrochemistry) Eesti piirkondlik esindaja.

2022. aastal sai üliõpilaste teadustööde riiklikul konkursil 1. preemia loodusteaduste valdkonnas (doktoriõppe astmes).

2026 riiklik teaduspreemia loodusteaduste valdkonnas.

Peamised uurimisvaldkonnad: elektrokatalüüs, hapniku elektrokeemiline redutseerumine, nanostruktuursete süsinikmaterjalide valmistamine, madalatemperatuursed kütuseelemendid.

Teadustöö peamine eesmärk on uudsete ja jätkusuutlike väärismetallivabade katalüsaatorite arendamine madalatemperatuurse kütuseelemendi katoodile. Peamine fookus on olnud metallilisandi (nt Fe, Co, Mn) ning süsinikkandja poorse struktuuri mõju uurimisel hapniku redutseerumise elektrokatalüüsile. Oma töödes on kasutanud erinevaid kommertsiaalseid süsiniknanomaterjale ja nende komposiite, kuid viimastel aastatel on olnud eesmärk eri matriitsimeetodeid kasutades valmistada ise sobivate omadustega süsiniknanomaterjale orgaanilistest lähteainetest.

Srinu Akula

Sündinud 20. juunil 1989 Indias Andhra Pradeshi osariigis

2005 ZP kõrgem kool, Konuru, Vizianagaram, Andhra Pradesh, India

2007 keskharidus, M.S.N. Jr. kolledž, Vizianagaram, Andhra Pradesh, India

2010 Andhra Pradeshi kolledž, Nagarjunasagar, Acharya Nagarjuna Ülikool, Guntur, India (BSc)

2013	Pondicherry Ülikool, Puducherry, India (MSc)
2020	Teadus- ja Innovatsiooniakadeemia – CSIR, keskse elektrokeemiauuringute instituudi (CECRI) Madrase üksus, India (PhD)
2021–2023	järeldoktor Tartu Ülikooli keemia instituudi kolloid- ja keskkonnakeemia õppetoolis.
2023–2024	külalisteadur Tartu Ülikooli keemia instituudi kolloid- ja keskkonnakeemia õppetoolis.

Alates 2025 Tartu Ülikooli keemia instituudi kolloid- ja keskkonnakeemia teadur.

2018 pälvis maineka CSIR-i vanemteaduri uurimisgrandi teadus- ja rakendusuuringute nõukogult (New Delhi, India).

2026 sai riikliku teaduspreemia loodusteaduste valdkonnas.

Juhendanud ühte doktoritööd.

Avaldanud 34 teaduspublikatsiooni (Web of Science'i andmebaasides indekseeritud ajakirjades).

Peamised uurimisvaldkonnad hõlmavad hapniku redutseerumis- ja eraldumisreaktsioone, elektrokatalüüsi ning aniooni- ja prootonivahetusmembraaniga kütuseelemente. Srinu Akula uurimistöö keskendub uudsete katalüsaatormaterjalide, eriti heteroaatomitega dopeeritud süsiniknanomaterjalide, näiteks grafeeni, süsiniknanokiudude, süsiniknanotorude ja poorsete süsinikmaterjalide, aga ka süsinikupõhistele alusmaterjalidele kantud metalli nanoosakeste disainile ja arendamisele. Viimastel aastatel on suurt tähelepanu pööratud siirdemetall-lämmastik-süsinik (M-N-C) tüüpi katalüsaatoritele tänu nende kõrgele elektrokatalüütilisele aktiivsusele ja stabiilsusele madalatemperatuuriliste kütuseelementide rakendustes. Need materjalid on näidanud suurt potentsiaali oluliste alternatiividena väärismetallidel põhinevatele katalüsaatoritele. Töö peamine eesmärk on arendada tõhusaid, vastupidavaid ja aatomdispergeeritud M-N_x tsentritega mittevääriismetallkatalüsaatoreid elektrokeemilise energiamuundamise seadmete jaoks, pöörates erilist tähelepanu madalatemperatuuriliste kütuseelementide jõudluse parandamisele.

https://doi.org/10.3176/evp.2026.05

KORTERELAMUTE TERVIKRENOVEERIMISE ARENDUSTÖÖ EESTIS VIIMASE 20 AASTA JOOKSUL – PANEELMAJA VUUKIDE TIHENDAMISEST KUNI NAABRUSKONNA TEHASELISE RENOVEERIMISENI

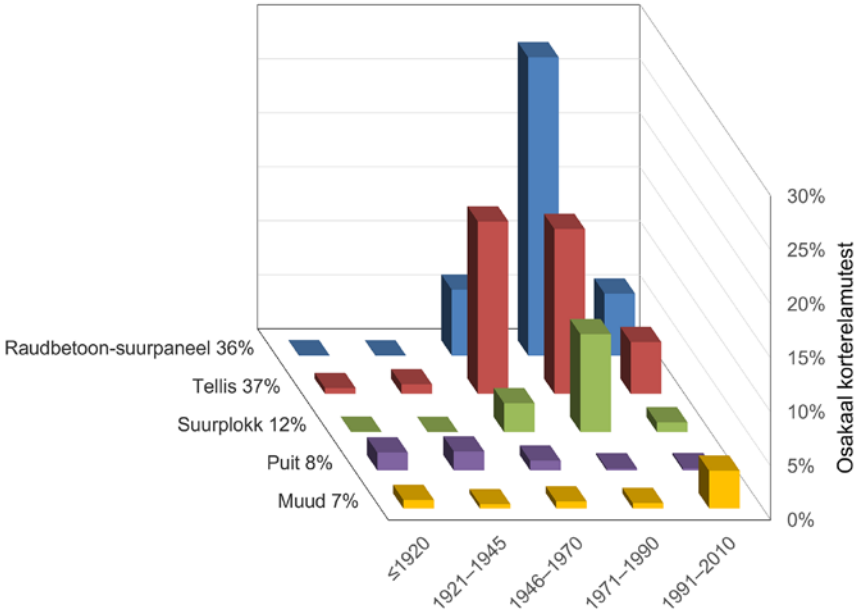
Targo Kalamees (Tallinna Tehnikaülikool)

Teaduspreemia tehnika ja tehnoloogia valdkonnas tööde tsükli „Elamufondi tervikrenoveerimine ja niiskusturvalisuse tagamine inimeste elukvaliteedi parandamiseks ja hoonete keskkonnamõju vähendamiseks“ eest

Korterelamute renoveerimise vajadus

Kuna Teise maailmasõja käigus hävines üle poole sõjaeelsest elamufondist (Juursoo, 1978), valitses pärast sõda eluasemete järele suur puudus. Umbes 12 sõjajärgse aastaga suudeti taastada hävinenud elamispind pindalaliselt, aga elanikkonna kasvu ja säilinud elamute halva seisukorra tõttu oli tarvidus elamispinna järele tunduvalt suurem (EKP KK, ENSV MN, 1957). Peatselt tõdeti, et ettenähtud elamuehituse perspektiivprogrammi elluviimine ei ole mõeldav seniseid mitteindustriaalseid ehitusviise kasutades, sest selleks tuli ehitustegevusse suunata mitu korda rohkem tööjõudu, mis aga polnud pingelise tööjõubilansi tõttu võimalik (Treifeldt, 1959). Seepärast orienteeriti elamuehituse edasisel arendamisel tööstuslikele, esmalt suurplokk- ja seejärel raudbetoon-suurpaneel ehitusviisile. Korterelamute ehituse kõrgaeg Eestis oli aastatel 1961–1990 ehk nõukogude aja kesk- ja lõpuaastatel, mil ehitati 90 000 – 120 000 korterit kümnendis (Statistikaamet, 2021) (joonis 1). Arvestades tüüpilist korterelamu projekteeritud kasutusiga 40–50 aastat, hakkab see vanemate korterelamute puhul lähenema lõpule ja ette on vaja võtta tervikrenoveerimine.

Korterelamute tehnilist olukorda on üsna põhjalikult uuritud. 1993. aastal viis Soome ettevõte AIR-IX OY läbi uuringud, mis hõlmasid nii 5- kui ka 16-korruselisi korterelamuid ja pilootprojektina renoveeriti 5-korruseline raudbetoon-suurpaneelelamu aadressil Õismäe tee 5. Mustamäe korterelamute konstruktsioonide seisukorda uurisid ning renoveerimise ettepanekuid



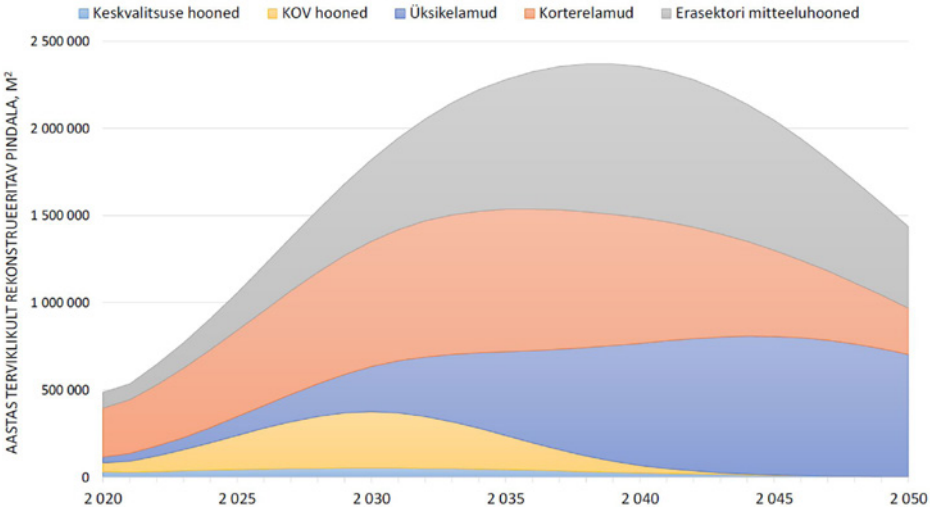
Joonis 1. Eesti korterelamute jaotus ehitusaasta ja välisseinakonstruktsiooni alusel (EHR, 2010).

tegid Ehituskonstrueerimise ja Katsetuste OÜ (EKK, 1994) ja inseneribüroo EstKONSULT (EstKONSULT, 1996). Perioodil 2009–2012 tegid Tallinna Tehnikaülikooli ehitusteadlased uuringuid raudbetoon-suurpaneel- (Kalamees jt, 2009), tellis- (Kalamees jt, 2010) ja puitkorterelamute (Kalamees jt, 2011) ning pärast taasiseseisvumist ehitatud korterelamute kohta (Kalamees jt, 2012). Uuringute tulemused osutasid korterelamute renoveerimise vajadusele nii hoonete juba algselt probleemse tehnilise olukorra, puuduliku ruumiõhu kvaliteedi kui ka suure hooldusvõla tõttu. Konstruktsioonide osas on kõige murettekitavam korterelamute rõdude, varikatuste ja fassaadide olukord. Tehnilise Järelevalve Ameti läbi viidud rõdude ja rõdupiirete uuringu kohaselt tuvastati 87% väiksemaid ja suuremaid puuduseid rõdude kinnituselementides ja 61% ilmnes ühe suure või mitme puudusega kinnitusi, mis võivad kaasa tuua varingu (TJA, 2013).

Omaette renoveerimisvajaduse põhjustab vanemate korterelamute suur energiavajadus. Eesti korterelamute energiakasutus on ligi 250 kWh/(m²·a), millest suurima osa moodustab soojuse kasutamine ruumide kütmiseks ja ventilatsiooniõhu soojendamiseks (Arumägi, Kalamees, 2014; Kuusk jt, 2014; Kuusk, Kalamees, 2016). Soojuskao põhjus on nii piirdetarindite ulatuslikus soojusläbivuses kui ka nende liitekohtades olevates soojasildades (Ilomets jt, 2017) ning piirdetarindite suures õhulekkes (Hallik jt, 2023). Need probleemid tuvastati ka esimeste raudbetoon-suurpaneelelamute juures – ehkki talvel ei langenud temperatuur väga madalale, külmusid välisseinad üksikutes kohtades läbi ja liitekohtadest puhus tuul sisse. Viga oli tingitud mitmest tegurist: seina konst-

ruktsioonist (soojustust vaid 13 cm), materjalist, paneelide valmistamise ja montaaži kvaliteedist (Veigel, 1962). Suurt soojusvajadust põhjustas ka küttesüsteemi juhitamatus: puudusid termostaadid, ühe toruga küttesüsteemi oli raske juhtida ja tasakaalustada jne.

Teise maailmasõja järgse ehituslaine käigus rajatud elamute projekteeritud kasutusea lõppemine põhjustab praegusajal suure renoveerimislaine. Eesti hoonete rekonstrueerimise pikaajalise strateegia kohaselt tuleb aastaks 2050 terviklikult renoveerida vähemalt 14 000 korterelamut ja 105 000 üksikelamut (MKM, TalTech, 2020). Praegusega võrreldes on renoveerimisvajadus korterelamute puhul kuni kolmekordne ja üksikelamute puhul mitmekümnekordne (joonis 2). Nõudluse kasvuga hakkamasaamiseks on renoveerimisel vaja rakendada tööstuslikke meetodeid, kuna käsitööonduslikult me hakkama ei saa.



Joonis 2. Kumulatiivne aastane rekonstrueerimise vajadus (MKM, TalTech, 2020).

Korterelamute renoveerimise varasem praktika

Taasiseseisvumise alguses käivitus ka korterelamute renoveerimise uurimis- ja arendustöö. Esimestele projektidele tulid appi sõbralikud naabrid: Taani spetsialistid aitasid korraldada energiaaudiitorite koolitust, Soome aitas kaasa esimese renoveerimise katseprojekti koostamisel.

Esimene tähelepanuväärne renoveerimise pilootprojekt oli Õismäe tee 5 asuv 5-korruseline 60 korteriga raudbetoon-suurpaneelelamu (tabel 1, 1. rida), millel rekonstrueeriti küttesüsteem, puhastati ventilatsioonisüsteem, tihendati välisseinapaneelide vuugid, korrastati rõdud, uksed-aknad, soojustati otsafassaadid, puhastati ja värviti küljefassaadid (Majandusministeerium, 1997). Soojustamata

jäid kõik välisseinad, piirdetarindite ja akende soojusläbivus jäi siiski suureks ning ventilatsioonil puudus soojuse tagastus.

Kümme aastat hiljem sama tüüpi korterelamu (Paldiski mnt 171, tabel 1, 2. rida) renoveerimisel soojustati juba kõik piirdetarindid, vahetati aknad ning uuendati küttesüsteem. Energiasääst küündis kuni 50% (KredEx, 2008). Osaliselt ressursinappuse, heade komplekssete lahenduste puudumise ja inimeste vastuseisu tõttu jäi ventilatsioon renoveerimata ja soojustagastus paigaldamata. Renoveeritud ja vähemalt üks aasta ekspluatatsioonis olnud elamute olukorra uuring (Hamburg jt, 2010) näitas, et korterelamute suurim probleem oli ebapiisavalt toimiv ventilatsioon, mis põhjustas halva õhuvahetuse, liigse niiskuse ja kõrge CO_2 taseme ning võis viia hallituse tekkeni ja ohustada tervist. Selle teadmise alusel otsustas KredEx toetada vaid projekte, kus rekonstrueeriti ventilatsioon koos soojustagastuse paigaldusega (Kuusk, Kalamees, 2016).

Sõpruse pst 244 korterelamu (tabel 1, 3. rida) oli katsehooneks projektis „Tervislik ja säästlik kodu“, mille eesmärk oli korteriühistutele näidata, et tervisliku sisekliima tagamiseks ja energia säästmiseks on otstarbekas hoone renoveerida kompleksselt. Selle hoone ventilatsiooni soojustagastus lahendati väljatõmbeõhu soojuspumba abil. Renoveerimise tulemusena vähenes soojuse tarbimine 50%, kuid edasise arendustöö vajadusele osutasid väljatõmbeõhu soojuspumba suur elektrikulu, soojasillad ümber akende (aknad jäid soojustuse tasapinda välja tõstmata) ja toetusmeetme lahendus (Kuusk jt, 2017). Kui säilivad soojasillad akende soojustuse tasapinda tõstmata jätmise ja konsoolrõdude tõttu, võib soojasildade negatiivne mõju ulatuda kuni 34% hoone kogu soojuskaost ning seda ei saa kompenseerida ka paksema soojustusega (Ilomets jt, 2017).

SmartEnCity projekti (2016–2022) Tartus võib näidisena esile tuua, kuna see astus ühe hoone renoveerimisest naabruskonna (18 korterelamut, tabel 1, 4. rida) renoveerimise suunas ja ühendas heitmevaba linna kontseptsiooni nutikate energialahendustega ühtseks toimivaks tervikuks. Protsessi olid aktiivselt kaasatud ka hoonetes elavad inimesed ja kohalik omavalitsus. Renoveerimise tulemusel vähenes oluliselt energiatarbimine (kaugküte −36%, elekter −27%, maagaas −78%), energiatõhusus paranes F-klassist (257 kWh/(m²·a)) A-klassi (101 kWh/(m²·a)) ning lisati päikeseelektrijaamad koguvõimsusega 551 kWp (TREA, 2022). A-energiaklassi renoveeritud elamute korterid olid 6,5% kõrgema kinnisvaraväärtusega kui renoveerimata või tavapäraselt renoveeritud elamute korterid (Lehes, 2021).

Tabel 1. Taasiseseisvumise järgsed olulisemad tervikrenoveerimise arendusprojektid.

Projekti iseloomustus	Foto
Õismäe tee 5, 60 korteriga 5-korruseline raudbetoon-suurpaneelelamu. Ehitatud 1975, renoveeriti 1994. Maksumus 0,28 mln eurot (93 €/m²), 35% rahastasid Soome Kaubandus- ja Tööstusministeerium ning Soome Keskkonnaministeerium, ülejäänu kattis Eesti Majandusministeerium. Kütte- ja ventilatsioonisüsteemide, akende ja rõdude uuendamine, katuse remont, välisseinapaneelide vuukide korrastamine ja tihendamine ning uste ja akende uuendamine (Majandusministeerium, 1997).	
Paldiski mnt 171, 60 korteriga 5-korruseline raudbetoon-suurpaneelelamu. Ehitatud 1977, renoveeriti 2006. Projekti „The Baltic Energy Efficiency Network for the Building Stock“ (BEEN, Interreg IIIB) piloothoone. Maksumus > 0,40 mln eurot (128 €/m²). Soojustati fassaad ja katus, vahetati aknad ning korrastati rõdud, rekonstrueeriti küttesüsteem, paigaldati küttekulu arvestuse süsteem (KredEx, 2008).	
Sõpruse pst 244, 60 korteriga 5-korruseline raudbetoon-suurpaneelelamu. Ehitatud 1966, renoveeriti 2011. Projekti „Tervislik ja säästlik kodu“ piloothoone. Maksumus > 0,45 mln eurot (114 €/m²). Soojustati fassaad, sokkel, vundament ja katuslagi, renoveeriti rõdud ning vahetati aknad ja uksed. Lisaks paigaldati soojustagastusega ventilatsioonisüsteem (Kalamees jt, 2013).	

Projekti iseloomustus	Foto
18 korterelamu tervikrenoveerimine Tartus Ehitatud 1950.–1960. aastatel, renoveeriti 2017–2019. Projekti „SmartEnCity“ piloothooned. Renoveerimise maksumus umbes 350–400 €/m². Soojustati piirdetarindid, uuendati tehnosüsteemid, rajati mehaaniline ventilatsioon ja kaugküttel põhinev tarbevee soojendamine, hoonetele paigaldati päikesepaneelid ja nutikodu lahendused energiatarbimise jälgimiseks. Arendati terviklikku nutikat linnaosa: loodi energiatõhus tänavavalgustus, elektrisõidukite laadimistaristu, jalgrattarent ning andmepõhised juhtimissüsteemid (SmartEnCity, 2022).	

Paljude hoonete korraga renoveerimine kasvatab nõudlust ja tõstab ehitusmaksumust, mis teeb renoveerimise korteriühistute jaoks raskemaks. Seetõttu on oluline lisaks stabiilsetele toetustele välja arendada renoveerimistehnoloogiad, mis nõudluse kasvades ei põhjustaks kallinemist, vaid mastaabiefektiga võimaldataks hoopis maksumuse alanemist. See on võimalik, kui renoveerimisel kasutatakse tehases valmistatud lisasoojustuselemente, millesse on eelpaigaldatud ka aknad ja ventilatsioonitorud.

Välismaa kogemus

Renoveerimisel lisasoojustuselementide kasutamine tähendab uut tehnoloogiat ja tootearendust, mis ei saa tekkida üleöö, vaid vajab nii arendustööde ja tehnoloogia pakkumist kui ka nõudlust. Üks esimesi suuremaid pilootprojekte tehaselise renoveerimise arendamiseks oli Rahvusvahelise Energiaagentuuri projekt IEA Annex 50 „Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings“ (2007–2011). Pilootrenoveerimised teostati Austrias, Hollandis ja Šveitsis. Tulemused rõhutasid täpse paigalduse ja tolerantside arvestamise olulisust ning kinnituste korrektset paigaldust (Miloni jt, 2011; Zimmermann, 2012). TES Energy Facade projekt (2008–2009) arendas lisasoojustuselementidega renoveerimise digitaalset töövoogu, kaasates sellesse mõõdistamise, planeerimise, tootmise ja kohapealse paigaldamise (Larsen jt, 2011). Toodi välja lisasoojustuselementide liitekohtade õhupidavuse (Loebus jt, 2014) ja niiskustehnilise toimivuse olulisus, samas ei esitatud lisasoojustatava seina algniiskusele mingeid kriteeriume (Lattke jt, 2009). Rootsi projektis TURIK „Teknikupphandling: Rationell isolering av klimatskärmen på befintliga flerbostadshus“ (2008–2011) hinnati lisasoojustuselementide soojuslikku ja

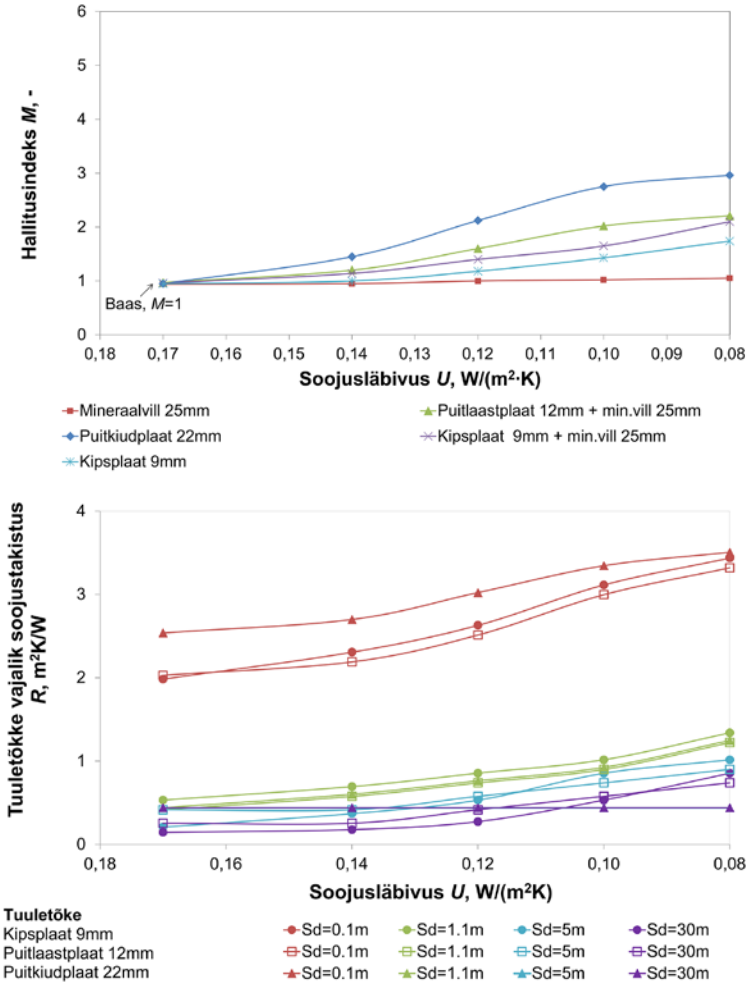
niiskuslikku toimivust, kulutõhusust, keskkonnasäästlikkust, vastupidavust ja hooldusvajadust (Mjörnell, 2011). EU Horizon2020 projekt E2ReBuild (Heim jt, 2014) (2011–2014) keskendus lisasoojustuselementide tööstuslikule tootmisele, renoveerimislahenduste standardimisele ja jäätmete vähendamisele, et tagada stabiilne korratavus ja hoone energiatõhusus. RetroKiti projekt (2012–2016) arendas ja testis lisasoojustuselementide lahendusi, mis oleks hõlpsasti paigaldatavad ning koos tehnosüsteemide ja taastuvenergia lahendustega võimaldaks hoonete terviklikku renoveerimist (Katsifaraki jt, 2014). Projekt „Multifunctional Energy Efficient Facade System for Building Retrofitting, MeeFS“ (2012–2016) keskendus komposiitmaterjalidel põhineva lisasoojustuselemendi arendamisele, mis ühendaks soojustuse ja tehnosüsteemid ning võimaldaks kohandada fassaade vastavalt hoonele ja kliimale, olles samas standardiseeritud, kulutõhus, vähese hooldusvajadusega ning sobiv tööstuslikuks tootmiseks ja paigalduseks (MEEFS, 2016). Projekt „Building energy renovation through timber prefabricated modules, BERTIM“ (2015–2019) arendas lisasoojustuselemente, millesse olid integreeritud aknad, tehnosüsteemid ja taastuvenergia lahendused ja mis võimaldas kiiret ja elanikke vähehäirivat paigaldust. Lisaks loodi terviklik digitaalne renoveerimisprotsess, mis toetas projekteerimist ja tööstuslikku tootmist (Lasarte jt, 2017).

Teiste riikide arendustööd pole võimalik otse üle võtta, kuna renoveeritav hoonefond ja vajadus on riigiti erinev. Vähem olulised pole ka arendusse kaasatud kohalikud ettevõtted ja lõpptarbijad, kelle usaldus uue tehnoloogia vastu kasvab protsessis osalemise tõttu.

Eesti arendustöö

Renoveerimise lisasoojustuselementide arendustöö Eestis on seni keskendunud peamiselt nende soojuslikule ja niiskuslikule toimivusele, soojuskadude vähendamisele, liitekohtade tihendamisele, kinnituse arendamisele ning niiskusturvalisuse ja tuleohutuse tagamisele ning hoone enda kandevõime tagamisele. Arendustöö on toimunud nii Tallinna Tehnikaülikoolis, Eesti Puitmajaliidus kui ka lisasoojustuselemente tootvates ja paigaldavates ettevõtetes, kellest on põhjalikemat tööd teinud Matek, Timbeco Woodhouse, KMT Prefab, Estnor, Welement, Timbeco Ehitus ja BaltiVara.

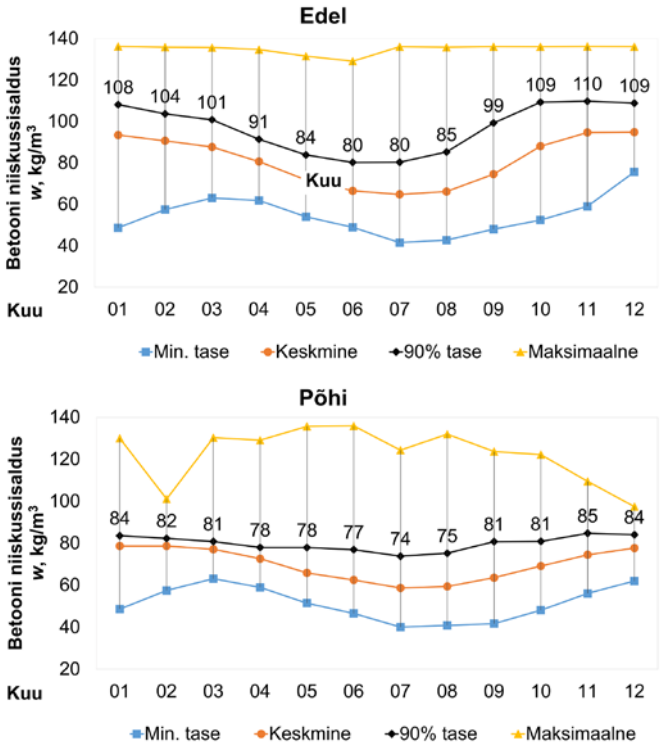
Lisasoojustuselemendi soojusliku ja niiskusliku toimivuse tagamise uuringuid võib vaadata kahes osas: lisasoojustuselemendi kui puitkarkass-seina toimivus ja lisasoojustuselement renoveeritaval seinal. Puitkarkass-seina soojusliku ja niiskusliku toimivuse analüüs näitas, et soojusläbivuse vähendamisel ainult soojustuse paksuse lisamisega (kui muid tarindi kihtide omadusi ei muudeta) on suhteline niiskuse ja hallituse tekke oht kõrgem (joonis 3 ülal) ning kuivamisperiood pikem. Suurema soojustakistusega tuuletõkked näitasid soojusläbivuse vähenemise käigus konstruktsioonis hallituse tekkeriski suurenemist väiksemal määral (joonis 3 all).



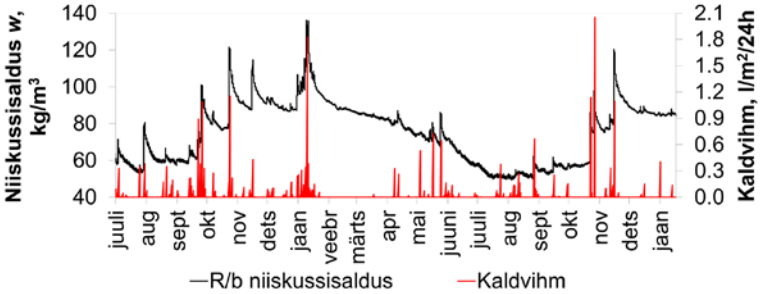
Joonis 3. Hallituse kasvuriski indeksi (M) sõltuvus tuuletõkkest ja seina soojusläbivusest (ülal). Tuuletõkke kihi nõutav minimaalne soojustakistus (R, m² K/W) ja õhu- ja aurutõkke veeaurutakistus S_d, et hoida hallituserisk M < 1 (kasvu ei esine) (all) (Pihelo, Kalamees, 2016).

Lisasoojustuselemendi niiskuslikku toimivust mõjutab oluliselt soojustatavast seinast välja kuivav niiskus. Ilma seinast välja kuivava niiskuse koormust arvestamata ei näita standardi EVS-EN ISO 13788 (2012) kohane analüüs õiget tulemust. Samas kasutavad paljud projekteerijad jätkuvalt selle standardi kohast arvutusmeetodit. Fassaadi niiskussisaldust mõjutab kõige rohkem kaldvihm, aga ka sesoonne õhuniiskuse muutus. Aasta lõikes on suurim niiskussisaldus sügistalvisel perioodil, mil renoveerimine tähendab lisasoojustuselemendile suurimat niiskuskoormust. Kaldvihma olulisim mõju vana fassaadimaterjali niiskussisaldusele on lääne- ja lõunaküljе fassaadide ülemises osas ja nurkades

– seal on niiskussisaldus 15–20% kõrgem kui põhja- ja idaküljel (joonis 4). Vihmast märjaks saanud seina väljakuivamine on suhteliselt kiire esimeste päevade jooksul pärast vihma ja praktiliselt peatub 7–9 päeva pärast (joonis 5). Kui fassaadi algniiskust pole mõõdetud, võib lähtuda järgnevatest niiskussisalduse suurustest: raudbetoonfassaad 110 kg/m³, tellisfassaad 100 kg/m³ ja suurplokkfassaad 60 kg/m³. Väiksemast algniiskusest võib lähtuda vaid siis, kui fassaadi niiskussisaldus ja selle jaotus on usaldusväärselt mõõdetud.



Joonis 4. Betoonfassaadi seina väliskooriku niiskussisalduse muutuse jaotus pärast kaldvihma edela (ülal) ja põhja (all) orientatsioonis (Pihelo jt, 2016).



Joonis 5. Betoonseina väliskooriku niiskussisalduse muutus pärast kaldvihma (Pihelo jt, 2016).

Lisasoojustuselemendi soojuslik ja niiskuslik toimivus sõltub lisaks soojustatava seina algniiskusele ka lisasoojustuselemendi soojustakistusest ning tuule- ja aurutõkke omadustest (tabel 2). Nagu näha, toimib kõige paremini suure veeaurujuhtivuse ja soojustakistusega mineraalvillast tuuletõke. Lisasoojustuselemendi materjalide esmaseks valikuks saab kasutada alltoodud valgusfooripõhist otsustusmaatriksit.

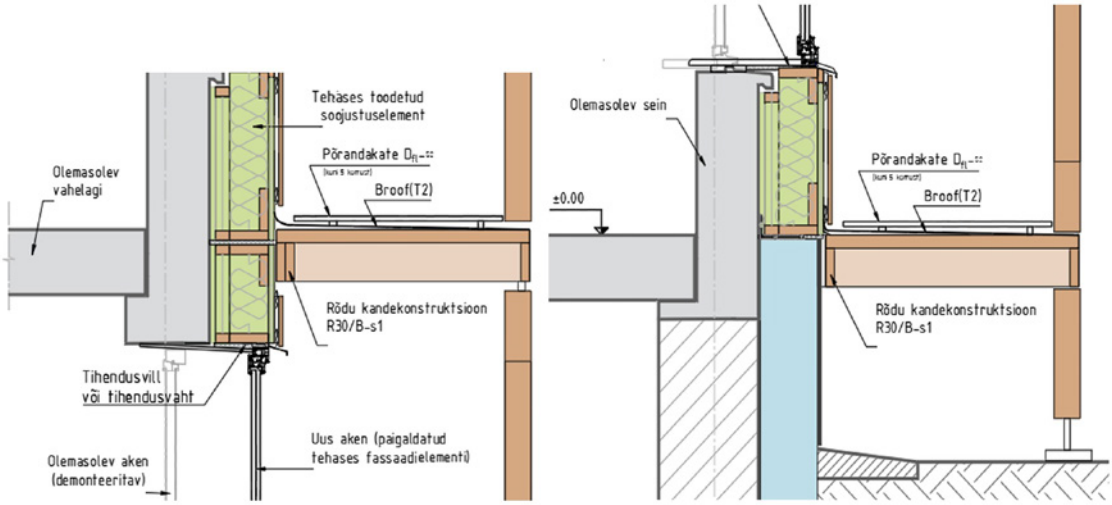
Tabel 2. Mineraalvillaga soojustatud lisasoojustuselemendi soojuslik ja niiskuslik toimivus sõltuvalt lisasoojustuselemendi karkassi vahelisest soojustuse paksusest, tuuletõkkeplaadist, õhutõkkest ja betoonfassaadi algniiskusest (roheline: hallitusrisk puudub, M < 1; kollane: mikroskoobiga tuvastatav hallitusrisk, 1 ≤ M < 2; punane: kõrgem hallitusrisk, M ≥ 2).

Tuuletõkkematerjal ja paksus	Õhutõkke veeaurutakistus	Soojustuse paksus								
		120 mm			145 mm			195 mm		
		Algniiskus (kg/m³)								
		85	95	110	85	95	110	85	95	110
Tuuletõkkekangas	0,2 m ≤ S_d ≤ 5 m	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Kipsplaat, 9 mm		4	4	4	4	4	4	4	4	4
D3Ts-kiudplaat, 9 mm		4	4	4	4	4	4	4	4	4
Puitkiudplaat 22 mm		4	4	4	4	4	4	4	4	4
Mineraalvill 30 mm		4	4	4	4	4	4	4	4	4
Tuuletõkkekangas	Ilma aurutõkketa	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Kipsplaat, 9 mm		6	6	6	6	6	6	6	6	6
D3Ts-kiudplaat, 9 mm		4	4	4	4	4	4	4	4	4
Puitkiudplaat 22 mm		6	6	6	6	6	6	6	6	6
Mineraalvill 30 mm		4	4	4	4	4	4	4	4	4
Tuuletõkkekangas	S_d ≥ 50 m	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Kipsplaat, 9 mm		4	4	4	4	4	4	4	4	4
D3Ts-kiudplaat, 9 mm		4	4	4	4	4	4	4	4	4
Puitkiudplaat 22 mm		4	4	4	4	4	4	4	4	4
Mineraalvill 30 mm		4	4	4	4	4	4	4	4	4

Punkt 4 – lisasoojustuselemendi õhu- ning aurutõkke sisepind.
Punkt 6 – lisasoojustuselemendi tuuletõkke sisepind.

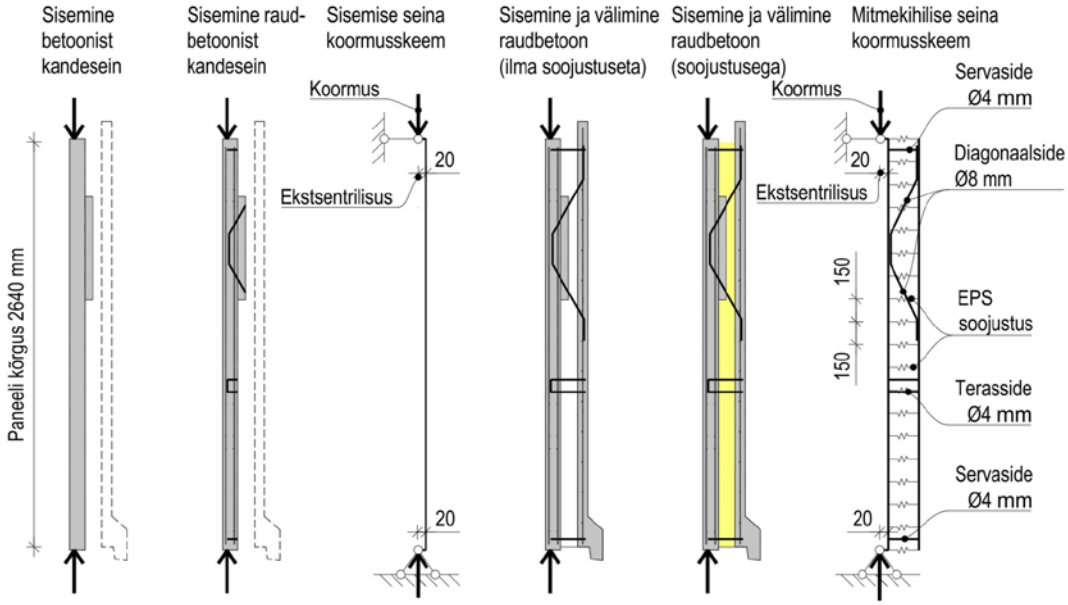
2020. aastal käivitus Eesti Puitmajaliidu eestvedamisel viie ettevõtte koostöö tehaselise renoveerimise põhilahenduste täiustamise alal, tuginedes esialgsetele pilootprojektidele (Pihelo jt, 2017; Pihelo, Kalamees, 2020). Arhiivist saadi tüüphoonete projekteerimisdokumentatsioon. Eri ettevõtete poolt välja töötatud kolme tüüpi korterelamute jaoks loodi renoveerimisjoonised. Peamine tähelepanu oli hoone väliskesta, sealhulgas akna-seina, katuse-seina, rõdu-seina, seina-seina, põranda-seina, sokli ja isolatsioonielemendi ventilatsioonikanalite ühendustel.

Koostöös Päästeameti ja tuleohutuse spetsialistidega töötati välja puitfassaadide tuleohutuslahendused kuni 5-korruseliste eluhoonete renoveerimise jaoks (Luht-Kallas jt, 2021) ja mõne aasta pärast ka kuni 8-korruselistele ja enama kui 8 korrusega hoonetele, kui need ei ole projekteeritud kõrghoonena (9-korruselised korterelamud perioodil 1970–1990) (Pukk, Vogt, 2023). Juhendid on kirjutatud ladusas keeles ja varustatud hästi arusaadavate joonistega (joonis 6).



Joonis 6. Näide lisasoojustuselemendi ja rõdu liitekohast vahelaega (vasakul) ja maapinnaga (paremal) (Pukk, Vogt, 2023).

Hooned projekteeritakse vastavalt neile mõjuvatele koormustele. Ka masselamuehituse aegsete hoonete kavandamisel ja ehitamisel peeti silmas materjalide põhjendatud kasutust ja välditi põhjendamatut üledimensioneerimist. Seetõttu tuleb koormuse lisamisel kindlasti hinnata olemasolevate kandekonstruktsioonide seisukorda ja võimet renoveerimisega lisanduvat koormust vastu võtta. Olukord on tõsisem, kui hoone ehituskvaliteet on halb, hoone on puudulikult hooldatud või remonditud. Ka kõrgemate hoonete puhul võib kandevõime risk olla suurem, kuna materjalikihtide paksuse puhul pole enam piiravaks mitte niivõrd tootmise tehnoloogia kui kihtide paksusest tulenev kandevõime.



Joonis 7. Seeria 111-133 suurpaneelelamu demonteerimisest (ülal) saadud seinapaneelide katsetamine laboris (keskel) ja arvutusskeemid modelleerimiseks lõplike elementide tarkvara abil (all) (Paalandi jt, 2026).

Selgitamaks korterelamute võimet vastu võtta lisasoojustuselementidest tulenevat täiendavat koormust, on Tallinna Tehnikaülikoolis läbi viidud nii laborikatseid, väliuuringuid kui ka arvutusi ja modelleerimisi. Tehaselise renoveerimise arendamine 9-korruseliste korterelamute jaoks tingis vajaduse uurida seda tüüpi korterelamute kandevõimet ning hinnata suutlikkust taluda lisasoojustuselementidest tulenevat täiendavat koormust (Paalandi jt, 2026). Unikaalse võimaluse selleks andis Valgas Tähe tn 31a demonteeritud korterelamu (joonis 7 ülal). Demonteeritud välisseinapaneelide kandevõimet mõõdeti tehnikaülikooli ehituskonstruktsioonide teadus- ja katselaboratooriumis (joonis 7 keskel). Laborimõõtmised olid aluseks lõplike elementide meetodi (FEM) tarkvara arvutusmudeli kalibreerimisele. Kalibreeritud mudeliga tehtud arvutused näitasid, et saledate raudbetoonseinte kandevõimet on võimalik usaldusväärselt hinnata ja tõendada. FEM-mudelid võimaldavad hinnata konstruktsioonide kandevõimet ka olukordades, kus tavapärased normipõhised meetodid osutuvad liiga konservatiivseks või ei ole rakendatavad. Katsete põhjal tõendati, et olemasolevate paneelide kandevõime on piisav tehaseliste puitkarkassil põhinevate lisasoojustuselementide täiendava koormuse 0,50 kN/m² vastuvõtmiseks, eeldusel et konstruktsioonide omadused ja ehitustolerantsid on põhjalikult hinnatud. Vanade raudbetoon-suurpaneelelamute kandevõime uuringud tehaselise renoveerimise valmiduseks jätkuvad Tallinna Elamuehituskombinaadi tüüpseeriate 1-464 ja 111-121 osas.

Piloteerimine, demonstreerimine

Iga arendustöö juures on vaja erinevate toote- ja tehnoloogia arendusetappide lahendusi testida, piloteerida ja demonstreerida. Kui ehitusettevõttel puudub oma arendusosakond ja labor lahenduste testimiseks ning praktika arendusalaseks koostööks ülikoolidega, on reaalseks kohaks teadmiste ja oskuste demonstreerimiseks ja kogemuste saamiseks täiemahulised ehitus- ja renoveerimisobjektid.

Esimene pilootprojekt – Akadeemia tee 5a, Tallinna Tehnikaülikooli pereühiselamu

Sellest sai kõik alguse. Akadeemia tee 5a asuv tehnikaülikooli pereühiselamu oli piloothooneks H2020 teadus- ja arendusprojektis MORE-CONNECT (2014–2019), kus osalesid lisaks Tallinna Tehnikaülikoolile veel AS Matek ja OÜ REF Ehitustööd. Renoveerimise peaprojekteerija oli Sirkel&Mall OÜ ja peatöövõtja oli Oma Ehitaja AS. Lisasoojustuselemendi kontseptsiooni (Kalamees jt, 2017) teostatavust kontrolliti Mateki puitmajatehases, kus valmistati prototüübid ja testiti nende paigaldamist teineteise peale. Prototüübi testimisest saadud kogemus kanti üle projektlahendile: muudeti soojustuselementide vahelist vahet, et pääseks paremini liitekohta tihendama.

Suurimad ülesanded ja arendusvajadused tulevikuks olid niiskusturvalisuse tagamine katuse (Kalamees jt, 2025) ja välisseina (Pihelo, Kalamees, 2021)

lisasoojustuselementide paigalduse osas. Soojustuselementide paigalduse ajal sadanud vihm tegi puidu ja soojustuse märjaks. Märgunud materjali kuivamine võttis aega kauem kui niiskes keskkonnas mikrobioloogilise kasvu algus. Õpikogemus oli see, et vihma ajal ja kohe pärast vihma elemente paigaldada ei või ja materjali märjaks lasta ei tohi.

Kuna enne elementide seinale kinnitamise koha projekteerimist jäi raudbetoon-välisseinapaneeli armeeringu asukoht tuvastamata, sattus kinnitus kohta, kus välisseinapaneelis oli palju armatuuri. Seetõttu osutus eraldi iga elemendi kinnituskronsteinide paigaldus väga töömahukaks ja aeganõudvaks. Põhjalikumad eeltööd projekteerimise ajal ja enne soojustuselementide tootmist võimaldavad selliseid ootamatusi vältida.

Hoone renoveeriti parimasse energiatõhususe klassi – liginullenergiahooneks. See oli 2016. aastal väga suur ambitsioon. Normaalkasutusele taandades vastas tulemus ootustele, aga tegeliku kasutuse eripärade ja standardarvutustes mitte-arvestatavate tehnosüsteemide tõttu oli tegelik tarbimine mõnevõrra suurem (Hamburg jt, 2020).

Kokkuvõttes oli esimene pilootprojekt edukas. Esimest korda tehes tuleb ikka ette asju, mida edaspidi vältida. See ongi tootearenduse osa ja õpiprotsess. Renoveerimisest valmis ka õppevideo (Alev jt, 2020). Akadeemia tee 5a keldrisse rajatud õppeklassis on kogemusi jagatud väga paljudele inimestele ja ettevõtetele.

Joonis 8. Akadeemia tee 5a, tehnikaülikooli pereühiselamu 2015. aastal enne renoveerimist (vasakul), 2017. aasta suvel renoveerimise ajal (keskel) ja 2017. aasta sügisel pärast renoveerimist (paremal) (Pihelo, Kalamees, 2021).

Teine pilootprojekt – korterelamu Kuuma tn 4 Sauel

Kuna Akadeemia tee 5a hoone renoveerimise pilootprojekt oli väga edukas, kutsuti tehnikaülikool järgmisse H2020 teadus- ja arendusprojekti DRIVE 0 (2019–2023), kus piloothooneks oli 24 korteriga 3-korruseline elamu Kuuma tn 4 Sauel (joonis 9). Ettevõtetest osalesid Timbeco Ehitus ja Timbeco Woodhouse, kes tootis lisasoojustuselemendid.

Joonis 9. Kuuma tn 4 korterelamu renoveerimine 2021. aastal. Foto: Erki Muhu, Timbeco Woodhouse.

Selle projekti arendustöö andis palju kogemusi ja uusi tulemusi:

- elanikud elasid renoveerimise ajal hoones;
- laserskaneeringust saadud punktipilve põhjal koostati hoone renoveerimiseks digitaalne 3D-mudel, mille info alusel toodeti tehase lisasoojustuselemendid;
- suurepärane energiatõhusus ja sisekliima saavutati ka praktikas – tänu hästi soojustatud piirdetarinditele ja efektiivsetele tehnosüsteemidele saavutati A-energiaklass ka tegeliku energiatarbimise alusel (Nigumann jt, 2024);
- katusel olevate päikesepaneelide toodang oli sama suur kui hoone aastane elektrivajadus ja võrku müüdud elektri abil kaeti renoveerimise laenumakseid ning vähendati elanike kulusid (Kalamees jt, 2026);
- lodžade kinniehitamise arevelt suurenes köök ja lõuna poole rajati uued rõdud;
- puitmajatehase algusest lõpuni ehitamise (nn võtmed-kätte-)lahendus;
- esimene renoveerimine Eestis, kus rakendati ulatuslikult ringmajanduse põhimõtteid (Kuusk jt, 2021).

Kuna ehitusperiood sattus COVID-19 pandeemia aega, tekitas see palju probleeme ehitusettevõttele: materjalide ja toodete tarneraskused, hinna kallinemine, tööjõupuudus, alltöövõtjate leidmine ja lepingutest kinnipidamine jne. Vaatamata mõnele kitsaskohale oli tegemist väga eduka pilootprojektiga, kus koguti hulganisti andmeid ja õppetunde, et tulevased projektid oleksid veelgi edukamad ja sujuvamad.

Kolmas, KredExi/EIS-i tehaselise renoveerimise pilootprojekt

2020. aastal valmis Eesti hoonete rekonstrueerimise pikaajaline strateegia (MKM, TalTech, 2020), mis tõi esile vajaduse suurendada korterelamute renoveerimismahtu mitu korda (joonis 2). Esimeste tehaseliste renoveerimiste edu taustal otsustas riik käivitada üleriigilise tehaselise renoveerimise pilootprojekti, mis keskendus tüüpkorterelamutele 1-317, 1-464, 111-121 ja 111-133 (joonis 10). Aastatel 2021–2024 renoveeriti 19 korterelamut enam kui 800 korteriga. Nii suure mahuga renoveerimise puhul tuli lisaks tehnilisele arendustööle panustada ka juhtimise, koostöökorralduse arendamise ja elanike kaasamise lahendustele. Pilootprojekti hoonete renoveerimise peatöövõtjad olid Balti Vara Ehitus OÜ ja Mapri Ehitus OÜ, lisasoojustuselemendid valmistasid EstNor OÜ ja KMT Prefab ja peaprojekteerijad olid Termopilt OÜ ja Eesti Soojustusprojekt OÜ.

Joonis 10. Tüüpseeria 111-121 (ülal) ja 1-317 (all) korterelamud enne (vasakul) ja pärast (paremal) renoveerimist.

Pilootprojekti üks suurimaid edusamme oli riigi rolli muutumine tavapärasest toetuse jagajast aktiivseks vahendajaks (Pikas jt, 2026). Ettevõtluse ja Innovatsiooni Sihtasutus (EIS) koondas nõudlust, korraldas ühishankeid, lõi tehnilised tingimused ning aitas vähendada hinnariski kiiresti muutunud ehitusturul. Samuti mindi üle integreeritud projekteerimis- ja ehitusmudelile, mis kaasas projekteerijad, tootjad ja ehitajad juba hanke ettevalmistamise etapis, võimaldades parandada koostööd ning täpsemat planeerimist. Tehniliselt saavutati märkimisväärne ajavõit: hoone lisasoojustuselementide paigaldus kestis vaid 2–6 nädalat, samas kui traditsiooniline renoveerimine võtab oluliselt kauem aega. Elanikud hindasid positiivselt paremat sisekliimat, soojusmugavust ja väiksemaid energiakulusid.

Oluline saavutus oli ka Puitmajaliidu ja Päästeameti koostöös standardiseeritud tuleohutuse tagamise lahenduste ja juhendite väljatöötamine (Luht-Kallas jt, 2021; Pukk, Vogt, 2023). Projekt näitas, et tööstuslik renoveerimine võib olla toimiv lahendus kogu korterelamufondi uuendamiseks, kui on olemas pikaajaline riiklik tugi ja koostööd toetav juhtimismudel.

Samas ilmnes pilootprojekti käigus mitmeid probleeme, millest suurimaks osutus ebakindlus projektide mahu osas, sest korteriühistud võisid pärast hanget projektist loobuda. See vähendas ettevõtete valmisolekut investeerida tootmise automatiseerimisse ja ei võimaldanud saavutada loodetud hinnalangust suuremate mahtude kaudu. Probleeme põhjustasid ka puudulikud algandmed olemasolevate hoonete kohta, mistõttu tuli projektlahendusi muuta ning ehitus venis. Kuigi lisasoojustuselementide paigaldus oli kiire, pikenes kogu projekti kestus peamiselt ettevalmistus-, tehnosüsteemide ja järelviimistlustööde tõttu.

Projekt näitas, et tehaselise renoveerimise tehnilise poole arendus on jõudnud juba heale tasemele. Tulevikus tuleb arendada lisaks tehnilistele lahendustele ka elanike ja korteriühistute kaasamist, vähendada projekteerimise ja ehitamise halduskoormust ning standardida rohkem nii objekti töökorraldust ja ehitustööde juhtimist kui ka lepinguid. Samuti vajab arendamist täpsem hoonete eeluuring. Et anda ettevõtlusele kindlust investeerida toote ja tehnoloogia arendusse, on vaja pikaajalist poliitilist raamistikku.

Neljas tehaselise renoveerimise pilootprojekt – Akadeemia tee 4, 6, 14, 22 korterelamud

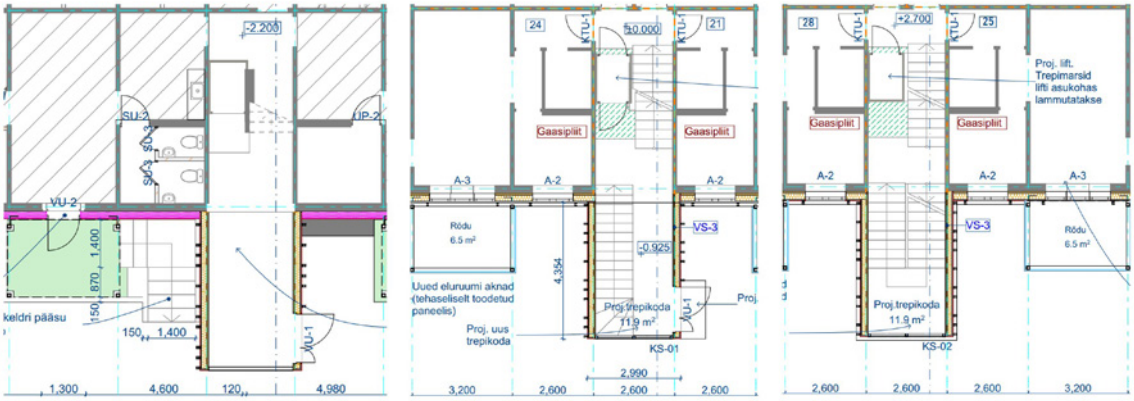
Hoonete renoveerimise kombineerimine naabruskonna ruumilise kvaliteedi parandamisega võiks olla võtmeks vananenud monofunktsionaalsete elamurajoonide kaasajastamisel (Truu jt, 2024). Järgmine tehaselise renoveerimise arenguetapp oli SoftAcademy (2024–2027) projekt, kus renoveeriti ühe hankega naabruskonna neli korterelamut ja nende hoovid. Projektil oli kaks suurt eesmärki:

- naabruskonna tasandi ringmajandusliku tervikrenoveerimise demonstreerimine eeltoodetud lisasoojustuselementidega heitmevaba hoone saavutamiseks;

- kogukonna kaasamise mudeli arendamine ja elamute kohandatud tervikrekonstrueerimise toetamine, sh uuenduslike digilahenduste arendamine renoveerimise protsessi strateegiliseks suunamiseks ja lihtsustamiseks ning Tallinna renoveerimiskiirendi loomine.

Piloothooneteks on Tallinnas Mustamäe esimese mikrorajooni esimesed korterelamud: Akadeemia tee 4, 6, 14 ja 22 (joonis 11). Korterelamu tehniline innovatsioon tehti vanasse 5-korruselisse korterelamusse lifti rajamisega. Viis aastat varem arendatud kontseptsioon (Kalamees, 2021) ja sellest arendatud tehniline lahendus (Sild jt, 2024) realiseerus praktikas (Anmeri, 2025) (joonis 12).

Joonis 11. Akadeemia tee 6 on esimene korterelamu, mis renoveeriti nelja korterelamu ühishankega 2026. aasta kevadel.



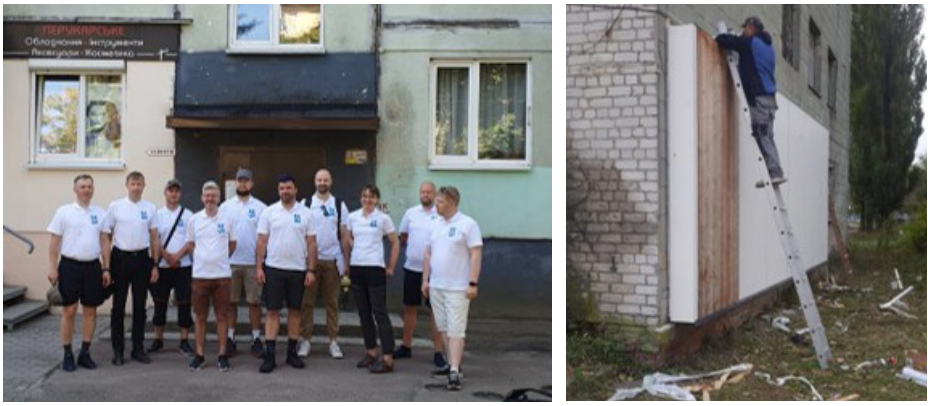
Joonis 12. Lift asub vana trepi asemel ja uus trepikoda on rajatud hoonest väljaspoole (Anmeri, 2025).

Ekspordipotentsiaal ja esimesed kogemused

Kui ehitusvaldkond ettevõtluse ja majandustegevuse vaates on enamasti lokaalse iseloomuga, siis tehaseline renoveerimine võimaldab Eesti ettevõtetel oma tooteid ja teenuseid eksportida. Üks esimesi Eesti ettevõtte renoveerimisprojekte algas 2021. aastal Berliini lähedal Ludwigsfeldes. Eeluuringutes ja renoveerimiskontseptsiooni väljatöötamisel osalesid ka Tallinna Tehnikaülikooli teadlased. Tänu esimeste pilootprojektide kogemustele ja jätkuvale arendustööle on Matek saanud tänaseks Saksamaal kortermajade tehaselise renoveerimise valdkonnas turuliidriks, olles viimaste aastate jooksul renoveerinud 15 hoonet. Renoveerimislahenduste ekspordi alal on edukad ka teised puitmajatootjad, näiteks Timbeco Woodhouse ja KMT Prefab.

Joonis 13. Esimene Eesti ettevõtte poolt renoveeritud korterelamu Saksamaal: 5-korruseline 82 korteriga elamu Ludwigsfeldes (Matek 2026).

Eesti Rahvusvahelise Arengukoostöö Keskus ESTDEV on käivitanud mitu suuremahulist arengukoostööprojekti Ukraina ülesehituseks. 2024. aasta suvel käisid Tallinna Tehnikaülikooli teadlased koos ettevõtete Hades Geodeesia ja Aero Grupp esindajatega Žõtomõri linnas, et hinnata kolme korterelamu tehnilist seisukorda, teostada kohapeal vajalikud mõõdistused ja analüüsida kortermajade sobilikkust tervikrenoveerimiseks, sh kasutades eeltoodetud lisasoojustus-elemente. 2025. aastal paigaldati katsesein Žõtomõri Polütehnikumi ühiselamule ja alustati renoveerimislahenduse projekteerimisega.



Joonis 14. Tehnikaülikooli ja Eesti ettevõtete uurimisrühma (vasakul) ülesanne oli välja selgitada tehaselise renoveerimise võimalusi Ukraina ülesehitamisel. Katseseina ehitamine Žõtomõri Polütehnikumi ühiselamule (paremal).

Kokkuvõte

Eesti korterelamute renoveerimine on vältimatu, sest suur osa sõjajärgsest elamufondist on tehnilise eluea lõpus, energiamahukas ja halva sisekliimaga. Tehaselise renoveerimise pilootprojektid näitasid, et tervikrenoveerimine koos lisasoojustamise ja tehnosüsteemide uuendamisega annab suurima kasu.

Tehaselise renoveerimise jätkamiseks tuleb tagada püsiv tootearendus, paremad eeluuringud, standardimine, elanike kaasamine ja stabiilne riiklik tugi. Üksikhoone renoveerimiselt tuleb edasi liikuda naabruskonna renoveerimisele.

Eesti ühe suurima taristu – elamufondi – kasutusea pikendamiseks ja kaasajastamiseks tuleb lisaks omanikele panustada ka riiklikul tasandil finantsmeetmete ja selgete raamtingimustega ning kohaliku omavalitsuse tasandil projekteerimise ja renoveerimise halduskoormuse vähendamisega, ühtsete kontaktpunktide loomise ja elanike nõustamisega. Oluline on tagada ettevõtete investeerimis- ja arendusjulgus püsivate renoveerimise toetusmeetmete kaudu. Käsitööndus-like meetoditega ei ole võimalik ees ootava renoveerimislainega toime tulla. Tehaseline renoveerimine kiirendab protsesse, parandab kvaliteeti ja võimaldab mastaabiefekti korral vähendada ka maksumust.

Lisaks Eesti kodude kordategemisele võimaldab tehaseline renoveerimine Eesti ettevõtetel oma tooteid ja teenuseid eksportida ning sel on suur potentsiaal Ukraina sõjajärgsel ülesehitamisel.

VIITED

Alev, Ü., Vilja, E., Hirvelaan, J. jt. 2020. nZEB energy renovation with prefabricated elements. Baltic Broadcasting OÜ, https://youtu.be/pPvIf9-G290

Anmeri. 2025. Akadeemia tee 4 korterelamu laiendamine ja rekonstrueerimine. KRT180525,EP. Tallinn.

Arumägi, E., Kalamees, T. 2014. Analysis of energy economic renovation for historic wooden apartment buildings in cold climates. Applied Energy 115, 540–548.

DRIVE 0. 2019. Driving decarbonization of the EU building stock by enhancing a consumer centred and locally based circular renovation process. Grant agreement ID: 841850. H2020, CORDIS, European Commission, https://cordis.europa.eu/project/id/841850/results

EHR. 2010. Riiklik ehitisregister, www.ehr.ee

EKK. 1994. Mustamäe suurelamute konstruktsioonide seisukorra ekspertiisi ning renoveerimise ettepanekud. Tallinn.

EKP KK, ENSV MN. 1957. Abinõudest elamuehituse arendamiseks Eesti NSV-s, määrus nr. 337. Eesti NSV seadusandlike aktide kronoloogiline kogu (II). Eesti NSV Ministrite Nõukogu juures asuv Juriidiline Komisjon, 415–419.

EstKONSULT. 1996. Tallinna Mustamäe linnaosa elamute rekonstrueerimine. Tallinn.

EVS-EN ISO 13788. 2012. Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus. Kriitilise pinnaniiskuse ja elemendisisese kondenseerumise vältimine. Arvutusmeetodid. Tallinn: Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-13788-2012 (07.05.2026).

Hallik, J., Kalamees, T., Pikas, E. 2023. Airtightness of Estonian dwellings – median and base-values for heat loss estimation. – Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries NSB2023, Aalborg, Denmark on 12–14 June 2023, 8.

Hamburg, A., Kuusk, K., Mikola, A. jt. 2020. Realisation of energy performance targets of an old apartment building renovated to nZEB. Energy 194: 116874.

Hamburg, A., Paap, L., Hamburg, P. jt. 2010. Renoveeritud ja vähemalt üks aasta ekspluatatsioonis olnud elamute ehitusfüüsikalise olukorra uuring. Tallinn.

Heim, T., Ehrbar, D., Schwehr, P. 2014. Technical Report: Industrial Energy Efficient Retrofitting of Resident Buildings in Cold Climates. E2Rebuild.

Ilomets, S., Kuusk, K., Paap, L. jt. 2017. Impact of linear thermal bridges on thermal transmittance of renovated apartment buildings. Journal of Civil Engineering and Management 23(1), 96–104.

Juursoo, R. 1978. Ehituse arendust Eesti NSV-s aastail 1944–1955. Andmeallikas: Eesti NSV Teaduste akadeemia toimetised 27(2). Eesti NSV Oktoobrirevolutsiooni ja Sotsialistliku Ülesehituse Riiklik Keskarhiiv (f. R-10, nim. 6, s. 36, 1. 1; s. 40, 1. 6–B, 57), 118–131.

Kalamees, T. 2021. Kuidas paigaldada lift vanasse korterelamusse? Elamu 1, 20–21.

Kalamees, T., Ilomets, S., Liias, R. jt. 2012. Eesti eluasemefondi ehitustehniline seisukord – ajavahemikul 1990–2010 kasutusele võetud korterelamud. Tallinn.

Kalamees, T., Ilomets, S., Mikola, A. jt. 2013. Sõpruse pst 244, Tallinn, korterelamu renoveerimisjärgne uuring. Tallinna Tehnikaülikool, https://eis.ee/wp-content/uploads/2023/10/sopruse_pst_244_korterelamu_renoveerimisjargne_uuring.pdf?context=eluase-eestis

Kalamees, T., Ilomets, S., Orro, O. jt. 2011. Eesti eluasemefondi puitkorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga: uuringu lõpparuanne. Tallinna Tehnikaülikool, https://eis.ee/wp-content/uploads/2023/10/eesti-eluasemefondi-puitkorterelamute-ehitustehniline-seisukord-ning-prognoositav-eluiga.pdf

Kalamees, T., Kalbe, K., Kodi, G-M. jt. 2025. Moisture Safety Strategies for Renovations of a Roof with Prefabricated Additional Insulation Elements: A Whole Building Heat, Air, and Moisture Simulation Approach. – Berardi, U.

(ed). Multiphysics and Multiscale Building Physics, Singapore, 262–269. Springer Nature.

Kalamees, T., Kuusk, K., Pihelo, P. jt. 2026. Circular, low carbon, affordable, and innovative apartment building renovation concept. – Zilio, C., Busato, F., Mazzarella, L. jt (eds). Proceedings of the 15th REHVA HVAC World Congress – CLIMA 2025 , June 4–6, 2025. Milan, Italy, 1173–1183. Springer Nature Switzerland.

Kalamees, T., Kõiv, T-A., Liias, R. jt. 2010. Eesti eluasemefondi telliskorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga. Uuringu lõpparuanne.

Kalamees, T., Pihelo, P., Kuusk, K. 2017. Deep Energy Renovation of Old Concrete Apartment Building to nZEB by Using Wooden Modular Elements. − 23. Internationales Holzbau Forum, IHF, 6−8 December 2017, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 317−325, https://www.forum-holzbau.ch/pdf/56_IHF2017_Kalamees.pdf

Kalamees, T., Õiger, K., Kõiv, T-A. jt. 2009. Eesti eluasemefondi suurpaneel-korterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga.

Katsifaraki, A., Bueno, B., Kuhn, T. jt. 2014. Technical Report: Assessment of a Photovoltaic Thermal (PVT) Prefabricated Facade. Retrokit.

KredEx. 2008. BEEN näidisprojekt Eestis Paldiski mnt 171 Tallinn asuva korterelamu rekonstrueerimine. Aruanne. Tallinn, https://eis.ee/wp-content/uploads/2023/10/paldiski-mnt-171-tallinn-asuva-korterelamu-rekonstrueerimine-.pdf

Kuusk, K., Kalamees, T. 2016. Estonian Grant Scheme for Renovating Apartment Buildings. Energy Procedia 96. SBE16 Tallinn and Helsinki Conference; Build Green and Renovate Deep, 5–7 October 2016, Tallinn, Helsinki, 628–637.

Kuusk, K., Kalamees, T. 2016. Retrofit cost-effectiveness: Estonian apartment buildings. Building Research and Information 44(8), 1–15.

Kuusk, K., Kalamees, T., Link, S. jt. 2017. Case-study analysis of concrete large-panel apartment building at pre- and post low-budget energy-renovation. Journal of Civil Engineering and Management 23(1). Taylor & Francis, 67–75.

Kuusk, K., Kalamees, T., Maivel, M. 2014. Cost effectiveness of energy performance improvements in Estonian brick apartment buildings. Energy and Buildings 77, 313–322.

Kuusk, K., Kullerkupp, K., Pihelo, P. jt. 2021. Circularity concepts for offsite prefabricated energy renovation of apartment buildings. − The 8th International Buildings Physics Conference, Copenhagen, Denmark, 25–27 August 2021, https://www.ibpc2021.org/

Larsen, K. E., Lattke, F., Ott, S. jt. 2011. Surveying and digital workflow in energy performance retrofit projects using prefabricated elements. Automation in Construction 20(8). Elsevier, 999–1011.

Lasarte, N., Chica, J. A., Gomis, I. jt. 2017. Prefabricated solutions and automated and digital tools for the optimisation of a holistic energy refurbishment process. − 8th edition of the European Congress on Energy Efficiency and Sustainability in Architecture and Urbanism (EESAP8) and the 1st International Congress on Advanced Construction (CICA1), Donostia-San Sebastian, Spain.

Lattke, F., Larsen, K., Ott, S. jt. 2009. Technical Report: TES Energy Facade – prefabricated timber based building system for improving the energy efficiency of the building envelope. Woodwisdom Net.

Lehes, E. 2021. Korterelamute rekonstrueerimise mõju korteriomandite väärtusele – Tartu elamuseeria 1-317 ehk nn hruštšovkade näitel. Eesti Maaülikool, http://hdl.handle.net/10492/6759 (03.05.2026).

Loebus, S., Ott, S., Winter, S. 2014. The multifunctional TES-facade joint. − Aicher, S., Garrecht, H., Reinhardt, H-W. (eds). Materials and Joints in Timber Structures: Recent Developments of Technology. RILEM, 31–44.

Luht-Kallas, K., Pukk, R., Vogt, E. 2021. Fire safety solutions for wooden facades in the renovation of residential buildings up to 5 floors high. Estonian Woodhouse Association, https://media.voog.com/0000/0009/4426/files/Puitfassaadide%20tuleohutuslahendused%20kuni%205%20korruseliste%20eluhoonete%20renoveerimisl.pdf

Majandusministeerium. 1997. Paneelelamute renoveerimisest. Tallinn.

Matek. 2026. Ludwigsfelde renoveerimine, https://www.matek.ee/et/project/ludwigsfelde-renovation/

MEEFS. 2016. Multifunctional Energy Efficient Facade System for Building Retrofitting, https://cordis.europa.eu/project/id/285411

Miloni, R., Grischott, N., Zimmermann, M. jt. 2011. Building Renovation Case Studies IEA ECBCS Annex 50. Empa, Building Science and Technology Lab.

Mjörnell, K. 2011. Teknikupphandling : Rationell isolering av klimatskärmen på befintliga flerbostadshus. SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.

MKM, TalTech. 2020. Hoonete rekonstrueerimise pikaajaline strateegia. Tallinn, https://www.mkm.ee/media/155/download

MORE-CONNECT. 2014. Development and advanced prefabrication of innovative, multifunctional building envelope elements for modular retrofitting

and connecions. Grant agreement ID: 633477. H2020, CORDIS, European Commission, https://cordis.europa.eu/project/id/633477/reporting (10.05.2026).

Nigumann, E., Kalamees, T., Kuusk, K. jt. 2024. Circular Renovation of an Apartment Building with Prefabricated Additional Insulation Elements to Nearly Zero Energy Building. Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering 34(1), 1: 22–34.

Paalandi, K., Talvik, I., Tuhkanen, E. jt. 2026. Structural Capacity Assessment of Precast Concrete Sandwich Panels of Existing Multi-Storey Buildings. European Journal of Environmental and Civil Engineering. Epub ahead of print 2026. DOI: https://doi.org/10.1080/19648189.2026.2667492

Pihelo, P., Kalamees, T. 2016. The effect of thermal transmittance of building envelope and material selection of wind barrier on moisture safety of timber frame exterior wall. Journal of Building Engineering 6. Elsevier B.V., 29–38.

Pihelo, P., Kalamees, T. 2020. Development of prefabricated insulation elements for buildings with aerated autoclaved concrete walls. – Kurnitski, J., Kalamees, T. (eds). 12th Nordic Symposium on Building Physics (NSB 2020) , 7–9 September 2020. Tallinn, Estonia, June 2020, 18001. EDP Sciences, https://www.e3s-conferences.org/10.1051/e3sconf/202017218001

Pihelo, P., Kalamees, T. 2021. Commissioning of moisture safety of nZEB renovation with prefabricated timber frame insulation wall elements. Wood Material Science & Engineering 16(2), 110–117. Taylor & Francis.

Pihelo, P., Kalamees, T., Kuusk, K. 2017. nZEB Renovation with Prefabricated Modular Panels. Energy Procedia 132. Trondheim. 11–14 June 2017, 1006–1011. Elsevier B. V., Pihelo, P., Lelumees, M., Kalamees, T. 2016. Potential of Moisture Dry-out from Concrete Wall in Estonian Climate. – International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering. 22–24 August 2016, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, Lyngby, Denmark, 21–24 August, 2016, 289–298.

Pikas, E., Kuusk, K., Pihelo, P. jt. 2026. Prefabrication for housing retrofit: governance, innovation, and resident experience. Buildings and Cities, taasesitatud 01.05.2026.

Pukk, R., Vogt, E. 2023. Renovation of apartment buildings with factory-made facade elements. Estonian Woodhouse Association, https://woodhouse.ee/wp-content/uploads/2024/02/2023-12-20-korterelamute-renoveerimise-tuleohutusnouded.pdf

Sild, J. Juhendajad Paalandi, K., Kalamees, T. 2024. Lifti kavandamine ja rajamine tüüpsesse viiekorruselisse suurpaneelelamusse. Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool, https://digikogu.taltech.ee/et/item/7d02166f-3ba8-44ef-b36b-f9bb31126d48 (10.05.2026).

SmartEnCity. 2022. Projekt SmartEnCity – Tark Tartu, https://tarktartu.ee/avaleht/ulevaade/

SoftAcademy. 2024. Demonstrating a model of collaborative pre-fabricated reinvention of modernist districts into cozy living environments. European Urban Initiative, https://www.urban-initiative.eu/ia-cities/tallinn/about-projects (10.05.2026).

Statistikaamet. 2021. Eluruumid ja eluruumidega hooned – 2021 aasta rahva- ja eluruumide loendus, https://rahvaloendus.ee/et/tulemused/eluruumid-ja-eluruumidega-hooned

Zimmermann, M. 2012. Project Summary Report. Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings. IEA Annex 50.

TJA. 2013. 1960–1990 ehitatud korterelamute rõdude ja rõdude raudbetoonist eenduvate esipiirdepaneelide uuring. Tehnilise Järelevalve Amet.

TREA. 2022. SmartEnCity projekti tulemused: rekonstrueerimine, https://tarktartu.ee/wp-content/uploads/2022/06/SmartEnCity-tulemused-rekonstrueerimine.pdf

Treifeldt, A. 1959. Suurplokk-ehitusviisi rakendamise võimalused ja majandusliku efektiivsuse kujunemine Tallinna elamuehituses. Eesti NSV Teaduste Akadeemia toimetised VII(2).

Truu, M., Lihtmaa, L., Niinemägi, M. 2024. Revitalizing Modernist Districts: Neighbourhood Level Mass-Renovation with SOFTacademy Project. Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering 34(1), 8–21.

Veigel, P. 1962. Seinad pidagu sooja! Õhtuleht 78(2), 2.

Foto: Erlend Štaub

Targo Kalamees

Sündinud 18. juulil 1972 Tartus

Ehitusfüüsika professor ja praktiseeriv ehitusinsener enam kui 30-aastase kogemusega ehitusfüüsika, energiatõhususe, hoonete renoveerimise ja kliimakindla ehituse valdkonnas, kes ühendab teadus-, arendus- ja praktilise inseneritöö. Juhtinud arvukaid Euroopa Liidu ja Eesti teadusprojekte, panustanud ehitusstandardite väljatöötamisse ning nõustanud avaliku ja erasektori organisatsioone ehitusfüüsika, energiatõhusa ning kestliku ehituse küsimustes.

Haridus

1991 Tallinna Ehitus- ja Mehaanikatehnikum, insenerigeodeesia

1996 Tallinna Tehnikaülikool, ehituse õppesuuna inseneriõpe

1999 Tallinna Tehnikaülikool, ehituse õppesuuna magistriõpe (lisasoojustatud seinte niiskusrežiim)

2006 Tallinna Tehnikaülikool, ehitustehnika doktoriõpe (niiskus- ja soojuslikud kriteeriumid hoonete projekteerimiseks ja simulatsiooniks)

Töökohad ja ametid

2001–2002 Tampere Tehnikaülikool, teadur

1995–2003 Arhitektuuribüroo Kuup OÜ, QP Arhitektid OÜ, ehitusinsener

2003–2004 Helsingi Tehnikaülikooli kütte ja ventilatsiooni labor, teadur

2004	Tampere Tehnikaülikool, teadur
2004–2007	Helsingi Tehnikaülikooli kütte ja ventilatsiooni labor, teadur
2007–2010	Helsingi Tehnikaülikool, teadur (järeldoktorantuur)
2015	Lundi Ülikool, külalisteadur
2009	Tallinna Tehnikaülikool, ehitusfüüsika professor

Tunnustused

2012	REHVA fellow – Euroopa kütte, ventilatsiooni ja õhu konditsioneerimise autasu silmapaistva töö eest hoonete energiatõhususe ja sisekliima alal
2015	Tallinna Tehnikaülikooli auhind ettevõtte-ülikooli koostööprojektile
2017	Tallinna Tehnikaülikooli ehituse ja arhitektuuri instituudi parim doktoritöö juhendaja
2017	Tallinna energiategu 2017 – Tallinna Akadeemia tee 5a tervikrenoveerimine liginullenergiahooneks
2018	Eesti puitmaja sõber – Eesti Puitmajaliidu tunnustus
2019	Tallinna Tehnikaülikooli aasta teadlane
2022	aasta ehitusinseneri tiitel – Eesti Ehitusinseneride Liidu tunnustus
2025	Tallinna Tehnikaülikooli parim doktoritöö juhendaja
2026	riiklik teaduspreemia „Elamufondi tervikrenoveerimine ja niiskusturvalisuse tagamine inimeste elukvaliteedi parandamiseks ja hoonete keskkonnamõju vähendamiseks“

https://doi.org/10.3176/evp.2026.06

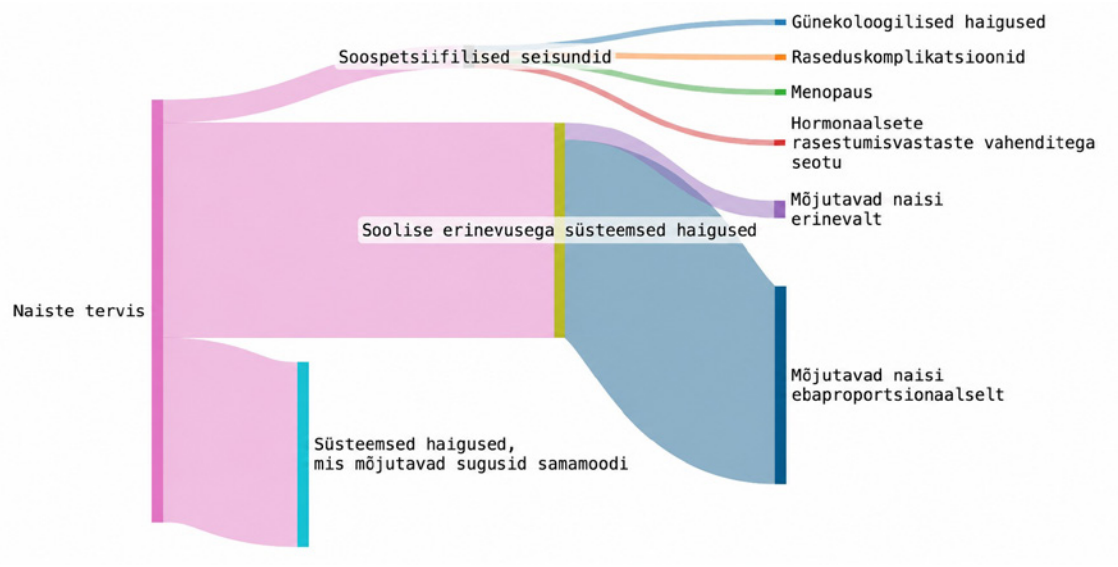
NAISTE TERVISE GENEETIKA

Triin Laisk (Tartu Ülikool)

Teaduspreemia arsti- ja terviseteaduste valdkonnas tööde tsükli „Naiste tervise geneetika“ eest

Naiste tervis on laiem mõiste, kui esmapilgul paistab

Naiste tervisest rääkides mõeldakse sageli eelkõige naistehaigustele või viljakusele/viljatusele. Tegelikult on see aga märksa laiem mõiste, mis hõlmab nii reproduktiivtervist kui ka seda, kuidas paljud levinud haigused naistel avalduvad ja kulgevad (joonis 1).



Joonis 1. Naiste tervise erinevad komponendid. Naiste tervise alla liigituvad nii soospetsiifilised seisundid ja diagnoosid (näiteks günekoloogilised haigused ning menopausi ja hormonaalsete rasestumisvastaste vahenditega seotu) kui süsteemsed haigused. Süsteemsete haiguste seas saame eristada nii neid, mis mõjutavad sugusid samaväärselt (näiteks infektsioonid), kui ka neid, mis mõjutavad naisi erinevalt (teatud südamehaigused) või ebaproportsionaalselt (autoimmuunhaigused, peavalu, depressioon).

Klassikalises vaates liigituvad naiste tervise alla tõepoolest erinevad naistehaigused või seisundid, mis esinevad ainult naistel. Neist levinuimad ja enim tuntud on näiteks endometrioos[1] ja polüendokriinne metaboolne ovariaalne sündroom, varem tuntud kui polütsüstiliste munasarjade sündroom[2], mis kombineerituna mõjutavad ligikaudu 20% naistest. Kuigi palju räägitakse naiste unikaalsest võimest rasestuda ning üheksa kuu jooksul loote arengut toetada, jääb tihti mainimata tõsiasi, et rasedus on naise kehale suur stress ning naiste tervist mõjutavad oluliselt erinevad sagedased raseduskomplikatsioonid, näiteks raseduse katkemine, emakaväline rasedus, rasedusaegne diabeet ning preeklampsia. Naiste reproduktiivse ea lõppu märgib menopaus, mis on küll loomulik osa reproduktiivsest vananemisest, kuid tähendab siiski 80–90% naistest erinevaid üleminekuea vaevuseid, mis mõjutavad oluliselt naiste heaolu, töövõimet ning tervist laiemalt. Eesti naiste tervise uuringus nimetas ⅔ üleminekueas või menopausis vastajatest kuumahoogusid ning öist higistamist ning valdav enamik vastajatest teatas mitmest erinevast menopausi sümptomist (Part jt, 2025). Kogu maailmas saab menopausiga seotud sümptomite mõju naiste vähenenud töövõimele aga mõõta miljardites dollarites.[3]

Naiste tervis ei piirdu ainult naistele omaste haigustega. Üha enam on selgunud, et ka paljud levinud haigused, nagu südame-veresoonkonna või autoimmuunhaigused, erinevad naistel nii esinemissageduse kui ka avaldumisviisi poolest. Näiteks esineb mitmeid autoimmuunhaigusi naistel sagedamini, samas kui südamehaiguste sümptomid võivad naistel olla teistsugused kui meestel, mis muudab nende õigeaegse diagnoosimise keerulisemaks. Miks selline sooline erinevus esineb, päris täpselt veel ei teata, kuid oma roll on arvatavasti hormoonidel, käitumuslikel erinevustel, geneetikal ning sotsiaalsetel teguritel.

Ükskõik millise prisma läbi naiste tervist ka ei vaatleks, järjest selgemaks on saanud tõsiasi, et meie teadmised naiste terviseprobleemide kohta on häbiväärselt kesised. See omakorda mõjutab teaduse ja meditsiinisüsteemi võimekust haigusi ennetada, diagnoosida või efektiivselt ravida. Viimase kümne aasta jooksul oleme oma töörühmaga püüdnud seda lünka täita, uurides naiste terviseprobleemide bioloogilist tausta suurte biopankade andmete ja geneetiliste seoseuuringute abil.

Kuidas saab geneetika aidata naiste tervist paremini mõista?

Geneetika valdkonna ning metoodika areng on oluliselt muutnud meie arusaama haiguste tekkest. Kui varem keskenduti üksikutele geenidele, siis tänapäeval võimaldavad suured biopangad ja rahvastikupõhised andmestikud uurida sadu tuhandeid inimesi korraga ning leida seoseid geneetiliste variantide ja haiguste vahel.

---

1 Endometrioos on haigus, mille puhul emakaõõnt vooderdav limaskest (endomeetrium) kasvab ja toimib väljaspool emakat – toim.

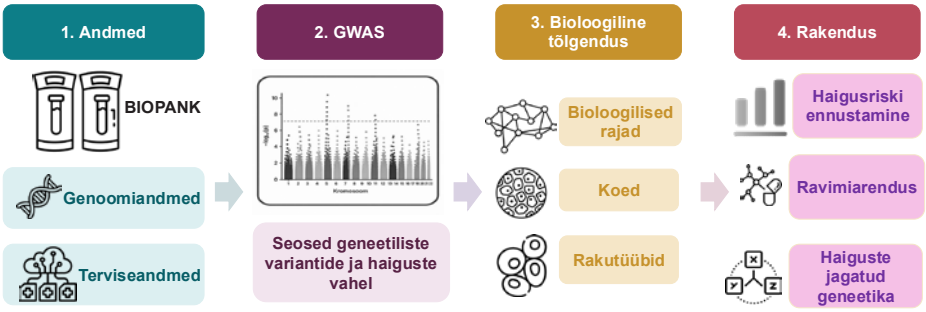
2 Polütsüstiliste munasarjade sündroom on hormonaalne häire, mis võib avalduda ebaregulaarsete menstruatsioonide näol regulaarsete ovulatsioonide puudumise tõttu – toim.

3 https://impactsofmenopause.com/

Iga inimese genoom on suuresti sarnane, kuid sisaldab miljoneid väikeseid erinevusi ehk geneetilisi variante. Need variandid on loomulik osa inimestevahelisest mitmekesisusest ning aitavad seletada, miks inimesed erinevad nii oma välimuse, omaduste kui ka haigusriskide poolest. Enamasti ei põhjusta üksik geneetiline variant haigust, vaid mõjutab riski väga väikesel määral. Geneetiliste haiguste puhul eristatakse monogeenseid ja komplekshaigusi. Monogeensed haigused on põhjustatud ühe geeni muutusest ning selliste muutuste mõju on tavaliselt tugev – näiteks võivad need viia haiguse tekkeni peaaegu vältimatult. Monogeensed haigused on näiteks tsüstiline fibroos, teatud perekondlikud rinnavähivormid ning perekondlik hüperkolesteroleemia[4].

Enamik levinud haigusi, sealhulgas paljud naiste tervisega seotud seisundid, kuuluvad aga komplekshaiguste hulka. See tähendab, et nende kujunemisel mängivad rolli paljud erinevad geneetilised variandid koos keskkonna- ja elustiiliteguritega. Iga üksiku variandi mõju on väike, kuid nende koosmõju võib märkimisväärselt mõjutada haigestumise riski.

Selliste keerukate seoste uurimiseks kasutatakse ülegenoomseid seoseanalüüse (*genome-wide association study*, GWAS). Nende abil on võimalik tuvastada geneetilisi riskitegureid, mis mõjutavad nii haiguste tekkeriski kui ka nende kulgu (joonis 2). Oluline on aga see, et geneetilised seosed ei anna infot ainult haiguse riski kohta, vaid aitavad ka mõista selle bioloogilist tausta. Kui mingi geneetiline variant on GWAS-i analüüsis haigusega seotud, viitab see sellele, et vastav genoomi piirkond ja seal paiknevad geenid on seotud haiguse tekkemehhanismidega. Koondades selliseid leide, on võimalik kaardistada bioloogilisi radu, mis haigust mõjutavad, ning tuvastada, millistes kudedes ja rakutüüpides need geenid on avaldunud. See omakorda annab meile väärtuslikku infot haiguse tekke seisukohast oluliste kudede kohta.



Joonis 2. Ülegenoomne seoseanalüüs (GWAS) otsib geneetiliste variantide ja diagnooside vahelisi seoseid. Leitud piirkonnad aitavad mõista haiguste bioloogilist tausta, mis omakorda on hea sisend ravimiarenduseks, haigusriskide ennustamiseks ning haigustevahelise jagatud geneetika mõistmiseks.

[4] Perekondlik hüperkolesteroleemia on pärilik haigus, mis põhjustab äärmiselt kõrget kolesteroolitaset sünnist alates – toim.

Sellised teadmised on olulised ka ravimiarenduses. Geneetiliste seoste abil tuvastatud bioloogilised rajad aitavad leida uusi ravisihtmärke ning suurendavad tõenäosust, et arendatavad ravimid mõjutavad tegelikult haiguse aluseks olevaid mehhanisme. On näidatud, et geneetilistele leidudele tuginevad ravisihtmärgid on suurema tõenäosusega edukad ka kliinilistes uuringutes (Minikel jt, 2024).

Lisaks üksikute haiguste uurimisele võimaldavad nn GWAS-i jätkuanalüüsid uurida, mil määral erinevad haigused jagavad omavahel geneetilist tausta. Selliste analüüside abil saab kaardistada haigustevahelisi seoseid ning tuvastada ühiseid riskitegureid. See aitab paremini mõista kaasuvate haiguste mustreid, näiteks miks teatud seisundid esinevad sageli koos, ning eristada, millised riskitegurid võivad olla modifitseeritavad ja seega potentsiaalselt ennetatavad.

Lõpuks võimaldab paljude väikese mõjuga geneetiliste variantide kombineerimine arvutada individuaalseid geneetilisi riskiskoore. Need riskiskoorid koondavad informatsiooni kogu genoomi ulatuses ning võimaldavad hinnata inimese eelsoodumust teatud haiguste tekkeks. Kuigi sellised mudelid ei ütle meile sajaprotsendilise kindlusega, kas inimene haigestub või mitte, võivad need aidata tuvastada kõrgema riskiga inimesi ning suunata ennetustegevusi ja sõeluuringuid tõhusamalt.

Meie töörühma keskne lähenemine on olnud kasutada biopankade suuri andmekogusid, mis ühendavad geneetilise info detailsete terviseandmetega. See võimaldab uurida korraga nii erinevaid haigusi kui ka nende omavahelisi seoseid ning otsida ühiseid bioloogilisi mehhanisme.

Naistehaiguste geneetiline atlas

Töö olulisemaid tulemusi on olnud ulatuslik analüüs, mis kaardistas geneetilised ja fenotüübilised seosed naiste reproduktiivtervise 42 erineva diagnoosi vahel (Pujol Gualdo jt, 2025). Tegemist on seni ühe kõige terviklikuma lähenemisega, kus naiste tervist vaadeldakse mitte üksikute haiguste, vaid omavahel seotud süsteemina. Töö eesmärk oli näidata, kuidas genoomse epidemioloogia[5] meetoditega on võimalik geneetikat kasutada naiste tervise paremaks mõistmiseks.

Uuring põhines ligi 300 000 naise andmetel Eesti geenivaramust ja Soome FinnGen biopangast. Suur andmestik võimaldas esmakordselt võrrelda väga erinevaid reproduktiivtervisega seotud diagnoose alates günekoloogilistest haigustest ja hormonaalsetest häiretest kuni raseduse ja sünnitusega seotud seisunditeni.

Geneetiliste seoseanalüüside tulemusena tuvastasime kokku 195 genoomi piirkonda, mis on seotud naiste tervise erinevate diagnoosidega. Seejuures oli märkimisväärne, et suur osa neist leidudest oli varasemates uuringutes kirjeldamata, mis peegeldab hästi, kui alauuritud see valdkond seni olnud on. Samas

[5] Genoomne epidemioloogia on teadusharu, mis tegeleb haiguste geneetiliste riskifaktorite kaardistamisega.

annavad uued leiud uut ja põnevat infot uuritud haiguste bioloogilise tausta kohta ning näiteks emakaväliste raseduste (Pujol Gualdo jt, 2023) ning emaka limaskesta polüüpide (Pathare jt, 2025) leiud oleme ka eraldi publitseerinud.

Leidsime, et enamikul uuritud haigustest on mõõdetav päritavus[6], kuid selle ulatus varieerub suuresti. Näiteks ainevahetusliku komponendiga seisunditel, nagu polütsüstiliste munasarjade sündroom või rasedusaegne diabeet, oli päritavus suurem kui põletiku või infektsioonidega seotud seisunditel. Praegu on endiselt vastuseta küsimus, miks on haigustel ja tunnustel, mis mõjutavad naiste viljakust või elussünni tõenäosust, sageli arvestatav geneetiline komponent. Intuitiivselt võiks eeldada, et kui mingi geneetiline variant vähendab järglaste saamise tõenäosust, siis peaks looduslik valik selle populatsioonist järk-järgult eemaldama. Tegelikkuses see aga sageli nii ei ole. Üks võimalikke selgitusi on asjaolu, et paljud reproduktiivtervist mõjutavad haigused avaldavad viljakusele mõju suhteliselt mõõdukalt, mistõttu nende mõju evolutsioonilisele valikule jääb piiratuks. Samuti võivad samad geneetilised variandid olla teatud kontekstis hoopis kasulikud, näiteks mõjutada positiivselt ainevahetust, immuunvastust või mõnda muud bioloogilist omadust. Nähtust, kus üks ja sama geneetiline variant võib samal ajal suurendada nii haiguse riski kui anda mõne teise evolutsioonilise eelise, nimetatakse antagonistlikuks pleiotroopiaks.

Mitme diagnoosi samaaegne analüüs võimaldas ka haigustevaheliste geneetiliste seoste kaardistamist. Leidsime, et paljud näiliselt eraldiseisvad diagnoosid jagavad omavahel geneetilist tausta ning moodustavad selgeid mustreid. Sellised seosed viitavad ühistele bioloogilistele mehhanismidele ning aitavad selgitada, miks teatud haigused esinevad sageli koos. Järgmise sammuna kaardistasime nn pleiotroopsed geenid ehk geenid, mis mõjutavad korraga mitut erinevat haigust. Oma analüüsis leidsime mitmeid selliseid keskseid geene, mis on seotud näiteks suguteede arenguga (*WNT4*, *PAX8*, *WT1*), hormonaalse regulatsiooniga (nt *FSHB*, *GREB1*, *SYNE1*/*ESR1*) või munasarjafolliikulite arenguga (*CHEK2*). Need leiud viitavad, et suguteede areng, hormonaalne regulatsioon ja munarakkude tsükliline küpsemine on naise tervise seisukohast kesksed protsessid, mille häired võivad avalduda erinevate diagnoosidena.

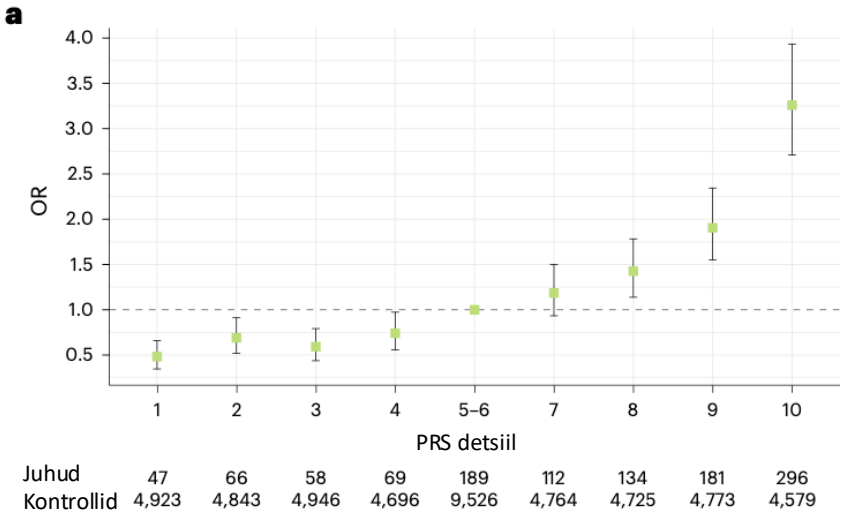
Kasutasime oma analüüsides Eesti ja Soome andmeid. Soome ning väiksemal määral ka Eesti populatsioonidel on unikaalne geneetiline ajalugu, mis tähendab, et nendes valimites esineb nn populatsioonispetsiifilisi geneetilisi variante, mis teistes Euroopa populatsioonides on kas väga harvad või puuduvad sootuks. Leidsime 17 sellist populatsioonispetsiifilist seost, näiteks emaka lihaskesta healoomuliste kasvajate ehk müoomide ja geeni *MYH11* vahel. *MYH11* kodeerib silelihaste müosiini valku, mida toodetakse ka müoomi rakkudes ning mida on seostatud silelihasrakkude proliferatsiooni ning I tüüpi kollageeni, insuliinilaadse kasvufaktor 1 ja fibronektiini tootmisega. Sellised leiud aitavad avastada uusi bioloogilisi mehhanisme, mis võivad olla olulised ka laiemalt, kuid jäävad

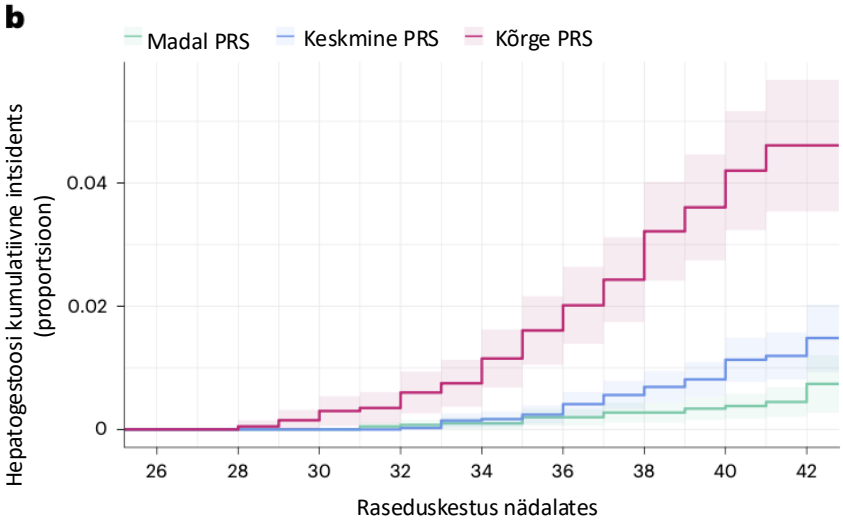
[6] Päritavus peegeldab, kui suur osa haigusriski varieeruvusest populatsioonis on seotud inimestevaheliste geneetiliste erinevustega.

teistes populatsioonides märkamatuks (Kurki jt, 2023; Tyrmi, Arffman, Pujol Gualdo jt, 2022).

Oma tööga illustreerisime ka geneetiliste seoseanalüüside rakendamist haigusriskide ennustamiseks. Selleks kasutasime näitena üht rasedusaegset maksahaigust nimega hepatogestoos, mis on õnneks suhteliselt harva esinev, kuid kliiniliselt oluline seisund, mis võib mõjutada nii ema kui ka lapse tervist. Hepatogestoosile on iseloomulik maksasiseste sapiteede sulgus, mis avaldub tavaliselt raseduse III trimestril tugeva nahasügelusena. Haiguse täpne tekkepõhjus ei ole teada, kuid see esineb perekonniti, mis viitab geneetilisele taustale. Kuna oma analüüsides leidsime, et hepatogestoosi geneetiline komponent on suhteliselt tugev, võimaldas see luua polügeense riskiskoori (PRS), mis hindab individuaalset haigestumisriski geneetilise info põhjal. Analüüs näitas, et kõrgeima geneetilise riskiga naistel oli haiguse esinemissagedus ligikaudu kuus korda suurem võrreldes madalaima riskigrupiga (joonis 3). See demonstreerib hästi, kuidas paljude väikese mõjuga geneetiliste variantide kombineerimine võib anda kliiniliselt olulist informatsiooni. Selline käsitlus loob võimaluse tulevikus tuvastada kõrgema riskiga naisi juba enne sümptomite teket ning suunata neid täpsemale jälgimisele või ennetavatele sekkumistele. Kuigi geneetilised riskiskoorid ei ole veel igapäevases kliinilises kasutuses, näitavad need üht võimalikku rada, kuidas geneetilised uuringud võivad liikuda baasteadusest praktiliste rakendusteni.

Kokkuvõttes loob selline „geneetiline atlas“ uue raamistiku naiste tervise mõistmiseks. Selle asemel, et käsitleda haigusi eraldi, võimaldab see näha nendevahelisi seoseid, ühiseid mehhanisme ja bioloogilisi mustreid. See omakorda loob aluse täpsemaks diagnostikaks, parameteks riskimudeliteks ning uute ravivõimaluste arendamiseks.





Joonis 3. Geneetiline riskiskoor hepatogestoosi ennustamiseks. a) Hepatogestoosi šansside suhe (OR) geneetilise riski (PRS) detsiilides (1 – madalaim geneetiline risk, 10 – kõrgeim geneetiline risk). b) Hepatogestoosi kumulatiivne intsidents geneetilise riski (PRS) gruppides. Madala PRS-i rühma kuuluvad esimese ja teise kvintiili indiviidid (madalaimad 40% PRS väärtustest); keskmise PRS-i rühma moodustavad kolmanda ja neljanda kvintiili indiviidid (keskmised 40%); ning kõrge PRS-rühma kuuluvad viienda kvintiili indiviidid (kõrgeimad 20% PRS väärtustest) (modifitseeritud Pujol Gulado jt, 2025 põhjal).

Viljatus

Viljatus mõjutab hinnanguliselt iga kuuendat paari kogu maailmas. Kuigi viljatuse põhjused võivad olla väga erinevad, varieerudes hormonaalsetest häiretest kuni anatoomiliste või keskkonnateguriteni, jääb märkimisväärsel osal juhtudest täpne põhjus teadmata. See peegeldab hästi, kui piiratud on meie arusaam viljakust mõjutavatest bioloogilistest mehhanismidest.

Laiaulatuslikus rahvusvahelises koostöös (Venkatest jt, 2025) viisime läbi seni ühe mahukaima geneetilise uuringu viljatuse põhjuste selgitamiseks, kasutades üle 700 000 inimese andmeid. Analüüs hõlmas nii naiste kui meeste viljatust ning võimaldas eraldi vaadelda erinevaid viljatuse alaliike, näiteks ovulatsioonihäiretest tingitud või teadmata põhjusega viljatust.

Uuringu tulemusena tuvastati 25 geneetilist riskilookust, mis on seotud viljatusega. Mitmed neist on seotud geenidega, millel on oluline roll naiste reproduktiivsüsteemi arengus ja hormonaalses regulatsioonis. Näiteks leidsime seoseid geenidega, mis osalevad munasarjade arengus (nt *WNT4*) või hormoonide (*INHBB*) regulatsioonis, mis kontrollivad ovulatsiooni. Ühe huvitava leiuna näitasime geeni *EBAG9* seost naise viljatusega. Arvatakse, et *EBAG9* reguleerib

rasedusaegset immuunvastust ning selle häiritud funktsioon põhjustab varase raseduse katkemise (Ohshima jt, 2001; Wicherek jt, 2005). Samas reguleerib *EBAG9* ka immuunvastust infektsioonidele (Rüder jt, 2009), mis võib seletada, miks viljatusega seotud geneetilised variandid populatsioonis püsivad, ning on heaks näiteks tasakaalustavast selektsioonist.

Samuti näitas uuring, et viljatus jagab geneetilist tausta mitmete teiste naistehaigustega. Leidsime tugeva geneetilise seose endometrioosi ja seletamatu viljatuse vahel, mis viitab sellele, et osa nn seletamatu viljatuse juhtudest võib tegelikult olla seotud diagnoosimata endometrioosiga. Huvitaval kombel ei leidnud me tugevat geneetilist kattuvust viljatuse ja näiteks ülekaalu või suguhormoonide taseme geneetika vahel. See viitab sellele, et kuigi need tegurid on kliiniliselt olulised, ei pruugi nende mõju viljakusele olla otseselt geneetiliselt vahendatud või on tegemist keerukamate kaudsete mehhanismidega.

Lisaks tavalistele geneetilistele variantidele uurisime ka haruldasi geneetilisi muutusi, mille mõju võib olla tugevam. Need analüüsid näitasid, et teatud haruldased variandid, mis mõjutavad näiteks testosterooni taset, võivad suurendada viljatuse riski. Seega koosneb viljatuse geneetiline taust nii paljudest väikese mõjuga variantidest kui ka üksikutest tugevama mõjuga muutustest.

Kokkuvõttes annab töö tervikliku ülevaate viljatuse geneetilisest arhitektuurist ning näitab, et tegemist on äärmiselt heterogeense seisundiga. Selline teadmine on oluline, sest see viitab vajadusele liikuda viljatuse käsitlemisel ühtsest lähenemisest personaalsemate strateegiate suunas, mis arvestavad konkreetse patsiendi bioloogilist tausta.

Emakakaelavähk

Emakakaelavähk on üks sagedasemaid naiste vähkkasvajaid maailmas ning selle teke on tihedalt seotud kõrge riskiga inimese papilloomiviiruse (*human papillomavirus*, HPV) püsiva infektsiooniga. Kuigi HPV nakkus on väga levinud, areneb vähk välja vaid väikesel osal naistest, mis viitab sellele, et lisaks keskkonnateguritele mängivad olulist rolli ka inimestevahelised geneetilised erinevused.

Meie töörühm on panustanud emakakaelavähi geneetiliste riskitegurite ning bioloogiliste mehhanismide kaardistamisse. Suur ülegenoomne seoseanalüüs võimaldas analüüsida nii emakakaelavähki kui ka sellega seotud varasemaid seisundeid, nagu emakakaela düsplaasia, põletik ja epiteeli muutused (Koel jt, 2023). Need analüüsid näitasid, et emakakaelavähi risk on seotud mitmete bioloogiliste protsessidega, sealhulgas reproduktiivtrakti arenguga, immuunvastusega ning rakkude kasvu ja programmeeritud rakusurma regulatsiooniga. Eriti oluline roll ilmnes immuunsüsteemiga seotud geenidel, sealhulgas *HLA* (*human leukocyte antigen*) piirkonnas, mis mõjutab organismi võimet HPV infektsioonile reageerida. See aitab selgitada, miks mõnel naisel viirus elimineeritakse, samas kui teistel kujuneb välja püsiv infektsioon ja sellest tulenevalt vähk.

Lisaks emakakaelavähi üksikute geneetiliste riskitegurite tuvastamisele oleme arendanud ka geneetilisi riskimudeleid (Koel jt, 2023; Tisler jt, 2023). PRS-i abil on võimalik hinnata naise individuaalset eelsoodumust emakakaelavähi tekkeks, kombineerides paljude geneetiliste variantide väikeseid mõjusid üheks terviknäitajaks. Meie analüüsid näitasid, et kõrgema geneetilise riskiga naised jõuavad sama haigusriskini märgatavalt varem kui madalama riskiga naised. Näiteks võivad kõrgeima riskiga naised saavutada keskmise populatsiooni riski taseme kuni kümnendi võrra varem. Samuti oli geneetiline risk seotud mitte ainult vähiga, vaid ka HPV infektsiooni ja selle eelstaadiumite, näiteks emakakaela düsplaasia tekkega. Sellised tulemused näitavad, et geneetiline info võiks täiendada olemasolevaid sõeluuringuprogramme. Näiteks võimaldaks riskipõhine lähenemine suunata intensiivsemat jälgimist naistele, kellel on suurem geneetiline eelsoodumus, ning vähendada ebavajalikke uuringuid madalama riskiga rühmades.

Kokkuvõttes aitavad need uuringud paremini mõista emakakaelavähi bioloogilist tausta ning loovad aluse personaalsematele ennetus- ja sõelumisstrateegiatele, mis arvestavad nii geneetilisi kui ka keskkonnategureid.

Rahvusvaheline koostöö

Geneetiline epidemioloogia on valdkond, kus suuremahuline rahvusvaheline koostöö on kesksel kohal. Valimite kombineerimine võimaldab saavutada andmemahte, mis oleks ainult ühe biopanga või kohordi andmeid analüüsides kättesaamatud ja nii on sadade tuhandete või isegi miljonite inimeste geeniandmeid kombineerivad uuringud selles valdkonnas igapäevane tegelikkus. Ka naiste tervise alal moodustavad suure osa meie tööst nii meie enda kui ka kolleegide algatatud koostööprojektid.

Oleme panustanud mitmete rasedusega seotud tunnuste ja rasedusaegsete tüsistuste geneetika uuringutesse. Oma analüüsidega oleme andnud panuse ka raseduse kestvuse geneetilise regulatsiooni uurimisse (Solé-Navais, 2023), kus kirjeldati geneetilisi tegureid, mis mõjutavad raseduse pikkust. Need tulemused aitavad paremini mõista enneaegse sünnituse bioloogilisi mehhanisme. Samal aastal avaldati ka kaks uuringut (Honigberg jt, 2023; Tyrmi jt, 2023), mis käsitlesid preeklampsia ja rasedusaegse hüpertensiooni geneetilisi mehhanisme. Preeklampsia on üks sagedasemaid raseduskomplikatsioone (esineb umbes 8% rasedatel), mida iseloomustab tõusnud vererõhk ning ema uriinis leitav valk, mis näitab neerude töö halvenemist. Preeklampsia võib põhjustada tõsiseid tüsistusi nii emale kui lapsele, seetõttu on oluline tuvastada riskirasedaid juba varakult. Honigberg jt ning Tyrmi jt uuringud näitasid, et rasedusaegsed südame-veresoonkonna komplikatsioonid jagavad osaliselt geneetilist tausta nii-öelda klassikaliste südame-veresoonkonna haigustega, mis aitab paremini mõista ka rasedusaegsete probleemide pikaajalist mõju naiste tervisele.

Lisaks oleme uurinud ka mitmete levinud günekoloogiliste haiguste geneetilist tausta ja haigustevahelisi seoseid. Näiteks võimaldas mahukas rahvusvaheline uuring tuvastada uusi emaka limaskesta vähi geneetilisi riskipiirkondi ning näitas, et geen *NAV3* võib toimida kasvaja arengut pidurdava geenina (Ramachandran jt, 2025). Samuti on meie tööd näidanud, et vererohke menstruatsioon jagab geneetilist tausta mitmete teiste naistehaigustega, sealhulgas endometrioosi ja emakamüoomidega (Thibord jt, 2025). Praegu käimasolevad koostööprojektid keskenduvad näiteks raseduskatkemiste, sünnitusjärgse depressiooni ning menopausiga seotud kuumahoogude geneetikale.

Lisaks klassikalistele geneetilistele seoseuuringutele oleme panustanud ka uute metoodiliste käsitluste arendamisse. Koostöös Oxfordi Ülikooli professori Christoffer Nellakeri uurimisrühmaga arendati masinõppepõhine meetod naiste reproduktiivtrakti kudede, eelkõige platsenta histoloogiliste preparaatide analüüsiks. Selle koostöö tulemusena avaldati ajakirjas Nature Communications metoodikaartikkel (Vanea jt, 2024), milles kirjeldatud lahendus võimaldab histoloogiliste kujutiste automatiseeritud ja standardiseeritud analüüsi. See avab uusi võimalusi suurte koepõhiste andmestike kasutamiseks ning aitab siduda morfoloogilisi tunnuseid geneetiliste ja kliiniliste andmetega. Jätkuprojektina avaldasime hiljuti uuringu, kus arendatud metoodikat rakendati raseduskomplikatsioonidega seotud platsenta muutuste iseloomustamiseks (Walker jt, 2026).

Tulevikuperspektiivid

Kuigi viimase kümnendi jooksul on naiste tervise geneetika teinud märkimisväärse arenguhüppe, on see valdkond endiselt mitmes mõttes alles algusjärgus. Rahvusvahelised analüüsid näitavad, et naised on keskmiselt umbes veerandi võrra rohkem oma elust kehvemas tervislikus seisundis kui mehed.[7] See peegeldab sügavat teaduslikku ja süsteemset lõhet, millel on mõju nii üksikisiku elukvaliteedile kui ka ühiskonna toimimisele laiemalt.

Üks kesksetest probleemidest on see, et paljud naiste tervise seisukohalt olulised teemad on endiselt alauuritud. See puudutab eriti hormoonide dünaamikaga seotud seisundeid, mis mõjutavad küll suurt osa naistest, kuid ei ole ajalooliselt olnud teaduse fookuses, sealhulgas näiteks premenstruaalne sündroom (PMS), perimenopaus ja menopausiga seotud muutused. Kuigi need teemad on viimastel aastatel pälvinud rohkem tähelepanu, eriti sotsiaalmeedias, on nende bioloogiline taust ja individuaalne varieeruvus endiselt halvasti mõistetud ning sageli ka halvasti mõõdetud. Ka rahvusvahelised andmestikud ei kajasta adekvaatselt eeltoodud seisundite tegelikku levimust ja mõju.[8] Nende küsimustega tegelemiseks alustame uut uurimissuunda Euroopa Teadusnõukogu (ERC) toel, mille eesmärk on siduda geneetilised, hormonaalsed ja kliinilised andmed, et paremini mõista

[7] https://www.weforum.org/publications/closing-the-women-s-health-gap-a-1-trillion-opportunity-to-improve-lives-and-economies/

[8] https://www.weforum.org/publications/closing-the-women-s-health-gap-a-1-trillion-opportunity-to-improve-lives-and-economies/

naiste hormonaalset tundlikkust kogu elukaare jooksul. See võimaldab liikuda sümptomipõhiselt kirjelduselt mehhanismipõhise arusaama suunas.

Teine oluline arengusuund on levinud haiguste sooliste erinevuste parem mõistmine. Üha enam on selgunud, et suur osa naiste tervise koormusest tuleneb mitte ainult naistele omastest haigustest, vaid ka seisunditest, mis mõjutavad naisi kas sagedamini või teistmoodi kui mehi (joonis 1). See puudutab näiteks südameveresoonkonna ja autoimmuunhaigusi ning vaimse tervise häireid. Tulevikus on oluline arendada riskimudeleid, mis arvestavad neid erinevusi süsteemselt, võimaldades täpsemat haigusriskide ennustamist. Just selliste riskimudelite arendamisega tegeleme Personaalmeditsiini tippkeskuse[9] projektide raames.

Kolmandaks on kriitilise tähtsusega andmelünkade vähendamine. Naiste tervisega seotud haiguskoormus on sageli alahinnatud, kuna paljusid seisundeid ei diagnoosita õigeaegselt või ei kajastu need olemasolevates andmestikes piisavalt täpselt.[10] See omakorda mõjutab teaduse prioriteete, investeeringuid ja ravivõimaluste arendamist. Tulevikus on oluline süsteemselt koguda ja analüüsida soopõhiseid andmeid ning siduda need geneetiliste uuringutega.

Lõpuks on naiste tervise uurimine üha enam seotud ka laiemate ühiskondlike ja majanduslike küsimustega. Naiste tervisel on otsene mõju haridusele, töövõimele ja majanduslikule produktiivsusele ning selle parandamine võib avaldada märkimisväärset mõju ühiskonna toimimisele tervikuna. Seetõttu ei ole tegemist ainult meditsiinilise, vaid ka strateegilise teadusvaldkonnaga.

Tänusõnad

Siin kirjeldatud teadustöö ei oleks saanud teoks Tartu Ülikooli genoomika instituudi bioinformaatika ja genoomse epidemioloogia töörühmata. On olnud suur rõõm töötada koos niivõrd toredate ja andekate inimestega. Eriline tänu kuulub professor Reedik Mägile, kellega koos eelmainitud töörühma juhime ning kelle teaduslik mõtteviis ja koostöövalmidus on kujundanud väga olulisel määral ka minu enda teadustööd. Suurimaks rõõmuks teadlase töös pean doktorantide juhendamist ning võimalust kõrvalt näha, kuidas noortest teadlastest kujunevad iseseisvad uurijad oma ideede ja teadussuundadega. Eespool kirjeldatud uuringutes on olnud väga oluline roll meie töörühma endistel ja praegustel doktorantidel – Natàlia Pujol Gualdol, Jelisaveta Džigurskil ja Valentina Rukinsil, kelle töö, pühendumus ja teaduslik uudishimu on andnud märkimisväärse panuse nende tulemuste sünnile.

Teaduspreemiani viinud artiklite seeria on valminud Eesti Teadusagentuuri grantide PSG726, TK214 ja MOBTP155 toel.

---

9 https://sisu.ut.ee/cepm/

10 https://www.weforum.org/publications/closing-the-women-s-health-gap-a-1-trillion-opportunity-to-improve-lives-and-economies/

VIITED

Honigberg, M. C., Truong, B., Khan, R. R., Xiao, B. jt. 2023. Polygenic prediction of preeclampsia and gestational hypertension. Nat Med. 29(6), 1540–1549, https://doi.org/10.1038/s41591-023-02374-9. Epub 2023 May 29. PMID: 37248299; PMCID: PMC10330886.

Kurki, M. I., Karjalainen, J., Palta, P. jt. 2023. FinnGen provides genetic insights from a well-phenotyped isolated population. Nature 613, 508–518, https://doi.org/10.1038/s41586-022-05473-8. Erratum in: Nature. 2023, 615(7952):E19, https://doi.org/10.1038/s41586-023-05837-8

Minikel, E. V., Painter, J. L., Dong, C. C. jt. 2024. Refining the impact of genetic evidence on clinical success. Nature 629, 624–629, https://doi.org/10.1038/s41586-024-07316-0

Ohshima, K., Nakashima, M., Sonoda, K., Kikuchi, M., Watanabe, T. 2001. Expression of RCAS1 and FasL in human trophoblasts and uterine glands during pregnancy: the possible role in immune privilege. Clin Exp Immunol. 123(3):481-6, https://doi.org/10.1046/j.1365-2249.2001.01461.x. PMID: 11298137; PMCID: PMC1906005.

Part, K., Laanpere, M., Ringmets, I., Eltermaa, M., Hein, M., Kond, K., Tõniste, G., Alafrange, M., Paju, K., Lõhmus, L., Karro, H. 2025. Eesti naiste tervis 2024: seksuaal- ja reproduktiivtervis, tervisekäitumine, hoiakud ja tervishoiuteenuste kasutamine. Uurimisaruanne. Tartu: Tartu Ülikooli naistekliinik ja seksuaaltervise uuringute keskus, https://sisu.ut.ee/wp-content/uploads/sites/4/uurimus-1.pdf

Pathare, A. D. S., Džigurski, J., Pujol Gualdo, N., Rukins, V., Peters, M., Estonian Biobank Research Team Mägi, R., Salumets, A., Saare, M., Laisk, T. 2025. A large-scale genome-wide association study on female genital tract polyps highlights role of DNA repair, cell proliferation, and cell growth. Human Reproduction, Volume 40, Issue 4, April 2025, 750–763, https://doi.org/10.1093/humrep/deaf025

Pujol Gualdo, N., Džigurski, J., Rukins, V. jt. 2025. Atlas of genetic and phenotypic associations across 42 female reproductive health diagnoses. Nat Med 31, 1626–1634, https://doi.org/10.1038/s41591-025-03543-8

Pujol Gualdo, N., Mägi, R., Laisk, T. 2023. Genome-wide association study meta-analysis supports association between MUC1 and ectopic pregnancy. Human Reproduction, 38, https://doi.org/10.1093/humrep/dead217

Ramachandran, D., Wang, X., Laisk, T., jt. 2025. GWAS meta-analysis identifies five susceptibility loci for endometrial cancer. EBioMedicine 2025, Aug; 118:105830, doi: https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2025.105830. Epub 2025 Jul 8. PMID: 40633141; PMCID: PMC12275056.

Rüder, C., Höpken, U. E., Wolf, J., Mittrücker, H. W., Engels, B., Erdmann, B., Wollenzin, S., Uckert, W., Dörken, B., Rehm, A. 2009. The tumor-associated antigen EBAG9 negatively regulates the cytolytic capacity of mouse CD8+ T cells. J Clin Invest. 2009 Aug; 119(8):2184-203, https://doi.org/10.1172/JCI37760. Epub 2009 Jul 20. PMID: 19620783; PMCID: PMC2719940.

Solé-Navais, P., Flatley, C., Steinthorsdottir, V. jt. 2023. Genetic effects on the timing of parturition and links to fetal birth weight. Nat Genet 55, 559–567, https://doi.org/10.1038/s41588-023-01343-9

Thibord, F., Cunha, J., Džigurski, J., Tuftin, B., Huffman, J. E., Pujol-Gualdo, N., Cho, K., Wilson, P. W. F., Johnsen, J. M., Raffield, L. M., Chen, M. H., Laisk, T., Johnson, A. D. 2025. Genome-wide meta-analysis of heavy menstrual bleeding reveals 36 risk loci. Blood. 2025, Aug 7; 146(6), 745–758, https://doi.org/10.1182/blood.2024027382. PMID: 40324064.

Tyrmi, J. S., Arffman, R. K., Pujol-Gualdo, N., Kurra, V., Morin-Papunen, L., Sliz, E., FinnGen Consortium, Estonian Biobank Research Team, Piltonen, T. T., Laisk, T., Kettunen, J., Laivuori, H. 2022. Leveraging Northern European population history: novel low-frequency variants for polycystic ovary syndrome. Hum Reprod. 2022, Jan 28; 37(2), 352–365, https://doi.org/10.1093/humrep/deab250. PMID: 34791234; PMCID: PMC8804330.

Tyrmi, J. S., Kaartokallio, T., Lokki, A. I., jt. 2023. Genetic Risk Factors Associated With Preeclampsia and Hypertensive Disorders of Pregnancy. JAMA Cardiol. 2023; 8(7), 674–683, https://doi.org/10.1001/jamacardio.2023.1312

Venkatesh, S. S., Wittemans, L. B. L., Palmer, D. S. jt. 2025. Genome-wide analyses identify 25 infertility loci and relationships with reproductive traits across the allele frequency spectrum. Nat Genet 57, 1107–1118, https://doi.org/10.1038/s41588-025-02156-8

Walker, E. C., Vanea, C., Meir, K., Hochner-Celnikier, D., Hochner, H., Laisk, T., Lindgren, C., Glastonbury, C. A., Ernst, L. M., Nellaker, C. 2026. Biologically inspired digital histology for deep phenotyping of placental composition changes across major lesion types. Placenta. 2026, Apr 29:S0143-4004(26)00143-8, https://doi.org/10.1016/j.placenta.2026.04.020

Wicherek, L., Klimek, M., Czekierdowski, A., Popiela, T. J., Galazka, K., Tetlak, T., Gilowski, A., Dutsch-Wicherek, M. 2005. The placental RCAS1 expression during stillbirth. Reprod Biol Endocrinol. 2005, Jun 17;3:24, https://doi.org/10.1186/1477-7827-3-24. PMID: 15963226; PMCID: PMC1184098.

Foto: Erlend Štaub

Triin Laisk

Sündinud 31. juulil 1985 Tartus

2003 Tallinna 21. Kool

2006 Tartu Ülikool, bioloogia (BSc)

2008 Tartu Ülikool, biomeditsiin (MSc)

2015 Tartu Ülikool, arstiteadus (PhD)

Doktoritöö raames uuris naiste viljakuse geneetilisi mõjureid ning pärast doktoritöö kaitsmist täiendas oma oskusi genoomse epidemioloogia vallas järeldoktorantuuris professor Reedik Mägi (Tartu Ülikool) ning professor Cecilia Lindgreni (Oxfordi Ülikool) juhendamisel. Aastatel 2019–2025 töötas Tartu Ülikooli genoomika instituudis, alguses teadurina ning hiljem vanemteaduri ja kaasprofessorina. Alates 2026. aastast Tartu Ülikooli genoomse epidemioloogia professor. Pälvinud 2023. aastal L'Oréal-UNESCO noorte talentide Baltikumi programmi „Naised teaduses" auhinna ning 2025. aastal valitud programmi „Nature Inspiring Women in Science" finalistide hulka teadusliku saavutuse kategoorias. Praegu juhib Tartu Ülikooli genoomika instituudis bioinformaatika ja genoomse epidemioloogia töögrupi reproduktiivgeneetika töörühma, mis keskendub naiste tervisega seotud uuringutele.

https://doi.org/10.3176/evp.2026.07

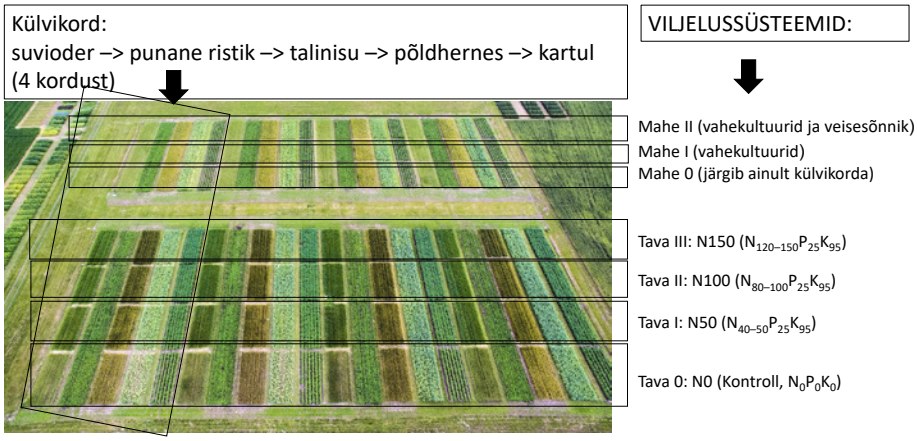
KVALITEETNE SAAK KESKKONNASÕBRALIKULT JA EESTI MAAD HOIDES

Evelin Loit-Harro ja Liina Talgre (Eesti Maaülikool)

Teaduspreemia põllumajandusteaduste ja veterinaaria valdkonnas tööde tsükli „Kvaliteetne saak keskkonnasõbralikult ja Eesti maad hoides“ eest

„See rahvas üksi võib oma vabaduse peale julge olla, kellel liha ja leib omaenese päralt on,“ ütles juba Carl Robert Jakobson. Põllumajanduse esmane eesmärk on kvaliteetse ja ohutu toidu- ja söödatooraine kasvatamine, tagades seejuures tootmise stabiilsuse, kättesaadavuse ja vastavuse tarbijate ootustele. Töö peamine eesmärk oli põllukultuuride saagi ja kvaliteedi kujunemise uurimine erinevates viljelusviisides, et leida ühisosa toiduga kindlustatuse, keskkonnasäästlikkuse, terve mulla ja elurikkuse vahel. Uurimistöö eripäraks ja tugevuseks oli terviklik lähenemine agroökosüsteemile pikaajalises külvikorrakatses. Pikaajalised põldkatsed võimaldavad käsitleda põllumajandussüsteeme dünaamiliste ja ajas muutuvate tervikutena, pakkudes süvitsi minevat arusaama nende toimimisest, stabiilsusest ja jätkusuutlikkusest ning luues aluse nii teaduslikele järeldustele kui ka praktilistele soovitustele põllumajandustootmises.

Töö tugeva vundamendi moodustas pikaajaline külvikorrakatse, milles uuriti ja uuritakse ka edaspidi mahe- ja tavaviljeluse süsteemide mõju saagile, kvaliteedile ja keskkonnale. Külvikorra moodustasid oder punase ristiku allakülviga, punane ristik, talinisu, põldhernes ja kartul (joonis 1). Eestis on põllukultuuridest suurima külvipinnaga teraviljad, eeskätt talinisu, mille külvipind oli 2025. aastal ligikaudu 200 000 hektarit, ja oder, mis kasvas ligikaudu 100 000 hektaril. Need teraviljad tagavad toiduga kindlustatuse Eestis ning moodustavad olulise osa ekspordist. Punane ristik on tähtis söödakultuur ja mullaviljakuse parandaja ning on laialdaselt kasutusel rohumaade segudes. Põldherne, mis pakub nii proteiinirikast toitu kui ka sööta ning on väärtuslik eelvili teraviljadele, kasvupinda on viimastel aastatel suurendatud. Kartulil on teraviljadega võrreldes küll väiksem külvipind (~ 3000 ha), kuid see on jätkuvalt oluline kultuur nii toidujulgeoleku kui ka jätkusuutliku külvikorra seisukohalt. Katses võrreldi kahte viljelusviisi: mahe- ja tavaviljelust. Maheviljeluses oli kolm viljelussüsteemi, millest kaks põhinesid talviste vahekultuuride ja komposteerunud veisesõnniku kasutamisel. Lisaks kuulus maheviljelusse kontrollsüsteem, kus järgiti üksnes külvikorda. Tavaviljeluse katse hõlmas nelja viljelussüsteemi, kus kasutati madala, keskmise ja kõrge normiga mineraalväetisi. Lisaks oli tavaviljeluses kontrollsüsteem, milles väetisi ei kasutatud (joonis 1).



Joonis 1. Pikaajalise külvikorrakatse skeem koos väetisvariantidega.
Foto: Indrek Keres

Saak

Toidujulgeolekuks on vaja stabiilset saaki ning kõrget kvaliteeti. Mõlemad sõltuvad mitmetest teguritest ning on omakorda mõjutatud kokkulepitud reeglitest. Euroopa Liidu eesmärk on vähendada mineraalväetiste kasutamist, samal ajal on viimastel aastatel langenud mineraalväetiste kättesaadavus kõrgete energiahindade ja geopoliitiliste pingete tõttu. Euroopa Liidu teine eesmärk on suurendada mahedalt viljeletud maa osakaalu. Eesti alustas maheviljeluse uuringutega umbes 30 aastat tagasi ja on olnud selles vallas teerajaja. Põhjalike uuringute alguseks võib lugeda 2008. aastat, mil Maaülikoolis alustati tänaseks juba pikaajalise külvikorrakatsega. Praegu moodustab mahemaa 23% kogu põllumajandusmaast.

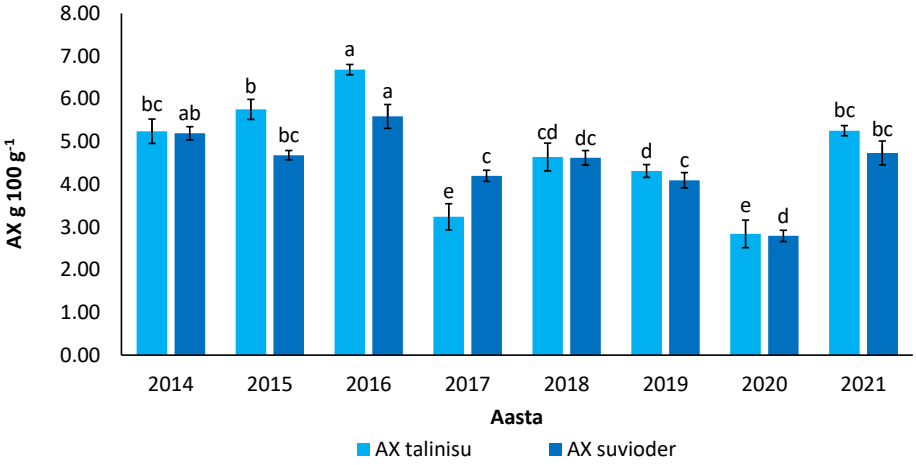
Pikaajalise mahe- ja tavaviljeluse süsteemide võrdluskatse 15 aasta andmete põhjal tehtud analüüs näitas, et uuritud viie kultuuri (oder punase ristiku allakülviga, punane ristik, talinisu, põldhernes ja kartul) kogusaagikus on ligi veerandi võrra suurem tavaviljeluse süsteemides, kus on kasutusel keskmise normiga (kuni 100 kg lämmastikku hektarile) mineraallämmastik (Viikoja jt, 2023). Külvikorra kultuuridest kõige ebastabiilsema saagi ja kõrgema riskiga oli põldhernes. Kuigi saagi mõistes riskikultuur, on hernes ja punane ristik olulised õhulämmastiku sidujad külvikorras ning neil on positiivne mõju toitainete bilansile (Voor ja Loit-Harro, 2024). See tähendab, et saagiga eemaldatud toitainete osa on väiksem kui mulda seotud toitainetel. Kõige parema saagistabiilsusega olid kartul ja suvioder, kuid samas oli näha, et äärmuslikud ilmastikuolud vähendavad ka nende kultuuride saagikust. Näiteks suvioder on väga tundlik veerežiimi ekstreemsele muutumisele ja seetõttu tuleb taime veekasutust arvesse võtta juba aretuse ajal (Sepp jt, 2021). Kartuli saagikus oli kõige stabiilsem mahesüsteemides ja kõige ebastabiilsem kõrgemate väetisannuste korral ning oluline oli

tõdeda, et vahekultuuride ja sõnniku kasutamisel annab mahepõllumajanduslikult viljeldav kartul sama häid saake kui madala mineraallämmastiku kogusega tavaviljelus (Margus jt, 2022; Kuht jt, 2024; Eremeev jt, 2025b). Kuigi keskmine saagitase võib jääda mahetootmises madalamaks, kompenseerivad seda väiksem sisenditest sõltuvus, parem mullatervis ning suurem elurikkus agroökosüsteemis (Boschiero jt, 2023). Need tegurid toetavad pikaajalist tootmisvõimekust ning vähendavad riske, mis on seotud turu- ja kliimakõikumistega.

Kvaliteet

Inimeste toidu puhul on kõige olulisem selle kvaliteet. Teraviljas leiduvad inimese tervist toetavad kiudained, nagu beeta-glükaan ja arabinoksülaan. Nisu ja odra kiudainete sisaldust uuriti väga pika aegrea ehk kaheksa aasta andmete põhjal. Leiti, et arabinoksülaani (Korge jt, 2022) ja beeta-glükaani (Khaleghdoust jt, 2024a, 2024b) sisaldus teraviljades sõltub peamiselt aasta ilmastikust ning väiksemad lämmastikväetise normid või maheviljelus selle sisaldust ei vähenda. Arabinoksülaani sisaldus oli nisus ja odras sarnane ja see varieerus 3% aastal 2020 kuni peaaegu 7% aastal 2016 (joonis 2). Beeta-glükaani sisaldus odras varieerus 3,7% aastal 2016 kuni 5,6% aastal 2021. Ka teravilja kasvatamine segus liblikõielistega valdavalt ei avaldanud saagile ega kiudainete sisaldusele mõju, välja arvatud suviodra ja viki koosluses, kus beeta-glükaani sisaldus vähenes (Alaru jt, 2024b; Khaleghdoust jt, 2024a).

Nisu on üks enim tarbitavaid teravilju ning enamjaolt jõuab see toidulauale küpsetatult. Hästi kerkinud saia jaoks on vaja funktsionaalset gluteenivõrgustikku, mis hoiaks pärmitaignas gaasimulle kinni. Gluteen on proteiin, mis sisaldab 6,25% lämmastikku ja sõltub seetõttu otseselt nisule kättesaadavast lämmas-



Joonis 2. Arabinoksülaani sisaldus talinisu ja suviodra proovides väetisvariantide keskmisena.

tikust. Lisaks gluteenisisaldusele on oluline proteiini ja tärklise omavaheline interaktsioon ja stabiilselt kvaliteetse taigna jaoks on vaja kõrgemat mineraalväetise normi 150 kg/ha. Maheviljeluses kasvanud nisu on tundlikum ilmastikus esinevate kõikumiste ja neist tingitud toitainete omastamise suhtes ning see tundlikkus kajastub ka taigna ebastabiilses kvaliteedis (Keres jt, 2021). Leiti, et kiudainete ja proteiini suhe mõjutab nisujahust valmistatud taigna kvaliteeti ja näidati, et kõige optimaalsem suhe on 2–2,1 : 1 (Alaru jt, 2024a). Kuna Eesti nisu kasutatakse peamiselt küpsetatud saiatoodetes, siis toetab see uus kvaliteedikriteerium innovatsiooni toidutehnoloogia valdkonnas. Mahepõllumajandusliku tootmise laienedes on edaspidi oluline käsitleda saiavalmistamise väärtusahelat tervikuna, et selgitada teravilja kvaliteedi varieeruvust.

Terades leiduv keemiline ühend fütaat ei sõltu samuti väetamisest või viljelusviisist (Korge jt, 2024; Korge jt, 2025a). Fütaadil võib olla inimese tervisele nii negatiivseid (takistab raua, tsingi, kaltsiumi ja magneesiumi imendumist) kui ka positiivseid (on antioksüdant) mõjusid. Oluline on teada, et mõnel aastal võib fütaadi sisaldus olla kaks korda kõrgem ja see võib omakorda mõjutada toidu suhtes tundlike inimeste tervist.

Saagi ja kvaliteedi kujunemise mehhanismid

Saagi ja kvaliteedi kujunemist määravad erinevad taimes toimuvad protsessid, mille mõistmine aitab aretajaid aretuseesmärkide saavutamisel ning agronoome uute jätkusuutlike agrotehnoloogiate loomisel. Enamasti töötavad agronoomid põllul ja oskavad katsetulemusi laiendada tootmistingimustesse. Rakusiseseid protsesse uurivad molekulaarbioloogid ja geneetikud enamjaolt kontrollitud tingimustes. Toiduga kindlustatuse ja jätkusuutliku taimekasvatuse jaoks on oluline agronoomia ja molekulaarbioloogia ühtne raamistik. Käesolevas uurimistsüklis analüüsiti põllutingimustes kasvanud odra geneetilisi protsesse, mis oli väga uuenduslik, kuna suur osa geneetikatöid viiakse läbi laboritingimustes. Selgus, et kõrgema mineraalväetise normi juures oli odra geeniekspressiooni aktiivsus oluliselt kõrgem (Esmaeilzadeh Salestani jt, 2023), täpsemalt: ammooniumtransporteri ekspressioon oli lisatud lämmastiku kogusega negatiivses seoses odra varastes kasvufaasides (Esmaeilzadeh Salestani jt, 2022). Geneetilised uuringud ning molekulaarsed markerid aitavad kiiremini leida parema kohastumisega fenotüüpe, mis on näiteks resistentsed juuremädanikule (Vazvani jt, 2024, 2025a, 2025b).

Vahelmine nisuhein – uus toidu- ja söödakultuur

Kliimamuutused loovad ootuse põuakindlamatele kultuuridele. Üks innovatiivne uus kultuur on vahelmine nisuhein (*Thinopyrum intermedium*) Kernza, mitmeaastane teravili, mis on aretatud kaheotstarbeliseks kultuuriks. See sobib nii terasaagi koristamiseks kui ka söödakultuuriks. Nisuheina võib pidada ka keskkonda toetavaks ja taastavaks kultuuriks, kuna tema sügavale ulatuv juures-

tik piirab toitainete leostumist ning aitab parandada mulla struktuuri ja viljakust (Culman jt, 2013). Koostöös Põhjamaadega alustati Eestis selle kultuuri testimist 2023. aastal. Vahelmine nisuhein kasvas, talvitus ning andis esimesel aastal ka väikese terasaagi Tartu tingimustes (Korge jt, 2025b). Biomassisaak söödatootmise otstarbel ulatus teisel kasvuaastal 5000 – 11 900 kuivaine kilogrammini hektarilt (Korge jt, 2025b). Toitaineväärtusi veel analüüsitakse, kuid esialgsed tulemused on söödatootmise puhul paljulubavad. Põuakindla kõrrelise kultuuri lisandumine valikusse aitab paremini väärindada Eesti rohumaid, mida on Eesti põllumajandusmaast kolmandik. Praegu on üks levinumaid kõrrelisi kultuure karjamaa raihein, mille saagikust ja kvaliteeti saab tõsta magneesiumi lisamisega (Aavola jt, 2025). Efektiivne ja kõrge kvaliteediga söödatootmine on eduka piimakarjakasvatamise aluseks ja toetab nii toiduga kindlustatust kui ka eksporti.

Maakasutuse efektiivistamine

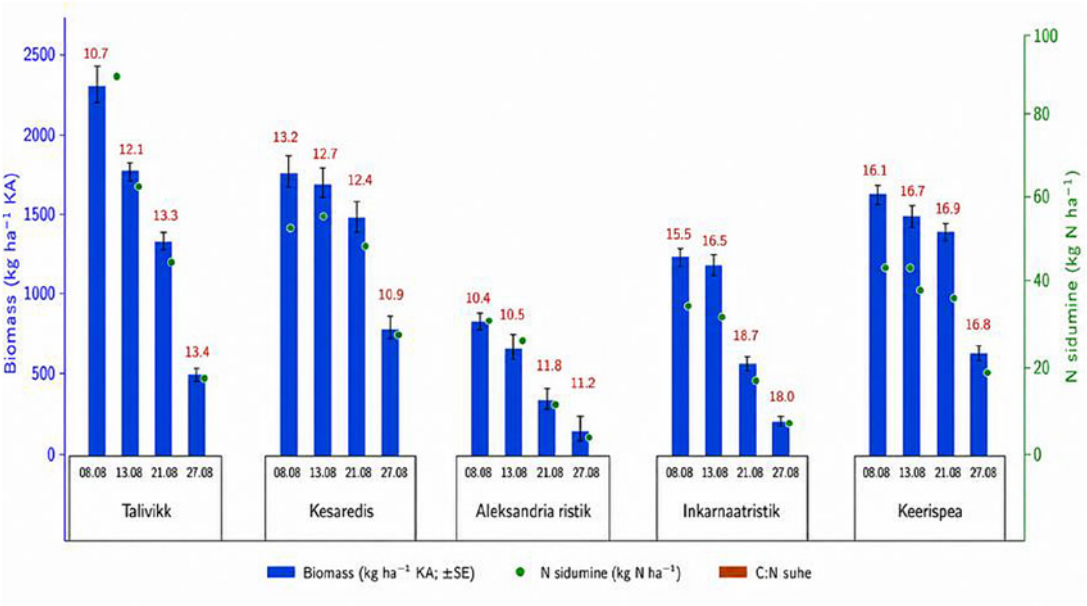
Maakasutuse ja kliima muutumine on Euroopas oluline proovikivi. Põllumajandusmaa väheneb, mis tähendab, et tuleb leida viise väheviljakate alade kasutusevõtuks, näiteks töödeldes taimi lehekaudsete preparaatidega, nagu räni või seleen (Schröder jt, 2022). Eelnevad laborikatsed on näidanud räniga pritsimise puhul häid tulemusi, kuid suures ökotronis tuleviku (prognoosi järgi 2050. aasta) kliimatingimustes ei pruugi lehekaudne ränipreparaat otseselt suviodra saaki suurendada (Rineau jt, 2024). Mitme riigi põldkatsetelt kogutud proovide analüüs näitas, et ränist ja süsinikust moodustuvad fütoliidid, mis võiks suuta siduda süsinikku mulda pikaks ajaks (Rutkowska jt, 2024). Vee ja lämmastiku kättesaadavus on vähemväärtuslikul põllumaal võtmetegur ning mudeldamise uuring suviodralt kogutud andmete alusel näitas, et optimaalne väetamise kogus on 100–120 kg ha^{-1} (Žydelis jt, 2025).

Vahekultuurid ja mitmekesisus

Toimunud klimaatilisi muutusi ja vastavat kohanemist põllumajanduskultuuride kasvatamisel uuriti ka koostoos 15 riigi teadlastega, võrreldes ajaperioode 1991–2000 ja 2012–2016 (Zhao jt, 2022). Tulemused näitasid, et muutused sademetes ja temperatuurides tekivad kiiresti ning nendega kohanemise strateegiad tuleb leida regiooniti. Põhja-Euroopas on kohanemise plaan mullakaitsele keskendumine, milles on oluline strateegiline osa põllu talvisel taimkattel. Eesti tingimustes aitab maapinna taimikuga kaetuna olek talvisel ajal takistada toitainete leostumist mulla künnikihist sügavamatesse kihtidesse ja hoida ära põhikultuuridest vabal perioodil tuule- ja vee-erosiooni. Kui külvikorras ei ole parasjagu talikultuuri, saab kasutada vahekultuure, mis külvatakse kohe pärast põhikultuuri koristust ning viiakse mulda kevadel maaharimistööde käigus enne järgmist põhikultuuri. Eestis veel suhteliselt uudse vahekultuuride teema uurimistulemused annavad alus- ja oskusteavet sobivate külviaegade ning liigilise koosseisu mõjust nende biomassi kujunemisele, toitainete sidumise võimele ja järelmõjule, samuti võimaldavad hinnata uute vahekultuuride sobivust Eesti ilmastikutingimustes (Toom jt,

2023; Toom jt, 2025). Uurimistulemused näitavad, et Eestis on vahekultuuride külviks sobivaim aeg kuni 15. augustini, kuna varasem külv võimaldab kasvada suuremal biomassil ning tagab tõhusama lämmastiku sidumise (joonis 3).

Pikaajalise külvikorra katse põhjal leiti, et talviste vahekultuuride kasutamine vähendab mulla toitainete defitsiiti ja mulla happesust (Kuht jt, 2023; Talgre jt, 2023b; Eremeev jt, 2025a). Liblikõieliste vahekultuuride täiendav agronoomiline väärtus lisaks suurele biomassi moodustamise võimele seisneb nende võimes siduda atmosfäärist lämmastikku sümbioosis mügarbakteritega (Toom jt, 2023). Seetõttu võimaldab nende kasutamine vähendada sõltuvust mineraalväetistest, mis on tänases geopoliitiliselt pingelises ja hinnatõusudest mõjutatud olukorras kriitilise tähtsusega. Vahekultuuridel on positiivne mõju mulla orgaanilise aine sisaldusele (Kuht jt, 2022c; Kuht jt, 2023; Kuht jt, 2025), soodustades seeläbi süsiniku sidumist ning panustades otseselt kliimamuutuste leevendamisse. Lisaks agronoomiateadmistele on kogutud andmestik olnud väärtuslik materjal masinõppe treenimiseks, mis näitab valdkonna interdistsiplinaarsust (Uzair jt, 2022; Tomasiello jt, 2023). Samuti vähendavad vahekultuurid vähem või rohkem umbrohtude biomassi (sõltuvalt põhikultuurist) (Madsen jt, 2023), mis teeb sellest olulise alternatiivi keemilisele umbrohtude tõrjumisele. Vahekultuurid tõstavad mikroobide aktiivsust ja mitmekesisust, mis omakorda hoiab võimalikke taimehaiguste tekitajaid kontrolli all (Kuht jt, 2022a, 2022b; Talve jt, 2022). Mullast eraldatud DNA analüüs näitas, et kõige enam soodustas mulla mikroorganismide arvukust ja mitmekesisust viieaastane külvikord, mahetootmine ja mõõdukas lämmastikuga väetamine (50 ja 100 kg ha^{-1}), samas kui suured lämmastiku-



Joonis 3. Vahekultuuride biomass, lämmastiku (N) sidumise võime ja biomassi süsiniku lämmastiku (C:N) suhe sõltuvalt külviajast.

kogused võivad mullaelustikku pigem pärssida (Esmaeilzadeh Salestani jt, 2021). See viitab, et taimede tasakaalustatud toitmine on oluline tegur mullaelustiku hea seisundi kujundamisel. Vahekultuuride mõjul suurenes mikroobide biomass kõigis uuritud mikroobide rühmades (gramnegatiivsed ja grampositiivsed bakterid, aktinobakterid ja seened) (Talve jt, 2022). Koostöös Tartu Ülikooli teadlastega selgus, et intensiivselt majandatud muldades väheneb arbuskulaarse mükoriisa (AM-seente) biomass peamiselt spetsialisttaksonite kadumise tõttu, kusjuures allesjäänud üldistunud taksonid suudavad kohaneda piiratud juureelupaiga ja toitainetega (Vahter jt, 2025). Kui AM-seente koosluste vähenemine peegeldab intensiivse majandamise mõju mullale, siis vahekultuuride kasutamine pakub praktilisi lahendusi mulla elurikkuse, toitainete kättesaadavuse ja taimekaitse parandamiseks. Vahekultuuride kasvatamine suurendab lisaks mikroorganismidele ka kasulike lülijalgsete (jooksiklased, hooghännalised) arvukust ja mitmekesisust, vähendades nii keemilise kahjuritõrje vajadust (Talgre jt, 2023a, 2023c; Luik jt, 2024; Madsen jt, 2024). Hooghännaliste arvukust ja liigirikkust suurendab ka sõnniku, sh putukasõnniku kasutamine (Kuu jt, 2025).

Kokkuvõte

Pikaajalise külvikorrakatse tulemused näitasid, et saagi stabiilsus on kõige parem suviodral ja kartulil, kuid ka nisu saab kasvatada. Põldhernes on seni veel riskikultuur. Nisu puhul määrab kvaliteedi proteiinisisaldus, mis sõltub otseselt lämmastikväetise annusest. Aasta ilmastikust sõltuvalt on võimalik saada kvaliteetset nisutainast ka maheviljeluse tingimustes. Lisaks mõjutab taigna kvaliteeti proteiini ja kiudainete suhe; seejuures sõltub kiudainete sisaldus vaid aasta ilmastikust. Kui tuleviku kliima toob kaasa rohkem kevadist põuda ja ekstreemseid ilmastikuolusid, siis uus põuakindel vahelmine nisuhein aitab seda riski vähendada. Samuti aitavad ilmastikuga seotud riske ning lämmastikusisaldust mullas hoida vahekultuurid. Lisaks on vahekultuuridel oluline roll mitmekesisuse tagamisel nii mulla sees kui mulla pinnal.

Pikaajaliste katsete väärtus kasvab ajas ning nende käigus kogutud andmeid saab kasutada mõõdupuu ja toena jätkusuutliku põllumajanduse ja toiduga kindlustatuse heaks veel aastakümneid.

Tänuavaldused

Oleme südamest tänulikud kolleegidele, kes on käivitanud meie ühise pikaajalise külvikorrakatse ja aidanud seda töös hoida. Oleme tänulikud kõigile tudengitele ja kaasautoritele. Evelin Loit-Harro tänab oma doktoritöö juhendajat professor Illimar Altosaart, kes on alati julgustanud esitama suuri küsimusi ja pürgima ikka edasi. Liina Talgre tänab dotsent Enn Lauringsoni ja professor Anne Luike, kes mõlemad on juba tudengipõlvest alates mõjutanud tema kujunemist teadlaseks.

Uuringu tulemused valmisid mitme projekti käigus: „Põhikultuuride järel vahekultuurina kasvatamiseks sobivate liikide ja segude ning nende viljelemiseks sobiva agrotehnika väljatöötamine“, „Stressi mõju biomassi kujunemisele muutlikes keskkonnatingimustes“, „Teravilja ja õlikultuuride väärindamine“ (RESTA28), „Seleeni ja räniga rikastatud ja klimaatiliste tingimustega kohanenud toidu ja sööda tootmine vähemväärtuslikul mullal“ (ERA-Net Cofund FACCE SURPLUS), „Agroökoloogiliste printsiipide kasutamine lihtsate ja vastupidavate maheviljelussüsteemide edendamiseks (All-Organic)“ (ERA-Net CORE Organic Cofund), „Saagi ja kvaliteedi stabiilsus ja jätkusuutlikkus pikaajalises külvikorrakatses“ (PRG1949), „Agroecological strategies for sustainable weed management in key European crops, AGROSUS“ (programm Euroopa Horisont), „Improving yields in organic cropping systems, OrganicYieldsUP“ (programm Euroopa Horisont), ja „Validating the Introduction of Kernza in the Nordic-Baltic region“ (Nordregio partnerlus).

VIITED

Aavola, R., Ingver, A., Loit-Harro, E., Kaart, T., Sooväli, P., Hiiesalu, I., Tamm, I. 2025. Magnesium fertilisation enhanced forage yield primarily in tetraploid perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science, 75(1), https://doi.org/10.1080/09064710.2025.2538457

Alaru, M., Kaasik, R., Khaleghdoust, B., Korge, M., Keres, I., Möll, K., Talgre, L., Loit, E. 2024a. The combined effects of weather conditions and fertilization on wheat fiber to protein ratio and on dough quality. Journal of Cereal Science, 117, 103923. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2024.103923

Alaru, M., Korge, M., Vesik, H., Möll, K., Keres, I., El Shawi, R. M. El E., Tomasiello, S., Loit-Harro, E. 2024b. Tera- ja kaunviljade puhas- ning segukülvide võrdluskatse esialgsed tulemused. Alaru, M., Korge, M. (toim). Agronoomia 2024, 50−59. Tartu: Vali Press, http://hdl.handle.net/10492/8860

Boschiero, M., De Laurentiis, V., Caldeira, C., Sala, S. 2023. Comparison of organic and conventional cropping systems: A systematic review of life cycle assessment studies. Environmental Impact Assessment Review, 102, https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107187

Culman, S. W., Snapp, S. S., Ollenburger, M., Basso, B., De Haan, L. R. 2013. Soil and water quality rapidly responds to the perennial grain Kernza wheatgrass. Agronomy Journal, 105(3), 735–744, https://doi.org/10.2134/agronj2012.0273

Eremeev, V., Kuht, J., Alaru, M., Margus, K., Loit-Harro, E., Luik, A., Talgre L. 2025a Kartuli saagistruktuurielemendid erinevates viljelusviisides aastatel 2008–2017. Tamm, Ü., Toom, M., Tamm, S. (toim). Agronoomia 2025, 109−117, Maaelu teadmuskeskus / Eesti Maaülikool, http://hdl.handle.net/10492/9612

Eremeev, V., Kuht, J., Margus, K., Mäeorg, E., Loit-Harro, E., Luik, A., Talgre, L. 2025b. Effects of potato cultivation on soil pHKCl and exchangeable calcium under organic and conventional management. Acta Agriculturae Scandinavica Section B – Soil & Plant Science, 75(1), https://doi.org/10.1080/09064710.2025.2577425

Esmaeilzadeh-Salestani, K., Samandari Bahraseman, M. R., Tohidfar, M., Khaleghdoust, B., Keres, I., Mõttus, A., Loit, E. 2022. Expression of AMT1;1 and AMT2;1 is stimulated by mineral nitrogen and reproductive growth stage in barley under field conditions. Journal of Plant Nutrition, 1−13, DOI: https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2067764

Esmaeilzadeh-Salestani, K., Tohidfar, M., Ghanbari Moheb Seraj, R., Khaleghdoust, B., Keres, I., Marawne, H., Loit, E. 2023. Transcriptome profiling of barley in response to mineral and organic fertilizers. BMC Plant Biology, 23, 261, https://doi.org/10.1186/s12870-023-04263-2

Khaleghdoust, B., Alaru, M., Korge, M., Esmaeilzadeh Salestani K., Loit-Harro, E. 2024a. Can intercropping alter cereal grains dietary fiber composition? Agronomy Research 22(3), 1201–1213, https://doi.org/10.15159/ar.24.096

Khaleghdoust, B., Esmaeilzadeh-Salestani, K., Korge, M., Alaru, M., Möll, K., Värnik, R., Koppel, R., Tamm, Ü., Kurg, M., Altosaar, I., Loit, E. 2024b. Barley and wheat beta-glucan content influenced by weather, fertilization, and genotype. Frontiers in Sustainable Food Systems, 7, DOI: https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1326716

Korge, M., Alaru, M., Keres, I., Khaleghdoust, B., Moll, K., Altosaar, I., Loit, E. 2023. The influence of cropping system, weather conditions and genotype on arabinoxylan content in wheat and barley grains. Journal of Cereal Science, 110, ARTN 103650, https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103650

Korge, M., Alaru, M., Keres, I., Kits, K., Möll, K., Loit-Harro, E. 2024. Fütaat meie teraviljades. Alaru, M., Korge, M. (toim). Agronoomia 2024, 87−95, Tartu: Vali Press, http://hdl.handle.net/10492/8860

Korge, M., Alaru, M., Keres, I., Möll, K., Talgre, L., Voor, I., Altosaar, I., Loit-Harro, E. 2025a. Phytate Content in Cereals Impacted by Cropping System and Harvest Year. Foods, 14(3), 446, DOI: https://doi.org/10.3390/foods14030446

Korge, M., Alaru, M., Keres, I., Möll, K., Tõruvere, K., Voor, I., Loit-Harro, E. 2025b. Kernza® ehk vahelmise nisuheina kasvatamine Eestis. Tamm, Ü., Toom, M., Tamm, S. (toim). Agronoomia 2025, 143−156. Maaelu Teadmuskeskus / Eesti Maaülikool.

Korge, M., Khaleghdoust, B., Alaru, M., Keres, I., Kurg, M., Loit, E. 2022. Beetaglükaani sisaldus odra ja nisu terades sõltuvalt lämmastikväetise normist

ja viljelusviisist. Alaru, M. (toim). Agronoomia 2022, 224−230. Tartu: Vali Press, http://hdl.handle.net/10492/7236

Kuht, J., Eremeev, V., Loit, E., Alaru, M., Mäeorg, E., Talgre, L., Luik, A. (2023a). Changes in the content of soil organic carbon and total nitrogen in the organic and conventional cropping systems. Agronomy Research 21(2), 814–823, https://doi.org/10.15159/AR.23.041

Kuht, J., Eremeev, V., Margus, K., Loit-Harro, E., Luik, A., Talgre, L. 2025. Kartuli saagikus ja mulla orgaanilise süsiniku ning lämmastiku sisaldus erinevates viljelusviisides. Tamm, Ü., Toom, M., Tamm, S. (toim). Agronoomia 2025, 66−73. Maaelu Teadmuskeskus / Eesti Maaülikool.

Kuht, J., Eremeev, V., Margus, K., Luik, A., Talgre, L. 2023b. Kartuli kasvuala mulla pH muutused mahe- ja tavaviljeluses olenevalt viljelusviisist. Lillak, R., Toom, M., Talgre, L., Peetsmann E. (toim). Põllumajandus ja keskkond. Toimetised, 52−59, SA Eesti Maaülikooli Mahekeskus, http://hdl.handle.net/10492/8750

Kuht, J., Eremeev, V., Talgre, L., Loit, E., Mäeorg, E., Margus, K., Runno-Paurson, E., Madsen, H., Luik, A. 2022a. Soil microbial activity in different cropping systems under long-term crop rotation. Agriculture, 12(4), 532, DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture12040532

Kuht, J., Eremeev, V., Talgre, L., Runno-Paurson, E., Alaru, M., Luik, A. 2022b. Mulla mikroobide aktiivsus olenevalt ilmastikutingimustest ja eelviljast tava- ja maheviljelussüsteemides. Alaru, M. (toim). Agronoomia 2022, 97−103. Tartu: Vali Press, http://hdl.handle.net/10492/7236

Kuht, J., Eremeev, V., Talgre, L., Runno-Paurson, E., Loit, E., Luik, A. 2022c. Mulla orgaanilise süsiniku sisalduse muutustest mitmesuguste viljelusviisidega külvikorras. Metspalu, L., Luik, A., Talgre, L., Peetsmann, E. (toim). Teaduselt mahepõllumajandusele. Toimetised 2022, 46−52, Tartu: Eesti Loodusfoto, http://hdl.handle.net/10492/7890

Kuu, A., Reissaar, R., Sutri, M., Ivask, M., Talgre, L., Visnapuu, M., Shanskiy, M. 2025. Ogakärblase (*Hermetica illucens*) putukasõnniku, mineraalväetiste ja arbuskulaarse mükoriisa mõju mulla kvaliteedile ja hooghännaliste (*Collembola*) arvukusele ning liigirikkusele. Tamm, Ü., Toom, M., Tamm, S. (toim). Agronoomia, 46−56, Maaelu Teadmuskeskus ja Eesti Maaülikool, http://hdl.handle.net/10492/9612

Luik, A., Eremeev, V., Talgre, L. 2022. Hooghännaliste esinemine mullas sõltuvalt viljelusviisist ning kultuurist. Teaduselt mahepõllumajandusele. Toimetised 2022, 60−65. Tartu: Eesti Loodusfoto, http://hdl.handle.net/10492/7890

Madsen, H., Eremeev, V., Sepp, K. E., Loit-Harro, E., Luik, A., Talgre, L. 2024. Viljelusviiside mõju hooghännaliste arvukusele ja liigilisele mitmekesisusele. Alaru, M., Korge, M. (toim). Agronoomia 2024, 96−102. Tartu: Vali Press, http://hdl.handle.net/10492/8860

Madsen, H., Luik, A., Eremeev, V., Mäeorg, E., Talgre, L. 2023. Changes in weed biomass, density and diversity in long-term crop rotation experiment during second rotation. Agraarteadus, 34(1), 18−30, https://doi.org/10.15159/jas.23.05

Margus, K., Eremeev, V., Loit, E., Runno-Paurson, E., Mäeorg, E., Luik, A., Talgre, L. 2022. Impact of farming system on potato yield and tuber quality in Northern Baltic sea climate conditions. Agriculture, 12(4), 568, https://doi.org/10.3390/agriculture12040568

Märs, K., Korge, M., Müür, H. P., Loit-Harro, E. 2025. Maisi toiteväärtus, terade saagikus ning pahknõe ja külgvõrsete esinemine sõltuvalt sordist. Tamm, Ü., Toom, M., Tamm, S. (toim). Agronoomia 2025, 133−142. Maaelu Teadmuskeskus / Eesti Maaülikool, http://hdl.handle.net/10492/9612

Rineau, F., Groh, J., Claes J., Grosjean, K., Mench, M., Moreno-Druet, M., Povilaitis, V., Pütz, T., Rutkowska, B., Schröder, P., Soudzilovskaia, N. A., … Loit, E. 2023. Limited effects of crop foliar Si fertilization on a marginal soil under a future climate scenario. Heliyon, 10(1), https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23882

Rutkowska, B., Schröder, P., Mench, M., Rineau, F., Szulc, W., Szulc, W., Poberezny, J., Tiideberg, K., Niedziński, T., Loit, E. 2024. Role of phytolith occluded carbon of cereales plants for climate change mitigation. Journal of water and land development, 60(I–III), 50–58, DOI: https://doi.org/10.24425/jwld.2023.148459

Schröder, P., Mench, M., Povilaitis, V., Rineau, F., Rutkowska, B., Schloter, M., Szulc, W., Žydelis, R., Loit, E. 2022. Relaunch cropping on marginal soils by incorporating amendments and beneficial trace elements in an interdisciplinary approach. The Science of The Total Environment, 803, 149844, DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149844

Sepp, S. S., Tamm, Ü., Loit, E. 2021. Is Estonian barley ready to tackle climate change-induced water regimes? Agraarteadus 2, XXXII, 314–318. DOI: https://doi.org/10.15159/jas.21.29

Zhao, J., Bindi, M., Eitzinger, J., Ferrise, R., Gaile, Z., Gobin, A., Holzkämper, A., Kersebaum, K. C., Kozyra, J., Kriaučiūnienė, Z., Loit, E., Nejedlik, P., Nendel, C., Niinemets, Ü., Palosuo, T., Peltonen-Sainio, P., Potopová, V., Ruiz-Ramos, M., Reidsma, P., Rijk, B., ... Olesen, J. E. 2022. Priority for climate adaptation measures in European crop production systems. European Journal of Agronomy, 138, DOI: https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126516

Žydelis, R, Chiarella, R., Weihermüller, L., Herbst, M., Loit-Harro, E., Szulc, W., Schröder, P., Povilaitis, V., Mench, M., Rineau, F. *et al.* 2025. Modeling Study on Optimizing Water and Nitrogen Management for Barley in Marginal Soils. Plants 2025, 14, 704, https://doi.org/10.3390/plants14050704

Talgre, L., Eremeev, V., Kuht, J., Luik, A. 2023b. Kaltsiumi ja magneesiumi sisalduse muutus pikaajalise mahekülvikorra katse mullas ühe rotatsiooni vältel. Tupits, I., Tamm, Ü., Toom, M., Tamm, S., Kass, M. (toim). Agronoomia 2023, 54−58. Tartu: Rebellis, http://hdl.handle.net/10492/8008

Talgre, L., Eremeev, V., Kuht, J., Luik, A. 2023c. Külvikorra mitmekesistamine ja maheviljelus soodustavad talituslikku elurikkust põllul. Lillak, R., Toom, M., Talgre, L, Peetsmann, E. (toim). Põllumajandus ja keskkond. Toimetised, 52−59. SA Eesti Maaülikooli Mahekeskus, http://hdl.handle.net/10492/8750

Talgre, L., Eremeev, V., Mäeorg, E., Luik, A. 2023a. Diversified cropping systems for promoting the beneficial insects-ground beetles (Coleoptera: Carabidae). Agronomy Research, 21 (Special Issue 2), 592−597, DOI: https://doi.org/10.15159/ar.23.027

Talve, T., Talgre, L., Toom, M., Edesi, L., Karron, E., Koll, B., Eremeev, V., Luik, A., Loit, E., Börjesson, G. 2022. Composition of the microbial community in long-term organic and conventional farming systems. Zemdirbyste-Agriculture, 109(2), 99−106, DOI: https://doi.org/10.13080/z-a.2022.109.013

Tomasiello, S., Uzair, M., Liu, Y., Loit, E. 2023. Data-driven approaches for sustainable agri-food: coping with sustainability and interpretability. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 14, https://link.springer.com/article/10.1007/s12652-023-04702-w

Toom, M., Sepp, K., Tikk, K., Kannimäe, M., Eremeev, V., Talgre, L. 2025. Uued potentsiaalsed haljasväetiskultuurid Eestis. Tamm, Ü., Toom, M., Tamm, S. (toim). Agronoomia 2025, 118−125. Maaelu Teadmuskeskus / Eesti Maaülikool, http://hdl.handle.net/10492/9612

Toom, M., Talgre, L., Tamm, S., Tamm, Ü., Tamm, I., Narits, L., Talve, T., Edesi, L., Lauringson, E. 2023. The effect of cover crops on biomass and nitrogen accumulation and on spring barley yield. Agraarteadus, 34(1), 1−8, DOI: https://doi.org/10.15159/jas.23.01

Uzair, M., Tomasiello, S., Loit, E., Lin, J. C-W. 2022. Predicting the soil organic carbon by recent machine learning algorithms. 2022 IEEE Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, Intl Conf on Cloud and Big Data Computing, Intl Conf on Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/CBDCom/CyberSciTech): Falerna, Italy, 12–15 September 2022. IEEE, 1−7, DOI: https://doi.org/10.1109/DASC/PiCom/CBDCom/Cy55231.2022.9928005

Vahter, T., Astover, A., Davison, J., Hiiesalu, I., Ingver, A., Koppel, R., Liu, S., Loit-Harro, E., Luik, A., Oja, J., Penu, P., Sepp, S-K., Simmer, M., Talgre, L., Tamm, I., Tamm, Ü., Vasar, M., Wipulasena, A. Y. A. P., Zobel, M., Öpik, M. 2025. Agricultural disturbance reduces arbuscular mycorrhizal fungal diversity and biomass by excluding specialist species. New Phytologist, 248(4), 2079–2091, DOI: https://doi.org/10.1111/nph.70548

Vazvani, M. G., Dashti, H., Loit, E., Riseh, R. S. 2025a. Genetic resistance to take-all disease: From the past to the present. Euphytica 221, 7, https://doi.org/10.1007/s10681-024-03453-9

Vazvani, M. G., Dashti, H., Riseh, R. S., Loit, E. 2025b. Association analysis of response to take-all disease with agronomic traits and molecular markers and selection ideal genotypes in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. Mol Breeding 45, 36, https://doi.org/10.1007/s11032-025-01554-4

Viikoja, R., Alaru, M., Keres, I., Lillak, R., Voor, I., Loit, E. 2023. Impact of changing weather on the crops yield stability in different cropping systems. Agronomy Research, 21. DOI: https://doi.org/10.15159/ar.23.078

Voor, I., Loit-Harro, E. 2024. Lämmastikubilansi erinevad arvestusmeetodid, sisendid ja väljundid ning nende maht liblikõielisterikkas külvikorras. Alaru, M., Korge, M. (toim). Agronoomia 2024, 121–130. Tartu: Vali Press, http://hdl.handle.net/10492/8860

Vasakult: Evelin Loit-Harro ja Liina Talgre. Foto: Erlend Štaub

Liina Talgre

Sündinud 5. septembril 1968 Antslas

1987 Räpina Sovhoostehnikum, aiandus

1997 Eesti Põllumajandusülikool, agronoomia

2000 Eesti Põllumajandusülikool, maaviljelus (MSc)

2013 Eesti Maaülikool, taimekasvatus (PhD)

Pärast ülikooli lõpetamist töötanud Eesti Maaülikoolis (varasem Eesti Põllumajandusülikool) teaduri ja dotsendina. Alates 2022 taimekasvatuse ja maaviljeluse kaasprofessor. Juhendanud kaitsmiseni 2 doktoritööd, 20 magistritööd ja kümneid bakalaureusetöid. Avaldanud 40 teadusartiklit. Teadustöös keskendub maheviljeluse teemadele: kuidas hoida ja parandada mullaviljakust, hoida kontrolli all umbrohud ja kasvatada kvaliteetset toidutoorainet.

Evelin Loit-Harro

Sündinud 5. aprillil 1980 Pärnus

2002 Tartu Ülikool, bioloogia bakalaureuseõpe

2009 Ottawa Ülikool Kanadas, biokeemia (PhD)

2009 Prantsusmaa Põllumajanduse Instituut (INRAE) Toursis, järeldoktorantuur

On töötanud Põllumajandusametis. 2011. aastal asus vanemteadurina tööle Eesti Maaülikoolis. Alates 2024. aastast Eesti Maaülikooli säästva taimekasvatuse tenuuriprofessor. Austria BOKU ülikooli külalisprofessor (2025/2026). On juhendanud 11 doktoritööd, 12 magistritööd ja kümneid bakalaureusetöid ning avaldanud üle 40 teadusartikli. Lisaks on ta Metsaülikooli korraldustoimkonnas. Teadustöös keskendub põllumajanduskultuuride saagi ja kvaliteedi kujunemisele, tooraine väärindamisele ning agronoomia ja geneetika seostele.

https://doi.org/10.3176/evp.2026.08

KUIDAS MÄRGATA JA VÄHENDADA INIMESTE HAAVATAVUST HÄDAOLUKORDADES?

Kati Orru ja Sten Hansson (Tartu Ülikool)

Teaduspreemia sotsiaalteaduste valdkonnas tööde tsükli „Haavatavus hädaolukordades: analüüs ja lahendused“ eest

Venemaa täiemahuline sõda Ukraina vastu, COVID-19 pandeemia, maailma eri piirkondi laastavad üleujutused, metsatulekahjud ning tõrked elutähtsate teenuste töös näitavad ühiskondade haavatavust ja elanikkonnakaitse valdkonna arendamise tähtsust. Praktilised kogemused, aga ka rahvusvahelised lepingud, nagu ÜRO Sendai raamistik katastroofiohu vähendamiseks (UNDRR, 2015) ja Euroopa Liidu strateegiad (European Commission, 2023; Niinistö, 2024), osutavad vajadusele paremini aru saada, mis takistab erinevate ühiskonnarühmade toimetulekut hädaolukordades. Tartu Ülikooli riski ja kerksuse uurimisrühma teadustöö aitab mõista, kuidas ohusündmuste ennetamisel, nendeks valmistumisel ja neile reageerimisel paremini arvestada elanike vajaduste ja haavatavustega. Eri riikide ja piirkondade kogemuste analüüs aitab leida võimalusi haavatavuse vähendamiseks eri tüüpi hädaolukordades.

Oleme koostöös rahvusvaheliste uurimismeeskondadega uurinud looduslikke ja inimtegevusest tingitud ohusündmusi maavärinatest tormide, põgenikekriisi, terrorirünnakute ja elutähtsate teenuste katkemiseni, kaasates kogemusi nii Saksamaalt, Prantsusmaalt, Itaaliast, Portugalist, Rootsist, Ungarist, Hollandist, Belgiast, Soomest, Norrast kui ka Eestist. Kogemuste analüüsi on toetanud küsitlusuuringud, intervjuud, dokumendianalüüs ja simulatsiooniharjutused elanikkonnakaitse valdkonnas osalejatega. Koos asutuste ja kogukondade esindajatega oleme loonud ja kasutusele võtnud uudse stsenaariumipõhise haavatavuse triaaži lahenduse, mis aitab täpsustada ohusündmuste sotsiaalseid mõjusid riskianalüüsides ja toetab hädaolukordade lahendamise planeerimist.

Risk

Meid ümbritsevate laiaulatuslike ohusündmuste mõtestamiseks tuleb esitada korraga mitu küsimust: millised on ohuallikad, kui tõenäoline on nende avaldumine, kes või mis on ohule avatud ning millised sotsiaalsed, majanduslikud või keskkonnategurid muudavad inimesed selle mõju suhtes haavatavaks? Kõige raskemate tagajärgede vältimiseks inimeste elule, tervisele ja heaolule tuleb rääkida riskidest.

Risk ei tähenda ainult ohtu ennast, vaid kujuneb ohu, haavatavuse, kokkupuute ja ühiskonna toimevõime koosmõjus. Loodusõnnetused, tehnoloogilised avariid või inimtekkelised ohusündmused muutuvad hädaolukorraks või katastroofiks siis, kui ühiskond pole nendeks valmis. Näiteks kui paduvihm ujutab Tartus üle Riia tänava ja kliinikumi keldrikorruse, ei ole küsimus ainult erakordses sademete hulgas, vaid ka linnaplaneerimises, sadeveesüsteemide toimevõimes ja inimeste erinevas haavatavuses. Mõne jaoks tähendab selline üleujutus liiklushäiret, teise jaoks katkenud ravi või juurdepääsu elutähtsale teenusele.

Risk ei ole staatiline, vaid pidevalt muutuv. Seda kujundavad näiteks ebavõrdsus, sotsiaalne tõrjutus, halvasti planeeritud elukeskkond ja keskkonnaseisundi halvenemine. Seetõttu ei tähenda ohusündmusteks valmistumine ainult ohtude ennustamist või tehniliste kaitsemeetmete loomist, vaid ka ühiskondliku haavatavuse vähendamist ja inimeste kerksuse tugevdamist.

Kerksus

Kerksus (ingl *resilience*) tähendab inimeste, kogukondade ja asutuste suutlikkust ohtudele vastu seista, nendega kohaneda ja neist taastuda viisil, mis säilitab põhifunktsioonid ja arenguvõime. Selle oluline osa on ligipääs ressurssidele ja tugivõrgustikele, mis aitavad muutlikes või erakordsetes olukordades toime tulla (Morsut jt, 2022a). Kerksust kujundavad nii inimeste ettevalmistatus kui ka ühiskondlike struktuuride tugi, sealhulgas elanike vajadustega arvestav riskikommunikatsioon ja -haldus. Taastumine ei tähenda üksnes varasema olukorra taastamist, vaid ka õppimist ja kohanemist viisil, mis vähendab tulevasi haavatavusi ja ebavõrdsust.

Kerksuse keskne komponent on ettenägelikkus – suutlikkus märgata ja hinnata tulevasi ohte enne nende realiseerumist. Kerksed ühiskonnad ei keskendu ainult järgmise hädaolukorra lahendamisele, vaid seiravad võimalikke arenguid keskkonnas, tehnoloogiates ja ühiskonnas 15–20 aasta või pikemas perspektiivis. Kui suudame ohte paremini prognoosida, märgata võimalikke haavatavusi ja võimelünki enne ohu tekkimist, on võimalik osa hädaolukordadest ennetada või nende mõju vähendada.

Kerksus avaldub nii ühiskondlike struktuuride kui ka inimeste tasandil. See hõlmab institutsioonide toimevõimet, taristu vastupidavust ja teenuste jätkumist, aga samavõrd inimeste teotahet, usaldust ja kohanemisvõimet. Ühiskonna polariseeritus, kihistumine, usaldamatus ja institutsionaalne korratus vähendavad kerksust. Seda tugevdavad toimivad tugivõrgustikud, kaasav juhtimine ja õiglane ligipääs ressurssidele. Samas ei ole kõik inimesed ühtviisi valmis ega võimelised end ohtude eest kaitsma ning on vastuvõtlikumad ehk haavatavamad nende mõjudele.

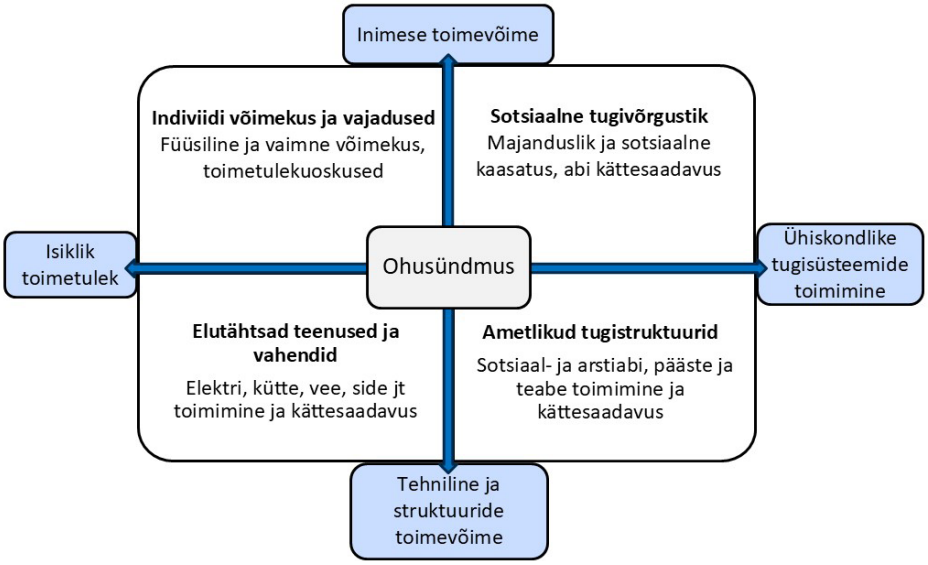
Haavatavus

Meie üleeuroopaline võrdlusuuring Eesti, Saksa, Itaalia, Belgia, Ungari, Rootsi, Norra ja Soome praktikatest näitab, et haavatavust käsitletakse enamasti teatud ühiskonnarühmade püsiva omadusena, sidudes seda näiteks vaesuse, puude või kõrge vanusega (Orru jt, 2022). Elanikkonnakaitsega seotud asutuste 95 esindajaga tehtud intervjuud ja mitmesuguste ohusündmuste juhtumianalüüsid osutavad, et haavatavuse sotsiaalseid aspekte käsitletakse süstemaatiliselt vaid mõnes riigis. Üldiselt valitseb ebakõla selles, keda peetakse haavatavaks, mis põhjustel ja kes peaks haavatavuse leevendamisega tegelema. Domineeriv üldistav vaade haavatavusele ei arvesta erineva toimevõimega haavatavate rühmade seas ega paku praktilisi juhiseid haavatavuse vähendamiseks. Haavatavuse vähendamise strateegiad kipuvad seadma ülesandeid üksikisikule, jättes tähelepanuta need struktuursed probleemid, mis muudavad mõned hädaolukordade tagajärgede suhtes vastuvõtlikumaks kui teised. Meie uurimisrühma üks olulisemaid panuseid on haavatavuse käsitlemine dünaamilise ja olukorraspetsiifilise nähtusena (Hansson jt, 2020; Kuran jt, 2020; Orru jt, 2022).

Haavatavus pole üksnes indiviidi omadus ega pelgalt piiratud toimetulekuvõime küsimus. Inimese teadmised, oskused, tervislik seisund ja suutlikkus keerulistes olukordades toime tulla on küll tähtsad, kuid sama oluline on, kuidas toimivad inimest ümbritsevad tehnoloogilised, sotsiaalsed ja institutsionaalsed süsteemid. Samuti võib haavatavus tekkida olukorras, kus inimene ei pääse ligi abile ja toetusele – olgu selleks perekondlik tugivõrgustik, kogukondlik abi või avalikud teenused ja institutsioonid. Näiteks võib inimene muutuda haavatavaks elektrikatkestuse tõttu, kui tema elu sõltub elektrilistest meditsiiniseadmetest, või siis, kui katkeb ligipääs küttele, joogiveele, sidevahenditele või transpordile. Seetõttu oleme pakkunud välja vajaduse mõtestada haavatavust kahe põimunud mõõtme kaudu (joonis 1). Esiteks tuleks eristada, kas haavatavus tuleneb inimeste toimevõime piirangutest või tehnoloogiliste ja institutsionaalsete süsteemide tõrgetest. Teiseks tuleks eristada eraviisilist hakkamasaamist ning sotsiaalseid tugistruktuure – nii lähikondsete tuge kui ka riiklikke ja kohaliku tasandi avalikke teenuseid.

Oluline on mõista, et ohuolukordades ei mõjuta need haavatavustegurid inimesi eraldi, vaid ristuvad ja võimendavad üksteist (Kuran jt, 2020). Konkreetse olukorra mõju sõltub sellest, kuidas põimuvad individuaalsed omadused, sotsiaalsed suhted, institutsionaalne tugi, tehnoloogiliste süsteemide toimivus ning olukorraspetsiifilised tingimused. Näiteks võib sama elektrikatkestus või üleujutus mõjutada inimesi väga erinevalt sõltuvalt nende tervislikust seisundist, elukohast, majanduslikust olukorrast, ligipääsust transpordile või sellest, kas neil on inimesi, kelle poole abi saamiseks pöörduda.

Kuigi teooria kohaselt tugevdavad sotsiaalne kapital ja tugivõrgustikud valmisolekut ja ohusündmustega toimetulekut (Morsut jt, 2022b), näitavad meie uuringud Eesti ja Saksamaa näitel, et tugivõrgustikud ei ole universaalne lahendus: need ei toimi igas olukorras, ei ole kõigile võrdselt ligipääsetavad



Joonis 1. Haavatavuse dimensioonid hädaolukorras (kohandatud Orru jt, 2022 järgi).

ning inimesed võivad ka ise valida neist mitte abi otsida (Schobert jt, 2023). Kogukondlikud võrgustikud on ebaühtlaselt jaotunud ning aktiivseid toetajaid ei jätku igasse piirkonda, mistõttu jäävad eriti haavatavaks uusasukad, ajutiselt kohal viibijad ja juba varem ühiskonnas tõrjutud inimesed. Samal ajal võivad tihedad suhtlusvõrgustikud küll pakkuda tuge ja infot, kuid ka kapseldada inimesi kitsasse inforuumi, kus levivad väärarusaamad ning väheneb kokkupuude ametliku teabega. Ligipääsu piiravad omakorda ka institutsionaalsed ja tehnilised tegurid: näiteks pandeemiaaegsed isolatsioonimeetmed võivad osa inimesi jätta ilma nii ametlikust toest kui ka kontaktist lähikondsetega (Orru ja Nævestad, 2023). Lisaks sõltub abi kasutamine inimeste võimest ohte ja teenuseid puudutavat teavet mõista ja otsuseid teha ning usaldusest institutsioonide vastu. Näiteks võib inimene end ohtu seada, otsustades mitte järgida evakuatsiooni- või vaktsineerimiskutset, kuna ta ei usalda ametivõime.

See osutab vajadusele murda riskianalüüsides stereotüüpseid müüte haavatavatest ühiskonnarühmadest ning täpsustada ohuolukorras haavatavuse allikaid ning tegelikke abivajajaid.

Näide 1: Ühiskonnas tõrjutute pandeemiakogemus

COVID-19 pandeemia kogemus tõi eriti eredalt esile, kuidas erinevad haavatavuse allikad võivad üksteist võimendada. Võtsime fookusesse seni vähe uuritud ühiskonnarühma, vähekindlustatute ja ühiskonnas tõrjutute hakkamasaamise pandeemia ajal (Orru jt, 2023; Orru ja Nævestad, 2023; Siimsen jt, 2023).

Intervjueerisime 13 Euroopa riigi supiköökide, varjupaikade ja kodutute öömajade ning sotsiaalmajutusüksuste kliente (n = 313) ning töötajaid (32 individuaalset ja 5 rühmaintervjuud), et mõista haavatavuse ja toimetuleku läbipõimunud mehhanisme (Orru jt, 2021).

Isiklikul tasandil ilmnes, et toimetulekut pandeemia ajal mõjutasid inimeste teadmised, riskitaju ja usaldus ametliku info vastu. Võrreldes tavapopulatsiooniga esines uuringus osalenute seas märkimisväärselt rohkem COVID-19 riski eitamist. Kuni 49% eitas suuremat nakatumise tõenäosust ning 38% pidas viiruse tagajärgi väheoluliseks (Nero jt, 2023a). Selline riskitaju ei olnud seotud ainult informeeritusega, vaid ka inimeste varasemate kogemuste, usaldamatuse ning elusituatsiooniga. Kui inimene on harjunud toime tulema pidevas ebakindluses või kogenud pikaajalist tõrjutust, võib uus kriis tunduda lihtsalt järjekordse ohuna paljude seas.

Olulist rolli mängisid ka tugivõrgustikud. Huvitaval kombel tulid pandeemiaaegse isolatsiooniga mõnevõrra kergemini toime inimesed, kelle sotsiaalvõrgustik oli juba enne pandeemiat piiratud. Nende igapäevaelu ei muutunud nii järsult kui neil, kelle jaoks terviseoht katkestas aktiivsed sotsiaalsed suhted. Samas ilmnes selgelt usalduslike suhete tähtsus sotsiaaltöötajate ja klientide vahel. Just sotsiaaltöötajad olid sageli peamised info vahendajad, toetajad ja usaldusisikud olukorras, kus ametlik ohuteavitus jäi kaugeks või raskesti mõistetavaks (Orru jt, 2021).

Haavatavust mõjutas tugevalt ka avalike tugistruktuuride toimimine. Pandeemia ajal tekitasid ebakindlust ja segadust pidevalt muutuvad või ebaselged reeglid ning raskused teenustele ligipääsemisel. Mitmed teenused, sealhulgas päevakeskused ja supiköögid, suleti või piirati nende tegevust just ajal, kui inimeste abivajadus kasvas (Orru jt, 2021). Uuring näitas ka, et abiasutuste esindajate kaasamine poliitikakujundamisse oli sageli nõrk. Kuigi just nemad puutusid kõige vahetumalt kokku haavatavate inimeste vajadustega, ei jõudnud nende teadmised ja kogemused kuigi tihti kriisimeetmete kujundamisse (Nero jt, 2023b). Mõnes riigis väljendus see äärmuslikes meetmetes, näiteks kodutuse kriminaliseerimises. Paremini tulid toime nende maade abiasutused, millel on tugev seos riikliku sotsiaalkaitsesüsteemiga nagu Eestis. See toetas nii lisaressursside saamist kui ka infovahetust (Orru jt, 2021).

Oluline haavatavuse allikas oli ka materiaalsete ja tehnoloogiliste vahendite puudus. Uuring näitas, et pandeemia mõjutas kõige rängemalt oma kodus elavaid abiasutuste kliente (Siimsen jt, 2023). Võib eeldada, et tänaval või ajutistes varjupaikades elavad inimesed tunnetasid mõjusid, kuna neil oli vähem varaliselt kaotada ja varjupaiga teenuseid püüti alal hoida ka piirangute ajal. Pikaajaliselt abiasutustes elavatele inimestele oli tagatud peavari ja toit. Vastupidiselt ootustele oli kõrgemas eas abisaajate materiaalne heaolu noorematega võrreldes vähem löögi all. Võib arvata, et stabiilne sotsiaaltoetus või pension aitasid vanemaealistel hakkama saada, samas kui paljud nooremad abivajajad kaotasid oma (ajutise) sissetuleku (Siimsen jt, 2023). Pandeemia ajal viidi paljud teenused üle

digitaalsetele lahendustele (kaugkonsultatsioonid ja veebipõhine asjaajamine), ent need ei olnud vajalike seadmete, internetiühenduse või digioskuste puudumise tõttu kõigile kättesaadavad.

Näide 2: Ukraina sõjapõgenike toimetulek Eestis

Samalaadsed haavatavuse mustrid ilmnesid ka Eestisse saabunud Ukraina sõjapõgenike kogemustele keskendunud uuringus (Aav jt, 2025). Uuring näitas, et toimetulekut ei mõjutanud üksnes sõjatrauma või individuaalsed oskused, vaid erinevate haavatavustegurite lõimumine.

Individuaalsel tasandil osutusid keskseks keele- ja digioskused. Eesti tugevalt digitaliseeritud teenuskeskkond oli paljudele võõras ning piiratud eesti või inglise keele oskus raskendas ametliku info, teenuste ja õiguste kohta käiva teabe leidmist ning kasutamist. Sõjakogemusest tingitud stress ja trauma vähendasid omakorda inimeste suutlikkust infot töödelda, eristada ametlikke allikaid mitteametlikest või väärinfot levitavatest kanalitest.

Olulist abi pakkusid tugivõrgustikud, mis aitasid põgenikel infot tõlkida ning igapäevaeluga toime tulla. Sageli toimisid kogukonnad esmaste info- ja abikanalitena olukorras, kus ametlik süsteem tundus keeruline või kauge. Samas võis ainult vene- või ukrainakeelsesse inforuumi jäämine süvendada usaldamatust ametiasutuste vastu ning suurendada kokkupuudet väärinfoga.

Toimetulekut mõjutasid ka materiaalsed ressursid. Puuduvad seadmed või võrguühendus tähendasid, et ligipääs digiteenustele ja ametlikule infole jäi piiratuks. See oli eriti oluline ühiskonnas, kus suur osa teenustest ja asjaajamisest toimib digitaalselt. Keelebarjäär surus paljud põgenikud madalapalgalistele töökohtadele ning eriti keerulisse olukorda sattusid üksikvanemad, kellel oli raske ühildada laste eest hoolitsemist, töötamist ning osalemist keele- ja lõimumiskursustel.

Avalike tugistruktuuride osas tõi uuring esile, et Eesti ametiasutustel puudus esialgu kogemus nii suuremahulise sõjapõgenike vastuvõtuga. Kuigi institutsioonid reageerisid kiiresti, ilmnes probleeme asutustevahelises koostöös, infovahetuses ja rollijaotuses. Põgenike jaoks tähendas see sageli killustatud teenuseid ja raskust mõista, kuhu abi saamiseks pöörduda.

Uuring rõhutab, et haavatavus kujuneb erinevate tegurite lõikepunktides. Näiteks võis piiratud keeleoskus koos omakeelse inforuumi, puudulike digivahendite ning riigi internetikeskse teenusmudeliga takistada olulise info õigeaegset jõudmist inimesteni (Aav jt, 2025). See näitab, et ohusündmuste mõistmisel ei piisa ainult üksikute riskirühmade määratlemisest, vaid tuleb vaadata, kuidas individuaalsed, sotsiaalsed, materiaalsed ja institutsionaalsed tegurid üksteist võimendavad.

Uudne lahendus: haavatavuse triaaž

Et täiustada riskianalüüse ning toetada teadmuspõhist elanikkonnakaitset, lõime Tartu Ülikooli riski ja kerksuse uurimisrühma, Päästeameti ja sidusrühmade esindajate koostöös hädaolukordade sotsiaalse haavatavuse triaaži süsteemi (Orru jt, 2025; Orru jt, 2023). Tegemist on tööriistaga, mis aitab elanikkonnakaitse asutustel simulatsiooniharjutusi läbi mängides tuvastada erinevad haavatavuse tegurid ja ohtu sattuvad inimrühmad ning parandada abi planeerimist.

Haavatavuse triaaži lähtekohaks võetakse reaalne või kujuteldav ohustsenaarium ehk tekst, mis kirjeldab võimalikku sündmuste kulgu, lähtudes selle tõenäosusest ja mõjude tõsidusest. Ohustsenaarium võimaldab määratleda süsteemi mõjutatud ja haavatavad elemendid (nt inimesed, ohualal asuvad elutähtsad teenused ja varad). Triaaži käigus täpsustatakse sündmuste otseseid ohte ning nende mõju inimeste tervisele ja elule. Tormid, üleujutused või elektrikatkestused võivad põhjustada vigastusi, haigusi ja eluohtlikke olukordi, eriti inimestele, kes sõltuvad meditsiiniseadmetest või pidevast hooldusest. Haavatavust suurendavad ka elutähtsate teenuste katkestused, nagu elektri- ja veevarustuse ning side-, transpordi- ja tervishoiuteenuste häired. Analüüsis pööratakse eraldi tähelepanu ka kommunikatsioonitõrgetele, mis võivad häirida inimese toimetulekut ohusündmustes. Selleks hinnatakse, kas riskiinfot pakutakse inimestele ligipääsetavates kanalites, kas teave on esitatud erinevatele sihtrühmadele arusaadavalt ja kas inimestel on suutlikkus sellele reageerida (Hansson jt, 2020, 2021).

Seejärel hindavad osalejad ohtude ja teenuste katkestuste kumulatiivset mõju erinevatele inimrühmadele. Analüüsitakse inimeste haavatavuse seisundeid, mis kujunevad puudujääkide tõttu inimese tervises, hoiakutes, oskustes ja sotsiaalses tugivõrgustikus. Arvestatakse, et haavatavust võivad põhjustada nii varasemad hädad (nt kroonilised haigused, vaesus või vähesed toimetulekuoskused) kui ka ohusündmuse tagajärjel tekkinud probleemid, nagu tervise- või varaline kahju.

Iga haavatavas seisus rühma puhul hinnatakse, kas ja kui kiiresti need inimesed võiksid analüüsitava ohustsenaariumi korral abi vajada: kas juba enne sündmust, viivitamatult ohu tekkides, 6, 24 või 72 tunni jooksul või pikema aja vältel. Osalejad määratlevad küsimustikus konkreetsele rühmale vajaliku abi tüübi: meditsiiniline (nt erakorraline arstiabi, haiglaravi), pääste (nt evakuatsioon), julgeolek (nt politsei, kaitsevägi), sotsiaalabi (nt nõustamine ja erakorraline materiaalne abi) ning teave (riskikommunikatsioon ja ohuteavitus). Osalejad täpsustavad, kes peaks aitama konkreetseid haavatavaid rühmi. Abi võivad pakkuda nii kohalikud omavalitsused, tervishoiu-, pääste-, politsei- ja sotsiaalteenuste osutajad kui ka kogukonnaorganisatsioonid või vabatahtlikud (sh eraettevõtted).

Taolise triaažiprotsessi tulemusena valmib haavatavuse aruanne: tabel, kus mõjutatud elanikkonnarühmad on loetletud abivajaduse pakilisuse alusel ning kus on täpsustatud, millist tüüpi abi on vaja ja millised asutused peaksid seda pakkuma.

Alates 2022. aastast on meie uurimisrühm koos Päästeametiga viinud ligi 400 eksperdi osalusel läbi haavatavuse triaaži simulatsiooniharjutusi erinevate ohustsenaariumide põhjal. Ühe näitena analüüsiti pikaajalist elektrikatkestust, mille põhjustasid tugev lumesadu, jäide ja torm, mis tõi kaasa elektri-, vee-, side- ja transpordikatkestused ning elamute jahtumise. Aruteludes nähti peamiste ohuallikatena elamiskõlbmatuid kodusid, raskendatud ligipääsu tervishoiu- ja sotsiaalteenustele, sidekatkestusi ning pääste- ja hooldusteenuse ülekoormust. Pikaajalise elektrikatkestuse stsenaariumi korral hinnati, et viivitamatut abi vajavad inimesed, kelle elu ja tervis sõltuvad elektrist või pidevast hooldusest, näiteks elektriliste meditsiiniseadmete kasutajad ja raskelt haiged. Hiljemalt kuue tunni jooksul võivad vajada tuge piiratud liikumisvõimega, dementsusega või hooldusasutustes viibivad inimesed ning need, kelle toimetulekut raskendavad vähesed teadmised, usaldamatus ametlike allikate vastu või keelebarjäärid. Neile tuleb tagada soojus, joogivesi, valgus, usaldusväärne ohuteavitus ning vajadusel ajutine majutus ja kogukondlik tugi. 24 tunni jooksul võivad vajada abi väikelastega pered, üksi elavad eakad, puudega ja krooniliselt haiged inimesed ning need, kellel puuduvad kriisivarud või alternatiivne elukoht. Nende toetamiseks on oluline kogukondlik abi, aga ka kerksuskeskuste, sotsiaalpindade ning joogivee ja laadimisvõimaluste tagamine omavalitsuse ja elutähtsate teenuste osutajate poolt.

Triaažisüsteemi edasiarendusena uurime, milliseid arendustöid on vaja elanikkonnakaitse asutustes teha, et need suudaksid paremini inimeste haavatavust vähendada ning erisugusteks tuleviku ohuolukordadeks valmistuda.

Kokkuvõte

Elanikkonnakaitse keskne ülesanne on kujundada piisavalt paindlik tugivõrgustik, mis arvestab inimeste vajaduste, võimaluste ja haavatavustega ega jäta kedagi abita. See tähendab, et ohusündmusteks valmistumisel tuleb hinnata, kas suudetakse toetada ka neid, kelle vajadused ei mahu nii-öelda tavapäraste raamide sisse. Tugivõrgustikud ja ametlikud teenused ei toimi ühtlaselt ega universaalselt, mistõttu võib osa inimesi jääda hädaolukorras toeta või teadmatusse. Ohuolukordade mõtestamisel ja ennetamisel on võtmetähtsusega süsteemne lähenemine, mis ühendab individuaalse toimevõime, sotsiaalsed võrgustikud ning institutsionaalse ja tehnilise suutlikkuse, et tuvastada ja vähendada ka varjatud haavatavusi. Elanikkonnakaitse peab lähtuma kahju minimeerimise, abi maksimeerimise ja inimväärikuse kaitse põhimõtetest, vältides tõrjumist ja diskrimineerimist.

Tänuavaldus

Südamlik tänu kõigile kaastöötajatele, doktorantidele ja nooremteaduritele, kelle pühendumus, analüütiline panus ja järjepidev töö aitasid kaasa selle uuringute tsükli valmimisele. Samuti avaldame tänu Eesti Siseministeeriumile, Päästeametile, Terviseametile, Sotsiaalkindlustusametile ning kohalikele oma-

valitsustele ja teistele elanikkonnakaitsega tegelevatele asutustele Eestis ja Euroopas, kelle teadmised ja koostöö on oluliselt rikastanud meie uuringuid. Täname Euroopa Komisjoni rahastatud projekte ROADMAP2 (Horizon 2020, grant 883464), BuildERS (Horizon 2020, grant 822421) ja SYNERGIES (Horizon Europe, grant 101094340) väärtusliku toe eest.

VIITED

Aav, K., Joao-Hussar, I., Hansson, S., Orru, K. 2025. Communication-Related Vulnerability of War Refugees: The Case of Ukrainians Escaping Russia's Invasion. Risk, Hazards & Crisis in Public Policy, 16(3), e70032, https://doi.org/10.1002/rhc3.70032

European Commission. 2023. Commission Recommendation of 8 February 2023 on Union disaster resilience goals 2023/C 56/01.

Hansson, S., Orru, K., Siibak, A., Bäck, A., Krüger, M., Gabel, F., Morsut, C. 2020. Communication-related vulnerability to disasters: A heuristic framework. International Journal of Disaster Risk Reduction, 51, 101931, https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101931

Hansson, S., Orru, K., Torpan, S., Bäck, A., Kazemekaityte, A., Meyer, S. F., Ludvigsen, J., Savadori, L., Galvagni, A., Pigrée, A. 2021. COVID-19 information disorder: Six types of harmful information during the pandemic in Europe. Journal of Risk Research, 24(3–4), 380–393, https://doi.org/10.1080/13669877.2020.1871058

Kuran, C. H. A., Morsut, C., Kruke, B. I., Krüger, M., Segnestam, L., Orru, K., Nævestad, T. O., Airola, M., Keränen, J., Gabel, F., Hansson, S., Torpan, S. 2020. Vulnerability and vulnerable groups from an intersectionality perspective. International Journal of Disaster Risk Reduction, 50, 101826, https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101826

Morsut, C., Kuran, C., Kruke, B. I., Nævestad, T., Orru, K., Hansson, S. 2022b. A critical appraisal of individual social capital in crisis response. Risk, Hazards & Crisis in Public Policy, 13(2), 176–199, https://doi.org/10.1002/rhc3.12236

Morsut, C., Kuran, C., Kruke, B. I., Orru, K., Hansson, S. 2022a. Linking resilience vulnerability, social capital and risk awareness for crisis and disaster research. Journal of Contingencies and Crisis Management, 30(2), 137–147, https://doi.org/10.1111/1468-5973.12375

Nero, K., Orru, K., Nævestad, T-O., Olson, A., Airola, M., Savadori, L., Kazemekaityte, A., Lovasz, G., Kajganovic, J. 2023a. Mechanisms behind COVID-19 scepticism among socially marginalised individuals in Europe. Journal of Risk Research, 26(6), 675–696, https://doi.org/10.1080/13669877.2023.2208119

Nero, K., Orru, K., Nævestad, T.-O., Olson, A., Schobert, M., Windsheimer, P., Keränen, J., Jukarainen, P., Kajganovic, J. 2023b. Care organisations role as intermediaries between the authorities and the marginalised in crisis management. International Journal of Disaster Risk Reduction, 86, 103516, https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103516

Niinistö, S. 2024. Safer Together: Strengthening Europe's Civilian and Military Preparedness and Readiness. European Commission, https://commission.europa.eu/document/download/5bb2881f-9e29-42f2-8b778739b19d047c_en

Orru, K., Hansson, S., Gabel, F., Tammpuu, P., Krüger, M., Savadori, L., Meyer, S. F., Torpan, S., Jukarainen, P., Schieffelers, A., Lovasz, G., Rhinard, M. 2022. Approaches to 'vulnerability' in eight European disaster management systems. Disasters, 46(3), 742–767, https://doi.org/10.1111/disa.12481

Orru, K., Hansson, S., Nero, K. 2025. Social vulnerability triage: A dynamic scenario-based system for disaster planning and response. Journal of Risk Research, 28(6), 549–570, https://doi.org/10.1080/13669877.2025.2522660

Orru, K., Klaos, M., Nero, K., Gabel, F., Hansson, S., Nævestad, T. 2023. Imagining and assessing future risks: A dynamic scenario-based social vulnerability analysis framework for disaster planning and response. Journal of Contingencies and Crisis Management, 31(4), 995–1008, https://doi.org/10.1111/1468-5973.12436

Orru, K., Nero, K., Nævestad, T., Schieffelers, A., Olson, A., Airola, M., Kazemekaityte, A., Lovasz, G., Scurci, G., Ludvigsen, J., De Los Rios Pérez, D. A. 2021. Resilience in care organisations: Challenges in maintaining support for vulnerable people in Europe during the Covid-19 pandemic. Disasters, 45(S1), https://doi.org/10.1111/disa.12526

Orru, K., Nævestad, T-O. 2023. "What makes individuals fall through the safety nets during disasters?" special issue in International Journal of Disaster Risk Reduction. International Journal of Disaster Risk Reduction, 96, 103874, https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103874

Orru, K., Nævestad, T-O., Siimsen, I., De Los Rios Pérez, D. A., Egner, L. E. 2023. Less is more? Why do we find less severe mental and material impact of COVID-19 among the most marginalised and homeless in countries with lower welfare spending? International Journal of Disaster Risk Reduction, 97, 104034, https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.104034

Schobert, M., Orru, K., Gabel, F., Nero, K., Windsheimer, P., Klaos, M., Nævestad, T-O. 2023. The three A's of social capital in crises: Challenges with the availability, accessibility and activatability of social support. International Journal of Disaster Risk Reduction, 92, 103704, https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103704

Siimsen, I., Orru, K., Naevestad, T-O., Nero, K., Olson, A., Kaal, E., Meyer, S. F. 2023. Socio-economic outcomes of COVID-19 on the marginalised: Who have taken the hardest hit? International Journal of Disaster Risk Reduction, 93, 103723, https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103723

UNDRR. 2015. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

Foto: Erlend Štaub

Kati Orru

Sündinud 4. augustil 1982 Tartus

2000	Rannu Keskkool
2004	Tartu Ülikool, sotsioloogia- ja sotsiaalpoliitika (BA)
2006	Tartu Ülikool, sotsioloogia (MA)
2011	King's College London, riskihaldus (PhD)
2025–...	riskisotsioloogia professor Tartu Ülikooli ühiskonnateaduste instituudis.

Teadusajakirja International Journal of Disaster Risk Reduction toimetuskolleegiumi liige. Osalenud Eesti-poolse juhina mitmetes Euroopa Komisjoni teadusprojektides, mis käsitlevad kriisivalmidust, sotsiaalset haavatavust, kogukondade kaasamist ja riskikommunikatsiooni.

Avaldanud üle 70 eelretsenseeritud teadustöö riskisotsioloogia ja keskkonnasotsioloogia valdkondades.

Sten Hansson

Sündinud 27. märtsil 1978 Tartus

1996	Miina Härma Gümnaasium
2002	Tartu Ülikool, ajakirjandus (BA)
2012	Lancasteri Ülikool, diskursuseuuringud (MA)
2016	Lancasteri Ülikool, lingvistika (PhD)
2021–...	kommunikatsiooniuuringute kaasprofessor Tartu Ülikooli ühiskonnateaduste instituudis.
2020–2022	Marie Skłodowska-Curie külalisteadur Birminghami ülikoolis.

Teadusajakirjade Discourse, Context & Media ning Journal of Language and Politics toimetuskolleegiumi liige.

Avaldanud üle 50 eelretsenseeritud teadustöö diskursuseuuringute, poliitilise kommunikatsiooni ja riskisotsioloogia valdkondades.

https://doi.org/10.3176/evp.2026.09

EUROOPA MUUTUMISE MAKROÖKONOOMILISED PÕHJUSED JA TAGAJÄRJED: VALITUD UURIMUSED[11]

Karsten Staehr (Tallinna Tehnikaülikool)[12]

Teaduspreemia sotsiaalteaduste valdkonnas tööde tsükli „Euroopa muutumise makroökonoomilised põhjused ja tagajärjed" eest

1. Sissejuhatus

Euroopa on kolme aastakümne jooksul alates Berliini müüri langemisest 1989. aastal läbi teinud fundamentaalseid muutusi. Need muutused on ümber kujundanud Euroopa poliitilise kaardi, kuna Kesk- ja Ida-Euroopas on juurdunud demokraatia ning Euroopa-sisene integratsioon ja koostöö on tugevnenud. Poliitilised muutused on mõnel juhul viinud isegi riigipiiride ümberjoonistamiseni.

Poliitiliste muutustega on Euroopas kaasnenud samavõrd fundamentaalsed majanduslikud muutused. Nende hulka kuuluvad kommunismijärgne üleminek turumajandusele, ühisraha kasutuselevõtt, 2008. aasta ülemaailmne finantskriis, Euroopa võlakriis, koroonapandeemia ning energiakriis pärast Venemaa täiemahulist sissetungi Ukrainasse 2022. aastal. Need ja teised arengud on muutnud Euroopa riikide makromajanduslikku keskkonda ning toonud kaasa uusi väljakutseid, aga ka uusi võimalusi. Koostöö, integratsiooni ja majanduskasvu faasidega on vaheldunud konfliktide, killustumise ja majanduskriiside faasid.

Käesolev artikkel annab ülevaate 13 uurimusest, mille on kirjutanud Karsten Staehr koos kaasautoritega ja mis moodustavad ühiselt uurimistsükli „Euroopa muutumise makroökonoomilised põhjused ja tagajärjed". Artikkel on temaatiliselt jaotatud kolme põhivaldkonda: majanduskasvu ja reaalse konvergentsi uurimused, inflatsiooni ja selle mõjutegurite uurimused ning makrofinantsstabiilsuse ja institutsioonide uurimused.

---

[11] Autor soovib tänada lektor PhD Signe Rosenbergi väärtusliku panuse ja abi eest käesoleva artikli kirjutamisel. Artiklis väljendatud seisukohad on autori omad ega pruugi kajastada nende institutsioonide seisukohti, millega ta on seotud.

[12] Tallinna Tehnikaülikool, Akadeemia tee 3-479, 12618 Tallinn, Estonia. E-post: karsten.staehr@taltech.ee. Mobiil: +372 58161415.

Kõik uurimused on empiirilised. Neis kasutatakse Euroopa riikide makromajanduslikke andmeid ning statistilisi või ökonomeetrilisi meetodeid, et tuvastada andmetes esinevaid seoseid. Empiirilised meetodid ulatuvad lihtsast regressioonanalüüsist keerukate mudeliteni, mis kirjeldavad paljude muutujate vahelisi seoseid. Eesmärk on tuvastada ajaloolisi seoseid ja teha nende põhjal järeldusi, mis võivad olla olulise tähtsusega majanduspoliitika kujundamisel.

2. Majanduskasv ja reaalne konvergents

Sisemajanduse koguprodukt (ehk lühendina SKP) on kõigi riigi eraettevõtete ja avaliku sektori institutsioonide loodud lisandväärtuse summa. SKP näitab ressursse, mis on kättesaadavad tarbimiseks, investeeringuteks, avalikeks kulutusteks ja ekspordiks. Sageli on mõttekas arvutada SKP elaniku kohta ning mõnel juhul korrigeerida seda hinnataseme või ostujõuga, et näitaja peegeldaks paremini ostujõudu. SKP-d elaniku kohta või ostujõuga korrigeeritud SKP-d elaniku kohta kasutatakse sageli riigi elanike majandusliku heaolu ligikaudsete mõõdikutena.

Sellest tulenevalt on SKP ja SKP kasvumäära dünaamika makromajanduse keskmes ning neid näitajaid jälgivad tähelepanelikult ministeeriumid, keskpangad, ettevõtted, rahvusvahelised organisatsioonid ja laiem avalikkus. Käesolevas osas käsitletakse nelja uurimust, mille eesmärk on hinnata SKP või SKP kasvumäära dünaamikat ning tuvastada nende arengute võimalikke mõjutegureid.

Lu ja Staehri (2025) uurimus „Revisiting economic growth and real convergence in the post-communist countries“ annab põhjaliku ümberhinnangu pikaajalisele majanduslikule konvergentsile 30 postkommunistlikus riigis, põhinedes perioodi 1995–2023 andmetele. Uurimus panustab postkommunistlikku üleminekut käsitlevasse kirjandusse, laiendades varasemate analüüside ajahorisonti ning hõlmates kõiki postkommunistlikke majandusi, mitte üksnes Kesk- ja Ida-Euroopa riike. Kirjeldava analüüsi, ökonomeetrilise hindamise ja endogeensete klasterdusmeetodite kombinatsiooni abil uuritakse, kas vaesemad postkommunistlikud riigid on vähendanud sissetulekute lõhet Lääne-Euroopaga.

Uurimus tugineb neoklassikalisele kasvuteooriale, mille kohaselt peaksid vaesemad majandused kasvama kiiremini kui jõukamad majandused kapitali kahaneva piirtootlikkuse tõttu. Samal ajal kasutatakse ka endogeense kasvuteooria käsitlust, mille järgi institutsionaalsed ja struktuursed piirangud võivad majanduskasvu takistada. Need kaks teoreetilist raamistikku ajendavad artiklis nii tingimusteta kui ka tingimusliku konvergentsi analüüsi.

Kirjeldav analüüs näitab, et aastatel 1995–2023 vähendasid kõik 30 postkommunistlikku riiki oma sissetulekute lõhet võrreldes EL15 riikide keskmisega. EL15 tähistab 15 Lääne-Euroopa riiki, kes ühinesid Euroopa Liiduga (EL) esimestena. Regressioonanalüüsides testitakse beetakonvergentsi ehk seda, kas vaesemad riigid on süstemaatiliselt kasvanud kiiremini kui rikkamad riigid. Kogu 30 riigist

koosneva valimi puhul hinnati konvergentsimääraks ainult ligikaudu 1%, mis tähendab, et keskmiselt väheneb postkommunistlike riikide ja EL15 vaheline sissetulekute lõhe vaid 1% aastas. See jääb alla beetakonvergentsi uurimustes sageli täheldatavale 2% võrdlusalusele.

Üldiselt pettumust valmistav tulemus varjab märkimisväärseid erinevusi riikide gruppide vahel. Grupipõhine beetakonvergentsi analüüs näitab, et konvergentsi kiirus varieerub piirkonniti märgatavalt. Kesk- ja Ida-Euroopa riigid, sealhulgas Eesti, saavutasid kõige kiirema kasvu ning nende beetakonvergentsi määr ulatus ligikaudu 5%-ni. Balkani riikides ja paljudes endistes Nõukogude Liidu vabariikides oli konvergents aga aeglane või puudus üldse. Majanduskasvu ja konvergentsi protsess on seega eri riikide gruppides olnud väga erinev.

Tingimusliku beetakonvergentsi edasine analüüs näitab, et valitsemiskvaliteeti mõõtev näitaja on peamine tegur, mis selgitab riikidevahelist heterogeensust ning mõjutab hinnatud konvergentsi kiirust. Teised tegurid, sealhulgas reformide intensiivsus ja poliitiline liberaliseerumine, ei osutu tähtsateks. Paljude postkommunistlike riikide aeglast konvergentsi võib seega osaliselt seletada valitsemiskvaliteedi ja institutsionaalse arenguga nendes riikides.

Staehri (2025) uurimus „Economic growth, current account dynamics, and growth regimes in the Baltic States“ keskendub kolme Balti riigi majanduskasvu dünaamikale ajavahemikul 1990. aastate keskpaigast kuni 2021. aastani, pöörates erilist tähelepanu majanduskasvu ja jooksevkonto saldo (kaubandusbilansi indikaator) seosele. Uurimuses väidab autor, et Balti riigid läbisid kaks erinevat lühiajalist kasvurežiimi: kriisieelse režiimi, mida vedasid sisenõudlus ja väliskapitali sissevool, ning kriisijärgse režiimi, mida iseloomustasid ekspordipõhine kasv ja suurem väline jätkusuutlikkus.

Perioodil 1995–2007 saavutasid Balti riigid kiire SKP kasvu ja lähenesid Lääne-Euroopa sissetulekutasemele. Selle laienemisega samaaegselt toimus ulatuslik kapitali sissevool, mida soodustasid finantsliberaliseerimine, EL-iga ühinemise väljavaated ja välispankade aktiivsus piirkonnas. Tulemuseks olid väga suured jooksevkonto puudujäägid, kuid samal ajal ka kõrged majanduskasvu määrad, mida vedasid laenurahastatud tarbimise ja investeeringute nõudlus.

Ülemaailmne finantskriis tõi selle kasvurežiimi haavatavuse selgelt esile. Kapitalivoogude järsk tagasipöördumine põhjustas aastatel 2008–2009 kõigis kolmes riigis sügava majanduslanguse. Pärast kriisi majanduskasv küll taastus, kuid märksa aeglasemas tempos. Uurimuses väidetakse, et aeglustumine peegeldas struktuurset muutust Balti riikide kasvurežiimis, mitte pelgalt tsüklilist langust. Kriisijärgsel perioodil toetas majanduskasvu välisnõudlus, mis väljendus jooksevkonto saldo paranemises.

Selle väite toetuseks tehakse artiklis paneelandmete ökonomeetriline analüüs, mis rakendab näiliselt mitteseotud regressioonide (SUR) meetodit. Tulemused näitavad, et enne kriisi oli majanduskasv jooksevkonto saldoga negatiivselt

seotud: kiirem kasv oli seotud suurema jooksevkonto puudujäägiga. Pärast kriisi muutus seos positiivseks, mis tähendab, et tugevam kasv seostus jooksevkonto paranemise ja ekspordi tugevnemisega.

Uurimuse järeldus on, et Balti riigid liikusid enne ülemaailmset finantskriisi väislaenudel põhinenud jätkusuutmatult kasvurežiimilt kriisijärgselt tasakaalukamale ja vastupidavamale, välisnõudlusel põhinevale kasvumudelile. Kasvumäärad on Baltimaades pärast kriisi olnud palju madalamad, aga uus kasvurežiim on viinud ka välisvõla vähenemisele ja makromajandusliku stabiilsuse paranemisele.

EL-i eesmärk on edendada sotsiaalmajanduslikku konvergentsi liidu piirkondade vahel. Üks peamisi poliitikainstrumente on Euroopa struktuuri- ja investeerimisfondid (ESIF), mille eesmärk on toetada tasakaalustatud majandusarengut ja investeeringuid. Staehri ja Urke (2022) uurimus „The European structural and investment funds and public investment in the EU countries“ hindab ESIF-i erinevate fondide väljamaksete mõju avaliku sektori investeeringutele EL-i riikides. Uurimus on ajendatud avaliku sektori investeeringute vähenemisest paljudes EL-i riikides pärast ülemaailmset finantskriisi, hoolimata infrastruktuuri ja kapitalikulutuste olulisusest pikaajalise majanduskasvu jaoks.

Analüüs põhineb aastastel andmetel kõigi EL-i riikide kohta perioodil 2000–2018 ning kasutab dünaamilisi paneelandmete spetsifikatsioone. Analüüs keskendub neljale peamisele EL-i rahastusallikale: Euroopa Regionaalarengu Fond (ERF), Ühtekuuluvusfond (ÜF), Euroopa Sotsiaalfond (ESF) ning maaelu arengu ja kalanduse fond. Ühtekuuluvusfond rahastab peamiselt infrastruktuuri- ja keskkonnaprojekte madalama sissetulekutasemega EL-i piirkondades, samas kui teistel fondidel on laiemad sotsiaalsed ja regionaalsed eesmärgid. Põhiküsimuseks on, kas Euroopa struktuuri- ja investeerimisfondide rahastamine toob kaasa „täiendavuse“ täiendavate avaliku sektori investeeringute näol või asendab see lihtsalt riiklikke kulutusi.

Empiirilised tulemused näitavad märkimisväärseid erinevusi fondide vahel. Ühtekuuluvusfondi rahastamisel on tugev ja statistiliselt oluline seos avaliku sektori investeeringutega, avaldades lühiajaliselt peaaegu üksühest ning pikemas perspektiivis veelgi suuremat mõju. Positiivsed mõjud ilmnevad eriti Kesk- ja Ida-Euroopa riikides, mis saavad suurima osa Ühtekuuluvusfondi vahenditest. Euroopa Regionaalarengu Fondi mõju avaliku sektori investeeringutele on seevastu nõrk ja ebatäpne, samal ajal kui Euroopa Sotsiaalfondi ning maaelu arengu fondide rahastusel puudub seos avaliku sektori investeeringutega.

Uurimuse järeldus on, et ESIF-i rahastus võib soodustada avaliku sektori investeeringuid juhul, kui rahastus on selgelt sihistatud, nagu Ühtekuuluvusfondi puhul. Laiema eesmärgiga sotsiaalsed ja regionaalsed programmid ei näi aga avaliku sektori investeeringute taset suurendavat. Tulemused seetõttu rõhutavad poliitikakujunduse ja vahendite jaotamise mehhanismide tähtsust selle tagamisel, et EL-i finantstoetus soodustaks jätkusuutlikku majanduslikku konvergentsi.

Eksport on paljudel juhtudel majanduskasvu peamiseks vedajaks. Staehri (2021) uurimus „Export performance and capacity pressures in Central and Eastern Europe“ analüüsib, kas erinevad tootmisvõimsuse kasutuse näitajad võivad aidata prognoosida Kesk- ja Ida-Euroopa 11 EL-i liikmesriigi ekspordi dünaamikat.

Uurimuses hinnatakse erinevaid dünaamilisi fikseeritud efektidega mudeleid, kasutades perioodi 2001–2019 aastaseid paneelandmeid. Sõltuvaks muutujaks on ekspordi kasv, selgitavateks muutujateks aga konkurentsivõime erinevad mõõdikud ja mõned kontrollmuutujad. Analüüs näitab, et kulu või hinna konkurentsivõime näitajatel, näiteks reaalsel efektiivsel vahetuskursil ja suhtelistel tööjõu ühikukuludel, on ekspordi kasvu prognoosimisel väike või üldse puuduv selgitusvõime. Seevastu tootmisvõimsuse kasutuse, töötuse määra ja SKP lõhe näitajad osutuvad tugevateks ja usaldusväärseteks ekspordi ennustajateks.

Uurimus paigutab need tulemused tootmisvõimsuse kasutuse hüpoteesi raamistikku, mille kohaselt piiratud tootmisvõimsusega ettevõtted priotiseerivad sisenõudlust ekspordile. Vastupidiselt aga, kui on kasutamata tootmisvõimsust, on ettevõtted valmis rohkem eksporti laiendama. Uurimuse tulemused toetavad seda hüpoteesi Kesk- ja Ida-Euroopa majanduste puhul ning viitavad sellele, et ekspordikäitumise prognoosimisel on kvantitatiivsed tootmispiirangud olulisemad kui suhtelised hinnad.

Tulemused püsivad ka mitmete täiendavate testide korral, sealhulgas alternatiivsete riigivalimite, kvartaalsete andmete, kaupade ekspordi mudelite ja paneelvektorautoregressiooni analüüside puhul. Kõigis spetsifikatsioonides jäävad tootmisvõimsuse kasutuse näitajad olulisteks ekspordi ennustajateks. Uurimus tõstatab võimaluse, et eksport võib majanduslanguste ajal toimida automaatse stabilisaatorina, sõltumata hinnamuutustest, pakkudes seeläbi olulisi teadmisi avatud majanduste makromajanduslike kohanemismehhanismide kohta.

3. Inflatsiooni põhjused ja tagajärjed

Inflatsioon ehk üldise hinnataseme tõus esineb enamikus riikides alati, kuid inflatsioonimäär erineb palju. Euroopa riikides püsis inflatsioon pärast ülemaailmset finantskriisi ja Euroopa võlakriisi aastaid madalal tasemel ning mõnes riigis oli see isegi negatiivne. Seevastu 2022. aastal kiirenes inflatsioon järsult pärast majanduste taasavamist COVID-19 pandeemiaga seotud piirangute lõppemise järel ning Venemaa agressiooni Ukrainas. Kõrge ja kõikuv inflatsioonimäär vähendab raha ostujõudu ning raskendab lepingute sõlmimist ja majandusotsuste kavandamist nii kodumajapidamiste, ettevõtete kui ka avaliku sektori jaoks. Need asjaolud rõhutavad vajadust uurida põhjalikumalt inflatsiooni kujunemise põhjuseid ja tagajärgi.

Liepnieksi jt (2026) ning Staehri ja Tkacevsi (2025) uurimused on omavahel tihedalt seotud, kuna nende eesmärk on hinnata erinevate šokkide panust euroala riikide inflatsiooni kujunemisse pärast euro kasutuselevõttu.

Liepnieksi jt (2026) uurimus „Contributions of demand and supply shocks to inflation in the euro area countries“ aktsepteeriti avaldamiseks juba 2024. aastal, kuid ilmus trükis alles kaks aastat hiljem. Uurimus analüüsib kogunõudluse ja kogupakkumise šokkide panust inflatsioonidünaamikasse euroala 12 asutajariigis, kasutades kvartaalseid andmeid 1999. aasta esimesest kvartalist kuni 2023. aasta esimese kvartalini. Uurimuse oluliseks panuseks on fokusseerimine üksikutele euroala riikidele, mitte euroalale tervikuna.

Analüüs põhineb Bayesi vektorautoregressiooni (BVAR) märgipiirangutega mudelitel. Kahe šoki panuse hindamiseks igas kvartalis iga riigi puhul kasutatakse ajaloolisi dekompositsioone. Šokkide identifitseerimine tugineb teoreetilisele eeldusele, et nõudlus- ja pakkumisšokid mõjutavad toodangu kasvu ja inflatsiooni erinevalt. Nõudlusšokkide korral liiguvad toodangu kasv ja inflatsioon samas suunas, samas kui pakkumisšokkide korral liiguvad need vastassuunaliselt.

Uurimuse tulemused näitavad, et nõudlus- ja pakkumisšokid on inflatsiooni kujunemisel üldjoontes võrdselt olulised mõjutegurid, kuid nende suhteline tähtsus varieerub ajas. Nõudlusšokid näivad domineerivat ülemaailmse finantskriisi ajal. Üllatuslikult paistab järgnenud võlakriisi ajal, et nii nõudlus- kui ka pakkumisšokid andsid võrdse panuse madalasse ja sageli negatiivsesse inflatsiooni, mis oli suurel määral seotud selle perioodi väga madalate naftahindadega. Koroonapandeemia ajal domineerisid nõudlusšokid, samas kui 2022. aastal, mil Venemaa alustas täiemahulist sissetungi Ukrainasse ning energiahinnad seejärel järsult tõusid, olid need kaks šokki inflatsiooni kujunemisel ligikaudu võrdse tähtsusega. Kaheteistkümne euroala riigi vahel ilmnevad märgatavad erinevused, eriti kriisiperioodidel.

Staehri ja Tkacevsi (2025) uurimus „The euro at 25: how shocks and policies contributed to inflation in the euro area member countries“ tugineb Liepnieksi jt (2026) uurimusele, kuid püüab leida lahendust mõningaid selle piiranguid. Kui varasemas uurimuses käsitleti kaht agregeeritud šokki, siis antud uurimuses vaadeldakse kuut erinevat šokki ehk inflatsiooni mõjutavat tegurit: euroala ja kodumaiseid nõudlusšokke, euroala ja kodumaiseid pakkumisšokke ning rahapoliitilisi ja fiskaalpoliitilisi šokke. Ka selles uurimuses identifitseeritakse šokid märgipiirangute abil, kuid identifitseerimine on märksa keerukam, arvestades suuremat šokkide arvu, nii kodu- kui ka välismaiste šokkide olemasolu ning asjaolu, et rahapoliitilised šokid on ühised kõigile euroala riikidele. Tulemuste usaldusväärsuse tagamiseks viiakse läbi suur hulk püsivuskontrolle, mis kinnitavad, et saadud hinnangud ei ole tundlikud konkreetsete identifitseerimiseelduste suhtes.

Kaheteistkümne euroala riigi kohta koostatud ajaloolised dekompositsioonid näitavad, et kõik kuus šokki on inflatsiooni mõjutanud, kuigi nende suhteline tähtsus varieerus nii riikide kui ka ajaperioodide lõikes. Inflatsioonidünaamika selgitamisel mängisid nõudlusšokid – nii kodumaised kui ka euroala-ülesed – üldiselt mõnevõrra suuremat rolli kui pakkumisšokid. Pakkumisšokid osutusid eriti oluliseks kriisiperioodidel, eelkõige pärast COVID-19 pandeemiat

ja Venemaa täiemahulist sissetungi Ukrainasse, mil energiahindade tõus ja tarnehäired suurendasid inflatsioonisurvet. Ka raha- ja fiskaalpoliitilistel šokkidel oli inflatsioonile mõningane mõju.

Ajaloolised dekompositsioonid toovad esile ka märkimisväärse heterogeensuse euroala riikide vahel. Lõuna-Euroopa majandused, nagu Hispaania, Portugal ja Kreeka, kogesid enne ülemaailmset finantskriisi tugevaid inflatsioonilisi nõudlus- ja fiskaalpoliitilisi šokke, samas kui Saksamaa inflatsioonidünaamika oli suuresti seotud kodumaise nõudluse ja pakkumispoolsete arengutega. Hoolimata ühisest rahapoliitilisest raamistikust erines šokkide ülekandumine riikide vahel märgatavalt, eriti majanduskriiside perioodidel.

Degleri ja Staehri (2021) uurimus „Price and income convergence and the dynamic Penn effect in Central and Eastern Europe“ käsitleb samuti inflatsiooni mõjutavaid tegureid, kuid lähtub pikaajalisest perspektiivist. Uurimus analüüsib sissetulekute konvergentsi ja hinnatasemete konvergentsi vahelist seost 11 Kesk- ja Ida-Euroopa (KIE) riigis ajavahemikul 1995–2018.

Uurimus keskendub dünaamilisele Penni efektile, mille kohaselt kipuvad kiirema SKP kasvuga riigid kogema kõrgemat inflatsioonimäära kui võrdlusrühma riigid, kui hinnatasemeid mõõdetakse samas valuutas. Teisisõnu tähendab see, et kiiresti kasvavad majandused kipuvad aja jooksul kogema reaalse vahetuskursi kallinemist. Dünaamilise Penni efekti olemasolu KIE riikides on oluline uurida, kuna reaalse vahetuskursi kallinemine võib ebasoodsalt mõjuda inflatsioonile, vähendada väliskonkurentsivõimet ning euro kasutuselevõtuks vajalike Maastrichti kriteeriumide täitmist.

Aastaste paneelandmete põhjal rakendatakse uurimuses ühendatud keskmiste rühma (PMG) hindamismeetodit, et modelleerida nii pika- kui ka lühiajalisi seoseid SKP elaniku kohta ja SKP deflaatorite vahel. PMG-meetod valiti seetõttu, et see võimaldab eeldada riikideülest ühist pikaajalist tasakaaluseost, lubades samal ajal lühiajaliste kohandumisdünaamikate heterogeensust.

Analüüs kinnitab, et vaadeldud perioodil esines Kesk- ja Ida-Euroopa riikides dünaamiline Penni efekt. Pikaajaliselt on kõrgem sissetulekutase seotud kõrgema hinnatasemega, võrreldes Lääne-Euroopa riikide grupiga. Samuti leitakse, et konvergeerumine pikaajalise tasakaaluseose suunas on suhteliselt aeglane: keskmiselt korrigeeritakse 11 KIE riigi puhul ligikaudu 30% pikaajalisest tasakaaluseosest kõrvalekaldumistest ühe aasta jooksul. See tähendab, et majanduskasv on KIE riikides tekitanud reaalse vahetuskursi kallinemise survet, mis fikseeritud vahetuskursiga riikides väljendub kõrgema inflatsioonina. Uurimus leiab ka märkimisväärse heterogeensuse riikidevahelises konvergentsiprotsessis. Rumeenia ja Leedu puhul toimub konvergents suhteliselt kiiresti, samas kui Tšehhi, Slovakkia, Sloveenia ja Poola puhul on kohandumine aeglasem või vähem täpselt hinnatav.

Staehri jt (2024) uurimus „Fiscal performance under inflation and inflation surprises: evidence from fiscal reaction functions for the euro area“ ei püüa selgitada

inflatsiooni, vaid keskendub hoopis inflatsiooni mõjudele ehk tagajärgedele. Venemaa täiemahulisele sissetungile Ukrainasse järgnenud kõrgest inflatsioonist ajendatuna uurib töö, kuidas inflatsiooniüllatused on mõjutanud euroala riikide eelarvetulemusi. Selleks hinnatakse fiskaalseid reaktsioonifunktsioone euroala 12 asutajariigi paneelandmetel, kasutades aastaseid andmeid perioodist 1999–2021. Analüüsis rakendatakse süsteemset GMM-hindamismeetodit, mis võimaldab arvestada nii püsivuse kui ka võimaliku pöördpõhjuslikkusega inflatsiooni ja fiskaalnäitajate vahel.

Uurimuses leitakse, et inflatsioonišokkidel on esmasele eelarvepositsioonile statistiliselt ja majanduslikult oluline positiivne mõju. Täpsemalt parandab harmoneeritud tarbijahinnaindeksi (HICP) inflatsiooni ühe protsendipunkti võrra kõrgem tase esmast eelarvepositsiooni lühiajaliselt ligikaudu 0,7 protsendipunkti võrra SKP suhtes. Paranemine tuleneb ühtaegu nii suurematest tuludest kui ka väiksematest kuludest suhtena SKP-sse.

Tulemused osutuvad üsna püsivateks erinevate mudelispetsifikatsioonide, ajaperioodide ning analüüsi kaasatud euroala riikide arvu suhtes. Samuti ei leita tõendeid selle kohta, et inflatsioon mõjutaks eelarvetulemusi erinevalt kõrge inflatsiooni ja madala inflatsiooni perioodidel. Uuringu peamine järeldus on, et inflatsioon, eriti veel ootamatu inflatsioon, võib ajutiselt parandada eelarvetasakaalu. Sellel tulemusel on oluline tähendus euroala riikide võlakoormuse jätkusuutlikkuse hindamisel, arvestades et kõrge inflatsiooni perioodid võivad varjata fundamentaalseid fiskaalseid nõrkusi.

Inflatsioonioootusi peetakse makromajandusliku arengu seisukohalt väga oluliseks, kuna need võivad mõjutada mitte ainult inflatsiooni ennast, vaid ka palgakujundust, SKP kasvu, töötust ja finantsotsuseid. Teema tähtsuse tõttu kogutakse üha rohkem andmeid inflatsioonioootuste kohta ning luuakse uusi andmebaase. See avab uusi ja huvitavaid uurimissuundi.

Kirpsoni ja Staehri (2024) uuring „Do individuals expect the Phillips curve? Evidence from the European Consumer Expectations Survey“ uurib, kas Euroopa tarbijate inflatsioonioootused on kooskõlas Phillipsi kõveraga. Phillipsi kõver kirjeldab negatiivset seost majandusliku lõhe ja inflatsioonimäära vahel ning on üks peamisi makromajandusanalüüsis ja majanduspoliitikas kasutatavaid spetsifikatsioone. Uurimuses analüüsitakse, kas ka üksikisikud eeldavad majandusliku lõhe ja inflatsiooni vahel negatiivset seost.

Uuringus kasutatakse Euroopa Keskpanga korraldatava tarbijate ootuste küsitluse (CES) mikrotasandi andmeid. Tegemist on roteeruva paneeluuringuga, mille andmeid koguti igakuiselt ajavahemikul aprillist 2020 kuni aprillini 2023. Uuring hõlmab kuut euroala riiki: Belgiat, Prantsusmaad, Saksamaad, Itaaliat, Hollandit ja Hispaaniat. CES sisaldab kvantitatiivseid vastuseid inimeste ootuste kohta järgmise 12 kuu inflatsiooni, töötuse ja majanduskasvu osas. Neid ootusi käsitlevaid andmeid kasutatakse paneelandmete analüüsis, kus rakendatakse fikseeritud efektidega mudeleid, et kontrollida küsitletavate isikute ajas muutumatute omaduste mõju.

Vastupidiselt sellele, mida Phillipsi kõver postuleerib, näitavad hinnangud, et oodatava inflatsiooni ja oodatava töötuse vahel esineb positiivne seos ning leitakse ka negatiivne seos inflatsioonioootuste ja oodatava SKP kasvu vahel. Need tulemused kehtivad kõigis kuues vaadeldud riigis ning püsivad erinevate mudelispetsifikatsioonide korral. Tulemused jäävad samaks ka siis, kui kontrollitakse energiahindade tõusu ja teiste pakkumispoolsete tegurite mõju.

Uurimuse järeldus on, et Euroopa tarbijad ei kujunda üldjuhul oma ootusi viisil, mis oleks kooskõlas standardse makromajandusteooriaga. Selle asemel viitavad tulemused sellele, et inflatsiooni ja majandustingimuste ootusi mõjutavad ühiselt inimeste meeleolud ja emotsioonid. See järeldus on kooskõlas varasemate Ameerika Ühendriikide leibkondade andmetel põhinevate uuringutega ning toob esile olulised erinevused professionaalsete prognoosijate ja tavatarbijate ootuste vahel.

4. Makrorahanduslik stabiilsus

Finantssüsteem on nüüdisaegse turumajanduse toimimise seisukohalt võtmetähtsusega. Finantssüsteem võimaldab ressursside ülekandmist ajas ning riskide ülekandmist nende vahel, kes soovivad riske vähendada, ja nende vahel, kes on valmis neid riske kandma. Finantssüsteem võimaldab ettevõtetel rahastada investeeringuid ning teadus- ja arendustegevust. Samuti võimaldab see majapidamistel võtta laenu eluaseme soetamiseks, katta suuri kulutusi ning säästa pensionipõlveks.

Sellest tuleneb, et on äärmiselt oluline, et finantssüsteem toimiks tõhusalt, võimaldades finantstehinguid teha katkestusteta ning ilma ülemääraste hinnakõikumiste ja koguste muutusteta. Finantsilise ebastabiilsuse häirivaid tagajärgi on kogetud korduvalt nii läbi sajandite kui ka eri riikides üle maailma. Panganduskriisid, aktsiaturgude kokkuvarisemised ja valuutakursside järsud langused on põhjustanud inimeste elatise kaotust, vara juhuslikku ümberjaotumist ning tõsiseid makromajanduslikke häireid, millele on järgnenud SKP vähenemine, koondamised ja töötuse kasv. Ka 2008. aasta ülemaailmse finantskriisi järelmõjud on järjekordseks näiteks tõsise finantsilise ebastabiilsuse rasketest majanduslikest ja sotsiaalsetest tagajärgedest.

On oluline säilitada finantsstabiilsus ja enamikus riikides on seetõttu loodud võrgustik avalikele institutsioonidele, mis reguleerivad finantsturge, teostavad järelevalvet üksikute pankade ja teiste finantsasutuste üle ning jälgivad finantssüsteemi arenguid tervikuna. Selline regulatsioon ja järelevalve eeldavad tõenduspõhiseid teadmisi finantssüsteemi toimimisest ning selle vastastikmõjust kogu makromajandusega. See vajab uurimusi, mis analüüsivad finantssüsteemi toimimist, finantsiliste tasakaalustamatuste kuhjumist ning seda, kuidas ebastabiilsus ja ebakindlus levivad riikide vahel. Neli uurimust käsitlevad makrorahandusliku stabiilsuse erinevaid aspekte.

Kirpsoni jt (2024) uurimus „Macroeconomic news and sovereign interest rate spreads before and during quantitative easing“ analüüsib, kuidas Euroopa Keskpanga (EKP) rakendatud kvantitatiivne lõdvendamine mõjutas riskide hinnastamist euroala finantsturgudel. Kvantitatiivse lõdvendamise programm kuulutati välja 2014. aasta suvel ning selle raames ostis EKP suures mahus euroala riikide ja hiljem ka erasektori võlakirju. Programmi eesmärk oli stabiliseerida finantsturge, alandada pikaajaliste võlakirjade intressimäärasid ning seeläbi aidata kaasa inflatsiooni tõstmisele EKP eesmärgiks seatud 2% tasemeni.

Uurimus võrdleb, kuidas makromajanduslikud uudisšokid mõjutasid Itaalia riigivõlakirjade tootluse vahet enne kvantitatiivse lõdvendamise perioodi ja selle ajal. Analüüs põhineb päevastel andmetel aastatest 2012–2018. Itaalia ja Saksamaa võrreldavate riigivõlakirjade tootluste vahet modelleeritakse makromajanduslike uudisšokkide funktsioonina. Uudisšokid arvutatakse avaldatud majandusnäitajate ja turuosaliste varasemate ootuste vahena, kus ootused pärinevad kommertsandmebaasidest kättesaadavatest küsitlustest. Uurimus eristab kaht perioodi: referentsperiood enne kvantitatiivset lõdvendamist ning kokkupuuteperiood pärast EKP varaostuprogrammi väljakuulutamist. Viimane algab pärast EKP presidendi Mario Draghi kõnet Jackson Hole'i konverentsil 2014. aasta augustis, kus ta andis märku peatselt algavatest EKP ulatuslikest varaostudest.

Tulemused näitavad, et enne kvantitatiivset lõdvendamist avaldasid makromajanduslikud uudised Itaalia riigivõlakirjade tootluse vahele nii statistiliselt kui ka majanduslikult olulist mõju. Kvantitatiivse lõdvendamise perioodil muutus see mõju aga peaaegu olematuks, mis viitab sellele, et EKP varaostud isoleerisid riigivõlakirjaturud makromajandusliku informatsiooni mõjust. Kokkuvõttes järeldab uurimus, et kvantitatiivne lõdvendamine muutis riigivõlakirjade hinnastamise dünaamikat, vähendades turgude reageerimist makromajanduslikule informatsioonile, stabiliseerides sellega võlakirjade tootlusi, kuid võis samal ajal vähendada ka Itaalia võlakirjaturu informatsioonilist efektiivsust, mis võib olla ebatraditsioonilise rahapoliitika võimalik ebasoovitav kõrvalmõju.

Eelnev käsitlus näitab, et võtmetähtsusega on tuvastada institutsionaalsed tegurid ja poliitikameetmed, mis mõjutavad tasakaalustamatuste kuhjumist. Staehri ja Uusküla (2021) uurimus „Macroeconomic and macro-financial factors as leading indicators of non-performing loans. Evidence from the EU countries“ uurib, kas erinevad makromajanduslikud ja finantsnäitajad võivad toimida viivislaenude tulevaste arengute juhtivate indikaatoritena.

Viivislaenude suur osakaal võib kahjustada pangandussektori toimimist ning viia lõpuks süsteemse finantsebastabiilsuseni. Selliste probleemide lahendamiseks kasutatavad poliitikameetmed mõjuvad tavaliselt pika viitajaga, näiteks ühe kuni kahe aasta jooksul. Seetõttu on kasulik identifitseerida arenguid, mis on seotud viivislaenude osakaalu suurenemisega tulevikus. Antud uurimus keskendub suhteliselt pikkadele prognoosihorisontidele, ulatudes kuni kahe aastani.

Uurimuses hinnatakse fikseeritud efektidega paneelmudeleid, kasutades 26 EL-i riigi kvartaalseid andmeid ligikaudu kahe aastakümne pikkuse perioodi jooksul. Sõltuvaks muutujaks on viivislaenude osakaal kõigist pangalaenudest protsentides. Baasspetsifikatsioon kasutab kaheksa kvartali pikkust prognoosihorisonti ning seletavate muutujatena kaasatakse viitajaga viivislaenude osakaal koos erinevate makromajanduslike ja makrorahanduslike näitajatega.

Uurimuses leitakse, et viivislaenude osakaal on ajas märkimisväärselt püsiv, kuid ka et mitmel makromajanduslikul ja makrorahanduslikul näitajal on prognoosivõimet. Suurem SKP kasv on järjekindlalt seotud väiksema viivislaenude osakaaluga tulevikus, samas kui kõrgem inflatsioon ja erasektori suurem võlakoormus ennustavad viivislaenude osakaalu suurenemist. Ka jooksevkonto saldo osutub oluliseks juhtivaks indikaatoriks: tugevam saldo ennustab madalamat viivislaenude osakaalu tulevikus. Töötusega seonduvad tulemused erinevad sõltuvalt kasutatud mudelispetsifikatsioonist.

Uurimuse olulisim panus seisneb EL-i Lääne-Euroopa riikide ning Kesk- ja Ida-Euroopa riikide võrdlemises. Kuigi SKP kasv, inflatsioon ja võlakoormus on mõlemas riikide grupis püsivad viivislaenude juhtivad prognoosijad, osutuvad reaalsed eluasemehinnad ja jooksevkonto saldo juhtivateks indikaatoriteks peamiselt Lääne-Euroopas. Nimetatud erinevused peegeldavad tõenäoliselt nende kahe Euroopa piirkonna struktuurseid eripärasid. Uurimus näitab ka, et makromajanduslike ja makrorahanduslike muutujate selgitusvõime suureneb prognoosihorisondi pikenedes.

Uurimuse peamine järeldus on, et makromajanduslikud fundamentaalnäitajad ja finantstingimused pakuvad väärtuslikke varajasi hoiatussignaale pangandussektori tulevaste haavatavuste kohta. Seetõttu võivad tulemused olla kasulikud finantsstabiilsuse seires ning makrofinantsjärelevalve poliitika kujundamisel EL-i riikides.

Harkmanni ja Staehri (2021) uurimus „Current account drivers and exchange rate regimes in Central and Eastern Europe“ käsitleb jooksevkonto arenguid mõjutavaid tegureid 11 Kesk- ja Ida-Euroopa riigis. Analüüsi ajendiks on märkimisväärsed jooksevkonto puudujäägid ning nende hilisemad pöördumised, mida paljud Kesk- ja Ida-Euroopa majandused kogesid, eriti enne ülemaailmset finantskriisi ja selle ajal.

Empiirilises raamistikus modelleeritakse jooksevkonto saldot protsendina SKP-st funktsioonina selle viitajaga väärtuse, kodumaiste makromajanduslike muutujate („tõmbetegurite“) ning euroala tuumikriikide majandusolukorda kajastavate väliste muutujate („tõuketegurite“) funktsioonina. Püsivuse ja võimalike endogeensusprobleemide arvestamiseks kasutatakse fikseeritud efektidega paneelmudeleid koos instrumentaalmuutujatega. Hinnangud viiakse eraldi läbi ujuva ja fikseeritud vahetuskursirežiimiga riikide jaoks.

Kahe vahetuskursirežiimi vahel ilmnevad märkimisväärsed erinevused. Ujuva vahetuskursiga riikides määravad jooksevkonto dünaamikat peamiselt kodumaised tegurid. Positiivne SKP lõhe, mis viitab majandusbuumile, on seotud jooksevkonto halvenemisega, samas kui kõrgemad sissetulekutasemed ning teatud määral ka riigi neto rahvusvaheline investeerimispositsioon aitavad kaasa jooksevkonto paranemisele. Euroala tuumikriikide majandusolukorda peegeldavad välised tegurid ei ole statistiliselt olulised.

Fikseeritud vahetuskursirežiimiga riikides on jooksevkonto mõjutajad märgatavalt erinevad. Kodumaised muutujad kaotavad üldjuhul oma prognoosivõime, samal ajal kui välised tegurid muutuvad tähtsaks. Nendes riikides reageerib jooksevkonto saldo tugevalt euroala tuumikriikide majanduslikele tingimustele ning muutustele rahvusvahelises kulukonkurentsivõimes. See viitab sellele, et fikseeritud vahetuskursirežiim jätab riigid haavatavamaks väliste majandusarengute ja finantstingimuste suhtes.

Tulemused on püsivad erinevate mudelispetsifikatsioonide, hindamismeetodite, valimiperioodide ja vahetuskursirežiimide klassifikatsioonide kasutamisel. Uurimuse järeldus on, et vahetuskursirežiimi valik mõjutab fundamentaalselt jooksevkonto dünaamika tegureid Kesk- ja Ida-Euroopa riikides. Ujuv vahetuskursirežiim näib kaitsvat majandust välise ebastabiilsuse eest, samas kui fikseeritud vahetuskursirežiim suurendab haavatavust väliste arengute suhtes. Neil tulemustel võib olla oluline tähendus vahetuskursirežiimi valikul väikestes avatud majandustes, nagu Kesk- ja Ida-Euroopa EL-i riigid.

Nilavongse jt (2021) uurimus „Foreign and domestic uncertainty shocks in four open economies“ uurib, kuidas kodu- ja välismaised majanduspoliitilise ebakindluse šokid mõjutavad makromajanduslikku tulemuslikkust neljas väikese avatud majandusega ning ujuva vahetuskursiga riigis: Kanadas, Lõuna-Koreas, Rootsis ja Ühendkuningriigis.

Viimastel aastatel on huvi majanduspoliitilise ebakindluse vastu kasvanud, osaliselt tänu sellele, et sellise ebakindluse mõõtmiseks on rohkem andmeid saadaval. Muutuja EPU (*Economic Policy Uncertainty*) on majanduspoliitilise ebakindluse näitaja, mis tuleneb ajaleheartiklites sisalduvast tekstist. Seda kogutakse paljude riikide kohta, sealhulgas Ameerika Ühendriikide ning käesolevas uuringus käsitletud nelja riigi kohta. Näitajat käsitatakse sageli avalike meeleolude ning makromajandusliku ja finantsolukorraga seotud ebakindluse lähendväärtusena.

Uurimuses hinnatakse kokku nelja riigispetsiifilist Bayesi struktuurset vektorautoregressiivset mudelit. Iga mudel sisaldab kodumaiseid muutujaid, nagu tööstustoodang, hinnatase, intressimäär ja EPU näitaja, vastavaid Ameerika Ühendriikide muutujaid ning lõpetuseks vaadeldava riigi ja USA vahelist vahetuskurssi. Kasutatakse kuiseid andmeid ajavahemikust 1998–2019.

Uurimus näitab, et Ameerika Ühendriikide majanduspoliitilise ebakindluse suurenemine vähendab järjekindlalt tööstustoodangut kõigis neljas riigis, mis

kinnitab rahvusvahelise ebakindluse ülekandumise tähtsust. Kodumaiste ebakindlussõkkide mõju on seevastu heterogeensem: tööstustoodang väheneb Lõuna-Koreas ja Rootsis, suureneb Kanadas ning jääb Ühendkuningriigis suuresti muutumatuks.

Uurimuse keskseks teemaks on vahetuskursside dünaamika analüüs. Nii kodukui ka välismaised EPU-šokid viivad üldjuhul kohaliku valuuta odavnemisele kõigis neljas riigis. Samas toob ebakindluse suurenemine Ameerika Ühendriikides kaasa USA dollari tugevnemise, mis peegeldab selle rolli ülemaailmse turvavaluutana. Järelikult toimivad vahetuskursid väikestes avatud majandustes šokkide leevendajatena, toetades rahvusvahelist konkurentsivõimet, samal ajal võimendades Ameerika Ühendriikides valuuta kallinemise kaudu ebakindluse negatiivseid mõjusid. Uurimuse tulemused pakuvad täiendavat tõendusmaterjali makromajanduslike ja finantsarengute tihedate seoste kohta.

5. Lõppsõna

Euroopa majandused on alates 1990. aastatest läbi teinud laiaulatuslikke muutusi. Nende hulka kuuluvad kommunismijärgne üleminekuprotsess, euro kasutuselevõtt, 2008. aasta ülemaailmne finantskriis, sellele järgnenud Euroopa võlakriis, koroonapandeemia ning energiakriis pärast Venemaa sissetungi Ukrainasse. Need ja paljud teised arengud on Euroopa majandusmaastikku fundamentaalselt muutnud.

Uurimistsükkel „Euroopa muutumise makroökonoomilised põhjused ja tagajärjed“ koosneb 13 teadusartiklist, mis käsitlevad Euroopa muutuva makromajandusliku keskkonna erinevaid aspekte rohkem kui kolme aastakümne jooksul. Uurimistsükli eesmärk on pakkuda paremat arusaama Euroopa muutuste ja ümberkujundamise protsesside peamistest tunnustest, pöörates erilist tähelepanu kommunismijärgsele üleminekule, jätkuvale Euroopa integratsiooniprotsessile ning sellest tulenevatele haavatavustele. Viimaste aastakümnete majanduslike muutuste parem mõistmine võib aidata nii era- kui ka avaliku sektori otsustajatel olla tulevasteks muutusteks paremini valmis ning kujundada uusi lahendusi tulevikuprobleemide lahendamiseks.

Iga uurimus pakub eraldiseisvalt mitmesuguseid üksikasjalikke tulemusi, kuid kogu uurimistsükkel tervikuna annab ka täiendavaid teadmisi. Lääne-Euroopa ning Kesk- ja Ida-Euroopa vahelised erinevused on majandusliku ülemineku ja integratsiooniprotsesside tulemusel järk-järgult vähenenud, kuid olulised majanduslikud ja struktuursed erinevused püsivad endiselt. Need erinevused on jätkuvalt olulised ning väärivad ka tulevikus põhjalikku uurimist.

Mitmes uuringus esile kerkiv teema on finantssektori ja kogu makromajanduse vahelised vastastikused seosed. Neil seostel on oluline mõju majanduspoliitikale,

kuna majanduse mõlemat osa tuleb käsitleda koos. Makromajanduslikud arengud mõjutavad intressimäärasid, vahetuskursse ja kapitalivoogusid, samal ajal kui finantstingimused ja -kriisid avaldavad sügavat mõju majanduskasvule ja tööhõivele.

Oluline on arvestada ühelt poolt majandusstruktuuride ja institutsioonide ning teiselt poolt majandust mõjutavate šokkide omavahelise koostoimega. Sama šokk võib eri riike mõjutada erinevalt sõltuvalt nende majandusstruktuuridest ja institutsioonidest. Sarnased tähelepanekud kehtivad ka poliitikameetmete mõju kohta. Euroopa majanduste heterogeensus muudab majanduspoliitika kujundamise Euroopas keerukaks.

Berliini müüri langemisest alates toimunud majanduslikud muutused on olnud murrangulised ning mõjutanud kõigi eurooplaste elukorraldust. Kõige olulisem järeldus on see, et viimase kolme aastakümne muutused jätkuvad tõenäoliselt ka tulevikus. Ees võivad oodata uued majanduslikud, tehnoloogilised ja sotsiaalsed ümberkorraldused, millel on taas ulatuslikud makromajanduslikud tagajärjed ning mis esitavad keerulisi väljakutseid nii otsustamisprotsessidele, poliitikakujundamisele kui ka teadustööle.

VIITED

Degler, M., Staehr, K. 2021. Price and income convergence and the dynamic Penn effect in Central and Eastern Europe. Economic Change and Restructuring, 54(3), 621–635, https://doi.org/10.1007/s10644-019-09248-6

Harkmann, K., Staehr, K. 2021. Current account drivers and exchange rate regimes in Central and Eastern Europe. Journal of International Money and Finance, 110, #102286, https://doi.org/10.1016/j.jimonfin.2020.102286

Kirpson, G., Randveer, M., Reigl, N., Staehr, K., Uusküla, L. 2024. Macroeconomic news and sovereign interest rate spreads before and during quantitative easing. Applied Economics, 56, 7487–7500, https://doi.org/10.1080/00036846.2023.2287556

Kirpson, G., Staehr, K. 2024. Do individuals expect the Phillips curve? Evidence from the European Consumer Expectations Survey. Economics Letters, 234, #111430, https://doi.org/10.1016/j.econlet.2023.111430

Liepnieks, R., Staehr, K., Tkacevs, O. 2026. Contributions of demand and supply shocks to inflation in the euro area countries. Applied Economics Letters, 33(6), 781–786, https://doi.org/10.1080/13504851.2024.2394204

Lu, M., Staehr, K. 2025. Revisiting economic growth and real convergence in the post-communist countries. Eurasian Economic Review, 15, 89–123, https://doi.org/10.1007/s40822-024-00308-5

Nilavongse, R., Rubaszek, M., Staehr, K., Uddin, G. S. 2021. Foreign and domestic uncertainty shocks in four open economies. Open Economies Review, 32(5), 933–954, https://doi.org/10.1007/s11079-021-09656-0

Staehr, K. 2021. Export performance and capacity pressures in Central and Eastern Europe. International Economics, 165, 204–217, https://doi.org/10.1016/j.inteco.2020.12.008

Staehr, K. 2025. Economic growth, current account dynamics and growth regimes in the Baltic States. Journal of Baltic Studies, 56(1), 43–62, https://doi.org/10.1080/01629778.2024.2336239

Staehr, K., Tkacevs, O. 2025. The euro at 25: how shocks and policies contributed to inflation in the euro area member countries. Journal of Applied Economics, 2025, 28(1), art nr 2469880, https://doi.org/10.1080/15140326.2025.2469880

Staehr, K., Tkacevs, O., Urke, K. 2024. Fiscal performance under inflation and inflation surprises: evidence from fiscal reaction functions for the euro area. Review of World Economics, 160(4), 1477–1504, https://doi.org/10.1007/s10290-024-00536-6

Staehr, K., Urke, K. 2022. The European structural and investment funds and public investment in the EU countries Empirica, 49(4), 1031–1062, https://doi.org/10.1007/s10663-022-09549-6

Staehr, K., Uusküla, L. 2021. Macroeconomic and macro-financial factors as leading indicators of non-performing loans. Evidence from the EU countries. Journal of Economic Studies, 48(3), 720–740, https://doi.org/10.1108/JES-03-2019-0107

Foto: Erlend Štaub

Karsten Staehr

Sündinud 20. detsembril 1962 Taanis Odsherredis

1981 Stenhusi Gümnaasium, Taani

1991 Kopenhaageni Ülikool, Taani, majandus (MSc)

1996 Massachusettsi Tehnoloogiainstituut (MIT), USA, majandus (MSc)

1998 Kopenhaageni Ülikool, Taani, majandus (PhD)

Karsten Staehr töötas õpingute ajal osalise koormusega ökonomeetrilise modelleerijana Taani Statistikaametis, konsultandina Maailmapangas ning õppejõuna Kopenhaageni Ülikoolis. Aastatel 1996–1997 oli ta EuroFaculty projekti raames külalisõppejõud Vilniuse Ülikoolis. Aastatel 1998–2003 töötas Norra Panga rahvusvahelise osakonna vanemnõustajana. 2002. aasta sügisel oli külalisteadur Soome Panga Üleminekumajanduste Instituudis (BOFIT). Aastatel 2001–2002 ja 2003–2005 töötas ta EuroFaculty projekti külalisõppejõuna Tartu Ülikoolis ning aastatel 2005–2006 vanemökonomistina Kopenhaagenis asuvas Keskkonnamõju Hindamise Instituudis. Aastatel 2006–2007 oli Karsten Staehr külalisteadur Eesti Pangas ning pärast seda sai temast Eesti Pangas osalise koormusega teadustöö juhendaja. Alates 2007. aastast on ta Tallinna Tehnikaülikooli professor.

https://doi.org/10.3176/evp.2026.10

KUUS VAADET KEELELE

Helle Metslang (Tartu Ülikool)

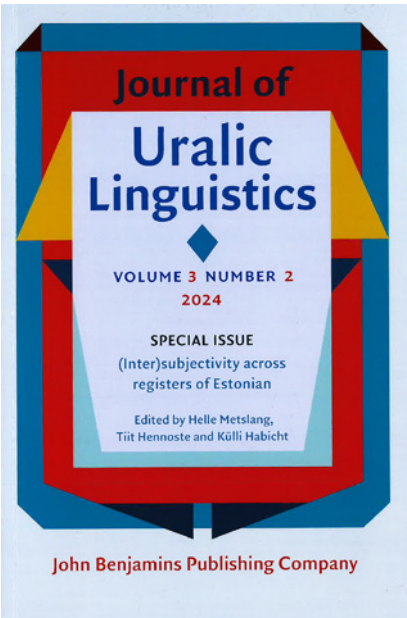
Teaduspreemia humanitaarteaduste ja kunstide valdkonnas tööde tsükli „Eesti keele kasutuspõhine mitmekesisus ja selle kujunemine“ eest

Alustuseks

Me elame keeles ja keel elab meis. Läbi aegade on inimesed vajanud ja kasutanud keelt info talletamiseks ja suhtluseks eri olukordades ja eri võimaluste piires, suhtumiste väljendamiseks, identiteedi markeerimiseks, loovuseks ja mänglemiseks. Elav keel ei saa kunagi valmis – ta kujuneb kasutuses, olles ühtaegu püsiv ja muutuv, stabiilne ja varieeruv. Nii toimivad maailma tuhanded keeled kogu oma mitmekesisusest hoolimata. Minu uurimistöö keskmes on olnud eesti keel: keele ja ta allkeelte struktuur ja selle dünaamika, keele kasutuse erijooned eri funktsioonides, eesti keele kõrvutused naaber- ja sugulaskeeltega. Aastatel 2022–2024 olen nii üksi kui koos kaasautoritega avaldanud 31 publikatsiooni, mille temaatika koondub järgmiste keskmete ümber: 1) eesti keele registrite pragmaatilised erijooned, 2) eesti keele grammatiline struktuur, 3) areaalne ja tüpoloogiline vaatenurk keeleuurimises, 4) eesti kirjakeele kujunemise sotsiolingvistilised aspektid, 5) keele kasutamine poeetilistes struktuurides, 6) rakenduslingvistika.

Eesti keele registrite pragmaatilised erijooned: (inter)subjektiivsus

Minu juhtida oli aastatel 2019–2023 ETAG-i projekt PRG341 „Pragmaatika grammatika kohal: subjektiivsus ja intersubjektiivsus eesti keele registrites ja tekstiliikides“, milles uurisime, kuidas eesti keeles väljendatakse suhtumisi – nii kõneleja suhtumist edasiantavasse infosse (subjektiivsust) kui ka suhet vestluspartneri või lugejaga (intersubjektiivsust) – ning kuidas need väljendusviisid erinevad eri registrites. Subjektiivsus ja intersubjektiivsus sageli põimuvad, näiteks oletuslikkust väljendavaid sõnu ja väljendeid, nagu *vist* või *ma arvan*, kasutatakse ühtlasi öeldu pehmendamiseks, kategoorilisuse vältimiseks kuulaja jaoks. Seetõttu oleme kasutanud (inter)subjektiivsuse koondmõistet. Register on allkeel, mis kujuneb suhtlussituatsiooni, eesmärgi ja osalejate järgi: argivestlus, ametlik (institutsionaalne) suhtlus, netivestlus, netikommentaarid, ajakirjandus, ilukirjandus, teadustekstid jne. (Inter)subjektiivsus on mis tahes suhtlusele sügavalt omane, kuid seni puudusid nii Eestis kui rahvusvaheliselt uuringud



selle avaldumise, mõjurite ja vahendite kohta eri registrites. Meie töö näitab, et eri registritele omane keelekasutus ei erine mitte ainult sõnavaliku või lausete ehituse poolest, vaid ka selle poolest, mil määral ja mis vahenditega väljendatakse hinnanguid, ebakindlust, veenmist, kaasamist jms.

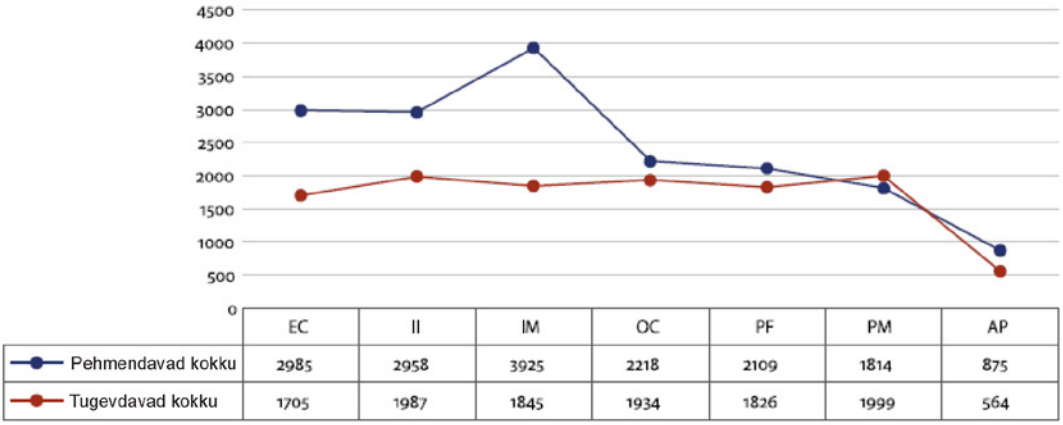
Uurimistöö lähtekohaks oli niisiis kahe valdavalt eraldi arenenud uurimisvaldkonna – registriuuringute (vt nt Biber, Conrad, 2009; Vaik, 2024) ja (inter)-subjektiivsuse uurimise (vt nt Nuyts, 2012; Narrog, 2017) – ühendamine. Kui registriuuringud on keskendunud sellele, kuidas keelekasutus allkeeltes varieerub, ja (inter)subjektiivsuse uurimine sellele, kuidas keeles väljendatakse suhtumisi ja hoiakuid, siis meie töö näitab, et need kaks valdkonda on tihedalt seotud: ka suhtumiste väljendamine varieerub registriti. Ajakirja Journal of Uralic Linguistics teemanumbris „(Inter)subjectivity across registers of Estonian“ (Metslang jt (toim), 2024) esitame süsteemse korpusanalüüsil põhineva käsitluse sellest, kuidas (inter)subjektiivsus ja registrid koos toimivad. Korpusanalüüs põhineb peamiselt meie koostatud Pragmaatika korpusel, mis sisaldab võrdsetes mahtudes eri registrite tekstimaterjali (Prillop jt, 2021). Selline sünteesiv lähenemine on uudne mitte ainult eesti keele uurimisel, vaid ka rahvusvahelises keeleteaduses. On küll analüüsitud (inter)subjektiivsust mingis üksikus tekstiliigis (vt nt Baumgarten jt, 2012; O'Grady, 2017; Shen, Tao, 2021), kuid nii laiaulatuslikku süstemaatilist uurimust teadaolevalt seni ei leidu.

Meie uurimistöö näitab, et (inter)subjektiivsuse väljendamine ei ole keeles juhuslik, vaid allub registripõhistele mustritele. Näiteks kasutatakse suulises suhtluses ja netivestlustes rohkesti partikleid, nagu *vist* (näide 1), *äkki* või *võib-olla*, mis väljendavad ebakindlust ja pehmendavad väiteid ja ka küsimusi, direktiive jm kõneakte.

(1) *Ma pean* ***vist*** *ise tulema.* (argivestlus, Metslang jt, 2024: 127)

Samas tugevdavaid partikleid, nagu *muidugi*, *tegelikult*, *kindlasti* (näide 2), kasutatakse kõigis vaadeldud registrites enam-vähem ühtlaselt, kuid trükitekstides tõusevad nad pehmendajatega samale tasemele, ajakirjanduses isegi kõrgemale, lisades väidetele veenvust (vt joonis 1).

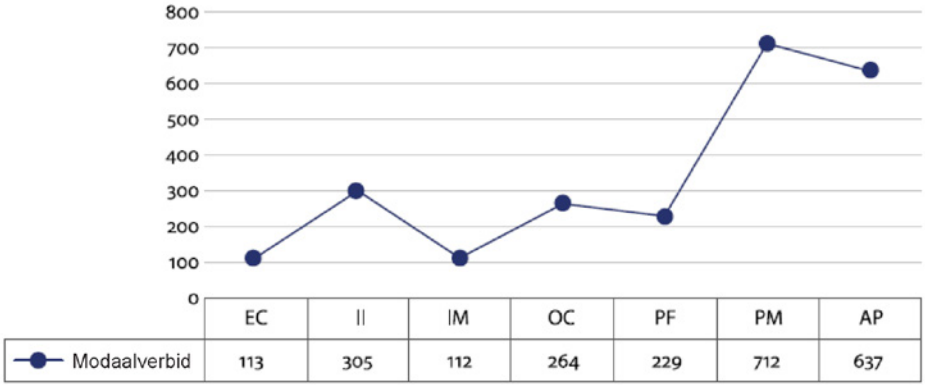
(2) *Sotsiaalministri ajast tuleb veel kiirabireform meelde, mis* ***kindlasti*** *parandas kiirabi kättesaadavust Eestis.* (ajakirjandus, Metslang jt, 2024: 121)



Joonis 1. Pehmendavad ja tugevdavad partiklid registrites (N = 28741) Pragmaatika korpuse materjalis (Metslang jt, 2024: 146).[13]

Teadustekstides seevastu pigem välditakse mujal levinud partikleid ning eelistatakse tõenäosushinnanguid väljendada objektiivsuse muljet luues: üldistust väljendavate partiklitega, nagu *üldjuhul* või *reeglina*, modaalverbitarinditega (näide 3) (vt joonis 2).

(3) *Asjaolusid, mis selle töö raskemaks või kergemaks teevad,* ***ei pruugi*** *teised ühiskonnarühmad tervikuna üldse* ***tajuda***. (teadustekst, Metslang jt, 2024: 144)



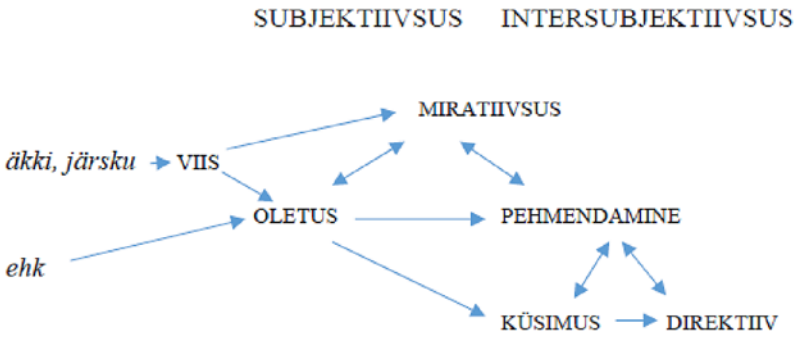
Joonis 2. Modaalverbitarindid registrites (N = 2372) (Metslang jt 2024: 149).[14]

[13] Tähised tabeli veergudes: EC – argivestlus (ingl *everyday conversation*), II – ametisuhtlus (*institutional interaction*), IM – netivestlus (*instant messaging*), OC – veebikommentaarid (*online comments*), PF – ilukirjandus (*printed fiction*), PM – ajakirjandus (*printed media*), AP – teadustekstid (*academic prose*).

[14] Tabelisse on märgitud modaalverbide arvud korpuses. Veergudes olevaid registritähiseid vt allmärkusest 13.

Olen ka uurinud, kuidas konkreetsed keelendid kujunevad markeriteks, mille abil (inter)subjektiivsus avaldub. Näiteks artiklis „Kolme (inter)subjektiivsusmarkeri lugu: *ehk*, *äkki*, *järsku*“ (Metslang, 2023) on analüüsitud korpuste materjalil alates 1890. aastatest, kuidas sõnad *äkki*, *järsku* ja *ehk* on hakanud toimima oletuslikkust väljendavate partiklitena ja mis funktsioonides neid tänapäeval eri registrites kasutatakse (vt joonis 3). Seejuures *äkki* ja *järsku* algne äkilisuse tähendus annab oletusele miratiivse, ootamatuse-üllatuslikkuse varjundi (näide 4).

(4) *Ostsin vinüüli, mida tõmban just praegu igaks juhuks arvutisse,* ***äkki*** *tekib kunagi tahtmine teda kuulata, aga mängijat pole käepärast.* (netivestlus, Metslang, 2023: 280)

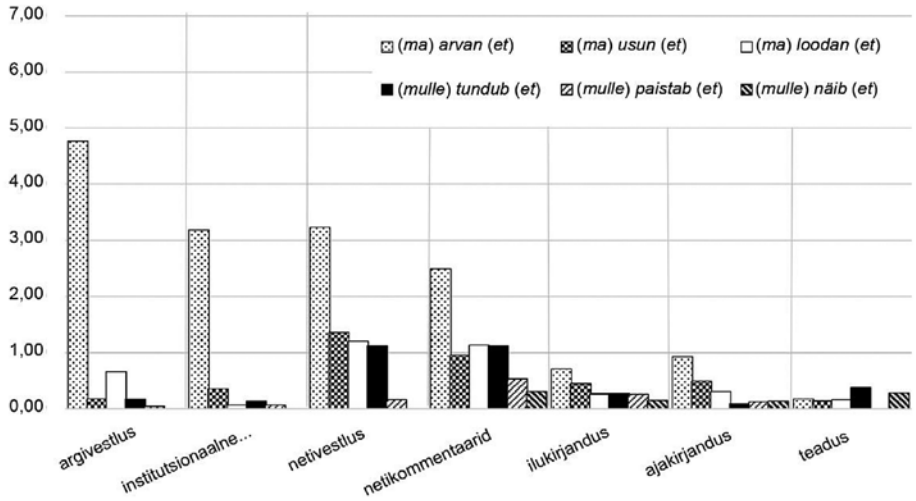


Joonis 3. Sõnade *äkki*, *järsku* ja *ehk* peamiste funktsioonide seosed (Metslang, 2023: 291).

(Inter)subjektiivsuse väljendusvahenditeks on ka diskursusemarkerid, mis põhinevad komplementkõrvallausega seostuvatel predikaatidel (KP-markerid): *(ma) arvan (et), (mulle) tundub (et), (ma) kardan (et)* jt. KP-markerid ei kirjelda enam otseselt kognitsiooni, taju või emotsiooni, vaid toimivad vahendina, millega kõneleja pehmendab algse kõrvallause väidet ja arvestab kuulaja võimaliku reaktsiooniga. Levinuim neist on inglise KP-markeri *I think* analoog *(ma) arvan (et)*, mis on levinud eriti suulises ja netisuhtluses (näide 5). (Hennoste jt, 2022)

(5) *Meil kõik kohad Kreeka ja Leedu maasikaid täis. Hind 3.80 kg.* ***Ma arvan, et*** *paljudel juba moos keedetud ja külmik maasikaid täis.* (veebikommentaarid, Metslang jt, 2024: 123)

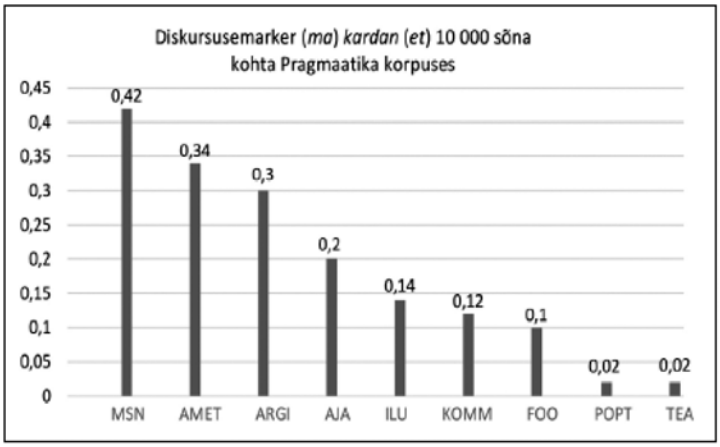
Trükitekstides (aja- ja ilukirjanduses ning teaduses) on KP-markerid vähem levinud, samas eristuvad teadustekstid selliste KP-markerite eelistamisega, kus arvaja mina-isik otseselt ei avaldu: *(mulle) tundub/näib (et)* (vt joonis 4).



Joonis 4. KP-markerite esinemiskordade arv 10 000 tekstisõna kohta registrites (Hennoste jt, 2022: 139).

Mitmekihiline on KP-marker *(ma) kardan (et)*, mis võib väljendada lähedases suhtluses muret, samas aga võib algne emotsionaalne tähendus olla maskiks, millega pehmendatakse äraütlemisi ametisuhtluses (näide 6) või tõstetakse esile irooniat meediatekstides ja netikommentaarides. (Vt joonis 5.)

(6) *oi* ***ma kardan et*** *neljapäev ei sobi* (ametivestlus, Metslang, Simmul, 2022: 174)



Joonis 5. Diskursusemarkeri *(ma) kardan (et)* sagedus 10 000 sõna kohta Pragmaatika korpuses (Metslang, Simmul, 2022: 182).[15]

[15] Tähised: MSN – netivestlus, AMET – ametlik suhtlus, ARGI – argivestlus, AJA – ajakirjandus, ILU – ilukirjandus, KOMM – veebikommentaarid, FOO – foorumid, POPT – populaarteadus, TEA – teadus.

Meie (inter)subjektiivsuse uurimise põhitulemused võtavad kokku ajakirjade Keel ja Kirjandus, Journal of Uralic Linguistics (kirjastus John Benjamins) ja Open Linguistics (kirjastus De Gruyter) teemanumbrid (Hennoste jt (toim), 2022; Metslang jt (toim), 2024; Habicht jt, 2024). (Inter)subjektiivsus avaldub kõigis registrites: väljendatakse suhtumisi, hoiakuid, enda rohkem või vähem teadja positsiooni, edastatakse seda kõike adressaadile info pehmendamiseks, kuulaja kaasamiseks, mõjutamiseks, veenmiseks jne. Markerite valiku ja jaotuse tendentsid on registrite lõikes erinevad ja on suuresti seotud registri kontekstilise ja situatsioonilise eripäraga.

Töötasime välja ka meetodi teksti registrikuuluvuse tuvastamiseks markerite kasutuse põhjal (Prillop jt, 2024). Selleks ei piisa lihtsalt kasutussagedustest, vaid indikaatoriteks on markerite kasutussageduste hierarhiasuhted eri registrites. Joonisel 6 on esitatud partiklite hierarhiasuhetel põhinevad registritevahelised kaugused.

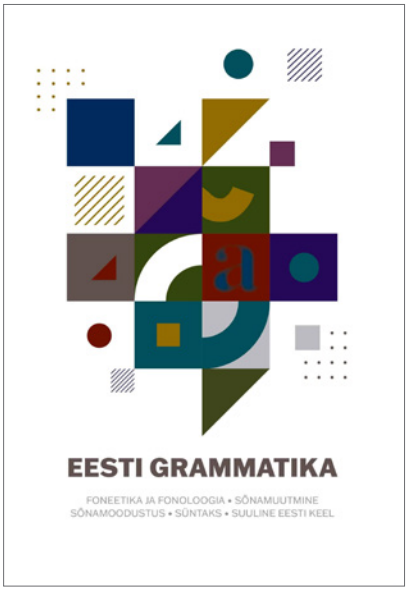
	AP	PM	IC	PF	IM	II	EC
AP	0	48	77	73	92	78	90
PM	48	0	61	61	93	65	88
IC	77	61	0	63	75	69	76
PF	73	61	63	0	63	51	57
IM	92	93	75	63	0	37	28
II	78	65	69	51	37	0	33
EC	90	88	76	57	28	33	0

Joonis 6. Registritevahelised kaugused (protsentides maksimaalsest võimalikust kaugusest) (Prillop jt, 2024: 276). Tähiseid vt allmärkusest 13.

Keelekasutajatele on oluline teadlikkus sellest, kuidas väljendatakse mitmesuguseid suhtumisi nii keeles üldse kui eri registrites, kuidas seeläbi kuulajat/lugejat kaasatakse, mõjutatakse või manipuleeritakse, millised on eri registrites kujunenud normid. Neid teadmisi saab kasutada emakeele ja eesti keele kui teise keele õpetuses, tekstiloome koolitustel, keelehooldes, stiilijuhistes, suhtluskoolitustel, keeletehnoloogias tekstide registrikuuluvuse tuvastamisel jne.

Meie töö ühendab detailse empiirilise analüüsi teoreetilise üldistusega. Pakume mudeli, mille kasutusala saab laiendada, mis on rakendatav ka teiste keelte puhul ning loob aluse võrdlevateks uuringuteks ka eri keelte vahel. Samuti avab registripõhine lähenemine võimalusi rakendusuuringuteks, näiteks keeleõppes, automaatses tekstitöötluses ja tehisintellekti keelemudelites, kus on vaja arvestada keelekasutuse situatsioonilist varieeruvust.

Eesti keele grammatiline struktuur: suur pilt



Teine teemaring mu teadustöös puudutab eesti keele grammatilise struktuuri kirjeldamist ja mõtestamist. Minu peatoimetamisel ja kaasautorlusel valmis kollektiivne koguteos „Eesti grammatika“ (EG 2023). See on läbi ajaloo kolmas, seejuures põhjalikem teaduslik eesti keele grammatika pärast F. J. Wiedemanni grammatikat (1865) ja 1980. aastate uurimisseisule toetunud „Eesti keele grammatikat“ (EKG, 1993, 1995).

„Eesti grammatika“ (EG) on nüüdiseesti ühiskeele lingvistiline kirjeldus, mis hõlmab keele ehitust häälikutest lausete ja dialoogideni, toetudes tänapäevastele uurimistulemustele ja keeleandmetele. Esmakordselt eesti keele uurimise ajaloos annab EG tervikülevaate keelesüsteemist läbi kolme keeletasandi ja nii kirjaliku kui suulise keelekuju kohta. EG põhiosad käsitlevad foneetikat ja fonoloogiat, sõnamuutmist, sõnamoodustust, kirjaliku ja suulise keelekuju süntaksit. EG lähtub keeleuurimise funktsionaaltüpoloogilisest suunast (vt nt Dik, 1989; Bybee, 2010), mis pöörab põhitähelepanu keelendite funktsioonidele ja suhestab eesti keele struktuurijooned üldisema keeleteadusliku taustaga. Oluline uuendus võrreldes varasemate eesti keele grammatikatega on empiiriline alus: EG kasutab ulatuslikke keelekorpusi ja andmekogusid: eesti keele ühendkorpus ja koondkorpus, suulise keele korpused ning mitmesugused kõneandmebaasid. See võimaldab kirjeldada keelt sellisena, nagu seda tegelikult kasutatakse.

Grammatika koondab ja sünteesib eesti keele uurimise tulemusi ja annab kasutajale võimaluse saada kompaktses vormis kätte oluline info eesti keele kõigi peamiste aspektide kohta, toob välja tänapäeva eesti keeles ilmneva variatiivsuse, muutustendentsid, ka keelekasutuse erinevused kirjakeele normingutest.

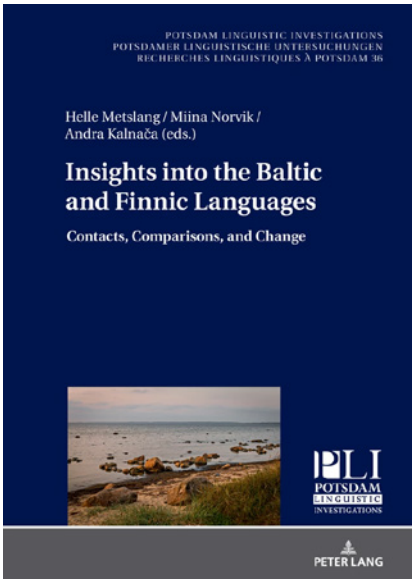
„Eesti grammatika“ loob tugeva aluse edasisteks uuringuteks ning kinnistab eesti keele positsiooni hästi kirjeldatud ja rahvusvaheliselt nähtava keelena, asetudes samasse paradigmasse viimaste kümnendite suurte funktsionaaltüpoloogiliste grammatikatega (nt Biber jt, 1999; Hakulinen jt, 2008; Auziņa jt, 2013). Esmakordselt on eesti keele grammatikas olemas ülevaade suulise keele struktuurijoontest. See viib eesti keele grammatikakirjelduse kooskõlla rahvusvaheliste suundumustega, kus üha enam pööratakse tähelepanu tegelikule keelekasutusele.

Lisaks grammatika koostamisele olen koos kaasautoritega uurinud eesti keeles juurduma asunud progressiivtarindit (Taremaa jt, 2024), samuti tutvustanud

eesti keelt rahvusvahelistes uralistika koguteostes „The Uralic Languages“ (Metslang, 2022) ja „Oxford Guide to the Uralic Languages“ (Argus, Metslang, 2023), esitades eesti keele struktuuri ja arengut laiemas uurali keelte kontekstis. Need tööd aitavad positsioneerida eesti keelt rahvusvahelises keeleteaduses ning vahendada uusimaid uurimistulemusi laiemale teadlaskonnale.

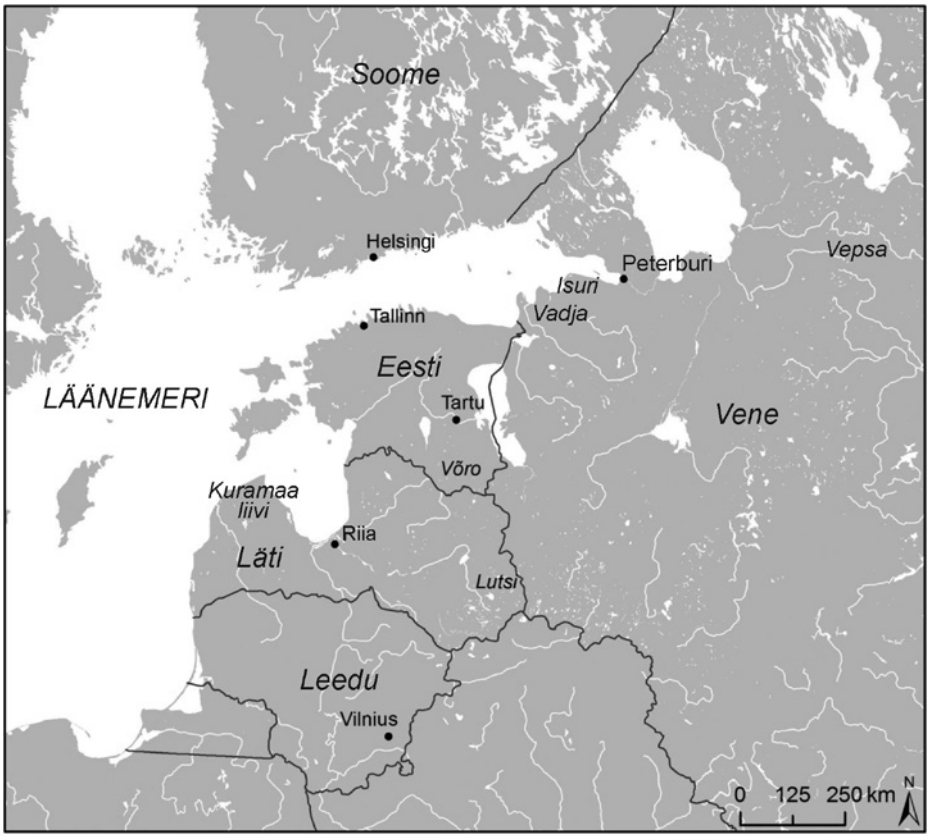
Selle teemaploki edasised arengusuunad on tihedalt seotud nii metodoloogiliste kui ka teoreetiliste küsimustega. Avaneb üha rohkem võimalusi keeleandmete automaatseks töötlemiseks ja analüüsiks, mis võimaldab grammatikakirjeldust täpsustada ja laiendada. Eesti keeleteadus täieneb pidevalt uute tulemustega. Ülevaatlikku kirjeldamist vajab netiregister. Funktsionaaltüpoloogiline lähenemine pakub võimalusi süvendada keeltevahelist võrdlust ja paremini mõista eesti keele eripära.

Areaalne ja tüpoloogiline vaatenurk: Läänemere areaal, uurali keeled



Mu kolmas teemaring käsitleb eesti keele grammatilise süsteemi laiemat konteksti: seoseid ja kõrvutusi muude keeltega. Ühelt poolt on eesti keel üks maailma keeltest, mis annab põhjust keelte üldiste struktuurijoonte tüpoloogiliseks võrdlemiseks (vt nt Dahl, 2001). Teiselt poolt kuulub ta ühte perre oma sugulaskeeltega ja nii pakuvad huvi ka uurali ja läänemeresoome keeled. Kolmandaks puutuvad kõik keeled kokku oma naaberkeeltega ja sellest vaatenurgast tõusevad esile Läänemere areaali keeled.

Läänemere areaalis on saanud kokku läänemeresoome balti, germaani ja slaavi keeled. Neid on kujundanud sugulus-, naabrus- ja võimusuhted, kohati sarnane, kohati erinev ajalugu. Nende tegurite mõju kajastumine keeltes on keeleteadlastele pikka aega huvi pakkunud (vt nt Dahl, Koptjevskaja-Tamm, 2001a, 2001b; Grünthal 2020). Selle lähenemise väljund on ka minu, Miina Norviku ja Andra Kalnača toimetatud kogumik „Insights into the Baltic and Finnic Languages. Contacts, Comparisons, and Change“ (Metslang jt (toim), 2022), mis koondab värskeid uurimistulemusi balti keeltest (läti, leedu) ja läänemeresoome keeltest (liivi, eesti, võru, soome, isuri, vadja, vepsa, lutsi). (Vt joonis 7.) Artiklid käsitlevad grammatiliste kategooriate, morfoloogiliste ja süntaktiliste struktuuride, eri liiki sõnade jne kasutustendentse seostatuna sotsiolingvistiliste, keelekorralduslike jm teguritega.



Joonis 7. Kogumikus „Insights into the Baltic and Finnic Languages. Contacts, Comparisons, and Change“ käsitletud keeled (kaart: Timo Rantanen). (Norvik, Metslang, Kalnača, 2022: 14).

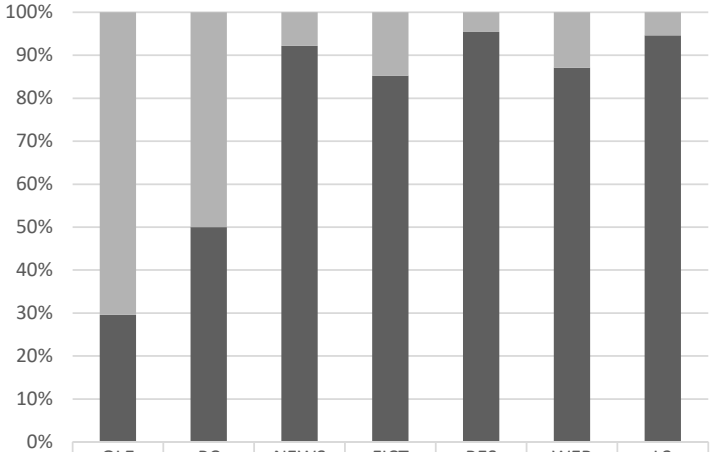
Minu kaasautorlusega artikkel „Analyticity/syntheticity in the language varieties: The case of Estonian“ (Metslang jt, 2022) pakub välja uudse metoodilise lähenemisviisi, võrdlemaks ühe keskse tüpoloogilise tunnustepaari, analüütilisuse *vs.* sünteetilisuse põhjal sama keele registreid jm keelevariante, aga ka eri keeli. Kui senised mõõdikud on võrrelnud analüütilisuse ja sünteetilisuse määri eraldi, siis meie meetod käsitab neid kahte vastandit ühe terviktunnusena. Indikaatoriteks on analüütilisuse/sünteetilisuse poolest erinevad sünonüümsete väljendite paarid, mille piires keelekasutaja saab valida, näiteks analüütilise alternatiivina ühendverb *ära unustama* ja sünteetilise variandina lihtverb *unustama*, analüütiline kaassõnaühend *tooli peal* ja sünteetiline käändevorm *toolil*.

Korpusematerjali uuringust ilmneb, et indikaator töötab ja uuritud keelevariandid jagunevad analüütilisuse osakaalu poolest kolme rühma: 1) suurem analüütilisus (vana kirjakeel, spontaanne kõnekeel), 2) keskmine analüütilisus (ilukirjandus- ja veebitekstid), 3) madal analüütilisus (ajalehe- ja teadustekstid).

Näitena toon verbipaari *unustama – ära unustama* kasutuse proportsioonid (joonis 8) ja näited analüütilisemast spontaansest kõnekeelest (näide 7) ja sünteetilisemast teadustekstist (näide 8).

(7) *ma mäletan et ta ütles mulle numbri ka aga ma* ***unustasin*** *selle* ***ära*** (spontaanne kõnekeel, Metslang jt 2022: 225)

(8) *Ühtne karjala kirjakeel* ***unustati*** *kohe ja vene keele kõrval sai ametlikuks keeleks taas soome keel*. (teadustekst, Metslang jt 2022: 226)



	OLE	PC	NEWS	FICT	RES	WEB	L2
unustama ära	57	18	34	227	11	66	9
unustama -	24	18	400	1314	229	447	158

unustama - unustama ära

Joonis 8. Verbipaari *unustama – ära unustama* kasutuse proportsioonid allkorpustes (Metslang jt, 2022: 224).[16]

Erinevate keelevariantide analüütilisuse määr erineb sõltuvalt mitmetest teguritest, millest olulisimad on väljenduse läbipaistvuse ja lihtsuse tendents, kontaktkeelte mõju, keelekorralduse hoiakud. Meetod sobib analüütilisuse määra võrdlemiseks eri registrite vahel ühes või mitmes keeles, kui keeltes on sünonüümseid analüütiliste ja sünteetiliste väljendite paare.

Kogu uurali keelkonna vaates olen ka koostanud koos kaasautoritega ülevaateartiklid mitme tüpoloogilise kategooria (isik, aeg, aspekt, modaalsus) avaldumise, sisu ja vormi kohta uurali keeltes koguteosele „Oxford Guide to the Uralic Languages“ (Janda jt, 2022; Bradley jt, 2022).

Selle teemaringi alla kuuluvad ka kollektiivsed uurimused, mis käsitlevad Läänemere areaali keelte nähtusi: üldküsimuse vormivahendeid liivi keelele

[16] Tähised: OLE – vana kirjakeel, PC – spontaanne kõnekeel, NEWS – ajalehetekstid, FICT – ilukirjandustekstid, RES – teadustekstid, WEB – veebitekstid, L2 – eesti keele õppijate tekstid.

keskendudes (Norvik, Metslang, Pajusalu jt, 2022), eesti murrete häälduspjooni (Pajusalu jt, 2024). Osalen ka uurali keelte andmebaasi UraTyp koostamises (Norvik, Jing jt, 2022), mis arendab edasi rahvusvahelise andmebaasi Grambank[17] põhimõtteid uurali keelte vaatenurgast, lisades Grambankis puuduvaid uurali keeli ning uurali keelte jaoks olulisi jooni. See andmestik võimaldab võrrelda uurali keeli ühtsete parameetrite alusel ning teha uusi järeldusi erinevate keelejoonte leviku, keelesüsteemi eri osade käitumise ja seda kõike mõjutavate tegurite kohta. See uurimissuund jätkub projekti PRG2184 („Idast läände: eesti keele ja lõuna-läänemeresoome keelte tüpoloogiline muutumine uurali taustal", vastutav täitja Karl Pajusalu) töörühmas: valminud ja avalikustatud on andmebaasi UraTyp uus versioon 2.0[18] (Norvik jt 2026), töös on uurimused nii konkreetsete keelenähtuste levikust kui Läänemere areaali ja uurali keelte üldpildist.

Eesti kirjakeele kujunemise sotsiolingvistilised aspektid: mõistatuslik ja murranguline 19. sajand

Neljas teemaring käsitleb eesti kirjakeele kujunemist ajaloolise sotsiolingvistika vaatenurgast. Koostöös Külli Habichtiga oleme pakkunud uue tõlgenduse eesti kirjakeele arenguloole, lähtudes sellest, et eesti kirjakeel on kujunenud kahe erineva staatusega keelevariandi – mitteemakeelsete (L2) ja emakeelsete (L1) kasutajate eesti keele – vastasmõjus, sisaldades mõlema jooni. Artiklis „Partitive, genitive or nominative? Estonian DOM in written use through centuries" (Metslang, Habicht, 2023) esitleme oma ideid rahvusvahelisele lugejale eesti keele sihitise vormi varieerumise näitel.

Eesti kirjakeelt kujundasid kuni 19. sajandini muukeelsed, peamiselt saksakeelsed haritlased, kelle jaoks see oli teine keel, emakeelse kasutaja keelega võrreldes vahekeel. Nende eesti keel ühtlustus ja stabiliseerus, kujunedes kollektiivseks vahekeeleks, millel oli palju saksapäraseid jooni. Eesti keele uurimist ja arendamist sel perioodil saab käsitada misjoni- või koloniaallingvistikana nagu meretagustes maades, kuhu eurooplased usku levitama ja koloniseerima siirdusid. Niisamuti põhinevad misjonilingvistika keelekirjeldused eurooplastest misjonäride ja administraatorite vahekeeltel (Makoni, Pennycook, 2007: 7). Sotsiolingvistiline olukord muutub keerukamaks siis, kui emakeelsed L1 kasutajad võtavad osaliselt üle muulastest sama keele L2 kasutajate keelekuju ning ühise variandina tekib suland L3, milles esineb mõlema keele jooni (Thomason, 2001: 75). Selline omapärane sulandkeele etapp iseloomustab ka 19. sajandi teise poole eesti kirjakeelt, milles alles otsiti võimalusi kasutada eestipäraseid struktuurijooni.

Eesti, nagu ka naabermaade selleaegset keelesituatsiooni iseloomustas topeltdiglossia (vt Nordlund, 2007). Ühelt poolt kasutati Eestis saksa ja eesti keelt, teiselt poolt aga eristusid eesti keele eri positsiooniga variandid. Mitte-eestlastest ülemkihi arendatud vahekeelne kirjakeel oli ühiskonnas kõrge staatusega keelevariant (H-variant), samal ajal kui eestlaste endi L1 kui suuline talurahvakeel

[17] https://grambank.clld.org/ (15.05.2026).

[18] https://uralic.clld.org/ (15.05.2026).

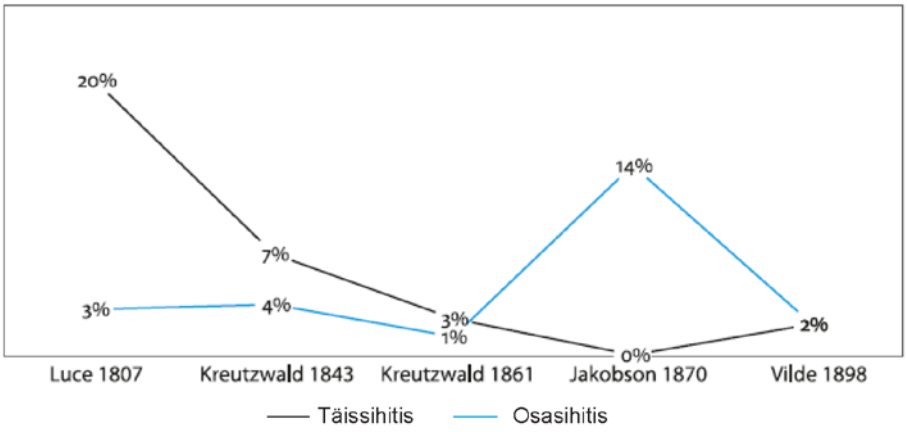
oli madala staatusega (L-variant) (vt Rutten, 2016). See tõi kaasa olukorra, kus sakslaste vahekeel oli järgimisväärseks eeskujuks ka eestlastest autoritele.

19. sajandil toimus eesti ühiskonnas oluline pööre; haritlaskonna teke ja rahvusliku identiteedi kujunemine tõid kaasa olukorra, kus eesti keel hakkas täitma üha rohkem funktsioone. Sajandi keskpaigast alates, kui kirjakeelt hakkasid kujundama emakeelsed eestlased, kujunes välja sulandkeele etapp, kus vahekeele jooned ei kao kohe, vaid põimuvad eestipäraste struktuuridega.

Sihitise vormivaheldus (ingl *differential object marking*, DOM) on sobiv indikaator uurimaks 19. sajandi eesti autorite kirjakeeles toimuvaid protsesse, eesti keele H-variandi kujunemisprotsessi sakslaste kollektiivsest vahekeelest läbi sulandkeele perioodi emakeelsete eestlaste algse L-variandi poole. Saksa keeles sihitise vormivaheldust ei ole, see oli saksa autoritele keeruline omandada ja nad kaldusid eelistama täissihitist, eriti nimetavas käändes, ka seal, kus emakeelse taju järgi peaks olema osastavas käändes osasihitis, nagu *lambaid ja elajaid* (näide 9).

(9) *kui nüüd lapsed pidid* ***lambad*** *ja* ***ellajad*** *hoidma ..* (Johann von Luce, 1803; Metslang, Habicht, 2023: 175)

Jälgisime sihitise kasutust läbi 19. sajandi mõjukate eesti autorite tekstide (F. R. Kreutzwald, C. R. Jakobson, E. Vilde). Ilmnes, et isegi nii eestipärase ja tähendust eristava nähtuse korral ei kao emakeelsete autorite tekstidest üleöö prestiižse vahekeele jooned. Ühelt poolt küll hakati enam kasutama osasihitist, mida ilmselt tajuti eestipärasena. Teiselt poolt aga täissihitise ülekasutus ei kadunud kohe, vaid hakkas vaikselt langema. Kui käsitada tänapäevast sihitisekasutust vastavana emakeelsele keelepädevusele, näeme Kreutzwaldil lähenemist emakeelsele kasutusele, Jakobsonil aga osasihitise ülekasutust (vt joonis 9): näites 10 peaks osastavas käändes sõnakuju *rahwaust* asemel olema omastavas *rahwause*.



Joonis 9. Tänapäevasest kasutusest erinevad sihitisevariandid 19. sajandi tekstides (Metslang, Habicht, 2023: 183).

(10) *Eestlane ei olla wõinud ja ei wõida nüüdki weel muul wiisil ülema waimuharimise järje peale tõusta, kuid et oma enese* ***rahwaust*** *ära salgab ja wõera rahwause sisse ära sulab.* (C. R. Jakobson, 1870; Metslang, Habicht, 2023: 180)

Esitame artiklis ülevaate ka mõnede muude vahekeele joonte dünaamikast 19. sajandil (keerukad verbi- ja lausekonstruktsioonid, ühendverbide rohkus, saksapärane raamkonstruktsioon sõnajärjes). Kõik vaadeldud keelenähtused annavad tunnistust 19. sajandi kirjakeele olemusest sulandkeelena, mis eri autoritel eri määral kõikus saksapärasuse ja eestipärasuse vahel. Nii kajastub 19. sajandi materjalides prestiižse keelekuju staatuse üleminek vahekeelselt kujult emakeelsele kujule.

Selle teemaringi jätkusuunad on seotud nii andmestiku laiendamise kui ka teoreetilise süvendamisega. Ühelt poolt pakuvad ajaloolised korpused võimalusi uurida keelemuutust detailsemalt ja suuremas mahus. Teiselt poolt on perspektiivne rakendada sulandkeele kontseptsiooni ka teiste keelte ja piirkondade uurimisel, kus kirjakeel on kujunenud kontaktolukordades.

Keele kasutamine poeetilistes struktuurides: regilaulu parallelism vastavuste võrgustikuna

Viiendat teemaringi, keele kasutamist poeetilistes struktuurides, esindab monograafia „Vastavuste võrgustikud. Eesti regilaulu värsiparallelismi süntaktiline analüüs“ (Metslang, 2025).

Parallelism on sarnase struktuuriga üksuste järjestamisel ja sarnasuse kaudu üksustevaheliste seoste loomisel põhinev nähtus, millel rajaneb tekstiloome paljude rahvaste folklooris ja muuski sõnakunstis läbi sajandite. Eesti (ja laiemalt läänemeresoome) regilaulus on parallelism keskne ülesehitusvõte, mis seob värsse üheks tervikuks, parallelismirühmaks. Eesti regilaulu parallelismi poeetika põhineb värsside keelelise ülesehituse sarnasusel ja värssidevahelistel tähendusseostel. Üks näide laulutüübist „Ma laulan mere maaks“: läbi seitsme paralleelvärsi võimendatakse peavärsis esitatud keskset väidet lauliku suutlikkusest.

(11) ma laulan mere maasse,
mere kaldad heinamaaks,
mere ääred karjamaaks,
mere põhja põllumaaks,

mere roogi rukkidesse,
mere osja odradesse,
mere kama kaeradesse, (Metslang, 2025: 9)

Loomulikku keelt vaadeldakse töös Juri Lotmani ideedele (1990, Lotman, 2006 [1970]; vt ka M. Lotman, 2012) toetudes kui primaarkeelt, milles peituvad võimalused olla aluseks sekundaarsele poeetika keelele. Arvestatakse nii primaarkeele kui ka tema poeetilise kasutamise iseärasustega, nagu Roman Jakobsoni (2012: 1732) idee keele poeetilisele funktsioonile omasest ekvivalentsisuhete projitseerimisest paradigmaatikast süntagmaatikasse ja Kimmo Tureniuse (1974) tähenduste konnoteerumise mudel.

Lause ülesehituse osas põhineb see analüüs sõltuvusgrammatika mudelil (Tesniere, 1959; Osborne, 2019), mille põhjal on uurimuses tuletatud sõnadevahelise hierarhia tasandid ja tuvastatud piiratud hulk selle hierarhia tasandite kombinatsioone. Näide 11 esindab üht tüüpilist juhtu: peavärsis on verb *laulan* (1. tasand) ja verbi kolm laiendit 2. tasandilt (alus *ma*, sihitis *mere* ja määrus *maasse*); peavärsiga rinnastatud järelvärsid on elliptilised: neis ei ole verbi ja üht 2. tasandi elementi (alust), aga 2. tasandi elementide juurde lisandub 3. tasandi elemente, täiendeid.

Infostruktuuri analüüsis on eristatud teemat (teate lähteinfot) ja reemat (uut infot, teate põhisisu) nii tavalise, primaarkeele kui ka poeetilise sekundaarkeele vaatenurgast. Poeetilisele keelekasutusele omastesse ekvivalentsiseostesse astuvad nii värsid (laused) kui paralleelsõnad ja sõnaühendid, neist tekivad uued, poeetilise sekundaarkeele paradigmad. Ka infostruktuurimalle leidub piiratud hulgal. Kirjeldusmudelis jälgitakse poeetilist infot, mis kujuneb värsside tähendusstruktuuride vaheliste seostena. Poeetilisele keelekasutusele omastesse ekvivalentsiseostesse astuvad nii lausesisud tervikutena kui paralleelsõnad ja sõnaühendid, neist tekivad uued, poeetilise sekundaarkeele paradigmad. Näites 11 moodustavad poeetilisi paradigmasid nii kogu peavärsi *ma laulan mere maasse* kui sõnade *mere* ja *maasse* vasted läbi paralleelvärsside. Ka infostruktuurimalle leidub piiratud hulgal, tüüpiline on rajada sekundaarparadigmad peavärsi kahele reemaelemendile. Siin ilmneb ka tüüpiline vastavus sõltuvusgrammatilise ja infostruktuuri vahel: 2. tasandi elemendid *mere* ja *maasse* on need, millele laiendite lisamisega rajatakse poeetiline info.

Uurimuses, mida see raamat esitab, on leitud, et analüüsi üldistusastet tõstes on võimalik jõuda parallelismi ehituse aluseks oleva sõrestikuni, kondikavani, mis regilauludes täitub konkreetse sisuga. Töö näitab, kuidas poeetiline keel kasutab ära loomuliku keele võimalusi ning kuidas folkloorne esteetika suunab keeleliste valikute süsteemsust. Monograafia asetub samasse ritta Kanni Labi (2006) ja Jukka Saarise (2018) väitekirjadega regilaulu parallelismist, selle süntaktilisest ehitusest ja tähendusseostest.

Kuigi parallelismi suulistes traditsioonides ja ka ilukirjanduses on palju uuritud, on lingvistilise huvi keskmes olnud valdavalt mäng tähendustega (vt nt Fox,

2014; Frog, Tarkka, 2017). Siinses uurimuses väljatöötatud uurimismetoodikat on rakendatud ka näiteks eesti mõistatuste ja vanasõnade ehituse uurimisel; see pakub raamistikku parallelismi struktuuri analüüsimiseks eri žanrides ja eri keeltes, selle universaalse võtte keelelise süvaolemuse tabamiseks ja kõrvutamiseks. „Metslangi uurimus aitab mõista, kuidas on seotud keel ja mõtlemine. See toob esile poeetilise teksti süsteemse loogika ning näitab, kuidas inimesed on sõnade kaudu maailma korrastanud ja tunnetanud. Poeetiline väljendus peegeldab keele ja mõtlemise alusstruktuure, mis tavalises kõnekeeles nähtavale ei tule.“ (Väina, 2025: 76)

Rakenduslingvistika: keeleuurimise ja ühiskonna kokkupuutepunktid

Mu teadustöö kuues teemaplokk puudutab rakenduslingvistikat – kiiresti arenevat valdkonda, kus keeleteadus kohtub ühiskondlike vajaduste ja tehnoloogiliste arengutega. Rakenduslingvistika-alast uurimistööd ma viimastel aastatel küll teinud ei ole, kuid olen olnud sellega järjepidevalt seotud valdkonna keskse väljaande toimetajana ja kogenud ses töös alus- ja rakendusuuringute vahelist sümbiosi. Oleme koos Margit Langemetsa, Maria-Maren Linkgreimi ja David Ogreniga pikka aega toimetanud Eesti Rakenduslingvistika Ühingu aastaraamatut (vt Langemets jt, 2022, 2023, 2024, 2025), mis on oluline platvorm nii Eesti kui kogu Läänemere areaali rakenduslingvistika uurimistulemuste avaldamiseks. Aastaraamat koondab töid, mis käsitlevad muu hulgas keeleõpet, terminoloogiat, keelekorraldust, keelepoliitikat, arvutilingvistikat ja tekstianalüüsi. Koos Peep Nemvaltsiga olen toimetanud ajakirja Open Linguistics teaduskeele probleeme käsitleva rahvusvahelise teemanumbri NatAcLang2021 (Nemvalts, Metslang, 2023). Sellised väljaanded aitavad tagada teadustulemuste levikut, luua sidemeid uurijate vahel ning kujundada valdkonna uurimissuundi.

Rakenduslingvistika eripära on selle dünaamilisus: valdkond reageerib kiiresti muutustele ühiskonnas ja tehnoloogias. Tänased kuumad teemad tulevad keeleõppest, keelekorraldusest, suurtest keelemudelitest. Toimetajate töö aitab neid arenguid vahendada, luua eeldusi valdkonna arenguks, tagada publikatsioonide kõrget taset ja toetada eesti rakenduslingvistika nähtavust rahvusvahelises teadusruumis.

Lõpetuseks

Mul on olnud õnne, võimalust ja kaaslasi, et olen saanud uurida keelt tema mitmekesisuses: siia koondatud kuus vaadet täiendavad ja toetavad üksteist ja aitavad vastastikku kujundada uut teadmist mõnest mutrikesest keele hiidsüsteemis (vt Hint, 2002 [1976]), keele rollist ja vastasmõjust kõige ümbritseva suhtes. Kui mind tabas kui välk selgest taevast telefonikõne teadusajakirjanikult Airika Harrikult uudisega teaduspreemia määramisest, meenusid kõigepealt kolleegid, kellega koos oleme neid töid teinud, ja perekond, kellele see uudis oli krooniks tõdemusele, et olen taas ja taas mõne kirjatükiga ajahädas. Airika loo pealkirjaks aga sai „Preemiasaaja Helle Metslang: võimalus alustatut lõpuni uurida on õnnemäng“ (Harrik, 2026) – sest selles õnnemängus võiks igaühel meie teadlaskonnast rohkem võiduvõimalusi olla.

Tänusõnad

Minu suurim tänu kuulub kõigile kaasautoritele, kellega koostöös publikatsioonid on valminud, ja Tartu Ülikooli eesti ja üldkeeleteaduse instituudile, kes on pakkunud suurepärast töökeskkonda. Selle ülevaate valmimist on toetanud Eesti Teadusagentuuri projekt PRG2184 „Idast läände: eesti keele ja lõunaläänemeresoome keelte tüpoloogiline muutumine uurali taustal“ ja Haridus- ja Teadusministeeriumi projekt TK215, tippkeskus „Eesti juured“. Olen tänulik paljudele toetajatele, tänu kellele siin tutvustatud publikatsioonid teoks on saanud: taas Eesti Teadusagentuur (projekt PRG341) ja Haridus- ja Teadusministeerium (mitmed projektid ja toetused), Euroopa Regionaalarengu Fond (Eesti-uuringute Tippkeskus, TK145), Eesti Kultuurkapital, Emakeele Selts, Kadri, Nikolai ja Gerda Rõugu nimeline uurimistoetuste fond jt.

VIITED

Argus, R., Metslang, H. 2023. North and Standard Estonian. – Abondolo, D., Valijärvi, R. (toim). The Uralic Languages. Routledge, London, 347–385, https://doi.org/10.4324/9781315625096-8

Auziņa, I., Breņķe, I., Grigorjevs, J., Indričāne, I., Ivulāne, B., Kalnača, A., Lauze, L., Lokmane, I., Markus, D., Nītiņa, D., Smiltniece, G., Valkovska, B., Vulāne, A. 2013. Latviešu valodas grammatika. LU Latviešu valodas institūts, Rīga.

Baumgarten, N., Du Bois, I., House, J. (toim). 2012. Subjectivity in Language and in Discourse. Studies in Pragmatics, 10. Brill, Leiden, https://doi.org/10.1163/9789004261921

Biber, D., Conrad, S. 2009. Register, Genre, and Style. Cambridge Textbooks in Linguistics. Cambridge University Press, Cambridge, https://doi.org/10.1017/CBO9780511814358

Biber, D., Johansson, S., Leech, G., Conrad, S., Finegan, E. 1999. Longman Grammar of Spoken and Written English. Longman, London.

Bradley, J., Klumpp, G., Metslang, H. 2022. TAM and evidentials. – Bakró-Nagy, M., Laakso, J., Skribnik, E. (toim). Oxford Guide to the Uralic Languages. Oxford University Press, Oxford, 904−923, https://doi.org/10.1093/oso/9780198767664.003.0046

Bybee, J. 2010. Language, Usage and Cognition. Cambridge University Press, Cambridge.

Dahl, Ö. 2001. Principles of areal typology. – Haspelmath, M., König, E., Oesterreicher, W., Raible, W. (toim). Language Typology and Language Universals. Walter de Gruyter, Berlin.

Dahl, Ö., Koptjevskaja-Tamm, M. (toim). 2001a. Circum-Baltic Languages. Vol. 1: Past and Present. Studies in Language Companion Series, 54. John Benjamins Publishing Company, Amsterdam & Philadelphia, https://doi.org/10.1075/slcs.54

Dahl, Ö., Koptjevskaja-Tamm, M. (toim). 2001b. Circum-Baltic Languages. Vol. 2: Grammar and Typology. Studies in Language Companion Series, 55. John Benjamins Publishing Company, Amsterdam & Philadelphia, https://doi.org/10.1075/slcs.55

Dik, S. C. 1989. The Theory of Functional Grammar. Part 1: The Structure of the Clause. Functional Grammar Series, 9. Foris, Dordrecht.

EG 2023 = Metslang, H., Erelt, M., Hennoste, T., Kasik, R., Teras, P., Viht, A., Asu, E. L., Habicht, K., Lindström, L., Lippus, P., Pajusalu, R., Plado, H., Rääbis, A., Veismann, A. 2023. Eesti grammatika. Tartu Ülikooli Kirjastus, Tartu.

Fox, J. J. 2014. Explorations in Semantic Parallelism. Australian National University Press, Canberra, http://press.anu.edu.au/titles/explorations-in-semantic-parallelism/ (28.09.2025).

Frog, Tarkka, L. 2017. Parallelism in verbal art and performance: An introduction. Oral Tradition, 31(2), 203−232.

Grünthal, R. 2020. The spread zones and contacts of medieval Finnic in the Northeastern Baltic Sea area: Implications for the rate of language change. Journal of Historical Sociolinguistics, 6(2), https://doi.org/10.1515/jhsl-2019-0029

Habicht, K., Hennoste, T., Metslang, H., Pajusalu, R. (toim). 2024. Subjectivity and Intersubjectivity in Language. Open Linguistics. De Gruyter Open Access, Warsaw, https://www.degruyterbrill.com/journal/key/opli/9/1/html

Hakulinen, A., Vilkuna, M., Korhonen, R., Koivisto, V., Heinonen, T. R., Alho, I. 2008. Ison suomen kieliopin verkkoversio. Kotimaisten kielten tutkimuskeskuksen verkkojulkaisuja, 5, http://scripta.kotus.fi/visk/etusivu.php (15.05.2026).

Harrik, A. 2026. Preemiasaaja Helle Metslang: võimalus alustatut lõpuni uurida on õnnemäng, https://novaator.err.ee/1609932563/preemiasaaja-helle-metslang-voimalus-alustatut-lopuni-uurida-on-onnemang (12.05.2026).

Hennoste, T., Klumpp, G., Metslang, H. (toim). 2022. Diskursusemarkerid grammatikas ja suhtluses. Keel ja Kirjandus, 1–2, https://www.keeljakirjandus.ee/ee/archives/issues/2022-1-2 (15.05.2025).

Hennoste, T., Prillop, K., Habicht, K., Metslang, H., Laanesoo, K., Pärismaa, L., Pärt, E., Rumm, A., Rääbis, A., Simmul, C. E. 2022. Komplementlausega predikaatidel põhinevate diskursusemarkerite kasutus eri registrites. Keel ja Kirjandus, 65(1–2), 130–150, https://doi.org/10.54013/kk770a8

Hint, M. 2002 [1976]. Keel hiidsüsteemina. – Hint, M. Keel on tõde on õige ja vale. Ilmamaa, Tartu, 246–263.

Jakobson, R. 2012 [1960]. Lingvistika ja poeetika. Tlk N. Lopp, A. Merilai. Akadeemia, 10, 1731–1773.

Janda, G. E., Laakso, J., Metslang, H. 2022. Person marking. – Bakró-Nagy, M., Laakso, J., Skribnik, E. (toim). Oxford Guide to the Uralic Languages. Oxford University Press, Oxford, 894–903, https://doi.org/10.1093/oso/9780198767664.003.0045

Labi, K. 2006. Eesti regilaulude verbisemantika. Dissertationes Philologiae Estonicae Universitatis Tartuensis, 18. Tartu Ülikooli Kirjastus, Tartu.

Langemets, M., Linkgreim, M-M., Metslang, H., Ogren, D. P. (toim). 2022. Eesti Rakenduslingvistika Ühingu aastaraamat = Estonian Papers in Applied Linguistics, 18. Tallinn, https://doi.org/10.5128/ERYa18

Langemets, M., Linkgreim, M-M., Metslang, H., Ogren, D. (toim). 2023. Eesti Rakenduslingvistika Ühingu aastaraamat, 19. Eesti Rakenduslingvistika Ühing, Tallinn, https://doi.org/10.5128/ERYa19

Langemets, M., Linkgreim, M-M., Metslang, H., Ogren, D. (toim). 2024. Eesti Rakenduslingvistika Ühingu aastaraamat, 20. Eesti Rakenduslingvistika Ühing, Tallinn, http://arhiiv.rakenduslingvistika.ee/ajakirjad/index.php/aastaraamat/issue/view/ERYa20

Langemets, M., Linkgreim, M-M., Metslang, H., Ogren, D. (toim). 2025. Eesti Rakenduslingvistika Ühingu aastaraamat, 21, https://doi.org/10.5128/ERYa21

Lotman, J. 1990. Universe of the Mind: A Semiotic Theory of Culture. I. B. Tauris & Co, London & New York.

Lotman, J. 2006 [1970]. Kunstilise teksti struktuur. Tlk P. Lias. Tänapäev, Tallinn.

Lotman, M. 2012. Verse as a semiotic system. Sign Systems Studies, 40(1–2), 18–51, https://doi.org/10.12697/SSS.2012.1-2.02

Makoni, S., Pennycook, A. 2007. Disinventing and reconstituting languages. – Makoni, S., Pennycook, A. (toim). Disinventing and Reconstituting Languages. Multilingual Matters LTD, Clevedon/Buffalo/Toronto, 1–41.

Metslang, H. 2022. North and Standard Estonian. – Bakró-Nagy, M., Laakso, J., Skribnik, E. (toim). Oxford Guide to the Uralic Languages. Oxford University Press, Oxford, 350–366, https://doi.org/10.1093/oso/9780198767664.003.0020

Metslang, H. 2023. Kolme (inter)subjektiivsusmarkeri lugu: *ehk, äkki, järsku*. Eesti ja Soome-Ugri Keeleteaduse Ajakiri, 14(2), 271–296, https://doi.org/10.12697/jeful.2023.14.2.11

Metslang, H. 2025. Vastavuste võrgustikud. Eesti regilaulu parallelismi süntaktiline analüüs. Eesti Teaduste Akadeemia Emakeele Seltsi toimetised, 85. Tallinn, https://www.emakeeleselts.ee/wp-content/uploads/2025/11/Vastavuste-vorgustikud_EST85_2025.pdf

Metslang, H., Habicht, K. 2023. Partitive, genitive or nominative? Estonian DOM in written use through centuries. Linguistic Variation, 23(1), 157–189, https://doi.org/10.1075/lv.20016.met

Metslang, H., Habicht, K., Hennoste, T., Laanesoo-Kalk, K., Prillop, K., Rääbis, A., Simmul, C. E. 2024. (Inter)subjectivity in Estonian registers: Introduction. Journal of Uralic Linguistics, 3(2), 119–158, https://doi.org/10.1075/jul.00028.met

Metslang, H., Habicht, K., Lippus, P., Pajusalu, K. 2022. Analyticity/syntheticity in the language varieties: The case of Estonian. – Metslang, H., Norvik, M., Kalnača, A. (toim). Insights into the Baltic and Finnic Languages. Contacts, Comparisons, and Change. Peter Lang Publishing, Berlin, 209–238.

Metslang, H., Hennoste, T., Habicht, K. (toim). 2024. (Inter)subjectivity Across Registers of Estonian. Special issue of the Journal of Uralic Linguistics. John Benjamins Publishing Company, https://doi.org/10.1075/jul.3.2

Metslang, H., Norvik, M., Kalnača, A. (toim). 2022. Insights into the Baltic and Finnic Languages. Contacts, Comparisons, and Change. Potsdam Linguistic Investigations, 36. Peter Lang Publishing, Berlin, https://doi.org/10.3726/b18341

Metslang, H., Simmul, C. E. 2022. *Ma kardan, et meie õnned on üksteisest eemal*. (Inter)subjektiivne diskursusemarker *(ma) kardan (et)*. Keel ja Kirjandus, 65(1−2), 168−188, https://doi.org/10.54013/kk770a10

Narrog, H. 2017. Three types of subjectivity, three types of intersubjectivity, their dynamicization and a synthesis. – Olmen, D., Cuyckens, H., Ghesquière, L. (toim). Aspects of Grammaticalization: (Inter)subjectification and Directionality. De Gruyter Mouton, Berlin/Boston, 19−46, https://doi.org/10.1515/9783110492347-002

Nemvalts, P., Metslang, H. (toim). 2023. Special Issue: Published in Cooperation with NatAcLang2021. Open Linguistics. De Gruyter Open Access, https://doi.org/10.1515/opli-2022-0233

Nordlund, T. 2007. Double diglossia – lower class writing in 19th century Finland. Multilingua, 26, 229−246.

Norvik, M., Forkel, R., Balodis, U., Bradley, J., Dunn, M., Egorov, I., Feodotova, I., Honkola, T., Huhtala, A., Jing, Y., Juutinen, M., Kejonen, O., Klumpp, G., Kowalik, R., Kuznetsov, N., Lehtinen, M., Metslang, H., Niinemägi, M., Pajusalu, K., Piha, M., Podleśny, P., Rünkla, M., Saar, E., Saarinen, S., Teptiuk D., Teras, P., Tomingas, M., Tuisk, T., Vaab, J., Vesakoski, O. 2026. Uralic Typological database – UraTyp (v2.0) [Data set]. Zenodo, https://doi.org/10.5281/zenodo.5236365

Norvik, M., Jing, Y., Dunn, M., Forkel, R., Honkola, T., Klumpp, G., Kowalik, R., Metslang, H., Pajusalu, K., Piha, M., Saar, E., Saarinen, S., Vesakoski, O. 2022. Uralic typology in the light of a new comprehensive dataset. Journal of Uralic Linguistics, 1(1), 4−42, https://doi.org/10.1075/jul.00002.nor

Norvik, M., Metslang, H., Kalnača, A. 2022. Introduction: The languages and language systems that meet at the Baltic Sea. – Metslang, H., Norvik, M., Kalnača, A. (toim). Insights into the Baltic and Finnic Languages. Contacts, Comparisons, and Change. Peter Lang Verlag, Berlin, 11−20.

Norvik, M., Metslang, H., Pajusalu, K., Saar, E. 2022. Livonian polar questions in their areal context. Eesti ja Soome-Ugri Keeleteaduse Ajakiri, 13(1), 121−155, https://doi.org/10.12697/jeful.2022.13.1.05

Nuyts, J. 2012. Notions of (inter)subjectivity. English Text Construction, 5(1), 53−76, https://doi.org/10.1075/etc.5.1.04nuy

O'Grady, G. 2017. "I think" in political speech. International Review of Pragmatics, 9(2), 269−303, https://doi.org/10.1163/18773109-00901006

Osborne, T. J. 2019. A Dependency Grammar of English: An Introduction and Beyond. John Benjamins Publishing Company, Amsterdam & Philadelphia.

Pajusalu, K., Metslang, H., Norvik, M., Saar, E., Teras, P., Vaab, J. 2024. Eesti murrete häältdusjooned läänemeresoome taustal. Areaaltüpoloogiline analüüs. – Pajusalu, K., Viikberg, J., Kendla, M. (toim). Saarte keeled. Ellen Niidi juubeliraamat. Eesti Teaduste Akadeemia Emakeele Selts, 104–127.

Prillop, K., Hennoste, T., Habicht, K., Metslang, H. 2021. Ei saa me läbi "Pragmaatika" korpuseta. Korpuspragmaatika ja pragmaatikakorpus. Mäetagused, 81, 161–176, https://doi.org/10.7592/MT2021.81.pragmaatika

Prillop, K., Hennoste, T., Metslang, H. 2024. Pragmatic particles as distinguishing features of registers. Journal of Uralic Linguistics, 3(2), 265–296, https://doi.org/10.1075/jul.00033.pri

Rutten, G. 2016. Diaglossia, individual variation and the limits of standardization: Evidence from Dutch. – Russi, C. (ed). Current Trends in Historical Sociolinguistics. De Gruyter Open, 194–218.

Saarinen, J. 2018. Runolaulun poetiikka: Säe, syntaksi ja parallelismi Arhippa Perttusen runoissa. Helsingin Yliopisto, Helsinki.

Shen, Q., Tao, Y. 2021. Stance markers in English medical research articles and newspaper opinion columns: A comparative corpus-based study. PLoS ONE, 16(3), e0247981, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247981

Taremaa, P., Metslang, H., Norvik, M. 2024. Midagi erakordset on toimumas! Progressiiv eesti keeles. – Prillop, K., Viht, A. (toim). Keelde. Keelel. Keelest. Pühendusteos Külli Habichtile 60. sünnipäevaks. EKSA, Tallinn, 335–359.

Tesnière, L. 1959. Éléments de syntaxe structurale. Klincksieck, Paris.

Thomason, S. G. 2001. Language Contact. Edinburgh University Press, Edinburgh.

Turenius, K. 1974. Konnotatiivinen menetelmä. Kirjallisuudentutkijain Seuran vuosikirja, 28, 217–236.

Vaik, K. 2024. Beyond Genres: A Dimensional Text Model for Text Classification. Tartu Ülikooli Kirjastus, Tartu.

Väina, M. 2025. Vastavuste võrgustikud regilaulu parallelismis. Oma Keel, 2, 73–76.

Foto: Erlend Štaub

Helle Metslang

Sündinud 29. juulil 1950 Paides

1968 Paide Keskkool

1974 Tartu Riiklik Ülikool (filoloog, eesti keele ja kirjanduse õpetaja)

1978 Tartu Riiklik Ülikool (filoloogiakandidaat soome-ugri keelte alal)

1994 Oulu Ülikool (filosoofiadoktor soome keele alal)

Helle Metslang on Tartu Ülikooli emeriitprofessor, Helsingi Ülikooli ja Oulu Ülikooli adjunktprofessor, Academia Europaea ja Eesti Keelenõukogu liige, Emakeele Seltsi esimees. Ta on töötanud Keele ja Kirjanduse Instituudis vanemteadurina, Helsingi, Tallinna ja Tartu ülikoolis professorina. On pidanud külalisloenguid Viinis, Münchenis, Greifswaldis, Firenzes, Budapestis, Pekingis, Turus, Oulus jm. Tema peamisteks uurimisvaldkondadeks on morfosüntaks, keeletüpoloogia, pragmaatika, keele dünaamika ja varieerumine ning ajalooline sotsiolingvistika. Ta on eesti keele grammatikate kaasautor, „Eesti grammatika“ (2023) ja tervikkäsitluste sarja „Eesti keele varamu“ peatoimetaja, üks Eesti Rakenduslingvistika Ühingu aastaraamatu ja ajakirjade STUF – Language Typology and Universals, Journal of Uralic Linguistics, Open Linguistics ning Keel ja Kirjandus teemanumbrite toimetajaid. On pälvinud riigi teaduspreemia aastatel 1995, 1996 ja 2026, F. J. Wiedemanni keeleauhinna aastal 2020.