Facta non solum verba

TEADUSMÕTE EESTIS (X)

TEHNIKATEADUSED III

TALLINN 2019

Koostaja: Jakob Kübarsepp
Vastutav toimetaja: Tarmo Soomere

Raamatu valmistasid ette:
Helle-Liis Help, Siiri Jakobson, Ebe Pilt, Anne Pöitel

Keeletoimetaja: Katrin Ringo

Fotod: Reti Kokk
Küljendaja: Erje Hakman

Kirjastus Argo
Trükitud trükikojas Print Best

ISSN 1736-5015 (trükiväljaanne)
ISSN 2674-1660 (võrguväljaanne)
ISBN 978-9949-9203-9-6 (trükiväljaanne)
ISBN 978-9949-7354-0-2 (võrguväljaanne)
© EESTI TEADUSTE AKADEEMIA

SISUKORD

SAATEKS 4
Jakob Kübarsepp

KÕNETEHNOLOOGIA- JA FONEETIKAUURINGUTEST TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLIS 7
Tanel Alumäe ja Einar Meister

GEOIDI MODELLEERIMINE KÕRGUSTE LÄHTENIVOOPINNANA 21
Artu Ellmann, Silja Märdla, Tõnis Oja

LAINELEVI MODELLEERIMINE TAHKISTES JA KOMPLEKSSÜSTEEMID 37
Jüri Engelbrecht

BIOMEDITSIINITEHNIKA – TEHNOLOOGIA TERVISE HEAKS 48
Hiie Hinrikus, Maie Bachmann, Kristjan Pilt, Kalju Meigas ja Ivo Fridolin

PÄIKESEENERGEETIKA MATERJALIDE UURINGUD EESTIS 59
Marit Kauk-Kuusik, Maarja Grossberg, Ilona Oja Acik, Malle Krunks

INIMTEKKELINE HELI OOKEANIS JA SELLE MÕJU MEREKESKKONNALE 66
Aleksander Klauson

NANOKIULISED MATERJALID 75
Andres Krumme, Anti Viikna, Tiia Plamus, Mihkel Viirsalu

NANOLAMINAATTAHKISTE, NANOKOMPOSIITIDE JA TAHKETE LAHUSTE AATOMKIHTSADESTAMINE 85
Kaupo Kukli, Väino Sammelselg, Aile Tamm, Jaan Aarik

ÜHTSUS JA ERISUS KAABELKONSTRUKTSIOONIDE PROJEKTEERIMISEL 96
Valdek Kulbach

TERAS KULUMISKINDLATE KOMPOSIITIDE TEHNOLOOGIAS 108
Jakob Kübarsepp

DIGITOOTMISE TEHNOLOOGIATE ARENDUSEST TÖÖTLEVALE TÖÖSTUSELE 122
Rein Küttner, Kristo Karjust, Tauno Otto, Jüri Riives

IMPEDANTS: ELEKTROONIKUTE IDEELAEGAS JA VARAKAMBER AASTAKÜMNETEKS 130
Mart Min

LIHASROBOTID 145
Indrek Must, Andres Punning, Alvo Aabloo

KÜTUSE PÕLETAMINE LÄMMASTIKUVABAS KESKKONNAS 152
Arvo Ots

EESTI TEADUSE NÄHTAMATUD HIIGLASED 161
Jaan Raik

LAIA KEELUTSOONIGA POOLJUHTMATERJALIDEL PÕHINEVAD POOLJUHTSEADISED 169
Toomas Rang, Galina Rang

LÄÄNEMERE RAHUTUTE RANNIKUTE PÕNEVAD SALADUSED 177
Tarmo Soomere

21. SAJANDI KESKKONNATEHNOLOOGIA VÄLJAKUTSE – MIKROSAASTEAINED 190
Marina Trapido, Eneliis Kattel

„TERVIS RUUDUS“ EHK TIPPKESKUSE CEBE LUGU 200
Raimund Ubar

UUDSED ALALISPINGEMUUNDURID TAASTUVENERGEETIKAS 216
Dmitri Vinnikov, Tanel Jalakas, Indrek Roasto

SENSORMATERJALID MOLEKULAARSELT JÄLJENDATUD POLÜMEERIDEST MEDITSIINILISEKS DIAGNOSTIKAKS JA KESKKONNASEIREKS 227
Andres Öpik, Vitali Sõritski ja Jekaterina Reut

Tehnikateadused/inseneriteadused on saanud teistest eristuva teadusvaldkonna tunnustuse alles sadakond aastat tagasi. Erinevalt loodusteadlastest püüavad tehnikateadlased teaduslikku metoodikat rakendades lahendada praktilisi probleeme. Selle tõttu on tehnikateadused/inseneriteadused oma olemuselt eelkõige rakendusteadused, kus uurimisobjekt on tehislik – inimese loomeprotsessi tulemus.

Paljud Eesti teaduse kvaliteedi näitajad on OECD (The Organisation for Economic Co-operation and Development, majanduskoostöö ja arengu organisatsioon) ja Euroopa Liidu keskmisest paremad. Eesti teadus on viimase kümmekonna aastaga läbinud väga kiire arengu. Oleme jõudnud teaduses parimate riikide esirinda. Paistame silma sellega, et oleme konkurentsivõimelised sisuliselt kõikides teadusvaldkondades. Teaduse kiiret kasvu on lisaks teadustööd soodustavale keskkonnale aidanud edendada teadustegevuse kultuuri muutused. Selle iseloomulikuks jooneks Eestis näib olevat see, et tööde avaldamise eelduseks on neis sisalduvad originaalsed ideed, mis pakuvad lahendusi olulistele probleemidele ja pälvivad kolleegide tähelepanu kogu maailmas. Selle kultuuri üheks osaks näib olevat mugavusteaduse vältimine.[1]

Parema rahvusvahelise taseme saavutamine teaduses ei saa olla omaette eesmärk. Teaduses toimuv ning ühiskonna ja majanduse areng on omavahelises seoses. Majanduse konkurentsivõime suurendamiseks on vaja suurendada teaduse majanduslikku ja ühiskondlikku mõjukust. Eesti teadus- ja arendustegevuse ning innovatsiooni strateegia 2014–2020 „Teadmistepõhine Eesti“ üheks põhiteguriks on mõistmine, et strateegia elluviimiseks peab teaduse arengu toetamise kõrval panustama enam ka tootlikkuse kasvu ettevõtlussektoris. Selle tagab majandusarengus maailma edukamate riikide kogemusele tuginedes tõhusam koostöö ülikoolide, ettevõtlussektori ja riigi institutsioonide vahel. Eriti suur potentsiaal on teiste teadusvaldkondade kõrval tehnikateadustel, eelkõige konkreetsetele rakendustele suunatuse tõttu.

Kuigi Eesti teaduse kvaliteet on rahvusvaheliselt kõrgel tasemel, pole samavõrra kiitvat hinnangut võimalik anda teaduse ja ettevõtluse tiheda seostamise, teaduse rahastamise, eriti erasektori poolt teadustöö rahastamise taseme, ning teadlaskonna järelkasvu kohta. Üleminek tööjõumahukalt majandusmudelilt kapitali- ja teadmusmahukale mudelile eeldab tähelepanu pööramist kõigile eelnimetatud aspektidele. Majandusarengu töögrupi raport[2] suunab tähelepanu Eesti majandusmudeli mitmekesistamise vajadustele tehnoloogia- ja teadusmahukuse suurendamise suunas. Kõige suurem mõju lisandväärtuse kasvule on seejuures tootlikkust suurendavatel tegevustel.

Majandusarengu töögrupi raporti kohaselt tuleb majanduskasvu edendamiseks inimressursi arendamise ja ärikeskkonna parendamise kõrval (1) suurendada avaliku sektori teadus- ja arendustegevuse (T&A) kulusid (vähemalt 1 protsendini sisemajanduse kogutoodangust ehk SKTst),

[1] Allik, J. 2016. Teaduspublikatsioonid: Eesti tee maailma tippu. – Eesti Teadus 2016. SA Eesti Teadusagentuur, 27–32.

[2] Raasuke, E. (töögrupi juht), jt. 2016. Majandusarengu töögrupi raport, 71 lk, https://www.valitsus.ee/sites/default/files/content-editors/failid/majandusarengu_raport.pdf

kasvatades eelkõige pikaajalise, stabiilse rahastusallika (baasfinantseerimine) osa ning muutes samas baasfinantseerimise tingimusi ja korda, et stimuleerida T&A asutuste ja ettevõtete koostööd; (2) välja töötada struktureeritud põhimõtete ja eesmärkidega süsteem, mida ja kuidas riik soovib teadusse suunatud avaliku sektori raha eest majanduskasvu edendamiseks saavutada; (3) luua informatsioonisüsteem, mis võimaldab hinnata teadustegevuse tõhusust ja selle panust innovatsiooni loomisel, saamaks aru, kuidas Eesti teadustegevus aitab kaasa tootlikkuse suurendamisele; (4) pöörata enam tähelepanu T&A sotsiaal-majandusliku mõju mõõtmisele rahaliste toetuste jagamisel ja (5) pöörata valdkondade T&A evalveerimisel enam tähelepanu innovatsioonile, kommertsialiseerimisele, koostööle ettevõtetega ning koostöövõrgustiku olemasolule, samuti teadmussiirdele. Need tegevused peaksid aitama kujundada ja tugevdada teadmussiirde kultuuri teadus- ja arendusasutuste (sh ülikoolide) ning ettevõtete vahel.

Teadmussiirde kultuuri tugevdamisel on kindel roll teadlastel ja uurimisrühmadel, sealhulgas neis tegutsevatel doktorantidel. Teadmussiire saab toimida vaid teadusasutuste ja ettevõtete partnerluses, kusjuures üha kasvav roll saab olema doktorikraadiga inimestel ettevõtetes. Kui kõrghariduse omandamises on Eesti OECD riikide võrdluses keskmiste hulgas, siis doktorikraadiga inimeste osas tööjõus üldse − ja erasektoris eriti − oleme ikka veel viimaste hulgas.

Selle kogumiku eesmärk on ettevõtlussektori ja laiema lugejaskonna teavitamine Eestis tehtavast rahvusvaheliselt kõrgel tasemel teadustööst tehnikateaduste ja sellega seotud interdistsiplinaarsetes teadussuundades. Eesmärgiks kõige üldisemas mõttes on teadusuuringute tähenduse ja olulisuse mõistmise parandamine ühiskonnas. Kitsas alavaldkonnas tegutseva teadlaskonna teadustulemuste kommunikeerimine laiemale lugejaskonnale on sama oluline kui publitseerimine mõjukates teadusajakirjades, monograafiate kirjutamine ning esinemised rahvusvahelistel teaduskonverentsidel.

Kogumik on pärast kümneaastast vaheaega järjeks aastatel 2002 ja 2007 avaldatud, tehnikateadusi laiemale lugejaskonnale tutvustanud kogumikele „Teadusmõte Eestis. Tehnikateadused“. Seekordne kogumik sisaldab sarnaselt eelnevatega piiratud väljavõtteid (kokku 21 artiklit) Tallinna tehnikaülikoolis ja Tartu ülikoolis tehtavatest tehnikateadusalastest ja nendega seonduvatest uuringutest pärast eelmise kogumiku ilmumist. Artiklid on toimetanud teaduste akadeemia. Kogumikus sisalduvad artiklid on esimeste autorite perekonnanimede tähestikulises järjekorras.

Jakob Kübarsepp

Eesti teaduste akadeemia informaatika ja tehnikateaduste osakonna juhataja

Tallinna tehnikaülikooli inseneriteaduskonna professor

KÕNETEHNOLOOGIA- JA FONEETIKAUURINGUTEST TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLIS

Tanel Alumäe ja Einar Meister
Tallinna tehnikaülikooli tarkvarateaduse instituut

SISSEJUHATUS

Kõne on inimeste jaoks kõige loomulikum suhtlusviis, kuid üha enam on see jõudmas ka inimese ja masina vahelisse suhtlusse. Virtuaalsete assistentidega, nagu nt Apple Siri, Google Assistant, Microsoft Cortana ja Amazon Alexa, võime suhelda nagu inimestega – kõne abil saame anda neile korraldusi mingi muusikapala või audioraamatu ettemängimiseks, salvestada kohtumisi oma kalendrisse, küsida teavet ilma, liiklusolude, spordisündmuste kohta, tellida e-poest kaupa, teha otsinguid internetis jpm. Keelte arv, milles virtuaalsete abilistega suhelda saab, on seni üsna piiratud – eelkõige on need suure kõnelejate arvuga keeled (inglise, prantsuse, saksa, jaapani, hiina, portugali jt, kokku u 20 keelt). Eesti keele lisamine võtab ilmselt veel mitu aastat aega, sest ligi ühe miljoni kõnelejaga keel pole tehnoloogiahiidude jaoks kuigi atraktiivne.

Suuline dialoog arvutiga eeldab mitmete keelespetsiifiliste komponentide olemasolu – kõnetuvastus, sõnumi mõistmine, vastuse genereerimine ja kõnesüntees. Tallinna tehnikaülikooli (TTÜ) keeletehnoloogia laboris (endine TTÜ küberneetika instituudi foneetika ja kõnetehnoloogia labor) on viimastel aastatel tehtud olulisi edusamme eestikeelse kõnetuvastuse arendamisel ja jõutud mitme reaalse rakenduseni, seda tänu aastatepikkusele järjepidevale uurimis- ja arendustööle kõnetehnoloogia valdkonnas, mida on toetanud suuremahuliste kõnekorpuste loomine ning eestikeelse kõne eksperimentaal-foneetilised uuringud.

Einar Meister (vasakul) ja Tanel Alumäe.

Selles artiklis anname ülevaate eestikeelse kõnetuvastuse viimaste aastate arendusest ja rakendustest ning kõne variatiivsuse uuringutest laste ja võõrkeelse aktsendiga kõne näidetel.

KÕNETEHNOLOOGIA

Kõnetuvastus. Automaatne kõnetuvastus on tehnoloogia, mille abil teisendatakse inimkõne sellele vastavaks tekstiks. Kõnetuvastus on interdistsiplinaarne valdkond, mis kasutab teadmisi ja meetodeid keeleteadusest, foneetikast, signaalitöötlusest, statistikast ja arvutiteadusest. Tänapäevane kõnetuvastus põhineb masinõppel, st kõnetuvastuses kasutatakse mudeleid, mis on treenitud suurte

treeningkorpuste põhjal. Kõnetuvastusel on palju rakendusalasid, nt dokumentide dikteerimine, inimese ja arvuti vaheline suhtlus, suurte kõnearhiivide transkribeerimine eesmärgiga teha need paremini indekseeritavaks ja otsitavaks, kuulmispuudega inimeste abisüsteemid jpm. Oluline on mõista, et kõnetuvastus piirdub ainult kõne muutmisega tekstiks. Kõne ja sellele vastava teksti arvutile arusaadavaks tegemisega tegelevad teised keeletehnoloogia harud.

Kõnetuvastuse muudavad keeruliseks eelkõige kaks asjaolu: kõne varieeruvus ja keelekasutuse suur valdkonna- ja olukorraspetsiifilisus. Kõne varieeruvus seisneb selles, et sama häälik (näiteks vokaal /a/) kõlab väga erinevalt sõltuvalt sellest, kes ja millises olukorras selle on „produtseerinud". Häälikute akustilised omadused sõltuvad kõneleja anatoomilistest erinevustest ja sotsiaalsest taustast. Teisalt sõltub hääliku kvaliteet ja kestus tugevalt kontekstist, kus see sõnas esineb. Näiteks on vokaal /a/ väga erinev sõnades k a d e ja j a l g, kuna konkreetsele häälikule eelnevad ja järgnevad häälikud põhjustavad olulisi koartikulatsiooniefekte.

Häälikute akustilisi omadusi mõjutab tugevasti ka suhtlusolukord: näiteks spontaanses kõnes on sõnad tüüpiliselt lohakamalt hääldatud kui dikteeritud kõnes, mis põhjustab omakorda häälikute kvaliteedi muutust ja redutseerumist. Keelekasutus on valdkonnaspetsiifiline: keeles kasutatav sõnavara ja tüüpilised sõnakombinatsioonid sõltuvad kasutusvaldkonnast. Näiteks noorte igapäevases suhtluses kasutatakse teistsuguseid sõnu kui meditsiinis või justiitsvaldkonnas. Kõne suur varieeruvus ja valdkonnaspetsiifilisus toovad kaasa olukorra, et universaalset kõnetuvastussüsteemi, mis töötaks ühtmoodi hästi kõikides olukordades ja valdkondades, on praegu kasutatava tehnoloogia juures võimatu luua. Teisalt, kuna tänapäevane kõnetuvastus põhineb suuresti masinõppel, sh sügavatel närvivõrkudel, on kõnetuvastuses vähe keelespetsiifilisi nüansse ning valdkonna ja/või keelespetsiifilise tuvastussüsteemi loomise eelduseks on eelkõige sobivate treeningandmete olemasolu.

Tallinna tehnikaülikooli keeletehnoloogia laboris on olnud prioriteediks eestikeelse kõnetuvastuse uurimine ja arendamine, eesmärgiga luua eesti keelele kõnetuvastuse tuumiktehnoloogia, mis oleks integreeritav ja adapteeritav mitmesugustesse valdkonnaspetsiifilistesse süsteemidesse. Selleks jälgime pidevalt uuemaid arenguid kõnetuvastuse maailmas üldiselt ning üritame üle võtta meetodeid ja tehnoloogiaid, mis on teiste keelte puhul andnud häid tulemusi. Kasutame vabatarkvaralist kõnetuvastustarkvara Kaldi (Povey jt, 2011), kus on implementeeritud paljud nüüdisaegsed kõnetuvastusalgoritmid. Oleme sellesse tarkvarasse ka omalt poolt täiendusi teinud ning loonud mitmesugust vaba tarkvara, mis Kaldi integreerimist reaalsetesse süsteemidesse hõlbustab (Alumäe, 2014) ja on leidnud kasutust ka mujal maailmas. Näiteks meie loodud kõnetuvastusserveri tarkvara kasutab ka Läti firma Tilde läti keele tuvastussüsteem.

Kõnetuvastussüsteemis kasutatakse kolme mudelit, mis modelleerivad kõne ja keele eri aspekte: akustiline mudel kirjeldab parameetriliselt, millised on selles keeles kasutatavate häälikute akustilised omadused ja kuidas need kontekstist sõltuvalt varieeruvad; keelemudel kirjeldab keeles esinevaid sõnu ja annab tõenäosusliku hinnangu erinevatele sõnakombinatsioonidele; hääldussõnastikus on toodud keelemudelis olevate sõnade hääldused, st sõnade teisendus akustilises mudelis olevate häälikute jadaks.

Akustilisi mudeleid treenitakse suurte kõneandmebaaside põhjal. Kõneandmebaasid on kõnekorpused, mis on lausungite kaupa segmenteeritud ning igale lausungile on inimtranskribeerija andnud sellele vastava ortograafilise transkriptsiooni. Kõnetuvastussüsteemi kvaliteet sõltubki suuresti kasutatavate kõneandmebaaside mahust ja kvaliteedist. Rakendusteks vajaliku kõnetuvastuskvaliteedi saavutamiseks oleme viimase kümne aasta

Tabel 1. Akustiliste mudelite treenimiseks kasutatavad kõneandmed.

Päritolu	**Kõne liik**	**Maht (tunde)**
Raadio ja televisiooni vestlussaated, raadiointervjuud	Poolspontaanne	109
Loengud ja konverentsiettekanded	Mittespontaanne	38
Raadio ja televisiooni uudistesaated	Dikteeritud, osaliselt poolspontaanne	30
Tartu ülikooli eesti keele spontaanse kõne foneetiline korpus	Spontaanne	29
Kõneandmebaas BABEL	Dikteeritud	8
Androidi rakenduse Kõnele reaalne kasutus	Dikteeritud	2
Kokku		216

jooksul pidevalt ja süstemaatiliselt arendanud erinevaid kõnekorpusi. Praegu kasutatakse akustiliste mudelite treenimiseks kokku 216 tundi kõneandmeid, mille päritolu kirjeldab tabel 1.

Keelemudelite treenimiseks kasutatakse suuri tekstikorpuseid. Tekstile vastavat kõnesignaali selleks ei vajata. See on hea kahe aspekti poolest. Esiteks võimaldab see keelemudeli treenimiseks kasutada sõnade arvult palju suuremaid korpuseid kui akustiliste mudelite treenimiseks (nt ajalehetekstid, Wikipedia jms). Teiseks saab tänu akustilise mudeli ja keelemudeli lahususele luua kõnetuvastussüsteemi ka sellisele valdkonnale, mille jaoks kõneandmeid pole või on neid vähe – vaja on vaid suurt hulka vastava valdkonna tekstimaterjali, mille abil treenida keelemudel. Eelduseks on siiski see, et treenimiseks kasutatavate kõneandmete hulgas oleks sellist materjali, mis on sihtvaldkonnale kõne stiililt ja muudest aspektidest lähedane: näiteks laste kõne tuvastamiseks mõeldud süsteemi treenimiseks on ikkagi vaja lastekõne korpust.

Kõnetuvastussüsteemi kvaliteedi mõõtmiseks kasutatakse meetrikana sõnavigade määra (ingl *word error rate*). Sõnavigade määr näitab, kui suur osa sõnadest tuvastati valesti. Sõnavigade määra arvutamiseks joondatakse testimises kasutatavate kõnesalvestuste automaatselt toodetud transkriptsioon inimese tehtuga, leitakse valesti tuvastatud, tuvastamata jäänud ja liiaselt tuvastatud sõnad, ning jagatakse vigade arv inimese loodud transkriptsioonis olevate sõnade arvuga.

Tabelis 2 on toodud meie kõnetuvastussüsteemi aktuaalne sõnavigade määr mitme erineva testvalimi peal. Kõige pikemalt oleme oma tuvastussüsteemi testinud raadio vestlussaadete valimi peal, kus sisalduvad erinevad päevakajalised jutusaated (nt „Olukorrast riigis“, „Välismääraja“, „Kukkuv õun“). Kuna meie treeningandmetes sisaldub sellist materjali palju, on tuvastuskvaliteet siin väga hea. Sellest isegi veidi suurema täpsusega on uudistesaadete transkribeerimine, kuigi „Aktuaalses kaameras“ sisaldub ka palju taustamüraga saatelõike ja poolspontaanseid intervjuusid. Tunduvalt kõrgem on sõnavigade määr konverentsiettekannete ja spontaanse kõne puhul. Konverentsiettekannete puhul on see eelkõige seletatav suure arvu erialaspetsiifiliste sõnade ja väljendite esinemisega kõnes. Tabeli viimases reas on toodud meie avaliku veebipõhise kõnetuvastusteenuse kasutusest juhuslikult valitud kõnesalvestused. Kuna seda teenust kasutatakse tihti suhteliselt halva kvaliteediga (nt diktofoni või nutitelefoniga mürases keskkonnas salvestatud) salvestuste transkribeerimiseks, on vigade arv siin umbes kolm korda suurem kui raadiosaadete puhul. Olgu öeldud, et oleme selliste salvestuste tuvastamise kvaliteedi parandamise võtnud üheks oma prioriteediks.

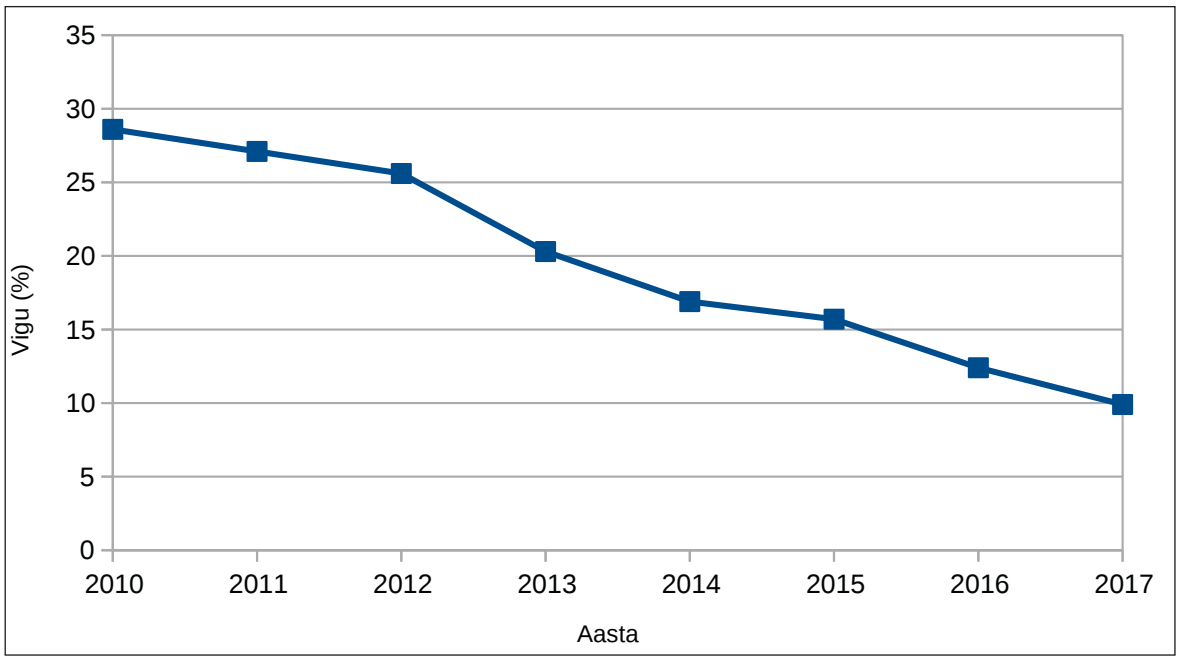
Tabel 2. Tuvastusvigade määr erinevate testvalimite lõikes.

Testvalimi päritolu	**Sõnavigade määr**
Raadio vestlussaated	9,8
ETV uudistesaade „Aktuaalne kaamera“	9,6
Ettekanded rakenduslingvistika konverentsilt	13,9
Spontaanne kõne Tartu ülikooli korpusest	17,6
Kasutajate üles laaditud salvestused	27,2

Joonisel 1 on näidatud tuvastusvigade määra vähenemine aastate lõikes raadio vestlussaadete valimi põhjal. 2010. aastaga võrreldes on nüüd vigu peaaegu kolm korda vähem. Samasugust trendi saab täheldada ka teiste testvalimite puhul: näiteks konverentsiettekannete puhul on vigade määr langenud 37 protsendilt 14-le.

Eestikeelse kõnetuvastuse kvaliteeti on aidanud parandada treeningandmete mahu pidev kasv. Kui 2010. aastal kasutasime akustiliste mudelite treenimiseks u 60 tundi kõneandmeid, siis nüüd on meil üle 210 tunni transkribeeritud salvestusi. Suurenenud on ka treeningmaterjali allikate varieeruvus, mis suurendab nende kvaliteeti ja kasulikkust veelgi.

Teine oluline faktor, mis on kogu maailmas viimase viie-kuue aasta jooksul kõnetuvastuse kvaliteeti hüppeliselt parandanud, on sügavate närvivõrkude (ingl *deep neural networks*) kasutuselevõtt. Sügavad närvivõrgud on oma olemuselt mitme peidetud kihiga närvivõrgud, mida on uuritud juba aastakümneid, kuid just 2010. aastate alguses õpiti neid



Joonis 1. Tuvastusvigade määra muutus aastate lõikes.

efektiivselt treenima ja kasutama ka kõnetuvastuses. Oma osa on siin olnud ka arvutusvõimsuse suurenemisel ja graafikaprotsessorite (GPU) kasutamisel maatriksarvutuste kiirendamisel. Meie võtsime närvivõrgud kõnetuvastuse akustilises mudelis kasutusele 2013. aastal, tänu millele on näha ka järsk langus vigade arvus. Ka edasine progress on tuginenud suuresti närvivõrkude kasutamise efektiivistamisele. Kuigi närvivõrkude treenimine nõuab suurt arvutusvõimsust, ei tee nende rakendamine tuvastusprotsessi aeglasemaks, pigem vastupidi. Kui 2010. aastal töötas meie tuvastussüsteem kolmekordse reaalajalise kiirusega (st tunniajase salvestuse transkribeerimiseks kulus u kolm tundi), siis nüüd töötab tuvastaja umbes poolekordse reaalajalise kiirusega (tunniajane salvestus töödeldakse poole tunniga).

Teised olulised faktorid tuvastuskvaliteedi parandamisel on olnud järgmised.

- Treeningandmete augmenteerimine: lisaks puhastele treeningandmetele kasutatakse akustiliste mudelite treenimise kunstlikult mürastatud ja reverbereeritud kõneandmeid, mis parandab eriti just viletsa kvaliteediga ja müraste salvestuste tuvastuskvaliteeti.
- Rekurrentsel närvivõrgul põhineva keelemudeli kasutamine, mis peaks parandama pikkade süntaktiliste seoste modelleerimist keelemudelis.
- Tundmatute (st keelemudelis mitteolevate) sõnade tuvastamine häälikutel põhineva n-gramm-mudeli abil. Sellised sõnad on näiteks keelemudelisse veel mitte jõudnud nimed, paljude harvem esinevate nimisõnade „eksootilisemad“ käändevormid jms. Selliste sõnade mittetuvastamine on pikka aega olnud traditsioonilise tuvastusarhitektuuri üheks suureks miinuseks. Kasutatud meetod põhineb sellel, et keelemudelis on tundmatute sõnade jaoks reserveeritud eraldi pseudosõna ning akustilises mudelis modelleeritakse tundmatut sõna häälikupõhise miniatuurse n-gramm-keelemudeliga, mis on treenitud kõigi keelemudelis olevate sõnade hääldus põhjal.

Eestikeelne kõnetuvastus on jõudnud reaalsete rakendusteni. Koostöös Põhja-Eesti regionaalhaiglaga töötasime välja kõnetuvastussüsteemi radioloogidele, mis võimaldab röntgeni-, magnetresonants-, ultraheli- ja muude meditsiinis kasutatavate piltide kirjeldusi dikteerida reaalajalise kõnetuvastuse abil. Kõnetuvastuse vigade määr on selles rakenduses u viis protsenti (Alumäe jt, 2017). Kõnetuvastust kasutavad ka mitmed Eesti meediamonitooringufirmad raadio- ja telesaadete automaatseks transkribeerimiseks. Samuti on aktiivses kasutuses Tallinna tehnikaülikooli keeletehnoloogia labori avalik veebipõhine kõnetuvastussüsteem (http://bark.phon.ioc.ee/webtrans/), mis võimaldab kõikidel huvilistel tasuta oma kõnesalvestusi kõnetuvastaja abil transkribeerida. Viimase aasta jooksul on selle süsteemi abil transkribeeritud pea tuhande erineva kasutaja kõnesalvestusi kogumahus 1900 tundi. Seda süsteemi kasutavad näiteks paljud ajakirjanikud ja humanitaarteadlased intervjuude transkribeerimiseks.

KIRJAVAHEMÄRGISTAMINE

Kõnetuvastussüsteemi genereeritav tekst on ilma kirjavahemärkideta, mis teeb sellise teksti lugemise inimesele raskeks. Seetõttu oleme välja töötanud tuvastatud teksti automaatse kirjavahemärgistamise tehnoloogia, mis oskab tuvastatud tekstis leida kõige tõenäolisemad lausepiirid, leida lausepiirile parima kirjavahemärgi (punkt või küsimärk) ning lisada sobivatesse kohtadesse komad (Tilk, Alumäe, 2016). Lingvistiliste reeglite asemel kasutame ka siin sügavaid kahesuunalisi rekurrentseid närvivõrke, mis on treenitud suurte tekstikogumite põhjal. Lisaks sellele kasutab mudel infot sõnadevaheliste pauside pikkuste kohta, toetudes intuitsioonile, et pikemate pauside kohal on lause lõpu ja

koma tõenäosus suurem. Kirjavahemärkide lisamise täpsus ja saagis on u 80 protsenti, st u 20 protsenti kirjavahemärkidest jääb leidmata ja u 20 protsenti süsteemi välja pakutud kirjavahemärkidest on valed. Oleme leidnud, et ka sellise täpsuse juures teeb automaatne kirjavahemärgistamine tuvastatud teksti inimesele paremini arusaadavaks ja loetavaks. Kirjavahemärgistaja tööga saab tutvuda labori automaatselt transkribeeritud raadiosaadete arhiivis (vt näiteks http://bark.phon.ioc.ee/tsab/p/play?trans=9630).

KÕNELEJATE IDENTIFITSEERIMINE

Paljudes kõnetuvastusega seotud rakendustes on lisaks tuvastatud tekstile huvitav ka teada, kes seda ütles. See võimaldaks näiteks raadio- või telesaadete arhiivist otsida kindla poliitiku lausungeid, mis sisaldavad mingeid „huvitavaid“ sõnu. Kõneleja identifitseerimine hääle põhjal ei ole iseenesest väga keeruline probleem, kuid suure katvusega kõnelejatuvastussüsteemi treenimiseks läheb üldjuhul vaja väga palju käsitsi annoteeritud treeningandmeid: iga kõneleja peab treeningandmetes olema esindatud paljude kõnelõikudega, kusjuures kõnelõikude piirid peavad olema täpselt märgendatud ning kõnelõigule peab olema omistatud korrektne kõneleja nimi. See teeb laia katvusega kõnelejatuvastussüsteemi loomise kalliks ja aeganõudvaks.

Meie töötasime välja täiesti uudse meetodi, mille abil treenida kõneleja identifitseerimise mudeleid „nõrgalt juhendatud“ viisil (Karu, Alumäe, 2018). Meie välja pakutud meetod vajab selliseid treeningandmeid, kus kõnelejad on annoteeritud salvestuste tasemel (annotatsioon peab seega ütlema, kas meid huvitav kõneleja esineb selles salvestuses või mitte) ning segmendi tasemel annotatsiooni ei ole vaja. Niisugused andmed on saadaval näiteks ERRi arhiivist, kus paljude saadete kohta on metaandmetes esitatud saates sõna saavad kõnelejad. Meetodi näitlikustamiseks treenisime oma kõnelejatuvastuse süsteemi „Päevakaja“ arhiivi põhjal (6619 saadet). Süsteem tunneb kokku peaaegu 5000 eri kõnelejat (kõik, kes esinevad „Päevakajas“ vähemalt kaks korda). Saavutatud kõnelejatuvastuse saagis (*recall*) on uute „Päevakaja“ saadete põhjal 66 protsenti ja täpsus (*precison*) 93 protsenti, kasutades automaatset kõnelejate segmenteerimist. See tähendab, et 66 protsenti ajast suudab meie süsteem määrata aktiivsele kõnelõigule korrektse kõnelejanime, kusjuures seitse protsenti ajast on süsteemi määratud nimi vale. Leidsime ka: et süsteem hakkaks kõnelejat korrektselt identifitseerima, on vaja, et ta oleks arhiivis olevates saadetes esinenud keskmiselt vähemalt 15 korda, kuigi mõningatel juhtudel töötab identifitseerimine ka ainult kuue esinemiskorra puhul.

FONEETIKAUURINGUD

Eestikeelse kõnetuvastuse arendamisel on treeningmaterjalina kasutatud ainult eesti emakeelega täiskasvanute kõnet, mistõttu on kõnetuvastusele probleemiks sellised kõnevariatsioonid, mida treeningkorpus ei sisalda, nt laste ja võõrkeelse aktsendiga kõne. Kõne variatiivsuse eksperimentaal-foneetiline uurimine võimaldab selgitada erinevate kõnevariatsioonide olemust ja annab kõnetuvastuse arendamiseks olulist teavet.

LASTE KÕNE UURINGUD

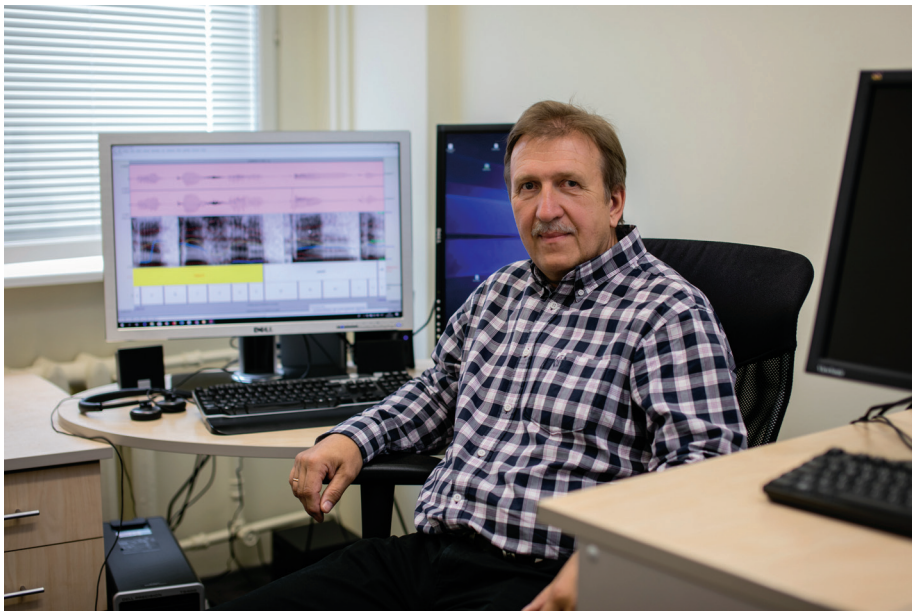
Laste kõne erineb oluliselt täiskasvanute kõnest. See on tingitud eelkõige anatoomilistest erinevustest kõnetrakti ja häälekurdude suuruses ning geomeetrias. Sündides on imiku kõnetrakti pikkus (mõõdetuna häälekurdudest kuni huulte väliskontuurini) ainult u 80 mm, 2–4-aastastel 9,9 cm, 13–14-aastastel 13,9 cm; erinevused poiste ja tüdrukute kõnetrakti pikkuses on registreeritud alates 15. eluaastast: 15–16-aastastel poistel 14,6 cm ja tüdrukutel 13,7 cm, 17–18-aastastel poistel 15,6 cm ja tüdrukutel 14,4 cm (Fitch, Giedd, 1999). Täiskasvanud meestel on see keskmiselt 17,5 cm ja naistel 15,5 cm (Barbier jt, 2015). Häälekurdude pikkus imikul on 4–5 mm, kuni 20. eluaastani kasvavad häälekurrud aastas keskmiselt 0,4 mm tüdrukutel ja 0,7 mm poistel, saavutades pikkuse u 10 mm naistel ja 16 mm meestel. Lisaks muutub koos vanusega ka kõnetrakti geomeetria, sealjuures arenevad poiste ja tüdrukute kõnetrakti erinevad osad (kõri, häälekurrud, kõva ja pehme suulagi jm) erinevalt (Vorperian, Kent, 2007). On registreeritud kõnetrakti kaks kiire arengu perioodi: (1) sünnist kuni kolme aasta vanuseni ja (2) puberteediiga (Fitch, Giedd, 1999; Vorperian jt, 2005, 2009; Barbier jt, 2015).

Akustiliselt väljenduvad vanuse ja sooga seotud häälekurdude ning kõnetrakti anatoomilised-füsioloogilised muutused eelkõige kõne põhitoonis (F0), mida me tajume häälekõrgusena, ja formantsagedustes, mis määravad vokaalide spektri. Puberteedieas langeb poiste F0 hüppeliselt, tüdrukutel langeb F0 ühtlaselt vanuse kasvades ja oluliselt vähemal määral. Vanuse kasvades alanevad formantsagedused järk-järgult nii poistel kui tüdrukutel ja saavutavad täiskasvanutele omased väärtused umbes 20. eluaastaks (Kent, Vorperian, 1995).

Vokaalide akustilist kvaliteeti kirjeldavad kõnetrakti resonantssagedused, mida nimetatakse formantideks. Vokaalide hääldamisel varieerub kõnetrakti kuju sõltuvalt keele ja huulte asendist ning sellest tulenevalt tekivad eri vokaalide puhul erinevad spektraalsed mustrid. Vokaalide kvaliteeti määravad eelkõige kaks esimest formanti (F1, F2), täpsemaks kirjeldamiseks esitatakse kuni nelja formandi (F1–F4) sagedused. Formantsagedused on korrelatsioonis vokaalide artikulatoorsete põhitunnustega – F1 on seotud keele kõrgusega, F2 keele ees-tagapoolsusega ja F3 huulte ümardatusega. Tüüpiliselt esitatakse vokaalide formantsagedusi F1–F2 teljestikus, mida nimetatakse ka akustiliseks vokaaliruumiks. Vokaalide formantsagedused on otseses seoses kõnetrakti anatoomilise suurusega – kõnetrakti pikkuse kasvades formantsagedused alanevad.

Eesti laste kõne uuringuteks oleme salvestanud kõnekorpuse[3], mis sisaldab 9–18-aastaste poiste (134 poissi) ja tüdrukute (175 tüdrukut) kõnenäiteid (kokku 309 keelejuhti). Salvestusi tehti Eesti eri murdepiirkondades, kokku kümnes koolis (kolm kooli Tallinnas, üks Harjumaal, kaks Ida-Virumaal, üks Põlvas, üks Võrumaal ja kaks Saaremaal). Salvestuse käigus lugesid keelejuhid etteantud lauseid ja numbrijadasid, spontaanse kõne näidete saamiseks paluti neil kirjeldada pilte ja rääkida iseendast, oma perekonnast, koolist, sõpradest ja hobidest. Igalt keelejuhilt salvestati u 15 minutit kõnet, kokku sisaldab korpus ligi 70 tundi salvestusi.

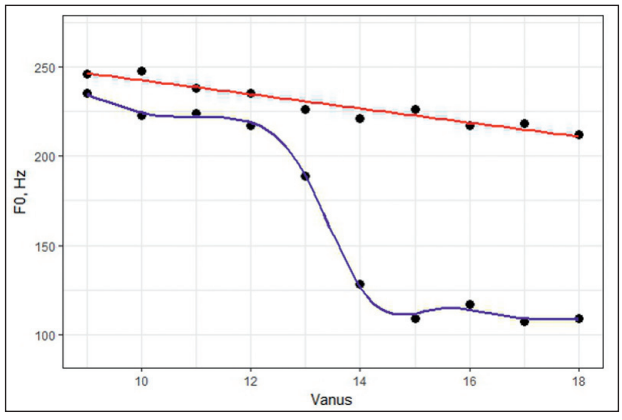
[3] Lastekõne korpus on loodud riikliku programmi „Eesti keeletehnoloogia (2011–2017)“ projekti EKT70 „Kõnekorpuste arendus“ raames.



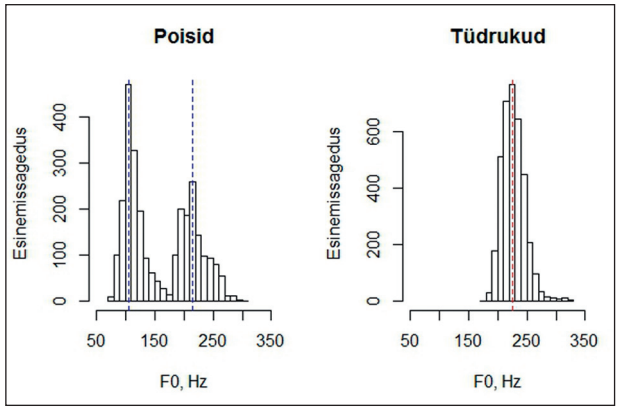
Järgnevalt esitame lastekõne põhitooni (Meister, Meister, 2017a) ja vokaalide (Meister, Meister, 2019) akustilise analüüsi tulemusi. Igalt keelejuhilt valiti uuringuks 21 lauset keskmise kestusega 7,8 sekundit. Akustiliseks analüüsiks kasutati programmi PRAAT (Boersma, Weenink, 2017), mille abil mõõdeti iga lause keskmine F0 väärtus ja rõhuliste vokaalide (kokku 28 070) formantsageduste F1–F4 väärtused.

F0 analüüsi tulemused (joonis 2) näitavad, et poistel vanuses 9–12 langeb keskmine F0 väärtus järk-järgult 235 Hz-lt 217 Hz-ni (18 Hz võrra), vanuses 12–15 leiab aset F0 väärtuse hüppeline langus 108 Hz võrra – 217 Hz-lt 109 Hz-ni –, kusjuures suurim langus (61 Hz) toimub vahemikus 13–14 aastat. F0 varieerumine vanuses 15–18 (109–117 Hz) peegeldab pigem keelejuhtide individuaalseid erinevusi kui arengulisi muutusi. Tüdrukute puhul langeb F0 väärtus vanuses 9–18 järk-järgult 245 Hz-lt 212 Hz-ni (33 Hz võrra).

F0 keskväärtuse esinemissageduse jaotust poistel ja tüdrukutel näitavad histogrammid joonisel 3. Poiste puhul eristuvad selgelt kaks maksimumi – 105 Hz ja 215 Hz. Neist esimene vastab häälemurde läbinud poiste sagedaseimale F0 keskväärtusele (poisid vanuses 15–18, F0 mediaan on 108 Hz), teine nooremate poiste (vanuses 9–12, F0 mediaan on 218 Hz), kelle puhul pole häälemurre veel alanud,



Joonis 2. F0 keskmised väärtused sõltuvalt vanusest ja vastavad regressioonijooned: ülemine tüdrukud, alumine poisid.

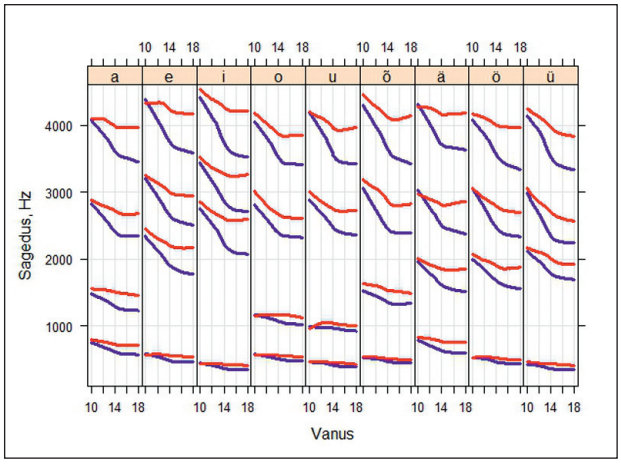


Joonis 3. F0 keskväärtuste histogrammid, vasakul poisid, paremal tüdrukud. Vertikaalsed kriipsjooned tähistavad suurimale esinemissagedusele vastavaid F0 keskväärtusi.

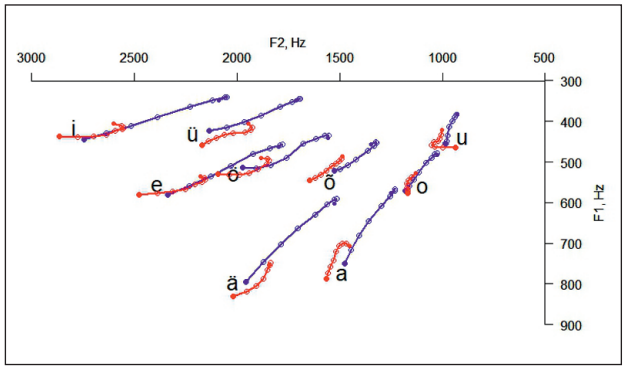
sagedaseimale F0 keskväärtusele. Tüdrukute F0 keskväärtuse jaotuses on ootuspäraselt ainult üks maksimum (225 Hz), mis on peaaegu võrdne kõigi tüdrukute F0 mediaanväärtuste keskmisega (226 Hz).

Laste kõne vokaalide formantsagedused F1–F4 sõltuvalt vanusest on esitatud joonisel 4. Kõigi vokaalide puhul näeme, et vanuse kasvades nii poiste kui tüdrukute vokaalide formantsageduste väärtused langevad, kusjuures poiste formantsagedused alanevad kiiremini kui tüdrukute omad. Soolised erinevused hakkavad ilmnema 11 aasta vanuselt ja kujunevad valdavalt välja 15. eluaastaks. Vanuses 15–18 on formantsageduste muutused väikesed, omandades täiskasvanud keelejuhtide vokaalidele tüüpilised väärtused.

Joonisel 5 on esitatud vokaalide asukoha muutus F1–F2 akustilises ruumis sõltuvalt keelejuhi vanusest. Näeme, et vanuse kasvades vokaalidevahelised kaugused akustilises ruumis vähenevad, muutused on suuremad poistel kui tüdrukutel. Enim muutuvad vokaalide /i, e, ä, a/ asukohad, kõige väiksemad on muutused vokaalide /u/ ja /o/ puhul.



Joonis 4. Poiste (sinine joon) ja tüdrukute (punane joon) vokaalide formantsageduste F1 (alumine joonepaar) – F4 (ülemine joonepaar) muutus sõltuvalt vanusest.



Joonis 5. Poiste (sinine) ja tüdrukute (punane) vokaalide asukoha muutus F1–F2 akustilises ruumis sõltuvalt vanusest. Vokaalide sümbolid paiknevad 10-aastaste keelejuhtide vokaalide juures, täidetud ringid tähistavad vastavalt 10- ja 18-aastaste kõnelejate vokaalide asukohti, tühjad ringid asukohti vanuses 11–17 aastat.

L2 KÕNE UURINGUD

Terminiga L2 (ingl *second language*) tähistatakse võõrkeelt, mida õpitakse pärast emakeele omandamist, samuti keelt, mis ei ole kõneleja emakeel; termin L1 (ingl *first language*) tähistab emakeelt. Võõrkeele õppimisega kaasneb sageli aktsent, mida tajutakse kui kõrvalekallet õpitavale keelele omasest tüüpilisest häälduses. Munro (2006) on sõnastanud võõrkeelse aktsendiga kõne tunnused järgmiselt: (1) kõneleja ei räägi oma emakeeles, (2) erineb süstemaatiliselt emakeelsest kõnest, (3) ei ole patoloogiline ja (4) hälbed on kuuldeliselt tajutavad. Üldtunnustatud seisukoha järgi on võõrkeelse aktsendi peamiseks põhjuseks imikueas omandatud emakeelsed hääldus- ja tajumallid (Polivanov, 1931; Trubetzkoy, 1939; Selinker, 1972; Best, 1995; Flege, 1995, jt). Keelemallide omandamise eelduseks on omakorda kategoriaalne taju – see on kõnetaju võime jagada pidevalt muutuvat kõnesignaali diskreetseteks üksusteks ja klassifitseerida neid üksusi erinevateks foneetilisteks/fonoloogilisteks kategooriateks.

Imikute keelelist arengut uurides on leitud, et kategoriaalne taju on sünnipärane võime (Eimas jt, 1987). Esimese eluaasta jooksul omandab laps oma

emakeele põhilised fonoloogilised kategooriad (nt Cheour jt, 1998) ja õpib segmenteerima pidevat kõnesignaali erinevateks segmentideks – vokaalideks ja konsonantideks. Vokaalikategooriad kujunevad imikul välja esimese kuue kuu jooksul (Kuhl jt, 1992; Polka, Werker, 1994), konsonantide kategooriad aga 10–12 kuu vanuselt (Werker, Tees, 1984). Emakeele häälikumallide omandamise järel tekib nn fonoloogiline kurtus, st lapse kõnetaju kurdistub emakeeles mitteesinevate kategooriate suhtes ning põhjustab raskusi võõrkeeles esinevate fonoloogiliste kontrastide tajumisel ja võõrkeele hääldu omandamisel (Dupoux, Peperkamp, 2002).

Fonoloogiline kurtus L2 kategooriate suhtes on määratud eelkõige L1 fonoloogilise süsteemiga, see ilmneb erinevate L1 ja L2 kombinatsioonide puhul erinevalt ja võib esineda nii segmentaalsete kui ka prosoodiliste kategooriate tajumisel. Näiteks: (1) jaapanlastel on raskusi eristada inglise keele foneeme /r/ ja /l/ (nt Yamada, 1995), sest jaapani keeles puudub /l/ ning jaapani /r/ on kuuldeliselt lähedasem pigem inglise /l/-ile kui /r/-ile (Takagi, 1993); (2) hispaania emakeelega kõnelejad ei erista inglise vokaalfoneeme /i/ ja /ɪ/ ning vastendavad neile hispaania keele /i/-vokaali (Flege, 1991); (3) kontrastiivne kestus (lühikeste-pikkade foneemide vastandus) on omane kvantiteedi-keeltele, näiteks jaapani, eesti ja soome keelele, kuid kestusvastandust ei esine näiteks prantsuse, vene ja hispaania keeles; (4) rõhu akustilisteks tunnusteks on intensiivsus, põhitooni sagedus ja kestus (Lehiste, 1970), kuid erinevad keeled kasutavad neid tunnuseid erinevalt – näiteks eesti keeles on rõhk seotud intensiivsuse ja põhitooniga (Eek, 1987), vene keeles eelkõige kestusega (Bondarko, 1977).

L2 hääldu eksperimentaalfoneetilisteks uuringuteks oleme salvestanud kõnekorpuse, mis sisaldab erineva emakeelega keelejuhtide kõnenäiteid, kelle jaoks eesti keel on võõrkeel (Meister, Meister, 2012a). Korpuses on esindatud 17 keelt, kokku 185 keelejuhti: 50 vene, 30 soome, 21 läti, 17 saksa, 13 prantsuse, 12 leedu, seitse jaapani ja rootsi ning üks kuni kuus inglise, itaalia, hindu, hispaania, hollandi, poola, taani, slovakkia ja aserbaidžaani emakeelega keelejuhti. Lisaks on salvestatud 20 eesti emakeelega keelejuhti, kelle kõnenäiteid kasutame võrdlusmaterjalina L2 kõnevariatsioonide uurimisel. Korpus sisaldab valdavalt etteloetud lauseid ja tekstilõike (kokku 140) ja spontaanse kõne näiteid (kolm pildikirjeldust ja enesetutvustus), igaühelt u 15 minutit kõnet. Keelejuhtide valikul oli oluline, et keelejuhi kõnes on aktsent kuuldeliselt tajutav. Keelejuhid on vanuses 16 kuni 57 aastat, valdav osa neist alustas eesti keele õppimist täiskasvanueas.

Aktsendikorpus pakub hulgaliselt võimalusi võõrkeelse aktsendi uurimiseks. Seni on uuritud eesti vokaalikategooriate ja vältevastanduste hääldust vene, soome, jaapani ja läti emakeelega keelejuhtide puhul (Meister, Meister, 2011, 2012b, 2013a, b, 2014a, b, 2017b; Meister jt, 2015; Nemoto jt, 2015). Näitena esitame siin eesti keele vältevastandusega sõnade hääldu akustilise analüüsi tulemusi.

Eesti keele välteid (ingl *quantity*; tähistatakse vastavalt Q1, Q2 ja Q3) kirjeldatakse kahesilbiliste üksuste – kõnetaktide rõhulise ja sellele järgneva rõhutu silbi kestussuhte – abil (Lehiste, 1960; Liiv, 1960), olulist rolli mängivad väldete eristamisel ka põhitooni harja asukoht ja akustilise energia jaotus taktis (Lehiste, 1997; Eek, 1994; Lippus jt, 2009). Varasematest uurimustest leitud tüüpilised välteid iseloomustavad kestussuhted vokaalikeskse vältevastandusega sõnades (nt sada [sata], Q1 – saada [saata], Q2 – saada [saa:ta], Q3) on järgmised: Q1: 0,5–0,8, Q2: 1,2–2,0 ja Q3: 2,0–3,9 (vt Asu jt, 2016). Sarnaselt eesti keelega on ka soome ja jaapani keel kvantiteedikeeled, st kestusel on neis keeltes fonoloogiline funktsioon. Kuid erinevalt eesti keelest on kestusvastandus neis keeltes binaarne – vokaalid ja konsonandid esinevad lühikeses ja pikas kestusastmes.

Läti keeles esineb binaarne kestusvastandus ainult vokaalide puhul; vene keeles ei ole kestusel fono-

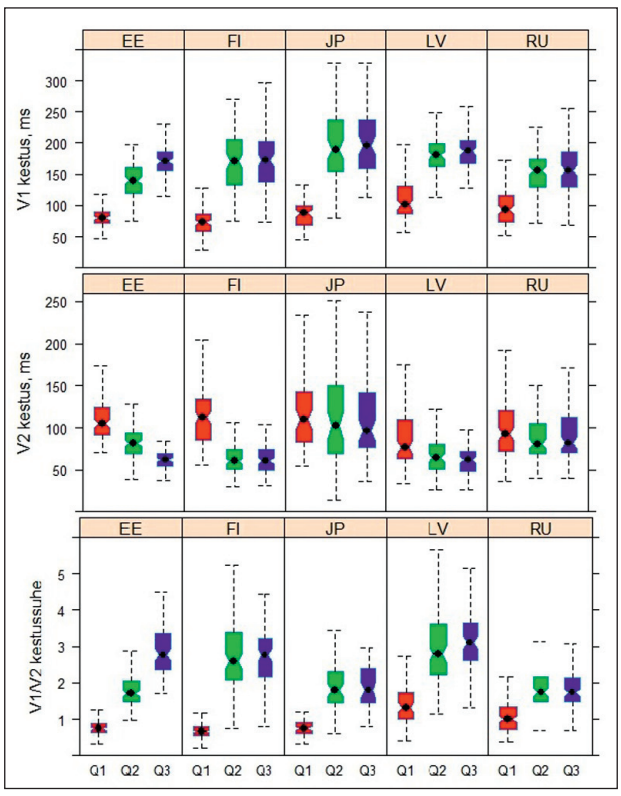
loogilist rolli ja seetõttu ei esine ka kestusel põhinevat vastandust, kuigi sõnarõhust tingituna on vokaalid rõhulises silbis pikemad (1,5–2 korda) kui vokaalid rõhutus silbis (Bondarko, 1998). Lähtuvalt kestuse erinevast rollist eelnimetatud keeltes, võib eesti väldete hääldamisel L2 kõnes oodata erinevaid kestushälbeid. Soome (tähistatud kui FI), jaapani (JP) ja läti (LV) emakeelega keelejuhtidel peaks olema eelis vene (RU) emakeelega keelejuhtide ees – eesti vokaalikeskse vältevastandusega sõnade hääldamisel saavad nad toetuda vokaalide kestusvastandustele oma emakeeles.

Akustilise analüüsi tulemusi kajastab joonis 6, kus joonise ülemises osas on esitatud esisilbi (rõhulise) vokaali kestused, keskmises osas järgsilbi (rõhutu) vokaali kestused ja alumises osas vokaalide kestussuhe V1/V2 sõltuvalt vältest. Eesti emakeelega (EE) keelejuhtide puhul näeme, et nii V1 kui V2 kestused moodustavad sõltuvalt vältest kolm selgelt eristuvat rühma, kusjuures V1 kestus kasvab (keskmised kestused Q1: 82 ms, Q2: 143 ms, Q3: 171 ms) ja V2 kestus (keskmised kestused Q1: 111 ms, Q2: 85 ms, Q3: 63 ms) vastavalt väheneb. Tulemusena eristuvad välteti ka V1/V2 kestussuhted (Q1: 0,8; Q2: 1,8; Q3: 2,8).

L2 keelejuhtide puhul näeme hoopiski erinevaid kestusmustreid. V1 keskmine kestus Q1 sõnades on FI (74 ms) ja JP (89 ms) keelejuhtide häälduses lähedane EE rühma V1 keskmisele kestusele (81 ms), kuid LV (112 ms) ja RU (98 ms) häälduses oluliselt pikem ($p < 0{,}001$). Q2 sõnades on V1 kestus lähedane EE (143 ms) rühmale ainult RU (153 ms) rühmas, teistes L2 rühmades on V1 tunduvalt pikem (FI: 170 ms, JP: 198 ms, LV: 182 ms; $p < 0{,}001$). Q3 sõnades on V1 kestus EE (171 ms) ja FI (173 ms) rühmades peaaegu võrdne, JP (202 ms) ja LV (188 ms) rühmades oluliselt pikem (JP: $p < 0{,}001$; LV: $p < 0{,}05$) ja RU (155 ms) rühmas oluliselt lühem ($p < 0{,}05$) kui EE rühmas. L2 kõnes ei eristu V1 kestused Q2 ja Q3 sõnades.

V2 kestused Q1 sõnades FI (114 ms), JP (121 ms) ja RU (100 ms) keelejuhtide puhul ei eristu statistiliselt EE rühmast (111 ms), oluliselt lühem ($p < 0{,}001$) on V2 aga LV (89 ms) rühma puhul. V2 kestused Q2 sõnades on EE (86 ms) rühmale lähedased ainult RU (90 ms) rühma puhul, FI (66 ms) ja LV (67 ms) rühmades on V2 oluliselt lühem ($p < 0{,}001$) ja JP (119 ms) rühmas oluliselt pikem ($p < 0{,}001$). V2 kestused Q3 sõnades on EE (63 ms) rühmale lähedased FI (61 ms) ja LV (68 ms) keelejuhtide puhul ning tunduvalt pikemad ($p < 0{,}001$) JP (115 ms) ja RU (91 ms) keelejuhtide häälduses.

Tulenevalt vokaalide V1 ja V2 häälduvariatsioonidest hälbivad välteid iseloomustavad kestussuhted L2 kõnes suurel määral L1 kõnele omastest väärtustest. Q1 sõnu hääldavad EE (0,8) rühmaga lähedaselt FI (0,7) ja JP (0,8) keelejuhid, LV (1,5) ja RU



Joonis 6. Esisilbi (V1, ülemine) ja järgsilbi (V2, keskmine) vokaalide kestused ning vokaalide kestussuhted (V1/V2, alumine) sõltuvalt vältest eri emakeelega keelejuhtide häälduses.

(1,1) rühmad aga oluliselt suurema ($p < 0{,}001$) kestussuhtega. Q2 sõnades on EE (1,8) rühmaga sama kestussuhe ainult RU (1,8) rühmas, teistes rühmades on kestussuhe oluliselt suurem (FI: 2,8 ja LV: 3,0, $p < 0{,}001$; JP: 2,2, $p = 0{,}05$). Q3 sõnade häälduses esinevad suuremad hälbed ($p < 0{,}001$) EE (2,8) rühmast JP (2,1) ja RU (1,8) keelejuhtide puhul, FI (2,8) ja LV (3,2) keelejuhtide hääldus on aga lähedane EE keelejuhtidele.

Lõpetuseks konstateerime, et kõik L2 keelejuhid eristavad häälduses esma- ja teisevältelisi sõnu, kuid ei erista teise- ja kolmandavältelisi sõnu. Leitud kestussuhete põhjal võib prognoosida, et eesti emakeelega kuulajad tajuvad FI ja LV keelejuhtide teisevältelisi sõnu pigem kolmandavältelistena ning JP ja RU keelejuhtide kolmandavältelisi sõnu pigem teisevältelistena.

KOKKUVÕTE

Eelnevalt tutvustatud töödes uurisime erinevate akustiliste tunnuste variatsioone laste kõnes ja eesti keelt võõrkeelena kõnelevate täiskasvanute kõnes. Esimesel juhul on tegemist kõneorganite anatoomilise arenguga kaasnevate variatsioonidega, teisel juhul on need tingitud emakeele ja võõrkeele fonoloogiliste süsteemide vastastikusest toimest. Kõne akustikat mõjutavad veel paljud tegurid, mis kajastuvad erinevalt erinevates akustilistes parameetrites. Inimestevahelises suhtluses ei ole kõne variatiivsus reeglina takistuseks – kõnetaju mehhanismid võimaldavad meil kiiresti kohaneda vestluspartneri kõne iseärasustega ja muutuva akustilise keskkonnaga. Küll aga on kõne suur variatiivsus probleemiks automaatse kõnetuvastuse jaoks olukordades, kus tuvastatava kõne akustika, sõnavara ja kõnestiil erinevad oluliselt kõnetuvastuse treenimiseks kasutatud kõnesalvestuste akustilistest omadustest ja keelekasutusest. Kõne eksperimentaalfoneetiline uurimine võimaldab selgitada erinevate kõnevariatsioonide olemust ja põhjusi ning kasutada saadud teadmisi kõnetehnoloogia arendamiseks.

VIITED

Alumäe, T. 2014. Full-duplex speech-to-text system for Estonian. – Baltic HLT 2014, 3–10.

Alumäe, T., Paats, A., Fridolin, I., Meister, E. 2017. Implementation of a radiology speech recognition system for Estonian using open source software. – Interspeech 2017, 2168–2172.

Asu, E. L., Lippus, P., Pajusalu, K., Teras, P. 2016. Eesti keele hääldus. TÜ kirjastus, Tartu.

Barbier, G., Böe, L.-J., Captier, G., Laboissiere, R. 2015. Human vocal tract growth: A longitudinal study of the development of various anatomical structures. – Interspeech 2015, 364–368.

Best, C. T. 1995. A direct realist perspective on cross-language speech perception. – Strange, W. (ed). Speech Perception and Linguistic Experience: Theoretical and Methodological Issues in Cross-Language Speech Research. York Press, Timonium, 171–203.

Boersma, P., Weenink, D. 2018. Praat: doing phonetics by computer [Computer program]. Version 6.0.39, http://www.praat.org/

Bondarko, 1977 = Бондарко Л. В. 1977. Звуковой строй современного русского языка. Просвещение, Москва.

Bondarko, 1998 = Бондарко Л. В. 1998. Фонетика современного русского языка. Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург.

Cheour, M., Ceponiene, R., Lehtokoski, A., Luuk, A., Allik, J., Alho, K., Näätänen, R. 1998. Development of language-specific phoneme representations in the infant brain. – Nature Neuroscience, 1, 351–353.

Dupoux, E., Peperkamp, S. 2002. Fossil markers of language development: phonological deafnesses in adult speech processing. – Laks, B., Durand, J.

(eds). Phonetics, Phonology, and Cognition. Oxford University Press, Oxford, 168–190.

Eek, A. 1987. The perception of word stress: A comparison of Estonian and Russian. – Channon, R., Shockey, L. (eds). Honor of Ilse Lehiste. Ilse Lehiste Pühendusteos. Foris Publications, Dordrecht, [etc.], 19–32.

Eek, A. 1994. Studies on Quantity and Stress in Estonian. Tartu. (Dissertationes Philologiae Estonicae Universitatis Tartuensis; 4).

Eimas, P. D., Miller, J. L., Jusczyk, P. W. 1987. On infant speech perception and the acquisition of language. – Harnard, S. (ed). Categorical Perception: The Groundwork of Cognition. Cambridge University Press, Cambridge, 161–195.

Fitch, T., Giedd, J. 1999. Morphology and development of the human vocal tract: A study using magnetic resonance imaging. – Journal of the Acoustical Society of America, 106 (3), 1511–1522.

Flege, J. E. 1991. The interlingual identification of Spanish and English vowels: Orthographic evidence. – Quarterly Journal of Experimental Psychology, 43A, 701–731.

Flege, J. E. 1995. Second language speech learning: Theory, findings, and problems. – Strange, W. (ed). Speech Perception and Linguistic Experience: Issues in Gross-Language Research. York Press, Timonium, 233–275.

Karu, M., Alumäe, T. 2018. Weakly supervised training of speaker identification models. – Proceedings of the Conference Odyssey 2018 The Speaker and Language Recognition Workshop (Les Sables d'Olonne, France, 26–29 June 2018), 24–30, doi: 10.21437/Odyssey.2018-4

Kent, R. D., Vorperian, H. K. 1995. Development of the Craniofacial-Oral-Laryngeal Anatomy. Singular Publishing Group Inc., San Diego.

Kuhl, P. K., Williams, K. A., Lacerda, F., Stevens, K. N., Lindblom, B. 1992. Linguistic experience alters phonetic perception in infants by six months of age. – Science, 255 (5044), 606–608.

Lehiste, I. 1960. Segmental and syllabic quantity in Estonian. – American Studies in Uralic Linguistics, 1, 21–82.

Lehiste, I. 1970. Suprasegmentals. The MITT Press, Cambridge, London.

Lehiste, I. 1997. Search for phonetic correlates in Estonian prosody. – Lehiste, I., Ross, J. (eds). Estonian Prosody: Papers from a Symposium. Institute of Estonian Language, Tallinn, 11–35.

Liiv, G. 1961. Eesti keele kolme vältusastme vokaalide kestus ja meloodiatüübid. – Keel ja Kirjandus, 7, 412–424; 8, 480–490.

Lippus, P., Pajusalu, K., Allik, J. 2009. The tonal component of Estonian quantity in native and non-native perception. – Journal of Phonetics, 37, 388–396.

Meister, L., Meister, E. 2011. Perception of the short vs. long phonological category in Estonian by native and non-native listeners. – Journal of Phonetics, 39 (2), 212–224.

Meister, L., Meister, E. 2012a. Aktsendikorpus ja võõrkeele aktsendi uurimine. – Keel ja Kirjandus, 55, 696–714.

Meister, L., Meister, E. 2012b. The production and perception of Estonian quantity degrees by native and non-native speakers. – Interspeech 2012, 886–889.

Meister, E., Meister, L. 2013a. Native and non-native production of Estonian quantity degrees: comparison of Estonian, Finnish and Russian subjects. – Asu, E. L., Lippus, P. (eds). Nordic Prosody: Proceedings of the XIth Conference, Tartu 2012. Peter Lang Verlag, Frankfurt am Main, 235–243.

Meister, E., Meister, L. 2013b. Production of Estonian quantity contrasts by native speakers of Finnish. – Interspeech 2013, 330–334.

Meister, E., Meister, L. 2014a. Estonian quantity degrees produced by Latvian subjects. – Linguistica Lettica, 22, 85–106.

Meister, E., Meister, L. 2014b. L2 production of Estonian quantity degrees. – Campbell, N., Gibbon, D., Hirst, D. (eds). Speech Prosody 7: Proceedings of the 7th international conference, (Trinity College Dublin) 20–23 May, 2014.

International Speech Communication Association, Dublin, 929–933.

Meister, E., Meister, L. 2017a. Eesti laste kõne I. Põhitooni akustiline analüüs. – Keel ja Kirjandus, 60 (7), 518–533.

Meister, E., Meister, L. 2017b. Production of Estonian consonantal quantity contrasts by Latvian subjects. – Linguistica Lettica, 25, 88−108.

Meister, E., Meister, L. 2019. Eesti laste kõne II. Vokaalide akustiline analüüs. – Keel ja Kirjandus, 62 (4), 282–295.

Meister, E., Nemoto, R., Meister, L. 2015. Production of Estonian quantity contrasts by Japanese speakers. – ESUKA-JEFUL, 6 (3), 79–96.

Munro, M. 2006. Perspectives on foreign-accented speech: issues, methods, and findings. (Ettekanne seminaril „Workshop on Variation in Speech Production and Perception", 4.–6. august 2006, Trondheim).

Nemoto, R., Meister, E., Meister, L. 2015. Production of Estonian vowels by Japanese subjects. – ICPhS 2015: 18th International Congress of Phonetic Sciences, 10−14 August, 2015, SECC Glasgow UK, Proceedings. University of Glasgow, Glasgow, [1−5].

Polivanov, E. D. 1931. La perception des sons d'une langue étrangère. – Travaux du Cercle linguistique de Prague, 4, 79–96.

Polka, L., Werker, J. F. 1994. Developmental changes in perception of nonnative vowel contrasts. – Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 20, 421–435.

Povey, D., Ghoshal, A., Boulianne, G., Burget, L., Glembek, O., Goel, N., Hannemann, M., Motlicek, P., Qian, Y., Schwarz, P., Silovsky, J. 2011. The Kaldi speech recognition toolkit. – IEEE 2011 Workshop on Automatic Speech Recognition and Understanding (ASRU), 7304–7308.

Selinker, L. 1972. Interlanguage. – International Review of Applied Linguistics, 10, 209−231.

Takagi, N. 1993. Perception of American English /r/ and /l/ by Adult Japanese Learners of English: a Unified View. Ph.D. Dissertation. University of California, Irvine.

Tilk, O., Alumäe, T. 2016. Bidirectional recurrent neural network with attention mechanism for punctuation restoration. – Interspeech 2016, 3047−3051.

Trubetzkoy, N. S. 1939. Grundzüge der Phonologie. – Traveaux de Cercle Linguistique de Prague, 7, 272.

Vorperian, H. K., Kent, R. D. 2007. Vowel acoustic space development in children: A synthesis of acoustic and anatomic data. – Journal of Speech Language and Hearing Research, 50 (6), 1510−1545.

Vorperian, H. K., Kent, R. D., Lindstrom, M. J., Kalina, C. M., Gentry, L. R., Yandell, B. S. 2005. Development of vocal tract length during childhood: A magnetic resonance imaging study. – Journal of the Acoustical Society of America, 117, 338−350.

Vorperian, H. K., Wang, S., Chung, M. K., Schimek, E. M., Durtschi, R. B., Kent, R. D., Ziegert, A. J., Gentry, L. R. 2009. Anatomic development of the oral and pharyngeal portions of the vocal tract: An imaging study. – Journal of the Acoustical Society of America, 125 (3), 1666−1678.

Werker, J. F., Tees, R. C. 1984. Cross-language speech perception: Evidence for perceptual reorganization during the first year of life. – Infant Behavior and Development, 7, 49–63.

Yamada, R. A. 1995. Age and acquisition of second language speech sounds perception of American English /ɹ/ and /l/ by native speakers of Japanese. – Strange, W. (ed). Speech Perception and Linguistic Experience: Issues in Gross-Language Research. York Press, Timonium, 305−320.

GEOIDI MODELLEERIMINE KÕRGUSTE LÄHTENIVOOPINNANA

Artu Ellmann[1], Silja Märdla[1], Tõnis Oja[2]

[1] Tallinna tehnikaülikooli inseneriteaduskonna ehituse ja arhitektuuri instituut, teedeehituse ja geodeesia uurimisrühm

[2] Maa-ameti geodeesia osakond

Kokkuvõte: geoid on Maa gravitatsioonivälja ekvipotentsiaalpind, mis langeb kokku „häirimata" maailmamere pinnaga, olles ühtlasi ka kõrguste ja sügavuste määramise lähtenivoopind. Geoidi mudelkuju saab arvutada raskuskiirenduse mõõtmistulemustest. Uuele kõrgussüsteemile üleminek alates 1. jaanuarist 2018 tingis ka Eesti uue geoidi mudeli arvutustööd. Kuna varasematest uurimustest on ilmnenud vajakajäämisi Eesti raskuskiirenduse mõõdistusandmetes, tehti suuremahulisi välimõõtmisi ja viidi läbi geoidiarvutuseks vajalike lähteandmete (gravimeetriline andmestik, GNSS-nivelleerimise punktid, digitaalsed topograafilised mudelid, globaalsed geopotentsiaalvälja mudelid) kogumine, süstematiseerimine, kvaliteedi kontroll ja tuvastatud vigade elimineerimine. Geoidi mudel arvutati modifitseeritud Stokesi (integraal)-valemiga, kus kombineeritakse globaalse geoidimudeli pikalaineline komponent piirkondlike terrestriliste raskuskiirenduse mõõtmistulemustega (lühilaineline komponent). Jääkhälbed gravimeetrilise geoidi ühildamisest geodeetiliste ja normaalkõrguste väärtustega võimaldasid hinnata saadud mudelpinna EST-GEOID2017 määramatuseks ±4,2 mm. Uurimistöö tulemusena saadud täpne geoidimudel EST-GEOID2017 on Eesti Vabariigi geodeetilise süsteemi koostisosa ja kõrgusmääranguu lähtepind, mida saab kasutada satelliitidepõhiseks kõrgusmääranguks nii maismaal kui merel.

Märksõnad: satelliitasukohamäärang, GNSS, GPS, Amsterdami null, Eesti kõrgussüsteem EH2000, EST-GEOID2017

Loo autorid (vasakult: Artu Ellmann, Silja Märdla, Tõnis Oja), taustal meri lähtena geoidi ekvipotentsiaalpinna modelleerimiseks, esiplaanil täpseks kõrgusmääranguks tarvilikud digitaalseadmed – gravimeeter ja nivelliir.

SISSEJUHATUS

Geodeesia on teadusharu, mis täpsete mõõtmiste tulemusena määratleb koduplaneedi kuju ja suurust, objektide täpseid asukohti ning ruumiandmete kujutamist kaartidel ja plaanidel. Nende ülesannete praktiliseks lahendamiseks rakendatakse laialdaselt matemaatika ja füüsika teadmisi kombineerituna nüüdistehnoloogiaga. Loomulikult ei ole kõik geodeedid otseselt seotud Maa kuju ja mõõtmete määramisega, mis on n-ö kõrgema geodeesia peaülesanne. Üldsuse jaoks on enim tuntud geodeetiliseks tegevuseks mitmesuguste objektide täpne

asukohamäärang maismaal. Tõepoolest, see oligi üks peamisi geodeetilisi ülesandeid minevikus, aga jätkuvalt ka tänapäeval. Meid ümbritseva inimtekkelise keskkonna toimimine sõltub suuresti selle osade omavahelise paigutuse korrektsusest. Hooned, sillad, teed ja tehnosüsteemid peavad olema omavahel ja ümbritseva keskkonna suhtes sobivalt paigutatud, eriti kui see puudutab isevoolselt sade- ja reovee ärajuhtimist. Nii kaasnevad igasuguse ehitustegevusega alati mõõtmis- ja märkimistööd[4] ning mitmesuguste ruumiandmete kogumine topograafiliste plaanide koostamiseks.

Nüüdisajal on need ülesanded tunduvalt lihtsustunud, kuna asukohamääranguks saab kasutada GNSS (Global Navigation Satellite System, mille vanim ja tuntuim komponent on GPS – Global Positioning System) satelliit-navigatsioonisüsteeme. GNSS-vastuvõtjaga saab määrata asukoha geograafilised koordinaadid, mis kuvatakse rahvusvahelise maaellipsoidi suhtes. Lisaks pikkus- ja laiuskraadidele saab teada ka vaatluspunkti kõrguse maaellipsoidi pinnast (tähistatakse *h*). Paraku ei oma kõrgused maaellipsoidi kui „tehisliku" matemaatilise pinna suhtes mingit praktilist väärtust, kuna loodusnähtuste uurimisel ja paljudes inseneriülesannetes on hoopis olulisem teada kõrgust merepinnast ehk absoluutkõrgust.

Maapinnast 20 000 km kõrgusel tiirlevad GNSS-satelliidid seda tüüpi kõrgust mõõta ei võimalda. Absoluutkõrguseid saab määrata ajamahuka ja kalli geomeetrilise nivelleerimisega (loodimisega), mille lähtepunktid on tavaliselt seotud kokkuleppelise keskmise merepinna tasemega. Eestis, nagu ka mujal idapoolses Euroopas, oli kokkuleppeliseks lähtenivooks kuni hiljutise ajani veel nn Kroonlinna null. Kuna suuremat osa (~70 protsenti) koduplaneedi pindmikust katavad veed, ongi loomulik Maa kuju füüsikaline lähendus hüdrostaatilises tasakaalus olev pind, mida nimetatakse geoidiks[5] (kr *gē γῆ* 'maa' ja *eidos* ειδος 'kuju'). Geoidi pind on alati risti raskuskiirenduse *g* suunaga (nn loodjoonega) ja idealiseeritult ühildub maailmamere keskmise „häirimatu" tasemega. Maasiseste masside ebaühtlase jaotuse tõttu on geoidil võrdlemisi keerukas kuju, see justkui „lainetab" maaellipsoidi pinna suhtes. Siiski on geoidi erinevus maaellipsoidi pinnast maksimaalselt vaid ±100 meetrit, enamasti alla paarikümne meetri.

Geoidi mudelil on suur tähtsus rakenduslike ülesannete lahendamisel, ennekõike GNSS-kõrgusmäärangul. Teades geoidi ja maaellipsoidi pindade erinevust (geoidi kõrgust *N*) GNSS-mõõtmispunktis, saadakse inseneerirakendusteks sobiv absoluutkõrgus *H* lihtsa liitmis- või lahutustehtega (joonis 1):

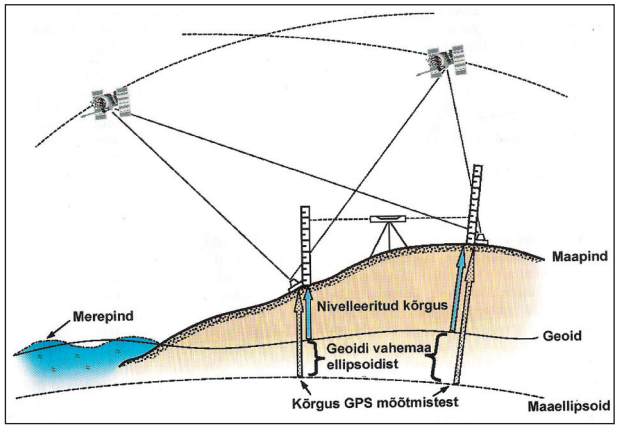
$H = h – N$.

EESTI UUTES KÕRGUSTES

Omariikluse taastamine tõi kaasa vajaduse GNSS-asukohamäärangut toetava geodeetilise süsteemi kehtestamiseks Eestis. Geodeetiline süsteem on ühtlasi ka riigi majandusliku infrastruktuuri ülejäänud komponentide rajamise alussammas. Ühtne ja ajakohane geodeetiline süsteem seob erinevatest allikatest pärinevad ruumiandmed tervikuks, võimaldades nii tõhusat andmevahetust ja täpsete kaartide koostamist. Geodeetiline referentssüsteem kinnistatakse üleriigilise geodeetiliste punktide võrgustiku rajamisega ning nende punktide tsentritähistele samasüsteemsete väärtuste (näiteks koordinaadid, kõrgused) määramisega. Nii osutubki kõrgusmäärangu probleemi lahenduse võtmeks

[4] Ehitusgeodeetilised tööd algavad ehitise jaoks planeeritud maa-ala mõõdistamisega ja täpse topograafilise plaani koostamisega, mis on lähteks projekteerijatele. Pärast ehitusprojekti valmimist märgib geodeet ehitise loodusesse ja teeb kogu ehitustegevuse ajal vajalikke märkimistöid ja kontrollmõõtmisi. Lisaks võib olla vajalik hoone kasutusea jooksul selle deformatsioonide mõõdistamine ja monitooring.

[5] Geoidi kui kõrguste lähtepinna idee esitas Saksa matemaatik ja geodeet Carl Friedrich Gauss (1777–1855). Termini „geoid" kasutuselevõtuks tegi 1872. aastal ettepaneku Saksa matemaatik Johann Benedict Listing (1808–1882).



Joonis 1. Kõrgusmäärang maaellipsoidi ja geoidi pindade suhtes.

täpse ja piisava detailsusega geoidimudeli modelleerimine.

Tänapäeval on geoidi mudel muutunud geodeetilise süsteemi loomulikuks osaks. Arvestades võimalusega kasutada GNSS-tehnoloogiat ka kõrgusmäärangul, on tekkinud vajadus 1 cm täpsusega ja kõrge ruumilise lahutusega (u 1 km) geoidi mudeli järele. Selle olemasolul muutub GNSS kõrgusmäärang lihtsaks ja kiireks, eriti võrreldes aja- ja töömahuka nivelleerimisega. See võimaldab GNSSi kasutuselevõttu pea kõigis ehitusetappides. Arvestades satelliitasukohamäärangu veelgi laialdasemat kasutuselevõttu, on täpsete ruumiandmete olemasolu ning riikidevaheline ühildatavus kriitilise tähtsusega mitmes uues tehnoloogiavaldkonnas. Näiteks tulevikutranspordi kontekstis tuleb siinkohal nimetada autonoomseid isejuhtivaid sõidukeid, mobiilseid roboteid ja intelligentseid transpordisüsteeme. Seetõttu on geoidi modelleerimine algsest loodusteaduslikust teemast muutunud selgelt tehnikateaduslikuks huviobjektiks.

1. jaanuarist 2018 hakati Eestis, sarnaselt teiste Euroopa riikidega, arvestama absoluutkõrguseid Euroopa kõrgussüsteemi ehk Amsterdami nulli suhtes (RT I, 26.07.2017, 2). Loobumine Kroonlinna nullist on tingitud ka asjaolust, et Nõukogude Liidu aegne Balti 1977 kõrgussüsteem (BK77) on Eestile mõju avaldava jääajajärgse maapinna tõusu tõttu aegade jooksul deformeerunud. Ka oli BK77 defineerimisel kasutatud planeedi Maa ebatäpseid füüsikalisi parameetreid. Selliste ebatäpsuste tõttu ei olnud kõrgusvõrgu punktide kõrgused enam korrektsed ega haakunud ajakohaste asukohamäärangutehnoloogiatega. Euroopa kõrgussüsteemiga liitumisel saab rahvusvaheliste infrastruktuuriprojektide projekteerimis- ja ehitustöödel hakkama ühtse kõrgussüsteemiga ega pea tegelema ümberarvutamisega. Oluline on see ka merenavigatsioonis, kuna nüüd on võimalik Läänemere riikide merekaartidel esitada sügavusi ühtses süsteemis.

Uue kõrgussüsteemiga kaasneb Eestis kõrgusväärtuste formaalne suurenemine vahemikus 14–26 cm, mis ilmnes maa-ameti korraldamisel toimunud kõrgtäpse riikliku nivelleerimisvõrgu renoveerimise tulemusena ning üleeuroopalisest andmetöötlusest. Kõrgussüsteemi muudatus tingis ka Eesti geoidi uue mudeli arvutustööde algatamise. Selle viis läbi Tallinna tehnikaülikooli geodeesia uurimisrühm, kus geoiditeemaga on tegeletud alates 2006. aastast. Sihikindel aastatepikkune uurimistöö ning maaameti ja Eesti maaülikooliga koostöös kogutud kvaliteetne lähteandmestik võimaldas parendada piirkondliku geoidi modelleerimise metoodikat ja saavutada nõutav täpsus. Hinnanguliselt on uuringu tulemused rakendatavad geoidi modelleerimisülesannetes ka mujal maailmas. Selle kogumiku laiemale lugejaskonnale suunatust arvestades on artikli rõhuasetused pigem uurimisteema taustsüsteemi kirjeldusel ning rakendustel. Detailsema ülevaate asjakohasest metoodikast leiab huviline viidatud kirjandusallikatest.

Oma kirjatöös näitame, et geoidi mudeli saab arvutada Maa pinnal, õhus ja kosmoses tehtud raskuskiirenduse mõõtmiste põhjal. Seetõttu käsitletakse raskuskiirenduse anomaalvälja modelleerimist ja peamisi tulemusi. Modifitseeritud

Stokesi integraalvalemit kasutava geoidiarvutuse tutvustusele järgneb ülevaade geoidimudeli valideerimisest, saavutatud täpsusest ja kasutusvõimalustest. Tulemust kontrollitakse võrdluses kõrgtäpsete GNSS-nivelleerimispunktidega ehk kohtades, kus on teada nii absoluutkõrgus merepinnast kui geodeetiline kõrgus ellipsoidist. Kokkuvõttes vaadeldakse saadud tulemuse rakendatavust erinevate ülesannete lahendamisel.

RASKUSKIIRENDUSE ANOMAALIAD GEOIDIARVUTUSE LÄHTEANDMESTIKUNA

Geoid on gravitatsioonivälja (täpsemalt raskusjõu välja) samapotentsiaalipinnana otseselt mõjutatud tiheduse variatsioonidest Maa sees, seetõttu saab geoidi mudelkuju arvutada Maa raskuskiirenduse mõõtmisandmetest. Raskuskiirenduse anomaaliad leitakse mõõdetud raskuskiirenduse väärtusest, millest lahutatakse teoreetiliselt arvutatav maaellipsoidi genereeritud normaalraskuskiirenduse väärtus. Raskuskiirenduse mõõtmisega tegeleb *gravimeetria* (ld *gravis* 'raske' ja kr *μήτηρ* 'mõõtma'), mis on teadus raskuskiirenduse vektori *g* uurimisest Maa ja teiste taevakehade pinnal või selle lähedal. Näiteks Tallinna tehnikaülikooli sõjaaegse rektori, geodeesiaprofessor Robert Livländeri (1903–1944) peamiseks teadushuviks oligi gravitatsioonivälja määramine Eestis ning sellega seonduvalt ka geoidi teema. Raskuskiirenduse määramiseks võib kasutada igat füüsikalist nähtust, mis sõltub raskusjõust: pendli võnkumine, keha vaba langemine, elastse keha deformatsioon jne.

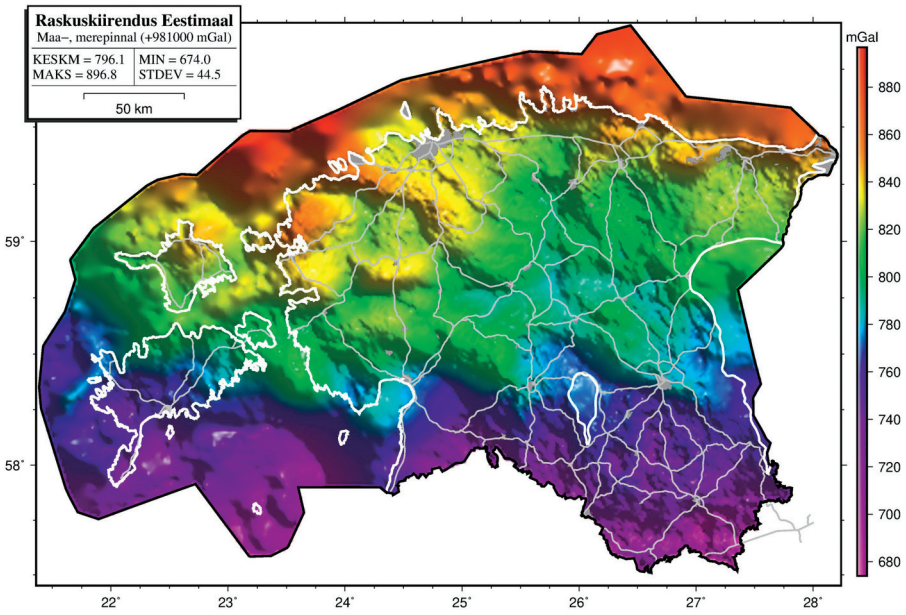
Raskuskiirenduse suurust mõõdetakse spetsiaalse instrumendi gravimeetriga, mis sisaldab proovimassi ja mida vertikaalselt kiirendab raskusjõud. SI-süsteemis on kiirenduse (ka raskuskiirenduse!) ühikuks m/s^2. Maa keskmine raskuskiirendus SI-ühikutes väljendatuna on g = 9,8 m/s^2. Kuna raskuskiirenduse muutused mingis piirkonnas on suhteliselt väikesed (võrreldes Maa keskmise raskuskiirenduse väärtusega), on otstarbekam sisse viia veelgi tundlikum mõõtühik. Nii ongi praktiliseks kasutamiseks sobivam vastavast SI-ühikust 100 korda väiksem ühik cm/s^2, mida raskuskiirenduse uurija Galileo Galilei nime järgi nimetatakse gall ja tähistatakse Gal. Tegemist on CGS-süsteemi (põhiühikuteks sentimeeter-gramm-sekund) ühikuga, mille seos SI-ühikutega on järgmine: 1 Gal = 10^{-2} m/s^2 = 1 cm/s^2 = 1000 mGal, teisisõnu 1 mGal = 10^{-5} m/s^2.

Nii on Maa keskmine raskuskiirendus ligikaudselt 980 Gal (cm/s^2). Geoloogiliste struktuuride põhjustatud raskuskiirenduse muutused on aga mõõdetavad vaid tuhandikega sellest ühikust – milligallides. Tänapäeva tehnoloogial põhinevad portatiivsed gravimeetrid võimaldavad mikrogallise (1 μGal = 10 nm/s²) täpsusega mõõtmisi. Eesti territooriumil jääb maapinnal mõõdetud *g* väärtus ligikaudu vahemikku 981,67 ... 981,90 Gal (joonis 2), millele vastab muutus 230 mGal (0,02% *g* koguväärtusest) (Ellmann, Oja, 2008).

Teoreetiliselt saaks Inglise matemaatiku Sir Gabriel Stokesi juba 1849. aastal avaldatud meetodi kohaselt geoidi undulatsiooni N (referentsellipsoidi suhtes) arvutuspunkti asukohas (koordinaatidega φ, λ) arvutada globaalse katvusega raskuskiirenduse andmetega integreerimisel (üle ühiksfääri pinna σ) järgmiselt:

$$N = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} S(\psi) \Delta g \, d\sigma, \qquad (1)$$

kus R on geoidi raadius (tavaliselt lähendatakse seda Maa keskmine raadiusega, u 6371 km), ψ tähistab arvutus- ja integreeritava punkti vahelist geotsentrilist nurka (sfääriline kaugus). Integraali tüveks olev $S(\psi)$ on Stokesi funktsioon. Jooksva integreerimispunkti pinnaelement ühiksfääril on tähistatud $d\sigma$ abil. Raskuskiirenduse anomaaliat jooksvas integreerimispunktis (koordinaatidega φ', λ') väljendatakse $\Delta g = g - \gamma$, kus γ on normaalraskuskiirendus.



Joonis 2. Raskuskiirendus Eesti maismaa ja merealade pinnal. Märka, et ekvaatori suunas liikudes toimib (Maa pöörlemisest tingitud) tsentrifugaaljõud gravitatsioonijõule vastu (kahandades raskuskiirenduse väärtusi).

Valemist (1) ilmneb, et geoidi mudelkuju arvutamiseks on vajalik Stokesi integraalvalemisse kaasata raskuskiirenduse anomaaliad (ehk siis kõrvalekalded nn normaalväljast) üle terve maailma. Paraku puudusid kuni viimase ajani need andmed (või olid salajased) valdava osa maakera pinna kohta, seega ei olnud Stokesi originaalettepanek kuigi hõlpsasti teostatav. Siiski on siin väljapääs, mis avanes alles kosmoseajastu algusega 20. sajandi teisel poolel.

KOSMOSEANDMED TULEVAD ABIKS

Kogu maakera hõlmavatel gravitatsioonivälja uuringutel ongi kõige tõhusam tugineda Maa tehiskaaslaste trajektooride vaatlustele. Satelliitide trajektooride radiaalsuunaliste hälvete ning liikumiskiiruse muutuste põhjal on võimalik tuletada raskuskiirenduse väärtuseid maapinnal. Tänapäeval tiirleb ümber Maa sadu tehiskaaslasi, mida saab käsitleda gravimeetriliste proovimassidena. Maalähedased satelliidid on küllalt tundlikud, et olla mõjustatud ulatuslikumatest (läbimõõdus rohkem kui sada kilomeetrit) Maa gravitatsioonianomaaliatest. Selle sajandi kosmoseseire andmed (eriti aga spetsiaalselt gravimeetrilisteks mõõtmisteks disainitud satelliitide[6] CHAMP, GRACE ja GOCE mõõtmistulemused) on oluliselt täpsustanud teadmisi Maa gravitatsioonivälja. Eriti oluline oli aastatel 2008–2013 madalorbiidil tiirelnud Euroopa Kosmoseagentuuri gravimeetrilise üksiksatelliidi GOCE pardale paigutatud raskuskiirenduse gradiomeeter, mis võimaldas varasematega võrreldes mitmeid kordi täpsemaid ja tihedamaid mõõtmisi.

Nendele (ja teistele ülemaailmsetele) andmetele ligipääsu omavad volitatud teadusasutused arvutavad gravitatsioonivälja parameetreid globaalses mastaabis. Koostatud globaalsed geopotentsiaalvälja mudelid (GGM) sisaldavad sfäärilis-harmoonilisi nn Stokesi koefitsiente, mis on valemile (1) tuginedes saadud geopotentsiaalvälja

[6] CHAMP – *CHAllenging Minisatellite Payload, GRACE – Gravity Recovery and Climate Experiment, GOCE – Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer*

spektraalanalüüsist. Seega Maa gravitatsioonivälja kirjeldatakse liitsignaalina ehk koosnevana erinevate lainepikkustega komponentide summast. Stokesi koefitsiente saab omakorda Fourier' teisenduse kaudu sünteesida geoidi kõrgusteks, raskuskiirenduse anomaaliateks ja loodjoonte kõrvalekalleteks. Mida rohkem on kasutatavas Fourier' reas liikmeid, seda väiksema lainepikkusega signaaliosakesi kaasatakse, seda parem on tulemuste detailsus.

Praeguseks on GOCE andmetöötluse tulemusena saadud geoidi ja raskuskiirenduse mudelite täpsuseks u 1 cm ja 1 mgal. Paraku kehtib see vaid geoidi nn pikalainelise komponendi kohta, mille ruumiline lahutus ületab 65 km. Suhteliselt madalast lahutusvõimest hoolimata on gravimeetriliste satelliitandmete väärtuseks ühtlane globaalne kattuvus ja ühetaoliselt mõõdetud-töödeldud informatsioon. See kosmoseandmestik omakorda võimaldab parendada ka regionaalseid, kõrge lahutusega geoidimudeleid. Nimelt kombineeritakse geoidi tänapäevasel modelleerimisel globaalse geoidi pikalainelist trendi piirkondlike raskuskiirenduse terrestriliste mõõtmistulemustega (lühilaineline komponent). Seega on mõlemad andmetüübid ühtlasi sisendandmeteks modifitseeritud Stokesi valemis. Modifitseerimise tulemusena peaks saavutama geoidi regionaalmudelile rahuldava täpsuse ka suhteliselt piiratud kättesaadavusega (st vaid mõnesaja kilomeetri ulatuses) lokaalsete gravimeetriliste andmete põhjal. Selle peale lootma jäämine ei taga veel siiski oodatud tulemust, kuna lähteandmete ebapiisav kvaliteet võib lagundada parimagi geoidiarvutuse teooria. Seetõttu järgnevalt vaatlemegi raskuskiirenduse andmestiku kättesaadavust Eestis ja selle lähikonnas.

RASKUSKIIRENDUSE MÕÕTMISED EESTIS

Praktikas on gravimeetrilised andmed kättesaadavad heal juhul vaid mõnesaja kilomeetri raadiuses arvutuspiirkonnast. Geoidi modelleerimisel on väga oluline integreerimisse kaasatavate andmete kvaliteedi tagamine. Eriti lubamatu on süstemaatiliste vigade sisseimbumine lõpplahendusse. Nii võib üsnagi tühine 1 mGal suurune süstemaatiline viga gravimeetrilistes lähteandmetes u 50 km raadiusega alal põhjustada u 10 cm vea geoidi mudelis. Enamasti on andmepunktid nii siin- kui sealpool riigipiiri kogutud pikema aja jooksul ning seetõttu järgides vägagi erinevaid spetsifikatsioone ja täpsusnorme. Seega võib mõni süstemaatiline viga üsna kergesti geoidiarvutuse lähteandmetesse lipsata.

Ega Eestiski veel kümme aastat tagasi olukord gravimeetriliste andmete osas kuigi roosiline olnud. Tänapäevaseid nõudeid arvestades on paljudel varasematel andmetel vaid ajalooline väärtus. Professor R. Livländer mõõtis 1938–1941 sadakond gravimeetrilist punkti kogu Eesti ulatuses. 1940. aastate lõpus jätkati gravitatsioonivälja uuringutega Eesti NSV teaduste akadeemia (TA) geoloogia instituudis. Aastatel 1949–1958 Voldemar Maasiku (1909–1991) läbi viidud gravimeetriliste mõõdistuste punktid olid enamasti kogutud piki maanteid kulgevate marsruutidena. Ainukese üle-eestilise andmestikuna oli see veel mõni aasta tagasi parema puudumisel kasutuses kõikides Läänemere regiooni geoidiarvutustes. Kuigi nõukogudeaegsete geoloogiaasutuste gravimeetrilised lausmõõdistused Põhja- ja Lääne-Eestis, Peipsi ja Võrtsjärvel pärinevad aastatest 1960–1980, jäid suured piirkonnad Eestis katmata. Nimetada võib ka 1960. aastate keskpaigast mõnekümnel punktil läbiviidavaid gravimeetrilisi täppis- ja kordusmõõtmisi, mis olid teaduste akadeemia jääajajärgse maatõusu uuringuprogrammi üks

komponentidest.[7] Eesti iseseisvumisel pani TA geoloogia instituudi teadur dr Heldur Sildvee (1936–2006) aluse Eesti riiklikule gravimeetrilisele alusvõrgule, korrastas gravimeetrilise andmestiku ning tegi selle kättesaadavaks rahvusvahelisele teadlaskonnale geoidi arvutusteks (Sildvee, 1998). Gravimeetriliste andmete ettevalmistamine ongi üks töömahukamaid ja vastutusrikkamaid etappe geoidiarvutuses. Uurimustest (Ellmann, 2001, 2002; Jürgenson, 2003; Oja, 2007; Ellmann jt, 2009) on selgunud, et erinevate gravimeetriliste daatumite ja lähtepunktide kasutamisest tingituna võivad mõned andmeliigid olla omavahelises süstemaatilises nihkes. Seetõttu viidi enne uue geoidimudeli arvutusi eelnevalt läbi vajalike lähteandmete (gravimeetriliste mõõdistuste andmed, GNSS-nivelleerimise punktid, digitaalsed topograafilised mudelid, globaalsed geopotentsiaalvälja mudelid) kogumine, süstematiseerimine, kvaliteedi kontroll ja vigade elimineerimine. Täiendavalt oli maa-ameti gravimeetria mõõterühma ja ülikoolide ühisjõul vajalik täiendada gravimeetrilisi andmeid puuduliku andmestikuga piirkondades Eestis.

Tulemusena lisandus aastail 2011–2016 üle 1900 uue gravimeetrilise mõõdistuspunkti. Mõõdistatud on jääkatte all olnud Väinameri ja Narva lahe rannik, maismaal aga Lääne-, Kesk-, Kagu- ja Ida-Eesti. Hiljuti on lisandunud uusi mõõdistuspunkte ka Eesti-Läti piirialadel ning suuremate rabade servades. Tänu nimetatud mõõtmistele ja Eesti geoloogiakeskuse andmete ajakohastamisele õnnestus oluline osa 1949–1958 Eestis mõõdetud andmestikust asendada täpsemate andmetega (vt ka Oja jt, 2011; Türk jt, 2011; Märdla jt, 2015, 2017). Täiendavalt kasutati meie vahetus naabruses oleva Soome lahe idaosa (merealadel vahemikus 59°… 62° p.l. ja 25°… 30° i.p.) andmetühiku katmiseks GOCE-l põhinevat globaalset geopotentsiaali mudeli (Bruinsma jt, 2013) Fourier' reaksarendust astmeni 240, mille põhjal genereeriti hõredasammuline 0,1 × 0,2° raskuskiirenduse punktide võrgustik ligi 20 000 km^2 alal. Raskuskiirenduse mõõtmise teaduslikke ning tehnilisi üksikasju kajastab detailsemalt Oja jt (2019) ingliskeelne teadusartikkel.

Gravimeetrilise andmestiku korrastamisel on Maa reljeefi täpne teadmine hädavajalik. Ka topograafiliste masside mõju arvestamine on üks keerukamaid probleeme geoidi mudeli arvutustöödes. Erinevalt varasematest geoidimodelleerimistest on nüüd kasutada tervet Läänemere regiooni kattev 3 × 3″ NKG2014 digitaalne maastikumudel (Soome geodeesia instituudist M. Bilker-Koivula, isikl. 2015). Eesti alal tugines see maa-ameti kaardistuslendude raames kogutud aeromõõdistuslikel nn lidartehnoloogial põhinevatel kõrgusandmetel.

PIIREÜLETAV KOOSTÖÖ

Valemi (1) kohaselt tuleks lähteandmeid geoidiarvutusse kaasata võimalikult ulatuslikult, tänapäevase praktika kohaselt ligi mõnesaja kilomeetri ulatuses väljaspool huvipakkuvat geoidimodelleerimisala. Seega tuleb kaasata gravimeetrilisi andmed teiste riikide territooriumitelt. Välismaiste andmete saamiseks on meil kokkulepe Põhjamaade geodeesia komisjoniga (NKG), mille erinevate töögruppide töös on eestlased aastaid olnud osalised. Hiljuti lõppesid NKG algatusel toimunud terve Läänemere regiooni geoidimudeli NKG2015 arvutused, milles Tallinna tehnikaülikool oli üheks arvutuskeskuseks. Selle koostöö raames ühtlustati osalevate riikide gravimeetrilised andmebaasid (Märdla jt, 2017) ning arvutati uus tervet Läänemere regiooni hõlmav u 1 km lahutuse ja 3 cm täpsusega

[7] Ligikaudu 10 000 aastat tagasi lõppenud viimasel suuremal jääajal põhjustasid massiivsed mandriliustikud oma raskusega maapinna vajumist ja deformatsioone maakoore ja vahevöö kihtides. Liustike taandumise ja jää sulamise järel algas maapinna tagasiliikumine. Samas on maapinna ja masside liikumised maapõues omavahel tihedalt seotud. Kui maapinna liikumised on tänapäeval jälgitavad erinevate geodeetiliste (kordusnivelleerimine, GNSSi püsivaatlusjaamade võrk), okeanograafiliste ja satelliitseire meetoditega, siis materjali ümberpaigutumist maakoores, ülemises vahevöös ja sügavamal ning sellega kaasnevat gravitatsioonivälja muutumist saab uurida gravimeetriliste pidev- ja kordusmõõtmiste abil.

geoidmudel. Projekti peamised tulemused on leitavad ettekandest Ågren jt (2016).

Kuigi NKG2015 geoidimudeli arvutusprojekt hõlmas muuhulgas ka terve Läänemere ala, on märke, et gravimeetrilised andmed merealadel on puudulikud ning kohati ka süstemaatilises nihkes. Selle tulemusena on merealadel NKG2015 (aga ka varasem Eesti ala geoidimudel, vt asjakohast jaotist allpool) kohati täiesti tundmatu täpsusega (eeldatavalt siiski vahemikus 5–20 cm). Seetõttu järgnes NKG2015 projektile Euroopa Liidu transpordiprogrammi rahastatav FAMOS (Finalising Surveys for the Baltic Motorways of the Sea) koostööprojekt, mille üldeesmärk on parendada navigeerimise ohutust Läänemere veeteedel. FAMOSi projekti edukuse tagamiseks on vajalik osalevate riikide kõrgussüsteemide harmoniseerimine. Muu hulgas on plaanis ühtse merekaardistamisdaatumi „Baltic Sea Chart Datum 2000" kehtestamine geodeetilise infrastruktuuri parenduste kaudu.

Seejuures on kõige olulisem Läänemere geoidimudeli parendamine. Paarisentimeetrise täpsusega geoidimudeli olemasolu võimaldaks GNSSi täppispositsioneerimisega hüdrograafiliste mõõdistuste mugavamat ja senisest täpsemat läbiviimist. Ühtlasi võimaldavad ühtse merekaardistamisdaatumi kasutuselevõtt ja täpsed sügavusandmed veesõidukite ohutumat navigeerimist rannikuvetes, kus sügavusvaru on kriitiliselt väike. See projekt ühendab Läänemere riikide meremõõdistuse ja geodeesia riigiasutusi, aga ka teadusasutusi/ülikoole (lisaks Tallinna tehnikaülikoolile osalevad näiteks ka Taani tehnikaülikool ja Potsdami geoteaduste uurimiskeskus GFZ). Projektis FAMOS osalevad ka meie senised olulised koostööpartnerid, võimaldades meil jätkata koostöövõrgustiku osana aktuaalsete ja huvitavate rakenduslike ja teadusprobleemide lahendamist.

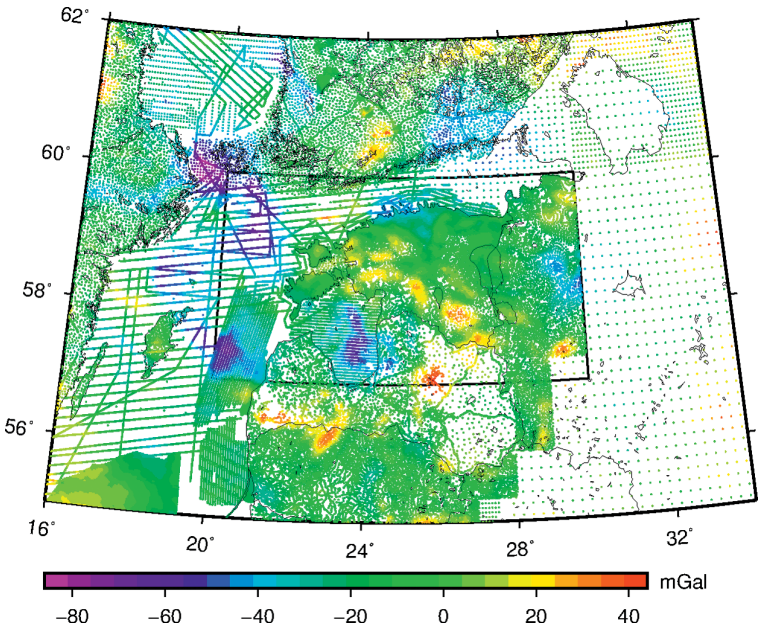
Eelnevate uuringute põhjal on selgunud, et olemasolevate merealade geoidimudelite parendamiseks tuleb läbi viia täiendavaid gravimeetrilisi mõõdistusi. Näiteks Eesti vetes oli suur andmetühik Narva lahes. Mõningaid andmetühikuid oli ka meie läänepoolsetes territoriaal- ja majandustsooni vetes. Nii viidigi koostöös Taani tehnikaülikooli, maa-ameti ja veeteede ametiga 2016 ja 2017 suveperioodil hüdrograafiliste mõõdistuslaevadega läbi meregravimeetrilised mõõtmised, vastavalt Lääne-Eesti rannikumerel ja Soome lahel (Ellmann jt, 2016; Varbla jt, 2017a, b). Sellele järgnes raskuskiirenduse anomaaliate andmebaasi täiendamine ja valideerimine. Rahvusvaheliste koostööprojektidest NKG2015 ja FAMOS tulenevad andmetäiendused võimaldavad otseselt parendada ka Eesti uue geoidimudeli arvutusi.

RASKUSKIIRENDUSTE ANOMAALIATE VÕRGUSTAMINE

Eesti uue geoidimudeli arvutamiseks õnnestus kaasata gravimeetrilisi andmed Eestist ja väljastpoolt u 200 km raadiuses, ühtekokku üle 89 000 punkti. Seega on tänu koostööle Balti- ja Põhjamaadega lisaks Eesti ning Läänemere andmetele kaasatud ka Läti, Leedu, Soome ja Rootsi andmed 2017. aasta seisuga. Joonis 3 näitab kasutatud gravimeetriliste punktide paiknemist.

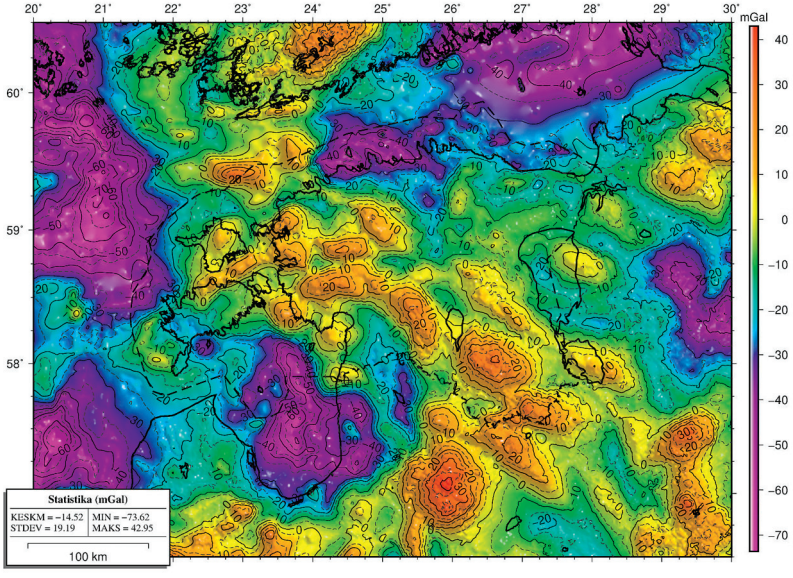
Kogutud punktandmetele tuginedes arvutati tervele andmealale vahemikus 55°…62° p.l. ja 16°… 34° i.p. raskuskiirenduse anomaalvälja (Δg) mudelpind regulaarse võrgustikuna, mille võrgu sõlmpunktide sammuks valiti 0,01 × 0,02°. Raskuskiirenduse võrgustikke saab ebakorrapäraselt paiknevatest punktandmetest arvutada eemalda-interpoleeritaasta (*remove-interpolate-restore*) protsessi abil. Esmalt redutseeritakse raskuskiirenduse väärtused interpoleerimise jaoks võimalikult sobivaks. Tavaliselt võrreldakse enamlevinud redutseerimis- ja mitmeid erinevaid interpoleerimismeetodeid, et selgitada välja kohaseim meetod raskuskiirenduse andmete võrgustamiseks. Ilmnes, et raskuskiirenduse anomaalvälja võrgustamiseks osutus sobivaimaks vähimruutude kollokatsiooni meetod

Joonis 3. Geoidi arvutamiseks kasutatavate gravimeetriliste mõõdistamispunktide (ühtekokku u 89 000) paiknemine. Ristkülikuga on tähistatud geoidiarvutusala. Värvusskaala kajastab raskuskiirenduse anomaaliate (Δg) arvväärtuseid.



(Märdla jt, 2017). Seejuures võeti arvesse sisendandmete täpsushinnangud, suurendamaks täpsema (ja enamasti ka värskeima) andmestiku kaalu arvutusprotsessis. Lõpptulemuseks on nn vabaõhuanomaaliate väärtused (joonis 4), mis ongi üks vajalik sisend geoidi modelleerimisel.

Raskuskiirenduse anomaaliad võimaldavad heita pilgu ka maapõue sügavustesse. Joonisel 4 peegelduvad Eesti ja ümbritsevate alade maakoore geoloogilise ehituse struktuurid (võrdluseks vt All jt, 2004). Negatiivsed ekstreemumid Riia lahes ja Põhja-Eestis viitavad väiksema tihedusega rabakivigraniidi massiividele aluskorras. Positiivsete anomaaliate vöönd suunaga kagust loodesse ühtib aga süvamurrangute vööndite ga Pihkva–Paldiski ja Saaremaa–Mustvee joonel.



Joonis 4. Raskuskiirenduse vabaõhuanomaaliate 0,01 × 0,02° võrgustik Eestis ja lähinaabruses. Kontuuridevahemik on 5 mGal.

STOKESI VALEMI MODIFITSEERIMINE REGIONAALGEOIDI MODELLEERIMISEKS

Nagu Stokesi originaalvalemist (1) selgub, tuleb geoidi kõrguse arvutamiseks teada raskuskiirenduse anomaaliate väärtusi üle kogu maakera. Praktikas on gravimeetrilised andmed arvutuspiirkonna ümber kättesaadavad vaid mõnesaja kilomeetri raadiuses. Stokesi valemi modifitseerimine võimaldabki integreerimisala piiratusest tulenevat viga kompenseerida. Modifitseeritud Stokesi valemiga (integreerides üle piiratud ala σ_0) arvutatakse geoidi undulatsioon N arvutuspunktis modifitseerimiskoefitsientide s_0, s_1, … s_M (terrestriliste) anomaaliate $\Delta\hat{g}$ ning GGMist arvutatud kosmoseandmelise raskuskiirenduse anomaalia signaaliosaku $\Delta\hat{g}_n$ väärtuste asetamisega üldvalemisse

$$N = \frac{R}{4\pi\gamma}\iint_{\sigma} S_M(\psi)\Delta\hat{g}\, d\sigma + \frac{R}{2\gamma}\sum_{n=2}^{M} s_n \Delta\hat{g}_n\,, \qquad (2)$$

kus modifitseeritud Stokesi funktsioon avaldub kujul

$$S_M(\psi) = S(\psi) - \sum_{k=0}^{M}\frac{2k+1}{2}s_k P_k(\cos\psi), \qquad (3)$$

M on kõrgeim modifitseerimisaste ning $P_k(\cos\psi)$ on Legendre'i polünoom.

Modifitseeritud Stokesi valemis lisatakse seega arvutuspiirkonnast kaugemate alade gravitatsioonivälja mõju (e geoidi pikalaineline trend) kosmoseandmetel põhinevast geopotentsiaalvälja spektraalmudelist, samas kui detailne (nn kõrgsageduslik) geoidikomponent saadakse lokaalsete terrestriliste mõõtmisandmete integreerimisest.

Muuseas, modifitseerimise originaalidee pärineb Molodenski jt (1960), kohe pärast esimese sputniku ilmaruumi jõudmist. Praeguseks on välja pakutud erinevaid Stokesi integraalvalemi modifikatsioone, vt näiteks Wong, Gore (1969), Meissl (1971), Sjöberg (1984), Vaníček, Kleusberg (1987) ja mitmed teised (vt kokkuvõtvat ülevaadet Featherstone, 2013). Sjöbergi (1984, 1991, 2003) ettepanekutel võib Stokesi valemit modifitseerida selliselt, et lisaks integreerimisala piiratuse arvestamisele on ka terrestriliste graviandmete ning GGMi koefitsientide vigadest tulenev mõju vähimruutude meetodil minimeeritud. Igat arvutuspunkti ümbritseb ringikujuline integreerimisala, mida võetakse koos vigade spektraalmudelitega arvesse valemites (2) ja (3) esinevate modifitseerimiskoefitsientide arvutamisel. Näiteks NKG2015 ja varasem Eesti geoidi mudel on arvutatud just Sjöbergi (1991, 2003) meetodil.

VARASEMAD GEOIDIMUDELID EESTI ALAL

Taasiseseisvumisjärgselt on Eesti ala täienisti katvaid geoidimudeleid arvutanud Vermeer (1994), Forsberg jt (1997), Denker, Torge (1998), Ellmann (2002), Jürgenson (2003), Ellmann (2005), millest osa on üleeuroopalised või regionaalsed geoidi arvutustööd. Eelmine ametlik geoidimudel EST-GEOID2011 (Ellmann jt, 2011) võeti geodeetilise süsteemi osana Eestis kasutusele 2011. aastal (RT I, 28.10.2011, 3). See oli ette nähtud riiklike EUREF-EST97 ellipsoidaalsete kõrguste ümberarvutamiseks BK77 absoluutkõrgusteks. Ka selle geoidimudeli arvutamiseks kasutati Sjöbergi (1991, 2003) ULSMSA[8] meetodit – summeeritavate paranditega nihutamata vähimruutude meetodil modifitseeritud Stokesi valemit. 2011. aasta geoidimudeli pikalaineline komponent põhines ühel esimesel GOCE satelliitandmetel põhineval globaalse geopotentsiaali mudelil (Pail jt, 2011).

GNSS-nivelleerimispunktide asukohtades hinnati EST-GEOID2011 ja BK77 kõrgussüsteemi ühildamise jääkhälvete (joonis 5) põhjal standardhälbeks ±1,3 cm. Samas olid jääkhälvete suurused piirkonniti (Riia lahe ümbrus, põhjarannik jne) üsna erinevad (ulatudes 2 … 3 cm-ni), mis viitas mõningatele süstemaatilistele vigadele kas gravi-

[8] *Unbiased Least Squares Modification of Stokes's formula with Additive Corrections.*

meetrilise geoidi sisendandmetes või GNSS/nivelleerimise punktide kõrgusväärtustes. Toona olid riikliku kõrgusvõrgu renoveerimistööd alles pooleli, mis ei võimaldanud vigade põhjuseid ja ruumilist jaotust adekvaatsemalt uurida. EST-GEOID2011 arvutustega seonduvat on põhjalikumalt kirjeldatud Ellmann jt (2011, 2016) ja Oja jt (2011) artiklites.

Tulenevalt Eesti üleminekust uuele kõrgussüsteemile EH2000 tekkis vajadus geoidi mudel ajakohastada. Vahepealsetel aastatel oli lisandunud hulgaliselt uusi raskuskiirenduse andmeid maa- ja merealadelt (joonis 3). Vahepeal on ka GOCE andmete põhised GGMid jätkuanalüüsidest täiustunud, mis omakorda eeldatavasti võimaldab parendada regionaalgeoidi modelleerimist. Rakendusliku geoidimudeli arvutus toimub reeglina kahes etapis. Esmalt arvutatakse gravimeetrilise regionaalgeoidi pind, mis seejärel ühildatakse GNSS-nivelleerimise punktide geodeetiliste ja normaalkõrgustega. Ühildamise jääkvigade põhjal võib anda ka hinnangu gravimeetrilise geoidi arvutustäpsusele.

GRAVIMEETRILINE GEOIDIMUDEL GRAV-GEOID2017

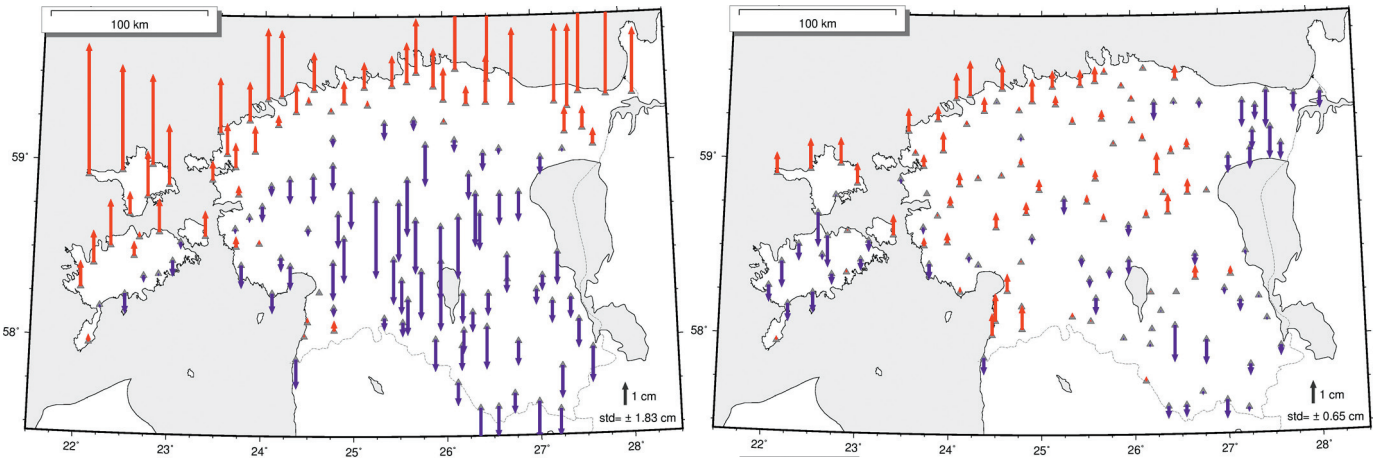
Uue geoidimudeli arvutustega seonduvat tegevust koordineeris Tallinna tehnikaülikooli geodeesia õppetool (nüüdne teedeehituse ja geodeesia uurimisrühm) koostöös maa-ameti geodeesia osakonnaga. Uurimistöö eesmärgiks seati sentimeetrist parema täpsusega ja kõrge ruumilise lahutusega (0,01 × 0,02 kaarekraadi, u 1,1 × 1,1 km, sarnaselt raskuskiirenduse anomaaliate võrgustikuga) Eesti geoidimudeli arvutamine, milleks töötati välja optimaalne lähenemisviis. Eesti majandusvetes geoidimudeli kasutatavuse tagamiseks laiendati arvutusala 57°… 60°p.l. ja 20°… 30°i.p. (pindalaga u 180 000 km^2, sisaldades ühtekokku 150 000 arvutuspunkti), mis hõlmas lisaks Eesti maismaale, territoriaalvetele ja majandustsoonile ka lähinaabrite piirialasid.

Uurimistöö tulemusena andis vähimruutude ULSMSA meetodil modifitseeritud Stokesi valem Eesti geoidi mudeli arvutustöödes statistiliselt täpseima tulemuse. Regionaalse geoidimudeli arvutamisel kombineeriti globaalse geoidi mudeli pikalaineline komponent piirkondlike terrestriliste mõõtmistulemustega (lühilaineline komponent). Gravimeetrilise geoidi mudeli GRAV-GEOID2017 arvutamiseks kasutati gradiomeetrilise satelliidi GOCE põhjalikult analüüsitud andmete põhjal 2015. aastal koostatud globaalset geopotentsiaali mudelit GOCO05s (Mayer-Gürr jt, 2015). Kosmoseandmete kaasamine toimus reaksarenduse astmeni $M = 200$, mis vastab ruumilisele lahutusele 100 km. Igat arvutuspunkti ümbritseva integreerimisala raadiusena osutus parimaks 2° (u 220 km).

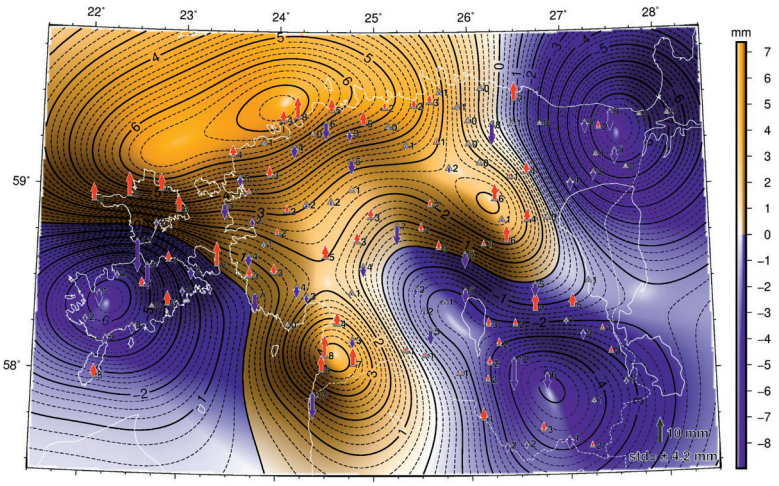
Gravimeetrilist geoidimudelit ei saa praktilistes töödes ehedal kujul kasutada, kuna see ei ühildu kohaliku kõrgussüsteemiga, mis ei pruugi kokku langeda globaalgeoidi (maailmamere) nivoopinnaga, ka mitte keskmise veetasemega Läänemeres. Gravimeetrilise geoidi ja Eesti kõrgussüsteemi erinevused tehakse kindlaks GNSS-nivelleerimise (kõrgused maaellipsoidi pinna suhtes ja ka Eesti uues kõrgussüsteemis) punktide abil.

GEOIDIMUDELI VALIDEERIMINE GNSS-NIVELLEERIMISPUNKTIDEGA. RAKENDUSLIK MUDEL EST-GEOID2017

Uue gravimeetrilise geoidimudeli GRAV-GEOID2017 praktilistes rakendustes kasutamiseks ühildati see kõrgtäpsete GNSS/nivelleerimise punktidega (täpsemalt riikliku geodeetilise võrgu punktide EUREF-EST97 ellipsoidaalsete ja uue kõrgussüsteemi EH2000 normaalkõrguste väärtuste erinevustega). Selleks kasutatud sobituspunktid (ühtekokku 131 riikliku geodeetilise GPS võrgu I ja II klassi punkti) ja seal esinenud jääkhälbed on kujutatud joonisel 5.

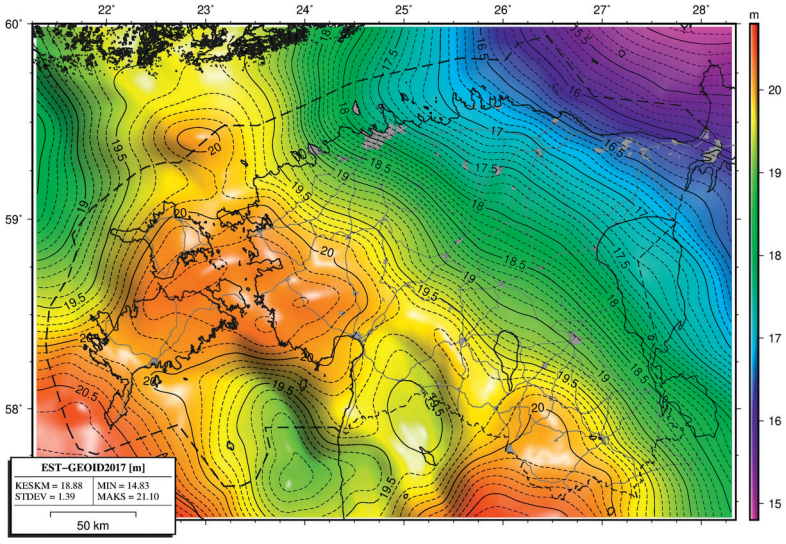


Joonis 5. Eelmise gravimeetrilise geoidimudeli GRAV-GEOID2011 (vasakul) ja uue GRAV-GEOID2017 (paremal) sobitamise jääkvead GNSS-nivelleerimise punktide asukohtades pärast keskmise erinevuse eemaldamist.



Joonis 6. Gravimeetrilise GRAV-GEOID2017 mudeli parandpinna arvutus vähimruutude kollokatsiooni meetodil rakendusliku geoidi EST-GEOID2017 mudelpinnaks. Ühildamise jääkhälbed GNSS-nivelleerimispunktide asukohtades on tähistatud nooltega. Ühikud on millimeetrites.

Geoidi mudelpindade ühildamise jääkvead kirjeldavad nii GNSSi mõõtmistest arvutatud geodeetiliste kõrguste ja nivelleeritud kõrguskasvudest tasandatud normaalkõrguste vigu, kui ka gravimeetrilise geoidi sisendandmestike ning arvutusmeetodite vigu. Ilmneb, et 2017. aasta geoidimudeli jääkvigade hälve pärast keskmise erinevuse eemaldamist (1D nihe) on vaid 6,5 mm, samas kui 2011. aasta geoidimudelil on see ligi kolm korda suurem. Selgelt on sellisel parendamisel mõju avaldanud nii uute andmete lisandumine kui ka nivelleerimisvõrgu korrastatud andmestik, aga põhiliselt ikka gravimeetrilise mudeli täpsem lahendus. Geoidimudeli lõplik ühildamine kõrgussüsteemiga toimus vähimruutude kollokatsiooni meetodil. Teisisõnu, gravimeetriline geoid „painutati“ selliseks, et see kajastaks GNSS-nivelleerimise punktides olevaid kontrollväärtusi, kuid säilitaks sealjuures võimalikult palju oma algset kuju. GRAV-GEOID2017 mudelit painutav nn parandpind on kujutatud joonisel 6.



Joonis 7. Mudelpind EST-GEOID2017 (koos suuremate asulate ja peamiste maanteedega), mis on rakendatav EUREF-EST97 ellipsoidaalsete kõrguste ümberarvutamiseks EH2000 kõrgusteks ja vastupidi. Isojoonte vahe on 0,1 m.

See transformeeris gravimeetriline geoidi mudeli nn rakendusliku geoidi EST-GEOID2017 mudelpinnaks (joonis 7). Täpsushinnanguks saadi, et GNSS-nivelleerimispunktide asukohtades on EST-GEOID2017 uue kõrgussüsteemiga ühildamise jääkhälvete (joonised 5 ja 6) standardhälbeks ±4,2 mm (1 sigma, e 68% tõenäosusega). Soome lahes tehtud GNSS profiilimõõtmised (vt Varbla jt, 2017a, b) näitavad, et geoidi mudeli määramatus merealadel on u ±3 cm, mis ületab FAMOS projekti poolt seatud ±5 cm täpsuseesmärki. Tulemuseks saadud rakenduslik geoidimudel EST-GEOID2017 on esitatud joonisel 6. Antud geoidiarvutuse teaduslikke ning tehnilisi üksikasju kajastab detailsemalt Ellmann jt (2019).

Jooniselt 7 nähtub, et EST-GEOID2017 geoidi mudelpinna undulatsiooni väärtused (referentsellipsoidi suhtes) kahanevad Eesti alal edela-kirdesuunaliselt enam-vähem ühtlaselt, 20,5 meetrist kuni 16 meetrini. Mudelit EST-GEOID2017 kasutatakse EUREF-EST97 ellipsoidaalsete kõrguste ümberarvutamiseks EH2000 normaalkõrgusteks ja vastupidi.

LÕPETUSEKS

Uurimistöö tulemusena saadud geoidimudel EST-GEOID2017 kehtestati Eesti Vabariigi geodeetilise süsteemi koostisosana (RT I, 26.07.2017, 2). Uus geoidimudel on osutunud vajalikuks maa-ametile, veeteede ametile ja teistele keskkonnaministeeriumi ning majandus- ja kommunikatsiooniministeeriumi haldusalas tegutsevatele asutustele-ettevõtetele. Geoidi mudeli kasutuslitsentsi on 2019. aasta alguseks taotlenud üle 160 välis- ja kodumaise ettevõtte ja uurimisasutuse. Potentsiaali mudeli kasutamiseks näeme ka Eesti kaitsejõududes ning sisejulgeolekuasutustes. Võimaldab ju uus geoidimudel GNSS-tehnoloogiaga saadud kõrguste täpset ümberarvutamist Eesti kõrgussüsteemi ametlikeks kõrgusteks (teisisõnu, üleminekut geodeetiliselt kõrguselt absoluutkõrgusele). Uus geoidimudel võimaldab täpset GNSS-kõrgusmäärangut riiklikus kõrgussüsteemis, olles seega kiire ja suhteliselt odav alternatiiv nivelleerimisele. Esmajoones on tulemused kasulikud geodeetiliste inseneriülesannete lahendamisel kogu riiki hõlmavate objektide (näiteks raud- ja maanteed, side- ja jõukaablid jne) rajamisel ja haldamisel.

Usaldusväärse geoidimudeli olemasolu on eelduseks selliste tööde kulutuste vähendamiseks, lisaks on sel oluline roll rajatiste ekspluateerimisel ja ohutuse tagamisel. Samuti on geoidi täppismudeli olemasolu (kombineerituna maa vertikaalliikumiste usaldusväärse mudeliga) eelduseks klassikaliste (seni küllaltki kallite!) geodeetiliste võrkude rajamise põhimõtete revideerimiseks, ja seda just lihtsustamise suunas.

Hinnanguliselt annavad jätkuva uurimistöö tulemused ainest mitmesugusteks interdistsiplinaarseteks analüüsideks ja tõlgendusteks. Geoidi ja gravitatsioonivälja (ennekõike selle ajalisi muutumisi) kirjeldavad mudelid pakuvad geoteadustele huvi näiteks kliimauuringutes, mitmesuguste loodusnähtuste, Maa siseehituse ja jätkuvalt Maad vormivate füüsikaliste protsesside (isostaasia, jääajajärgne maatõus jne) põhjuste uurimisel ja selgitamisel. Veealade detailsem geoidimudel, kombineerituna merepinna topograafiat ning atmosfääriprotsesse (nt tormituuled) kirjeldavate mudelitega, peaks võimaldama täpsemalt prognoosida rannikualasid tabavaid üleujutusi, nende ulatust ja võimalikku kahju.

Uurimistöö võimaldas ühiselt tegutsedes rakendada mitmeid innovaatilisi mudeleid ja metoodikaid, lahendada hulgaliselt probleeme ning esitada tulemina täpsema ja usaldusväärsema (võrreldes senistega) raskuskiirendusvälja ja geoidi mudeli Eesti alale. Samas teadmised Maa gravitatsioonivälja ning geoidi osas täienevad pidevalt, seda tänu nii globaalsete mudelite parendamisele ja uute andmete lisandumisele rahvusvahelise ühistegevuse tulemusena kui ka meie enda ettevõtmistele Eestis.

Tänuavaldused. Eesti teadusfond toetas aastail 2008–2011 teadusgrandiga ETF7356 uuringuid teemal „Kosmosetehnoloogia rakendused geoidi ja gravitatsioonivälja täpsustamiseks Eesti alal“. Rahvusvaheline koostöö NKG ja FAMOS projektide raames on andnud hindamatu võimaluse Eesti geoidi mudeli äärealade parendusteks. Uurimistööd on finantseerinud ka Eesti teadusagentuur (PRG330). Viidatud kirjanduses publikatsioonide autoritena loetletud kolleegid on tänatud geoidi modelleerimise parendamiseni viinud andmestiku kogumise ja kättesaadavaks tegemise eest.

VIITED

All, T., Puura, V., Vaher, R. 2004. Orogenic structures of the Precambrian basement of Estonia as revealed from the integrated modelling of the crust. – Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology, 53 (3), 165–189.

Bruinsma, S. L., Foerste, C., Abrikosov, O., Marty, J. C., Rio, M. H., Mulet, S., Bonvalot, S. 2013. The new ESA satellite – only gravity field model via the direct approach. – Geophysical Research Letters, 40, 3607–3612.

Denker, H., Torge, W. 1998. The European gravimetric quasigeoid EGG97– an IAG supported continental enterprise. – Forsberg, R., Feissel, M., Dietrich, R. (eds). Geodesy on the Move. Springer, Berlin, Heidelberg, NewYork, 249–254. (IAG Symp. Series; 119).

Ellmann, A. 2001. Least Squares Modification of Stokes Formula with Applications to the Estonian Geoid. Licentiate thesis. Royal Institute of Technology, Division of Geodesy Report No. 1056, Stockholm.

Ellmann, A. 2002. An improved gravity anomaly grid and a geoid model for Estonia. – Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology, 51, 199–214.

Ellmann, A. 2004. The Geoid for the Baltic Countries Determined by the Least Squares Modification of Stokes' Formula. PhD thesis. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Ellmann, A. 2005. Two deterministic and three stochastic modifications of Stokes's formula: a case study for the Baltic countries. – Journal of Geodesy, 79, 11–23.

Ellmann, A., Oja, T. 2008. Füüsikalise geodeesia ja gravimeetria alused. TTÜ kirjastus, Tallinn.

Ellmann, A., All, T., Oja, T. 2009. Toward unification of terrestrial gravity data sets in Estonia. – Estonian Journal of Earth Sciences, 58 (4), 229–245.

Ellmann, A., Oja, T., Jürgenson, H. 2011. Kosmosetehnoloogia rakendused geoid ja gravitatsioonivälja täpsustamiseks Eesti alal. – Geodeet, 41 (65), 22–25.

Ellmann, A., Väling, P., Oja, T. 2016. Meregravimeetrilised mõõdistused Lääne-Eesti vetes FAMOS projekti raames. – Geodeet, 45/46, 80–82.

Ellmann, A., Märdla, S., Oja, T. 2019. The 5 mm geoid model for Estonia computed by the least squares modified Stokes's formula. Survey Review. https://doi.org/10.1080/00396265.2019.1583848

Featherstone, W. E. 2013. Deterministic, stochastic, hybrid and band-limited modifications of Hotine's integral. – Journal of Geodesy, 87 (5), 487–500.

Forsberg, R., Kaminskis, J., Solheim, D. 1997. Geoid for the Nordic and Baltic region from gravimetry and satellite altimetry. – Segawa, J., Fujimoto, H., Okubo, S. (eds). Gravity, Geoid and Marine Geodesy. Springer, Berlin, Heidelberg, NewYork, 540–547. (IAG Symp. Series; 117).

Jürgenson, H. 2003. Eesti täppisgeoidi arvutus. PhD väitekiri, Tartu, EMÜ.

Mayer-Gürr, T., Pail, R., Gruber, T., Fecher, T., Rexer, M., Schuh, W.-D., Kusche, J., Brockmann, J.-M., Rieser, D., Zehentner, N., Kvas, A., Klinger, B., Baur, O., Höck, E., Krauss, S., Jäggi, A. 2015. The Combined Satellite Gravity Field Model GOCO05s. Vienna, Austria.

Meissl, P. 1971. Preparation for the Numerical Evaluation of Second Order Molodenskii-Type Formulas. Department of Geodetic Science, Columbus, Ohio. (OSU Report; 163).

Molodenski jt, 1960. = Молоденский М. С., Юркина М. И., Еремеев В. Ф. 1960. Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли. (Труды Центрального научно-исследовательского института геодезии, аэросъемки и картографии; 131).

Märdla, S., Oja, T., Ellmann, A., Jürgenson, H. 2015. Improving and validating gravity data over ice-covered marine areas. – Rizos, C., Willis, P. (eds). IAG 150 Years: Proceedings of the 2013 IAG Scientific Assembly, Postdam, 2013. International Association of Geodesy Symposia, Springer, 143, 263–270.

Märdla, S., Ågren, J., Strykowski, G., Oja, T., Ellmann, A., Forsberg, R., Bilker-Koivula, M., Omang, O., Parseliunas, E., Liepinš, I., Kaminskis, J. 2017. From discrete gravity survey data to a high-resolution gravity field representation in the Nordic-Baltic region. – Marine Geodesy, 40, 416–453.

Oja, T. 2007. Gravimeetrilised süsteemid ja võrgud Eestis: IGSN71 ja EGS ajavahemikus 1975–2007. – Geodeet, 35 (59), 11–20.

Oja, T. 2011. Raskuskiirenduse anomaalvälja kerkest Luusika kandis ning selle mõjust geoidile. – Geodeet, 41 (65), 26–30.

Oja, T., Ellmann, A., Jürgenson, H., Kall, T. 2011. Mudelpindade EST-GEOID2011 ja EST-GEOID2003 omavahelistest erinevustest ning võimalikust üleminekust uuele kõrgussüsteemile. – Geodeet, 41 (65), 31–37.

Oja, T., Türk, K., Ellmann, A., Gruno, A., Bloom, A., Sulaoja, M. 2011. Relative gravity surveys on ice-covered water bodies. – Cygas, D., Froehner, K. D. (eds). Selected Papers of the 8th Int. Conf. on Environmental Engineering, Vilnius, Lithuania, 19–20, May, 2011. Proceedings. Vilnius Gediminas Technical University Press „Technika", Vilnius, 1394–1401.

Oja, T., Ellmann, A., Märdla, S. 2019. Gravity anomaly field over Estonia. Estonian Journal of Earth Sciences, 68, 2, 55–75, https://doi.org/10.3176/earth.2019.06

Pail, R., Bruinsma, S., Migliaccio, F., Foerste, C., Goiginger, H., Schuh, W.-D., Hoeck, E., Reguzzoni, M., Brockmann, J. M., Abrikosov, O., Veicherts, M., Fecher, T., Mayrhofer, R., Krasbutter, I., Sanso, F., Tscherning, C. C. 2011. First GOCE gravity field models derived by three different approaches. – Journal of Geodesy, 85 (11), 819–843.

RT I, 28.10.2011, 3. = Keskkonnaministri 26.10.2011 määrus nr 64 „Geodeetiline süsteem“. – Riigi Teataja, https://www.riigiteataja.ee/akt/128102011003

RT I, 26.07.2017, 2. = Keskkonnaministri 26.10.2011 määruse nr 64 „Geodeetiline süsteem“ muudatus. – Riigi Teataja, https://www.riigiteataja.ee/akt/126072017002

Sildvee, H. 1998. Gravity measurements of Estonia. – Reports of the Finnish Geodetic Institute, 98, 3.

Sjöberg, L. E. 1984. Least Squares Modification of Stokes and Vening-Meinesz Formulas by Accounting for Errors of Truncation, Potential Coefficients and Gravity Data. The Department of Geodery Report, 27. University of Uppsala.

Sjöberg, L. E. 1991. Refined least squares modification of Stokes formula. – Manuscripta Geodaetica, 16, 367−375.

Sjöberg, L. E. 2003. A computational scheme to model the geoid by the modified Stokes formula without gravity reductions. – Journal of Geodesy, 77 (7–8), 423–432.

Türk, K., Sulaoja, M., Oja, T., Ellmann, A., Jürgenson, H. 2011. Precise gravity surveys in South Estonia from 2009 to 2010. – Cygas, D., Froehner, K. D. (eds). Selected papers of the 8th Int. Conf. on Environmental Engineering, Vilnius, Lithuania, 19–20, May, 2011. Proceedings. Vilnius Gediminas Technical University Press „Technika“, Vilnius, 1499−1505.

Vaníček, P., Kleusberg, A. 1987. The Canadian geoid – Stokesian approach. – Manuscripta Geodaetica, 12, 86–98.

Varbla, S., Ellmann, A., Metsar, J., Oja, T. 2017a. Meregravimeetrilised mõõdistused Soome lahel FAMOS projekti raames. – Geodeet, 47, 39–43.

Varbla, S., Ellmann, A., Märdla, S., Gruno, A. 2017b. Assessment of marine geoid models by ship-borne GNSS profiles. – Geodesy and Cartography, 43 (2), 41–49.

Vermeer, M. 1994. A Fast Delivery GPS-gravimetric Geoid for Estonia. Reports of the Finnish Geodetic Institute. Helsinki.

Wong, L., Gore, R. 1969. Accuracy of geoid heights from the modified Stokes kernels. – Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 18, 81–91.

Ågren, J., Strykowski, G., Bilker-Koivula, M., Omang, O., Märdla, S., Forsberg, R., Ellmann, A., Oja, T., Liepinš, I., Paršeliūnas, E., Kaminskis, J., Sjöberg, L., Valsson, G. 2016. The NKG2015 gravimetric geoid model for the Nordic-Baltic region. – 1st Joint Commission 2 and IGFS Meeting Int. Symp. on Gravity, Geoid and Height Systems, Thessaloniki, Greece, 19–23 September, 2016. Aristotle University of Thessaloniki, 1.

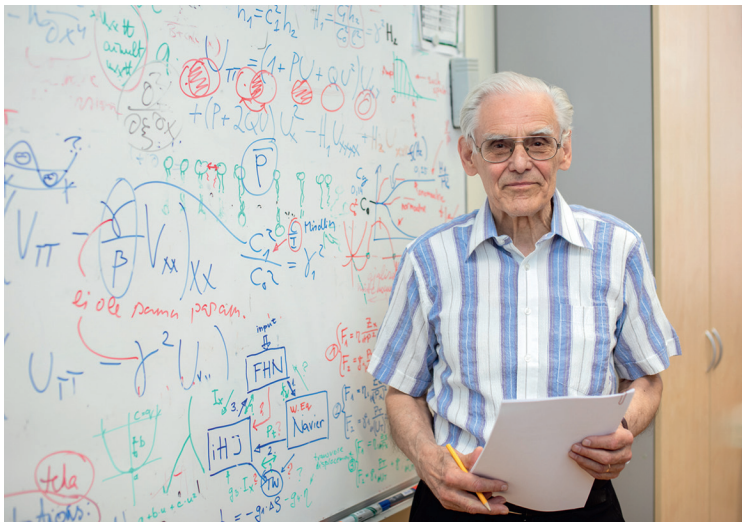
LAINELEVI MODELLEERIMINE TAHKISTES JA KOMPLEKSSÜSTEEMID

Jüri Engelbrecht
Tallinna tehnikaülikooli küberneetika instituut

AJALOOLISELT ASJADE ALGUSEST

Mehaanikateaduse juured ulatuvad kaugele ajalukku, sest meid ümbritsevas maailmas toimuvad protsessid on paljuski seotud mehaanikanähtustega ja inimmõistus on otsinud neile vastavaid selgitusi ja lahendusi. Mehaanika seaduspärasuste tundmiseta ei saa läbi ükski insener ega füüsikateadlane. Võiks arvata, et sellise ajaloolise taustaga teadusvaldkonnas on põhiprobleemid ammu lahendatud, kuid nii see pole. Tõsi, Isaac Newtoni kuulsas raamatus „Principia“ (1687) on üldised printsiibid kirjas kolme seadusena, milleta ei saa ükski mehaanikaprobleem läbi (mis sellest, et nende seaduste kirjapilt tänapäeval on hoopis teine). Jättes kõrvale teadusajaloo, on huvitav märkida, et juba 1690. aastal tutvustas professor Sven Dimberg Tartu ülikoolis Newtoni õpetust, millest sai alguse mehaanikateaduse kui tänapäeva ühe olulisema insenerivaldkondade tugisamba õpetamine ja arendamine Eestis.

Mehaanika süstemaatilisele õpetamisele ja vastavatele teadusuuringutele pandi alus tehniliste õppeasutuste loomisega Tallinnas alates 1918. a. Selles oli suur osa legendaarsel Ottomar Maddisonil. Kui tulla aga tänapäeva mehaanikateaduse probleemide juurde, siis on need seotud materjali kui kontinuumi (tahkised, vedelikud jne) käitumisega, erinevate struktuuride analüüsiga, numbriliste meetodite rakendamisega, dünaamiliste protsesside (löök, võnkumine jne) modelleerimisega, purunemismehaanikaga ning jõuavad paljude üldistusteni. Nii või teisiti, Newtoni formuleeritud momendi jäävus (Newtoni II seadus) on mehaanika nurgakivi. Siit tulenevad nii tasakaalutingimused staatikas kui ka liikumisvõrrandid



dünaamikas. Ometi ei piisa nendest mehaanikaprobleemide lahendamiseks. Materjali käitumine nõuab ka nn olekuvõrrandeid (lihtsustatult pinge ja deformatsiooni vahelisi seadusi) ja siin pole kaugeltki kõik selge. Materjalid on keerulise sisestruktuuriga ja mitmemastaapsed (tavamõõtmetestiga päevaelus nanostruktuurideni ühelt poolt ja universumi mõõtmeteni teiselt poolt), dünaamilised koormused varieeruvad laias sageduste diapasoonis, pingevälja kõrval tuleb arvestada teiste väljade (temperatuur, elektromagnetism) mõjuga, termodünaamika tingimuste rahuldamine tekitab lisatingimusi jne. Tekkinud on hulk spetsiifilisi valdkondi, nagu biomehaanika, fotoelastsus, geomehaanika jm, kus vastava keskkonna spetsiifilised omadused mängivad olulist rolli. Mehaanika on andnud väga olulise tõuke üldiste teadusprobleemide arengusse mittelineaarse dünaamika näol ja selle üldistused on rakendatud paljudes teistes teadusvaldkondades. Järgmine samm üldistuste

teel on komplekssüsteemide teooria ja rakenduste kaudu (Engelbrecht, 2015a). Nii mittelineaarne dünaamika kui ka komplekssüsteemide teooria nõuaksid eraldi analüüsi (vt eesti keeles: Lepik, Engelbrecht, 1999; Engelbrecht, 2010), mis aga väljub praeguse ülevaate raamidest.

SISSEJUHATUS

See artikkel käsitleb deformatsioonilainete leviprotsesside matemaatilist modelleerimist komplekssüsteemide teooria raames, mis on olnud TTÜ küberneetika instituudi üks olulisi uurimissuundi (vt Research Report 317/16, 2016).

Alustuseks paar definitsiooni. Laine on häiritus (deformatsioon, pinge jne), mis levib lõpliku kiirusega keskkonna ühest ruumipunktist teise, ilma et keskkond ise liikuma hakkaks. Väli on füüsikaliste muutujate (jääkpinge, temperatuur jne) kogum keskkonnas antud ajahetkel, mida üldises mõttes käsitletakse vastastikmõju vahendajana. Materjali sisestruktuur peegeldab tema ehitust (segu mitmest materjalist, kihilisus, graanulid jne) ja on seotud mastaabiga kuni aatomaarse struktuurini välja.

Matemaatilised mudelid lainelevi modelleerimiseks tuletatakse Newtoni II seadusest, mis kontinuumi puhul seob pinge muutusi osakeste kiirendustega. Jättes kõrvale keerulised pingetensori kujud ja võimalikud kõverjoonelised koordinaadid, on ühemõõtmelisel juhul ristkoordinaatides tulemiks lainevõrrand

$$u_{tt} - c_0^2 u_{xx} = 0, \qquad (1)$$

kus u on paigutis (siire), c_0 on laine levimise kiirus, x ja t on vastavalt ruumi ja aja koordinaat ning indeksid tähendavad diferentseerimist.

Võrrandi tuletamisel on eeldatud, et materjal on homogeenne, pinge ja deformatsioon on võrdelised ning puudub sumbuvus. Olgugi et selline mudel on universaalne ja kirjeldab paljusid laineleviprotsesse (kuuludes nende 17 võrrandi hulka, mis muutsid maailma (Stewart, 2013)), on maailm tunduvalt keerulisem. Nagu eespool öeldud, pole materjalid homogeensed, neis võib esineda mikrostruktuur, pinge ja deformatsiooni seos on üldjuhul mittelineaarne, mängu tulevad termodünaamika tingimused, arvestada tuleb näiteks elektromagnetiliste mõjudega jne. Seetõttu on ka matemaatilised mudelid reaalsete protsesside kirjeldamiseks tunduvalt keerulisemad kui klassikaline lainevõrrand (1).

Üldistatult tuleb aga reaalsust paremini kirjeldavate mudelite konstrueerimisel arvestada komplekssüsteemide tunnustega, mis viitavad ühelt poolt füüsikaliste protsesside universaalsusele, teiselt poolt aga juhivad tähelepanu võimalikele iseärasustele (Nicolis, Nicolis, 2007; Érdi, 2008).

Olulised tunnusjooned on:

- komplekssüsteemid koosnevad paljudest komponentidest, mis on omavahel seostatud ja mõjutavad üksteist (interakteeruvad), tihti esineb hierarhilisus;
- komplekssüsteemide käitumine on reeglina kirjeldatav mittelineaarsete (ei kehti võrdelisus) seostega komponentide vahel;
- komplekssüsteemid võivad olla iseorganiseeruvad uuteks struktuurideks uute omadustega, mis pole otseselt tuletatavad komponentide omadustest;
- komplekssüsteemid võivad omada mälu (st mäletavad, mis juhtus minevikus) ja olla adaptiivsed;
- komplekssüsteemid on ajas muutuvad ja tihti termodünaamilises mõttes mittetasakaalulised;
- komplekssüsteemide lokaalsed muutused arenevad tihti globaalseteks;
- komplekssüsteemide muutused toimuvad tihti korra ja kaose piirimail ning väikesed süsteemi alghäiritused võivad tekitada globaalseid muutusi.

Laineleviprotsesside analüüs mahub üsna kenasti sellisesse raamistikku (Engelbrecht, 2015a) ja võrrandi (1) asemel tuleb tegemist teha palju keerulisemate mudelitega. Samas on nende tuletamisel võimalik järgida üsna selgeid samme (Engelbrecht, 2015b). Alustada tuleb loomulikult protsessi füüsikast ja põhiprintsiipidest ning siis otsustada, kas modelleerida mitut või vaid ühte lainet, millised on oodatavad efektid konservatiivsetes või mittekonservatiivsetes materjalides ja kuidas käituda mitme mastaabiga. Erilist tähelepanu tuleks pöörata just materjali struktuuri iseloomustamisele, milleks on võimalik kasutada sisemuutujate kontseptsiooni (Berezovski, Ván, 2017). Sisemuutujad tulevad mängu mikrostruktuuriga materjalide kirjeldamiseks (mikrodeformatsioon, mikrotemperatuur) ja erinevalt vaadeldavatest muutujatest (paigutis, kiirus jne) tuleb nende olekuvõrrandid tuletada termodünaamika tingimustest. Saab nentida, et laineprotsesside analüüsiks on välja töötatud hea teoreetiline baas.

Alljärgnevalt on põhitähelepanu mikrostruktuuriga materjalide käitumisel, arvestades mitmete füüsikaliste väljade koosmõjuga. Kui kohandada ülaltoodud komplekssüsteemide käitumisprintsiipe laineleviprotsessidele sellistes materjalides, on oluline märkida:

- laineid iseloomustavad pinged, kiirused, deformatsioonid ja temperatuur sõltuvad materjali komponentide interaktsioonidest ja väljade koosmõjust;
- lained kannavad endaga informatsiooni ja nende energia iseloomustab interaktsioone;
- lainete parameetrid (amplituudid, kiirused, spekter, profiilid) on mõõdetavad ja otsese pingeseisundi määramise kõrval kasutatavad ka pöördülesannete lahendamiseks;
- termodünaamika tingimustega arvestamine garanteerib mudelite kooskõlalisuse;
- tuleb arvestada mastaape (makro-, meso-, mikro- ja molekulaarmastaabid);
- mitme efekti koosmõjul võivad tekkida lainestruktuurid, mis levivad kuju muutmata.

Üheks oluliseks protsessiks lainelevis on interaktsioonid, mis võivad põhimõtteliselt olla mitut tüüpi: laine-sisestruktuur, laine-laine ja laine-väli. Alljärgnevalt on juttu sellest, kuidas interaktsioon materjali sisestruktuuriga mõjutab laine parameetreid ning kuidas lained on seostatud ja interakteeruvad omavahel.

LAINED KOMPAVAD MATERJAL SISESTRUKTUURI

Tüüpilised näited mikrostruktuuriga materjalidest on tänapäevased komposiitmaterjalid, funktsionaalselt skaleeritud materjalid, kristalsed sulamid jne. Ka betoon on mikrostruktuuriga materjal. Lainelevi modelleerimisel on üldreeglina vaja eristada makro- ja mikrostruktuuri ja viimase mastaapi (Engelbrecht, 2015b; Berezovski, Ván, 2017) ning formuleerida jäävusseadused mõlema jaoks eraldi. Võimalik on ka ühtse jäävusseaduse kasutamine, mille juures tulevad kohe mängu interaktsioonijõud (Maugin, 1999). Kasutades Euleri-Lagrange'i võrrandeid ja sisemuutujate kontseptsiooni, saab ühemõõtmelisel (1D) juhul koostada lineaarses seades makrosiirde u ja mikrodeformatsiooni (kui sisemuutuja) φ jaoks järgmise võrrandisüsteemi (Engelbrecht, 2015b):

$$\rho u_{tt} = (\lambda + 2\mu)\, u_{xx} + A\varphi_{xx}, \tag{2}$$

$$I\varphi_{tt} = C\,\varphi_{xx} - Au_x - B\varphi, \tag{3}$$

kus ρ on makrotihedus, λ ja μ on Lamé parameetrid, I on mikroinerts ning A, B ja C täiendavad materjali parameetrid.

See süsteem on taandatav vaid makrostruktuuri muutujale u:

$$u_{tt} = \left(c_0^2 - c_A^2\right)u_{xx} + a_1\left(u_{tt} - c_0^2 u_{xx}\right)_{xx} -$$

$$- a_2\left(u_{tt} - c_0^2 u_{xx}\right)_{tt} + a_3 u_{xxxx}, \tag{4}$$

kus c_0 on heli kiirus makrostruktuuris ja c_A on vastav kiirus mikrostruktuuris ning a_1, a_2 ja a_3 on konstandid.

Asümptootiline analüüs võimaldab seda võrrandit veelgi lihtsustada ja tulemiks on

$$u_{tt} = \left(c_0^2 - c_A^2\right)u_{xx} + p^2 c_A^2 \left(u_{tt} - c_1^2 u_{xx}\right)_{xx}, \qquad (5)$$

kus c_A on modifitseeritud kiirus ja p iseloomustab mikroinertsi.

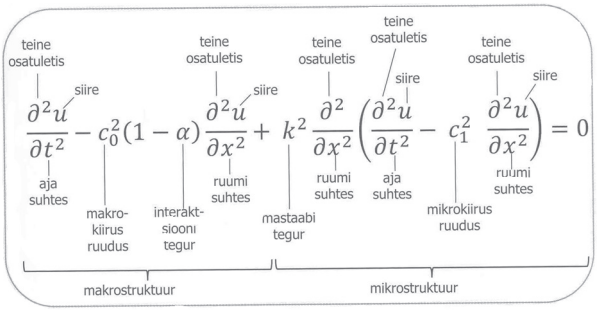
Võrrand (5) on tüüpiline hierarhiline lainevõrrand, mis seob kaht laineoperaatorit – üks makrostruktuuri kirjeldamiseks, teine mikrostruktuuri kirjeldamiseks. Joonis 1 demonstreerib kõiki kasutatud muutujaid.

Juhul kui tegemist on kahemastaabilise mikrostruktuuriga (mikrostruktuuris endas on väiksema mastaabiga mikrostruktuur), läheb ka mudel keerulisemaks:

$$u_{tt} = \left(c_0^2 - c_{A1}^2\right)u_{xx} + \delta_1 b_1 \left(u_{tt} - c_1^2 u_{xx}\right)_{xx} -$$

$$- \delta_2^2 b_2 \left(u_{tt} - c_2^2 u_{xx}\right)_{xxxx}, \qquad (6)$$

kus δ_1 ja δ_2 on skaleerimisparameetrid, b_1 ja b_2 kirjeldavad seostatust ning c_{A1}, c_1 ja c_2 on mikrostruktuure iseloomustavad kiirused.



Joonis 1. Hierarhilise lainevõrrandi (5) struktuur.

Kui võtame arvesse ka mittelineaarsed efektid nii makro- kui ka mikrotasandil, teisendub võrrand (5) mittelineaarseks:

$$u_{tt} = \left(c_0^2 - c_A^2\right)u_{xx} + \frac{1}{2} q_1 \left(u_x^2\right)_x +$$

$$+ p^2 c_A^2 \left(u_{tt} - c_1 u_{xx}\right)_{xx} - \frac{1}{2}\sqrt{\delta} q_2 \left(u_{xx}^2\right)_{xx} \qquad (7)$$

kus q_1 ja q_2 on mittelineaarsuse koefitsiendid ning δ on skaleerimisparameeter. Seejuures on mittelineaarsed efektid seotud deformatsioonidega, mis on iseloomulik just tahkistele.

Üks huvitav mikrostruktuuriga materjal on vilt, mida kasutatakse klaverihaamrite valmistamiseks. Lisaks mikrostruktuurile on vildil ka mälu ehk teisisõnu materjal mäletab varasemat deformatsiooni. Jättes kõrvale vastava pinge-deformatsiooniseose, esitame siin liikumisvõrrandi (Kartofelev, Stulov, 2014):

$$[(u_x)^p]_x - u_{tt} + [(u_x)^p]_{xt} - \delta u_{ttt} = 0, \qquad (8)$$

kus $p \geq 1$ iseloomustab mittelineaarsust ja δ kirjeldab materjali mälu.

Ka bioloogilised koed on käsitletavad kui mikrostruktuuriga matejalid. Näitena võib tuua lipiididest koosneva biomembraani, mis ümbritseb nii rakke kui moodustab ka närvikiu seina. Olulise erinevusena tahkistest on mittelineaarsus sel juhul seotud siirdega ehk paigutisega. Lähtudes laineprotsesside modelleerimise kogemustest tahkistes, osutus vajalikuks modifitseerida nn Heimburgi-Jacksoni mudelit, arvestades mikrostruktuuri inertsiaalsust. Selline lainevõrrand, mis kirjeldab pikilaine evolutsiooni närvikiu seinas, omandab kuju (Engelbrecht jt, 2015):

$$u_{tt} = \left[\left(c_0^2 + pu + qu^2\right)u_x\right]_x - h_1 u_{xxxx} + h_2 u_{xxtt}, \qquad (9)$$

kus $u = \Delta\rho$, ρ on tihedus, p ja q on mittelineaarsust iseloomustavad parameetrid ning h_1 ja h_2 on dispersiooniparameetrid. Erinevalt tahkistest (vt võrrand (7)) on siin mittelineaarsus seotud pikisiirdega ehk tiheduse muutusega pikisuunas.

Ülaltoodud matemaatilised mudelid on osutunud olulisteks täiendusteks lainelevi teoorias ja nende

analüüs on tuvastanud hulga seaduspärasusi, mis pakuvad huvi nii teoreetilisest kui ka praktilisest küljest (vt „Lõpetuseks“).

Nii nagu klassikaline lainevõrrand (1), on ka ülaltoodud järgnevad mudelid nn kahe-laine võrrandid. Asümptootiline analüüs võimaldab paljudel juhtudel konstrueerida evolutsioonivõrrandeid, mis on nn ühe-laine-võrrandid, nii nagu kuulus Kortewegi – de Vriesi (KdV) võrrand. Iseloomulikult on need võrrandid kirjutatud liikuvas koordinaadistikus, kus tavaliselt kasutusel $\xi = c_0 t - x$, $\tau = \varepsilon x$, kus c_0 on antud laine kiirus lineaarses seades ja ε on väike parameeter. Füüsikalises mõttes tähendab selline teisendus, et vaatleja liigub koos lainega ja muutused laine parameetrites toimuvad aeglaselt.

Järgnevalt esitan siin rea huvitavaid mudeleid, mis on seotud konkreetsete näidetega. Martensiitausteniit sulamis on laineprotsess iseloomustatud järgmiste võrrandite abil (Salupere jt, 2001):

$$v_\tau + \left[P(v)\right]_\xi + dv_{\xi\xi\xi} + bv_{5\xi} = 0\,, \tag{10}$$

$$P(v) = -\frac{v^2}{2} + \frac{v^4}{4}\,, \tag{11}$$

kus v on seotud deformatsiooniga ning d ja b on dispersiooni parameetrid.

Mittelineaarse mikrostruktuuriga materjali jaoks on võrrandist (7) tuletatav evolutsioonivõrrand järgmise kujuga (Randrüüt, Braun, 2010):

$$v_\tau + a_1 v v_\xi + d_1 v_{\xi\xi\xi} + a_2\left(v_\xi^2\right)_{\xi\xi} = 0\,, \tag{12}$$

kus a_1 ja a_2 on mittelineaarsuse parameetrid ning d_1 on dispersiooni parameeter.

Lainelevi võib olla häiritud välise jõu poolt, mis pakub erilist huvi häiritusega KdV kui soliton-tüüpi lahendite mudel. Selline mudel (Engelbrecht, Salupere, 2005)

$$v_\tau + vv_\xi + d_1 v_{\xi\xi\xi} = f(v) \tag{13}$$

osutub harmoonilise häirituse $f = \alpha \sin \beta v$ puhul üllatavalt rikkaks, selgitamaks varjatud solitonide olemasolu. Kui aga häiritus on modelleeritud kuuppolünoomi abil, on võrrand (13) kasutatav seismiliste lainete sumbuvuse ja võimendamise modelleerimiseks (Engelbrecht, 2015b).

Kui on tegemist kahemõõtmelise (2D) probleemiga, nagu mittepurustava katsetamise tehnika tihti nõuab, on vastav 2D evolutsioonivõrrand mikrostruktuuriga materjalide jaoks nn Kadomtsevi-Petviashvili tüüpi (Sertakov jt, 2014):

$$[v_\tau + k_1 v v_\xi + d v_{\xi\xi\xi} + \varepsilon k_2 (v^2)_{\xi\xi\xi}]_\xi = k_3 v_{\eta\eta}, \tag{14}$$

kus koordinaatide x_1, x_2 ja t asemel on kasutatud $\xi = c_0 t - x_1$, $\tau = \varepsilon x_1$, $\eta = \sqrt{\varepsilon} x_2$, ε on väike parameeter ning k_1, k_2, k_3 ning d on materjali iseloomustavad konstandid.

Kõik need lainevõrrandid annavad tunnistust, et materjali sisestruktuuriga arvestamine muudab võrrandite struktuuri. Millised füüsikalised efektid ilmnevad, on juttu selle essee viimases osas.

LAINETE SEOSTATUS JA INTERAKTSIOON

Klassikaline laineteooria, mis põhineb lineaarsel seadel ja homogeensuse arvestamisel, viib lihtsustusteni: piki- ja ristlained on eraldatavad, kehtivad võrdelisuse ja summeerimise printsiibid, termoelastsusel on deformatsioonidele vaid summutav mõju jne. Sellest piisab traditsiooniliste inseneriülesannete lahendamiseks, kuid paljud tänapäeva tehnoloogia ja interdistsiplinaarsed probleemid nõuavad täpsemat analüüsi. Seetõttu on oluline just teoreetiliste põhimõtete laiendamine ja täpsemate matemaatiliste mudelite koostamine, nii nagu eelmises osas kirjeldatud.

Kui materjalis või konstruktsioonielemendis on eelpinge, tuleb arvestada lainevõrrandi koostamisel eelpinge või eeldeformatsiooni väljaga. Olgu eelpinge näol tegemist 2D väljaga (u_1^0 ja u_2^0) ja levigu

selles 1D laine. Siis on momendi jäävusseadusest tuletatav (Ravasoo, 2007):

$$\left[1+k_1u^0_{1,1}+k_2u^0_{2,2}\right]u_{1,11}+$$
$$+\left[k_1u^0_{1,1}+k_3u^0_{1,22}+k_4u^0_{2,12}\right]u_{1,1}+$$
$$+k_1u_{1,1}u_{1,11}-c^2u_{1,tt}=0, \quad (15)$$

kus $u_{i,j}=\partial u_i/\partial x_j$ jne ning k_1, k_2, k_3 ja k_4 on konstandid ja c on heli kiirus. Ülaindeks „0“ tähistab eelpinge olukorda.

Vaatleme veel paari näidet, kus lainete seostatus on ilmne.

Mikrostruktuuriga materjalides on reeglina mikrostruktuuri elastsed ja soojuslikud omadused erinevad makrostruktuuri vastavatest omadustest. Kui võrrandid (1) ja (2) arvestavad vaid mikrostruktuuri elastsuse ja inertsiga, võime püstitada küsimuse, mida teha siis, kui mikrodeformatsiooni kõrval tuleks arvestada ka mikrotemperatuuri (fluktuatsioone, mis on põhjustatud mikrostruktuuri soojuslike omaduste erinevusest). Sel juhul on põhivõrrandite süsteem järgmine (Berezovski jt, 2014):

$$\rho_0u_{tt}=(\lambda+2\mu)u_{xx}+m\theta_x+A\varphi+M\psi_{xx}, \quad (16)$$

$$\rho_0c_p\theta_t=(k\theta_x)_x+m\theta_0u_{xt}+R\psi_t^2, \quad (17)$$

$$I\varphi_{tt}=C\varphi_{xx}-Au_x-B\varphi, \quad (18)$$

$$L\psi_{tt}+R\varphi_t=N\psi_{xx}+Mu_{xx}. \quad (19)$$

Siin on sõltuvad muutujad järgmised: makropaigutus u, makrotemperatuur θ, mikrodeformatsioon φ ja mikrotemperatuur ψ. Lisaks on c_p soojusmahtuvus, θ_0 algtemperatuur ning ülejäänud koefitsiendid on konstandid (vrdl süsteemiga (2) ja (3)).

Võrrand (16) väljendab momendi jäävust makrostruktuuris, võrrand (17) – energia jäävust makrostruktuuris. Võrrandid (18) ja (19) kirjeldavad vastavalt mikrodeformatsiooni ja mikrotemperatuuri käitumist ja on tuletatud sisemuutujate kontseptsiooni kasutades. Esitatud süsteem seostab kõigi muutujate käitumise ansambliks.

Teine näide seob elektrilist signaali mehaanikaliste lainetega. Närviimpulsi klassikaline teooria seostab leviva signaali (aktsioonipotentsiaali AP) levi vaid närvikiu ehk aksoni seina (biomembraani) läbivate ioonvooludega, mis garanteerivad konstantse ebasümmeetrilise signaali levi. Viimasel ajal on pööratud rohkem tähelepanu võimalikele kaasnevatele efektidele, mis väljenduvad mehaanikalise pikilaine (LW) levis aksoni seinas ja rõhulaine (PW) levis aksoni sees olevas aksoplasmas. On rõhutatud vajadust kirjeldada protsessi koherentse tervikuna (Andersen jt, 2009). Lähtudes võimalikest üksikmudelitest aktsioonipotentsiaali, rõhulaine ja biomembraanis leviva laine kirjeldamiseks, on võimalik koostada kõiki laineid hõlmav süsteem (Engelbrecht jt, 2015, 2018), mis omab järgmist kuju:

aktsioonipotentsiaali kirjeldamiseks FitzHugh'-Nagumo mudel:

$$z_t=z(z-a)(1-z)-j+D_1z_{\boldsymbol{x}}, \quad (20)$$

$$j_t=\varepsilon(-j+bz); \quad (21)$$

rõhulaine kirjeldamiseks:

$$\overline{p}_{tt}=c_f^2\overline{p}_{xx}+F_1(z); \quad (22)$$

pikilaine kirjeldamiseks biomembraanis (vt võrrand (9)):

$$u_{tt}=\left[\left(c_0^2+pu+qu^2\right)u_x\right]_x-h_1u_{xxxx}+$$
$$+h_2u_{xxtt}+F_2(z,\overline{p}). \quad (23)$$

Süsteemi käivitab algimpulss $z=f(x)$ ajal $t=0$. Võimalik ristsuunaline närvikiu paigutis w on arvutatav:

$$w=-kru_x. \quad (24)$$

Ülaltoodud võrrandites on z aktsioonipotentsiaali amplituud, j on ioonvool, $\overline{p}$ on rõhulaine amplituud ja $u=\Delta\rho$ on biomembraani pikitiheduse

muutus (vt ka võrrand (9)), r on aksoni raadius ning ülejäänud tähised väljendavad konstante. Siduvateks elementideks on jõud

$$F_1 = \gamma_1 j_x \ , \qquad F_2 = \gamma_2 \overline{p}_t + \gamma_3 j_x \ , \tag{25}$$

mis on seotud ioonvoolu j ja rõhu $\overline{p}$ gradientidega ning ajatuletistega; γ_1, γ_2 ja γ_3 on konstandid. Selline mudel on teadaolevalt esimene katse kirjeldada närvikius esinevaid protsesse ühtse ansamblina.

FÜÜSIKALISED EFEKTID (EHK MIS SELLEST KÕIGEST TOLKU ON?)

Jättes kõrvale analüütika, numbrilised simulatsioonid ja saadud lahenduste eksplitsiitse kirjelduse, märgime allpool olulisemaid tulemusi. Alustuseks paar põhiprintsiipi, millele tuginevad kirjeldatud mudelid. Lähtuda saab lainevõrrandist, mis on lainedünaamika selgrooks (Stewart, 2013).

Esiteks on mitmete matemaatiliste mudelite tuletamiseks kasutatud sisemuutujate kontseptsiooni (Berezovski jt, 2014; Berezovski, Ván, 2017), mis võimaldab tegelikku sisestruktuuri esitada täiendava väljana. Erinevalt vaadeldavatest (ja otseselt mõõdetavatest) makromuutujatest (pinge, deformatsioon jne) on sisemuutujad kirjeldatud termodünaamiliste tingimuste abil, mis kindlustavad ühtlasi mudeli termodünaamilise korrektsuse. Samas on võimalik duaalsete sisemuutujate abil arvestada sisemuutujate arenemisega aja jooksul, mis on oluline just laineprotsessi iseloomustamiseks. Puht praktilisest küljest vaadatuna õnnestub nii arvesse võtta mikrostruktuuri inertsi. Sellise teooria väljatöötamine on oluline tulemus, mis on kokku võetud hiljutises monograafias (Berezovski, Ván, 2017).

Teiseks on komplekssüsteemidele iseloomulikult oluline mittelineaarsuse arvestamine, mis lubab selgitada mitmeid füüsikalisi nähtusi nii ühe mudeli raames kui ka mitme laine seostatuse analüüsis (vt allpool). Seejuures tuleb eristada tahkistele iseloomulikku deformatsioonist sõltuvat mittelineaarsust paigutisest sõltuvast mittelineaarsusest bioloogilistes kudedes.

Kolmandaks tuleb rõhutada mastaabi tähtsust materjali sisestruktuuri iseloomustamisel. Siin tuleb mängu ka häirituse mastaap, s.o lainepikkus. Teisisõnu, mastaabitegurid peavad näitama, kas leviv laine „tunnetab“ materjali struktuuri või mitte.

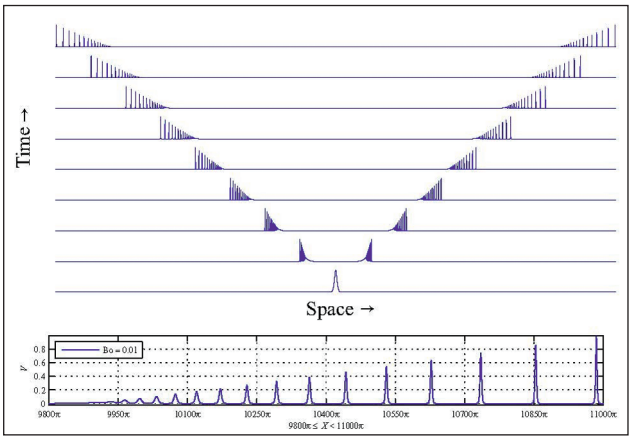
Nüüd siis konkreetsete tulemuste juurde, mis põhinevad modifitseeritud lainevõrranditel, millest mõned on ülalpool esitatud. Kuna tihti on tegemist mitteintegreeruvate võrranditega, on kasutatud numbrilist simulatsiooni (lõplike mahtude meetod, pseudospektraalmeetod).

Lainelevi analüüs mikrostruktuuriga materjalides, kasutades ülalkirjeldatud teooriat koos vastavate mudelitega, on loonud hea teoreetilise aluse arusaamiseks nendest dünaamilistest protsessidest. Mikrostruktuur põhjustab lainete dispersiooni (hajumist), mida harilikult on seostatud optiliste nähtustega. Samas on dispersioon võimalik ka tahkistes ehk teisisõnu – erineva lainepikkusega häiritused levivad erinevate kiirustega ja see sõltub mikrostruktuuri omadustest. On vaja vahet teha normaalse (faasikiirus suurem kui grupikiirus) ja anomaalse dispersiooni (faasikiirus väiksem kui grupikiirus) vahel, mida saab tuvastada materjali parameetrite abil. See tekitab erinevusi ka lainete profiilides. Vahemärkusena: grupikiirus on seostatud energiaga. Võrrandite kuju viitab aga lainete hierarhiale, sest sõltuvalt leviva laine parameetritest prevaleerib mõnel juhul makrosüsteem, mõnel aga mikrosüsteem. Seda on hõlbus tuvastada mõõduta parameetrite abil – teades materjalide parameetreid, võib ennustada teatud efekte ilma võrrandeid lahendamata (vrdl Reynoldsi arv vedelike dünaamikas). Kokkuvõttev ülevaade uuringutest selles valdkonnas (Berezovski jt, 2013) peegeldab mitme doktoritöö (M. Berezovski, K. Tamm, T. Peets) tulemusi.

Juhul kui mikrostruktuur on mitmemastaapne, on lainete dispersioon samuti keerulisem. Seostatuna kahe mikrostruktuuri võimaliku resonantsiga, võib ilmneda negatiivne grupikiirus – füüsikaline nähtus, mida tavaliselt seostatakse optikaga (Peets jt, 2013). Ilmselt on selline „kiiruse aeglustumine“ oluline metamaterjalide disainis. Kui arvestada koos mikrodeformatsiooniga ka mikrotemperatuuri (võrrandid (15)−(18)), ilmneb oluline füüsikaline efekt – temperatuuri muutused toimuvad lõpliku kiirusega koos makrostruktuuris leviva lainega (Berezovski, Engelbrecht, 2013). See laiendab tunduvalt arusaamu termoelastsusest ja astub sammu lähemale temperatuuri levi lõpmatu kiiruse paradoksi seletamisele. Lisaks ebareeglipärasele sisestruktuuri jaotusele on tihti kasutusel ka reeglipärased sisestruktuurid. Nii nagu optikas, on ka laineleviprotsesside analüüsil olulisel kohal lainete difraktsioon läbi teatud võre. Erinevalt optikast on aga vaja sel juhul arvestada nii makrostruktuuri kui ka võreelementide elastsusega. Kuna see tähendab ka piki- ja põikilainete interaktsiooni, võib laineväljas esineda energia kontsentratsioone (Berezovski jt, 2015). See on oluline just konstruktsiooni tugevuse seisukohalt.

Äärmiselt huvitav nii teoreetiliselt kui ka praktiliselt on lainelevi mittelineaarses mikrostruktuuriga keskkonnas. Mittelineaarsed ja dispersiivsed efektid võivad tasakaalustada ja selle tulemiks on statsionaarse kujuga üksiklaine – soliton. Solitoni avastamise ja uurimise ajalugu on üks põnevamaid tänapäeva matemaatilises füüsikas (vt Engelbrecht, Kändler, 2015). Erinevalt klassikalistest solitonivõrranditest, nagu KdV võrrand, on mikrostruktuuriga materjalide analüüsil osutunud oluliseks just modifitseeritud lainevõrrand (7). See aga tähendab, et meelevaldse kujuga algimpulss laguneb vasakule ja paremale liikuvateks laineteks ja võivad areneda vastassuunas levivad solitonide jadad (vt joonis 2).

On tuvastatud mitmed olulised füüsikalised efektid. Esiteks eksisteerivad solitonid võrrandi (7) lahendina teatud tingimustel, mis sõltuvad materjali parameetritest (Janno, Engelbrecht, 2011). Teiseks põhjustab mittelineaarsus mikrostruktuuris solitonide ebasümmeetrilisuse (Randrüüt, Braun, 2010). Edasi, teatud välisjõuga häiritud solitonid (vt võrrand (13)) võivad viia solitonide struktuuride (statsionaarse kujuga solitonide ansamblite) tekkimiseni. Veelgi enam, võivad areneda nn varjatud solitonid, mis häirituse puudumisel pole üldse



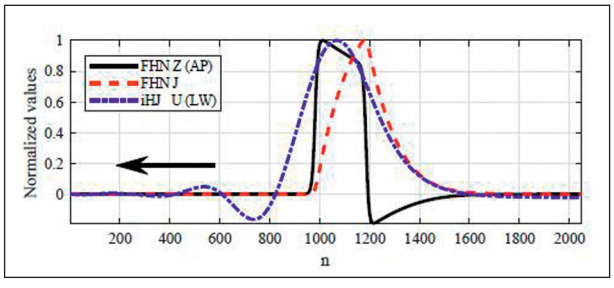
Joonis 2. Solitonide jadade tekkimine mikrostruktuuriga materjalides (Berezovski jt, 2013).

eristatavad (Engelbrecht, Salupere, 2005). Matemaatilise rangusega võttes peavad solitonid omavahel interakteerudes säilitama oma kuju ja kiiruse. Kahe-laine-võrrand (7) lubab selliseid interaktsiooniprotsesse hästi analüüsida. Nii nagu paljudes füüsikalistes süsteemides, pole ka sel juhtumil matemaatilised tingimused rangelt täidetud ja solitonide interaktsiooniga kaasneb radiatsioon (Maugin, 2011). See võib mitmekordsete interaktsioonide tulemusena viia solitonide lagunemiseni.

Solitonide interaktsiooniprotsess 2D seades (vt võrrand (14)) on ilmekas näide mittelineaarsuse filosoofilisest tähendusest. Nimelt on veepinnal levivate kahemõõtmeliste solitonide interaktsioonil võimalik 1 + 1 = 4! See tähendab, et interaktsiooni ajal pole lainete summaarne amplituud mitte kahekordne, nagu intuitsioon ütleb, vaid hoopis neljakordne (Soomere, Engelbrecht, 2005).

Nagu öeldud „Sissejuhatuses“, kannavad lained informatsiooni ja see võimaldab neid kasutada pöördülesannete lahendamiseks. Matemaatiliselt tähendab see antud algtingimuse ja teatud kohas mõõdetud laine parameetrite põhjal materjali parameetrite määramist. Praktilisest küljest vaadatuna tähendab see mittepurustavat katsetamist, näiteks ultraheli abil. Võrrandi (15) põhjal on konstrueeritud algoritmid algpingeolukorra määramiseks (Ravasoo, 2007). Mikrostruktuuriga materjalide parameetrite määramiseks on kirjeldatud terve hulk algoritme, arvestades matemaatiliste tingimustega pöördülesannete korrektsel lahendamisel (Janno, Engelbrecht, 2011). Täiesti uudne idee on kasutada ebasümmeetriliste solitonide teket mittepurustavas katsetamises, et määrata mikrostruktuuri mittelineaarsust.

Juba eespool oli juttu võimalikest laineansamblitest nii termoelastsuses kui ka solitonide struktuurides. Väga oluline on aga lainete ansambli genereerimine närvisignaali modelleerimisel. See probleem on köitnud paljude uurijate tähelepanu (vt Andersen jt, 2009), kuid siiani pole õnnestunud lahendada koos üksikute komponentide levi kirjeldavaid võrrandeid ühtsesse süsteemi. Niisugune läbimurre on nüüd tehtud ja võrrandisüsteem (20)–(23) on esimeses lähenduses formuleeritud ja lahendatud (Engelbrecht jt, 2018). Joonisel 3 on esitatud vastavate lainete ansambel.



Joonis 3. Lainete ansambel närvikius (Engelbrecht jt, 2018): elektriline signaal (pidev joon), ioonvool (kriipsjoon), pikilaine biomembraanis (kriipspunktjoon).

See ansambel seob elektrilise signaali (AP) kui põhilise infokandja aksoplasmas genereeritud rõhulaine (PW) ja närvikiu seinas kui biomembraanis genereeritud pikilaine (LW) ja selle profiilist tuletatud ristsuunalise lainega (TW). Põhjalikult on uuritud pikilaine (LW) kirjeldamiseks täiendatud matemaatilist mudelit (23), mis haarab solitone ja

arvestab uudse täiendusena biomembraani moodustava lipiidide struktuuri inertsiga (Engelbrecht jt, 2017). Oluline on eeldus, et interaktsioonijõud pole seotud mitte ansamblisse kuuluvate signaalide amplituudidega, vaid nende muutustega. Esitatud mittelineaarne mudel ootab eksperimentaalset verifitseerimist, kuid on selge, et üksikud laineprofiilid ansamblis vastavad kvalitatiivselt mõõdetud signaalidele.

LÕPETUSEKS

Meid ümbritsev maailm on mittelineaarne ja uute teadmiste genereerimine ei sõltu mitte ainult füüsika, bioloogia ja keemia edusammudest, vaid olulisel määral ka matemaatika arengust, millele juhtis tähelepanu juba W. Heisenberg. Teinekord on matemaatikat iseloomustatud kui intellektuaalset masinat ning meie teadmised sõltuvad suurel määral ka sellest, kuidas me seda masinat oskame kasutada, eriti komplekssüsteemide analüüsil, kus suurt rolli mängib mittelineaarsus. Ülalkirjeldatud matemaatilised mudelid lainelevi kirjeldamiseks on selleks oma panuse andnud. Need mudelid põhinevad pideva keskkonna (*continuum*) teoorial, kus on paika pandud termodünaamilised tingimused. Lisaks väljenduvad mudelites selgelt komplekssüsteemidele iseloomulikud omadused: mitu komponenti lainete ansamblis, mittelineaarsus, hierarhia, uute struktuuride teke (solitonid), termodünaamika olulisus (sisemuutujad). Samas on silmas peetud nn Occami printsiipi – lihtsaimate lahendite eelistamine, et selgitada füüsikaliste nähtuste olulisi põhijooni. Detailsem analüüs on esitatud mitmes monograafias (Engelbrecht, 1997; Janno, Engelbrecht, 2011; Engelbrecht, 2015b; Berezovski, Ván, 2017) ja ülevaates (Berezovski jt, 2013; Berezovski, Engelbrecht, 2015).

Tänuavaldus. Autor tänab kõiki kaasautoreid nii Eestis kui ka välismaal, samuti uuringute rahastajaid, eriti Eesti teaduse tippkeskuse CENS (1999–2015) toetajaid.

VIITED

Andersen, S. S., Jackson, A. D., Heimburg, T. 2009. Towards a thermodynamic theory of nerve pulse propagation. – Progress in Neurobiology, 88, 104–113.

Berezovski, A., Engelbrecht, J. 2013. Thermoelastic waves in microstructured solids: dual internal variables approach. – Journal of Coupled Systems and Multiscale Dynamics, 1 (1), 112–119.

Berezovski, A., Engelbrecht, J. 2015. Reflections on mathematical models of deformation waves in elastic microstructured solids. – Mathematics and Mechanics of Complex Systems, 3 (1), 43–82.

Berezovski, A., Engelbrecht, J., Salupere, A., Tamm, K., Peets, T., Berezovski, M. 2013. Dispersive waves in microstructured solids. – International Journal of Solids and Structures, 50 (11), 1981–1990.

Berezovski, A., Engelbrecht, J., Ván, P. 2014. Weakly nonlocal thermoelasticity for microstructured solids: microdeformation and microtemperature. – Archive of Applied Mechanics, 84 (9–11), 1249–1261.

Berezovski, A., Engelbrecht, J., Berezovski, M. 2015. Pattern formation of elastic waves and energy localization due to elastic gratings. – International Journal of Mechanical Sciences, 101–102, 137–144.

Berezovski, A., Ván, P. 2017. Internal Variables in Thermoelasticity. Springer, Cham et al.

Engelbrecht, J. 1997. Nonlinear Wave Dynamics. Complexity and Simplicity. Kluwer, Dordrecht.

Engelbrecht, J. 2010. Komplekssüsteemid. – Akadeemia, 22 (8), 1347–1362.

Engelbrecht, J. 2015a. Complexity in natural sciences and engineering. – Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 64 (3), 249–255.

Engelbrecht, J. 2015b. Questions About Elastic Waves. Springer, Cham et al.

Engelbrecht, J., Salupere, A. 2005. On the problem of periodicity and hidden solitons for the KdV model. – Chaos, 15, 015114.

Engelbrecht, J. (koost), Kändler, T. (toim). 2015. Keeruka maailma võlu. CENS, Tallinn.

Engelbrecht, J., Tamm, K., Peets, T. 2015. On mathematical modelling of solitary pulses in cylindrical biomembranes. – Biomechanics and Modeling in Mechanobiology, 14, 159–167.

Engelbrecht, J., Tamm, K., Peets, T. 2017. On solutions of a Boussinesq-type equation with displacement-dependent nonlinearities: the case of biomembranes. – Philosophical Magazine, 97 (12), 967–987.

Engelbrecht, J., Peets, T., Tamm, K., Laasmaa, M., Vendelin, M. 2018. On complexity of signal propagation in nerve fibres. – Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 67 (1), 28–38.

Érdi, P. 2008. Complexity Explained. Springer, Berlin and Heidelberg.

Janno, J., Engelbrecht, J. 2011. Microstructured Materials: Inverse Problems. Springer, Berlin, Heidelberg.

Kartofelev, D., Stulov, A. 2014. Propagation of deformation waves in wool felt. – Acta Mechanica, 225 (2), 1–11.

Lepik, Ü., Engelbrecht, J. 1999. Kaoseraamat. Eesti TA kirjastus, Tallinn.

Maugin, G. A. 1999. The Thermomechanics of Nonlinear Irreversible Behaviours. World Scientific, Singapore.

Maugin, G. 2011. Solitons in elastic solids (1938–2010). – Mechanics Research Communications, 38 (5), 341–349.

Nicolis, G., Nicolis, C. 2007. Foundations of Complex Systems. World Scientific, Singapore.

Peets, T., Kartofelev, D., Tamm, K., Engelbrecht, J. 2013. Waves in microstructured solids and negative group velocity – Europhysics Letters., 103 (1), 16001.

Randrüüt, M., Braun, M. 2010. On one-dimensional waves in microstructured solids. – Wave Motion, 47, 217–230.

Ravasoo, A. 2007. Non-linear interaction of waves in prestressed material. – International Journal of Non-Linear Mechanics, 42, 1162–1169.

Research Report 317/16. 2016. Complexity in Engineering and Natural Sciences. Centre for Nonlinear Studies. Institute of Cybernetics at Tallinn UT.

Salupere, A., Engelbrecht, J., Maugin, G. A. 2001. Solitonic structures in KdV-based higher order systems. – Wave Motion, 34, 51–61.

Sertakov, I., Engelbrecht, J., Janno, J. 2014. Modelling 2D wave motion in microstructured solids. – Mechanics Research Communications, 56, 41–49.

Soomere, T., Engelbrecht, J. 2005. Extreme elevations and slopes of interacting solitons in shallow water. – Wave Motion, 41 (2), 179–192.

Stewart, I. 2013. 17 Equations that Changed the World. Profile Books, London.

BIOMEDITSIINITEHNIKA – TEHNOLOOGIA TERVISE HEAKS

Hiie Hinrikus, Maie Bachmann, Kristjan Pilt, Kalju Meigas ja Ivo Fridolin
Tallinna tehnikaülikooli tervisetehnoloogiate instituudi biomeditsiinitehnika keskus

Autorid (vasakult) Maie Bachmann, Ivo Fridolin, Hiie Hinrikus, Kalju Meigas ja Kristjan Pilt.

SISSEJUHATUS

Elusloodus toimemehhanismide saladused on teadust aastasadu ahvatlenud, aga jäänud kaasajalgi lõpuni avastamata. Nii mitmedki inimeses toimuvad protsessid on siiani mõistatuseks, ei ole võimalik täpselt ja usaldusväärselt kirjeldada mitmeid füsioloogilisi protsesse ega alati selgitada tervisehäirete ja haiguste tekkemehhanisme. Sellepärast on oluline kompleksne lähenemine: pakkuda meetodeid tervise hindamiseks, kaasates teadmisi erinevatelt teadusaladelt, eelkõige loodus- ja tehnikateadustelt. Infotehnoloogial kui praegu kõige kiiremini areneval teadus- ja tehnikaharul on kahtlemata oluline osa inimese tervisega seotud tehnoloogiates.

Biomeditsiinitehnika on kogu maailmas kiiresti arenev interdistsiplinaarne ala, mille eesmärk on tehnika ja tehnoloogia kasutamine tervise ja elukvaliteedi parandamiseks. Tallinna tehnikaülikoolis asutati biomeditsiinitehnika keskus 1994. aastal. Biomeditsiinitehnika keskus on osalenud kahe Eesti teaduse tippkeskuse, mittelineaarsete protsesside analüüsi keskuse (CENS) ja integreeritud elektroonikasüsteemide ja biomeditsiinitehnika tippkeskuse (CEBE) töös ning osaleb Eesti IT tippkeskuse (EXCITE) tegemistes.

Keskuse tegevussuundadeks on kujunenud aju biosignaalide interpreteerimine, optiline vaskulaarne diagnostika ja biovedelike optika. Kliinilises diagnostikas on traditsiooniliselt põhirõhk pildidiagnostikal (röntgen, magnetresonatstomograafia jt), mis võimaldavad väga hea ruumilise eraldusvõimega tuvastada juba toimunud morfoloogilisi muutusi. Oluline roll on ka keemilistel analüüsidel. Keskuse teadustegevus on suunatud inimorganismis toimuvate füsioloogiliste protsesside dünaamika hindamisele; vaadeldes mitte staatilist olekut, vaid ajalisi protsesse, mis iseloomustavad füsioloogiliste süsteemide tööd. Meie eesmärk on leida meetodid, mis võimaldaksid tuvastada muutusi süsteemide töös varakult, enne haiguslike sümptomite ilmnemist ja morfoloogiliste muutuste teket. Pildidiagnostika asemel kasutame biosignaalide töötlust. Keemilised analüüsid on asendunud pideva optilise monitooringuga. Just sellepärast on infotehnoloogial, eriti signaalitöötlusel, meie tegemistes väga oluline roll. Häirete varane avastamine ajutegevuses või kardiovaskulaarsetes protsessides

on nende ennetamise ja tõhusa ravi eeldus. Neeruasendusravi protseduuride kontrollimine reaalajas, kasutades optilist monitooringut, tagab ravi efektiivsuse ja tulemuslikkuse. Keskuse peamine partner on Põhja-Eesti regionaalhaigla.

AJU BIOSIGNAALIDE INTERPRETEERIMINE

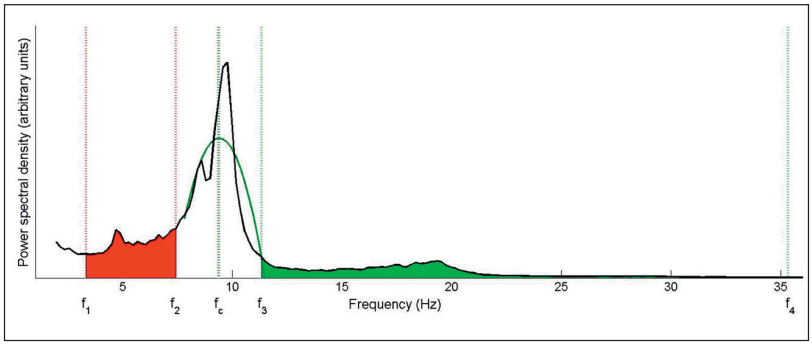
Inimese närvitegevus on tihedalt seotud elektromagnetiliste protsessidega ja on põhimõtteliselt elektriliselt juhitav. Aju koosneb umbes sajast miljardist närvirakust ehk neuronist, mis kõik on omavahel seotud mitu korda suurema arvu närvikiudude kaudu, mis edastavad elektrilisi signaale ja on üksteisest eraldatud keemiliste või elektriliste lülitite – sünapsite – abil. Aju, mille närvirakkude taktsagedus ei ületa paari tuhandet hertsi, saab hakkama tohutu hulga informatsiooni töötlusega reaalajas. Vaatamata tõsistele pingutustele ei ole teadlased siiani suutnud ajutegevuse saladustes täielikult orienteeruda ega ka luua samaväärset arvutit.

Ajutegevuse uurimine on keeruline ülesanne – ei saa ju ajju sisse tungida ilma selle tööd häirimata. Sellepärast mõõdetakse aju bioelektrilisi signaale peanahalt. See meenutab arvuti korpuselt tehtud mõõtmisi, mille põhjal on vaja aru saada, kuidas arvuti töötab. Elektroentsefalograafia (EEG) kirjeldab ajus toimuvaid bioelektrilisi protsesse niivõrd kuivõrd see on kaudse mõõtmise puhul võimalik. EEG puuduseks on madal ruumiline eraldusvõime, kuna signaal pindmistel elektroodidel kajastab paljude neuronite tekitatavaid välju. EEG eeliseks on aga hea ajaline eristus, suhteliselt madalsageduslik EEG signaal ei ole läbi naha ja kolju toimivast sidestusest moonutatud.

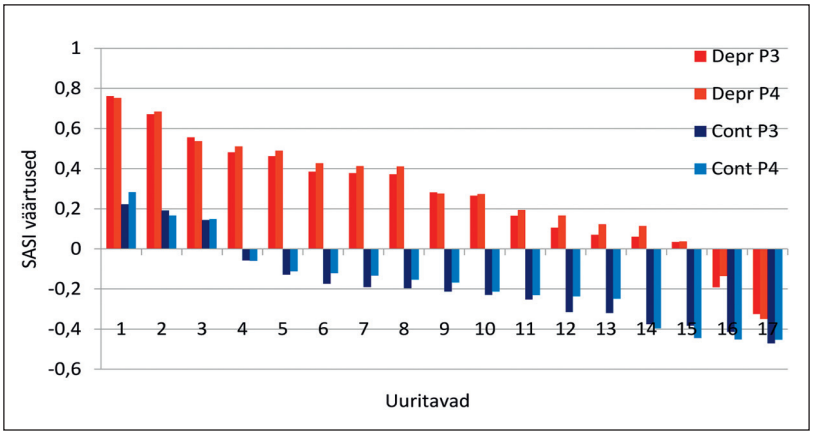
Ajus plingivad perioodiliselt miljardid neuronid ja toimub üheaegselt miljoneid protsesse, mille hulgast on huvipakkuvat väga raske eristada. Ajutegevuse tundmaõppimine ja sellest arusaamine on ülimalt keerukas eesmärk, mis saab olla edukas vaid paljudest erinevatest vaatenurkadest lähenemiste sünergia kaudu. Meie eeldame, et paljud sisemised (mentaalsed häired, stress jmt) ja välimised (kiirgus, vibratsioon jmt) stressorid mõjutavad kogu ajutegevust, mitte ainult kindlaid punkte ajus. See eeldus võimaldas läheneda ajule kui süsteemile võnkumiste teooria vaatenurgast. Aju võib vaadelda kui väga paljudest omavahel sidestatud ostsillaatoritest koosnevat süsteemi, millel on normaalses häirimata olekus (silmad kinni puhkeoleku EEG) kindlad omadused: väljakujunenud domineeriv maksimum keskmistel sagedustel (alfa-rütm) ja iseloomulik sagedusspekter tasakaalustatud võimsustega madalamate ja kõrgemate sageduste vahel. Kui ostsillaatorite süsteemi koormata, kaob domineeriv maksimum. Nii juhtub, kui uuritav avab silmad, lisades ajule töötlemiseks suurel hulgal informatsiooni. See nähtus on teada ka EEG kliinilistes uuringutes.

Uus ja huvitav oli meie leid, et EEG võimsuste tasakaal sagedusribades, mis on valitud ülal- ja allpool maksimumsagedust, muutub, kui on tegemist depressiooni diagnoosiga patsientidega (Hinrikus jt, 2008). EEG võimsuste tasakaalu iseloomustamiseks tõime sisse spektraalse asümmeetria indeksi SASI, mis iseloomustab EEG võimsuste tasakaalu ülal- ja allpool keskmisi sagedusi ja mida arvutatakse kui nende võimsuste suhtelist erinevust (joonis 1). SASI on kaitstud rahvusvahelise patendiga. Depressioonihaigete grupil oli SASI positiivne, enamikul tervetel uuritavatel negatiivne (joonis 2). SASI eristusvõime osutus võrreldavaks palju keerukamate ja suurema arvutusmahuga mittelineaarsete meetodite, näiteks Higuchi fraktaaldimensiooni abil saaduga (Bachmann jt, 2013, 2018).

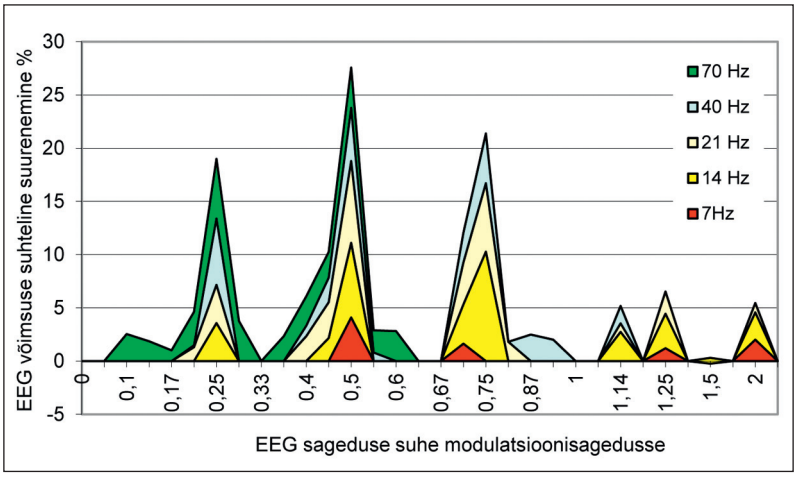
Edasised uuringud näitasid, et SASI eristab positiivseid ja negatiivseid emotsioone (Orgo jt, 2015), aga ka füüsikaliste, nagu mikrolainekiirgus (Bachmann jt, 2014), ja keemiliste, nagu kohv (Saifudinova jt, 2015), stressorite mõju. SASI võimaldab eristada haridustaset, mis on kaudselt seotud vaimse töö koormusega (Põld jt, 2017). Kui



Joonis 1. Spektraalse asümmeetria indeksit SASI arvutatakse lähtudes EEG signaali võimsuse spektraaltihedusest $X(f)$, võrreldes EEG signaali võimsust sagedusvahemikus f_1 kuni f_2 spektri maksimumist madalamal, võimsusega sagedusvahemikus f_3 kuni f_4, spektri maksimumist kõrgemal, kusjuures spektri maksimum sagedustel f_2 kuni f_3 jäetakse arvutustest välja: $SASI = \left[\int_{f_3}^{f_4} X(f)\,df - \int_{f_1}^{f_2} X(f)\,df\right] \Big/ \left[\int_{f_3}^{f_4} X(f)\,df + \int_{f_1}^{f_2} X(f)\,df\right]$.



Joonis 2. Puhkeoleku EEG (silmad kinni) signaalist arvutatud SASI väärtused 17 depressioonihaigel (punased tulbad) ja 17 inimesel kontrollgrupis (sinised tulbad). Arvutused on tehtud signaalidele pea vasakul ja paremal pool paiknevates sümmeetrilistes EEG kanalites P3 ja P4; aju poolkerade vahelist asümmeetriat ei ole märgata. SASI on positiivne enamikul depressioonigrupi (v.a kaks) ja negatiivne enamikul kontrollgrupi (v.a kolm) uuritavatest, tagades eristusvõime 85%.



Joonis 3. Kahel erineval uuritavate grupil viie erineva modulatsioonisagedusega 450 MHz mikrolainekiirgusega tehtud EEG salvestused näitavad, et aju bioelektriliste võnkumiste amplituud kasvas sagedustel 0,25*F*, 0,5*F* ja 0,75*F*, kus *F* on modulatsioonisagedus, ühtlasi parameetrilise ergutuse sagedus, mis on kooskõlas parameetrilise ergutuse teooriaga.

kõrgema hariduse puhul tõusid kõrgemad EEG sagedused, mis loetakse olevat seotud intellektuaalsete tegevustega, siis suurem kohvi tarbimine hoopis langetas neid.

Kuna eeldasime, et ajutegevuse häirete puhul kajastuvad olulised muutused erinevate ajustruktuuride mittelineaarsuses (Päeske jt, 2018) ja sidestuses, on ootuspärane depressiooni mõju sünkroonsusele (*synchronisation likehood*), mida täheldasime aju erinevatest osadest saadud EEG signaalide vahel (Orgo jt, 2017).

Lähenemine ajule kui sidestatud ostsillaatorite süsteemile võimaldab seletada ka mobiilsidega kaasneva moduleeritud mikrolainekiirguse mõju ajutegevusele. Aastakümneid on maailma teaduskogukond vaielnud mikrolainekiirguse mõju üle inimese tervisele. Probleemiks on olnud mikrolainekiirguse toimemehhanismi seletuse puudumine, kõrged kasutatavad sagedused võrreldes füsioloogiliste protsesside sagedustega ja nõrk väljatugevus võrreldes molekulisiseste väljadega. Meie uurimisgrupp pakkus esmakordselt välja mikrolainekiirguse mõju füüsikalise mehhanismi seletuse ja tõestas eksperimentaalselt selle põhimõttelised etapid, kiirguse mõju difusioonile ja närvisüsteemi parameetrilise ergutuse võimalikkuse (Hinrikus jt, 2011, 2015, 2017, 2018). Leidsime, et moduleeritud mikrolainekiirguse mõju aju rütmidele sõltub modulatsioonisagedusest ja ilmneb EEG sagedustel, mis on võrreldavad modulatsioonisagedusega või sellest madalamad (Hinrikus jt, 2008). Ergutussagedusest madalamatel sagedustel ilmnenud mõju saab olla tingitud ainult parameetrilisest ergutusest. Edasised uuringud näitasid, et parameetriline ergutus tõesti leiab aset (Hinrikus jt, 2011) (joonis 3). Parameetrilise ergutuse mehhanism, mille puhul väga nõrk ergutus saab tekitada võnkumise parameetrilise resonantsi sagedustel, seletab ka, miks muutused EEG signaalis saavad toimuda kiirgusvõimsuste juures, mis on kehtivatest tervisekaitsenormidest sadu kordi madalamad (Suhhova jt, 2013).

Aju bioelektriliste signaalide uurimisgrupi edasine teadustöö on suunatud ajuhäirete hindamise algoritmide usaldusväärsuse tõstmisele. Eristamaks paljude üheaegselt toimivate mõjude hulgast huvipakkuv, tuleb kombineerida erinevaid EEG analüüsi meetodeid. Kiire elutempo tõstab pidevalt vaimset koormust ja suurendab vaimsete häirete all kannatavate inimeste arvu, mida omakorda mõjutab ka nutiseadmete kasutamine. Nii on depressiooni all kannatavate inimeste arv viimase kümne aastaga kasvanud 40 korda ja moodustab üle kuue protsendi elanikkonnast. Praeguseks on depressioon haigena elatud aastate üheks peamiseks põhjuseks. Meie eesmärk on välja töötada objektiivne meetod aju mentaalse seisundi hindamiseks, mis võimaldaks avastada mentaalseid häired enne subjektiivsete sümptomite teket ja oleks kasutatav nii kõrge vastutusastmega töötajate

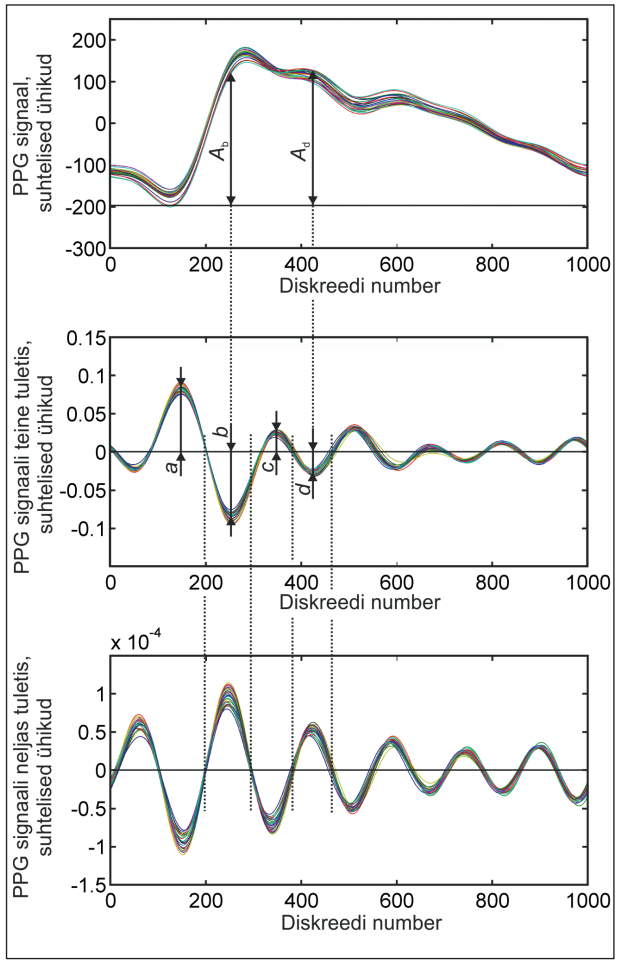
(politseinikud, päästetöötajad, militaartöötajad) kui ka elanikkonna regulaarse tervisekontrolli puhul.

OPTILINE VASKULAARNE DIAGNOSTIKA

Arterite vananemisega kaasneb üldjuhul ateroskleroos ja naastude teke veresoone seinale. Erinevate haiguste, näiteks diabeedi puhul on arterite vananemise protsess kiirenenud. Arterite lupjumise tulemusena suureneb nende jäikus, mis põhjustab südame koormuse tõusu, sest veresoonte avaldatava suurema takistuse tõttu on verd raskem läbi soonte pumbata. See põhjustab omakorda erinevaid veresoonkonnaga seotud haigusi, näiteks hüpertensiooni ja südame isheemiatõbe.

Veresoonkonna seisundit on võimalik mitteinvasiivselt hinnata, kasutades pulsilaine analüüsi. Südame kontraktsiooni lõpus avaneb järsult aordiklapp, veri paiskub vasakust vatsakesest aorti. Vere mahu kasvust tingitud järsk rõhu tõus põhjustab elastse aordi diameetri suurenemise. Seejärel rõhk langeb ja elastsuse tõttu väheneb aordi diameeter ning tasakaaluolekust välja viidud süsteem hakkab taastuma. Tekkinud pulsilaine levib mööda aorti edasi teiste väiksema läbimõõduga arterite suunas, jõudes lõpuks välja perifeersetesse veresoontesse. Pulsilaine levikiirus ja kuju sõltuvad soone elastsusest ja vererõhust ning annavad seega olulist informatsiooni veresoonkonna seisundist. Soone elastsuse vähenemisega pulsilaine kiirus kasvab ja selle kuju muutub.

Veresoonkonna parameetrite mõõtmiseks on oluline valida mitteinvasiivne meetod, mis ei mõjutaks sooni ega verevoolu. Selleks sobib fotopletüsmograafiline (*Photoplethysmography* – PPG) optiline meetod, millega saab registreerida vere hulga muutust. Valgus suunatakse naha pinnalt kudedesse ning registreeritakse tagasipeegeldunud või kudesid läbiva optilise kiirguse tugevuse muutust. Detekteeritud valgustugevuse muutus ajas pulseerib sünkroonis südame taktsagedusega ja registreeritav signaal vastab pulsilaine kujule.



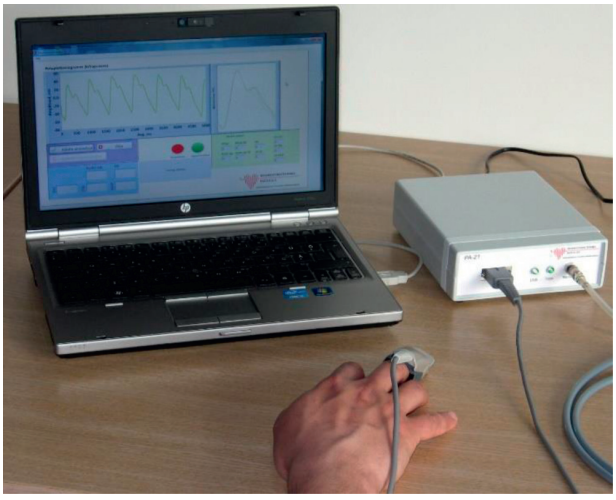
Joonis 4. Südame taktsagedusega sünkroonis salvestatud normeeritud pikkusega PPG signaalide kujud (ülemine graafik) ning nendest arvutatud teine ja neljas tuletis, mille järgi määratakse PPG signaali kuju indeksi PPGAI arvutamiseks vajalikud iseloomulikud punktid signaalis: $PPGAI=A_d/A_b$.

Registreeritud pulsilaine kujust on võimalik eristada teatud iseloomulikke komponente ning nende muutust sõltuvalt veresoonkonna seisundist. Nooremate inimestel on registreeritud PPG signaal lainelisem ja ühe südamelöögi perioodi jooksul võib eristada kahte lainemaksimumi. Inimestel, kellel on arterite elastsus vähenenud, sarnaneb laine kuju kolmnurksignaaliga.

Erinevate meetoditega on elastsusest tingitud muutusi PPG signaalis võimalik numbriliselt hinnata. Pulsilaine kuju kirjeldamiseks kasutatakse teise tuletise meetodit (Pilt jt, 2012). PPG signaali teise tuletise signaalist on võimalik eristada viit laine piiki ('a', 'b', 'c', 'd', 'e') ning määrata nende amplituudid, mis jäävad südame tsükli süstoolsesse osasse (joonis 4). Teise tuletise signaali laine piikide punktides määrati PPG signaali amplituudid, mille põhjal töötati välja uudne indeks ja algoritm veresoonkonna vanuse hindamiseks (Pilt jt, 2014). PPG signaali laine kuju indeks PPGAI põhineb teise ja neljanda piigi suhteliste amplituudide võrdlusel. Meie algoritmi eelis seisneb ka mürade mahasurumises PPG signaalis, kasutades adaptiivset filtreerimist, ja pulsilaine kuju analüüsi sidumises südame taktsagedusega. Adaptiivse kammfiltriga on võimalik vähendada liikumisest tingitud mürasid PPG signaalis, mis suurendab pulsilaine kiirusel põhinevat löögilt löögile vererõhu määramise täpsust (Pilt jt, 2010).

Väljatöötatud algoritmi võrdlus kliinilises praktikas kasutatavate meetoditega näitas uue meetodi eelist normaalsete ja suurenenud jäikusega arteritega uuritavate eristamisel (Pilt jt, 2013a). Edasised uuringud näitasid, et diabeedihaigetel ja tervetel, kellel oli normist kõrgem pulsilaine kiirus aordis, oli pulsilaine teise piigi normeeritud amplituudi väärtus keskmisest märgatavalt kõrgem ja neljanda piigi normeeritud amplituudi väärtus keskmisest märgatavalt madalam (Pilt jt, 2013b). Need tulemused kinnitavad, et PPG signaali analüüs uudse algoritmiga, kasutades pulsilaine kuju indeksit PPGAI, võimaldab saada usaldusväärset informatsiooni veresoonkonna seisundi kohta.

Uudne meetod koos optilise pulsilaine registreerimissüsteemiga (joonis 5) on perspektiivne kasutamiseks arterite elastsuse hindamisel kliinilistes sõeluuringutes. Südame-veresoonkonnahaigused on üheks peamiseks surma põhjuseks maailmas. Ateroskleroosi varajane avastamine ning selle tule-



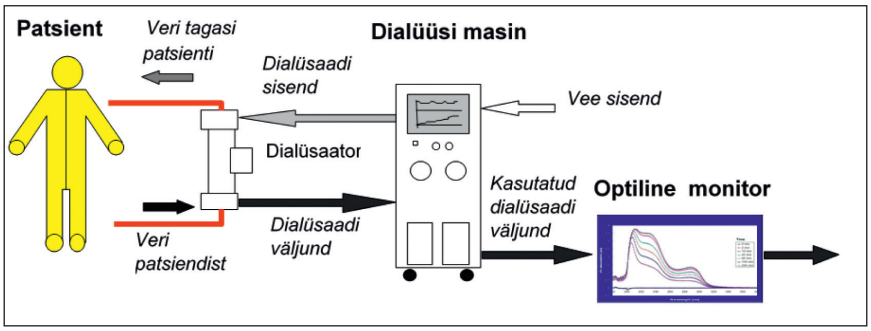
Joonis 5. Seade arterite elastsuse hindamiseks, mis põhineb PPG signaali kuju indeksi arvutamisel registreeritavast optilisest signaalist.

musena rakendatud õige ravi korral on võimalik edasine haiguse süvenemine ära hoida.

BIOVEDELIKE OPTIKA

Neerud puhastavad verd, filtreerides välja ainevahetuse jääkprodukte, sealhulgas toksiine. Kroonilise lõppstaadiumis neerupuudulikkuse korral on sageli ainus võimalus kasutada neeruasendusravi, nn kunstneeru, mis hemodialüüsi käigus filtreerib kahjulikud ained verest välja. Neeruasendusravi on patsiendile eluliselt hädavajalik, kuid aeganõudev ja ebamugav protseduur. Seepärast on hemodialüüsi efektiivsuse tagamine väga oluline.

Hemodialüüsi kvaliteedi hindamine põhineb tänapäeval peamiselt ühe metaboolse jääkprodukti – uurea – jälgimisel. Uurea vähenemise suhte (URR, *urea reduction ratio*) väärtused on paljude uurimuste põhjal otseselt seotud dialüüsipatsientide haigestumuse ja suremusega. Hinnatakse uurea kehast väljafiltreerimise kiiruse K ja dialüüsi



Joonis 6. Hemodialüüsi skeem optilise monitoriga, ühendatuna heitdialüsaadi kanalisse enne dialüsaadi juhtimist kogumispaaki.

kestuse *t* suhet vedeliku hulka kehas *V*, *Kt/V*. Kuna toksiinide hulgas on erineva suurusega molekule, ei iseloomusta ainult uurea muutuse jälgimine hemodialüüsi protsessi ammendavalt.

Neeruasendusravi kvaliteeti ja tulemuslikkust on traditsiooniliselt kontrollitud keemiliste analüüsidega, võttes perioodiliselt vereproove. Erinevate firmade praegu pakutavad hemodialüüsi monitorid põhinevad uurea kontsentratsiooni mõõtmisel ensüümi ureaas abil, mõõtes kas ammooniumiioonide juhtivust või summaarset ioonidest tingitud juhtivust. Olemasolevate meetodite puuduseks on keemiliste reagentide kasutamine ja keeruline mõõteprotseduur.

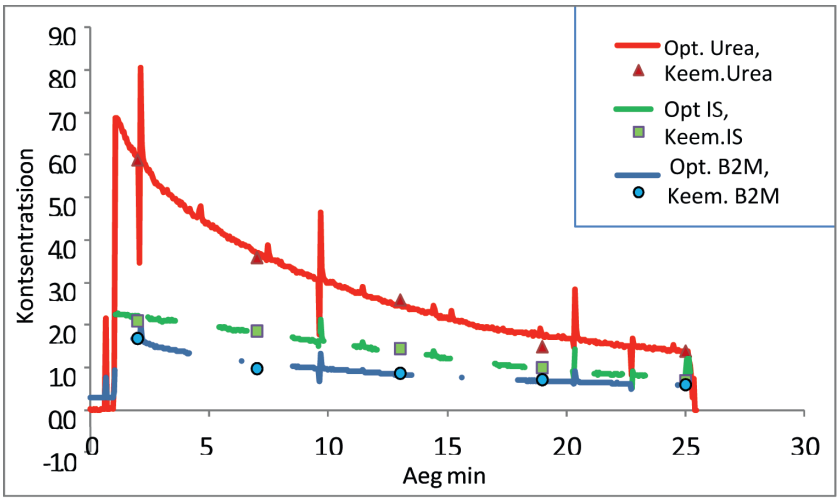
Biovedelike optika uurimisgrupp pakkus välja põhimõtteliselt uue lähenemise hemodialüüsi kvaliteedi kontrolliks ja monitooringuks, milles kasutatakse optilist kiirgust (Uhlin jt, 2006; Fridolin jt, 2008; Karai jt, 2013). Mõõtes optilise meetodi abil erinevate molekulide neeldumisspektreid dialüsaadis, on võimalik hinnata nende kontsentratsiooni ja seega jälgida dialüüsi reaalajas (joonis 6). Optilise meetodi eelisteks on, et mõõtmine toimub kasutatud dialüsaadil, pakkudes seega monitori lihtsaimat ühendamise võimalust, dialüüsi protsessi mingilgi moel häirimata. Ei ole vajadust võtta vereproove ega kasutada keemilisi aineid. Varieerides optilisi sagedusi ning neeldumis- ja fluorestsents-spektreid, on võimalik registreerida erinevaid, nii väikesi kui suuri molekule.

Biovedelike optika uurimisgrupi esimeses ja mitmete patentidega kaitstud optilises dialüüsimonitoris kasutati uurea molekulide eemaldamise kiiruse ja hulga registreerimiseks ultraviolettkiirgust (Uhlin jt, 2006; Fridolin jt, 2008; Luman jt, 2009).

Edasise töö käigus uuriti kusihappe rolli dialüüsis kui võimalikku uut markerit (Jerotskaja jt, 2010). Samuti uuriti kahe väikse molekulkaaluga ureemilise jääkprodukti taseme mõju dialüüsipatsientide elulemusele. Töötati välja algoritmid kusihappe eemaldamise jälgimiseks dialüüsiprotseduuri jooksul, kasutades kulunud dialüsaadi ultraviolettkiirguse absorptsiooni ja mudeleid, et hinnata patsientide elulemuse tõenäosust lähtuvalt kahe molekuli – uurea ja kusihappe – tasemest ja eemaldamisest (Holmar jt, 2012).

Kuna uurea ei võimalda saada informatsiooni teiste ureemiliste toksiinide eemaldamise kohta, näiteks valkudega seotud ainete kohta, mis on verest raskesti eemaldatavad, on rahvusvaheline ureemiliste toksiinide töögrupp välja pakkunud uue markeraine – toksiliste omadustega indoksüülsulfaadi – valkudega seotud ainete eemaldamise hindamiseks. Indoksüülsulfaadi eemaldamise hindamiseks töötati maailmas esmakordselt välja ja kaitsti patendiga fluorestsentsil põhinev meetod (Arund jt, 2012, 2016).

Teadustöö tulemusena on väljaarendamisel reaalajas mõõtev sensor ehk nn *Multicomponent Monitoring* (MCM) kontseptsioon, mis kasutab uurimisgrupi väljatöötatud optilist meetodit toksi-



Joonis 7. Erinevate jääkainete kontsentratsiooni muutus kasutatud dialüsaadis ühe dialüüsi käigus, mõõdetuna paralleelselt optilise MCM anduriga (Opt.) ja pisteliselt tehtud keemiliste analüüsidega (Keem.) uurea (ülemine graafik), indoksüülsulfaadi (IS, keskmine graafik)) ja beeta2 mikroglobuliini (B2, alumine graafik) puhul. Tulemused näitavad väga head kokkulangevust nii väikeste, keskmiste kui suurte molekulide kontsentratsiooni hindamisel pideva optilise ja pistelise keemilise kontrolli abil.

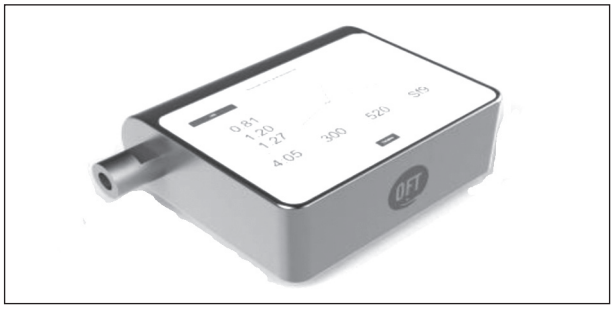
liste jääkainete verest eemaldamise jälgimiseks (joonis 7).

Biovedelike optika uurimisgrupi edasise teadustöö eesmärk on välja töötada uudne optiline meetod ureemiliste toksiinide ja alatoitumuse, kroonilise põletiku, südame-veresoonkonnahaiguste ja ajukahjustuse riski potentsiaalsete markerite monitooringuks, mille tulemusena tekiks arstidel täiendavat infot kroonilise neerupuudulikkusega patsientide seisundi interpreteerimisel ja ravi modifitseerimisel. Fookuses on kolme traditsioonilise ureemiliste toksiinide grupi (väikesed, keskmised ja valkudega seotud molekulid) optilised monitooringuvõimalused ning samuti glükatsiooni kaugelearenenud lõppsaaduste (*advanced glycoxidation end products*, AGE) hulga hindamine biovedelikes, kasutades molekulide neeldumis- ja fluorestsentsomadusi.

TEHNOLOOGIASIIRE

Koostöös TTÜst välja kasvanud *spin-off* ettevõttega Optofluid Technologies OÜ on aktiivselt käimas teadus-arendustöö MCM meetodi tehnoloogiasiirdeks. Euroopa Komisjoni poolt H2020 raames toetatava arendustöö tulemusena peaks arstide käsutusse jõudma sensor kliinilisteks katsetusteks Euroopa juhtivates neeruasendusravi tippkeskustes Linköpingis, Madridis, Montpellier's, Gentis ja Tallinnas, mis kuuluvad juhtorganisatsiooni European Uremic Toxin Work Group. Väikesegabariidiline ja lihtsalt dialüsaadi väljundkanalisse lülitatav MCM sensor (joonis 8) võimaldab meedikutel kohandada neeruasendusravi vastavalt vajadusele, et parandada 3,6 miljoni kroonilise neerupuudulikkusega patsiendi ravitulemusi ja elukvaliteeti maailmas.

Eesti suurima rõivatootja AS Protex Balti, Eesti IKT Klastri ja Targa Elektroonika klastri ESTRONICS ning TTÜ instituutide koostöös töötati välja tark töörõivas Ragnarok Workwear 2.0, mis on



Joonis 8. Koostöös ettevõttega Optofluid Technologies OÜ väljatöötatav MCM sensor.

Joonis 9. LabVIEW tarkvaral põhinev kasutajaliides, mis kuvab kukkumisi, erinevaid füüsilisi tegevusi ning välis- ja sisetemperatuuri.

mõeldud kõrgendatud riskiga töökeskkonnas viibivatele töötajatele. Tark töörõivas reaalajas: 1) tuvastab kukkumise, 2) monitoorib füüsilist aktiivsust, 3) mõõdab keha- ja välistemperatuuri, 4) võimaldab GPS-positsioneerimist, 5) omab häältuvastus kõne-tekst-funktsionaalsust ja käed-vabad-süsteemi, 6) edastab automaatselt alarmid ning teated kukkumiste (k.a üle parda), vigastuste, üle- ja alatemperatuuride jms puhul, 7) salvestab sensorandmed ja alarmid pilve, 8) pakub võimalust sensorandmete analüüsiks ja kuvamiseks IoT platvormil.

Projekti tulemusena töötati välja algoritmid ja mudelid, mis võimaldavad klassifitseerida inimese füüsilist tegevust ja kukkumisi. Töörõivas kasutatavate algoritmide ja mudelite aluseks olevad füsioloogilised signaalid registreeriti võrdluskatsetel, kasutades referentsseadmetena Shimmeri kiirendusandureid (Allik jt, 2018). Uuringu käigus määrati katsealuste antropomeetrilised näitajad, mis olid vajalikud sensori abil füüsilise aktiivsuse hindamisega seotud mudelite koostamiseks. Mõõdetud signaalide salvestamiseks, töötlemiseks ja esitamiseks reaalajas loodi kasutajaliides LabVIEW keskkonnas (joonis 9). Eesti keele häältuvastus kõne-tekst-funktsionaalsuse ja käed-vabad-süsteemiga realiseeriti töörõiva kraesse paigaldatud mikrofoni ja TTÜ küberneetika instituudi foneetika ja kõnetehnoloogia labori mobiilirakenduse Kõnele abil.

TTÜ teadlaste ja ettevõtete rakendusliku koostööprojekti lõpptulemusena sai ettevõte integreeritud terviklahenduse – tark töörõivas Ragnarok Workwear 2.0 prototüübi, mis arvestab kõrgendatud riskiga töökeskkonnas viibivate töötajate vajadustega ning tagab kandjale täiendava turvalisuse ja mugavuse.

VIITED

Allik, A., Pilt, K., Karai, D., Fridolin, I., Leier, M., Jervan, G. 2018. Classification algorithm improvement for physical activity recognition in maritime environments. – The IUPESM World Congress 2018, Prague, Czech Republic, 3–8 June, 2018 (will be published in Proceedings of IFMBE).

Arund, J., Tanner, R., Uhlin, F., Fridolin, I. 2012. Do only small uremic toxins, chromophores, contribute to the online dialysis dose monitoring by UV absorbance? – Toxins, 4, 849–861.

Arund, J., Luman, M., Uhlin, F., Tanner, R., Fridolin, I. 2016. Is fluorescence valid to monitor removal of protein bound uremic solutes in dialysis? – PLoS ONE, 11 (5), e0156541.

Bachmann, M., Lass, J., Suhhova, A., Hinrikus, H. 2013. Spectral asymmetry and Higuchi's fractal dimension measures of depression electroencephalogram. – Computational and Mathematical Methods in Medicine, Article ID 251638,

http://dx.doi.org/10.1155/2013/251638

Bachmann, M., Päeske, L., Kalev, K., Aarma, K., Lehtmets, A., Ööpik, P., Lass, J., Hinrikus, H. 2018. Methods for classifying depression in single channel EEG using linear and nonlinear signal analysis. – Computer Methods and Programs in Biomedicine, 155 (11), 11–17.

Fridolin, I., Lauri, K., Jerotskaja, J., Luman, M. 2008. Nutrition estimation of dialysis patients by on-line monitoring and kinetic modeling. – Estonian Journal of Engineering, Special Issue on Biomedical Engineering, 14, 177–188.

Hinrikus, H., Bachmann, M., Lass, J., Tomson, R., Tuulik, V. 2008. Effect of 7, 14 and 21 Hz modulated 450 MHz microwave radiation on human electroencephalographic rhythms. – International Journal of Radiation Biology, 84, 69–79.

Hinrikus, H., Suhhova, A., Bachmann, M., Aadamsoo, K., Võhma, Ü., Lass, J., Tuulik, V. 2009. Electroencephalographic spectral asymmetry index for detection of depression. – Medical and Biological Engineering and Computing, 47, 1291–1299.

Hinrikus, H., Bachmann, M., Lass, J. 2011. Parametric mechanism of excitation of the electroencephalographic rhythms by modulated microwave radiation. – International Journal of Radiation Biology, 87, 1077–1085.

Hinrikus, H., Lass, J., Karai, D., Pilt, K., Bachmann, M. 2015. Microwave effect on diffusion: a possible mechanism for non-thermal effect. – Electromagnetic Biology and Medicine, 34, 327–333.

Hinrikus, H., Bachmann, M., Karai, D., Lass, J. 2017. Mechanism of low-level microwave radiation effect on nervous system. – Electromagnetic Biology and Medicine, 36, 202–212.

Hinrikus, H., Bachmann, M., Lass, J. 2018. Understanding physical mechanism of low-level microwave radiation effect. – International Journal of Radiation Biology, 94, 877–882.

Holmar, J., Fridolin, I., Uhlin, F., Lauri, K., Luman, M. 2012. Optical method for cardiovascular risk marker uric acid removal assessment during dialysis. – The Scientific World Journal, Article ID 506486, doi: 10.1100/2012/506486

Jerotskaja, J., Uhlin, F., Fridolin, I., Lauri, K., Luman, M., Fernström, A. 2010. Optical on-line monitoring of uric acid removal during dialysis. – Blood Purification, 29, 69–74.

Karai, D., Fridolin, I., Kostin, S., Ubar, R. 2013. Accurate dialysis dose evaluation and extrapolation algorithms during on-line optical dialysis monitoring. – IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 60, 1371–1377.

Luman, M., Jerotskaja, J., Lauri, K., Fridolin, I. 2009. Dialysis dose and nutrition assessment by optical on-line dialysis adequacy monitor. – Clinical Nephrology, 72, 303–311.

Orgo, L., Bachmann, M., Lass, J., Hinrikus, H. 2015. Effect of negative and positive emotions on EEG spectral asymmetry. – Proceedings of 37th Annual International Conference of the IEEE EMBS: 37th Annual International Conference of the IEEE EMBS, Milan, Italy, 25–29 August, 2015. IEEE, 8107–8110.

Orgo, L., Bachmann, M., Kalev, K., Jarvelaid, M., Raik, J., Hinrikus, H. 2017. Resting EEG functional connectivity and graph theoretical measures for discrimination of depression. – 4th IEEE EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics, BHI 2017, Orlando, United States, 16–19 February, 2017, 389–392.

Pilt, K., Meigas, K., Ferenets, R., Kaik, J. 2010. Photoplethysmographic signal processing using adaptive sum comb filter for pulse delay measurement. – Estonian Journal of Engineering, 16, 78–94.

Pilt, K., Meigas, K., Temitski, K., Viigimaa, M. 2012. Second derivative analysis of forehead photoplethysmographic signal in healthy volunteers and diabetes patients. – IFMBE Proceedings World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, Beijing, China, 26–31 May, 2012, 39, 410–413.

Pilt, K., Ferenets, R., Meigas, K., Lindberg, L. G., Temitski, K., Viigimaa, M. 2013a. New photoplethysmographic signal analysis algorithm for arterial stiffness estimation. – The Scientific World

Journal, Article ID 169035, doi: 10.1155/2013/169035

Pilt, K., Meigas, K., Temitski, K., Viigimaa, M. 2013b. The analysis of finger photoplethysmographic waveform in healthy volunteers and diabetes patients. – IFMBE Proceedings of International Symposium on Biomedical Engineering and Medical Physics, Riga, Latvia, 10−12 October, 2012, 38, 55–58.

Pilt, K., Meigas, K., Ferenets, R., Temitski, K., Viigima, M. 2014. Photoplethysmographic signal waveform index for detection of increased arterial stiffness. – Physiological Measurement, 35, 2027−2036.

Põld, T., Bachman, M., Orgo, L., Kalev, K., Lass, J., Hinrikus, H. 2017. EEG spectral asymmetry index detects differences between leaders and non-leaders. – Joint Conference of the European Medical and Biological Engineering Conference (EMBEC) and the Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering and Medical Physics (NBC), Tampere, Finland, 11−15 June, 2017. IFMBE Proceedings, 65, 17−20.

Päeske, L, Bachmann, M., Põld, T., de Oliveira, S. P. M., Lass, J., Raik, J., Hinrikus, H. 2018. Surrogate data method requires end-matched segmentation of electroencephalographic signals to estimate non-linearity. – Frontiers in Physiology, 9, 1350, doi: 10.3389/fphys.2018.01350

Saifudinova, M., Bachmann, M., Lass, J., Hinrikus, H. 2015. Effect of coffee on EEG spectral asymmetry. – World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, 7–12 June, 2015, Toronto, Canada. IFMBE Proceedings, 51, 1030−1033.

Suhhova, A., Bachmann, M., Karai, D., Lass, J., Hinrikus, H. 2013. Effect of microwave radiation on human EEG at two different levels of exposure. – Bioelectromagnetics, 34, 264−274.

Uhlin, F., Fridolin, I., Magnusson, M., Lindberg, L. G. 2006. Dialysis dose (Kt/V) and clearance variation sensitivity using measurement of ultraviolet-absorbance (on-line), blood urea, dialysate urea and ionic dialysance. – Nephrology Dialysis Transplantation, 21, 2225−2231.

PÄIKESEENERGEETIKA MATERJALIDE UURINGUD EESTIS

Marit Kauk-Kuusik, Maarja Grossberg, Ilona Oja Acik, Malle Krunks
Tallinna tehnikaülikooli materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

Majandusarengust ja ühiskonna heaolu tõusust tingituna kasvab energiatarbimine jätkuvalt, millega kaasneb CO_2 emissioonide suurenemine ja üha suurenev koormus keskkonnale. Sellest tingitud negatiivsete kliimamuutuste vältimine ja taskukohase hinnaga energiaga varustatus on energiatehnoloogiate valikute tegemisel kogu maailmas peamised ülesanded. Et vältida võimalikku energiakriisi, muutuvad energeetiline sõltumatus, energiajulgeolek, energiaga varustatuse stabiilsus ning energiaallikate mitmekesisus ajas aina tähtsamaks. Uued tehnoloogiad, mis on puhtamad, keskkonnasõbralikumad, kiiremini realiseeritavad ja kohalikele nõudmistele sobivamad, on olnud viimase aastakümne tehnoloogia arengu üheks suureks väljakutseks. Tallinna tehnikaülikooli (TTÜ) materjaliteadlased on jätkusuutlike energiatehnoloogiate arengusse panustanud uudsete materjalide ning tehnoloogiate arenduse kaudu päikeseenergeetika rakendusteks juba mitme kümnendi vältel.

Autorid (vasakult): Maarja Grossberg, Ilona Oja Acik, Malle Krunks ja Marit Kauk-Kuusik.

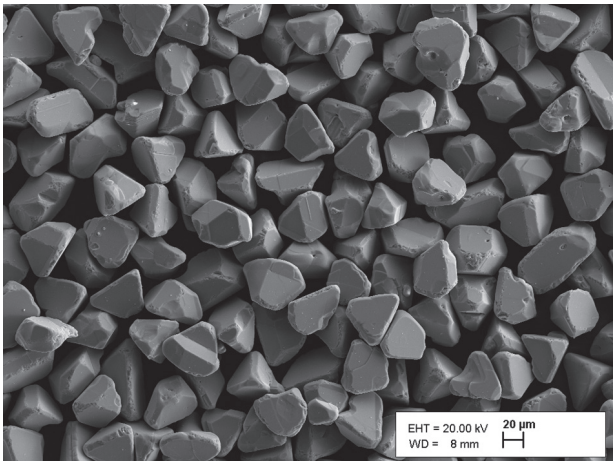
Päikeseenergia otsest fotoelektrilist muundamist elektrienergiaks peetakse üheks perspektiivsemaks ja keskkonnasõbralikumaks energiasaamise viisiks, ja seda just päikeseenergia universaalse kättesaadavuse tõttu ning tulenevalt tohutust potentsiaalist päikesekiirguse otsesel muundamisel elektrienergiaks. Ühes tunnis maale jõudev päikeseenergia hulk on samas suurusjärgus energiahulgaga, mida toodavad kogu maailma elektrijaamad kokku ühe aasta jooksul. Ometigi moodustab päikeseenergeetika praegu maailma kogu elektrienergia tootmisest vaid ligikaudu kaks protsenti. Sellel on mitu põhjust: eelkõige päikesepaneelide kõrge hind ning enamlevinud, ränil baseeruvate päikesepaneelide tehnoloogia paindumatus, mis seab rakendamisele ja kasutuskeskkonnale piirangud.

Päikeseenergeetikas on kõrvuti klassikaliste räni-päikesepaneelidega, mille tootmine on ressursi- ja energiamahukas, väga perspektiivsed ning laialdast uurimist ja juba ka rakendust leidnud ühendpooljuhtmaterjalide (CdTe ja $CuInSe_2$ (CIS)) baasil valmistatud päikesepaneelid. Kuid peaaegu piiramatu energeetilise ressursiga päikeseenergia kasutamine suurenergeetika globaalsete probleemide lahendamiseks nõuab päikesepaneelide valmistamiseks laialdase levikuga, odavate ja mittemürgiste materjalide kasutamist. See on toonud päikesepaneelide materjalide valikul täiendava kriteeriumina vajaduse arvestada kasutatavate materjalide ressurssi maakoores. Uuringud

on näidanud telluuri ja indiumi varude piiratust ja tulenevalt sellest neil ühenditel põhineva päikeseenergeetika võimetust energeetika ees seisvate ülesannete lahendamisel vajalikul teravatt-tundide tasemel. Seetõttu on maailma teadlaskonna huvi pöördunud uute alternatiivsete, laiema levikuga ja odavate materjalide ja ka tehnoloogiate otsingule nende tööstuslikuks kasutamiseks odavate ning samal ajal kõrge efektiivsusega päikesepaneelide loomiseks.

Teoreetilised arvutused näitavad, et keeruliste nelja- ja viiekomponentsete materjalide kasutamisel on võimalusi valmistada päikesepaneele ligi 30-protsendilise päikeseenergia muundamise efektiivsusega (Shockley, Queisser, 1961). Viimasel aastakümnel on Tallinna tehnikaülikooli päikeseenergeetika materjalide teaduslabori ning optoelektroonsete materjalide füüsika labori uurimisrühmade teadustöö olnud suunatud just selliste keeruliste nelja- ja viiekomponentsete ühendite nagu Cu_2ZnSnS_4, $Cu_2ZnSnSe_4$ (CZTS, CZTSe) uurimisele. Neis ühendites on $CuInSe_2$ võres asendatud III rühma element (indium) võrdsetes osades II (tsink) ja IV (tina) rühma elementidega, mille sisaldus maakoores on suur ja hind madal. Selline isoelektrooniline asendus loob materjali, mille mitmed füüsikalised omadused on sarnased $CuInSe_2$-tüüpi materjalidega, mis on end efektiivse päikesepatarei absorbermaterjalina juba tõestanud. Selliseid materjale nimetatakse *kesteriitideks* (nimetus tuleneb nende ühendite kristallstruktuurist). Selliste keeruliste nelja- kuni kuuekomponentsete pooljuhtmaterjalide kasutamine päikeseelemendi absorbermaterjalina nõuab aga väga täpset kontrolli loodavate materjalide struktuursete ja elektriliste omaduste, materjalide stöhhiomeetria ja defektstruktuuri üle.

TTÜ päikeseenergeetika materjalide teaduslabori uurimisrühm kasutab kesteriitsete materjalide sünteesiks maailmas ainulaadset monoterapulbertehnoloogiat. Monoterapulber (joonis 1) sünteesitakse kõrgel temperatuuril sulasoola juuresolekul. Uurimistööde tulemusel on kindlaks tehtud kesteriitsete materjalide sünteesiprotsessi mehhanismid ja kineetika erinevates sulades soolades, lähtudes erinevatest lähteainetest – metallilistest või binaarsetest kalkogeniidsetest lähtekomponentidest. Kasutades erinevaid sulandajaid, on leitud sobivaimaid sulandajad ja optimaalsed kogused, mis määravad ära saadava materjali faasilise ja granulomeetrilise koostise. Samuti on kindlaks määratud kasvatamise temperatuur, kasvatusprotsessi kestus ja sulandaja keemiline koostis, et reguleerida kristallide suurust ja kuju (Mellikov jt, 2015).

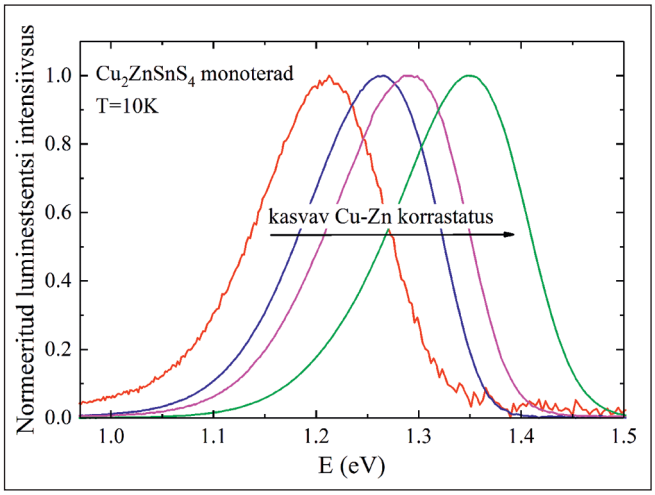


Joonis 1. Skaneeriva elektronmikroskoobi pilt Cu_2ZnSnS_4 monoterapulbrist, mis on sünteesitud sula kaaliumjodiidi keskkonnas.

Süstemaatiliselt läbi viidud kesteriitsete monoterapulbrite koostise ja termiliste järelkäsitluste uurimise tulemusel on tehtud mitu olulist avastust. Esmakordselt leiti, et vask ja tsink on mingil määral omavahel kristallivõres vahetatavad: kõrgem vasesisaldus annab võimaluse sünteesida madalama tsingikontsentratsiooniga monoterapulbreid ning vastupidi – kõrgem tsingi kontsentratsioon prekursorite segus tagab sünteesitud materjalides madalama vasesisalduse. See teadmine andis meile võimaluse kontrollitult sünteesida ühefaasilisi stöhhiomeetrilise kõrvalekaldega CZTS monoterapulbreid. Teiseks suuremaks uurimisteemaks kesteriitide monoterapulbrite arendamisel on gaasifaasiliste termotöötluste mõju uurimine materjali pinnakoostisele ja optilistele omadustele. Uurimistöö tulemusel määrati tegurid, seaduspärasused ja mehhanismid, mis kontrollivad saadavate monoterapulbrite keemilist ja defektkoostist järgnevatel termilistel käsitlustel erinevates gaasikeskkondades.

Kuigi uuritavad päikesepatarei absorbermaterjalid kuuluvad keeruliste nelja- kuni kuuekomponentsete pooljuhtmaterjalide hulka, mis teeb nende sünteesi ja omaduste kujundamise suhteliselt keerukaks, olles samas ka paindlikum, on uurimisgrupi loodud materjalidel baseeruvate päikesepatareide efektiivsused ~10–12 protsenti. Maksimaalsest teoreetilisest võimalikust efektiivsusest (~30%) moodustab see 40 protsenti. Üheks limiteerivaks parameetriks on avatud vooluahela pinge (V_{oc}) puudujääk, võrreldes antud materjalile vastava keelutsooni väärtusega. Teoreetiliselt võiks 1,5 eV keelutsooniga absorbermaterjalist valmistatud päikesepatareide V_{oc} väärtus olla ~1 V, aga ulatub praeguseks ligikaudu 0,8 eV-ni (Timmo jt, 2017). Üheks põhjuseks on Cu-Zn korrastamatuse esinemine kesteriitses kristallvõres, mis põhjustab keelutsooni vähenemist. Sisuliselt tähendab see isoelektroonsete Cu ja Zn aatomite omavahelist kohavahetust võres, millel on teatud korrapära. Uurimistöö käigus leidsime tehnoloogilised võimalused Cu-Zn korrastatuse reguleerimiseks ja demonstreerisime suurima V_{oc} väärtusega CZTS-tüüpi päikesepatareid (Timmo jt, 2017).

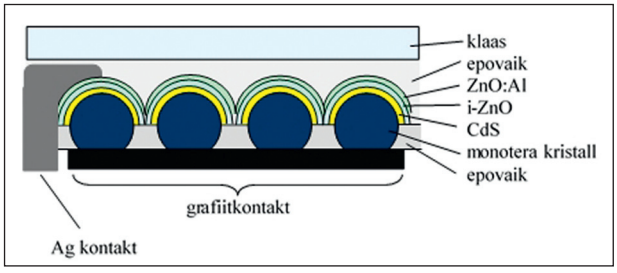
Päikesepatareides kasutatavate absorbermaterjalide tsoonistruktuur koos defektstruktuuriga ning faasikoostis mõjutavad oluliselt nende materjalide elektrilisi ja optilisi omadusi. Fotoluminestsentsspektroskoopia on üheks tundlikuks ja mittedestruktiivseks meetodiks materjalide defektstruktuuri ja rekombinatsiooni mehhanismide uurimisel. Tallinna tehnikaülikooli optoelektroonsete materjalide füüsika labori teadlaste tehtud kesteriitide defektstruktuuri uuringud on olnud teedrajavad nende materjalide fundamentaalsete omaduste mõistmisel. Kesteriitide fotoluminestsentsi uuringud on näidanud sügavate defektide ja defektipaaride domineerimist kiirguslikes rekombinatsiooniprotsessides (Grossberg jt, 2012; Krustok jt, 2018), mis päikesepatarei efektiivsuse seisukohalt on kahjulikud. Samuti on uurimisgrupp esmakordselt näidanud korrelatsiooni fotoluminestsentskiirguse ning Cu-Zn korrastatuse astme vahel (joonis 2) (Grossberg jt, 2014). Veelgi enam, Cu-Zn



Joonis 2. Cu_2ZnSnS_4 monoterade madalatemperatuurse fotoluminestsentskiirguse sõltuvus Cu-Zn korrastatuse astmest.

korrastatuse modifitseerimisega kaasneb ka muutus kiirgusliku rekombinatsiooni mehhanismis (Grossberg jt, 2014). Saadud info võimaldab paremini juhtida absorbermaterjali omadusi materjali kasvuprotsessi ja järeltöötluste kaudu.

Kontrollitud omadusega monoterapulbreid rakendatakse originaalsete monoterakihiliste päikesepatarei struktuuride loomiseks. Antud tehnoloogia on kaitstud mitme patendiga rohkem kui 20 riigis. Monoterapulbri iga üksik tera on väike monokristall, millest igaüks moodustab suures paneelis üliõhukese puhverkihiga kaetuna omaette fotoelemendi (miniatuurse päikesepatarei, joonis 3). Tehnoloogia eeliseks klassikaliste teise põlvkonna päi-



Joonis 3. Monoterakiht-päikesepatarei struktuur.

kesepaneelide ees on võimalus luua igasuguse kujuga ja piiramatu suurusega, täielikult ehitisega integreeritud päikesepaneele (BIPV – *building integrated photovoltaics*).

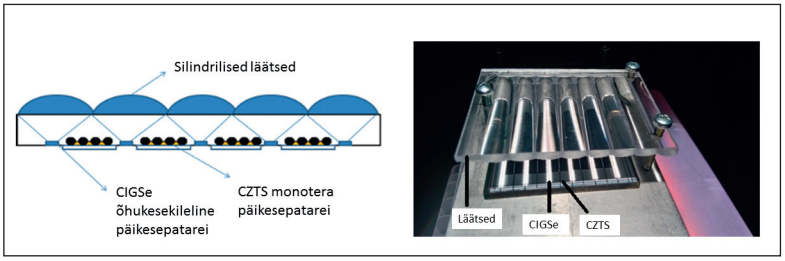
Teadus- ja arendustöö tulemused leiavad praktilist rakendust TTÜ *spin-off* firma Crystalsol GmbH päikesepaneelide väljatöötamisel. Seda tehnoloogiat on sageli nimetatud revolutsiooniliseks nii kasutatavate materjalide kui ka päikesepaneelide kujunduse poolest. Saavutatud lahenduste uudsuse kinnituseks on firma erinevatel rahvusvahelistel innovatsioonikonkurssidel saavutatud esikohad (vt ka http://www.crystalsol.com).

Kahtlemata sisaldab selline originaalne ja odav tehnoloogia ka arenguruumi ja täiustamisvõimalusi.

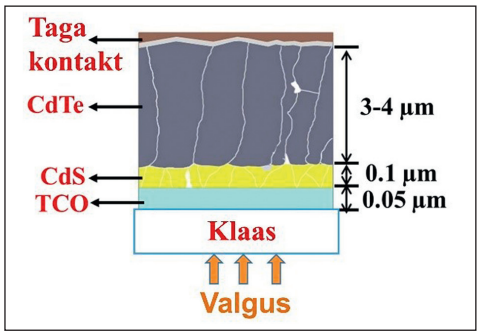
Uudsete rakendustena on katsetatud ka monoterakiht-päikesepatarei struktuuri kasutamist mikrokontsentraator-kontseptsioonis, kus valgus on koondatud väikeste optiliste läätsede abil väikesele päikesepatarei alale, et vähendada materjalikulu ja tõsta päikesepatarei efektiivsust (joonis 4). Selle töö tulemusena valmis ka esimene mikrokontsentraator-päikesepatarei prototüüp. Samuti on koostöös Euroopa Kosmoseagentuuriga (ESA – *European Space Agency*) läbi viidud esimesed katsetused kasutada monoterakiht-päikesepatareisid kosmoserakendustes.

TTÜ keemiliste kiletehnoloogiate teaduslabori peamine uurimisteema on päikesepatareides, aga ka erinevates elektroonikaseadistes nõutud omadustega metalloksiid (ZnO, NiO, TiO_2, SnO_2, In_2O_3) ja metallsulfiid (ZnS, CdS, $CuInS_2$, In_2S_3, SnS, Sb_2S_3, jt) õhukeste kilede ja nanostruktuursete materjalide väljatöötamine peamiselt keemiliste vedeliksadestuse tehnoloogiatega, nagu pihustuspürolüüs, keemiline sadestamine lahusest ja sool-geel meetod, aga samuti sublimatsioon lähidistantsilt kui füüsikaline meetod. Laboris arendatavad tehnoloogiad on lihtsad, odavad ja tööstuses kergesti rakendatavad.

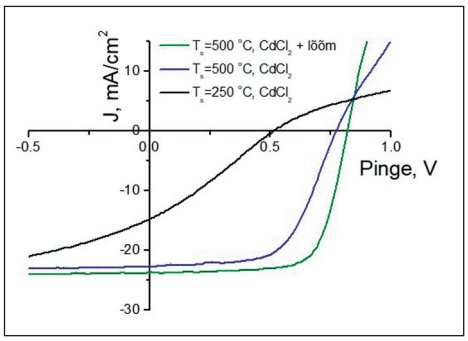
Joonis 4. Mikrokontsentraator-päikesepatarei skeem (vasakul) ning prototüüp.



Viimastel aastatel on oluliselt panustatud uurimistöösse CdTe/CdS päikesepatarei materjalide arenduse alal. Õhukesekilelise CdS/CdTe päikesepatareide toodang moodustab ligi kümme protsenti päikesepaneelide kogutoodangust maailmas, olles seega peaaegu ainuke tehnoloogia, mis pakub praegu konkurentsi ränil baseeruvatele tehnoloogiatele. Uurimistöö eesmärk oli patarei kõrge efektiivsuse saavutamiseks ühe olulise tehnoloogilise etapi, nagu $CdCl_2$ aktiveerimisprotsess hapniku juuresolekul (oksikloriidne lõõmutamine), füüsikalis-keemilise mehhanismi väljaselgitamine.



Joonis 5. CdS/CdTe päikesepatarei skeem.



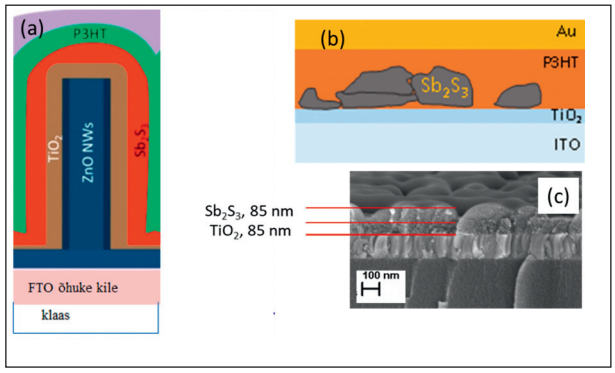
Joonis 6. CdS/CdTe päikesepatarei volt-amper karakteristikud valgustamisel sõltuvalt CdTe kihi sadestamise temperatuurist ja CdS/CdTe struktuuri $CdCl_2$ käsitluse ja järgneva termotöötluse tingimustest.

Katsed viidi läbi CdTe/CdS päikesepatarei struktuuridel (joonis 5), mis olid valmistatud kombineerides keemilist lahusest sadestamise meetodit (*chemical bath deposition*, CBD) CdS kilede ja lähidistantsilt sublimatsiooni vaakumis (*close space sublimation*) CdTe absorberkihi jaoks. Tõestati, et hapniku juuresolekul tekib $CdCl_2$-CdTe süsteemis sula faas eutektikast madalamatel temperatuuridel. Sula faas soodustab kristalliitide kasvu, kuid samaaegselt toimub nii CdS kui CdTe kihtide legeerimine $CdCl_2$-ga, mille kõrge kontsentratsioon põhjustab madala laengukandjate kontsentratsiooni absorberkihis ($<10^{15}$ cm^{-3}), absorberkihi kõrge takistuse ja patarei madalad väljundparameetrid (efektiivsus <10%). Eksperimentaalselt näidati, et oksikloriidsele lõõmutamisele järgneva termotöötlusega on võimalik juhtida $CdCl_2$ väljadifusiooni kristallidest, tagada legeeriva komponendi optimaalne kogus kristallides ja saavutada optimaalsele (u 10^{16} cm^{-3}) lähedane laengukandjate kontsentratsioon absorberkihis. Tõestati korrelatsioon kristallvõre defektide ning CdS ja CdTe kilede elektriliste, optiliste ja struktuursete omaduste vahel ning nende kontrollitud juhtimine läbi termiliste töötluste (Spalatu jt, 2016; Maticiuc jt, 2017). CdS/CdTe päikesepatarei väljundkarakteristikuid sõltuvalt CdTe kihi sadestamise temperatuurist ja CdS/CdTe struktuuri $CdCl_2$ käsitluse ja järgneva termotöötluse tingimustest iseloomustab joonis 6.

Üliõhukese absorberkihiga päikesepatareide (*eta-solar cell*) väljatöötamisega alustati laboris kümmekond aastat tagasi, mil esmalt töötati välja ZnO nanovarraste (ZnOnr) pihustussadestuse tehnoloogia ja seejärel ZnO nanovarrastel baseeruva päikesepatarei valmistamise tehnoloogia (Krunks jt, 2010). Selle uurimistöö tulemused on maailmas ainulaadsed ja kaetud mitme rahvusvahelise patendiga. ZnO nanovarrastel põhineva päikesepatarei struktuuri koostiskihid valmistati keemilise pihustuspürolüüsi meetodil ja optimeeritud omadustega ZnOnr, In_2S_3 ja $CuInS_2$ materjalid kombineeriti päikesepatarei struktuuris ZnOnr/TiO_2/In_2S_3/$CuInS_2$ (Krunks jt, 2010).

Struktureeritud ZnO nanovarraste kihi kasutamine planaarse aknakihi asemel suurendab valguse neeldumist päikesepatareis, mis omakorda tõstab lühisvoolu tihedust ning seeläbi suureneb valguse elektriks muundumise efektiivsus. Päikesepatareide uuringud näitasid, et vaatamata $CuInS_2$ heale valguse neeldumise võimele toimub pihustussadestatud absorberkihist vase difusioon In_2S_3 puhverkihti, mille tulemusena muutub In_2S_3 fototundlikuks ning päikesepatarei väljundparameetrid halvenevad (Kärber jt, 2013). Selle uuringu tulemused andsid tõuke binaarsete, vaske mitte sisaldavate absorbermaterjalide, nagu SnS ja Sb_2S_3 väljatöötamisele keemilise pihustuspürolüüsi meetodil. Keemilise pihustuspürolüüsi meetod on ressursisäästlik, odav, kiire ja tööstusesse kergesti rakendatav meetod, mis võimaldab kasvatada vesilahusest aluspinnale nii kolmemõõtmelisi struktuure kui ka õhukesi kompaktseid pinnakatteid paksusega alates mõni nanomeeter.

Viimastel aastatel on seda tehnoloogiat edasi arendatud hübriidsete päikesepatareide väljatöötamisel. Hübriidses päikesepatareis kasutatakse ära nii anorgaanilise absorberi kui ka orgaanilise p-tüüpi juhtivusega kontaktmaterjali omadusi. Praegu töötatakse laboris välja nii õhukesel TiO_2 kihil (Kärber jt, 2016) kui ka ZnO nanovarrastel



Joonis 7. Hübriidsed päikesepatarei struktuurid baseeruvana (a) ZnO nanovarrastel, (b) TiO_2 õhukesel kihil ja (c) skaneeriva elektronmikroskoobi ristlõige klaas/ITO/TiO_2/Sb_2S_3 päikesepatarei struktuurist.

(Parize jt, 2017) baseeruvaid hübriidseid päikesepatarei struktuure (joonis 7), milles on absorberkihina kasutusel Sb_2S_3 ja orgaanilise kihina polü(3-heksüültiofeen-2,5diüül) (P3HT).

ZnO nanovarrastel baseeruva päikesepatarei (joonis 7a) väljatöötamisel kaeti ZnOnr kompaktse ja õhukese TiO_2 kihiga, muutes ZnOnr keemiliselt stabiilseks, avaldamata seejuures mõju päikesepatarei väljundparameetritele. Pihustuspürolüüsi meetodil sadestati ZnOnr/TiO_2 tuum-kest struktuuridele ühtlased Sb_2S_3 absorberkihid paksusega kuni 10 nm. Hübriidsed päikesepatarei struktuurid ZnOnr/TiO_2/Sb_2S_3/P_3HT näitasid väljatöötluse esimeses faasis efektiivsust 2,3 protsenti (Parize jt, 2017).

TiO_2 õhukesel kihil baseeruvad hübriidse päikesepatarei (joonis 7b, c) valmistamiseks kasutatavad temperatuurid on vahemikus 170–350 °C. Protsess viiakse läbi õhu keskkonnas ja aega kulub päikesepatarei valmistamiseks umbes tund. Praegusel ajal on hübriidse õhukesekilelise päikesepatarei laboratoorse prototüübi valguse elektriks muundamise kasutegur 5,5 protsenti. Uurimistöö jätkub absorberkihi omaduste parendamise eesmärgil, rakendades järeltöötlusi ja struktuuri üleviimist nanovarrastele, mis hinnanguliselt peaks efektiivsust kahekordistama.

Arvestades valmistamisprotsessi lihtsust, odavust, kiirust ja kergesti tööstusesse rakendatavust, on väga tõenäoline, et hübriidsed päikesepatareid võivad tulevikus leida kasutust kui elektrit tootvad aknakatted (*solar windows*).

Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituudi kolme teaduslabori – päikeseenergeetika materjalide teaduslabori, optoelektroonsete materjalide füüsika labori ja keemiliste kiletehnoloogiate teaduslabori – teadus- ja arendustöö panus päikeseenergeetika materjalide ning päikesepatareide väljatöötamisse on selles valdkonnas tähelepanuväärne. Laborites kasutusel olevad tehnoloogilised lahendused ning alus- ja rakendusuuringute võimekus on aluseks nutikate ja innovaatiliste päikeseenergeetika materjalide, päikesepatareide ning neil baseeruvate uute tulevikulahenduste loomiseks jätkusuutlike energiatehnoloogiate valdkonnas.

VIITED

Grossberg, M., Krustok, J., Raudoja, J., Raadik, T. 2012. The role of structural properties on deep defect states in Cu_2ZnSnS_4 studied by photoluminescence spectroscopy. – Applied Physics Letters, 101 (102102), 102102-1−102102-2.

Grossberg, M., Krustok, J., Raadik, T., Kauk-Kuusik, M., Raudoja, J. 2014. Photoluminescence study of disordering in the cation sublattice of Cu_2ZnSnS_4. – Current Applied Physics, 14, 1424−1427.

Krunks, M., Kärber, E., Katerski, A., Otto, K., Oja Acik, I., Dedova, T., Mere, A. 2010. Extremely thin absorber layer solar cells on Zinc Oxide nanorods by chemical spray. – Solar Energy Materials and Solar Cells, 94 (7), 1191−1195.

Krustok, J., Raadik, T., Grossberg, M., Kauk-Kuusik, M., Trifiletti, V., Binetti, S. 2018. Photoluminescence study of deep donor- deep acceptor pairs in Cu_2ZnSnS_4. – Materials Science in Semiconductor Processing, 80, 52–55.

Kärber, E., Abass, A., Khelifi, S., Burgelman, M., Katerski, A., Krunks, M. 2013. Electrical characterization of all-layers-sprayed solar cell based on ZnO nanorods and extremely thin CIS absorber. – Solar Energy, 91, 48–58.

Kärber, E., Katerski, A., Oja Acik, I., Mere, A., Mikli, V., Krunks, M. 2016. Sb_2S_3 grown by ultrasonic spray pyrolysis and its application in a hybrid solar cell. – Beilstein Journal of Nanotechnology, 7, 1662−1673.

Maticiuc, N., Katerski, A., Danilson, M., Krunks, M., Hiie, J. 2017. XPS study of OH impurity in solution processed CdS thin films. – Solar Energy Materials and Solar Cells, 160, 211−216.

Mellikov, E., Altosaar, M., Kauk-Kuusik, M., Timmo, K., Meissner, D., Grossberg, M., Krustok, J., Volobujeva, O. 2015. Growth of CZTS-based monograins and their application to membrane solar cells. – Ito, K. (ed). Copper Zinc Tin Sulfide-Based Thin Film Solar Cells. Wiley, 289−309.

Parize, R., Katerski, A., Gromyko, I., Rapenne, L., Roussel, H., Kärber, E., Appert, E., Krunks, M., Consonni, V. 2017. $ZnO/TiO_2/Sb_2S_3$ core-shell nanowire heterostructure for extremely thin absorber solar cells. – The Journal of Physical Chemistry C, 121 (18), 9672–9680.

Shockley, W., Queisser, H. J. 1961. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. – Journal of Applied Physics, 32 (3), 510–519.

Spalatu, N., Krunks, M., Hiie, J. 2016. Structural and optoelectronic properties of $CdCl_2$ activated CdTe thin films modified by multiple thermal annealing. – Thin Solid Films, 633, 106−111.

Timmo, K., Kauk-Kuusik, M., Pilvet, M., Raadik, T., Altosaar, M., Danilson, M., Grossberg, M., Raudoja, J., Ernits, K. 2017. Influence of order-disorder in Cu_2ZnSnS_4 powders on the performance of monograin layer solar cells. – Thin Solid Films, 633, 122−126.

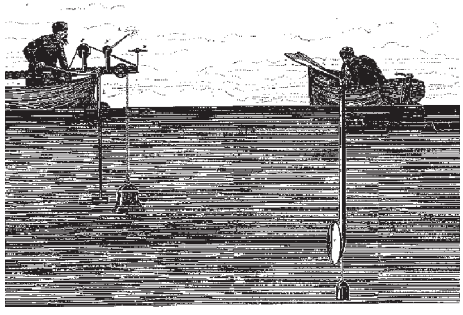
INIMTEKKELINE HELI OOKEANIS JA SELLE MÕJU MEREKESKKONNALE

Aleksander Klauson
Tallinna tehnikaülikooli ehituse ja arhitektuuri instituut

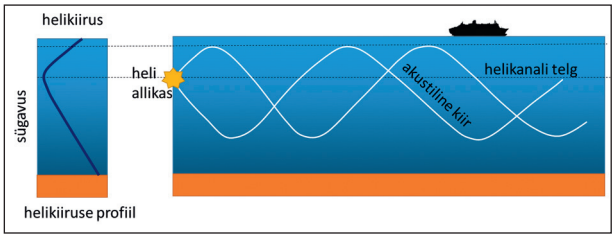
MEREKESKKOND JA KOMMUNIKATSIOON

Juba sajandeid on inimene vallutanud maid ja merd, viimase sajandi jooksul on ta loonud aparaate, mis lubavad liikuda suurtele kaugustele nii õhus kui ka kosmoses. Sellist kiiret arengut soodustas asjaolu, et õhus ja kosmoses levivad raadiolained, mis lubavad sidet pidada ning lendavaid aparaate juhtida. Kuid siinsamas Maa peal mere sügavuste uurimine edeneb küllalt suure vaevaga. Tänapäevani on harulduseks aparaadid, mis võimaldavad uurida merepõhja suurtel sügavustel, kus aparaadi korpus peab vastu pidama ülisuurtele rõhu koormustele. Üks sellise aeglase arengu põhjustest peitub selles, et raadiolained ei levi merevees ja seetõttu on side võimalik vaid kaablite kaudu, mis oluliselt piirab kommunikatsiooni kaugust. Ka valgus levib vees küllalt väikeste vahemaade ulatuses, sõltuvalt vee puhtusest. Läänemere nähtavus vees on piiratud enamasti mõne meetriga, rääkimata maailma ookeani sügavustest, kuhu pole kunagi pääsenud päikese kiired. Kuidas on võimalik edastada informatsiooni vees? Selgub, et kõige kindlam ja ookeani vees kaugele levivate lainete liik on heli- ehk akustiline laine.

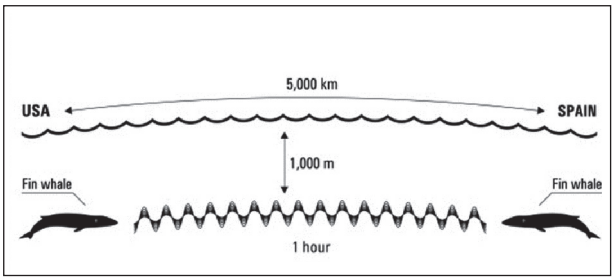
Helilaine nii õhus kui ka vedelikus kujutab endast pikilainet ehk keskkonna tihenemisi ja hõrenemisi, mis levivad heliallikast eemale. Võrreldes raadiolainetega on helilained üliaeglased. Kui raadiolaine ja valgus levivad õhus kiirusega 300 000 000 m/s, siis helilained vees levivad kiirusega 1500 m/s ehk kaks miljonit korda aeglasemalt. Selline suur kiiruste erinevus lubab mõõta heli kiirust. Piisab valguse ja helisignaali üheaegsest saatmisest näiteks veealuse kella ja püssirohu põletamise abil. Nii toimuski esimene dokumenteeritud helikiiruse mõõtmine vees Genfi järvel 1826. aastal. Seda tegid Šveitsi füüsikud Jean-Daniel Colladon ja Charles-Francois Sturm. See sündmus oli jäädvustatud gravüüril (joonis 1).



Joonis 1. Helikiiruse mõõtmine Genfi järvel 1826. aastal.



Joonis 2. Sügavusel, kus helikiirus on minimaalne, tekib helikanal.



Joonis 3. Vaalad kasutavad ookeani helikanaleid omavaheliseks kommunikatsiooniks. (https://whalevocalization.weebly.com/why-use-sound.html)

Mõõdetud helikiiruseks saadi tookord 1435 m/s vee temperatuuri juures 8 ˚C. See tulemus erines vaid mõni meeter sekundis tänapäeval mõõdetud väärtusest. Helikiirus sõltub vee temperatuurist, vee soolsusest, aga ka vee sügavusest. Helikiirus ookeani soolases vees muutub vähe ja on reeglina vahemikus 1450–1540 m/s, kuid isegi nii väike muutus mõjutab oluliselt heli levimist ookeanis. Vee temperatuuri tõusuga helikiirus suureneb, mistõttu ookeani ülemises veekihis on helikiirus suurem. Sügavusega vee temperatuur langeb ja langetab helikiirust, kuid veel suurematel sügavustel hakkab helikiirus jälle kasvama hüdrostaatilise rõhu kasvu tõttu. Nii tekib helikiiruse profiilis miinimum ookeani tingimustes umbes 1000 meetri sügavusel. Kui heliallikas asub sellisel sügavusel, jääb heli veekihtide vahel lõksu ning tänu sellele levib erakordselt kaugele – tuhandete kilomeetrite kaugusele. Sellist nähtust nimetatakse helikanaliks (joonis 2). Vaalad võivad sukelduda väga suurtele sügavustele, tihti üle 1000 meetri, ning sealt edastatud hüüe kostab tuhandete kilomeetrite kaugusele üle ookeani (joonis 3).

Helilained peegelduvad oma levimise teekonnal mitmekordselt nii vee pinnalt, merepõhjalt kui ka vees olevatelt osakestelt ja õhumullidelt, mistõttu akustiline signaal on oluliselt moonutatud. Kuid vaatamata sellele jääb heli mereloomadele, eeskätt mereimetajatele põhiliseks kommunikatsioonivahendiks. Vaalalised kasutavad helisignaale nii

Fotodel: Läänemeres elavad pringel ja hallhüljes.

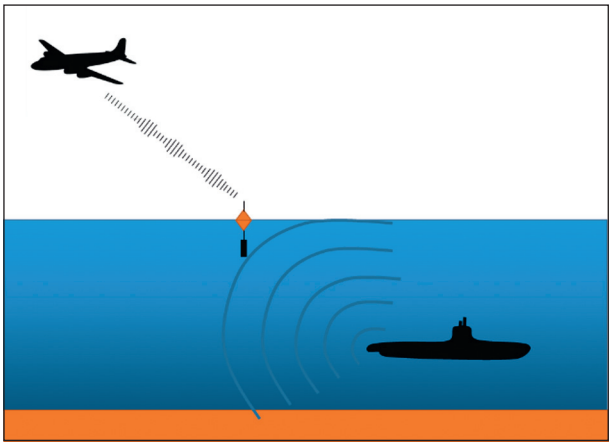
suhtlemiseks kui ka jahtimiseks. Läänemere lõunaosas elav vaalaline pringel kasutab kala püüdmiseks kõrgsageduslikke impulsse sagedusel 45 kHz ja avastab saaki saabunud kajasignaalide järgi. Hülglased teadaolevalt kajalokatsiooni ei kasuta. Erinevalt vaalalistest saavad hülglased suhelda ka õhus, kuid ka nende jaoks on allvee heli oluline kommunikatsioonivahend. Hallhüljestel *(Halichoerus grypus macrorynchus)* on teada mitu tüüpi hüüdeid, mida nad kasutavad omavahelises suhtlemises, eriti paaritumisajal. Need hüüded jäävad peamiselt sagedusvahemikku 100–300 Hz, kuid üksikute hüüete sagedused tõusevad 4000–5000 Hz-ni. Loivaliste hääleline kommunikatsioon toimub küllalt laias sagedusvahemikus nii õhus kui ka vees. See sagedusvahemik langeb kokku ka laevamüra sagedusvahemikuga. Teatud heliintensiivsuse juures toimub hüljeste kommunikatsiooni maskeerimine. Maskeerimise mõju on kogenud igaüks, kes on üritanud vestelda mürarikkas kohas, näiteks diskosaalis. Mereimetajate puhul on kuulmisel väga oluline roll ning nende kõrvade helitundlikkus on äärmiselt kõrge, mistõttu maskeerimine ohustab loomade igapäevaste tegevuste kulgu. Kuna mereimetajad veedavad oma elu peamiselt vees, vajavad nad palju kõrgekalorilist toitu oma energeetilise tasakaalu säilitamiseks. Akustiline maskeerimine võib aga saakloomade leidmist oluliselt raskendada.

KASSI JA HIIRE MÄNGUD – HÜDROAKUSTIKA MILITAARRAKENDUSI

Kuna merekeskkond on suhteliselt läbitungimatu, ei saanud inimesed seda kasutamata jätta ka sõjalistel eesmärkidel. 20. sajandil tulid laevastikes laialt kasutusele allveelaevad ning neist said sõjaajaloo ühed kõige surmavamad relvad. Tungiv vajadus tuvastada veesügavuses peituvat vaenlast ja samas mitte reeta oma asukohta tõi kaasa hüdroakustika tormilise arengu. Kui Esimese maailmasõja ajal võeti kasutusele esimesed sonarid, siis Teise maailmasõja ajal arendati seadmeid, mis lubasid avastada mere sügavustes peituvaid allveelaevu isegi lennukite pardalt.

Selleks viskas lennuk huvipakkuvas merealas, kus allveelaevu otsiti, alla erilisi poisid. Iga poi oli varustatud vees oleva hüdroakustilise anduriga ja merepinnal oleva raadioantenniga. Kõik registreeritud akustilised signaalid edastati raadiolainete abil. Lennuk kogus allvee helide informatsiooni ning tuvastas selle abil veealused müraallikate asukohad (joonis 5).

Tänapäeva allveelaevadel on väga tundlikud „kõrvad“ – hüdroakustilised antennid –, mis lubavad identifitseerida ja reaalajas jälgida mitmeid sihtmärke, olgu need veepealsed laevad, torpeedod või teised allveelaevad. Kuna allveelaevad on aastatega muutunud väga vaikseteks, on ka nende tuvastami-

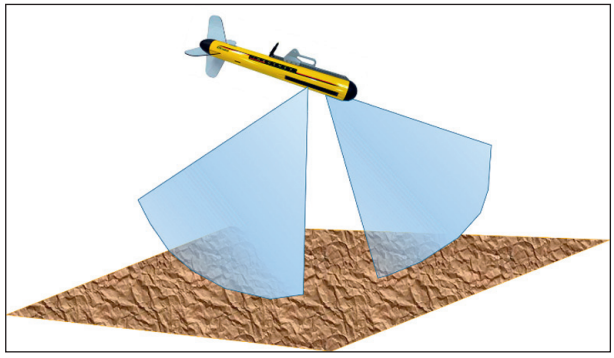


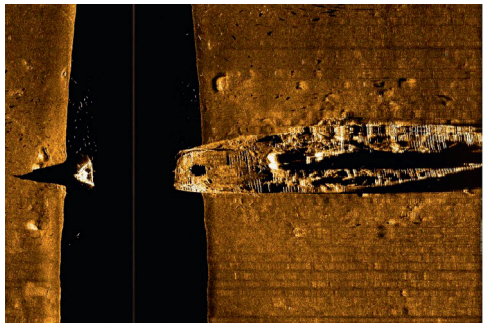
Joonis 5. Hüdroakustiline poi tuvastab akustilisi signaale vees ning saadab neid edasi raadiolainetena.

seks loodud üha täiuslikumad hüdroakustilised süsteemid – nii passiivsed kui ka aktiivsed sonarid. Ei saa mainimata jätta ka veealuste droonide-robotite viimase aastakümne kiiret arengut, kus hüdroakustikal on tähtis roll autonoomsete sõidukite juhtimisel ja informatsiooni edastamisel.

HÜDROAKUSTIKA TSIVIILKASUTUSES

- Kajaloodid on seadmed, millega on varustatud kõik laevad. Need on sonarid, mille saadetud kõrgsageduslik akustiline signaal peegeldub merepõhjalt ja annab informatsiooni mere sügavusest.
- Kalaloodid on sonarid, mis töötavad sarnaselt kajaloodidega, kuid nende võimsus on suurem, kuna otsitav sihtmärk on väiksem. Otsitav peegeldus tuleb peamiselt kala ujupõiest.
- Külgsonarid merepõhja kaardistamiseks on sonarid, mida triivitakse etteantud sügavusel. Külgsuunas saadetud kõrgsageduslikud akustilised signaalid peegelduvad merepõhjalt tagasi ning saadud signaalide töötlemisel saadakse kõrge lahutusvõimega merepõhjapilte (joonis 6).





Joonis 6. Ülal – külgsonari saadetud kõrgsageduslikud akustilised signaalid peegelduvad merepõhjalt tagasi ning lubavad saada kõrge lahutusvõimega merepõhjapilte. All – külgsonari pilt laevavrakist.

Merepõhjaalused uuringud võimaldavad saada informatsiooni geoloogilistest kihtidest ja ka maavarade olemasolust. Ka siin on kasutusel sonari põhimõte, kuid kasutusel on väga suure võimsusega akustilised saatjad, mille signaalid läbivad veekihi ning peegelduvad merepõhjaalustest eri omadustega geoloogilistelt kihtidelt tagasi. Kasutusel olevad akustilised signaalid on ohtlikud mereloomadele. Näiteks läheduses olevatel mereimetajatel võib intensiivse heli tõttu tekkida ajutine või alaline kuulmisläve nihe.

Hüdroakustilised salvestajad võimaldavad mõõta ümbritseva heli intensiivsust ning ka kaudsetel meetoditel uurida veesamba omadusi, kasutades näiteks hüdroakustilist tomograafiat.

Hüdroakustilised positsioneerimisseadmed paigaldatakse tihti merepõhja ning nende saadetud

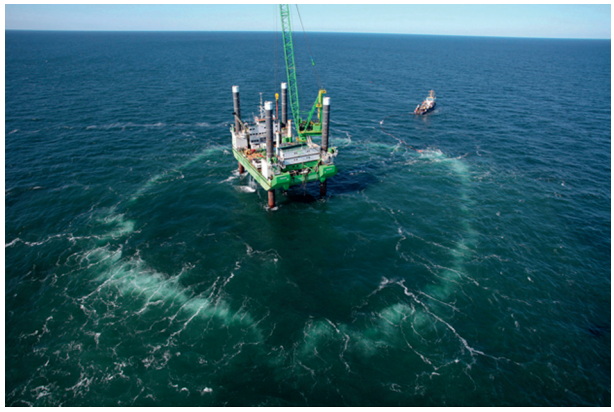
signaalide järgi saab määrata merepõhja erinevate punktide koordinaate.

HELI VÕI MÜRA?

Oma kogemustest teame, et meid ümbritsev maailm on helisid täis. Osa neist on meeldivad, osa kasulikud, kuid on ka häirivaid ja ebameeldivaid helisid, mida nimetatakse müraks. Liigset ja ebameeldivat inim-, loom- või masintekkelist keskkonnamüra, mis häirib inimeste või loomade elutegevust, nimetatakse mürareostuseks. Keskkonnaks võib olla nii õhk kui ka merekeskkond. Viimase puhul on suurimaks saasteallikas just inimtekkeline müra. Eristatakse kaht tüüpi inimtekkelise müra allikaid – impulssmüra ja pideva müra allikad.

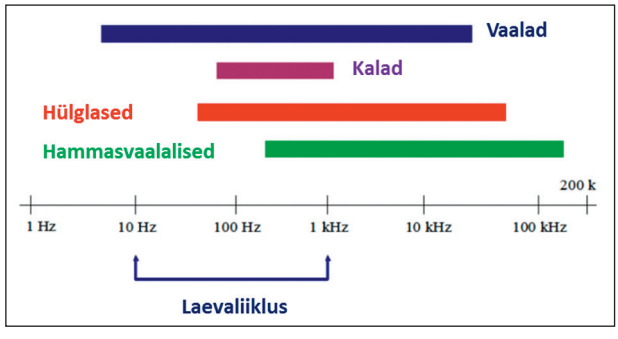
Impulssmüra põhiallikateks on plahvatused, merepõhja geoloogilised uuringud ja ehitustööd. Ehitustööde näitena võib tuua vaiade rammimise, mille puhul merekeskkonda satub rohkesti akustilist energiat. Mereimetajate tundlikud kõrvad tunnevad vaiade rammimise müra rohkem kui 10 kilomeetri kaugusel. Rammimise koha lähedale sattuvad loomad saavad suure tõenäosusega kuulmistraumasid. Akustilise energia neeldumiseks ning merekeskkonnale kahjuliku mõju leevendamiseks lastakse vette õhumullide pilvi, mis moodustab vaia ümber „kardina“ (joonis 7). Loomulikult on selline tegevus energiamahukas ja kallis, mis paneb teadlasi ja insenere mõtlema uutele lahendustele avamereehituses.

Teisteks impulssmüra allikateks on merel sooritatavad plahvatused, mis leiavad aset kas ehituses või vanade meremiinide kahjutukstegemisel. Ka siis on risk, et mõni mereimetaja võib kahjustusi saada. Mereväelased kontrollivad hüdroakustiliste süsteemide abil tihti, et plaanitava plahvatuse piirkonnas ei oleks vaalade ja delfiinide saadetavaid akustilisi signaale, mis on märk, et mereimetajaid ohtlikus tsoonis pole.

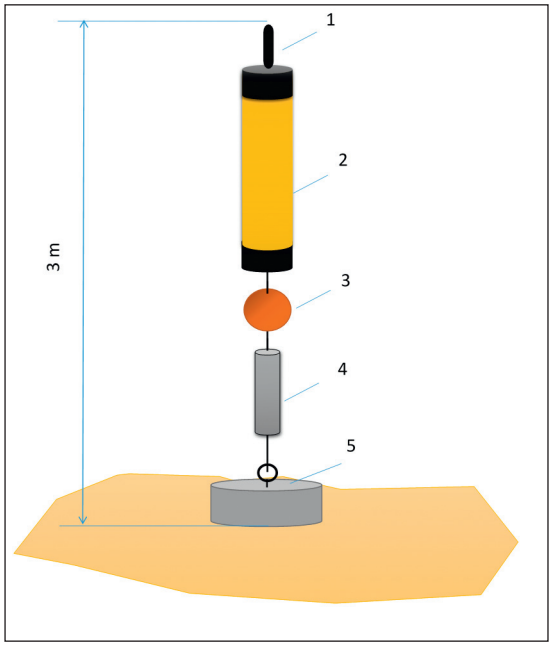


Joonis 7. Vaiade rammimine avamerel koos leevendusmeetmetega – õhumullide pilve genereerimisega.

Pideva müra allikaks on peamiselt laevaliiklus. Uuringud näitasid, et viimase poole sajandiga on laevaliiklus kahekordistunud ning laevade genereeritud müra on märgatavalt kasvanud üle maailma. Laeva müra pärineb peamiselt sõukruvi pöörlemisest, kui sõukruvi laba tekitab kavitatsioonimulle. Mullide tekkimine ja kadumine tekitab laiaribalist müra, mida on eriti hästi kuulda sagedusvahemikus 10–10 000 Hz. Teisteks müraallikateks on laeva masinad ja hüdrodünaamiline müra laeva liikumisest. Laevaliikluse müra spekter kattub paljude mereliikide kasutatavate sagedusribadega (joonis 8) ning seega võib maskeerida mereliikide elutähtsaid tegevusi.



Joonis 8. Laevaliikluse müra sagedusriba võrdlus mereloomade kasutatavate sagedusribadega.



Joonis 9. Vasakul merepõhjapoijaama skeem: 1 – hüdrofon, 2 – SM2M andmeloger, 3 – ujuk, 4 – akustiline vabastaja, 5 – betoonist ankur; paremal poijaama ettevalmistamine veeskamiseks uurimislaeva Salme pardal.

Euroopa parlament ja nõukogu võtsid 17. juunil 2008 vastu direktiivi 2008/56/EÜ, millega kehtestatakse ühenduse merekeskkonnapoliitika tegevusraamistik (merestrateegia raamdirektiiv; edaspidi MSRD). Selle direktiivi kehtestatud raamistiku piires rakendavad liikmesriigid vajalikke meetmeid, et säilitada või saavutada hiljemalt 2020. aastaks oma mereala hea keskkonnaseisund. MSRD paneb igale liikmesriigile kohustuse töötada välja ja rakendada oma merealas ökosüsteemist lähtuv merestrateegia, mille eesmärk on:

- kaitsta ja säilitada merekeskkonda, hoida ära selle seisundi halvenemine ning taastada võimaluse korral mereökosüsteemid piirkondades, kus need on kahjustatud;
- hoida ära ja vähendada heiteid merekeskkonda, järk-järgult kõrvaldada reostus, et see ei mõjutaks ega ohustaks oluliselt mere elustiku mitmekesisust, mere ökosüsteeme, inimese tervist ega mere õiguspäraseid kasutusviise.

Üheks heidete liigiks on tunnistatud ka inimtekkeline müra. MSRD nõuab, et kogu inimtekkelise impulss- ja pideva müra tase ei ületaks mereloomade populatsioonidele kahjulikult mõjuda võivat taset. Kahjulikuks mõjuks peetakse mereloomade elupaikade hävimist kommunikatsiooni ruumi kadumise tõttu ning kroonilise pikaajalise stressi mõjul.

2014. aastal toimus Läänemeres ELi Life+ BIAS projekti raames ulatuslik pideva müra monitooring. BIAS (*Baltic Sea Information on Acoustic Soundscape* – Läänemere helipildi informatsioon) projektis osales kuus rannikuriiki (Rootsi, Taani,

Saksamaa, Poola, Eesti ja Soome), kes mõõtsid veealust müra kogu 2014. aasta jooksul üheaegselt 38 mõõtmispunktis.

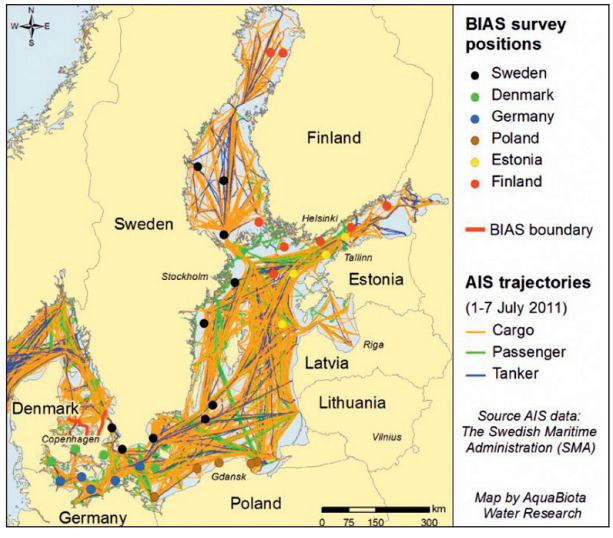
Projektis kasutusel olnud poijaamad paigaldati merepõhja. Salvestamisseade oli varustatud patareidega, mis võimaldas seadme pikaajalist töötamist autonoomses režiimis. Pärast tööperioodi poijaam vabastati ning see tõusis merepinnale ja tõsteti ümberseadistamiseks ja andmete salvestamiseks laeva pardale (joonis 9).

Heli mõõtmine üksikutes punktides ei anna veel kogu pilti meres toimuvast. Selleks et saada helipilti kogu mereala jaoks, kasutati veealuse helilevi modelleerimist. Mudel võtab arvesse nii looduslikke tingimusi (sügavus, helikiiruse profiil, loodusliku müra genereerimine merelainete poolt jne) kui ka laevade liikumise trajektoore ning laevade akustilise energia kiirgamist vette. Laevade liikumist on võimalik jälgida automatiseeritud infosüsteemi (AIS) kaudu. Süsteem on loodud laevaliikluse ohutuse tagamise eesmärgil. Kõik suuremad laevad on varustatud AIS-saatjatega ning tänu sellele on nähtavad teistele liiklejatele. AISi signaalide põhjal joonestatud laevaliikumise trajektoorid on toodud joonisel 10. Samal joonisel on näidatud ka BIAS projekti mõõtmispunktid, iga riigi jaoks eri värviga. Kaardilt on näha, et kaubalaevade laevateed ühendavad suuri sadamaid ning suunduvad läbi Taani väinade Põhjamerre.

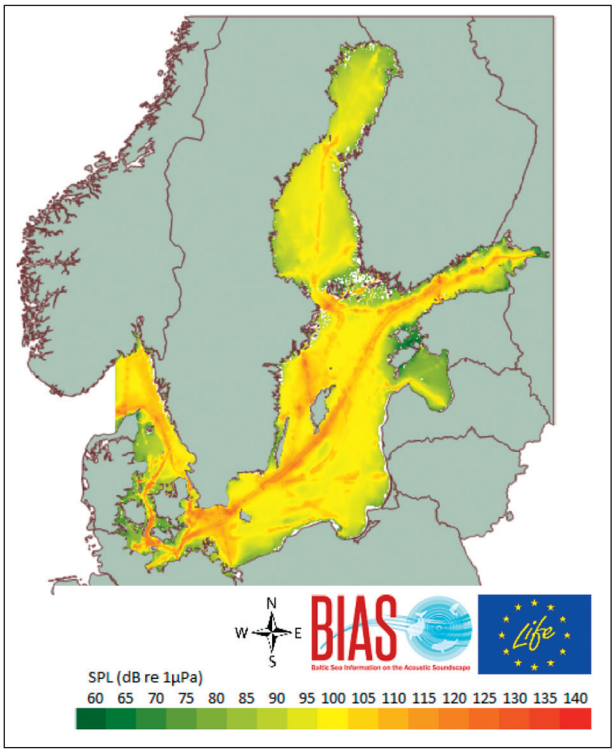
Kuna allvee heli on ajas kiiresti muutuv, peab modelleerimistulemuste esitamiseks tulemusi keskmistama. Joonisel 11 on esitatud 2014. aasta keskmine helirõhu tase ühikutes dB re 1 µPa ehk detsibellides, mille referentsrõhuks on 10^{-6} paskalit. Peab arvestama sellega, et detsibelle vees ei tohi otse võrrelda detsibellidega õhus, kuna nende arvutusmetoodika on väga erinev. Kui 100 dB õhus on väga tugev heli, siis vees on 100 dB pigem keskmise intensiivsusega heli. Kuid helil on ka sageduse „dimensioon“. Tavaliselt on helil palju sagedusi, kuid mõned sagedusvahemikud on levinumad. Nii näiteks on laevamüra tugev kolmandikuoktaavis 125 Hz, see on sagedusvahemik, kus tasub laevamüra otsida.

Viimastel aastakümnetel on ühiskond teadvustanud, et inimtekkeline allvee müra on meresaaste liik, mille kahjulik mõju peab olema õigesti ja adekvaatselt hinnatud. Kui teaduslikult põhjendatud hinnangud on tehtud ning olukord on tõsine, on aeg probleemiga tegeleda ja leevendusmeetmeid rakendada. Loomulikult ei pane keegi seisma ei laevaliiklust ega avamereehitust, kuid kahju keskkonnale saab alati minimeerida nii, et mereloomade kasutatavatel aladel on loomadele tähtsal ajal teatud mürarikkad tegevused piiratud ajas või ruumis või edasi lükatud soodsamale ajale.

Kahjulikuks peetakse mõju, mille tulemusena on hävinud mereloomade elupaik. Näiteks vaiade rammimise tõttu on teatud merealast lahkunud pringlid ning pärast tegevuse lõppemist pole nad tagasi tulnud. Või mõne teise mereala merepõhja süvendamistööde tõttu oli pikemat aega kestnud tugev müra, mis on sundinud oma lesilatest lahkuma hallhülged. Selliste olukordade vältimiseks

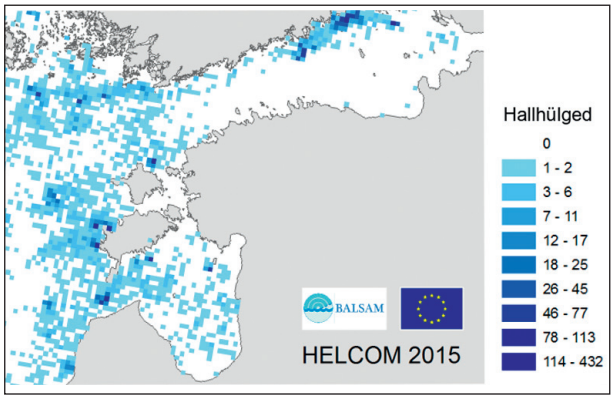


Joonis 10. Läänemere laevaliikluse kaart. Punktidega on tähistatud BIAS projekti mõõtepunktid.



Joonis 11. Läänemere helipilt – 2014. aasta keskmine helitase. Sagedusvahemik – kolmandikoktaav 125 Hz. On toodud tugevaim heli, mis esineb 10% ajast, helirõhk (detsibellides) on keskmistatud.

tuleb ühelt poolt ennustada inimtekkelise müra intensiivsust ning ruumilist ulatust. Teiselt poolt tuleb aga täpselt määrata merealasid, mida mereloomad kasutavad. Üks meetod mereloomade liikumisteede tuvastamiseks on telemeetria. Väikese GPS-saatjaga kiibistatud loom saadab signaale oma liikumise ajal. Satelliidi kaudu saadud signaalid kantakse mereala kaardile ning selle tulemusena saadakse hinnanguid loomade esinemistiheduse kohta. Tuues kokku helikaardid ja loomade esinemistiheduse informatsiooni, on võimalik teha järeldusi võimaliku kahjuliku mõju kohta merekeskkonnale.



Joonis 12. Telemeetrilise saatjaga kiibistatud hallhüljes (pildi autor: SMRU), paremal on satelliittelemeetrial põhinev (kiibistatud isendite) hallhüljeste esinemine 5 × 5 km suurustes ruutudes [www.helcom.fi].

LÕPPSÕNA

Tehnoloogia arenguga inimtegevus intensiivistub nii maa peal kui ka merealadel ning sellega kaasneb loomade elupaikade häving. Teiste kahjulike mõjude kõrval on oma roll ka inimtekkelisel veealusel müral, mis on tihti vältimatu, kuid selle ulatust on võimalik ennustada ning vajaduse korral leevendusmeetmeid rakendades ka piirata. Teadusuuringute ülesandeks on välja selgitada, kui suur on meremüra pikaajaline mõju mereloomadele,

milliseid tehnoloogilisi lahendusi saaks kasutada laevamüra vähendamiseks ning merekeskkonna seisundi parandamiseks.

VIITED

EU. 2008. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008, establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive). – Official Journal of the European Union, L164, 19–40.

Jüssi, I., Jüssi, M. 2001. Tegevuskava hallhüljeste kaitse korraldamiseks Eestis aastatel 2001–2005. – Eesti Ulukid, 7, 13–17.

Jüssi, I., Jüssi, M. 2015. Viigerhülge (*Phoca hispida*) kaitse tegevuskava (2015–2019). https://www.envir.ee/sites/default/files/viigerhyljes_ktk_kodukale.pdf

Klauson, A., Laanearu, J., Mustonen, M. 2017. Veealuse akustilise müra seire Soome lahes. Aruanne. Keskkonnainvesteeringute keskus. https://www.ttu.ee/public/e/ehituse-ja-arhitektuuri-instituut/LMIN16081_aruanne.pdf

Sigray, P., Andersson, M., Pajala, J., Laanearu, J., Klauson, A., Tegowski, J., Boethling, M., Fischer, J., Touaard, J., Wahlberg, M., Nikolopoulos, A., Folegot, T., Matuschek, R., Verfuss, U. 2016. BIAS: A Regional Management of Underwater Sound in the Baltic Sea. – Popper, A. N., Hawkins, A. (eds). The Effects of Noise on Aquatic Life II. Springer, 1015–1023. (Advances in Experimental Medicine and Biology; 875).

Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Greene, C. R. Jr., Kastak, D., Ketten, D. R., Miller, J. H., Nachtigall, P. E., Richardson, W. J., Thomas, J. A., Tyack, P. L. 2007. Marine mammal noise exposure criteria: initial scientific recommendations. – Aquatic Mammals, 33 (4), 411–521.

NANOKIULISED MATERJALID

Andres Krumme, Anti Viikna, Tiia Plamus, Mihkel Viirsalu
Tallinna tehnikaülikooli materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut,
polümeeride ja tekstiilitehnoloogia labor

SISSEJUHATUS: NANOKIULISTE MATERJALIDE OLEMUS JA KASUTUSVALDKONNAD

Kiud on tekstiilmaterjal, mida iseloomustab painduvus, väike läbimõõt ning pikkuse ja läbimõõdu suur suhtarv. Kasutusel on mõiste monofilamentkiud, mis sisuliselt on „lõputu“ pikkusega kiud. Monofilamentkiud vajadusel staapeldatakse, st lõigatakse kindla pikkusega kiuks, nn staapelkiuks. Tekstiilitehnoloogias kasutatakse kiude niidi ja lõnga ketramiseks, millest omakorda kootakse riiet, trikotaažkangast ja muid tekstiilmaterjale. Tekstiilkiududest võib toota ka erinevaid lausmaterjale, milles kiud paiknevad juhuslikult või mingi tasapinna järgi korrastatuna. Kiudusid klassifitseeritakse keemilisteks (tehiskiud, sünteetilised kiud ja anorgaanilised keemilised kiud) ja looduslikeks (taimsed, loomsed ja mineraalsed) kiududeks. Keemilisi kiudusid toodetakse erinevate ketrusmeetoditega. Samas on võimalik tekstiilkiudusid toota ka erineva jämedusega (peenusega) – mikrokiud ja nanokiud. Neid on võimalik toota ketrusmeetodite mõningase modifitseerimisega või näiteks ka kiudude lõhestamisel või eraldamise meetodil.

Eesliide *nano-* (kr *νάνος* 'kääbus') väljendab üldjuhul miljardikku (1/1 000 000 000) põhimõõtmest, antud juhul kiudude läbimõõdust meetrites. Nanotehnoloogia on teadus- ja tööstusharu, mis käsitleb nanomõõtmetes objekte. Siia valdkonda jäävad üldjuhul sellised materjalid, struktuurid ja vahendid, mille vähemalt üks mõõde on alla 100 nanomeetri (nm). Tekstiilitehnoloogia puhul kuuluvad siia valdkonda ka teatavate mööndustega objektid, mille väikseim mõõde on alla 500 nm

Autorid (vasakult): Anti Viikna, Andres Krumme, Tiia Plamus, Mihkel Viirsalu.

(Ramakrishna jt, 2005). Levinud tekstiilmaterjalid koosnevad enamikus kiududest, mille läbimõõt on 10–100 korda suurem.

MIKS NANOKIUDE VALMISTATAKSE JA UURITAKSE EHK MILLISEID ERILISI OMADUSI ANNAB ÜLIPEENIKESTE KIUDUDE KASUTAMINE?

On täheldatud, et nanokiududel on märkimisväärselt kasvanud nende tugevus ja sitkus. Kuna nanokiudude läbimõõt on lähedane üksikute aatomite ja molekulide mõõtmetele, sunnib selline piiratud ristlõige kiude moodustavaid makromolekule orienteeruma ja korrastuma kiudude pikkusmõõtme suunas. Korrastatud makromolekulidest struktuur on heade mehaaniliste omaduste tekkimise eeldus, sest sel juhul saavad makromolekulide

vahelised molekulaarjõud neid omavahel tugevamalt siduda. Nii tugevuse kui ka sitkuse kasv on eksponentsiaalne, kui kiudude läbimõõt kahaneb alla 150 nm (Papkov jt, 2013).

Kiudude üheks tähtsamaks omapäraks on nende suur vastupidavus painutamisele, st võime taluda purunemiseta väga järske painutusi. Põhjuseks on kiudude paindejäikuse kahanemine.

Kiu paindejäikust R saab arvutada valemiga (Morton, Hearle, 1997)

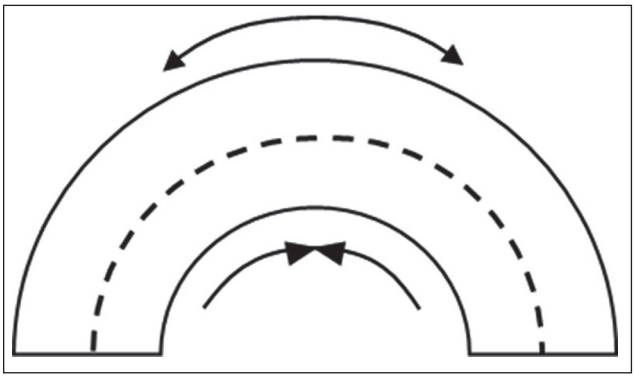
$$R = \frac{1}{4\pi}\frac{\eta E T^2}{\rho}, \quad (1)$$

kus E on erielastsusmoodul tõmbel (N/tex), η on kiu ristlõike kuju faktor (väärtus ringikujulise ristlõike puhul on 1), ρ (g/cm^3) on tihedus ja T (Tex) on joontihedus:

$$T = \frac{\pi d^2}{4}\rho\,. \quad (2)$$

Valemitest (1) ja (2) tuleneb, et kõige enam mõjutab paindejäikuse väärtust kiu läbimõõt ehk diameeter *d*, mille vähenemisel 10 korda väheneb paindejäikus 10^4 korda.

Kiudude painderaadius väheneb üleminekul väliskaarelt sisekaarele. Kiu U-kujulisel painutamisel rakenduvad välis- ja sisekaarel paindekohtades erinevad pinged (joonis 1). Painde väliskaarel esinevad tõmbepinged (kiud venib pinnalt välja) ja sisekaarel survepinged (kiud surutakse sisekaarel kokku). Sealjuures pinged kasvavad kiu keskteljest kaugenedes. Seega, mida suurem on kiudude diameeter, seda suuremad on ka tõmbepinged väliskaarel ja, vastupidi, kiu diameetri vähenemisel pinged väliskaarel vähenevad. Seega on ka vastusurve (jõud) painutamisele väiksem, väheneb võimalus kiu kahjustamiseks paindejõudude toimel. Seega on praktikas kiudu võimalik painutada väiksema painderaadiusega.



Joonis 1. Painutatud kiule rakenduvad tõmbejõud väliskaarel ja survejõud sisekaarel. Keskteljel (punktiirjoon) jõud puuduvad.

Eripinget väliskaarel võib arvutada valemiga (Viikna, 2005):

$$\sigma = E\frac{1}{2r/d + 1}, \quad (3)$$

kus r on painderaadius keskteljel.

See valem võimaldab leida teatava diameetriga kiule minimaalse võimaliku painderaadiuse ilma purunemiseta kiu väliskaarel, juhul kui tõmbekatsetest on teada tema erielastsusmoodul ja eripinge purunemisel. Näiteks 10 µm diameetriga polüesterkiu puhul, mille erielastsusmoodul on 10 N/tex ja eripinge purunemisel on 0,5 N/tex, peab painderaadius olema vähemalt 100 µm, et eripinge väliskaarel ei ületaks eripinget purunemisel. 100 nm diameetriga kiudude puhul on aga nõutav minimaalne painderaadius ainult 1 µm. Piltlikult võib võrrelda arvutihiire juhtme ja elektrimontaažikaabli painutamist. Viimase minimaalne painderaadius on märgatavalt suurem.

Kiudude diameetri kahanemisel suureneb kiudude eripindala (pindala massiühiku kohta). Eripindala on võimalik arvutada järgmise valemi abil (Neckar, Das, 2012):

$$a = \frac{4(1+q)}{\rho d}, \quad (4)$$

kus q on kujufaktor (silindrilise objekti korral on selle väärtus 0). Sellest valemist tulenebki, et eripindala suureneb proportsionaalselt diameetri kahanemisega. Näiteks eelnevalt mainitud 10 µm

Tabel 1. Nanokiuliste materjalide kasutusvaldkonnad (Bhardwaj, Kundu, 2010)

Elektrienergia salvestus ja tootmine • Superkondensaatorid • Akud • Kütuseelemendid • Piesoelektrilised materjalid	**Meditsiin** • Antibakteriaalsed plaastrid ja sidemed • Rakkude kasvusubstraadid naha ja muude organite kasvatamiseks kunstlikes tingimustes • Kontrollitud vabanemisega ravimite ja ensüümide kandjad	**Keskkond** • Gaaside ja vedelike filtreerimine • Raskemetallide ja orgaaniliste ühendite absorbendid • Mürasummutus • Kaitserõivad
Komposiitmaterjalid • Armeering • Iseparanevad komponendid • Kahjustuste indikaatorid	**NANOKIUD**	**Keemiliste reaktsioonide katalüsaatorite kandjad**
Kahjurite tõrje põllumajanduses	**Keemiliste, füüsikaliste ja bioloogiliste protsesside sensorid**	**Vedelikku hülgavad materjalid ja kaitsekihid**

diameetriga polüesterkiu eripindala oleks silindrilise geomeetriaga ristlõike puhul ~288 m^2/kg, arvestades, et selle tihedus on 1390 kg/m^3. Samast materjalist kiudude eripindala oleks 100 korda väiksema diameetri (100 nm) puhul ~28 777 m^2/kg. Selliste kiudude kilogrammis sisalduvate kiudude pindala kataks enam kui neli jalgpalliväljakut. Suurem eripind soosib kõiki keemilisi ja füüsikalisi protsesse, mis on seotud kiudude pinnaga, nt filtreerimine, katalüüs, energia salvestamine, bioloogilised protsessid jne.

Nanokiududest on võimalik valmistada lausmaterjale, kus kiududevahelised tühimikud ehk poorid on samuti nanoskaalas ja seega sobivad peenosakeste filtreerimiseks nii õhust kui ka vedelikest. Nanokiudude mõõtmed sobivad rakkude kasvatamiseks, kuna meenutavad nende loomulikku kasvukeskkonda ning soodustavad valkude ja rakumembraani kinnitumist (Rodriguez jt, 2012).

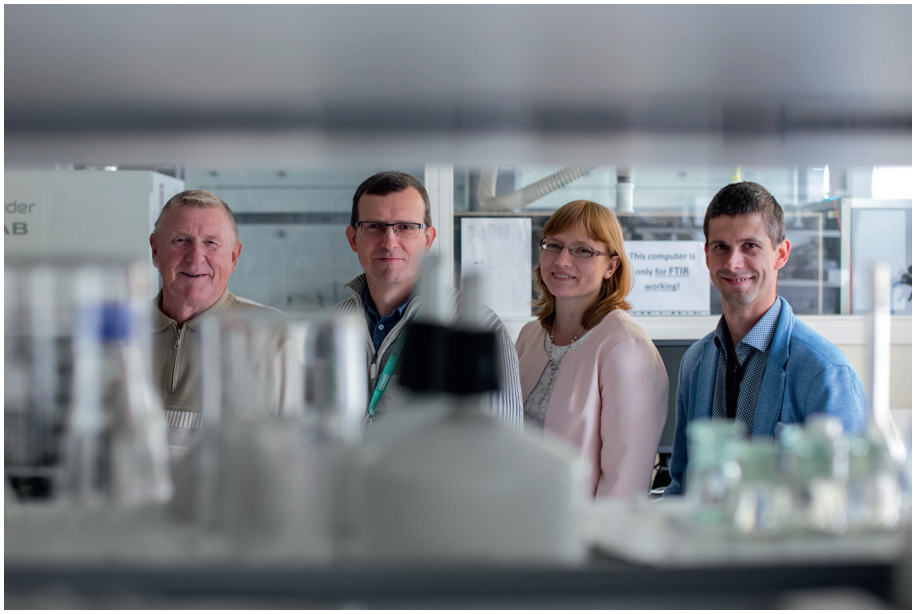
Tavapärastest kiuketrustehnoloogiatest erinevad nanokiudude valmistamise meetodid pakuvad võimaluse kiududeks vormida paljusid erinevaid polümeere, komposiite ja anorgaanilisi materjale. Seega on materjali koostisest lähtuvalt saadavate kiudude valik väga lai.

Tabelis on esitatud nanokiudude olulisemad rakendused, millest osa on uuringute faasis ja osa on jõudnud ka kaubanduslike toodeteni.

NANOKIULISTE MATERJALIDE VALMISTAMISMEETODID

Klassikalised kiudude valmistamise meetodid on järgmised (Mather, Wardman, 2015).

Ketramine sulamassist, mille käigus sulanud polümeer pressitakse läbi ketrusdüüsi avade, mis annavad kiududele ja nende ristlõikele esialgse kuju. Formeerunud kiud jahutatakse gaasivoolus, venitatakse täiendavalt makromolekulide orienteerituse ehk kiudude tugevuse suurendamiseks ja keritakse poolile.



Kuivketruseks lahustatakse polümeer orgaanilises lahustis. Lahus pumbatakse läbi ketrusdüüsi. Sealt väljunud kiududest eemaldatakse lahusti aurustamise teel kuuma gaasi voolus. Kiud pestakse lahusti jääkide eemaldamiseks, venitatakse täiendavalt ja keritakse poolile.

Märgketruse korral lahustatakse polümeer orgaaniliste või anorgaaniliste ainete vesilahuses. Lahus pumbatakse läbi ketrusdüüside koagulatsioonivanni, kus kiud lahusest välja sadenevad, või regenereeritakse keemiliste meetoditega. Seejärel pestakse kiud lahusti jääkide eemaldamiseks, kuivatatakse, venitatakse täiendavalt ja keritakse poolile. Märgketruse alamliigiks on geelketrus, kus halvasti lahustuv või ülikõrge molaarmassiga polümeer ei ole esmases etapis täielikult lahustunud, vaid on geeli olekus. Geelketrusega on võimalik valmistada kõrgest makromolekulide orienteeritusest lähtuvalt erakordsete mehaaniliste omadustega kiude.

Klassikaliste ketrusmeetodite puhul on peamisteks kiu diameetrit määravateks parameetriteks ketrusdüüsi avade läbimõõt, kiudude tõmbamise kiirus ja venitusaste ehk vahetult ketrusdüüsist väljunud ja täiendavalt venitatud kiudude läbimõõdu suhe. Mikromeetrist väiksema diameetriga kiudude tootmine pole siiski võimalik meetoditega, mis põhinevad peamiselt mehaanilistel tõmbe/venitusprotsessidel nendega kaasnevate defektide ja tootmise ebastabiilsuse tõttu (Agarwal jt, 2016). Siis rakendatakse meetodeid, mis kasutavad kiudude venitamise asemel nende formeerimiseks pigem gaasivoolu, kõrgepingevälja, kapillaarset voolamist või tsentrifugaaljõudu.

Kiudude puhumisketrus sulamassist võimaldab valmistada suurtes kogustes kiude läbimõõduga 0,5–2 µm. Sarnaselt ketramisega sulamassist kasutatakse polümeeri sulatamiseks ja sulamassi transpordiks ekstruuderit. Ekstruuderi suulises on kitsas ava (või mitu ava), mida ümbritseb koonduv kuuma gaasi vool kiirusega ~100 m/s. Intensiivne gaasivool venitab ja lõhestab avast väljuvat sulamassi üha peenemateks kiududeks, mis viimaks tahkestuvad ja kogunevad suulise ette seatud kollektorile. Kiudude hargnemise tõttu on kollektorile kogunenud kiudude mass tugevalt läbipõimunud (Pinchuk jt, 2002).

Sarnane suure tootlikkusega meetod, mis võimaldab valmistada mikromeetrist väiksema diameetriga kiude, on puhumisketrus lahusest. Polümeerilahust pumbatakse kontsentrilisse, kahekihilisse suulisesse, kus lahus liigub sisemises kanalis ja gaasivool seda ümbritsevas kanalis. Intensiivne gaasivool eemaldab lahusti ja venitab polümeerilahuse peenikesteks kiududeks, mis viimaks kogunevad kollektorile (Medeiros jt, 2009).

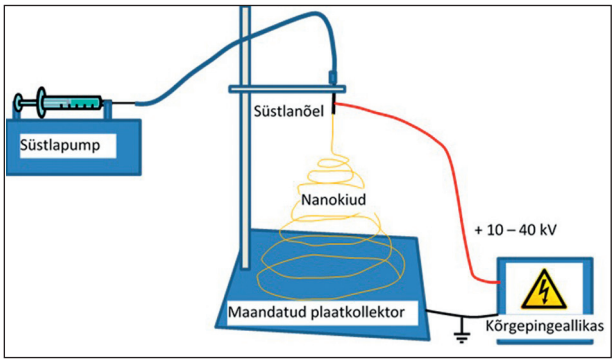
Puhumisketruse meetodite puuduseks on see, et alla 500 nm läbimõõduga „lõputuid“ ehk pidevaid kiude ei ole võimalik valmistada ning töödeldavate materjalide valik on piiratud.

Lisaks eelnevatele on välja töötatud mitmeid nanomõõtmetes kiudude valmistamise meetodeid, mis põhinevad faaside eraldumisel, kapillaarsel voolamisel, makromolekulide isekoostumisel või matriitsipõhisel sünteesil, kuid nende keerukus ja väike tootlikkus pigem välistavad edasiarendused tööstuslikeks rakendusteks (Ramakrishna jt, 2005).

Siiski on olemas nanokiudude valmistamise meetod, millel on tööstuslikku potentsiaali ja mis võimaldab valmistada väga peenikesi pidevaid kiude paljudest erinevatest polümeeridest ja komposiitidest. Selliseks meetodiks on elektroketrus.

ELEKTROKETRUS

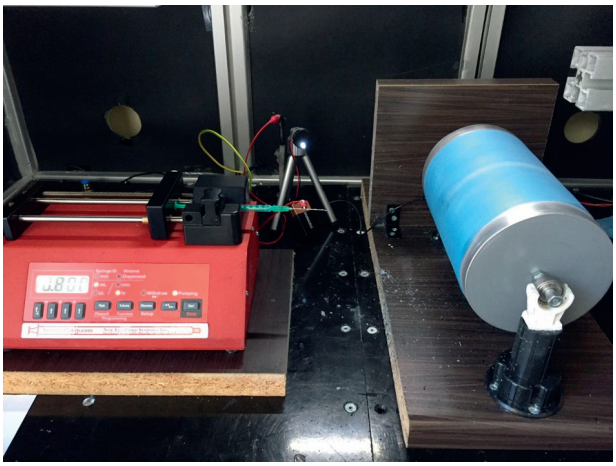
Elektroketrus põhineb kõrgepingeväljas polümeerilahusest kiudude formeerimisel. Elektroketrussüsteemi peamisteks komponentideks on kõrgepingeallikas (tavaliselt alalisvool, 10–200 kV), polümeerilahuse doseerimise seade (laboris tavaliselt süstlapump ja süstal koos polümeerilahusega) ning hästijuhtivast materjalist maandatud kollektor (joonis 2). Polümeerilahuse tilk väljub läbi doseerimisseadme kitsa ava, laboriseadme puhul tavaliselt süstla nõela kaudu, millele on rakendatud kõrgepinge. Elektrostaatiline väli ületab tilga pindpinevusjõu ja venitab lahuse maandatud kollektori suunas kiududeks. Venituse käigus lahusti eemaldub ja kollektorile kogunevad kiud diameetriga 20–2000 nm sõltuvalt erinevatest protsessi parameetritest.



Joonis 2. Lihtsa laboratoorse elektroketrusseadme skeem.

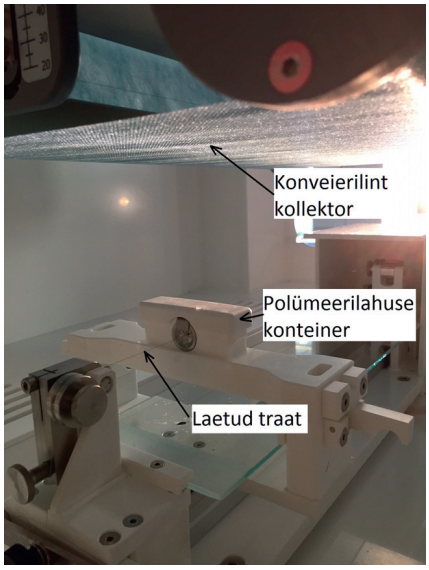
Elektroketrusel on huvitav ajalugu, mis sisaldab leiutiste unustusehõlma langemist ja taas avastamist. Protsessi patenteeris esimesena J. F. Cooley 1900. aastal (Cooley, 1900). Protsessi edasiarenduste osas, muuhulgas ka niitide tootmiseks, esitas 1934. aastal patendi A. Formals (Formhals, 1934) ja elektroketruseks polümeeri sulamassist 1936. aastal C. L. Norton (Norton, 1936). Venemaal asutasid eelmise sajandi 40. aastatel N. D. Rozenblum ja I. V. Petrjanov-Sokolov eletroketrust uuriva koolkonna, peamiselt filtermaterjalide valmistamiseks (Tucker jt, 2012). Selle töö tulemuseks on eletroketrusprotsessil põhineva tööstuse rajamine Sillamäel enam kui 50 aastat tagasi. Praegune AS Esfil Tehno on välja kujunenud 1964. aastal tööle rakendatud filtermaterjale tootva tsehhi baasil, mida on hiljem tehnoloogiliselt moderniseeritud (www.envir.ee/sites/default/files/300530_as_esfil_tehno_lahteolukorra_aruanne_parandatud.pdf). Kui Eestis toimiv ettevõtlus välja arvata, oli elektroketrus nii tööstusliku kui ka laboratoorse meetodina varjusurmas kuni 1990. aastateni, kui prof Reneker kolleegidega publitseeris artikli, kus kirjeldati nanomõõtmetes kiudude valmistamist elektrostaatilise välja abil (Doshi, Reneker, 1995). Pärast seda hakkas elektroketrusega seotud publikatsioonide arv eksponentsiaalselt kasvama ja praeguseks on see arv lähenemas 39 000-le, millest peaaegu 5000 ilmus 2017. aastal (scifinder.cas.org/scifinder/view/scifinder/scifinderExplore.jsf).

Vaatamata elektroketruse laialdasele rakendusele teadusuuringutes, ei ole see meetod veel ettevõtluses levinud. Maailmas tegutseb praegu



a)

b)



c)

Foto 1. a) laboratoorne elektroketrusseade pöörleva trummelkollektoriga, b) pooltööstuslik elektroketrusseade, kus kiud eralduvad polümeerilahusega märgunud traadilt, ning c) kollektoriks on tekstiilmaterjalist konveierilint.

15 ettevõtet (neist seitse Euroopas), kes seda tehnoloogiat kasutavad, ning 12 ettevõtet pakub elektroketruseks tööstuslikke või pilootseadmeid (electrospintech.com/industry.html). Kuna ka paljud ülikoolid ja arendusasutused kasutavad elektroketrusseadmeid, on nimetatud tehnoloogiat kasutavate tootmiskohtade arv ilmselt oluliselt suurem. Siiski võib laboriuuringute ja ettevõtete suhet võrreldes väita, et elektroketrusmeetod alles ootab tõelist tööstuslikku läbimurret.

Tänapäevane elektroketrus ei ole enam ammugi nii lihtne, kui seda on kujutatud eespool oleval skeemil. Lihtsa staatilise kollektori asemel kasutatakse pöörlevaid kettaid, trumleid (foto 1a) või konveierilinte, mis mõjutavad kiudude orienteeritust ja venitusastet. Kiude võib koguda ka kahe vastas-

märgiliselt laetud kiudude allika (nt süstlanõela) vahel tekkivast kiudude pilvest, n-ö virtuaalselt kollektorilt gaasivoolus. Sellise meetodi täpsem kirjeldus on esitatud allpool seoses niitide elektroketrusega. Laetud süstlanõel on samuti asendatud mitmete erinevate liikumatute või liikuvate, n-ö nõelavabade süsteemidega. Levinud on erineva kujuga objektid (kerad, silindrid, spiraalid, kettad, traadid), millele on rakendatud kõrgepinge ja mida regulaarselt kaetakse polümeerilahusega (foto 1c). Eeldatavasti on meetodi tootlikkus suurem, kuna suuremalt pinnalt eraldub samaaegselt palju kiude. Kiude võib eraldada ka laetud polümeerilahuse pinnal olevatest mullidest, kui lahusest gaasi läbi pumbata (Agarwal jt, 2016). Üldisest põhimõttest erinevaks meetodiks on vahelduvvoolu elektroketrus, kus kiud tekivad polümeerilahuse ja selle kohal paiknevate laetud gaasiosakeste vahel (Pokorny jt, 2014).

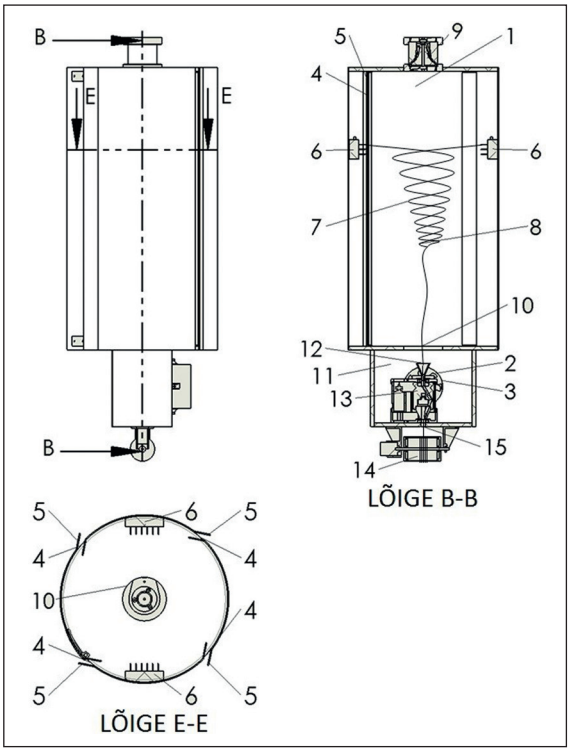
ELEKTROKETRUS TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLIS

TTÜs on elektrokedratud nanokiulised materjalid huviorbiiti tõusnud tänu nende eespool kirjeldatud olulisematele omadustele: suur eripind ja sitkus ning väike paindejäikus. Sellised kiud on sobivad erinevate painduvate või sisse kootud elektroonikakomponentide valmistamiseks, nagu kaabeldus, kondensaatorid, liikumisenergiat elektrienergiaks muutvad ehk piesoaktiivsed elemendid jne. Koostöös Euroopa Kosmoseagentuuri ja Skelton Technologies OÜga on välja arendatud uudne nanokiuline elektroodimaterjal kasutamiseks painduvates, elektrilise kaksikkihi nähtusel põhinevates superkondensaatorites (Krumme jt, 2016). Nanokiuline elektrood koosneb nanomõõtmeteni jahvatatud karbiidsest süsinikust, mis annab vajaliku mahtuvuse, ning polümeersest maatriksist, mis tagab head sitkusomadused ehk vastupanu vibratsioonile ja korduvale painutamisele. Maatriksi poorne struktuur ja teatavad lisandid võimaldavad elektrolüüdi ligipääsu mahtuvuslikule komponendile ehk karbiidsele süsinikule ja tagavad elektroodi juhtivuse. Sellisel meetodil valmistatud superkondensaatorid ja nende paketid on ennekõike ette nähtud toimima satelliitides, piiratud ruumis ja keerulistes keskkonnatingimustes, aga ka maistes rakendustes, kus kondensaator tuleb paigaldada painduvale ja piiratud pinnale (painduv elektroonika, erirõivad jne).

Erinevaid süsinikuvorme, nagu süsinik-nanotorude polümeerseid komposiite nanokiududes, on uuritud ka kiudude juhtivusomaduste ja tugevuse suurendamiseks (Vassiljeva jt, 2017), mis võib pakkuda materjale mikromõõtmetes kaabelduse väljatöötamiseks nutikates tekstiilmaterjalides, soojendusmaterjalides jne.

Kui eelnevalt kirjeldatud uudsete materjalide arendus põhineb peamiselt klassikalisel elektroketrusmeetodil, siis TTÜs tegeletakse ka uue elektroketrustehnoloogia arendamisega, seda ennekõike niitide valmistamiseks elektroketrusmeetodil. Klassikaline elektroketrus võimaldab valmistada ennekõike nanokiulisi lausmaterjale, matte ja membraane, mis piirab nende kasutust sissekootud elektroonika rakendustes. Seetõttu on eriliste omadustega nanokiulisi materjale vajalik valmistada niitide kujul. Seniseid lahendusi niitide elektroketruseks iseloomustab väga madal tootlikkus (kuni 1 m/min) (Ali jt, 2012), TTÜs on aga välja töötatud meetod, mis võimaldab niite toota kuni 200 korda kiiremini (Viirsalu jt, 2014).

Vastastikku laetud polümeerilahuse allikate vahele tekitatakse kiupilv, millele antakse esialgne keerdumus alarõhuga kambris tekitatud kunstliku tornaado ehk õhupöörise abil (joonis 3). Õhuvool suunab heide keerutusseadmesse täiendava keerdumuse andmiseks. Lisaks suurele tootlikkusele on meetodi eeliseks see, et kiududel puudub kontakt teiste seadmeosadega enne, kui need on juba formeerunud esmase keerdumusega heideks. See on oluline, kuna valmiv nanokiuline niit saavutab tugevusomadused alles pärast kiudude



Joonis 3. Niitide elektroketrus õhupöörise abil.
1) elektroketruskamber, 2) ventilaator õhu eraldamiseks, 3) ventilaatori ava, 4) pilu õhu juurdevooluks elektroketruskambrisse, 5) õhu suunaja, 6) mitmenõelaline ketrusdüüs, 7) nanokiud, 8) punkt, kus kiud formeeritakse heideks, 9) kompressor-ventilaator kambris õhu ringvoolu kiirendamiseks, 10) valmis heie tõmmatakse läbi ketruskambri põhjas olevasse niidi keerutamise seadmesse, 11) alarõhus olev niidikeerutuskamber, 12) keerutamisseadme düüs, 13) keerutusseade, 14) valmis niit, 15) niidi vastuvõtu trummel (Viirsalu jt, 2014).

kokkukeerutamist. Selline niit on juuksekarvajämedune, koosnedes ristlõikes siiski sadadest nanomõõtmetes komponentkiududest (foto 2), olles seega väga painduv ja sitke. Selliseid niite võib pärast vastava tehnoloogia arendamist valmistada mitmekihilisena, kaasates erinevaid juhtivaid, mahtuvuslikke või piesoaktiivseid materjale, valmistades seega mikromõõtmetes kaabeldust, niit-kondensaatoreid või liikumisenergia kogumise funktsiooniga kootud materjale.

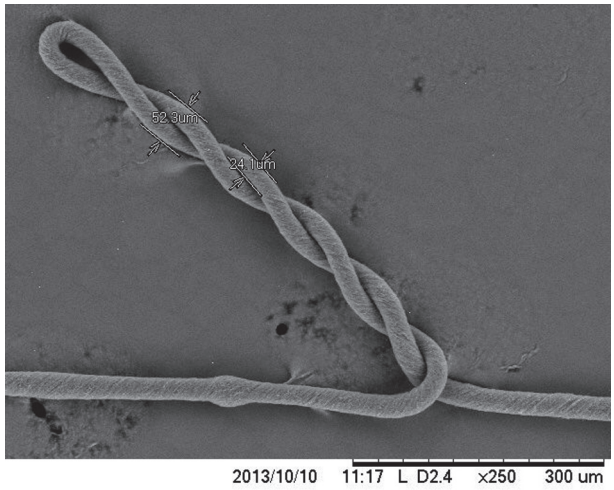


Foto 2. Skaneeriva elektronmikroskoobi pilt elektrokedratud nanokiulisest niidist.

KOKKUVÕTE

Nanokiulised materjalid koosnevad sellistest kiududest, mille läbimõõt jääb alla 500 nm. Nanoskaalas diameeter annab neile mitmed erilised füüsikalised ja mehaanilised omadused, suure eripindala ning eeldused heaks bioloogiliseks sobivuseks rakkude kasvusubstraadina. Seetõttu on neil ka mitmed unikaalsed rakendused, millest alles väike osa on jõudnud meie igapäevaellu tööstusliku toodanguna. Üheks laiemat levikut piiravaks asjaoluks on nende spetsiifilised ja keerukad valmistusmeetodid. Elektroketrus on üks perspektiivseid nanokiudude valmistamise meetodeid. Vaatamata pikale ajaloole ootab ka see meetod alles tööstuslikku läbimurret. Väljavaated selleks on siiski head, kuna selle meetodiga seotud teadusuuringud on viimasel aastakümnel eksponentsiaalselt kasvanud. Vähetuntud on fakt, et kuigi elektroketrusel põhinevat tööstust peetakse üldjuhul uudseks ja innovaatiliseks, on Eestis seda tehnoloogiat kasutav ettevõte tegutsenud juba alates 1964. aastast. Seni on peamisteks elektroketruse teel valmistatud toodeteks filtermaterjalid peenosakeste eraldamiseks.

Tallinna tehnikaülikoolis uuritakse võimalusi elektrokedratud membraanide kasutamiseks energiasalvestuses, lähtuvalt nende headest mehaanilistest omadustest ja suurest eripinnast. Samuti on välja töötatud tehnoloogia elektroketrusmeetodil niitide valmistamiseks, mis avab võimalused nanokiuliste materjalide kasutamiseks sissekootud elektroonikas ja nutikates rõivastes.

VIITED

Agarwal, S., Burgard, M., Greiner, A., Wendorff, J. H. 2016. Electrospinning. A Practical Guide to Nanofibres. Walter de Gruyter, Berlin.

Ali, U., Zhou, Y., Wang, X., Lin, T. 2012. Direct electrospinning of highly twisted, continuous nanofiber yarns. – Journal of the Textile Institute, 103, 80–88.

Bhardwaj, N., Kundu, S. C. 2010. Electrospinning: A fascinating fibre fabrication technique. – Biotechnology Advances, 28, 325–347.

Cooley, J. F. 1900. Improved methods of and apparatus for electrically separating the relatively volatile liquid component from the component of relatively fixed substances of composite fluids. GB 06385.

Doshi, J., Reneker, D. H. 1995. Electrospinning process and applications of electrospun fibers. – Journal of Electrostatics, 35, 151–160.

Formhals, A. 1934. Process and apparatus for preparing artificial threads. US 1975504.

Krumme, A., Savest, N., Leis, J., Arulepp, M., Perkson, A., Malmberg, S. 2016. A method for manufacture of electrochemical system of supercapacitor of flexible ultra-thin structure. WO2017149044A1.

Mather, R. R., Wardman, R. H. 2015. The Chemistry of Textile Fibres. The Royal Society of Chemistry. Cambridge.

Medeiros, E. S., Glenn, G. M., Klamczynski, A. P., Orts, W. J., Mattoso, L. H. C. 2009. Solution blow spinning: a new method to produce micro- and nanofibers from polymer solutions. – Journal of Applied Polymer Science, 113, 2322–2330.

Morton, W. E., Hearle, J. W. S. 1997. Physical Properties of Textile Fibres. The Textile Institute, Manchester.

Neckar, B., Das, D. 2012. Theory of Structure and Mechanics of Fibrous Assemblies. Woodhead Publishing, New Delhi.

Norton, C. L. 1936. Method of and apparatus for producing fibrous or filamentary material. US 2048651.

Papkov, D., Zou, Y., Andalib, M. N., Goponenko, A., Cheng, S. Z. D., Dzenis, Y. A. 2013. Simultaneously strong and tough ultrafine continuous nanofibers. – ACS Nano, 7, 3324–3331.

Pinchuk, L. S., Goldade, V. A., Makarevich, A. V., Kestelman, V. N. 2002. Melt Blowing: Equipment, Technology, and Polymer Fibrous Materials. Springer, Berlin.

Pokorny, P., Kostakova, E., Sanetrnik, F., Mikes, P., Chvojka, J., Kalous, T., Bilek, M., Pejchar, K., Valtera, J., Lukas, D. 2014. Effective AC needleless and collectorless electrospinning for yarn production. – Physical Chemistry Chemical Physics, 16, 1–8.

Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W.-E., Lim, T.-C., Ma, Z. 2005. An Introduction to Electrospinning and Nanofibers. World Scientific, New Jersey.

Rodriguez, I. A., McCool, J. M., Bowlin, G. L. 2012. Functional nanofibers forb tissue engineering applications. – Wei, Q. (ed). Functional Nanofibers and their Applications. Woodhead Publishing, Oxford, 171–187.

Tucker, N., Stanger, J. J, Staiger, M. P., Razzaq, H., Hofman, K. 2012. The history of the science and technology of electrospinning from 1600 to 1995. – Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 7, 63–73.

Vassiljeva, V., Kirikal, K.-K., Hietala, S., Kaljuvee, T., Mikli, V., Rähn, M., Tarasova, E., Krasnou, I., Viirsalu, M., Savest, N., Plamus, T., Javed, K., Krumme, A. 2017. One-step carbon nanotubes grafting with styrene-co-acrylonitrile by reactive melt blending for electrospinning of conductive reinforced composite membranes. – Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 25, 667–677.

Viikna, A. 2005. Kiuteadus. TTÜ kirjastus, Tallinn.

Viirsalu, M., Kivirand, T., Krumme, A. 2014. Device and method for preparing continuous nanofibrous yarns and bundles from electrospun fibers and fibrils. EP3191631A1.

NANOLAMINAATTAHKISTE, NANOKOMPOSIITIDE JA TAHKETE LAHUSTE AATOMKIHTSADESTAMINE

Kaupo Kukli, Väino Sammelselg, Aile Tamm, Jaan Aarik
Tartu ülikooli füüsika instituut

MOTIVATSIOONIST

Tehnoloogia areng, eriti elektroonika ja infotehnoloogia alal toimuv, on seadnud ja seab edaspidigi uusi nõudeid selles valdkonnas kasutatavatele materjalidele ning nende valmistamiseks ja töötlemiseks sobivatele tehnoloogiatele. Näiteks infotehnoloogiaseadmetelt nõutakse üha mitmekesisemaid rakendusvõimalusi ja suuremat töökiirust, aga samas ka väiksemaid mõõtmeid ja kaalu. On ju tänapäeval loomulik, et telefoni peaks saama kasutada peale helistamise ka pildistamiseks ja internetis käimiseks. Seejuures on paljud tänapäeva nutitelefonid üksikrakendustes võimekamad kui 20 aastat tagasi toodetud foto- ja videokaamerad ning lauaarvutid.

Selline areng on saanud võimalikuks tänu uute materjalide ja eriti just uute tehnoloogiliste meetodite rakendamisele. Üheks võtmeteguriks on olnud üha õhemate materjalikihtide ja nn kolmemõõtmelise (3D) arhitektuuri kasutamine info salvestamiseks ja töötlemiseks mõeldud seadistes. See on võimaldanud valmistada üha väiksemaid ja tihedamini pakitud elektroonikakomponente ning vähendada ühe infoühiku salvestamiseks vajalikku ruumala mäluseadistes. Veelgi enam, on tekkinud võimalus uute salvestus- ja lugemismeetodite juurutamiseks infotehnoloogias. Üliõhukestel kihtidel põhinevate mäluseadiste üheks näiteks on juba aastaid kasutuses olnud välkmälud näiteks mälupulkades ja teistes kompaktsetes salvestusseadmetes. Uute lahendustena arendatakse tänapäeval intensiivselt takistuslikke ja multiferroidmälusid ja tehnoloogiaid nende valmistamiseks.

Autorid (vasakult): Kaupo Kukli, Aile Tamm, Jaan Aarik, Väino Sammelselg.

Samal ajal on mitmed materjalitehnoloogilised meetodid, mis sobivad õhukeste materjalikihtide ehk kilede valmistamiseks ja mis algselt olid välja arendatud eelkõige elektroonikatööstuse huvisid silmas pidades, leidmas rakendust ka muudel elualadel. Näidetena võib siin tuua mitmesugused pinnakatted meditsiinitarvikutel, pakkimismaterjalidel, kööginõudel ja muudelgi laiatarbekaupadel.

Paljude eelnimetatud arengutega seotud probleemide lahendamisse on oma panuse andnud ka Tartu ülikooli füüsika instituudi kiletehnoloogia labori teadlased. Oluliseks eelduseks selles uurimistöös osalemiseks on olnud kogemus aatomkihtsadestamise tehnoloogia alal, mida on Tartu ülikoolis edukalt arendatud alates eelmise sajandi 80. aastate keskpaigast. On panustatud nii mälumaterjalide kui

ka erinevate materjalide pindu väärindavate pinnakatete valmistamise meetodite väljatöötamisse.

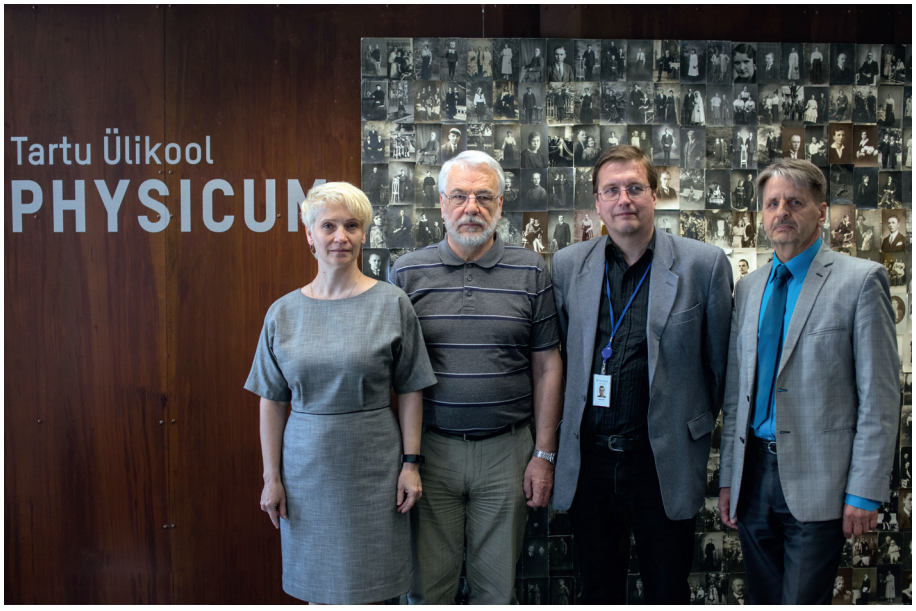
TÖÖHÜPOTEESIDEST

Mälumaterjalidealase uurimistöö üheks alusteesiks on olnud aatomkihtsadestamise meetodi sobivus madalatemperatuurilise protsessina kunstliku struktuuri ja piiritletava defektsusega funktsionaalsete materjalide sünteesiks. Mälumaterjalidest on meil viimasel paaril aastal uuritud eelkõige selliseid materjale, mis välise elektri- ja/või magnetvälja abil on viidavad kõrgema või madalama erijuhtivusega seisundisse või siis elektrilaengu- või spinnpolarisatsiooni kahe erineva suuruse ja/või märgiga olekusse. Sellised juhtivuse või polarisatsiooni muutused tekitavad neis mälumaterjalides voolu ja pinge, laengutiheduse ja välise elektrivälja tugevuse ning magneetumuse ja välise magnetvälja tugevuse vahelistes sõltuvustes hüstereesisilmustega sarnased kõverad (joonis 1), mis on iseloomulikud eelkõige kristallilistele ferromagneetikutele ja senjettelektrikutele. Kasulikud mäluefektid, ehk füüsikaliste omaduste (polarisatsioon, takistus) eristatavalt kaheseisundiline realiseerimine ja võimalus nende registreerimiseks suhteliselt madalatel temperatuuridel sünteesitud, kristallograafilises mõttes ainult osaliselt korrastatud struktuuris, on ühtaegu nii materjaliteaduslikud uurimisobjektid kui ka protsessiinseneride ees seisvad tehnoloogilised ülesanded.

Pooljuhtmaterjalidest või metallidest kilesid, valgustundlikke või optilisi katteid, mehhaaniliste vigastuste või keemilise korrosiooni eest kaitsvaid tahkiskatteid ja teisi funktsionaalseid tahkiskihte ei õnnestu üldjuhul valmistada struktuurselt perfektsete monokristallidena ja koostiselt soovimatutest lisanditest vabana. Materjaliteadlased, aga samuti protsessinsenerid on sellest üldjuhul teadlikud ja üritavad kas leida võimalusi defektitiheduse vähendamiseks või siis, vastupidi, püüavad erinevaid defekte ja nende mõju soodsalt ära kasutada, leides sellistele materjalidele sobivaid kasutusviise. Ühtlasi on tehnoloogias võimalik ka tahtlik defektide tekitamine ja nende tiheduse hoidmine etteantud piirides. Näiteks on võimalik isegi väikese hulga lisandite lisamisel materjali põhilistele koostiselementidele luua parema elektrilise või magnetilise polariseeritavusega õhukesi kristallilisi kilesid. Sellised kiled on suhteliselt hõlpsalt valmistatavad, segades põhimaterjali (nt HfO_2, ZrO_2) väikeste lisandmaterjalide (nt Al_2O_3, Fe_2O_3, Co_3O_4, Y_2O_3) kogustega, luues niiviisi kahe metallioksiidi tahkeid lahuseid või segusid. Niimoodi on saadud põhimaterjali metastabiilseid – modifitseeritud sümmeetriaga – struktuure, mis muidu normaaltingimustel stabiilsed ei ole.

Nii siledate kui ka ebatasaste pindade modifitseerimine on realiseeritav, kasutades aatomkihtsadestusmeetodit. See meetod võimaldab kasvatada õhukesi tahkisekihte üksikute molekulaarkihtide kaupa temperatuuride vahemikus toatemperatuurist kuni 1000 °C. Muutes sellise sadestusprotsessi parameetreid, on võimalik varieerida defektide tihedust ja tahkise kui keemilise ühendi stöhhiomeetriat ning sadestada järjestikku erineva nominaalse koostise, stöhhiomeetria ja korrastatuse astmega materjalide kihte, luues nii elektrilaenguid lõksustavaid või nende liikumist piiravaid mitmikkihte või supervõrelaadseid struktuure. Samuti on võimalik protsessi parameetreid varieerides muuta metallide või metallioksiidide nanokristallide tihedust ja nendega seotud defektide aktiivsust kilestruktuuri pinnal. Nanokristalliidid on oma olemuselt defektsed tänu pinna kui katkenud aatomtasandite kogumi suurele osakaalule materjalis. Samas, kattes nanoosakesi mingi teise materjali õhukese kihiga, on võimalik nende pinda funktsionaliseerida ning neid ühtlasi stabiliseerida. Samuti saab nii muuta nanoosakeste läbimõõtu ja teatud juhtudel ka kristallograafilist struktuuri. Aatomkihtsadestusega on võimalik katta ka metallide, nitriidide ja oksiididega suhteliselt inertseid

süsiniknanostruktuure (nanotorusid, grafeeni, kserogeeli), mõjutades niiviisi sidestatust juhtiva süsinikmaatriksi ja sellega kontaktis olevate pindade vahel.

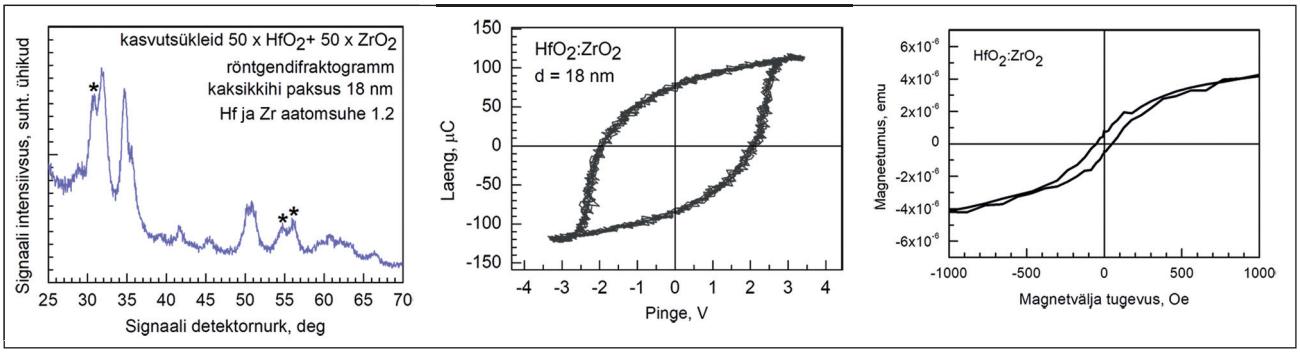


VÕIMEKUSEST

Aatomkihtsadestusega seonduval uurimistööl on olnud oluline roll institutsionaalse uurimisteema IUT2-24 „Kilestruktuurid nanoelektroonika rakendusteks ja funktsionaalseteks pinnakateteks“ (juht prof Väino Sammelselg) personaalse uurimisteema PUT170 „Nanostruktuurid elektriliste, plasmon- ja spinnefektide uurimiseks“ (juht dr Aile Tamm), rühmagrandi PRG4 „Tugevalt frustreeritud kvantmagnetite adapteeruvad olekud“ (juht dr Raivo Stern keemilise ja bioloogilise füüsika instituudist, vastutav täitja Tartu ülikoolis dr Aile Tamm), Euroopa regionaalarengufondi toetatavate tippkeskuste TK134 „Emerging orders in quantum and nanomaterials“ (juht dr Urmas Nagel keemilise ja bioloogilise füüsika instituudist, vastutav täitja Tartu ülikoolis dr Aile Tamm) ja TK141 „Uudsed materjalid ja kõrgtehnoloogilised seadmed energia salvestamise ja muundamise süsteemidele“ (juht akad, prof Enn Lust, vastutav täitja prof Väino Sammelselg) ning Eesti teaduste akadeemia uurijaprofessori grandi (SLTFYUPROF, uurija-prof Kaupo Kukli) ülesannete täitmisel. Koostööd tehakse nii Eesti kui ka välismaa teadusasutustega. Mõne näitena tasuks nimetada magnetomeetrilisi uuringuid koostöös dr Raivo Sterni töörühmaga Eesti magnetlaboriga keemilise ja bioloogilise füüsika instituudis, elektriliste mäluefektide mõõtmisi koostöös elektrooniliste materjalide ja seadmete uurimis rühmaga (rühma juhid prof Salvador Dueñas, prof Helena Castán) Valladolidi ülikooli elektroonikaosakonnas Hispaanias, kaitse- ja funktsionaalsete katete uurimist koostöös prof Alda Simõesi rühmaga Lissaboni tehnikaülikoolis Portugalis, dr Martin Frenkeli töörühmaga haruldaste muldmetallide ja metallokeemia instituudis Saksamaal ning firmadega Linde AG (Saksamaa), Picosun OY (Soome), Micro Fix OÜ (Eesti) ja Metallieksperdid OÜ (Eesti).

MAGNETOELEKTRILISELT POLARISEERITAVAD TAHKISKIHID

Nanoelektroonikarakendusteks mõeldud tahkiskihtide teaduslik-tehniline iseloomustamine algab tavaliselt nende materjaliteaduslikest baasuuringutest, sh struktuuri, morfoloogia ja optiliste või magnetoelektriliste parameetrite mõõtmistest. Joonisel 1 on näidetena toodud elektroonikamaterjalidena aktsepteeritud hafnium- ja tsirkooniumoksiidi õhukeste laminaatstruktuuride kristallstruktuuri iseloomustav röntgendifraktogramm ning elektrilise ja magnetilise polarisatsiooni kõverad.



Joonis 1. Aatomkihtsadestatud ja toatemperatuuril mõõdetud hafnium- ja tsirkooniumoksiidi korrusstruktuuri kristallilisust ning kostet elektri- ja magnetväljale iseloomustavad kõverad. Vasakpoolseimal paneelil esitatud röntgendifraktogrammil on oksiidide metastabiilsetele, eeldatavalt tugevamalt polariseeruvatele faasidele iseloomulikud refleksid tähistatud tärnidega. Elektrilise (keskmisel paneelil) ja magnetilise (parempoolseimal paneelil) polarisatsiooni käitumine on registreeritud ühes ja samas üliõhukeses nanokristallilises kaksikkihis. Struktuuri aatomkihtsadestamise ja röntgendifraktsiooni uuringud viis läbi Kristjan Kalam. Elektrilised mõõtmised on tehtud prof Helena Castáni ja prof Salvador Dueñase uurimisrühmas Valladolidi ülikoolis. Magnetmõõtmised tegi Mats Mikkor keemilise ja bioloogilise füüsika instituudis.

Joonisel on näha elektrilise polarisatsiooni ja magneetumuse iseloomulikud silmuskõverad, mis moodustuvad väliste elektri- ja magnetväljade tugevuse ja suuna muutmisel aatomkihtsadestatud struktuuris, milles ~ 10 nm paksusega HfO_2 kile peal on ZrO_2 kile. Nanoelektroonika spetsialistid tunnevad neist esimest materjali kui nüüdisaegsete arvutiprotsessorite transistoride südamikku ehk paisudielektrikku ja teist kui 3D arhitektuuriga maatriksmälude kondensaatorite dielektrikku. Kummalgi juhul on ära kasutatud nende kristalliliste metalloksiidide õhukestes kihtides moodustuvate metastabiilsete, modifitseeritud sümmeetriaga faaside kasulikke füüsikalisi omadusi, eelkõige nende suuremat dielektrilist läbitavust. Selliste faaside stabiliseerimisega kaasneb defektide (tõenäolisimalt hapnikuvakantside) tiheduse teatav kasv, mis võibki võimendada materjalis esilekutsutavat elektrilist ja/või magnetilist polarisatsiooni. Joonisel 1 esitatud hüstereesisilmustega kõverad on mõõdetud just niisuguste metastabiilsete faasidega küllastatud tahkiskihtides.

Oluline on tähele panna, et kuigi elektrilise polarisatsiooni kõver joonisel 1 näitab oksiidikihi tugevat polariseeritust, st kihi sees ja/või elektroodidel tekib märkimisväärne laeng, mille märk oleneb rakendatud elektrivälja tugevusest ja suunast, ei ole siiski veel võimalik pidada seda oksiidikihti ferroelektriliseks materjaliks, kuigi seda iseloomustab tugeva hüstereesiga polarisatsioonisilmus ja nähtavasti ka äratuntav ferroelektrilise polarisatsiooni komponent kogulaengus. Tuleb silmas pidada, et selles oksiidikihis on polarisatsioonikõver tugevamates elektriväljades vaevu jõudnud ferroelektrikutele karakteristlikku küllastusrežiimi, mis tähendab, et materjalis tõenäoliselt puuduvad selgelt eristuvad, tihedalt pakitud ja elektriliselt samasuunaliselt polariseeritud domeenid. Selle asemel on suur osa elektrilaengutest ühesuunalise pingepolaarsuse mõjul tõenäoliselt triivinud defektsete piirpindadeni ja seal ajutiselt lõksustunud. Vastassuunalise pinge rakendamisel need laengud vabanevad ning hakkavad triivima vastassuunas, tekitades materjalis lõpuks ka vastassuunalise polarisatsiooni.

Perfektselt ferroelektrilises materjalis, mis ideaalsel juhul võiks olla isolaatormaterjal või vähemalt madala elektrijuhtivusega materjal, peaksid aga

samasuunaliste polarisatsioonivektoritega domeenid pinge suurenedes kasvama üksteise arvelt, kuni kogu materjalikiht on polariseerunud. Sellisel juhul ei toimuks vastassuunalise pinge rakendamisel kohest materjalisisest laengute ümberpaiknemist, vaid elektroodidelt mõõdetud laengutihedus peaks jääma märgatavas pingevahemikus muutumatuks. Ka nullise pinge korral ehk pinge puudumisel jääks ferroelektrik elektriliselt polariseerituks, st polarisatsioonikõveralt oleks nullise väljatugevuse korral loetav nullist erinev laengutihedus, mida nimetatakse jääkpolarisatsiooniks.

Märkimisväärselt tugeva vastassuunalise pinge rakendumisel pööratakse polarisatsioon ferroelektrikus vastassuunaliseks. Vastassuunalise pinge edasisel suurenemisel vahetavad positiivse ja negatiivse laengu akumulatsioonikihid materjalis oma kohad. Nii tekib ferroelektrilisele materjalile omane S-kujuline polarisatsioonikõver, mida peale jääkpolarisatsiooni iseloomustavad veel maksimaalse ehk küllastuspolarisatsiooni väärtus ja selgelt välja joonistunud väljatugevuste vahemik nullpinge ja polarisatsiooni suunda muutva pinge vahel ehk hüsterees. Rangelt sel moel kirjeldatavad karakteristikud puuduvad joonise 1 keskmisel paneelil kujutatud elektrilisel silmuskõveral. Võimalik, et ferroelektrilist tüüpi polariseeritavuse saavutamiseks peab materjal olema paremini struktuurselt korrastatud ja sisaldama vähem jääkelemente, mis eeldab sadestusjärgse kuumtöötlusprotsessi rakendamist ja optimeerimist.

Samal ajal on nendes madalatel temperatuuridel sadestatud tahkiskihtides magnetomeetriliste mõõtmiste tulemusena jälgitud pehmele ferromagnetilisele materjalile iseloomulikku käitumist. Analoogiliselt elektrilaengu polariseeritavusega ferroelektrilises materjalis suureneb magnetiline kogupolarisatsioon ferromagnetilises materjalis kiiresti koos välise magneetiva välja tugevusega. See polarisatsiooni kasv on mittelineaarne ja küllastub välises väljas, mille tugevus on piisav selleks, et orienteerida materjalis samasuunaliselt kõik üksikud ühesuunalise magnetvektoriga domeenid, sõltumata nende algsest suurusest. Vähendades välise välja tugevust, muutes selle suuna vastupidiseks ja suurendades seejärel muudetud suunaga välja tugevust, saab sellisel juhul jälgida olukorda, kus nullise välja korral ehk välise välja puudumisel on materjal lühema või pikema aja jooksul siiski ühes suunas magneetunud. Materjali magneetumuse elimineerimiseks on ka siin tarvis rakendada mingi suurusega vastassuunalist magnetvälja. Niiviisi välise välja suunda ja tugevust muutes ja ferromagnetilise materjali magneetumust mõõtes saab registreerida hüstereesiga magneetumuse-väljatugevuse silmuskõveraid. Sellesarnast magneetumuse käitumist on meil olnud võimalik demonstreerida mitmetes aatomkihtsadestatud õhukestes kiledes, sealhulgas ka ülaltoodud ZrO_2/HfO_2 kaksikkihis (joonis 1, parempoolne paneel). Kui õnnestuks realiseerida ühes ja samas objektis hüstereesi ja küllastusrežiimiga polarisatsioonisilmused nii elektri- kui ka magnetväljas ja sünteesida need objektid madalatemperatuurilises protsessis, mis võimaldaks saada üliõhukesi homogeenseid tahkiskihte suurtel, vabalt valitava kujuga alusplaatidel, võiks hakata rääkima tööstuslikku huvi pakkuva multiferroidmaterjalide valmistamise tehnoloogia väljatöötamisest.

Tulles tagasi ferroelektrilise laengupolarisatsiooni võimalikkuse juurde, võiks arvata, et antud näidismaterjalil (ZrO_2/HfO_2) põhinevas kondensaatorstruktuuris ei olegi võimalik saavutada ferroelektrilisele materjalile iseloomulikku kostet välisele muutuvale pingele, kuna tsirkooniumi ja hafniumi oksiidid ei ole kuulunud traditsiooniliste ferroelektrikute (varem tuntud ka senjettdielektrikutena) hulka. Siiski, mõne aasta eest leidsid Saksa tahkiselektroonikud, et õhukeses hafniumoksiidi kiles, kuhu on vähesel määral lisatud teisi metalle, on võimalik stabiliseerida metastabiilset

ortorombilise ühikrakuga kristallilist faasi (Müller jt, 2012). Sellise kristallvõre ühikrakk ei ole tsentraalsümmeetriline ja seetõttu saab realiseeruda keskse metalliooni elektronpilvele kaks ruumiliselt eraldatud stabiilset olekut, mille vahel võib laeng ümber paikneda välise elektrivälja mõjul.

Hüstereesiga magneetumust võib viimaste vaatlusandmete järgi otsustades üsna kergesti esile kutsuda defektsetes nanokristallilistes materjalides, ka sellistes, mille keemilise koostise järgi otsustades ei tohiks vastav monokristalliline ja massiivne materjal püsivalt magneetuda ehk kvalifitseeruda ferromagneetikuks. On näidatud, et keemiliselt puhtas (jääkelementidevabas), kuid struktuuriliselt defektses metastabiilses ZrO_2 kihis võib tõesti jälgida ferromagneetikule iseloomulikku magnetilist polarisatsiooni (Ning, Zhang, 2015). Osutub, et aatomkihtsadestatud üliõhukestes materjalikihtides on võimalik küllastusmagneetumust ja pehmele ferromagneetikule iseloomulikku hüstereesi üsna lihtne esile kutsuda. Meie uuringute käigus on seda nähtust olnud võimalik jälgida näiteks tsirkooniumi ja raua (Kalam jt, 2018) või erbiumi ja raua (Tamm jt, 2017b) oksiidide kombineeritud kiledes, koobaltferriidi nanoosakestest ja tsirkooniumioksiidi kiledest (Tamm jt, 2017a) koosnevates nanokomposiitides ning veel mitmetes teistes madaladimensioonilistes tahkistes. Tuleb siiski tunnistada, et seni pole õnnestunud realiseerida üheselt tuvastatavalt ferromagnetilist ja ferroelektrilist käitumist ühes ja samas aatomkihtsadestatud proovimaterjalis, hoolimata paljulubavatest ilmingutest erinevates mõõtetulemustes. Sellesuunalised uuringud aga jätkuvad.

Magnetoelektriliste omaduste poolest atraktiivsete materjalide kõrval oleme pööranud tähelepanu ka nn takistuslülituslikele materjalidele. Sellistes materjalides on võimalik dielektrikukihile sadestatud elektroodidele rakendatud pinge mõjul esile kutsuda dielektrikusiseste defektide struktuurset järjestust ja sellega seotud püsiva elektrivoolukanali (juhtiva filamendi) teket. Seda voolukanalit saab katkestada, rakendades elektroodidele vastassuunalise pinge, mille tekitatud voolu ja kontaktbarjääril eralduva soojuse toimel korrigeeritakse materjali struktuuri. Sel moel saab materjali elektritakistust tüürida ja ümber lülitada suurusjärkudes erinevate suure ja väikese takistusega olekute vahel. Niisugust efekti saab ära kasutada memristorideks kutsutavates püsimäluseadmetes. Mitmetes meie laboris aatomkihtsadestatud metalloksiidtahkistest on demonstreeritud sellist takistuslülituslikku käitumist, sealhulgas ülalnimetatud ZrO_2/HfO_2 või ZrO_2/Fe_3O_4 kiledes, aga ka üliõhukestest TiO_2 ja Ta_2O_5 kiledest ülestikku kasvatatud korrusstruktuurides ehk nanolaminaatides (Dueñas jt, 2018).

Õhukeste, 1 … 10 nm paksuste kilede koostist varieerides oli meil võimalik märgatavalt tüürida kahestabiilse materjali seisundite vahelist erinevust. Näiteks TiO_2, mis on standardselt aatomkihtsadestatav väga ühtlase paksusega tahkiskilena suurtele ja keerulise kujuga pindadele, on suhteliselt kitsa keelutsooniga materjal ja seega aldis kriitiliselt suurtele elektroonsetele lekkevooludele. Seetõttu on TiO_2-l põhinevate mahtuvuslike mälustruktuuride valmistamiseks kasutatud tehnoloogilisi meetodeid, mis küll lubavad saada mahtuvuslike mäluelementide jaoks rekordiliselt suuri erimahtuvusi väikestel lekivooludel (Aarik J. jt, 2012, 2013; Aarik L. jt, 2014b; Arroval jt, 2014), kuid on samas väga nõudlikud elektroodmaterjali omaduste ja protsessiparameetrite valiku suhtes. Selleks et suurendada õhukeste dielektrikukihtide elektritakistust, on osutunud kasulikuks materjalikihi aatomkihtsadestusprotsessi käigus kasvatada TiO_2 põhikihtide vahele vähem kui nanomeetrilise paksusega, kuid laiema keelutsooniga tantaaloksiidi (Ta_2O_5) kiht. Selline vahekiht moodustab materjalis lisabarjääri elektronide triivile, suurendades efektiivselt materjali algset takistust, mida pinge edasise

tõusuga on võimalik ümber lülitada väikese takistusega seisundisse ja edasi realiseerida korduv ümberlülitustsükkel.

PINDU KAITSVAD TAHKISKIHID

Aatomkihtsadestatud kilede korrusstruktuuridele (nanolaminaatidele) on võimalik üles ehitada nii nanoelektroonikaseadmetes kasutatavaid funktsionaalseid elemente kui ka mehhaanilisi ja keemilisi kaitsekatteid. Meie laboratooriumis on nanokomposiitide jäikuse, elastsuse ja kõvaduse modifitseerimisvõimaluste kindlakstegemise eesmärgil aatomkihtsadestatud metalloksiidide (näiteks Al_2O_3) kilesid konformselt poorsetele nanokristallilistele aluspindadele, mis võivad koosneda alumiiniumoksiidi nanofiiberkimpudest (Jõgiaas jt, 2014) või siis ränikarbiidosakestest (Jõgiaas jt, 2015). Luues mitmekihilisi struktuure, oli niiviisi võimalik suurendada sellist tüüpi mehhaaniliste kaitsekatete elastsust ja ka kõvadust. Sellised katted võivad muuhulgas leida kasutust teatud triboloogilistes rakendustes või elastsete nanostruktuursete membraanide loomisel.

Mitmekihiliste struktuuride positiivseid tehnoloogilisi väljundeid oleme uurinud ka grafeenil baseeruvates struktuurides. Sealjuures uurisime aatomkihtsadestamist nii suurepinnalisele grafeenile kui ka grafeeni nanoliistakutele, mida kasutati nanokomposiitide ja segumaterjalide koostisosadena. Nii oma elektroonsete kui ka mehhaaniliste omaduste tõttu äärmiselt perspektiivseks materjaliks peetav grafeen on kahedimensionaalne kristall – tasapinnaline süsinikuaatomite võrk –, millel puudub keelutsoon harjumuspärases käsitluses ja mis on oma tasapinnas väga suure elektrijuhtivusega. Samas on grafeen oma pinnanormaali sihis väga halb elektrijuht, peaaegu isolaator. Niisuguseid komplementaarseid omadusi saab põhimõtteliselt ära kasutada grafeenipõhiste sensorite või elektrooniliste lülitite konstrueerimisel, aga samuti selliste tehnoloogiliste ülesannete lahendamisel, kus on tarvis juhtida eemale pinnalaengut ja samal ajal takistada difundeerumast korrodeerivaid laetud osakesi. Sellejuures on oluline teada, et grafeeni keemiline ühendamine teiste materjalikihtidega ei ole triviaalne ülesanne. Defektivaba grafeeni pind on keemiliselt inertne ja vabalt valitud koostisega materjalikihtide liitmine grafeeni pinnaga on komplitseeritud ülesanne. Kasutades molekulaarkihilise massitundlikkusega kvartskristallsensorit, oleme teinud kindlaks ZrO_2 kile pärsitud kasvu grafeenil, kuigi kasutasime aatomkihtsadestamisel sama lähteainet – tsirkooniumi tetrakloriidi ($ZrCl_4$) –, mis teistel alusmaterjalidel tagas selle oksiidikihi traditsiooniliselt hea nakkuvuse ja kiire kasvu (Tamm jt, 2014). Oleme ka näidanud, et materjalikihtide efektiivsemale kasvule inertsel pinnal võib kaasa aidata sadestustemperatuuri alandamine mõne esimese oksiidse materjalikihi sadestamisel grafeenile oluliselt madalamal temperatuuril, jätkates kile kasvatamist oluliselt kõrgemal temperatuuril (Rammula jt, 2013), või siis valides teistsuguse lähteaine, nagu näiteks ZrO_2 kasvatamisel tsirkooniumi kloriidi asemel uuema lähteaine – tsirkooniumi alküülamino-tsüklopentadienüüli (Aarik L. jt, 2014a).

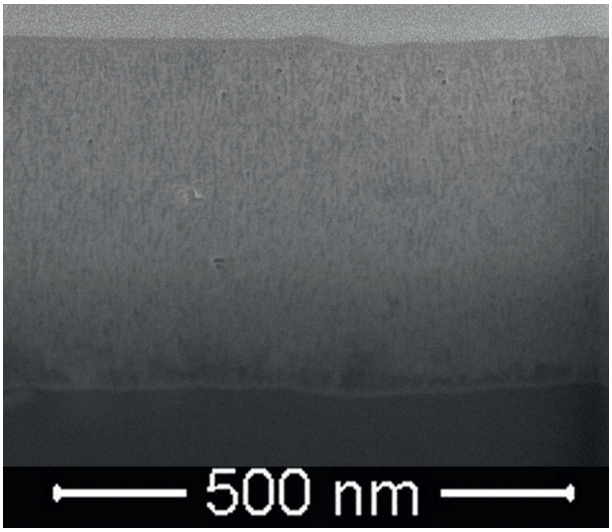
Metallioksiidide aatomkihtsadestamist on uuritud veel mitme lähteaine- ja materjalisüsteemi puhul (Aarik L. jt, 2013, 2014b; Arroval jt, 2015, 2016), millega põhimõtteliselt oleme laiendanud võimalusi komposiitkaitsekatete sünteesiks. Seejuures on meil õnnestunud paljudel juhtudel erinevates protsessides saavutada juba aatomkihtsadestuse algfaasis kile pidevus ja ühtlane paksus, olenemata pinna keemilisest koostisest, kujust ja karedusest. Eraldi uurisime aatomkihtsadestatud kilede vastupidavust eriti reaktiivses, kuumas väävelhappe lahuses, mille käigus selgitasime välja, millised kilede materjalid ning millised nende valmistamise lähteained ja protsessiparameetrid annavad keemiliselt kõige vastupidavamad kiled (Sammelselg jt, 2013). Samuti oleme konstrueerinud ühtlase struktuuri

ning koostisega kilesid ja vajadusel ka erinevate kasulike omadustega materjalidest mitmekihilisi katteid, mille abil suudame edukalt kaitsta materjalide pindu korrosiooni ja mõõduka mehaanilise kulumise eest.

Prof Sammelselja juhendamisel on juurutatud nanografeeni, st grafeenoksiidi ja redutseeritud grafeenoksiidi nanoliistakute, valmistamise tehnoloogia ja meetodid nende ainete üliõhukeste (mõne nanomeetri paksuste) kihtide sadestamiseks metallile (Mondal jt, 2015a, b). Ühe- ja mitmekihilist suurepinnalist grafeeni oleme kasvatanud keemilise aurufaas-sadestamise meetodil vastavalt vasele ja niklile, uurides sadestusjärgselt kihtide pidevust ja defektide polümeeriga katmise võimalust (Merisalu jt, 2015), üksikute grafeenikihtide omavahelist orientatsiooni ja defekte ning neist tulenevaid võimalusi ja piiranguid selliste struktuuride rakendamisel kaitsekatetes (Kozlova jt, 2015). Oleme katsetanud erinevate meetoditega valmistatud grafeeni kasutamist difusioonibarjääridena metallidel, kuna varasematest uuringutest oli juba teada, et grafeen toimib barjäärina mitmetele gaasidele ja vedelikele, sh korrodeerivatele molekulidele (O_2, H_2O, NO_2 jt) ning ioonidele (OH^- ja halogeniidide ioonid). Uuringutes on kasutatud (nano-) grafeeni kilesid nii iseseisva barjäärikihi kui ka mitmekihilise komposiitkatte komponendina.

Roostevabal terasel tehtud testide põhjal on selgunud, et grafeenoksiidi nanomeetriliste kihtide võime efektiivselt pinda kaitsta väheneb aja jooksul (Mondal jt, 2015b). Uudse lahendusena katsetati titaanisulami kaitseks nanografeeni kihti, millele oli aatomkihtsadestatud mitmekihiline Al_2O_3/TiO_2 laminaat (Mondal jt, 2015a). Selles töös näidati, et võrreldes suurepinnalise grafeeniga on nanografeenile aatomkihtsadestusega kergem kasvatada õhukesi oksiidikihte, sest tänu nanografeeni osakeste äärtele kinnitunud hapnikku sisaldavatele radikaalidele oli oksiidikihi kasv nanografeenile kiirem kui eespool märgitud keemiliselt aurufaasist sadestatud suurepinnalisele grafeenile. Sellise komposiitkaitsekatte vastupidavus oli soolalahuses läbi viidud 30-päevases immersioonitestis tunduvalt parem kui katmata nanografeeni kihtidel. Sealjuures andis redutseeritud grafeenoksiidi ehk vähem hapnikku sisaldavaid radikaale kandvate grafeeniliistakutega valmistatud barjäärkiht mõnevõrra paremaid tulemusi kui grafeenoksiidist valmistatud barjäärkiht. Samasuguse õhukese komposiitkatte käitumist laialt kasutataval roostevabal terasel uuriti detailsemalt koostöös prof Simõesi rühmaga Lissaboni tehnikaülikoolist (Mondal jt, 2016). Töö käigus viidi läbi põhjalikud elektrokeemilised analüüsid, mille tulemusena tõestati, et väljatöötatud õhuke komposiitkate kaitseb efektiivselt terase pinda reaktiivsetes keskkondades, kus eelnevalt katmata pind kattub kiiresti sügavate punktkorrosioonist tingitud aukudega. Sarnaste komposiitkatete valmistamise tehnoloogiat on võimalik juurutada tööstuses.

Korrosioonivastaste katete ühe edasiarendusena töötati välja uudne tehnoloogia anodeeritavate metallide (Al, Ti, Zn jt ning nende sulamid) katmiseks, millele taotletakse patenti paljudes arenenud tööstusriikides (Sammelselg jt, 2012). Nimetatud leiutis põhineb kaheastmelisel tehnoloogial, mille käigus puhastatud metalli pind esmalt anodeeritakse ja seejärel kaetakse aatomkihtsadestamise meetodil mitmekihilise laminaadiga (joonis 2). Anoodkihi paksust saab vastavalt vajadusele varieerida rakendatava potentsiaali ning elektrolüüdi temperatuuri ja koostisega. Nii on võimalik anodeerimisega keemiliselt homogeniseerida materjali pind ning järgnevas aatomkihtsadestamise protsessis sulgeda poorid, mida anoodoksiidi kihtides pole võimalik vältida. Aatomkihtsadestatud pealiskihi õige koostis tagab sellise kaitsekatte märkimisväärse keemilise vastupidavuse. Väljatöötatud tehnoloogia kasutamise tähtajalise litsentsi on ülikool andnud iduettevõttele Captain Corrosion OÜ.



Joonis 2. Patenteeritud kahekihilise korrosiooni tõkestava katte ristlõige, mis on tehtud fokusseeritud ioonkiirega ja visualiseeritud skaneeriva elektronmikroskoobi abil: pealmine heledam kiht on ioonkiirega sadestatud lokaalne Pt-abikiht, mis on vajalik ristlõike tegemiseks, keskmine ala on anodeeritud kiht, mille poorid on suletud titaanoksiidiga (tumedamad triibud anoodkihis), ja alumine tumedam ala on anodeerimata metallisulam. Objekti valmistasid Maido Merisalu ja Lauri Aarik. Pildi autor on Maido Merisalu.

Samuti olulise rakendusena konstrueeriti ja ehitati aatomkihtsadestusalastest uurimistulemustest lähtudes uut tüüpi seadme prototüüp hermeetiliselt suletavate, suuremõõtmeliste metallkonteinerite sisepindade katmiseks õhukeste kaitsekatetega, mis peaksid vastu agressiivsete gaaside ja vedelike keskkonnale, kaitseksid anuma seinu korrosiooni eest ning taluksid suuri rõhumuutusi, mis muudavad anuma mõõtmeid. Viimane tingimus nõuab kattelt elastsust, seega keraamiliste katete võimalikult väikest paksust, ning väga head adhesiooni anuma seintega. Selliste katete valmistamiseks töötati välja sobiv sadestustehnoloogia ja testiti kaitsekatteid koos suurettevõttega Linde AG (Saksamaa). Kuna testid osutusid edukaks, on tehnoloogia kaitseks taotletud patendid (Kostamo jt, 2014; Sammelselg jt, 2015) paljudes tööstusriikides.

Seega, üliõhukeste kihtide aatomkihtsadestamise alane uurimistöö, mis selle algfaasis oli ka Tartu ülikoolis suunatud eelkõige rakendustele elektroonikas, on nüüdseks jõudnud rakendusteni ka muudes tehnikavaldkondades. Ühtlasi on sellesuunalisel tööl oluline osa ka Tartu ülikooli füüsika instituudi õppetöös. Nanomõõtmeliste tahkisestruktuuride uuringud on aidanud edendada tänapäeva kõrgtehnoloogilise tööstuse vajadustega kooskõlas olevat haridust ülikooliõppuritele kõigil tasemetel. Artikli autorid tänavad dr Lauri Aarikut, doktorante Kristjan Kalamit ja Maido Merisalu ning magistrant Mats Mikkorit nende panuse eest uurimistöösse. Samuti oleme tänulikud prof Helena Castánile, prof Salvador Dueñasele ja dr Raivo Sternile viljaka koostöö eest. Seda uurimistööd on toetanud haridus- ja teadusministeerium institutsionaalsete uurimisteemade IUT2-24 ja IUT20-54, personaalse uurimisteema PUT170 ja rühmagrandi PRG4 kaudu, Euroopa regionaalarengu fond tippkeskuste TK134 ja TK141 kaudu, aga samuti Eesti teaduste akadeemia uurija-professori grandi eraldamisega.

VIITED

Aarik, J., Hudec, B., Hušekova, K., Rammula, R., Kasikov, A., Arroval, T., Uustare, T., Fröhlich, K. 2012. Atomic layer deposition of high-permittivity TiO_2 dielectrics with low leakage current on RuO_2 in $TiCl_4$-based processes. – Semiconductor Science and Technology, 27, 074007.

Aarik, J., Arroval, T., Aarik, L., Rammula, R., Kasikov, A., Mändar, H., Hudec, B., Hušekova, K., Fröhlich, K. 2013. Atomic layer deposition of rutile-phase TiO_2 on RuO_2 from $TiCl_4$ and O_3: growth of high-permittivity dielectrics with low leakage current. – Journal of Crystal Growth, 382, 61–66.

Aarik, L., Arroval, T., Rammula, R., Mändar, H., Sammelselg, V., Aarik, J. 2013. Atomic layer deposition of TiO_2 from $TiCl_4$ and O_3. – Thin Solid Films, 542, 100−107.

Aarik, L., Alles, H., Aidla, A., Kahro, T., Kukli, K., Niinistö, J., Mändar, H., Tamm, A., Rammula, R., Sammelselg, V., Aarik, J. 2014a. Influence of process parameters on atomic layer deposition of ZrO_2 thin films from $CpZr(NMe_2)_3$ and H_2O. – Thin Solid Films, 565, 37–44.

Aarik, L., Arroval, T., Rammula, R., Mändar, H., Sammelselg, V., Hudec, B., Hušeková, K., Fröhlich, K., Aarik, J. 2014b. Atomic layer deposition of high-quality Al_2O_3 and Al-doped TiO_2 thin films from hydrogen-free precursors. – Thin Solid Films, 565, 19−24.

Arroval, T., Aarik, L., Rammula, R., Mändar, H., Aarik, J., Hudec, B., Hušekova, K., Fröhlich, K. 2014. Influence of growth temperatureon structure and electrical properties of high-permittivity TiO_2 films in $TiCl_4$-H_2O and $TiCl_4$-O_3 atomic layer deposition processes. – Physica Status Solidi A, 211 (2), 425–432.

Arroval, T., Aarik, L., Rammula, R., Aarik, J. 2015. Growth of $Ti_xAl_{1-x}O_y$ films by atomic layer deposition using successive supply of metal precursors. – Thin Solid Films, 591, 276−284.

Arroval, T., Aarik, L., Rammula, R., Kruusla, V., Aarik, J. 2016. Effect of substrate-enhanced and inhibited growth on atomic layer deposition and properties of aluminum-titanium oxide films. – Thin Solid Films, 600, 119−125.

Dueñas, S., Castán, H., García, H., Ossorio, O. G., Domínguez, L. A., Seemen, H., Tamm, A., Kukli, K., Aarik, J. 2018. The role of defects in the resistive switching behavior of Ta_2O_5-TiO_2-based metal–insulator–metal (MIM) devices for memory applications. – Journal of Electronic Materials, https://doi.org/10.1007/s11664-018-6105-0

Jõgiaas, T., Arroval, T., Kollo, L., Kozlova, J., Käämbre, T., Mändar, H., Tamm, A., Hussainova, I., Kukli, K. 2014. Atomic layer deposition of alumina on γ-Al_2O_3 nanofibres. – Phys. Status Solidi A, 211, 403–408.

Jõgiaas, T., Kollo, L., Kozlova, J., Tamm, A., Hussainova, I., Kukli, K. 2015. Effect of atomic layer deposited aluminium oxide on mechanical properties of porous silicon carbide. – Ceramics International, 41 (6), 7519–7528.

Kalam, K., Seemen, H., Ritslaid, P., Rähn, M., Tamm, A., Kukli, K., Kasikov, A., Link, J., Stern, R., Dueñas, S., Castán, H., García, H. 2018. Atomic layer deposition and properties of ZrO_2/Fe_2O_3 thin films. – Beilstein Journal of Nanotechnology, 9, 119−128.

Kostamo, J., Malinen, T., Sammelselg, V., Aarik, J., Aarik, L. 2014. Protecting an interior of a hollow body with an ALD coating. EP20140884857.

Kozlova, J., Niilisk, A., Alles, H., Sammelselg, V. 2015. Discontinuity and misorientation of graphene grown on nickel foil: Effect of the substrate crystallographic orientation. – Carbon, 94, 160−173.

Merisalu, M., Kahro, T., Kozlova, J., Niilisk, A., Nikolajev, A., Marandi, M., Floren, A., Alles, H., Sammelselg, V. 2015. Graphene-polypyrrole thin hybrid corrosion resistant coatings for copper. – Synthetic Metals, 200, 16−23.

Mondal, J., Kozlova, J., Sammelselg, V. 2015a. Graphene nanoplatelets based protective and functionalizing coatings for stainless steel. – Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 15, 6747–6750.

Mondal, J., Aarik, L., Kozlova, J., Niilisk, A., Mändar, H., Mäeorg, U., Simões, A., Sammelselg, V. 2015b. Functionalization of titanium alloy surface by graphene nanoplatelets and metal oxides: corrosion inhibition. – Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 15, 6533–6540.

Mondal, J., Marques, A., Aarik, L., Kozlova, J., Simões, A., Sammelselg, V. 2016. Development of a thin ceramic-graphene nanolaminate coating for corrosion protection of stainless steel. – Corrosion Science, 105, 161−169.

Müller, J., Böscke, T. S., Schröder, U., Mueller, S., Bräuhaus, D., Böttger, U., Frey, L., Mikolajick, T. 2012. Ferroelectricity in simple binary ZrO_2 and HfO_2. – Nano Letters, 12, 4318−4323.

Ning, S., Zhang, Z. 2015. Phase-dependent and defect-driven d^0 ferromagnetism in undoped ZrO_2 thin films. – RSC Advances, 5, 3636−3641.

Rammula, R., Aarik, L., Kasikov, A., Kozlova, J., Kahro, T., Matisen, L., Niilisk, A., Alles, H., Aarik, J. 2013. Atomic layer deposition of aluminium oxide films on graphene. – IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 49, 012014-1–4.

Sammelselg, V., Merisalu, M., Aarik, L. 2012. Method of preparing corrosion resistant coatings. GB2509335 A.

Sammelselg, V., Netšipailo, I., Aidla, A., Tarre, A., Aarik, L., Asari, J., Ritslaid, P., Aarik, J. 2013. Chemical resistance of thin film materials based on metal oxides grown by atomic layer deposition. – Thin Solid Films, 542, 219−224.

Sammelselg, V., Kostamo, J., Bayerl, W., Aarik, J., Aarik, L., Lindfors, S., Adam, P., Poutianen, J. 2015. Protecting an interior of a gas container with an ALD coating. WO 2015/1324443 A1.

Tamm, A., Kozlova, J., Aarik, L., Aidla, A., Lu, J., Kiisler, A.-A., Kasikov, A., Ritslaid, P., Mändar, H., Hultman, L., Sammelselg, V., Kukli, K., Aarik, J. 2014. Atomic layer deposition of ZrO2 for graphene-based multilayer structures: *In situ* and *ex situ* characterization of growth process. – Phys. Status Solidi A, 211, 397–402.

Tamm, A., Joost, U., Mikkor, M., Kalam, K., Mändar, H., Seemen, H., Link, J., Stern, R., Castán, H., Dueñas, S., Kukli, K. 2017a. Properties of zirconium oxide and cobalt ferrite layered nanocomposite. – ECS Journal of the Solid State Science and Technology, 6, P886−P892.

Tamm, A., Kalam, K., Seemen, H., Kozlova, J., Kukli, K., Aarik, J., Link, J., Stern, R., Dueñas, S., Castán, H. 2017b. Magnetic and electrical performance of atomic layer deposited iron erbium oxide thin films. – ACS Omega, 2, 8836–8842.

ÜHTSUS JA ERISUS KAABELKONSTRUKTSIOONIDE PROJEKTEERIMISEL

Valdek Kulbach
Tallinna tehnikaülikooli emeriitprofessor

KAABELKONSTRUKTSIOONIDE PÕHITÜÜBID

Prof Heinrich Laulu algatusel sai Tallinna tehnikaülikooli (TTÜ) ehituskonstruktsioonide kateeder 1958. aastal ülesande osaleda arhitekt Alar Kotli pakutud Tallinna laululava sadulakujulise kõlaekraani projekteerimisel, kahe kaldse tasandkaarega mudeli katsetamisel ja ehitustööde korraldamisel. Seda tüüpi sümmeetrilise kaabelvõrgu ning seda toetavate kaartega rippkatustega kõrvuti olid sel ajal kasutusel ka nii talaga kui ka jäikuskaabliga jäigastatud paralleelkanduritega katusekonstruktsioonid ning pikemat aega tuntud kaldvantidega ankurdatud sillad: rippsildade kandeavad lähenesid juba siis 2000 meetrini. Nende kaabelkonstruktsioonide ja neid toetavate tarindite koostöö analüüs andis sobiva võimaluse rippkonstruktsioonide lähemaks uurimiseks. 1960. aastatel lisandus sellele osavõtt „paarisrakendis“ koos prof Johannes Aarega Tallinna tõstemastide nime all tuntud, vantidega toetatud masttõstukite edasiarendamisest esialgu 500-, hiljem 1000-tonnise massiga kõrgete naftatöötlemisreaktorite grupiviisiliseks kohalemonteerimiseks (Aare jt, 1976). Ka masttõstuki põhiosaks saab lugeda kaablid.

Meie huviorbiiti tulid rippsillad seoses Saaremaa püsiühenduse võimaluste uurimisega, mis algas koos Saaremaa maavanema juures tegutsenud sillakomisjoni loomisega. Nende uurimise vajadus tekkis osavõtuga nimetatud sillakomisjoni tööst. Nii tekkis mõte analoogiast kaldvantidega toetatud rippsilla kasutamisega. Rippsildadega tegelemise ajaks oli mul välja töötatud hüpari kujuga võrk-rippkatuse teooria, mille kontuurirõngas on plaanis ellipsikujuline. Selle kujuga, kuigi kaldne ja esiküljel toetamata kõlaekraan, viidigi ellu Tartu laululava ehitamisel 1994. aastal. Nii oli välja kujunenud grupp erinevaid kaabelkonstruktsioone, mille omavaheline kõrvutamine pakkus erilist huvi (Kulbach, 2007). Samas tekkis ka palju küsimusi nende konstruktsioonide erisusest ja ühtsusest. Kõik need küsimused moodustavad probleemistiku, mida võib nimetada kaabelkonstruktsioonide filosoofiaks.

Esimeseks küsimuseks on kaablite kasutamise otstarbekus konstruktsioonimaterjalina. On need ju võimelised avaldama vastupanu ainult tõmbejõududele (tõmbevastupanu on *EA*, s.o elastsusmooduli ja

ristlõike pindala korrutis). Kõige tugevamad on suhteliselt peentest traatidest koosnevad terastrossid. Aga tõmbejõudude tasakaalustamine ongi üks põhiprobleemidest, mis tuleb kaabelkonstruktsiooni projekteerimise käigus lahendada. Siin on kohane võrrelda terastraate ämblikuvõrgu niitidega. Jüri Engelbrecht on oma artiklis „Väljakutse tõmbepingetele“ (Engelbrecht, 2002) välja toonud terastraadi võrdluse ämblikuvõrgu niitidega, millest selgub, et terasele lähedase tõmbetugevuse juures on selle tihedus mitu korda väiksem kui terasel, elastsusmoodul aga mitu korda kõrgem kui terasel.

ÜKSIKKAABLI NING JÄIKURITEGA TASAND-KONSTRUKTSIOONIDE PROJEKTEERIMINE

TTÜs väljatöötatud arvutusmetoodika lähtub mittelineaarse elastsusõpetuse tasakaalu- ja geomeetrilise vastavuse (deformatsioonide pidevuse) võrranditest. Arvutuse võtmeparameetriks on konstruktsiooni (kaabli) suhteline läbipaine. Konstruktsiooni käitumist oluliselt mõjutav tugede järeleandvus (siire) võetakse otseselt arvesse geomeetrilise vastavuse võrrandis. Ühes tasandis paikneva kaabli pingedeformatsiooni määramine lähtub tasakaalutingimustest (2.1) ja (2.2) ning deformatsioonide vastavuse võrrandist (2.3). Nende võrrandite lahendamiseks esitame need kujul

$$H_0 \frac{d^2 z}{dx^2} = p_0, \tag{2.1}$$

$$H \frac{d^2 (z+w)}{dx^2} = p_0 + p; \tag{2.2}$$

$$\frac{du}{dx} + \frac{dw}{dx}\left(\frac{dz}{dx} + \frac{dw}{dx}\right) = \frac{H - H_0}{EA}\left[1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2\right]^{3/2}, \tag{2.3}$$

kus p_0 ja p on vastavalt esialgne ja täiendav kaabli koormus.

Selle mittelineaarse võrrandsüsteemi lahendamisel võime elimineerida rõhtsiirde u, kasutades integraali ning asendades selle kaldu asetseva vanttoe siirdega järgmise mõttearenduse kaudu.

Jättes arvestamata tuletise *du/dx* teise astme kui väga väikese suuruse, võime rõhtsiirde integraali avaldada kujul

$$\int_0^a \frac{du}{dx} dx = \frac{(H - H_0)b}{E_a A_a \cos^3 \beta}, \tag{2.4}$$

kus $E_a A_a$ on ankurkaabli tõmbetugevus ja β selle kaldenurk.

Pärast toodud võrrandite rakendamist ühtlase hajukoormuse juhtumile saame kaabli suhtelise läbipainde $\zeta_0 = w_0 / f$ avaldada kuupvõrrandist

$$\zeta_0^3 + 3\zeta_0^2 + \left(2 + p_0^*\right)\zeta_0 = p^*, \tag{2.5}$$

kus ζ_0 sõltuvuses koormusparameetrist p^* prevaleerib lineaarne liige.

Kaabli sisejõu esialgse ja täiendava koormuse väärtuse saame määrata avaldistest

$$H_0 = \frac{p_0 a^2}{2f}, \tag{2.6}$$

$$H = H_0 + \Phi\zeta_0\left(2 + \zeta_0\right); \tag{2.7}$$

kus

$$p_0^* = \frac{H_0}{\Phi}; \quad p^* = \frac{P}{\Phi}; \quad P = \frac{pa^2}{2f};$$

$$\Phi = \frac{2EAf^2}{3a^2\left(1 + \kappa + \vartheta\right)}; \quad \kappa = \frac{2f^2}{a^2} + \frac{6f^4}{5a^4};$$

$$\vartheta = \frac{EAb}{E_a A_a a \cos^3 \beta}.$$

Kui konstruktsioon koosneb kande- ja pingestuskaablist ning neid ühendavatest püstvarrastest (joonis 1), tuleb võrrandeid (2.3)–(2.9) rakendada mõlemale kaablile, kusjuures algkoormus p_0 mõjub mõlemale kaablile ja muutub konstruktsiooni

koormamisel suuruseks p_c ning selle saab elimineerida kaablite läbipainde võrdsustamisel:

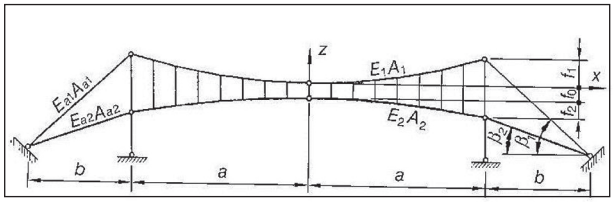
$$(H_1 + H_2)w_0 + (H_1 f_1 - H_2 f_2) = p. \qquad (2.8)$$

Deformatsioonide vastavuse võrrandid võime esitada kujul:

$$\frac{(H_1 - H_{01})(1 + \kappa_1 + \vartheta_1)}{E_1 A_1} = \frac{4 f_1 w_0}{3a^2} + \frac{2w_0^2}{3a^2}, \qquad (2.9)$$

$$\frac{(H_1 - H_{02})(1 + \kappa_2 + \vartheta_2)}{E_1 A_1} = \frac{4 f_2 w_0}{3a^2} + \frac{2w_0^2}{3a^2}, \qquad (2.10)$$

kus indeks 1 märgib kande- ja indeks 2 pingestuskaablit.



Joonis 1. Kande- ja pingestuskaabliga eelpingestatud kandur.

Kui kaablite algkujuks on ruutparaboolid, on kontaktkoormuseks ühtlaselt jaotuv hajukoormus. Konstruktsiooni koormamisel ühtlase hajukoormusega jäävad kaablid ruutparaboolikujuliseks. Eelpinge olekus on kaablite ordinaadid ja sisejõud määratud valemitega:

$$z_1 = \frac{f_1 x^2}{a^2}; \quad z_2 = -(f_0 + f_2 \frac{x^2}{a^2}); \qquad (2.11)$$

$$H_{01} = \frac{p_0 a^2}{2 f_1}; \qquad (2.12)$$

$$H_{02} = \frac{p_0 a^2}{2 f_2}. \qquad (2.13)$$

Valemite (2.8)–(2.10) rakendamisel kaldsete ankurkaablitega konstruktsioonile saame kuupvõrrandi konstruktsiooni suhtelise läbipainde määramiseks kujul:

$$(1 + \psi)\zeta_0^3 + 3(1 - \alpha\psi)\zeta_0^2 + \left[2(1 + \alpha^2 \psi) + p_0^* \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \right] + \zeta_0 = p^*. \qquad (2.14)$$

Kaablite sisejõud saame avaldistest:

$$H_1 = H_{01} + \Phi\zeta_0(2 + \zeta_0), \qquad (2.15)$$

$$H_2 = H_{02} - \psi\Phi\zeta_0(2\alpha - \zeta_0), \qquad (2.16)$$

kus $\alpha = f_2 / f_1$, selle sobivaks väärtuseks on vahemik 0,4–0,7 ning

$$\psi = \frac{A_2(1 + \kappa_1 + \vartheta_1)}{A_1(1 + \kappa_2 + \vartheta_2)}; \quad p_o^* = \frac{H_{01}}{\Phi}; \quad p^* = \frac{P}{\Phi};$$

$$\Phi = \frac{2E_1 A_1 f_1^2 (1 + \kappa_1 + \vartheta_1)}{3a^2}.$$

Paindevardaga jäigastatud kaabelkonstruktsioone kasutatakse peaasjalikult rippsildades. Tavaline rippsild koosneb enamasti põhikaablist, seda jäigastavast talast, nendevahelistest ühendusvarrastest ja ankurkaablitest. Kaableid koos jäikurtaladega tuleb vaadelda kui tervikkonstruktsiooni (joonis 2). Tähistagem jäikurtala omakaalu p_0, täiendavat alalist koormust p_1 ning konstruktsioonile rakendatavat ajutist koormust p_2. Koormused p_1 ja p_2 jagunevad kaabli ja jäikurtala vahel, olgu nende vastavad osad p' ja p''. Siis võib esitada tasakaalutingimused järgmiselt:

kaabli jaoks algseisundis

$$H_0 \quad \frac{d^2 z}{dx^2} = p_0; \; z = \frac{fx^2}{a^2} \qquad (2.17)$$

ning koormatud kaabli jaoks

$$H\left(\frac{d^2 z}{dx^2} + \frac{d^2 w}{dx^2} \right) = p_0 + p'. \qquad (2.18)$$

Jäikurtala jaoks kasutame selle elastse joone võrrandit kujul:

$$E_b I_b \frac{d^4 w}{dx^4} = p''. \tag{2.19}$$

Võrrandites (2.17)–(2.19) tähistavad H_0 ja H kaabli sisejõudu enne ja pärast konstruktsiooni koormamist, z on kaabli algordinaat, w on kaabli ja jäikurtala ühine püstsuunaline siire ja $E_b I_b$ on jäikurtala paindejäikus.

Summeerides võrrandid (2.18) ja (2.19), saame tasakaaluvõrrandi

$$E_b I_b \frac{d^4 w}{dx^4} - H\left(\frac{d^2 z}{dx^2} + \frac{d^2 w}{dx^2}\right) + p_0 + p' + p'' = 0. \tag{2.20}$$

Tähistades konstruktsiooni kogukoormuse $p = p_0 + p' + p''$ ja suuruse $c^2 = E_b I_b / H$, võime esitada konstruktsiooni kui terviku jaoks tasakaaluvõrrandi kujul:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} - \frac{1}{c^2}\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{1}{c^2}\frac{d^2 z}{dx^2} - \frac{p}{E_b I_b}. \tag{2.21}$$

Teguri *c* määramiseks kasutame deformatsioonide vastavuse võrrandit

$$H = H_0 + \frac{\pi^2 EAf^2}{8a^2(1+\kappa+\vartheta)}\left(\zeta_0^2 + \frac{64}{\pi^3}\zeta_0\right), \tag{2.22}$$

kus $p_0^* = \frac{H_0}{\Phi}$; $p^* = \frac{P}{\Phi}$; $P = \frac{pa^2}{2f}$;

$$\Phi = \frac{2EAf^2}{3a^2(1+\kappa+\vartheta)}; \ \kappa = \frac{2f^2}{a^2} + \frac{6f^4}{5a^4}; \ \vartheta = \frac{EAb}{E_a A_a a \cos^3\beta}.$$

Selle võrrandi lahendamiseks kaabli antud algkuju juures kasutame läbipaindefunktsiooni aproksimeeritud kujul

$$w = -w_0 \cos\frac{\pi x}{2a}, \tag{2.23}$$

mis rahuldab rajatingimusi.

Lahendades koos võrrandid (2.21) ja (2.22), saame kuupvõrrandi suhtelise läbipainde määramiseks, mis pärast Galjorkini protseduuri kasutamist ja teatavat lihtsustamist on esitatav kujul

$$\zeta_0^3 + 3\zeta_0^2 + \left(2 + \rho + p_0^*\right)\zeta = p^*, \tag{2.24}$$

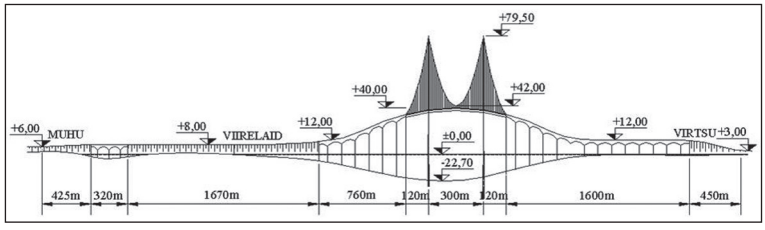
kus $\rho = 4E_b I_b(1+\kappa+\vartheta)/(EAf)^2$ on jäikurtala suhteline jäikus, $p_0^* = H_0/\Phi$, $p^* = P/\Phi$ ja $P = pa^2/(2f)$ on eelpinge- ja koormusparameetrid.

Nendes võrrandites on H_0 ja H kaabli sisejõud vastavalt enne ja pärast koormamist, z on kaabli algordinaat, w on kaabli ja jäikurtala ühine läbipaine ning $E_b I_b$ on jäikurtala paindejäikus. Nüüd saame arvutada kaabli sisejõu H kaabli deformatsioonide vastavuse võrrandist lihtsamal kujul:

$$H = H_0 + \Phi\zeta_0(2 + \zeta_0). \tag{2.25}$$

Tala paindemomendi väärtuseks saame

$$\max M = \rho\Phi f\zeta_0. \tag{2.26}$$



Joonis 2. Talaga jäigastatud kaabelkonstruktsioon Suure väina silla keskse osana.

Joonis 3. Suure väina püsiühenduse kesksilde ületamiseks sobiv vant-rippsild (hübriid).

Suure väina püsiühenduse jaoks oleme viimati pakkunud hübriidkonstruktsiooni (joonis 3), mis kujutab endast ripp- ja vantsüsteemi kombinatsiooni, kuid selle arvutust ei ole selles artiklis toodud.

HÜPARIKUJULISED RIPPKATUSED

KATUSE ALGKUJU

Hüperboolse paraboloidi (hüpari) kujulise rippkatuse pinna kuju koordinaadistikus x, y, z on määratav võrrandiga

$$z = f_x \frac{x^2}{a^2} - f_y \frac{y^2}{b^2}, \tag{3.1}$$

kus f_x ja f_y on sümmeetriatelgedel paiknevate kaablite kõverusnooled ning a ja b on pooltelgede pikkused (joonis 4).

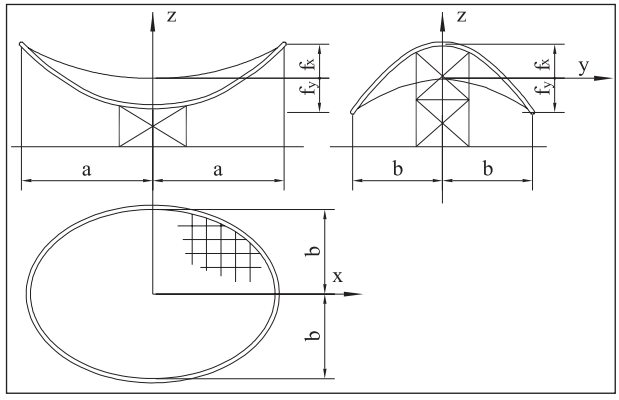
Kontaktkoormus kande- ja pingestuskaablite vahel ellipsikujulise kontuurirõnga puhul on pinnal ühtlaselt jaotatud ning seda võime käsitleda hajukoormusena p_0. Sellele vastavad kaablite algsisejõud

$$H_{0x} = \frac{p_0 a^2}{2 f_x} \text{ ja} \tag{3.2}$$

$$H_{0y} = \frac{p_0 b^2}{2 f_y}. \tag{3.3}$$

HÜPARKATUSE PINGEDEFORMATSIOONI SEISUND VERTIKAALKOORMUSE MÕJUMISEL

Ellipsikujulise kontuurirõngaga hüparikujulise katuse pinna võime lugeda pidevaks pinnaks, millele sobib kontinuaalse arvutusmudeli kasutamine. Seejuures teeme järgmised lihtsustused, mis ei mõjuta märkimisväärselt arvutustulemusi: jätame tasakaalutingimustes ja deformatsioonide vastavuse võrrandites arvestamata rõhtsuunaliste siirete mõju; kontuurirõnga lihtsustatud aproksimeerimisel arvestame selle siirete lineaarset sõltuvust kaablite sisejõududest ning jätame arvestamata survejõudude mõju kujumuutusele.



Joonis 4. Hüparikujuline rippkatus.

Sel juhul võime võrgu fiktiivse elemendi tasakaaluvõrrandi esitada kujul:

$$H_x \frac{\partial^2 (z+w)}{\partial x^2} + H_y \frac{\partial^2 (z+w)}{\partial y^2} = p\,. \tag{3.4}$$

Võrgu elemendi deformatsioonide vastavuse võrrandid võime esitada kujul:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x}\left(\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{1}{2}\frac{\partial w}{\partial x}\right) = \frac{H_x - H_{0x}}{E t_x}\left[1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2\right]^{3/2}, \tag{3.5}$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial y}\left(\frac{\partial z}{\partial y} + \frac{1}{2}\frac{\partial w}{\partial y}\right) = \frac{H_y - H_{0y}}{E t_y}\left[1 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2\right]^{3/2}, \tag{3.6}$$

kus H_x ja H_y on vastavalt kande- ja pingestuskaablite sisejõud ühiklaiuse kohta, u, v ja w on siirdekomponendid vastavalt telgede x, y ja z suunas, Et_x ja Et_y on kande- ja pingestuskaablite tõmbetugevused võrgu ühiklaiuse kohta.

Rõhtsuunaliste siirete u ja v elimineerimiseks tuleb võrrandeid (3.5) ja (3.6) integreerida ning need integraalid võrdsustada kontuurirõnga vastavate siiretega kaablitelt üleantavate jõudude toimel, kasutades integreerimisrajadena selle koordinaate tasandil x, y:

$$u = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial u}{\partial x} dx \text{ ja } v = \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial v}{\partial y} dy, \tag{3.7}$$

kus $x_2 = -x_1 = a\sqrt{\left(1 - x^2/a^2\right)}$ ja

$y_2 = -y_1 = b\sqrt{\left(1 - y^2/a^2\right)}$.

Elliptilise kontuuri rõhtsiirded kaablijõudude mõjumisel on avaldatavad seostest:

$$u_1 = \frac{5b^2}{72E_cI_c}\sqrt{\frac{a}{b}}\left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right)^{3/2} W; \tag{3.8}$$

$$v_1 = -\frac{5a^2}{72E_cI_c}\sqrt{\frac{a}{b}}\left(1 - \frac{x^2}{b^2}\right)^{3/2} W, \tag{3.9}$$

kus $W = -\left(H_x - H_{0x}\right)b^2 + \left(H_y - H_{0y}\right)a^2$ ja kus E_cI_c on kontuurirõnga paindejäikus.

Siirete u_1 ja v_1 aproksimeerimine valemitega (3.8) ja (3.9) viib tulemusteni, mis on väga lähedased täpsetele väärtustele.

Võrrandite (3.3)–(3.4) lahendamiseks aproksimeerime kaaablitevõrgu läbipaindefunktsiooni kujul, kus iga kaabel jääb ruutparaboolikujuliseks, järgmiselt

$$w = w_0\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 1\right). \tag{3.10}$$

Võttes nüüd arvesse valemeid (3.5) ja (3.6) ja integraale (3.7) ning võttes kaablite sisejõud deformatsioonide vastavuse võrranditest, saame süsteemi kahest võrrandist:

$$A_1\Delta H_x + B_1\Delta H_y = C_1, \tag{3.11}$$

$$A_2\Delta H_x + B_2\Delta H_y = C_2, \tag{3.12}$$

kus tegurid A_1, A_2, B_1, B_2, C_1 ja C_2 sõltuvad läbipaindest w_0 ja koordinaatidest x, y. Opereerides nüüd kaablite sisejõududega ΔH_x ja ΔH_y kui võrgu siirete funktsiooniga, saame kuupvõrrandi $\zeta_0 = w_0/f_x$ suhtes.

Integreeritavad võrrandid saab esitada kujul:

$$\int_0^b dy \int_0^K \left(\frac{x}{a}\right)^{2m}\left(\frac{y}{b}\right)^{2n}\left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)^q\left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right)^s \times$$
$$\times\left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}\right), \tag{3.13}$$

kus $K = a\sqrt{1 - y^2/b^2}$.

Pärast integreerimist, kasutades dimensioonita parameetreid, võime kuupvõrrandi kaablitevõrgu läbipainde $\zeta_0 = w_0/f_x$ määramiseks (võtmevõrrandi) esitada kujul:

$$\left(1 + \psi + 4\xi\right)\zeta_0^3 + 3\left[(1 - \alpha\psi) + 2(1 - \alpha)\xi\right]\zeta_0^2 +$$
$$+\left\{2\left[\left(1 + \alpha^2\psi\right) + (1 - \alpha)^2\xi\right] + \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)p_0^*\right\}\zeta_0 = p^*, \tag{3.14}$$

kus

$$\alpha = \frac{f_y}{f_x};\ \psi = \frac{a^4 t_y\left(1 + \kappa_x\right)}{b^4 t_x\left(1 + \kappa_y\right)};\ \kappa_x = \frac{5}{3}\frac{f_x^2}{a^2};$$

$$\kappa_y = \frac{5}{3}\frac{f_y^2}{b^2};\ \mu = 1 + \frac{1}{\psi}$$

on geomeetrilised parameetrid;

$$\Phi = \frac{5}{9}\frac{Et_x f_x^2}{a^2(1+\kappa_x)(1+\mu\xi)}$$

on kaablivõrgu jäikusparameeter (dimensioon kN/m);

$$\xi = \frac{5}{72}\sqrt{\frac{a}{b}}\frac{a^3 Et_y}{E_c I_c(1+\kappa_x)}$$

on kontuurirõnga suhteline jäikus;

$p_0^* = \frac{p_0 a^2}{2f_x\Phi}$ ja $p^* = \frac{pa^2}{2f_x\Phi}$ on vastavalt algse ja täiendava koormuse parameetrid.

Kaablite sisejõud saame määrata valemitest

$$H_x = H_{0x} + \Phi\zeta_0\left[(2+\zeta_0) - 2(1-\alpha+\zeta_0)\xi\right], \qquad (3.15)$$

$$H_y = H_{0y} - \beta^2\Phi\zeta_0\left[(2\alpha-\zeta_0)\psi - 2(1-\alpha+\zeta_0)\xi\right]. \qquad (3.16)$$

Pärast kaablitevõrgu suhtelise läbipainde määramist saame kontuurirõnga paindemomendi kohal $x=0$ arvutada võrrandist

$$M_{x=0} = \frac{1}{2}\left(H_x b^2 - H_y a^2\right)\times$$

$$\times\left[\frac{1+k^2}{3k^2} - \frac{(1-k^2)K(k)}{3k^2E(k)} - 1\right], \qquad (3.17)$$

kus $k=\sqrt{1-\beta^2}$ on kontuuri elliptilisus, $K(k)$ ja $E(k)$ on täielikud, vastavalt esimest ja teist järku elliptilised integraalid; paindemomendi väärtus kohal $x=a$ võetakse avaldisest (3.17) ilma nurksulgudes antud liikmeta 1.

Deformeeruva kontuurirõngaga hüparikujuliste katuste kasutamise efektiivsus oleneb suurel määral selle valitud konstruktiivsetest parameetritest. Need aga on seotud kaablitevõrgu ja seda toetava kontuurirõnga koostööga. Piirangud on tavaliselt määratud võrgu (koos katusekattega) ja kontuurirõnga deformatsioonidega ning kontuurirõnga vastupanuga paindel. Arusaadavalt tuleb silmas pidada ka materjali kasutamise ökonoomsust.

Katuse mõõted plaanis a, b (ja nende suhe $\beta = b/a$) ning kande- ja pingestuskaablite summaarne kõverusnool $f = f_x + f_y$ on tavaliselt ette antud. Põhifaktorid, mis mõjutavad märkimisväärselt konstruktsiooni käitumist katuse koormamisel, on järgmised:

- kaablite kõverusnoolte suhe $a = f_y / f_x$;
- pingestus- ja kandekaablite fiktiivsete paksuste suhe $\tau = t_y / t_x$;
- kontuurirõnga suhteline jäikus ξ;
- kaablitevõrgu eelpinge parameeter p_0^*.

Katuse väliskoormus (parameeter p^*) ning kontuurirõnga elliptilisus ja plaani mõõtmete suhe β on reeglina ette antud. Valitavate parameetrite jaoks võib soovitada järgmisi väärtusi:

$\alpha = 0{,}3 \ldots 0{,}5$, $\beta > 1$, $\tau = 0{,}7 \ldots 1{,}5$.

Parameetri τ mõju konstruktsiooni käitumisele on seotud põhiliselt kontuurirõnga deformatsioonidega, mille määrab selle jäikuse parameeter ξ. Kontuurirõnga suhtelise jäikuse parameeter ξ ongi enamasti põhifaktor, mis mõjutab kaablitevõrgu deformatsioone.

Võrreldes erinevaid katusekonstruktsioone (Kulbach, 2007), võib tulla järeldusele, et elliptilise kontuurirõngaga hüparikujulise pinnaga võrk-rippkatus on nende hulgas üks efektiivsemaid. Ehituspraktikas enam kasutatud võrk-rippkatused kahest tasapindsest kaarest kontuuriga on mitmeti ebasoodsamad, eriti võrgu pinna kõveruse järskude piirkondade tõttu. Hüparikujulised katused on kasutatavad ka suhteliselt suurte katusepindade puhul. Järgnevas on toodud projekteerimise näide spordihoone jaoks, kuhu saab mahutada normaalsete mõõdetega jalgpallistaadioni koos suurte tribüünidega pealtvaatajatele.

JALGPALLISTAADIONI VÕIMALIKU KATUSE-KONSTRUKTSIOONI KONTSEPTUAALNE PROJEKT

Olgu arvutusnäitena esitatav katusekonstruktsioon moodustatud hüparikujulise võrk-sadulpinnana ellipsikujulise kontuurirõngaga. Selle konstruktiivsed parameetrid on valitud selliselt, et hoonesse saaks mahutada staadioni jalgpalliväljakuga ning tribüünid pealtvaatajatele (Kulbach, Õiger, 2012). Seda arvestades lähtume järgmistest mõõdetest:

$L = 2a = 160$ m, $B = 2$, $b = 128$ m (vastav $\beta = 0{,}8$), $f = f_x + f_y = 20 + 8 = 28$ m (sellele vastav $\alpha = 0{,}4$). Katuse alaline koormus olgu $p_1 = 0{,}8$ kN/m^2, muutuv koormus $p_2 = 1{,}0$ kN/m^2. Võrgu eelpingele vastav kontaktkoormus koos võrgu omakaaluga $p_{0x} = 0{,}4 + 0{,}28 = 0{,}68$ kN/m^2, $p_{0y} = 0{,}4 - 0{,}28 = 0{,}12$ kN/m^2. Pingestuskaablitena kasutame terastrosse läbimõõduga $d = 60$ mm, kandekaablitena samu terastrosse dubleeritult; kaablite samm on $a_1 + b_1 = 2{,}00$ m. Seega on võrgu kihtide fiktiivsed paksused $t_x = 2{,}390$ mm, $t_y = 1{,}195$ mm ja nende suhe $\tau = 0{,}5$. Järgnevalt arvutame vajalikud parameetrid:

$$1 + \kappa_x = 1 + \frac{5}{3}\frac{f_x^2}{a^2} = 1{,}104\,,\quad 1 + \frac{5}{3}\frac{f_y^2}{b^2} = 1{,}026\,,$$

$$\psi = 1{,}3125 \text{ ja } \mu = 1 + 1/\psi = 1{,}7613\,.$$

Kontuurirõnga ristlõikeks olgu terastoru $D_c \times t_c = 3600 \times 80$ mm; selle geomeetrilised parameetrid $A_c = 0{,}8847$ m^2, $I_c = 1{,}3709$ m^4, $W = 0{,}7616$ m^3. Nüüd saame arvutada $\xi = 22{,}419$ ja $\Phi = 389{,}89$ kN/m. Võtmevõrrandi (3.1) alusel määrame nüüd võrgu eelpingele vastavad kaablite alg-sisejõud $H_{0x} = 108{,}8$ kN/m, $H_{0y} = 30{,}72$ kN/m; nendele vastavad koormusparameetrid on $p_1^* = 0{,}3064$ alalise koormuse jaoks ning $p^* = 0{,}7150$ summaarse koormuse jaoks. Kuupvõrrandi (3.14) lahendamisel saame võrgu pinna suhtelised ja absoluutsed läbipainded vastavalt $\zeta_0 = 0{,}03306$, $w_0 = 0{,}661$ m ning $\zeta_0 = 0{,}01574$, $w_0 = 0{,}315$ m.

Katusepinna kõveruse muutust iseloomustab nende suuruste vahe ja lühema silde (läbimõõdu) suhe. Vaadeldaval juhul on see

$$\frac{0.661 - 0{,}315}{128} = \frac{1}{370}\,,$$

mille võib rippkatuse jaoks lugeda vastuvõetavaks.

Kaablite sisejõudude juurdekasvud on $\Delta H_x = 392{,}1$ kN/m ja $\Delta H_y = 225{,}84$ kN/m.

Kaabli maksimaalne sisejõud on seega

$$N = \frac{108{,}8 + 392{,}1}{\cos\left(\arctan\dfrac{2f_x}{a}\right)} = 560{,}0 \text{ kN/m}$$

ning vastav tõmbepinge

$\sigma = 560/2{,}390 = 234{,}3$ N/mm^2.

Kontuurirõnga paindemomendi arvutamiseks tuleb arvutada selle elliptilisus $k = \sqrt{1 - \beta^2} = 0{,}6$. Tabelist saab leida vastavate elliptiliste integraalide väärtused $K(k) = 1{,}7508$, $E(k) = 1{,}4181$. Paralleelselt arvutame momendi võrrandis esinevad kordajad

$$\frac{1+k^2}{3k^2} - \frac{(1-k^2)K(k)}{3k^2E(k)} \text{ ja } \frac{1+k^2}{3k^2} - \frac{(1-k^2)K(k)}{3k^2E(k)} - 1\,.$$

Nende väärtuseks on 0,5277 kohal $x = a$ ning 0,4723 kohal $x = 0$; korrutame neid kordajaid momendi lähteväärtusega $\left(H_x b^2 - H_y a^2\right)/2$ katuse maksimaalse koormamise ning võrgu eelpingestamise juhtudel. Arvutamisel saame $\max M = 108\,100$ kN m.

Võttes arvesse ka pingeid pikijõust (survest), saame maksimaalse survepinge pikijõu $N = H_y a$ ja $\max M$:

$$\max\sigma = \left(\frac{108\,100}{761{,}6} + \frac{256{,}56 \times 80}{884{,}7}\right) \times 10^{-3} =$$

$$= 141{,}9 + 23{,}2 = 165{,}1 \text{ N/mm}^2.$$

VANTIDEGA TOETATUD PAARISMASTIDEST TÕSTUKID

Vaatamata mobiilkraanade arengule jäävad masttõstukid eelistatuks kõrgete seadmete (näiteks naftatöötlemise reaktorite) seeriaviisilisel montaažil. Tavaliselt ehitatakse mastid neljast sümmeetriliselt paiknevast nurkrauast, kusjuures iga mast on toetatud nelja (tavaliselt sümmeetriliselt asetatud) eelpingestatud vandiga. Tüüpilise masti tüvi on koormatud masti tipus rakendatud suurte püst- ja rõhtkoormustega. Jõudude ekstsentrilisus masti tipus põhjustab suuri paindemomente, mis sõltuvad oluliselt masti tipu siiretest, mis omakorda olenevad vantide eelpingest. Nende otstarbekas reguleerimine on seega suure tähtsusega. Sellal kui rippsilla ainult omakaaluga koormatud vandid on käsitletavad lineaarselt deformeeruvate tõmbevarrastena, tuleb mastide arvutamisel võtta arvesse vantide läbipainete muutumist nende omakaalu ja mastile rakendatud koormuste toimel.

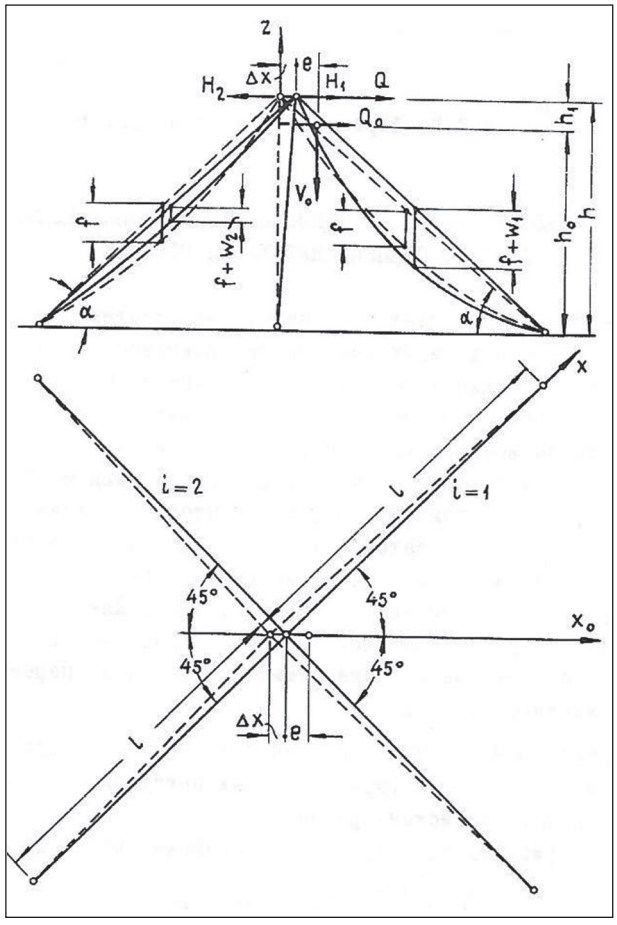
TTÜ ehituskonstruktsioonide kateedris on arendatud meetodid masttõstukite kandevõime oluliseks suurendamiseks: 1) masti stabiilsuse suurendamine paindemomentide ümberjaotamise teel ning 2) koormuse ekstsentrilisuse vähendamine spetsiaalse kangsüsteemi abil. Meie töödes on toodud näited vantidega masttõstukitest tõstevõimega 650 ja 1000 tonni. Montaažimastide kandevõime sõltub suurel määral kaabelvantide eelpingejõududest. Suurem eelpinge vähendab masti tipu siiret, kuid suurendab masti tüve survejõudu. Selle nähtuse illustreerimiseks analüüsime masti tüve ja kaabelvantide koostööd (joonis 5).

Neljast vandist koosnev süsteem on koormatud rõhtjõuga

$$Q = \frac{1}{h}\left[Q_0 h_0 + V_0\left(e + \Delta x\right)\right]. \tag{4.1}$$

Tasakaaluvõrrand on esitatav kujul

$$H_0 \frac{d^2 z}{dx^2} = p \tag{4.2}$$



Joonis 5. Sümmeetriliselt toetatud vantidega masttõstuki skeem.

lähteoleku jaoks ja

$$H_i \frac{d^2 (z + w_i)}{dx^2} = p \tag{4.3}$$

koormatud oleku jaoks, kus w_i on i-nda vandi läbipaine ($i = 1, 2$), H_0 ja H_i on i-nda vandi sisejõud enne ja pärast koormuse rakendamist mastile.

Siirde Δx ning kaabli sisejõudude H_1 ja H_2 määramiseks on meil masti tipu tasakaalutingimus ning kaks kaablite kui elastsete varraste deformatsioonide vastavuse võrrandit. Sümmeetriliselt paiknevate vantide korral viib võrrandite (4.2) ja (4.3) integreerimine, arvestades rajatingimusi, võrrandid kujule

$$z = (h - 4f)\frac{x}{l} + 4f\frac{x^2}{l^2}; \tag{4.4}$$

$$w = -4w_0\left(\frac{x}{l} - \frac{x^2}{l^2}\right); \tag{4.5}$$

$$H_0 = \frac{pl^2}{8f}; \tag{4.6}$$

$$H_i = \frac{pl^2}{8f\left(1 + \frac{w_i}{f}\right)} = \frac{H_0}{1 + \frac{w_i}{f}}, \tag{4.7}$$

kus f on kaabli (vandi) esialgne püstsuunaline läbiripe silde keskel (4.7).

Integreerides deformatsioonide vastavuse võrrandit

$$\frac{du}{dx} + \frac{dw}{dx}\left(\frac{dz}{dx} + \frac{1}{2}\frac{dw}{dx}\right) =$$

$$= \frac{H - H_0}{EA}\left[1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2\right]^{3/2} \tag{4.8}$$

ja võttes arvesse masti tipu siiret Δx, saame nüüd selle viia kujule

$$\frac{8f^2}{3l^2}\zeta_i(2 + \zeta_i) \mp \frac{\Delta x}{l\sqrt{2}} = \frac{H_i - H_0}{EA}\left(1 + \frac{h^2}{l^2}\right)^{3/2}, \tag{4.9}$$

kus $\zeta_i = w_i / f$ on *i*-nda kaabli suhteline läbipaine ja *EA* on kaabli tõmbetugevus.

Lahendades koos võrrandid (4.6), (4.7) ja (4.9), saame võrrandi kaabli suhtelise läbipainde määramiseks kujul

$$\zeta_i(2 + \zeta_i) \mp \frac{3l\Delta x}{8f^2} + \lambda = 0, \tag{4.10}$$

kus

$$\lambda = \frac{3H_0 l2}{8EFf^2}\left(1 + \frac{h^2}{l^2}\right)^{3/2} = \frac{3p_0 l^4}{64EAf^3}(1 + \kappa)$$

on kaabli koormusparameeter.

Sisestades kaabli sisejõud H_0 ja H_1 valemitest (4.6) ja (4.7) võrrandisse (4.9), saame kuupvõrrandi *i*-nda kaabli suhtelise läbipainde ζ_i määramiseks kujul

$$\zeta_0^3 + 3\zeta_0^2 + \left(2 + p_0^* \pm \frac{3l\Delta x}{8f^2\sqrt{2}}\right)\zeta_0 =$$

$$= \pm\frac{3l\Delta x}{8f^2\sqrt{2}}, \tag{4.11}$$

mis on analoogiline katuste ja sildade kaabelkonstruktsioonide vastavate valemitega. Märk „+“ kuulub kaablile indeksiga 1 ning märk „–“ kaablile indeksiga 2.

Rakendades nüüd valemit (4.10) eraldi suureneva ja väheneva läbirippega kaabli kohta, saame viia need kujule

$$\zeta_1(2 + \zeta_1) + \zeta_2(2 + \zeta_2) +$$

$$+ \lambda\left(\frac{1}{1 + \zeta_1} + \frac{1}{1 + \zeta_2}\right); \tag{4.12}$$

$$\frac{1}{1 + \zeta_1} - \frac{1}{1 + \zeta_2} = \frac{Q}{H_0\sqrt{2}}. \tag{4.13}$$

Pärast suhteliste läbipainete määramist saame valemist (4.10) määrata ka masti tipu siirde

$$\frac{\Delta x}{f} = \frac{8f}{3l}\left[\zeta_1(2 + \zeta_1) + \lambda\right]. \tag{4.14}$$

Suhteliste läbipainete ζ_1 ja ζ_2 võimalikud kombinatsioonid erinevate eelpingejõudude juures, masti tipu rõhtsiirde sõltuvus rakendatud koormusest Q ning eelpingejõududest, siirde Δx ja sisejõu H_1 olenevus parameetrist λ ning mastide arvutusliku kandevõime sõltuvus kaabelvantide läbipaindest selguvad trükises (Aare jt, 1976) toodud joonistelt.

KASUTATUD ARVUTUSMETOODIKA ISEÄRASUSED

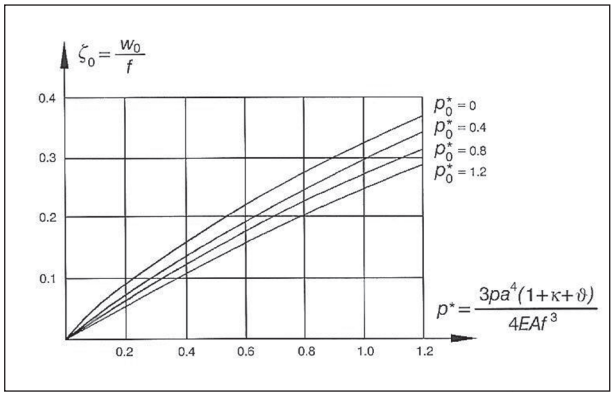
Selles töös on vaadeldud eri tüüpi kaabelkonstruktsioonide kõige üldisemaid (ühtlasi lihtsamini käsitletavaid) variante, kasutades ainult kontinuaalseid arvutusskeeme, jättes kõrvale meil arendatud diskreetsed arvutusskeemid ning ebaühtlaste koormuste juhud. Kaabelkonstruktsioonide arvutamisel lähtume üldisest filosoofiast. Vaatamata erisustele on vaadeldud konstruktsioonide põhiosaks kaabel (ühtsus), mida iseloomustab suur tõmbetugevus (Engelbrecht, 2002). Arvutusmudelid vastavad vaadeldava konstruktsiooni iseloomule, mis viitab nende erisusele. Kõikidel juhtudel on arvestatud põhikonstruktsiooni ja seda toetavate süsteemide koostööd. Ka selle koostöö arvestamisel võib esineda ühtsus, kui sirge kaabli omakaal jääb arvestamata (näiteks sirgete ankurvantide korral või eeldades toetava kontuuri kui varrassüsteemi deformatsioonide lineaarsust) või erisus, kus ankurdava kaabli läbipaine omakaalu toimel mängib suurt rolli (näiteks tõstemasti toetavate vantide puhul). Mitmete lihtsustatud valemite kasutamisel on kontrollitud nende kokkulangevust keerukate inseneriülesannete lahendamiseks kasutatavate keerukamate mudelite abil saadud tulemustele vajaliku täpsusega. Siin võib käsitleda täpsete ja ligikaudsete mudelite ühtsust või erisust.

Kaabelkonstruktsioonide pingedeformatsioonide matemaatilise mudeli tuletamise aluseks on mittelineaarse elastsusteooria võrrandite rakendamine. Kaabelkonstruktsioonide uurimise algstaadiumis selgus, et kaabli töötamist tavaliselt iseloomustavad kuupvõrrandid, kus võtmeparameetriks on kaabli sisejõud, pole sobitatavad reaalsete süsteemide arvutamiseks. Kui rakendaksime meil kasutatavaid tähistusi, on tavaliselt kasutatav kuupvõrrand kaabli sisejõu kui põhiparameetri määramiseks esitatav kujul:

$$\left(\frac{H}{EA}\right)^3+\left[\frac{2f^2}{3a^2(1+\kappa)}-\frac{H_0}{EA}\right]\left(\frac{H}{EA}\right)^2 =\frac{(p_0+p)^2a^2}{6E^2A^2(1+\kappa)}. \tag{5.1}$$

Jüri Engelbrechti kandidaadiväitekirja koostamise ajal tekkis meil esimene diskussioon kaabli võrrandi esitamiseks kujul, kus võtmeparameetriks on kaabli läbipaine (Kulbach, Engelbrecht, 1967). See põhimõte läbib kõigi hiljem meil vaatluse alla võetud erinevate kaabelkonstruktsioonide arvutamist. Usaldusväärsete arvutustulemuste saamiseks tuleb vahetult arvesse võtta kaabelsüsteemi ja seda toetavate konstruktsioonide koostööd, võrrutades toe siirde kaabelsüsteemi deformatsioonide vastavuse võrrandi integreerimisel saadava siirdega. Vajadusel on erinevate ligikaudsete mudelite kasutamisel saadud arvutustulemusi võrreldud suurema täpsusega mudelite alusel saadud tulemustega.

Sümmeetrilisest erineva (näiteks ühepoolse) väliskoormuse korral on rakendatud pingeolekute superpositsiooni printsiipi summaarse koormuse jagamisel sümmeetriliseks ja antisümmeetriliseks komponendiks ning nendele vastavate koormustega pingeolekute järjestikune arvutamine. Selle idee rakendamist mittelineaarsete ülesannete lahenda-



Joonis 6. Suhtelise läbipainde sõltuvus koormusparameetrist.

misel on õigustanud selle töö autori teised uurimistööd (mudelite ühtsus ja erisus).

Kõigi vaadeldavate kaabelkonstruktsioonide võtmevõrrandid on esitatud kujul, kus nii määratavad tundmatud (süsteemi läbipainded) kui ka kõik teised parameetrid (k.a toetava konstruktsiooni vastupanu määravad suurused) on dimensioonita (suhtelised) suurused. Kõigis võtmevõrrandites (suhtelise läbipainde määramiseks) on prevaleerivaks lineaarne liige; see võimaldab kuupvõrrandite lahendamist lihtsa iteratsiooni teel. Arvutusmetoodika erisust võib demonstreerida graafiku abil (joonis 6), kus on antud konstruktsiooni suhtelise läbipainde ζ_0 sõltuvus koormusparameetrist p^*.

VIITED

Aare, J., Goldenberg, I., Kulbach, V. 1976. Analysis of hoisting masts with consideration of system displacements. – Transactions of Tallinn Polytechnical Institute, 410, 3–10 (vene keeles).

Engelbrecht, J. 2002. Challenges for tensile stresses. – Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Engineering, 8 (2), 134–142.

Kulbach, V. 2007. Cable Structures. Design and Static Analysis. Estonian Academy of Sciences Publishers, Tallinn.

Kulbach, V., Engelbrecht, J. 1967. On design of an elastic string by the method of displacements. – Transactions of Tallinn Polytechnical Institute, 256, 57–64 (vene keeles).

Kulbach, V., Õiger, K. 2012. Design of spatial cable structures for sport arenas. – Збірник науковой праць: Українского інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського [V. N. Shimanovsky Ukrainian Institute of Steel Construction]. Kiiev, 142–155. (Науковий збірник; 9).

TERAS KULUMISKINDLATE KOMPOSIITIDE TEHNOLOOGIAS

Jakob Kübarsepp
Tallinna tehnikaülikooli mehaanika ja tööstustehnoloogia instituut

SISSEJUHATUS

Materjalidel on oluline roll tootlikkuse ja konkurentsivõime suurendamisel paljudes tööstusharudes. See on üks peamistest põhjustest, miks materjaliteadus ja -tehnoloogia kuuluvad Euroopas ja Eestis prioriteetsete teadussuundade hulka. Materjale liigitatakse enamasti keemilise koostise ja aatomstruktuuri järgi kolme gruppi: (1) metallid ja sulamid, (2) keraamilised materjalid ja (3) orgaanilised materjalid. Neljanda grupina eristatakse komposiitmaterjale, milles eelnimetatud materjalid on struktuurselt kombineeritud, nt metallmaatrikskomposiidid ja keraamikamaatrikskomposiidid.

Materjalid on läbi inimkonna ajaloo vallandanud revolutsioonilisi muudatusi tootmises ja ühiskonnas laiemalt. Olulisemad, inimkonda enim mõjutanud leiutiste hulgas on tähelepanu väärivad teras ja betoon (Inventions that Changed the World, 2017). Suurem osa muudest leiutistest (transistor, auto, lennuk, raudtee, hõõglamp, patarei, arvuti jne) on leidnud laialdast rakendust tänu saavutustele materjalide ja materjalitehnoloogiate valdkonnas. Olulisemate inimkonda mõjutanud materjalide hulka kuuluvad lisaks terasele (masstootmine, 1856) ja betoonile (nüüdisaegne tehnoloogia, 1755) klaas (u 4000 aastat tagasi), kummi (vulkaniseerimine, 1844), alumiinium (elektrometallurgia, 1886), roostevaba teras (1904–1912), polümeerid (teoreetilised alused, 1920) (The Greatest Moments …, 2017).

Materjalidest väärib esile tõstmist teras, mis tegi võimalikuks esimese tööstusliku revolutsiooni. Masstootmise algus 19. sajandi keskpaigas, kui Henry Bessemer leiutas odava terase tootmistehnoloogia (1856) ja Carl Wilhelm Siemens terasesulatuse regeneratiivmeetodi (1865), tegi võimalikuks terase massilise kasutamise konstruktsioonimaterjalina. Teras on oluline konstruktsioonimaterjal ka praegu, 21. sajandi alguses. Teraste tehnoloogia valdkonnas on oluliseks tähiseks Robert Forester Musketi leiutatud volframteras (1868), mis lõi eeldused kiirlõiketeraste väljatöötamiseks ja rakendamiseks metallitöötlemises 20. sajandi alguses. Teras on sajaprotsendiliselt taaskasutatav, ilma et selle tulemusena halveneks uue terase kvaliteet, samuti enim taaskasutatav materjal üldse.

Üks peamisi seadmete ja konstruktsioonide suhteliselt lühikese elutsükli põhjusi on kulumine ja korrosioon või mõlemad üheaegselt. Mõnes tööstusharus, näiteks mäetööstuses, võivad kulutused kulunud konstruktsiooniosade väljavahetamisele või taastamisele ulatuda 40 protsendini kogukuludest seadme elutsükli jooksul (EuMat, 2017). Kulutuste vähendamine elutsükli

jooksul eeldab teaduslikult põhjendatud materjalivalikut, uute materjalide ja vastavate materjalitehnoloogiate arendamist ning paremat arusaama materjali degradatsioonimehhanismidest (kulumine, korrosioon, väsimus jne). Nüüdismaterjalide valdkonnas on Euroopa suundumas uute materjaligruppide (sh nanostruktuursed materjalid, gradientmaterjalid, multimaterjalid, metall- ja keraamikamaatrikskomposiidid) väljatöötamisele ning tänapäevaste tootmistehnoloogiate (pulbermetallurgia, pindamistehnoloogiad, uued kihtlisandus- ja liitetehnoloogiad) arendamisele.

Teadusuuringutega materjalitehnoloogia valdkonnas on TTÜs tegeletud erinevates teaduskondades juba aastakümneid. Üheks suunaks alates 1960ndate algusest on pulbermetallurgia (pulbertehnoloogia) kui üks toodete vormimise tehnoloogiatest tavapäraste (valutehnoloogia, survega töötlemine) kõrval. Pulbermetallurgia laboratooriumi asutamisest peale kuni praegusajani on teadus- ja arendustöö üks peamisi suundi olnud kulumiskindlad komposiitmaterjalid (pulberkomposiidid).

Paralleelselt uuringutega kulumiskindlate pulberkomposiitide valdkonnas on pikka aega toimunud teadustöö ka materjalide kulumise (triboloogia üks alasuundi) valdkonnas. Kahe paralleelse uurimissuuna (kulumiskindlad pulbermaterjalid ja materjalide kulumine) sünergia toel on arendatud terve rida tööstuslikeks rakendusteks sobilikke, suure kulumiskindlusega komposiitmaterjalide gruppe. Nende hulka kuuluvad kermised (ingl *cermet, ceramic-metal composite*) – suure kõvadusega rasksulavate ühendite (karbiidid, karbonitriidid, oksiidid, nitriidid, boriidid jmt keraamika) ja metalse materjali baasil komposiitmaterjalid. Kermistest on kõige enam rakendust leidnud kõvasulamid (ingl *cemented carbide, hardmetal*), mida eristab teistest keraamilise osisena volframkarbiidi (WC) kasutamine. TTÜs on teadus- ja arendustegevus olnud suunatud peamiselt titaankarbiidi (TiC) baasil kulumiskindlate keraamikapõhiste komposiitmaterjalide (kermiste) arendamisele, kus kasutatakse keraamika haprust vähendava metalse komponendina niklisulameid (valdavalt NiMo) või rauasulameid (teraseid).

RAUASULAMID (TERASED) KERMISTE METALLFAASINA

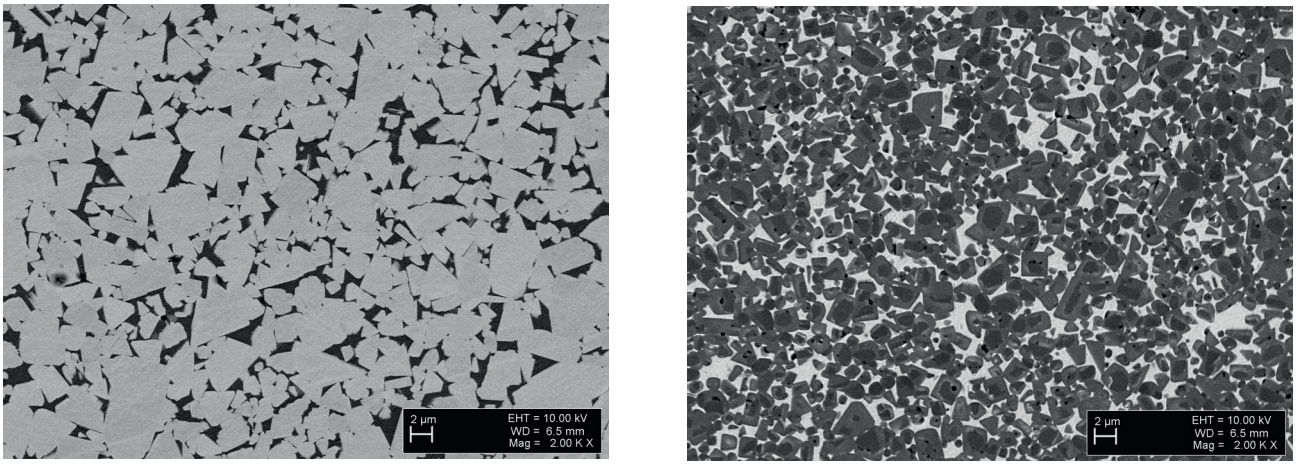
Kõige laiemat kasutust alates patenteerimisest 1923. aastal on keraamilis-metalsete komposiitidena leidnud kõvasulamid WC-Co. Metallitöötlemises võib kõvasulamitest tööriistu vaadelda revolutsioonilistena, sest need võimaldavad kordades suurendada lõikekiirusi ja survetöötlustööriistade püsivust. Sarnased arengud toimusid ka mäetööstuses. WC-Co kõvasulamite kõrval arendati materjalide lõiketöötlemiseks selliseid komposiitmaterjale nagu WC-TiC-Co (1931), WC-TiC-(Ta, Nb)C-Co (1932) jt. Suurepäraste mehaaniliste omaduste ja kulumiskindluse tõttu on volframkarbiidil põhinevad karbiidkomposiidid ka tänapäeval kõige laiema kasutusvaldkonnaga kulumiskindlad, samas suure tugevusega materjalid tööriistade ja kulumiskindlust eeldavate toodete tootmisel.

Nii volfram kui koobalt on strateegiliselt olulised metallid, mille sisaldus maakoores on piiratud. Samuti iseloomustab nende baasil kõvasulameid WC-Co tagasihoidlik vastupanu oksüdeerumisele temperatuuridel >600 °C. Nendel põhjustel alustati juba möödunud sajandi kolmekümnendatel alternatiivsete, WC-Co kõvasulameid asendavate kermiste arendamist. Alternatiivsetes, nn volframivabades karbiidkomposiitides on kõige laiemat rakendust leidnud titaankarbiid (TiC) ja titaankarbonitriid (TiCN). Sellistes komposiitmaterjalides kasutatakse metalse faasina eelkõige niklit ja niklisulameid (Sarin, 2014). Märksa vähem on uurijatele huvi pakkunud kermised, kus metalse faasina kasutatakse rauda ja rauasulameid. Eelmise sajandi 80ndatel ja 90ndatel ning selle sajandi alguses oli TTÜ üks vähestest teadusasutustest maailmas ja

Euroopas, kus fookuses olid titaankarbiidsed kergkomposiidid, milles metalse faasina kasutati teraseid – martensiitseid (karastuvaid), austeniitseid ja austeniit-martensiitseid teraseid. TTÜs läbiviidud uurimistöö tulemusena arendati terve rida metalse komponendi erineva sisalduse ja struktuuriga karbiidkermiseid TiC-teras. 1996. aastaks leidsid need karbiidkomposiidid koha ka vastava valdkonna käsiraamatus Eesti ainsa kõvasulamitest ja kermistest tooteid tootva firma SUMAR Ltd. toodetena (Brookes, 1996).

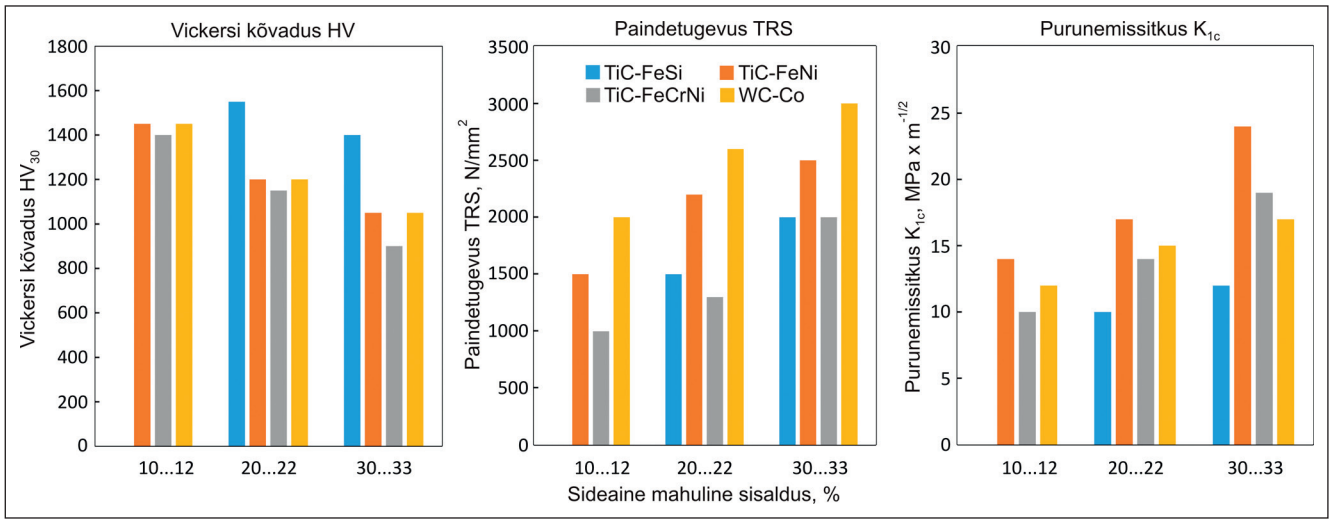
Väljatöötatud ja intellektuaalse omandi tunnistustega kaitstud titaankarbiidkomposiidid ei olnud vaid teadusliku uurimise objektiks (struktuuri moodustumise protsessid, mehaanilised omadused, korrosiooni- ja kulumiskindlus), vaid pakkusid huvi ka tööstuslikke rakendusi silmas pidades tingimustes, kus WC-Co kõvasulamitel on vajakajäämisi. TiC-teras kermiseid iseloomustavad heal tasemel mehaanilised omadused; väike tihedus (u 2,5−3 korda väiksem kui kõvasulamitel WC-Co), hea korrosiooni- ja korrosioon-abrasiivkulumiskindlus, väga head kõrgtemperatuursed omadused (oksüdeerumiskindlus), lähtekomponentide (TiC, Fe) kättesaadavus, odavus ja mittetoksilisus. Joonisel 1 on näha titaankarbiidkermise ja võrdlusena WC-Co kõvasulami tavapärane struktuur. Joonisel 2 on võrreldud kermiste TiC-teras kõvasulamite WC-Co mehaanilisi omadusi.

Tavapäraste, volframkarbiidi baasil karbiidkomposiitide toksilisusele on hakatud tähelepanu pöörama alles viimasel aastakümnel, kui Euroopa Liit võttis vastu määruse, mis käsitleb kemikaalide registreerimist, hindamist, autoriseerimist ja piiramist (REACH – *Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals*) (REACH, 2006). REACH liigitab koobalti inimese tervisele väga toksiliste elementide hulka. Toksiliseks ja allergiat tekitavaks elemendiks on ka nikkel, mis on leidnud kasutamist WC ja TiC ning TiCN-baasil komposiitide metallsideaine peamise koostisosana. Ameerika Ühendriikide rahvuslik toksikoloogiaprogramm (National Toxicology Program, 2017) hindab mürgiseks volframkarbiidi ja koobalti pulbrit ja tolmu, eriti nende kahe komponendi koosesinemisel. Koobalti ja nikli kui kermiste peamiste metalsete komponentide mürgisus on põhjustanud teadlaste kasvava huvi raua ja rauasulamite (teraste) vastu keraamilis-metalsete komposiitide metalse faasina. Samuti on kasvamas



a) b)

Joonis 1. Kõvasulamite WC-Co (a) ja kermiste TiC-FeNi (b) struktuur (karbiidse faasi ligikaudselt sarnase mahulise sisalduse juures ~80%).



Joonis 2. Karbiidkomposiitide TiC-teras ja WC-Co mehaaniliste omaduste (kõvadus, paindetugevus, purunemissitkus) võrdlus metallsideaine sarnase mahulise sisalduse (%) ja karbiidse faasi keskmise terasuuruse (~2 µm) juures.

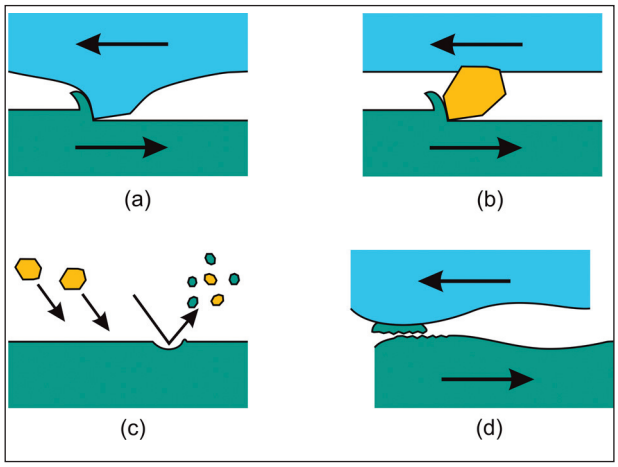
teadusartiklite arv, kus uurimisobjektiks on karbiidkomposiidid ja kõvasulamid, milles metalse sideainena kasutatakse nn alternatiivseid sideaineid, peamiselt rauasulameid. Uuringud sulamite TiC-teras valdkonnas on jätkunud ka TTÜs. Viimasel kümmekonnal aastal on uuritud muu hulgas nende kergkomposiitide talitusomadusi – kulumiskindlust, vastupanu tsüklilistele koormustele (väsimust).

KONKURENTSIVÕIME KULUMISKINDLA MATERJALINA

Kulumine seisneb kontakteeruvate pindade järkjärgulises purunemises ja sealt materjali eemaldumises. Väsimuse ja korrosiooni kõrval on kulumine üks kolmest peamisest põhjusest, mis piirab tööriista või konstruktsioonielemendi püsivusaega. Tavaliselt eristatakse nelja pindade kulumismehhanismi (protsessi): (1) abrasioon, (2) adhesioon, (3) pindväsimus, (4) tribo-keemilised reaktsioonid. Enim esinevad kulumismehhanismid on abrasioon ja adhesioon. Kulumine toimub üldjuhul siiski mitme kulumisprotsessi koosmõjul.

Kulumisliikidena eristatakse abrasiiv-, adhesioon-, erosioon-, väsimus-, löök-, korrosioonkulumist jt. Iga kulumisliigi puhul võib, olenevalt konkreetsest tribosüsteemist (joonis 3), esineda üks või mitu kulumismehhanismi. Abrasiivkulumine (kulumine abrasiooni toimel) on kõvade osakeste toimel toimuv materjalikadu pindadelt. See võib toimuda kahe keha abrasioonina (*two-body abrasion*) või kolme keha abrasioonina (*three-body abrasion*) (joonis 3a ja 3b). Pindade abrasioon kaasneb ka erosioonkulumisel (joonis 3c). Adhesioonkulumisel kontakteeruvad pinnad liituvad molekulaarjõudude toimel üksikutes punktides, millele järgneb materjali pinnast väljarebimine (joonis 3d).

Kulumisuuringud TTÜs on suurel määral suunatud tulemuste kasutamisele uute tööriistamaterjalide arendamiseks ja valikuks. Fookuses on olnud eelkõige tööriistamaterjalid sellistes valdkondades nagu metallide külmsurvetöötlus, samuti maavarade kaevandamine ja materjalide peenestamine. Kui esimesel juhul on valdavateks kulumismehhanismideks adhesioon ja abrasioon, ka pindväsimus, siis maavarade kaevandamisel ja peenestamisel eelkõige abrasioon ja pindväsimus. Kuna lisaks



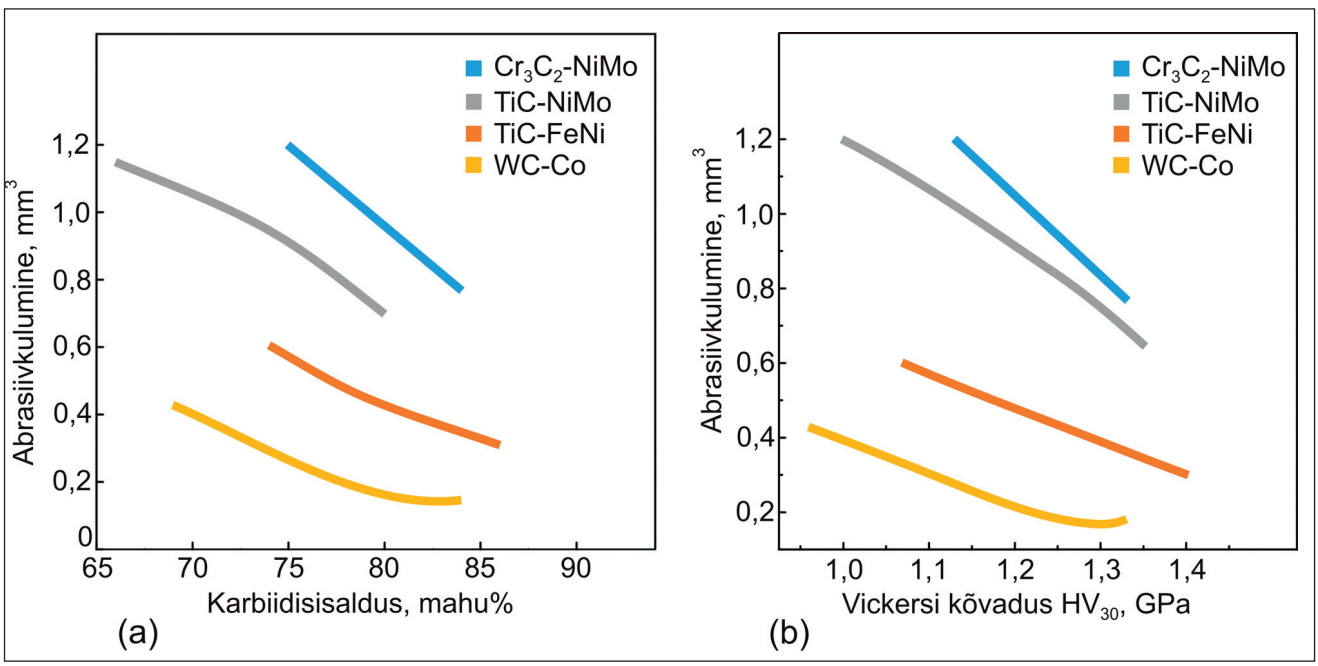
Joonis 3. Kahe keha abrasioon (a), kolme keha abrasioon (b), abrasiiv-erosioon (c) ja adhesioon (d).

kulumisele on tööriistad allutatud ka märkimisväärsetele mehaanilistele koormustele, on materjalide valikul oluline ka tugevus ja purunemissitkus. Sobivaima materjali leidmine erinevate töötingimuste puhul on sagedane väljakutse materjaliteadlastele ja inseneridele.

ABRASIOON

Abrasiivkulumiskindlust saab testida, rakendades standardiseeritud metoodikaid, nt standardit ASTM G 65-94. Abrasiivina kasutatakse testimisel valdavalt kulumist põhjustavat abrasiivi – kvartsliiva. Kummiga kaetud terasketta ja proovikeha vahele suunatakse liiv terasuurusega 0,1 … 0,2 mm ja Vickersi kõvadusega ligikaudu $HV = 1100$. Kulumist hinnatakse massi kaona (mm^3) proovikeha ja ketta suhtelise libisemise kindla teekonna jooksul (nt 144 m).

Ootuspäraselt on kulumine seda väiksem (kulumiskindlus suurem), mida suurem on komposiidi kõvadust suurendava karbiidse faasi sisaldus (joonis 4a). Ootuspärane ei ole, et kõvaduse järgi pole võimalik hinnata karbiidfaasi erineva koostisega komposiitide kulumiskindlust – sama kõvaduse juures võib kulumine väga suurel määral erineda (joonis 4b). Küll saab kõvaduse järgi hinnata kulumiskindlust karbiidkomposiitide sama grupi (nt WC-baasil kõvasulamid) piires (Klaasen, Kübarsepp, 2006; Klaasen jt, 2007).



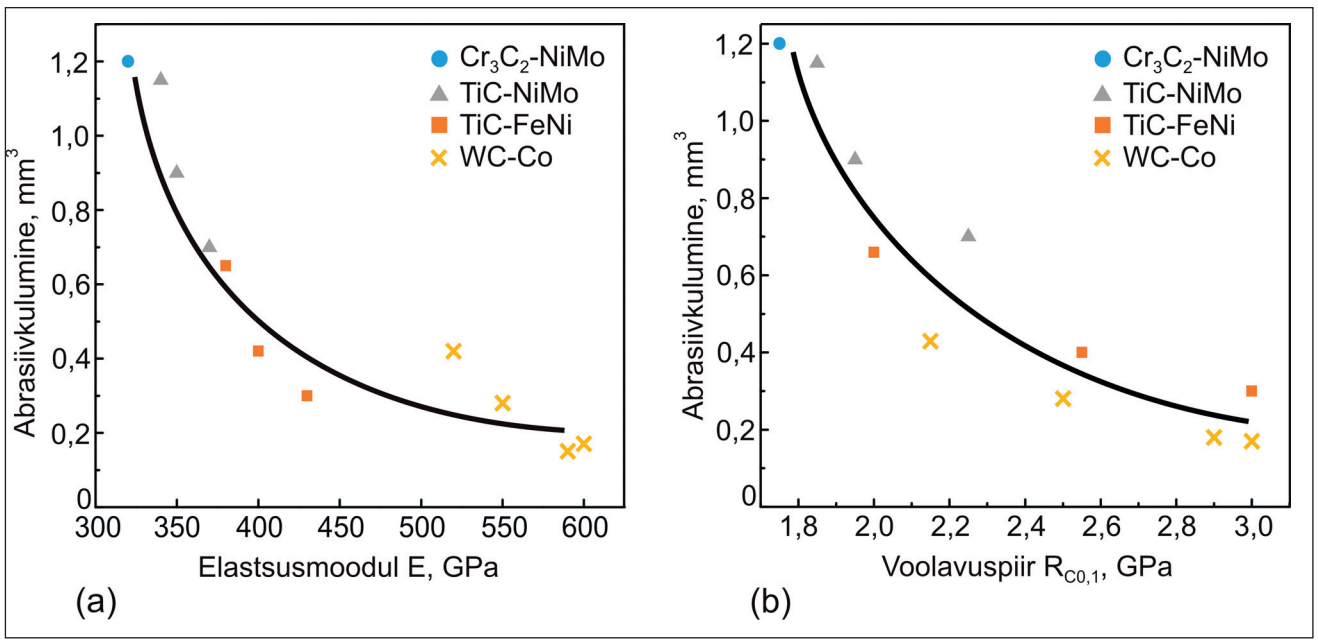
Joonis 4. Karbiidkomposiitide abrasiivkulumise (massi kao) sõltuvus karbiidfaasi (WC, TiC, Cr_3C_2) mahulisest sisaldusest (a) ja Vickersi kõvadusest (b).

Sarnase kõvaduse ja keraamilise faasi mahulise sisalduse juures on kulumiskindluselt selgelt parimad WC-baasil kõvasulamid. Titaankarbiidkermiste (TiC-NiMo, TiC-FeNi) võrdluses on toatemperatuuridele lähedastel temperatuuridel kulumiskindlamad rauasulamitest (terastest) sideainetega kermised. Abrasiivkulumiskindlus sõltub eelkõige komposiidi jäikusest, see tähendab vastupanust elastsetele ja plastsetele deformatsioonidele. Vastupanu elastsetele deformatsioonidele saab hinnata normaalelastsusmooduliga (E) ja plastsetele deformatsioonidele voolavuspiiriga survel $R_{C0,1}$. Mõlemad mehaanilised omadused (E, $R_{C0,1}$) on kõige enam mõjustatud komposiidi karbiidse faasi karakteristikutest (elastsusmoodul, mahuline sisaldus, terasuurus), vähemal määral metalse faasi omadest. Karbiidkomposiitide kulumise sõltuvus elastsusmoodulist ja voolavuspiirist on näha joonisel 5. Nende mehaaniliste karakteristikute alusel saab märksa paremini kui kõvaduse alusel hinnata erinevate materjalide abrasiivkulumiskindlust (vrd joonis 4b ja joonis 5).

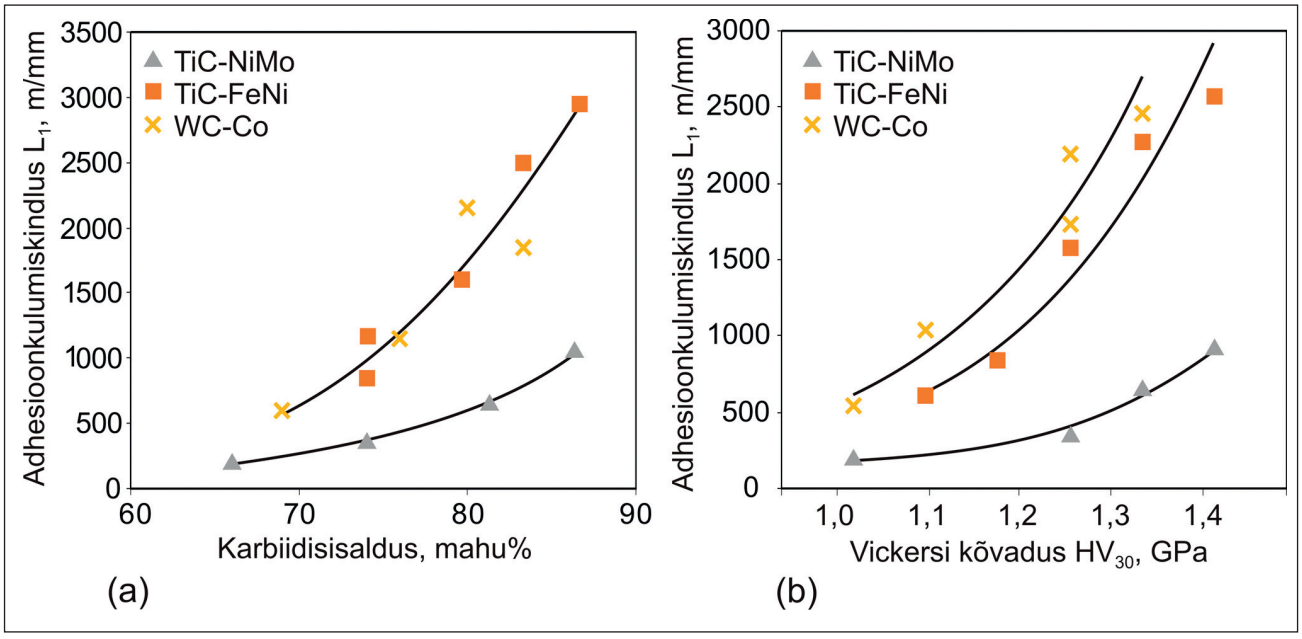
Eeltooduga küllalt sarnaseid järeldusi saab teha kulumisel abrasiivse erosiooni tingimustes. Abrasiiv-erosioonkulumist testitakse, kasutades selleks TTÜs juba enam kui 40 aastat tagasi Ilmar Kleisi eestvedamisel arendatud abrasiivosakeste tsentrifugaalkiirendit. Ka abrasiiv-erosioonkulumise tingimustes demonstreerivad parimat kulumiskindlust suure elastsusmooduliga kõvasulamid WC-Co. Seda vaatamata kulumismehhanismi erisustele võrreldes tavapärase abrasiivkulumisega (Klaasen, Kübarsepp, 2006). Kokkuvõtvalt on võimalik järeldada, et kulumistingimustes, kus prevaleerivaks kulumismehhanismiks on abrasioon, tuleb eelistada võimalikult suure jäikusega (elastsusmooduliga) keraamilis-metalseid komposiitmaterjale.

ADHESIOON

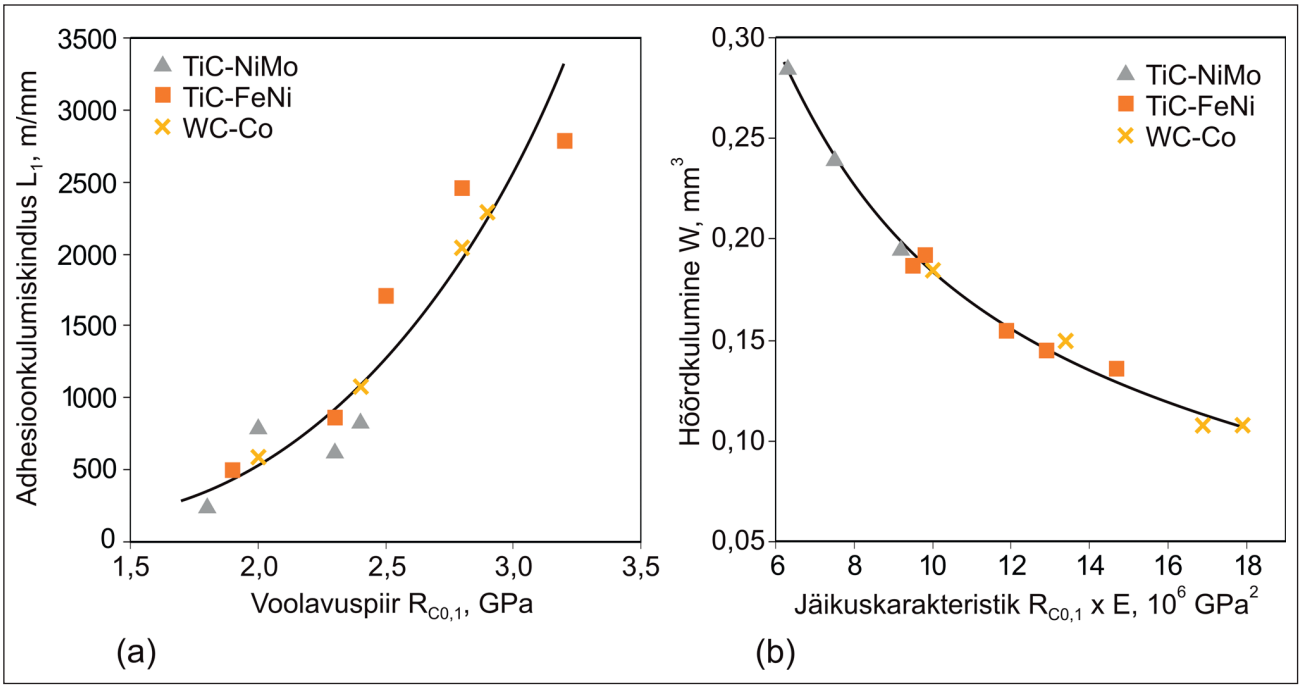
Adhesioonkulumise testimise ühe võimaliku skeemina on TTÜs kasutatud meetodit, mis seisneb plastse madalsüsinikterase treimises väikestel lõikekiirustel. Sellistes tingimustes prevaleerib kulumismehhanismina adhesioon (joonis 3d).



Joonis 5. Karbiidkomposiitide abrasiivkulumise (massi kao) sõltuvus elastsusmoodulist (a) ja voolavuspiirist survel (b).



Joonis 6. Karbiidkomposiitide adhesioonkulumiskindluse sõltuvus karbiidfaasi mahulisest sisaldusest (a) ja Vickersi kõvadusest (b).



Joonis 7. Karbiidkomposiitide adhesioonkulumiskindluse sõltuvus voolavuspiirist survel ja hõõrdkulumise sõltuvus jäikuskarakteristikust (b).

Adhesioonkulumisel, erinevalt abrasiivkulumisest ja abrasiiv-erosioonkulumisest, ei ole kõvasulamitel WC-Co karbiidfaasi sama mahulise sisalduse puhul märkimisväärseid eeliseid titaankarbiidkermiste TiC-teras ees (joonis 6a). Sarnaselt abrasiivkulumisega ei võimalda kõvadus adekvaatselt hinnata erineva koostisega (WC, TiC, Cr_3C_2-baasil) karbiidkomposiitide kulumiskindlust (joonis 6b). Suurte kõvaduste puhul võivad karbiidfaasi erineva koostisega komposiitide kulumiskindlused erineda kuni suurusjärgu võrra. Küll saab kõvaduse järgi hinnata kulumiskindlust sama grupi (nt TiC-teras kermised) piires (Klaasen jt, 2010).

Erinevalt abrasiivkulumisest ja abrasiiv-erosioonkulumisest ei anna keraamilis-metalsete komposiitide suurem vastupanu elastsetele deformatsioonidele (elastsusmoodul) eeliseid adhesioonkulumiskindluses. Kulumine sõltub pigem materjali vastupanust kohalikele plastsetele deformatsioonidele, mis on hinnatav materjali voolavuspiiriga survel (joonis 7a). Voolavuspiir on seda suurem, mida suurem on keraamilise faasi mahuline sisaldus ning metalse faasi vastupanu (tõmbe- ja nihketugevus) eraldumisele.

ADHESIOON JA ABRASIOON

Hõõrdkulumise kulumismehhanismideks on nii abrasioon kui adhesioon.

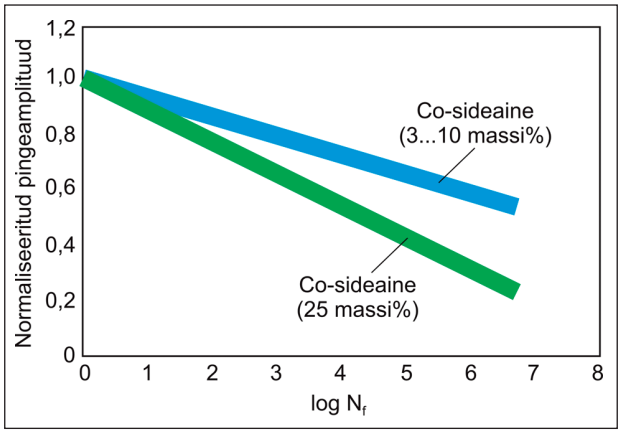
Erinevalt abrasiiv- ja adhesioonkulumisest iseloomustab hõõrdkulumist märgatavalt väiksem kulumise intensiivsus, kulumise struktuuri (karbiidfaasi mahuline sisaldus, sideaine koostis ja struktuur) tundlikkus. See on seletatav kulumist vähendavate tribokihtide moodustumisega vastastikku hõõrduvate pindade vahel. Sarnaselt abrasiiv- ja adhesioonkulumisega ei saa materjali valikul anda kulumiskindlusele adekvaatse hinnangu karbiidkermiste kõvaduse järgi. Märksa täpsema hinnangu saab anda nn jäikusparameetrit $ER_{C0,1}$ (elastsusmoodul × voolavuspiir survel) kasutades (joonis 7b) (Klaasen jt, 2010).

Kokkuvõtvalt: kulumisuuringud võimaldasid teha olulisi järeldusi erinevate keraamilis-metalsete komposiitide parima rakenduse seisukohalt. Kulumistingimustes, kus prevaleerib abrasioon, on selged eelised suure elastsusmooduliga volframkarbiidkomposiitidel WC-Co. Kulumistingimustes, kus olulist rolli mängib adhesioon (näiteks madalsüsinikteraste külmdeformeerimine), on titaankarbiidkermised kulumiskindluse seisukohalt tööriistamaterjalina volframkarbiidsete kõvasulamitega samaväärsed või isegi paremad.

VASTUPANU TSÜKLILISTELE KOORMUSTELE (VÄSIMUS)

Kulumise ja korrosiooni kõrval on väsimus üks kolmest põhjusest, mis piirab konstruktsioonielemendi või tööriista püsivust. Purunemine toimub ühe koormustsükli jooksul, kui koormuse monotoonsel kasvamisel pinged ületavad tugevuspiiri. Tsüklilistel koormustel võivad enneaegset purunemist põhjustada ka pinged, mis on voolavuspiirist (paljutsükliline väsimus) või tugevuspiirist (vähetsükliline väsimus) väiksemad.

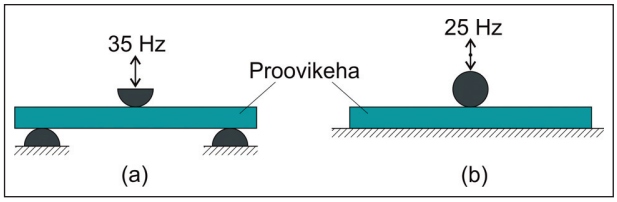
Enimkasutatav lähenemine väsimusuuringutes on pinge – tsüklite arv *S–N* (*stress – number of cycles*) kõverate, nn Wöhleri kõverate koostamine (joonis 8). Kõvasulamite ja kermiste puhul



Joonis 8. Kõvasulamite WC-Co tüüpilised Wöhleri kõverad (Sarin, 2014).

kasutatakse tsüklilise koormuse skeemina enamasti painet (Sarin, 2014). Wöhleri kõverad võimaldavad hinnata väsimustugevust, st suurimat pinget, mida materjal *N* korda purunemata talub. Väsimuskõvera kaldenurk iseloomustab väsimuskahjustuste akumuleerumisest tingitud tugevuse vähenemist. Suurem kaldenurk annab tunnistust suuremast väsimustundlikkusest.

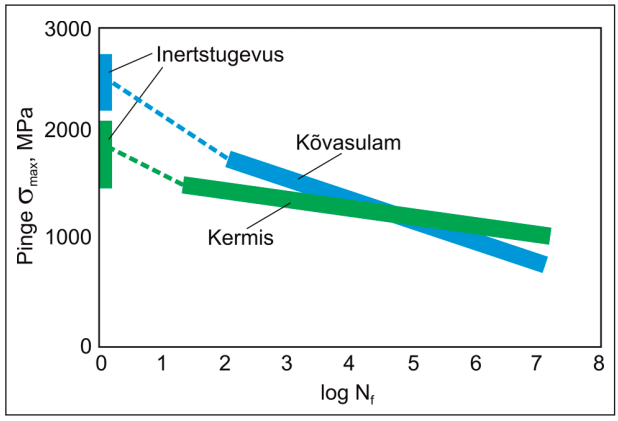
Karbiidkomposiitide väsimusuuringud TTÜs on olnud seotud tulemuste praktilise rakendamise vajadustega uute tööriistamaterjalide arendamiseks ja valikuks. Fookuses on olnud eelkõige stantsimaterjalid elektrotehnilisest madalsüsinikterasest plekist toodete väljalõike- ja silelõikestantsimiseks. Väljalõikestantside elementide, eelkõige matriitside püsivus võib olla seotud kas tavapärase, struktuurse väsimusega või kontaktväsimusega. Kontaktväsimust, erinevalt tavapärasest, põhjustavad lokaalsed kontaktpinged, mis on iseloomulikud kontaktidele, millest vähemalt üks on kõverjooneline (nt kuul–tasapind). TTÜs rakendatud väsimuskatsete lihtsustatud skeemid on näha joonisel 9.



Joonis 9. Katseskeemid tsüklilistel koormustel: a) väsimuskatse kolme-punkti-paindel b) kontaktväsimuskatse (kuul–tasapind).

VÄSIMUSTUGEVUS JA -TUNDLIKKUS

WC baasil kõvasulamite kui tööriistade tootmises enim rakendust leidnud karbiidkomposiitide väsimust on uuritud aastakümneid (Sarin, 2014). Kermistele on pööratud tähelepanu vähe. Alternatiivsete, rauasulamitest (terastest) sideainega kermiste väsimust on seni uuritud vaid TTÜs.



Joonis 10. Kõvasulami WC-Co ja kermise TiC-FeNi Wöhleri (väsimus)kõverad.

Nagu kulumiskindluse käsitlemisel eespool näidatud, on kõrgete mehaaniliste omadustega (paindetugevus, purunemissitkus) kermiste TiC-FeNi adhesioonkulumiskindlus samaväärne WC-Co kõvasulamite omaga. Seetõttu olid huvipakkuvad ka nende komposiitide väsimuskarakteristikud.

Potentsiaalsete rakenduste tõttu survetöötlustööriistade valmistamiseks olid fookuses erineva koostisega komposiidid karbiidfaasi mahulise sisaldusega 75 … 80 protsenti ja karbiiditera suurusega umbes 2 µm. Kuigi WC-Co kõvasulamite paindetugevus on monotoonsel koormamisel reeglina mõnevõrra suurem kui TiC-FeNi kermistel (joonis 10), väheneb koormustsüklite arvu kasvades viimaste väsimustugevus tunduvalt mõõdukamalt kui kõvasulamitel WC-Co. Teiste sõnadega, kermiste väsimustundlikkus on märkimisväärselt väiksem. Väsimustundlikkus väheneb, erinevalt kõvasulamitest WC-Co, mille väsimustundlikkus Co sisalduse kasvades suureneb, kermiste metallfaasi osakaalu kasvades veelgi. Tsüklite küllalt suure arvu korral võib titaankarbiidkermiste statistiliselt oodatav väsimustugevus ületada kõvasulamite oma. Tulemused on seletatavad kõvasulamite ja kermiste struktuursete erisustega, sealhulgas karbiiditerade sfäärilisele lähedase vor-

miga kermistes, võrreldes prismaatilisemat laadi volframkarbiidi teradega kõvasulamites (joonis 1) (Kübarsepp jt, 2007; Klaasen jt, 2009, 2011).

Purunemismehhanismi uuringutega tuvastati, et struktuurselt suhteliselt habraste keraamilis-metalsete komposiitide purunemisele nii monotoonsel kui tsüklilisel koormamisel eelnevad lokaalsed plastsed deformatsioonid mitte ainult metalses, vaid ka keraamilises faasis. Plastsetest deformatsioonidest põhjustatud struktuursed muutused karbiidfaasis on seejuures WC-Co kõvasulamitel suuremad kui kermistes TiC-FeNi (Sergejev jt, 2008a, 2011a; Klaasen jt, 2009, 2011).

KONTAKTVÄSIMUS

Kontaktväsimus väljendub pindade piting-tüüpi kohtpurunemises, mis esineb kuul- ja rull-laagrites, hammasratastel, raudteerööbastel jms. Sagedase esinemise tõttu on konstruktsioonteraste kontaktväsimuse uuringutele palju tähelepanu pööratud. Keraamilis-metalsete komposiitide kui tööriistamaterjalide vastupanu tsüklilistele kontaktkoormustele on suhteliselt tagasihoidlikult uuritud valdkond (WC-Co kõvasulamid). TTÜs on uuritud erineva koostise (WC-, TiC-, Cr_3C_2-baasil) ja struktuuriga karbiidkomposiitide kontaktväsimust, kasutades nendeks uuringuteks arendatud katseseadet ja metoodikat, mis seisneb suure survetugevusega kulumiskindlast materjalist (nt WC-Co) kuuli dünaamilise löögiga surumises uuritavast materjalist proovikeha tasapinnalisse pinda (joonis 9b). Uurimistulemused on sarnased väsimusuuringutega kolme-punkti-painde skeemi järgi (joonis 10) – titaankarbiidkermiste vastupanu tsüklilistele kontaktkoormustele on suurem ja väsimustundlikkus väiksem kui WC-Co kõvasulamitel (karbiidfaasi ligikaudselt sarnase mahulise sisalduse puhul) (Sergejev jt, 2011b). Selgitati struktuuridefektide (Sergejev jt, 2008b, 2011b), jääkpingete (Sergejev jt, 2011a) ja kermiste koostise (Petrov jt, 2015) mõju karbiidkomposiitide kontaktväsimusele.

RAKENDUSED

Kui tavaliselt terasest valmistatud tööriista või konstruktsioonelemendi kiirelt kuluvate osade kulumiskindlust soovitakse suurendada mitte protsentides, vaid kordades, või isegi suurusjärgu võrra, tuleb esimese valikuna meelde kõvasulam WC-Co. Seda suure kulumiskindlusega materjali (patent 1923. aastast) on hinnatud üheks silmapaistvamaks inimese loodud komposiitmaterjaliks. Praeguseni ei ole selge, kas selline keraamilise (volframkarbiid) ja metalse (koobalt) faasi kooslus sai teoks tuginedes teaduslikule kontseptsioonile või oli tegemist pigem õnnestunud tehnilise (insenerliku) lahendusega eesmärgiga suurendada metallide plastse

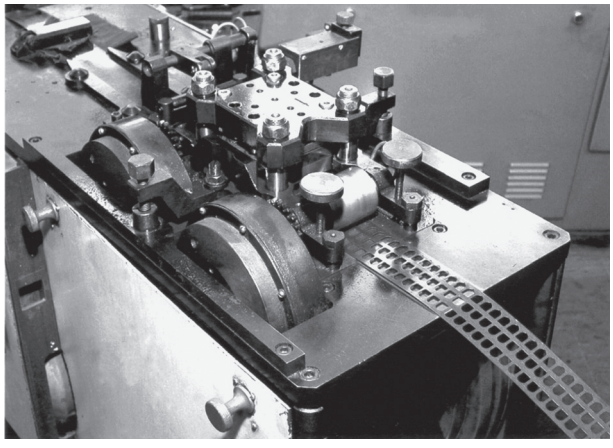
deformeerimise tööriistade püsivust. Vaatamata WC-Co sulamite suurepärastele funktsionaalsetele omadustele on nende puuduseks eelkõige väike oksüdeerumiskindlus ja vastupanu elektrokeemilisele korrosioonile. Probleeme on tekitanud ka volframi tagasihoidlikud varud (eriti Euroopas) ja kõrge hind. Viimastel aastatel on esile kerkinud raskmetalli volframi ja volframkarbiidi mõju kahjulikkus keskkonnale ja inimeste tervisele (REACH, 2006; National Toxicology Program, 2017).

Uuringud asendajate leidmiseks WC-baasil kõvasulamitele algasid juba 1930. aastatel. Perioodilisussüsteemi IVb, Vb ja VIb rühma siirdemetallide − Ti, Zr, Hf; V, Nb, Ta; Cr, Mo, W – karbiididest ja karbonitriididest on WC kõrval enim tähelepanu pälvinud titaankarbiid (TiC) ja titaankarbonitriid (TiC_xN_y). Metalse faasina (sideainena) on kasutatud valdavalt Co- ja Ni-, vähemal määral Fe-sulameid.

Rauasulamid (terased) metalse faasina pakkusid algul huvi eelkõige termotöödeldavuse tõttu, võimaldades titaankarbiidkermistest toodete (nt tööriistade) kõvadust termilise töötluse abil küllalt laiades piirides muuta. Piisavalt väikese karbiidfaasi sisalduse juures (kuni 50 mahuprotsenti) on sellistest metallmaatrikskomposiitidest toorikud probleemideta lõiketöödeldavad. Järgneval karastamisel omandavad tooted kulumiskindluse tagamiseks piisava kõvaduse. Sedalaadi metalse faasi suure osakaaluga komposiidid TiC-teras on tuntud kaubamärgi Ferro-TiC või Ferro-Titanit all (Evans jt, 2003). On võimalik ka alternatiivne lähenemine − kasutada rauasulameid (sh termiliselt mittetöödeldavaid) karbiidfaasi suure sisaldusega (enam kui 60 mahuprotsenti) keraamikapõhiste komposiitide koostises. Sellistes kermistes leiavad kasutamist terasest sideaine märkimisväärselt paremad tugevusomadused ja kulumiskindlus (suhteliselt madalatel temperatuuridel) võrreldes Ni ja Co baasil sulamitega, samuti odavus, kättesaadavus ja mittetoksilisus. Samas tuleb leida lahendusi tehnoloogilist laadi probleemidele defektivabade (väikese poorsusega) pulbersulamite valmistamisel.

Kermiste TiC-teras eelistamisel kõvasulamitele WC-Co on kaks lähenemisviisi: (1) majanduslikud ja keskkonnaga seotud aspektid; (2) tehnilised aspektid.

Majanduslikud ja keskkonnaga seotud aspektid on olulised, kui tehnilisest küljest (näiteks kulumiskindlus) on võrreldavad karbiidkomposiidid sarnased. WC baasil kõvasulami asendamine titaankarbiidkermistega annab kokkuhoidu, kuna samast kogusest lähtematerjalist (karbiidi ja metalli pulbersegu mass) on võimalik valmistada u 2,5 korda enam kulumiskindlaid tooteid. Sääst tuleneb komposiitide WC-Co ja TiC-teras tiheduste enam kui kahekordsest erinevusest: WC-Co kõvasulamitel ~14,0 … 15,0 ja TiC-teras kermistel 5,4 … 5,8 g/cm^3. Peamiselt majanduslikele argumentidele tugineva valiku näitena saab tuua stantside kuluvad osad (matriits, tempel) metallide külmal plastsel deformeerimisel tingimustes, kus valdavaks kulumismehhanismiks on adhesioon. Funktsionaalsed katsed – väljalõikestantsimine mitmepositsioonilisel stantsil, mille kuluvad osad olid valmistatud kõvasulamist



Joonis 11. Elektrotehnilisest lehtterasest toodete väljalõikamine automaatpingil.

WC-Co ja titaankarbiidkermistest (joonis 11) – tõestasid, et karbiidfaasi ligikaudselt sarnase mahulise sisalduse korral on kermistest stantsiosade püsivus parem või samaväärne. Teaduslik põhjendus sellele on titaankarbiidkermiste TiC-FeNi kõrge adhesioonkulumiskindlus ja väiksem väsimustundlikkus võrreldes kõvasulamitega WC-Co.

Titaankarbiidkermistest on valmistatud ja tootmises rakendust leidnud samuti pressvormid madalsüsinikterastest poltide külmvormpressimiseks, metallraha (Eesti Vabariigi sendid rahareformi käigus 1990. aastate alguses) vermimiseks jms.

Tehnilistest aspektidest on tähelepanu väärivad titaankarbiidkermiste väike (tunduvalt väiksem kui terastel) tihedus, suur oksüdeerumiskindlus ja metallfaasi sobiva koostise puhul (roostevaba teras) suurepärane vastupanu elektrokeemilisele korrosioonile ja korrosioon-abrasiivkulumiskindlus. Titaankarbiidsete kergkermiste väike tihedus volframkarbiidkermistega võrreldes võib olla eeliseks mitmetes rakendustes. Näiteks desintegraatorveskite (desintegraatorite) kiirelt kuluvad osad, löögisõrmed, mis kinnitatakse vastassuunas kiirelt pöörlevate rootorite külge. Löögisõrmede püsivust, eriti suure abrasiivsusega materjalide peenestamisel, saab märkimisväärselt tõsta, valmistades neid suure kulumiskindlusega, aga samas tsüklilistele löök-koormustele piisava vastupanuga materjalidest. Titaankarbiidsetest kergkomposiitidest löögisõrmede kasutamisel on eeliseks tunduvalt väiksemad tsentrifugaaljõud, samuti seadme väiksem mass.

Teiseks näiteks, kus väikese tihedusega karbiidkomposiit on eelistatud, on rehvinaastud. Kui talverehvide naastude valmistamiseks kasutatakse WC-Co kõvasulameid, on puuduseks tee intensiivne kulutamine. Teekatet peenestavate naastude kineetiline energia on proportsionaalne naastude massiga ja rehvi pöörlemiskiiruse ruuduga. Muutes naastu konstruktsiooni (suurem kontaktpind teekattega, väiksem väljaulatuvus rehvist) ja vähendades selle massi, on võimalik märkimisväärselt (kuni 10 korda) teede kulumist vähendada. Uut tüüpi titaankarbiidkermistest naastude, nn tasanaastude prototüüpe on TTÜs koostöös Soome firmadega toodetud üle 10 000. Vaatamata funktsionaalsete katsete edukusele ei ole tasanaastude masstootmiseni seni veel siiski jõutud.

Kolmandaks näiteks titaankarbiidkermiste rakenduste osas on nende suure kõvadusega kergmaterjalide kasutamine juveelitööstuses, kus lisaks kriimustuskindlusele ja väikesele tihedusele on täiendavaks nõudeks mürgiste metallide (Co, Ni) puudumine ja kõrge korrosioonikindlus. Vastavad rakendusuuringud on olnud aktuaalsed viimastel aastatel.

KOKKUVÕTE

Tallinna tehnikaülikoolis on teadus- ja arendustegevus kulumiskindlate, keraamika baasil komposiitmaterjalide valdkonnas olnud suunatud alternatiivide leidmisele WC-Co kõvasulamite keraamilisele (volframkarbiid WC) ja metalsele (Co) komponendile. Keraamilise osisena on kergkomposiitides rakendust leidnud peamiselt titaankarbiid (TiC), samuti kroomkarbiid (Cr_3C_2) ning keraamilisele materjalile iseloomulikku haprust vähendava metalse osisena nii nikli- kui rauasulamid (terased). Uurimistöö väljundiks on olnud volframita ja koobaltita keraamilis-metalsed komposiidid, nn kermised. Kermiste hulgas moodustavad eraldi grupi pulbersulamid TiC-teras, mille metalse osise koostis valitakse erinevaid rakendusvaldkondi silmas pidades. Teadustööd pulberkomposiitide tehnoloogia suunal on täiendanud uuringud kulumise ja väsimuse (vastupanu tsüklilistele koormustele) valdkonnas. Uurimistöö tulemusena on paranenud arusaam kermiste struktuuri moodustumise protsessidest, kasutades nüüdisaegseid kuumkonsolideerimise tehnoloogiaid, ja nende protsesside suunamise võimalustest, samuti koostise, struktuuri ja omaduste vahelistest seostest. See on loonud aluse teaduslikult

põhjendatud materjalivalikuks või materjali projekteerimiseks, silmas pidades erinevaid mehaaniliste koormuste (staatilised, dünaamilised, tsüklilised) ja kulumise tingimusi.

Kirjeldatud uurimistööd on viimastel aastatel toetanud institutsionaalne uurimisteema IUT 19-29 „Mitmeastmeliselt struktureeritud keraamikabaasil komposiitmaterjalid kasutamiseks ekstreemtingimustes“ ning eelnenud aastatel samuti sihtfinantseerimisteemad SF0140062s08 „Mitmefaasiliste tribomaterjalide arendamine ja tehnoloogia“ ning 0142505s03 „Kulumiskindlad materjalid ja kulumine“. Autor tänab kermiste uurimisrühma kaastöötajaid Heinrich Klaasenit, Jüri Pirsot, Maksim Antonovit, Fjodor Sergejevit, Lauri Kollot, Kristjan Juhanit, Mart Viljust ja Rainer Traksmaad, samuti uurimisrühmas tegutsenud doktorante ja magistrante nende panuse eest volframi- ja koobaltivabade kermiste arendamisel, nende talitusomaduste uurimisel ja arendustegevuses partnerluses tööstusega.

VIITED

Brookes, K. J. 1996. World Dictionary and Handbook of Hardmetals and Hard Materials, 6th ed. International Carbide Data, London.

EuMAT − The European Technology Platform for Advanced Engineering Materials and Technologies. 2017. www.eumat.eu

Evans, A., Marchi, C., Mortensen, A. 2003. Metal Matrix Composites in Industry. An Inroduction and Survey. Kluwer, Dordrecht, Boston.

Inventions that Changed the World. 2017. https://interestingengineering.com/35-inventions-that-changed-the-world

Klaasen, H., Kübarsepp, J. 2006. Abrasive wear performance of carbide composites. – Wear, 261 (5–6), 520–526.

Klaasen, H., Kollo, L., Kübarsepp, J. 2007. Mechanical properties and wear performance of compression sintered TiC base cermets. – Powder Metallurgy, 50 (2), 132−136.

Klaasen, H., Kübarsepp, J., Sergejev, F. 2009. Strength and failure on TiC-based cermets. – Powder Metallurgy, 52 (2), 111−115.

Klaasen, H., Kübarsepp, J., Roosaar, T., Viljus, M., Traksmaa, R. 2010. Adhesive wear performance of hardmetals and cermets. – Wear, 268 (9−10), 1122−1128.

Klaasen, H., Kübarsepp, J., Tšinjan, A., Sergejev, F. 2011. Performance of carbide composites in cyclic loading wear conditions. – Wear, 271 (5–6), 837–841.

Kübarsepp, J., Klaasen, H., Sergejev, F. 2007. Performance of cemented carbides in cyclic loading wear conditions. – Materials Science Forum, 534/536, 1221−1224.

National Toxicology Program. U.S. 2017. Department of Health and Human Servicies. http://ntp-server.niehs.nih.gov

Petrov, M., Kübarsepp, J., Sergejev, F., Viljus, M. 2015. Effect of carbide phase and binder chemical composition on surface fatique of carbide composites. – Proceedings of the International Powder Metallurgy Congress&Exhibition EuroPM 2015. European Powder Metallurgy Association, 1–6. (USB).

REACH – Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals. (EC 1907/2006). http://ec.europa.eu/environment/chemicals/reach_intro.htm

Sarin, V. (ed). 2014. Comprehensive Hard Materials, Vol 1: Hardmetals. Elsevier, UK.

Sergejev, F., Preis, I., Hussainova, I., Kübarsepp, J. 2008a. Fatique mechanics of TiC-based cemented carbides. – Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J: Journal of Engineering Tribology, 222 (3), 201−209.

Sergejev, F., Preis, I., Kübarsepp, J., Antonov, M. 2008b. Correlation between surface fatique and

microstructural defects of cemented carbides. – Wear, 264 (9−10), 770–774.

Sergejev, F., Klaasen, H., Kübarsepp, J. 2011a. Effect on residual stresses on the surface fatique of TiC-based carbide composites. – Procedia Engineering, 10, 3152−3161.

Sergejev, F., Klaasen, H., Kübarsepp, J., Preis, I. 2011b. Fatique mechanics of carbide composites. – International Journal of Materials and Product Technology, 40 (1/2), 140−163.

The Greatest Moments in Materials Science and Engineering. 2017. http://www.materialmoments.org/top100.html

DIGITOOTMISE TEHNOLOOGIATE ARENDUSEST TÖÖTLEVALE TÖÖSTUSELE

Rein Küttner, Kristo Karjust, Tauno Otto, Jüri Riives
Tallinna tehnikaülikool, tehnoloogiaarenduskeskus IMECC

Autorid (vasakult): Jüri Riives, Rein Küttner, Kristo Karjust ja Tauno Otto TalTechi paindtootmise ja robootika demokeskuses.

Digitootmise arengu alguseks võib lugeda eelmise sajandi 80ndaid. Seda perioodi tööstuses iseloomustab arvutijuhtimisega seadmete ja tööstusrobotite kasutuselevõtt, aga samuti personaalarvutite, interneti ja teiste info- ja kommunikatsioonitehnoloogiate (IKT) saavutuste rakendamine ning kulusäästliku tootmise tehnoloogiate (*lean manufacturing*) laialdane kasutamine. Ettevõtte juhtimise ning tootearenduse toetamiseks võeti kasutusele infotehnoloogilised süsteemid, nagu ettevõtte ressursside planeerimise süsteem (ERP), tootmise täitursüsteemid (MES), CAD/CAM (*Computer Aided Design and Manufacturing*) jt.

Praegu seostatakse digitootmise arengut (nimetatakse ka neljandaks tööstusrevolutsiooniks) küber-füüsikaliste süsteemide (*cyber-physical systems*, CPS), mobiilsete tehnoloogiate ja reaalajas kogutavate suurandmete kasutamisega tootmise monitoorimiseks, pilveteenuste ja asjade interneti kasutamisega. See areng võimaldab otstarbekamalt juhtida tootmisprotsesse, võtta kasutusele reaalse tootmissüsteemi virtuaalsed mudelid, optimaalsetel otsustel põhineva juhtimise jms.

Digitootmise tehnoloogiate arendamisele pööratakse praegu suurt tähelepanu. Näidetena võiks tuua rahvuslikud programmid/projektid (Lemke, 2016), nagu Saksamaal Industrie 4.0, Prantsusmaal Usine du Futur, Itaalias Fabbrica Intelligente, Ühendkuningriigis High Value Manufacturing, Belgias Made Different, Hollandis Smart Industry, Rootsis Production 2030, Poolas Digital manufacturing for SME (*small and medium-size enterprises*) jt.

Eesti probleemiks on digitehnoloogiate ebapiisav kasutamine tööstuses ja vastava rahvusliku programmi puudumine. Selles valdkonnas on Eesti digiteerituse tase allpool ELi keskmist, vajalikud on otsustavad sammud digitootmise tehnoloogiate arendamiseks ja evitamiseks. Et arengutest mitte maha jääda, on vaja aktiivselt osaleda rahvusvahelises koostöös, katta Eesti ülikoolides põhilised arengusuunad teadus- ja arendustegevuse (T&A) tööga ning koolitusega, arvestades meile iseloomulike väike- ja keskmiste ettevõtete (VKE) vajadusi ja piiratud ressursse.

Tööstuses eristatakse üheksat põhilist digitehnoloogia arengusuunda.

- Küber-füüsikalised süsteemid (ka digitaalsed kaksikud (*digital twins*))
- Robootika, sh autonoomsed ja koostöörobotid
- Kihtlisandusteholoogiad (*additive manufacturing*)
- Virtuaal- ja liitreaalsuse (*virtual & augmented reality*, VR/AR) rakendamine
- Tootmise väärtusahela integreerimine (*horizontal/vertical integration*)
- Tööstuslik asjade internet (*industrial internet of things*)
- Pilvearvutuste rakendused (*cloud computing*)
- Küberturvalisus (*cyber security*)
- Ennetav hooldus (*predictive maintenance*).

SUURANDMETE ANALÜÜTIKAL (*BIG DATA*) JA PROGNOOSIDEL PÕHINEVA TOOTMISE PARADIGMA (*PREDICTIVE MANUFACTURING*) EVITAMINE

Digitootmine eeldab mitmeid muudatusi nii toodetes, tootmises kui ka kasutatavates ärimudelites. Nutikad tootmissüsteemid võimaldavad minimaalsete kulutustega seadistada süsteeme uuele tootele, toota väikeseeriatena, kooskõlas kliendi nõuetega. Digitaalne tootearendus ja tootmise virtuaalne simuleerimine lühendavad toote projekteerimisele ja valmistamisele kuluvat aega, paraneb kvaliteet.

Järgnevalt kirjeldame tehnikaülikooli mehaanika ja tööstustehnika instituudis digitootmise valdkonnas tehtava T&A töö kolme peamist suunda:

- küber-füüsikaliste süsteemide ja nende komponentide arendus VKEdele
- tootmise mudelipõhine prognoosimine ja monitooring
- kergelt ümberhäälestatavate, kõrge tootlikkusega automatiseeritud tootmissüsteemide ja nende komponentide lahendused VKEdele.

KÜBER-FÜÜSIKALISTE SÜSTEEMIDE JA NENDE KOMPONENTIDE ARENDUS VKE-DELE

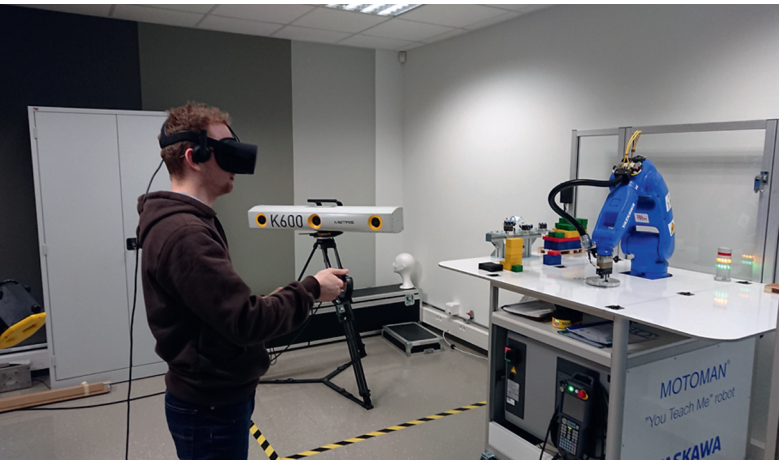
Väljakutseks küber-füüsikaliste süsteemide arendamisel on sünergia erinevate teadusvaldkondade vahel, nagu IKT, süsteemiteooria, elektroonika, matemaatiline statistika, optimeerimine, mehaanika, tootmistehnika jt.

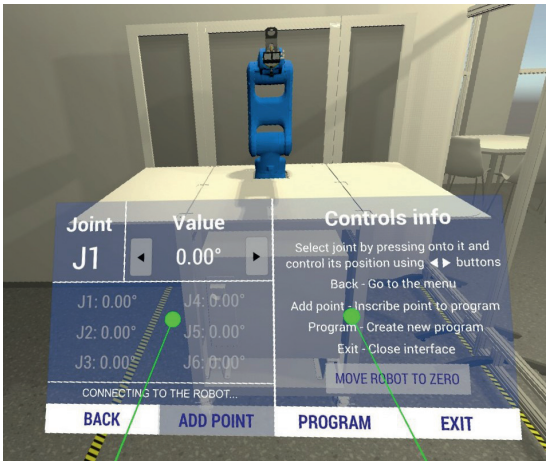
Vajadus suurendada toodete konkurentsivõimet, lühendada tarneaegu ja vähendada kulutusi tingib kõrgjõudlusega andmetöötluse ja küber-füüsikaliste süsteemide kasutamisele orienteeritud meetodite arendamise ja kasutamise. Võtmeküsimuseks on optimaalne juhtimine ja monitooring reaalajas.

Kooskõlastatud ja tõhus virtuaalne tootearendus ja tehnoloogia planeerimine on rohkem kui lihtsalt olemasolevate CAD, CAE (*Computer Aided Engineering*) ja ERP vahendite kasutamine. Arvestada tuleb integreeritult erinevaid toote arendamise ja valmistamise aspekte, nagu geomeetria modelleerimine, toote tugevusnõuete analüüs, tootmise planeerimine, tehnoloogilistest protsessidest tulenevad piiranguid jms. Valida tuleb konkreetsetele ülesannetele sobivad meetodid ja tarkvarasüsteemid, neid sobitades/arendades.

Instituudis läbiviidava T&A töö peamine eesmärk on luua lahendid ja meetodid küber-füüsikaliste tootmissüsteemide erinevate osade koostöö, usaldusväärsuse ja kasutamisotstarbekuse suurendamiseks VKEdes.

Digitaalsete kaksikute kontseptsiooni põhiselt luuakse reaalse tootmise digitaalne mudel koos juhtimiseks vajaliku infoga, mida on võimalik optimeerimis- ja simulatsioonivahendeid kasutades operatiivselt rakendada reaalse tootmise juhtimiseks. Kavandatakse eri tasemetel eksperimente, analüüsitakse ja modelleeritakse nende põhjal ettevõtetele olulisi koostöö- ja ohutusmudeleid. Need meetodid ja protsessid on eksperimentaalselt rakendatud vabavaralise robotite tarkvaraplatvormi ROS (*Robot Operating System*) abil. Reaalse keskkonna digitaalne mudel on vastavas mõõtkavas





Joonis 1. Robottootmisrakk reaalses ja tehismaailmas koos väljaarendatud virtuaalreaalsusest juhitava digitaalse kaksikuga.

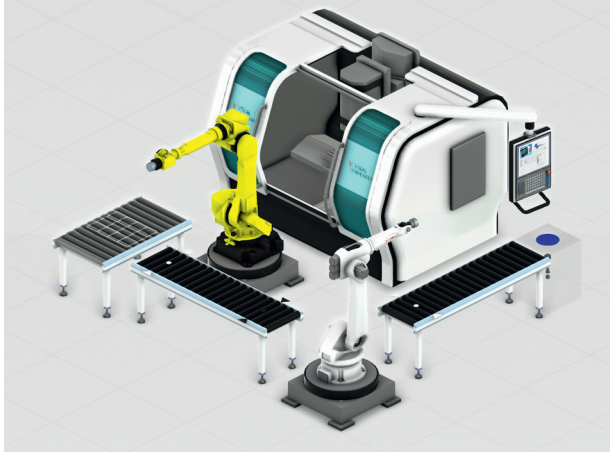
digiteeritud ning jälgitav liit- ja virtuaalreaalsuse (VR/AR) vahenditega. Tootmisrakkude digimudelite loomiseks ning küber-füüsikaliste süsteemide arhitektuuri ja juhtimismeetodite hindamiseks on instituudis kasutatud VR/AR vahendeid, sh Unity3D tarkvara (joonis 1) (Kuts jt, 2017).

Kaamera liikumise sisend saadakse klaviatuurilt või tehisreaalsuse peakomplektilt, kasutades geneerilist avatari, millele on isiku digimaailmas kohaloleku simulatsiooniks lisatud mahulise võrkmudeli simulatsioon.

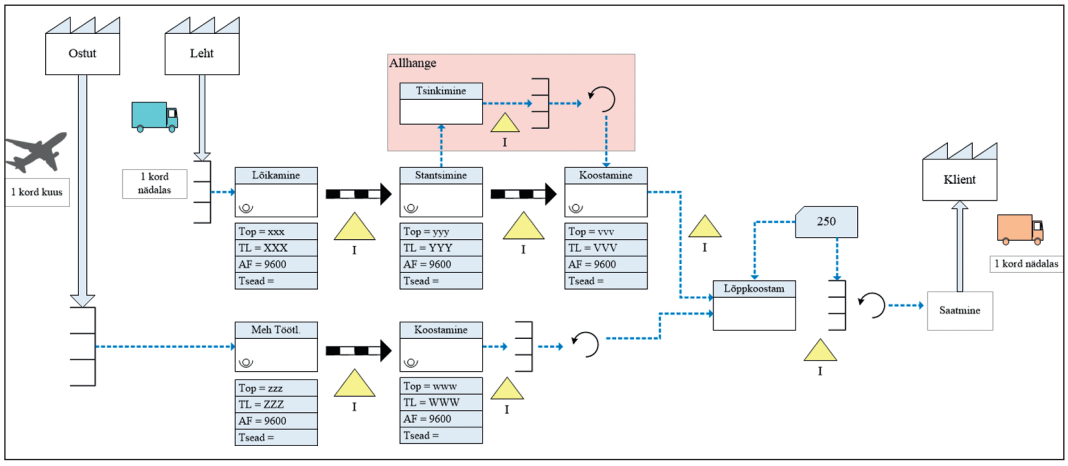
Virtuaaltootmise mudel ja selle tehisreaalsuses simulatsiooni tulemused annavad kasulikku infot tootmise kohta, võimaldavad kirjeldada muutuste mõju ning hinnata erinevaid arengustsenaariume. Kasutades tehisreaalsuses VR/AR modelleerimist, on hinnatud erinevate tootmissüsteemi variantide otstarbekust eesmärgiga lühendada toodete evitamise aega, parandada töökindlust, planeerida otstarbekaid tootmisprotsesse ja prognoosida tõrkeid.

VKEdele on oluline ressursse „roheliselt“ kasutada. Ka olemasolevate tootmissüsteemide andur- ja juhtsüsteemi moderniseerimise mõju saab uute mudelitega prognoosida. Digiteerimise mõju tootlikkusele on sel puhul rohepositiivne. Virtualiseerimiseks on kasutatud Visual Components Pro tarkvara (joonis 2) (Mahmood jt, 2017), milles loodud simulatsioone on võimalik teisendada ka tehisreaalsusesse.

Digitehnoloogiate evitamine eeldab ettevõtte ressursside planeerimise süsteemide (ERP), tootmise täitursüsteemide (MES) ning inseneritööd toetavate süsteemide (CAD, CAM, CAE jt) otstarbekat kasutamist. Instituudis ja Eesti tööstuses on nendes valdkondades kogunenud arvestatav



Joonis 2. Paindtootmisraku simulatsioon digiteerimist võimaldava andur- ja juhtsüsteemiga.



Joonis 3. Väärtusvoo kaardi näide (fragment). Tootmissüsteem koosneb kahest tootmisliinist ja lõppkoostamisest, tsinkimine teostatakse allhankena. Operatsioone iseloomustatakse operatiivaja T_{Op}, tsükliaja T_L jt mõõdikutega.

kogemus (Küttner, 2016), neid tutvustatakse aktiivselt ka õppetöös.

Tootmise juhtimine eeldab tootmise sellist planeerimist piiratud ressursside tingimustes, mis tagab, et kliendile sobiv toode valmib majanduslikult otstarbekalt ja õigeks ajaks. Arvestada tuleb tootmise keerukusega ja tootmise väärtusahela otstarbeka integreerimise võimalustega (Hopp, Spearman, 2001; Küttner, 2016). Ootused planeerimisele on robustsus, lahendite efektiivsus ja usaldusväärsus; mudelite vastavus reaalsele tootmisolukorrale.

Tootmissüsteemi kirjeldamiseks kasutatakse nn tootmise väärtusvoo kaarti (What is value stream mapping, 2018). Väärtusvoo kaart kirjeldab kõiki tootmisprotsessi operatsioone, materjalide laoseise, tarnijaid ja kliente (joonis 3). Iga operatsiooni hinnatakse efektiivsuse mõõdikutega. Lisaks koostatakse väärtusvoo kaart ka tootmise juhtimisele, arvestades kasutatud juhtimismeetodeid, arvutisüsteeme, sidevahendeid jm. Kaardistamise eesmärgiks on luua uus efektiivsem väärtusahel.

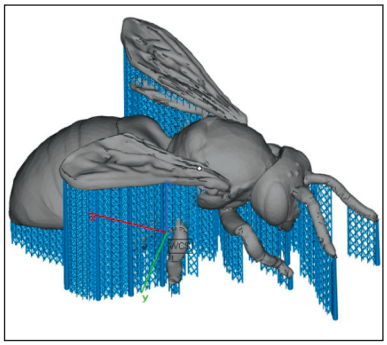
Tootmise pideva parendamise protsessi (ka KAIZEN protsessi) eesmärgiks on tagada tootmise efektiivsus ja paindlikkus. Parendamine baseerub toodete ja protsesside parimate variantide multikriteriaalsel valikul. Arvestada tuleb integreeritult kogu tootmissüsteemi, sh toodete töötlemise järjekorra (*scheduling*) määramist, mis on teoreetiliselt väga arvutusmahukas ülesanne.

Analüüsiks on otstarbekas püstitada arvutusmudel, lähtudes väärtusvoo kaardist, grupitehnoloogia põhimõttest jt tootmistehnika soovitustest. Instituudis on kasutatud arvutipõhiseid planeerimise mudeleid, mis baseeruvad täisarvulisel planeerimisel ja arvestavad reaalseid tootmisolukordi (Küttner, 2016).

Põhilised probleemid sealjuures:

- konkreetsele tootmisüksusele parendatud väärtusvoo kaardi (nn tulevikukaardi) väljatöötamine, sh uute tehnoloogiate, juhtimismeetodite, tootmissüsteemi struktuuri, kasutatavate ressursside vajaduse jms määramine;
- integreeritud mudelite väljatöötamine tootmissüsteemile;
- arvutipõhiste meetodite arendus tootmise analüüsiks ja optimaalseks juhtimiseks.

Kihtlisandustehnoloogia (*additive manufacturing*) on materjali kihthaaval lisamisel baseeruv tehnoloogia. Detailid valmistatakse otse CAD



Joonis 4. Optimeeritud topoloogiaga detaili näide: Maarjamäe kommunismiohvrite memoriaali tarbeks 3D skaneeritud ja 3D printimiseks optimeeritud mesilase digimudel koos projekteeritud tehnoloogiliste tugedega (vasakul) ning selle roostevabast terasest väljatrükk enne tugede eemaldamist (paremal).

kolmemõõtmelisest (3D) mudelist. Kuna puudub detaili joonise vajadus ja piisab detaili arvutimudelist, siis nimetatakse tehnolooogiat ka digitaalseks otsetootmiseks. Täiendavalt on vajalik detaili 3D mudeli kihiti töötlemise modelleerimise tarkvara, mis esitab detaili geomeetria õhukeste kihtidena ja valmistab ette juhtprogrammi kihtide töötlemiseks. Kihtlisandustehnoloogia algne kasutus oli peamiselt prototüüpide valmistamine. Praegu kasutatakse tehnoloogiat ka nn kiirtootmiseks (*rapid manufacturing*), mille käigus valmistatakse lõpptoode. Tehnoloogia võimaldab vähendada vigade tekkimist ja töömahtu. Protsessi on arvutisüsteemide abil kerge hallata.

Instituudi T&A töö põhiliseks eesmärgiks selles valdkonnas on metallipõhise laserpaagutustehnoloogia (*Selective Laser Melting*, SLM) arendus ja selle võimaluste (täpsuse, pinna kvaliteedi ja tugevusomaduste) uurimine, võrdlemine traditsiooniliste töötlemismeetoditega ning otstarbekas materjalide valik. Tehnoloogia võimaldab saada detaile nii metallidest kui ka polümeeridest. Piirangute puudumine geomeetriale pakub võimalusi valmistada mistahes kujuga detaile, mis rahuldavad otstarbekalt funktsionaalseid nõudeid ja mida ei ole võimalik valmistada traditsiooniliste töötlemismeetoditega (joonis 4).

Kavandatud arenguteks on erinevate tehnoloogiate kombineerimine komposiitkonstruktsioonide valmistamiseks ja funktsionaalselt projekteeritud materjalide tootmisvõimaluste hindamine.

Instituut osaleb koos Tartu teadlastega teaduse teekaardi investeeringuprojektis „Nutika tootmise tuumiktaristu“, mille arenduse eesmärgiks on tootmissüsteemide jaotatud kasutamine: metalli 3D printimissüsteem SLM280 2.0 evitati tehnikaülikoolis ja metalli 3D kompuutertomograaf Yxlon FF35 CT Eesti maaülikoolis, seadmed paigaldati koostoimivalt, nende kasutamist arendatakse digitaalsete kaksikutena.

TOOTMISE MUDELIPÕHINE PROGNOOSIMINE JA MONITOORING

Tootmisprotsesside planeerimis- ja juhtimismudelite areng digitootmises on toimunud üksikult tootelt toodete portfelli optimeerimise suunas, üksiku töökoha tootmise planeerimisest ettevõtete koostöövõrgu planeerimiseni. Väljakutseks on optimeerida tootmist kui terviklikku väärtusvoo protsessi.

Tootmise planeerimine ja juhtimine (*Production planning and control*, PPC) määrab põhilised tootmist iseloomustavad näitajad. Seoses konkurentsi suurendamisega ning toodete ja tootmissüsteemide keerukuse kasvuga suureneb tootmise planeerimise ja juhtimise olulisus. Ilma otstarbeka planeerimiseta on raske saavutada kasumi,

tootlikkuse, ajakadude, käibevahendite vajaduse, ressursside kasutuse jm optimaalseid väärtusi. Tootmise planeerimist iseloomustab juhuslikkus ja ainult osalise informatsiooni omamine. Tegelik tootmisprotsessi kulgemine võib planeeritust oluliselt erineda, tingituna reast põhjustest, nagu seadmete seisakud, kvaliteediprobleemid, puuduvad toorikud, operaatorite vead jt. Vaja on luua võimekus mõõta/jälgida tootmist ja reageerida operatiivselt muutustele. Tootmise monitooring sisaldab mõõdetud/jälgitud tootmisnäitajate võrdlemist, planeeritud ja reaalajas efektiivsust vähendavate kõrvalekallete põhjuste määramist ja tegevuste kavandamist nende kõrvaldamiseks. Digitootmises realiseeritakse monitooringuandmete kogumise ja analüüsiga (joonis 5). See nõuab vastava andmehõive ja -analüüsi süsteemi otstarbekat evitamist ja baseerub tootmise väärtusvoo modelleerimisel.

Kuna tootmise kirjeldamisel on tegemist juhuslike protsessidega ja osalise määramatusega, sobivad tootmise planeerimiseks stohhastilised mudelid, mis võimaldavad hinnata erinevate juhtimisstrateegiate otstarbekust, määramatuse vähendamise võimalusi jms. Tootmisprotsessi monitoorimise meetodiks on mõõtetulemuste alusel protsessimudelite jooksev täpsustamine ja täpsustatud mudelite abil

Joonis 5. Tootmise reaalajas andmehõive- ja monitooringusüsteem.

replaneerimine ehk nn mudelipõhine prognoosimine ja juhtimine (*model predictive control*).

Instituudil on kogemus planeerimistulemuste varieeruvuse hindamiseks (*sensitivity analysis*) ja nn tagasipöördumisega optimaalsete planeerimismudelite kasutamises (*recourse models*), kus planeerimist käsitletakse mitmesammulisena. Alguses lahendatakse ülesanne tuntud parameetritega ja kui mõõtmiste või vaatluste tulemusena on rohkem infot juhusliku suuruse (näiteks nõudluse) kohta, täpsustatakse lahendit (Küttner, 2009).

Tootmise monitooringusüsteemi (*Production Monitoring System,* PMS) arenduse eesmärgiks on meetodite, tarkvaravahendite ning süsteemi prototüüpide arendus eesmärgiga luua VKEdele reaalajas töötav süsteem.

Traditsiooniliselt baseerub andmehaldus tootmise juhtimissüsteemides tsentraalsete andmebaaside kasutusel, kus esinevad sageli usaldusväärsuse probleemid.

Otstarbekas on tootmise andmeanalüüsi meetodite arendamisel lähtuda plokiahela (*blockchain*) tehnoloogiast (Rosic, 2018). Peamiseks erinevuseks on plokiahela jagatud olemus, st andmebaas eksisteerib samaaegselt ja sünkroonsena mitmes kohas ja selle eesmärk on kaitsta andmete terviklikkust ja võltsimiskindlust.

Ettevõtte infosüsteemi jaoks tagab plokiahela tehnoloogia turvalise keskkonna ja on sobiv digitootmise arendamiseks. Selle rakendused võimaldavad siduda tervikuks ka nutiseadmed ja sensorid, mõjutades asjade interneti arengut.

Uudse tehnoloogiana ei ole plokiahel tootmise juhtimises laialt levinud. Vaja on määrata, milliste protsesside toetamiseks see sobib ja kuidas rakendada. Eesmärgiks on tõestada, et plokiahela tehnoloogia rakendamine sobib digitootmise arendamiseks. Kõik on alles varajases katsetusfaasis.

KERGELT ÜMBERHÄÄLESTATAVATE, KÕRGE TOOTLIKKUSEGA AUTOMATISEERITUD TOOTMISSÜSTEEMIDE JA NENDE KOMPONENTIDE LAHENDUSED VKE-DELE

Et tagada tootmissüsteemide kiire ümberhäälestamine uutele toodetele, garanteerida kvaliteet ja suurendada tootlikkust, kasutatakse digitootmises laialdaselt arvutijuhtimisega seadmeid ja tööstusroboteid. T&A eesmärgiks on arendada VKEdele otstarbekaid digitootmise mudeleid, et toetada nende püüdlusi areneda uuele digitootmise tasemele.

Joonisel 6a on näitena toodud arenduskeskuses IMECC ettevõttele Norcar BSB loodud ja rahvusvaheliste projektidega (Horizon 2020, i4MS, ERASMUS+, Interreg, etc) seotud robotiseeritud tootmisraku mudel.

Kaksiksüsteemi prototüübina on projekteeritud tootmisrakus kasutatud erinevaid komponentidevahelisi liideseid, erinevaid sardsüsteemide komponente ja andureid.

Õpetamise ja arendustöö läbiviimiseks on instituudis realiseeritud nn targa tootmissüsteemi digimudel (*Festo Didactic Smart Factory*) (joonis 6b).

SOOVITUSED VKE-SÕBRALIKU DIGITOOTMISSÜSTEEMI ARENDAMISEKS

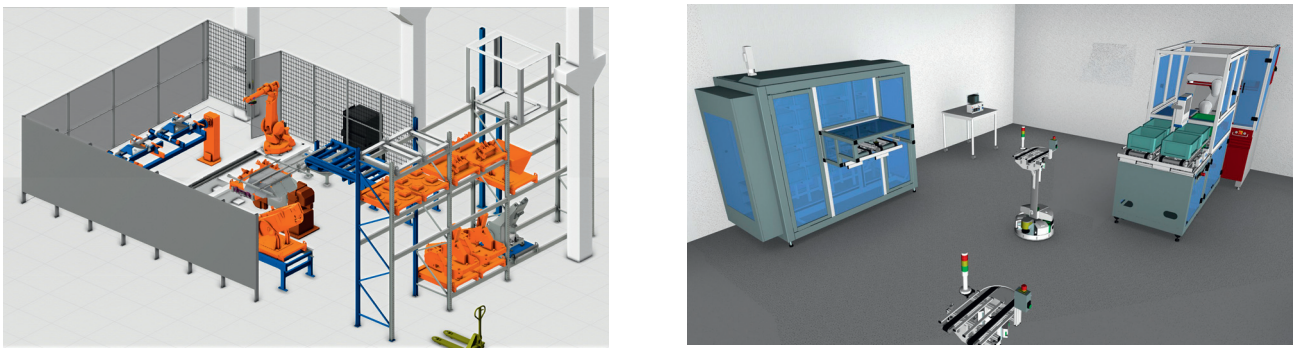
Eesti töötlevas tööstuses on valdavalt tegemist VKEdega ja sellega tuleb T&A temaatika kavandamisel arvestada. Suurettevõtetele mõeldud tehnoloogiad ja vahendid ei ole sageli VKEdele kasutamiseks otstarbekad.

Digitootmise tehnoloogiate evitamine VKEdes võib kujuneda pikaks. Arvestades kiirelt muutuvaid tehnoloogiaid, peavad VKEd kavandatud tegevusi operatiivselt korrigeerima. Oluline on käsitleda üleminekut digitootmisele kui pidevalt arenevat protsessi, mis nõuab tootmissüsteemi pidevat ja jätkusuutlikku parendamist.

Et paindlikult arvestada nii ärikeskkonna kui ka tehnoloogia muutusi, tuleb liikuda lühikeste sammudega, pidades silmas strateegilist terviklahendust.

Millised oleksid soovitused ja lahendust ootavad probleemid VKEdele?

- Otstarbekas on liikuda lihtsamalt keerukamale, kogudes kogemusi ja arendades moodulsüsteeme.
- Luua tüüplahendid ja normatiivid uute tehnoloogiate evitamiseks.
- Evitada sellealaseid parimaid lahendusi, sh küberturvalisuse praktikaid.



Joonis 6. a) Robotiseeritud tootmisraku digimudel; b) paindtootmissüsteemi digimudel (*Festo Didactic Smart Factory*).

Digitootmise tehnoloogiate majanduslikult otstarbekas valik VKEdes on raskendatud järgmistel peamistel põhjustel.

- Evitamine eeldab praktilisi teadmisi ja oskusi tehnoloogia uutes valdkondades.
- Evitamist vajavad samaaegselt erinevad tehnoloogiad. Osaliselt on need alles arengufaasis, mis teeb raskeks hinnata nende otstarbekust ja vajalikku töömahtu.
- Olemasolevaid IKT süsteeme ja tootmisseadmeid on evitatud erinevatel ajaperioodidel ja neid on tarninud erinevad firmad, mistõttu on raske saavutada süsteemide ühtset lahendust.
- Nüüdisaegsete tehnoloogiate otstarbekaks rakendamiseks tuleb tagada neile nõutav koormus.
- VKEdel ei ole sageli piisaval arvul IKT spetsialiste, vajalik on abi väljastpoolt ja koostöö.

Arengu toetamiseks peab ülikool täiustama spetsialistide ettevalmistust integreeritud ja nutikate tootmissüsteemide otstarbeka kasutuse ning tootmise plaanimise ja juhtimise alal, pidevalt jälgima uusi arenguid ja neid tutvustama. Et toetada kogu vajaduste spektrit, peab osalema rahvusvahelises koostöös.

VIITED

Hopp, W., Spearman, M. 2001. Factory Physics. Foundation of Manufacturing Management. Irwin/McGraw-Hill, NY.

Kuts, V., Modoni, G. E., Terkaj, W., Tähemaa, T., Sacco, M., Otto, T. 2017. Exploiting factory telemetry to support Virtual Reality simulation in robotics cell. – De Paolis, L. T., Bourdot, P., Mongelli, A. (eds). Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics: 4th Int. Conf., AVR 2017, Ugento, Italy, 2017. Proc., Part I. Springer, 212–221. (Lecture Notes in Computer Science).

Küttner, R. 2009. Production planning for a supply chain a low-volume and make-to-order manufacturing environment. – Estonian Journal of Engineering, 15 (1), 48–60.

Küttner, R. 2016. Nüüdistootmise õpetus. TTÜ kirjastus, Tallinn.

Lemke, M. 2016. Digitising European Industry: A Key Role for Europe's Digital Competence Centres. European Commission, Brussels.

Liang, S., Hecker, R., Landers, R. 2004. Machining process monitoring and control: The State-of-the-Art. – Journal of Manufacturing Science and Engineering, 126 (2), 297–310.

Mahmood, K., Karaulova, T., Otto, T., Shevtshenko, E. 2017. Performance analysis of a flexible manufacturing system (FMS). – Procedia CIRP, The 50th CIRP Conf. on Manufacturing Systems, May, 2017, Taichung City, Taiwan, 63, 424–429.

Rosic, A. 2018. What is blockchain technology? A step-by-step guide for beginners. https://blockgeeks.com/guides/what-is-blockchain-technology

Snatkin, A., Karjust, K., Eiskop, T. 2012. Real time production monitoring system in SME. – Proceedings of the 8th Int. Conf. of DAAAM Baltic Industrial Engineering, Tallinn, Estonia, 573–578.

Snatkin, A., Karjust, K., Majak, J., Aruväli, T., Eiskop, T. 2013. Real time production monitoring system in SME. – Estonian Journal of Engineering, 19 (1), 62–75.

Snatkin, A., Eiskop, T., Karjust, K., Majak, J. 2015. Production monitoring system development and modification. – Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 64 (1), 567–580.

What is value stream mapping? 2018. https://www.lucidchart.com/pages/value-stream-mapping

IMPEDANTS: ELEKTROONIKUTE IDEELAEGAS JA VARAKAMBER AASTAKÜMNETEKS

Mart Min
Tallinna tehnikaülikooli emeriitprofessor

MIS ON IMPEDANTS

Inglise matemaatik ja füüsik ning insener Oliver Heaviside (1850–1925) vermis mõiste *impedance* 1887. aastal. See tuleneb ladinakeelsest sõnaühendist *im+pedire*. Meile tähendab impedants kas takistust või tõkestust ning vastutoimet (ehk ka jalus olemist – ladina *pedis* tähendab jalgu) liikumisele või mõjutusele. Teame mehaanilist impedantsi, kus hõõrdumine ja inerts takistavad liikumist, kusjuures inerts avaldub kaheti, nii massi kui ka elastsuse tõttu. Meie kasutame impedantsi mõõtmist ja analüüsi informatsiooni saamiseks mitmesuguste materjalide ning tehniliste ja bioloogiliste struktuuride omaduste ja funktsioneerimise kohta. Eesti teadlastele on impedants pakkunud uudseid ideid, ärgitanud julgeid mõtteid ning võimaldanud rakendusi ja rahastamist juba 70 aastat.

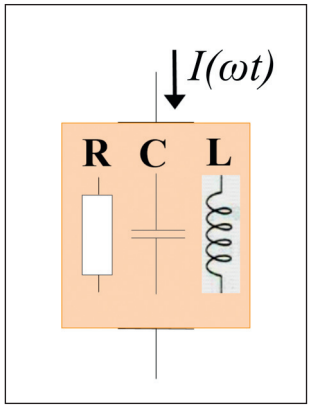
ELEKTRILINE IMPEDANTS

Elektri vallas tähendab impedants Z (ühikuga oom [Ω]) vooluahela vastutoime määra muutuvale elektrivoolule. Impedants küll seostub, aga ei samastu mõistega takistus (ingl *resistance)* R (ühikuga oom [Ω]) ning selle pöördväärtuse ehk juhtivusega (ingl *conductance*) G (ühikuga siimens [S]). Tehniliselt on impedants klassikalise (ehk inertsitu) takistuse mõiste üldistus muutuva tugevuse või suunaga voolule tekkiva vastutoime kirjeldamiseks. Kui takistus R on inertsitu tõkestus elektrivoolule I (ühikuga amper [A]), siis impedants kirjeldab lisaks ka vooluahela inertsi, mis tuleneb mahtuvuse C (ühik farad [F]) ning induktiivsuse L (ühik henri [H]) vastutoimest muutustele (joonis 1). Kõige tuntumaks elektrivoolu muutumiseks on siinuseline vaheldumine sagedusega f (ühikuks herts [Hz]). Siin tuleb esile impedantsi $Z(\omega)$ sõltuvus voolu muutumise nurksagedusest $\omega = 2\pi f$ (ühikuks radiaani sekundis [rad/s]). Vaid alalisvoolu puhul (ehk kui $f \to 0$) samastub impedants takistusega.

Üheks inertsi põhjustajaks reaalsetes vooluahelates on takistusega R paratamatult kaasnev mahtuvus C, mis salvestab ja vabastab elektrilaenguid läbi takistuse R, püüdes samas säilitada pinget V (ühikuga volt [V]) mahtuvuse peal. Selliselt tekkiva inertsi mõõduks on ajakonstant $T_C = RC$ ühikuga sekund [s]. Teiseks inertsi põhjustajaks on induktiivsus L. Selle vastutegevust elektrivoolu I muutumisele kirjeldab teine ajakonstant $T_L = L/R$, mille ühik on samuti sekund. Seetõttu on reaalse vooluahela impedants teatav vektor, mille üks komponent kirjeldab klassikalise (inertsitu) takistuse vastutoimet voolule ja teised komponendid

esitavad mahtuvuse ja induktiivsuse mõjul sündivat vastutoimet.

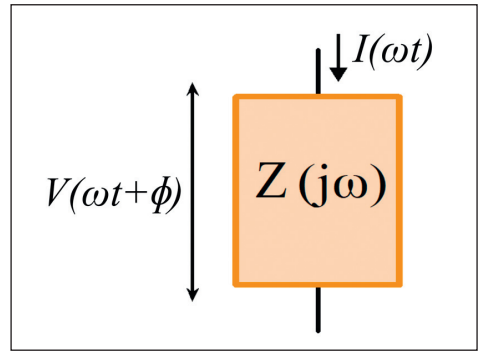
Ülal mainitud suurus $Z(\omega)$ on niisiis voolu muutumise sagedusest ω sõltuva impedantsi moodul. See esitab küll vastutoime suurust, kuid jätab arvestamata mahtuvusest C ja induktiivsusest L (joonis 1) põhjustatud ajalised nihked mõjutuse ja selle tulemuse vahel ehk faasierinevused $\Phi(\omega)$ voolu I ja pinge V muutumiste vahel. Impedantsi on mugav kirjeldada kompleksarvude keeles. Selles kontekstis esitatakse C ja L poolt põhjustatud vastutoimete moodulid $X_C(\omega)=1/\omega C$ ja $X_L(\omega) = \omega L$ impedantsi imaginaarsete komponentidena. Kasutades maginaarühikut[9] $j=\sqrt{-1}$, saame kompleksimpedantsi $Z(j\omega)$ (ehk vooluahela kompleksarvude keeles esitatud täieliku impedantsi) imaginaarosad esitada kujul $X_C(j\omega)=1/(j\omega C)$ ning $X_L(j\omega) = j\omega L$ (joonis 2). Impedantsi üldavaldises (1) esindab Re $Z(\omega)$ täisimpedantsi reaalosa ning Im $Z(\omega)$ imaginaarosa:



Joonis 1. Impedantsi Z komponendid R, C, ja L.

$$Z(j\omega)=\frac{V(j\omega)}{I(\omega)}=\mathrm{Re}\,Z(\omega)+j\,\mathrm{Im}\,Z(\omega). \qquad (1)$$

[9] Elektrotehnikas kasutatakse tavaliselt imaginaarühiku tähisena sümbolit j, kuna matemaatikas ja mehaanikas kasutatav sümbol i on elektri käsitlemisel reserveeritud voolutugevuse jaoks.



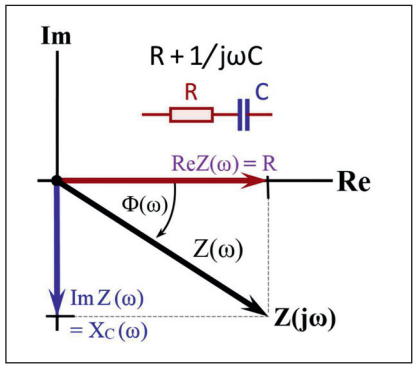
Joonis 2. Kompleksimpedants $Z(j\omega)$.

Näiteks toome sageli esineva mahtuvust C ja takistust R sisaldava impedantsi $Z(j\omega)=R+1/(j\omega C)=R-j/(\omega C)$, mis on joonisel 3 kujutatud vektorina $Z(j\omega)$ komplekstasandil Re ja Im kaudu ristkoordinaadistikus.

Impedantsi $Z(j\omega)$ vektorit, mis lahutub reaalosaks $\mathrm{Re}\,Z(\omega)=R$ ja mahtuvusest C põhjustatud imaginaarosaks $\mathrm{Im}Z(\omega)=X_C(\omega)=-1/(\omega C)$, saab esitada vektori pikkuse ehk mooduli $Z(\omega)$ ja faasinihke $\Phi(\omega)$ kaudu elementaarse trigonomeetria abil (joonis 3):

$$Z(\omega)=\sqrt{(\mathrm{Re}\,Z)^2+(\mathrm{Im}Z)^2}=\sqrt{R^2+1/(\omega C)^2}\,;$$

$$\Phi(\omega)=\arctan\frac{\mathrm{Im}(\omega)}{\mathrm{Re}(\omega)}=-\frac{1}{\omega RC}. \qquad (3)$$



Joonis 3. Järjestikahela impedantsi $Z(j\omega)=R+1/(j\omega C)$ esitus vektordiagrammina komplekstasandil.

MIKS ME IMPEDANTSIST RÄÄGIME?

Ajalooline ülevaade. Elektrilisel impedantsil ja selle mõõtmisel on ajalooline tähendus meie ülikooli ja kogu Eesti elektroonikavaldkonna jaoks. Praeguse Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituudi eelkäija – tööstuselektroonika kateedri – looja (1962) ja kauaaegne juhataja dotsent Paul Plakk uuris pärast maailmasõda (1946–1966) turba niiskusesisaldust elektrilise impedantsi kaudu. Ta saavutas märgatavat edu, mille eest omistati talle teaduskraad ning ta pälvis Nõukogude Eesti teaduse- ja tehnikapreemia ning Nõukogude Liidu rahvamajanduse saavutuste näituse pronksmedalid (1963, 1966). Aastatel 1960–1970 hakkasid impedantsi vallas tegutsema Tartu ülikooli teadurid, seda nii südameuuringute juures Foucault' vooludega (Leo H. Humal ja Jüri Vedru) kui ka elektrokeemilist impedantsi uurides (Vello Reeben).

Meie tärkav teadusgrupp (Toomas Parve, Mart Min) jätkas elektrokeemilise impedantsi alal tööd aastatel 1975–1985 Tartu ülikooli tellimusel (Ülo Haldna, Viktor Palm). Valmis impedantsi muutuste erakordselt peene detekteerimisvõimega (0,01%) originaalne aparatuur (protsentmeetrid) keemiliste reaktsioonide kineetika uurimiseks (kuldmedal rahvamajanduse saavustuste näituselt Moskvas). Bioimpedantsi (bioelektrilise impedantsi ehk bioloogiliste objektide impedantsi analüüsi) juurde tõi meid Jürgen Lamp (JR Medical OÜ). Samaaegselt kaasnes telespektromeetri FAZA impedants-sensoritega mõõtekanali sünkroniseerimine Nõukogude Liidu kosmosejaamade Saljut ja MIR jaoks (Kosmos on meie…, 2016) Tõravere observatooriumi tellimusel (Uno Veismann, Charles Villmann).

1990. aastate lõpul kukkus meile sülle osalemine Euroopa Liidu projektis (aitäh, kolleeg Raimund Ubar!), mille eesmärk oli välja töötada elektroonika südamestimulaatori (rütmuri) stimulatsioonisageduse ehk rütmi juhtimiseks hägusloogika *(fuzzy logic)* abil. Valisime oma liiniks rütmi juhtimise kopsu elektrilise bioimpedantsi alusel. Kopsuimpedantsi varieerumise põhjuseks on hingamise sageduse ja sügavuse muutused sõltuvana inimese füüsilisest aktiivsusest. Sajandivahetuse paiku huvitus tulemustest USA korporatsioon St. Jude Medical, mille Rootsis asuva Euroopa allüksusega lahendasime jätkuvalt südamestimulaatorite ja impedantsiga seotud probleeme, leides toetust ka Eesti teadusfondi grantide ning Eesti teadusagentuuri uurimistoetuste näol. Viimasel paaril aastakümnel on impedantsialased tööd saanud edulooks nii teaduse ja innovatsiooni kui tööstuslike rakenduste vallas. Impedantsi mõõtmise alusel hindame elusa ja eluta looduse objektide ning tehismaterjalide struktuuride omadusi nendes toimuvate muutuste identifitseerimiseks meditsiinilise ja tehnilise diagnostika jaoks.

Tänapäeva tegemised. Lisaks St. Jude Medical (nüüd Abbot, alates 2017) töödele Rootsis arendasime selle sajandi esimesel kümnendil bioimpedantsiuuringuid koos teise USA suurfirmaga Guidant, millest nüüdseks on saanud Boston Scientific Corporation. Eestipoolseks partneriks sai arstide initsiatiivil asutatud firma Smartimplant OÜ. Eesti teadlaste koostöö Ameerika ja Rootsi ettevõtetega andis teadustulemuste kõrval ka mitmeid patenteeritud lahendusi bioimpedantsi mõõtmiseks ja kasutamiseks, mille eest meie töögrupp nomineeriti Euroopa leiutusauhinna 2011 saamiseks. Jäime küll konkursil teiseks, kuid lohutas platseerumine Oxfordi ülikooli nominendi ette.

Meie töö bioimpedantsi vallas jätkub tänapäeval nii välismaal (Soome ja Taani ettevõtted) kui Eestis – toimub mahukas institutsionaalne uurimistöö IUT1911 (2014–2019), osaleme Eesti IT-teaduse tippkeskuses EXCITE (2015–2022), teeme projektijärgset koostööd Ida-Tallinna keskhaiglaga ning tehnoloogia arenduskeskusega ELIKO, samuti Euroopa tugevate teaduskeskustega Horizon 2020 FET-ERA JTC2016 CONVERGENCE projekti (2017–2021) raames. Värskete, 2018. aastal kokku

võetud uuringute alusel kuulub TTÜ bioimpedantsi valdkonnas kümne kõige viljakama organisatsiooni hulka maailmas (El Khaled jt, 2018).

Samas ei tegele me tänapäeval üksnes bioloogiliste objektidega. Põnevad on olnud meie tööd ka metallistruktuuride uuringutes, eriti just müntide ehtsuse kontrolli osas. Võitsime Euroopa võltsingute vastase büroo OLAF hanke euromüntide ehtsuse kiire tuvastamise protseduuri väljatöötamiseks aastatel 2007–2009 (Olev Märtens). Järgnenud on mitmed projektid metallide ja nende struktuuride identifitseerimise ülesannetes, käimas on projekt firmaga Autoliv-Norma Eestis.

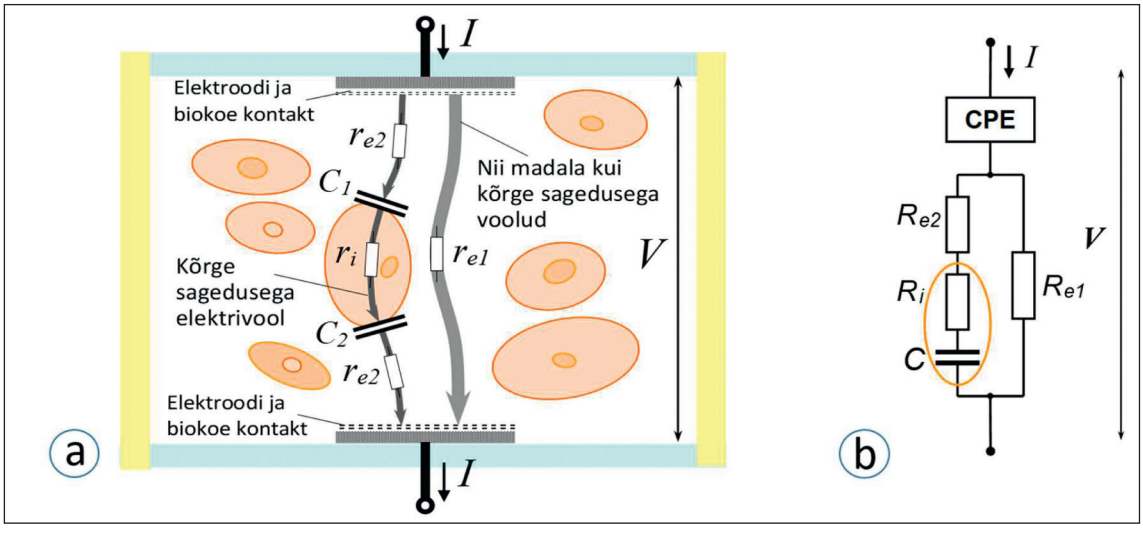
BIOLOOGILISTE MATERJALIDE IMPEDANTS EHK BIOIMPEDANTS

Bioimpedants on üks keerulisemaid impedantsiliike, mis kirjeldab impedantsi ajalisi muutusi bioloogilistes kudedes laias sagedusvahemikus 10 Hz kuni 1 MHz ja enamgi. Bioimpedantsi mõõtmiseks kasutatakse tavaliselt pingestatud kontaktelektroode tillukese elektrivoolu (≤1 mA) viimiseks läbi eluskoe, mis lihtsustatuna on esitatud joonisel 4.

Joonis 4 kirjeldab bioimpedantsi lihtsustatud ja üldistatud kujul. Midagi lähedast kohtame ka juhtudel, kus tegemist ei ole mitte bioloogiliste objektide impedantsiga, vaid mõne teise elektrilise impedantsi liigiga. Näiteks elektrokeemilise impedantsiga patareides ja akudes, samuti nii elektrijuhtide kui pooljuhtide impedantsiga ning ka elektriliste isolaatorite dielektrilise impedantsiga. Neid erijuhte me detailsemalt ei vaatle. Küll aga käsitleme rakendusi, mis valdavalt on tehtud koostöös ettevõtlusega.

SÜDAMEASJAD

Südamestimulaator ehk rütmur. Meie peamiseks sihiks olid küll uuringud südamestimulaatorite tehnika osas, kuid huvitusime ka südameveresoonkonna töö analüüsist ja diagnostikast. Seda esmajoones arstide (Andres Kink, Indrek Rätsep, Tiina ja Hasso Uuetoa) innustusel ning firmade Smartimplant OÜ ja JR Medical OÜ ning tehnoloogia arenduskeskuse ELIKO huvides. Need teadmised osutusid hädavajalikuks edaspidise töö tulemuslikkuse jaoks.



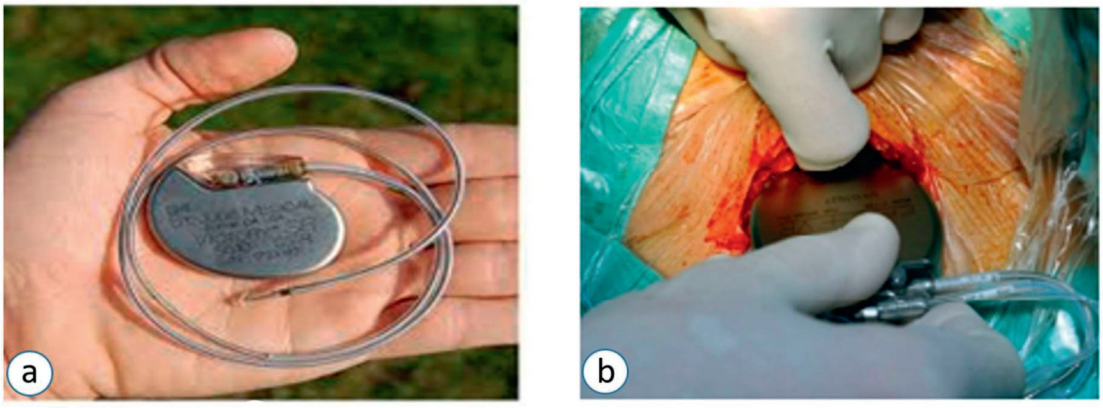
Joon. 4. (a) Elektrivool rakukultuuris, kus r_e tähistab rakuväliste vedelike osatakistusi, r_i esindab rakusiseseid takistusi, C_1 ja C_2 kajastavad rakukestade mahtuvusi; (b) rakukultuuri impedantsi elektriline aseskeem, mis sisaldab koondesitusi rakuväliste takistuste R_{e1}, R_{e2} ja rakusiseste osaimpedantside R_i ning rakukestade mahtuvuste C näol; lisaks on toodud konstantfaasi element CPE (*constant phase element*), mis esindab metallelektroodi ja bioloogilise koe vahelist toimet.

Esimene algeline südamerütmur (joonis 5) loodi firmas Siemens-Elema ning implanteeriti Rootsis juba 1958. aastal. Oma olemuselt on südamestimulaator ehk rütmur elektronseade, mis viiakse rindkeresse, et aidata väikese jõudlusega töötavat südant kiiremini ja jõudsamalt lööma või siis õhutades haiget südant regulaarsemalt tööle lühikeste, vaid üksikuid millisekundeid kestvate mõnevoldiste impulssidega. Esimese aastakümne rütmurid töötasid jäigalt seatud rütmiga, mis ei vastanud küll inimese füsioloogilistele vajadustele, kuid ometi aitasid päästa kümneid miljoneid elusid ning parandada elukvaliteeti veelgi suuremal hulgal patsientidel.

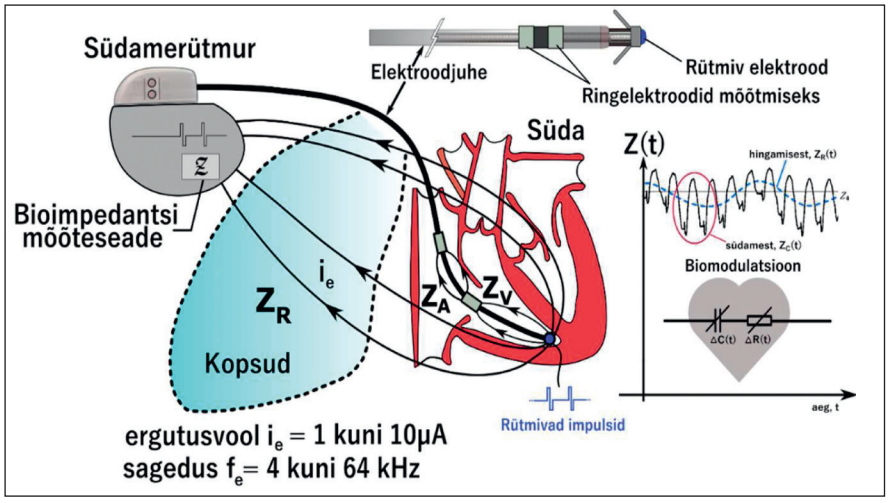
Südamerütmurite edasine areng on olnud hämmastav. Neist on saanud targad aparaadid (joonis 6), milles üha enam on kasutusel tehisintellekti printsiibid (Min, 2011b; Mäeniit, Olesk, 2017).

Uued vajadused, rütmi isekohastumine. Kerkis küsimus: missugune on optimaalne südamerütm (lööki minutis) haigele südamele ehk kui sagedasti on vaja stimuleerida (mitu impulssi minutis)? Sellist üheselt määratud arvu polegi, inimene vajab muutuvat rütmi, mis on üsnagi madal magades, samas aga kõrge füüsiliste pingutuste korral. On üsna selge, et südame poolt veresoonkonda paisatud hapnikurikka vere hulk peab vastama töötava organismi vajadustele ehk tarbenõudele kopsude kaudu verega seotud hapniku järele. Vajaliku hapnikuhulga katab kopsude poolt sisse hingatava õhu maht. Ülaltoodust tulenes ahvatlev võimalus – stimuleerimissageduse seostamine hingamise mahu ehk hingamise sageduse ja sügavuse mõõtmise kaudu. Appi tuleb kopsu impedantsi

Joonis 5. Esimene tööstuslik südamestimulaator.



Joonis 6. Tänapäevane südamerütmur (a) ning selle implanteerimine rinnalihasesse (b).



Joonis 7. Impedantsi mõõtmise tulemuste rakendamine südamestimulaatori rütmi juhtimiseks.

muutuste mõõtmine, sest need sõltuvad kopsu õhuga täituvuse määrast. Joonisel 7 mõõdetakse ära hingamisest sõltuv respiratoorne impedants Z_R elektroodjuhtme rütmiva elektroodi ning rütmuri metallkesta vahel ergutusvoolu i_e abil, mille sagedus on f_e.

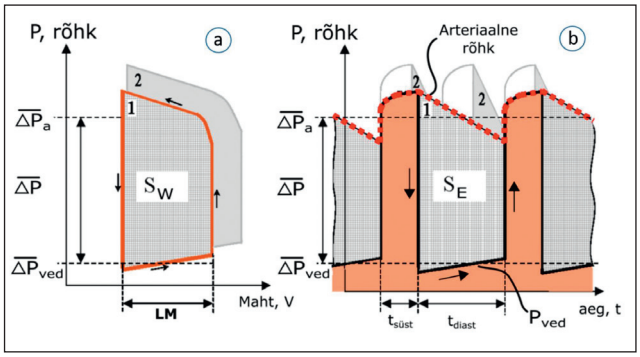
Kas olime esimesed maailmas, kes selle meetodi üles leidsid ja ära proovisid? Ei, ei olnud. Austraalia firma Telectronics oli sarnast teinud aastaid varem, kuid mitme patsiendi surmaga seotud probleemide tõttu sattus firma raskustesse ning St. Jude Medical (USA) ostis selle 1996. aastal ära. Ameeriklased ei jätnud jonni ning 1999. aastal hõivasid nad meid impedantsmeetodit edasi arendama. Kas võib juhtuda, et töötava organismi hapnikunõue osutub nii kõrgeks, et ületab südame võimekuse? Jah, süda võib iseenda lihaste hapnikuga varustamisega hätta jääda ning saabub infarkt. Nii juhtuski Telectronicsi patsientidega. Aatriumi impedantsi Z_A mõõtmine annab informatsiooni südame koja funktsioneerimise kohta, mis on vajalik südametöö kontrolli jaoks.

Südame energiabalanss. Kuidas teha nii, et rütmuri sagedus järgib küll organismi vajadusi, kuid samas ei luba ületada südamelihase töövõimet? Appi tuleb jällegi impedants. Kuna südamelihase impedants on vere omast mitu korda kõrgem, saame vatsakese sees mõõtes impedantsi Z_V kaudu (joonis 7) kätte verega täitumise hulga, mis paisatakse löökhaaval organismi. See on südame löögimaht *LM* (ingl *stroke volume SV*). Rõhu-mahu (ingl *P–V*) diagrammil (joonis 8a) esitatud pindala S_W on proportsionaalne veremahu väljutamisel tehtava töö hulgaga W ühe südamelöögi kohta. Täpselt võttes saab S_W kätte pindintegraali abil, kuid füsioloogia jaoks küllaldase täpsusega võib kasutada keskmisi väärtusi:

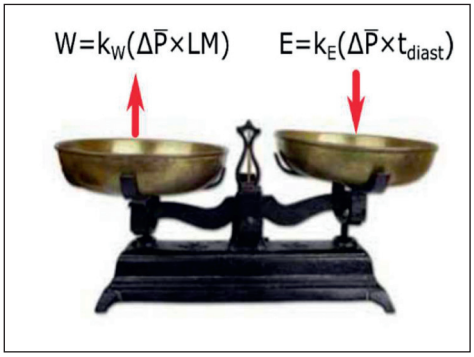
$$W = k_W \cdot S_W = k_W \cdot LM \cdot \Delta\overline{P}, \qquad (4)$$

kus k_W on tööarvutuse proportsionaalsustegur ning $\Delta\overline{P}$ on arteriaalse ja diastoolse vererõhu keskväärtuste $\overline{P}_a$ ja $\overline{P}_{ved}$ vahe.

Joonisel 8b on toodud vatsakeses toimiva ventrikulaarse vererõhu $P_{ved}(t)$ kõver. Südame täitumine verega leiab aset diastoolse intervalli t_{dias} jooksul.



Joonis 8. (a) Südametöö rõhu-mahu (*pressure-volume*, *P–V*) diagramm, kus *LM* tähistab südame löögimahtu; *(b)* vatsakese vererõhu $P_v(t)$ ajalised muutused, kus P_{ved} tähistab vatsakese diastoolset rõhku, P_a märgistab arteriaalset rõhku, ajalõigud $t_{süs}$ ja t_{dias} osutavad südametsükli süstoolsele ja diastoolsele intervallile; pindala S_W vastab südametsükli jooksul tehtud tööle W ning S_E energiavarustusele E samas tsüklis.



Joonis 9. Südame poolt tehtava töö W ja energiaga varustatuse E tasakaal, nõutav on $E \geq W$.

Energia kulutamise (töö W) ja energiaga varustamise E balansi korral toimib sama keskmine rõhkude vahe $\Delta\overline{P}$ valemist (4). Sel juhul avaldub energiavarustus E pindala S_E kaudu järgmiselt:

$$E = k_E \cdot S_E = k_E \cdot \Delta\overline{P} \cdot t_{dias}\,, \tag{5}$$

kus k_E on energiavarustuse proportsionaalsustegur. Energia varustatuse ja kulutuse balansi korral ($W = E$, vt joonis 9) saame kaalukausside tasakaalu $k_W \cdot LM \cdot \Delta\overline{P} = k_E \cdot \Delta\overline{P} \cdot t_{dias}$.

Kaalumisel taandub välja rõhkude vahe $\Delta\overline{P}$ (asub mõlemas kausis, vt joonis 9). See on väga tähtis asjaolu, sest reaalses elus on peaaegu võimatu südamesisest rõhku pidevalt mõõta. Saame:

$$k_W LM = k_E \cdot t_{dias} \cdot . \tag{6}$$

Kindla verevarustuse tagamiseks ($E \geq W$) peaks t_{dias} olema suurem kriitilisest (6):

$$t_{dias} \geq \frac{k_W}{k_E} LM. \tag{7}$$

Teades, et südame löögisagedus *HR* (*heart rate*, Hz) on pöördvõrdeline südametsükli kestivusega ($t_{süs} + t_{dias}$), saame siduda löögisageduse *HR* ja diastoolse intervalli t_{dias} :

$$HR = \frac{1}{t_{süs} + t_{dias}},$$

kust saadud:

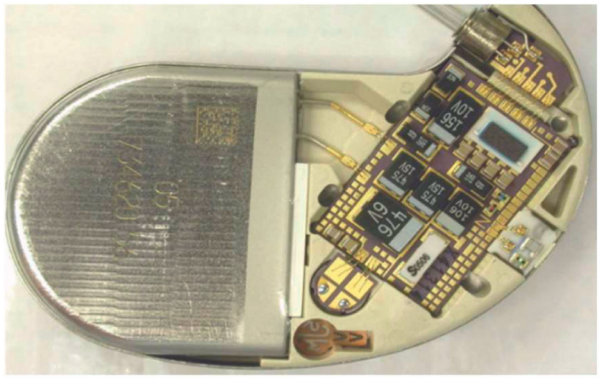
$$t_{dias} = \frac{1 - t_{süs} \cdot HR}{HR}\,. \tag{8}$$

Asetame seose (7) avaldisse (8) ning saame maksimaalselt lubatava stimulatsioonisageduse max *HR* ühikuga lööki minutis (60 sekundit), mis kindlustab südame heaolu ($E \geq W$):

$$\max HR \leq \frac{60}{\frac{k_W}{k_E} \cdot LM + t_{süs}} \text{ lööki/min.} \tag{9}$$

Parameetrid, nagu töö W on otseselt tuletatav respiratoorsest impedantsist Z_R ning löögimaht *LM* ja süstoolne ajaintervall $t_{süs}$ on saadav ventrikulaarse impedantsi $Z_V(t)$ mõõtmisest (joonis 7). Seejuures on süstoolne aeg $t_{süs}$ üsna vähe sõltuv südame löögisagedusest *HR*. Konstandid k_W ja k_E on määratavad konkreetse patsiendi koormustesti abil.

Tulemused võimaldasid isekohanduva rütmiga südemestimulaatoreid rakendada ülepiitsutamise ohu paindliku taltsutamise teel (meie arsti, dr Andres Kinki initsiatiiv). Kurioosne oli see, et tulemused osutusid sedavõrd ootamatuteks (või ohtlikeks?), et Eesti teadusfond (ETF) otsustas meie tagasihoidliku finantseerimise katkestada. Patentimine St. Jude Medicali (USA/Rootsi) poolt ning huvi ärkamine USA teadlaskonna hulgas (lepingud firmaga Guidant) andsid ETFile aluse taastada ka finantseerimine koos tunnustusega (Min, 2011a). Rakenduste edendamiseks asutasime oma firma Smartimplant OÜ. Töö südame ja veresoonkonna seire ja diagnostika vallas jätkub mitmekülgse finantseerimise toel tehisintellekti komponente silmas pidades ning eriti just kognitiivsuse printsiipe rakendades (Maidla, 2016a, b).

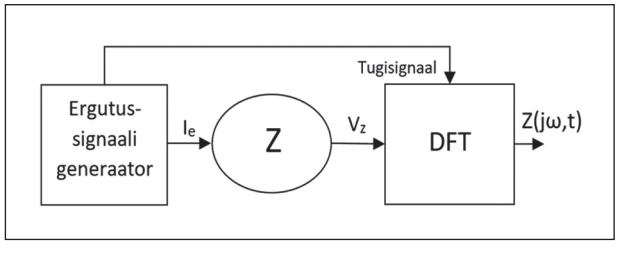


Joonis 11. Nüüdisaegne südamerütmur avatud kujul. Suurima komponendina näeme patareid, mis töötab vahetpidamata kümme aastat. Paremal pool asetseb elektroonikasõlm, mis sisaldab nii impulssgeneraatorit ja arvutit kui bioimpedantsi mõõteseadet, lisaks veel mitmeid sensoreid.

IMPEDANTSI MÕÕTMINE. SPEKTROSKOOPIA

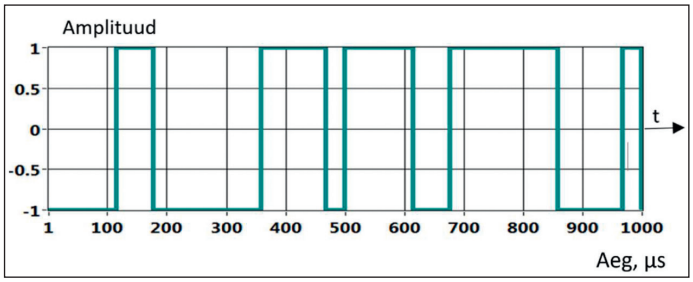
Informatsiooni saamiseks tuleb impedantsi mõõta. Kerkib küsimus: kuidas mõõta impedantsi kõige mõistlikumal moel? Impedantsi mõõtmise üldpõhimõte selgub jooniselt 10 avaldisi (1)–(3) kasutades. Nüüdisaegse avatud südamerütmuri foto on toodud joonisel 11.

Mõõtelülituse koostamise juures küsime esmalt, millise kujuga peaks olema genereeritav ergutusvool $I_e(t)$? Klassikalisel kujul on ergutusvool siinuseline ehk harmooniline, mis on õigustatud sellega, et harmooniline signaal ei sisalda muid signaalikomponente (kõrgemaid harmoonilisi) ning seetõttu on mõõtetulemus selgelt määratud. Märkigem, et ka impedantsi esialgne definitsioon eeldab siinuseliste signaalide kasutamist. Mureks on aga see, et siinuselise voolu genereerimine ja töötlemine ei vasta enam hästi tänapäeva digitaaltehnikale orienteeritud elektroonika suunale, milleks on komplementaarne metall-oksiid-pooljuht (ingl CMOS) tehnoloogia. Samas sobib CMOS-tehnika digitaalsetele lahendustele lausa ideaalilähedaselt. Otsustasime välja arendada digitaaltehnika versiooni, mis täidab nii digitaal- kui analoogtehnika ülesandeid.



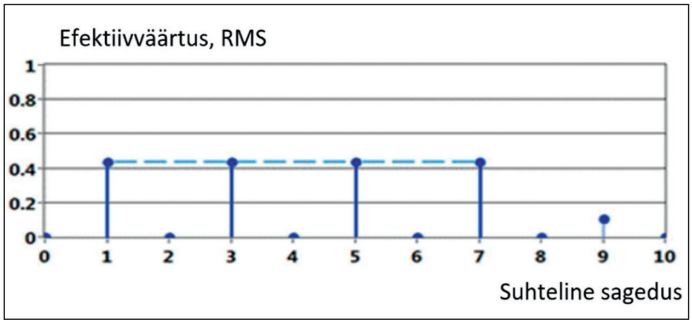
Joonis 10. Impedantsi mõõtmise üldskeem: sisendpoolel asetsev generaator väljastab nii ergutusvoolu I_e impedantsile Z kui ka tugisignaali diskreetse Fourier' teisenduse (DFT) protsessorile, mis arvutuste tulemusena väljastab ajas t muutuva kompleksimpedantsi $Z(j\omega,t)$ parameetrid paljudel sagedustel ω.

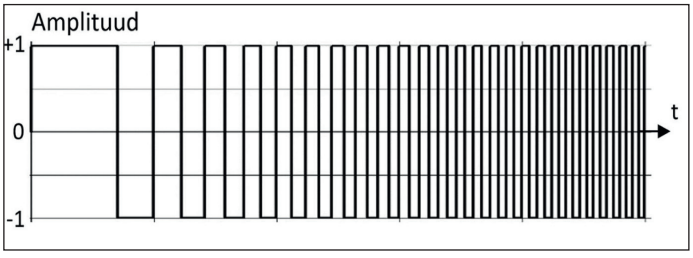
Selleks koostasime ja patenteerisime mitmeid mõõtelahendusi, kus kasutasime binaarseid signaale (kahe diskreetse väärtusega impulsid, vt joonis 12). Joonisel 13 on kujutatud joonisel 12 toodud binaarse komposiitsignaali spekter, milles sisaldub neli spektraalkomponenti. Seega on binaarne signaal joonisel 12 nelja võrdse amplituudiga siinussignaali summa, milles kaasnevad mõned madala nivooga



Joonis 12. Binaarne ergutussignaal amplituudidega +1 ja –1, mis sisaldab nelja erinevatel sagedustel asetsevat harmoonilist signaalikomponenti, vt spekter joonisel 13.

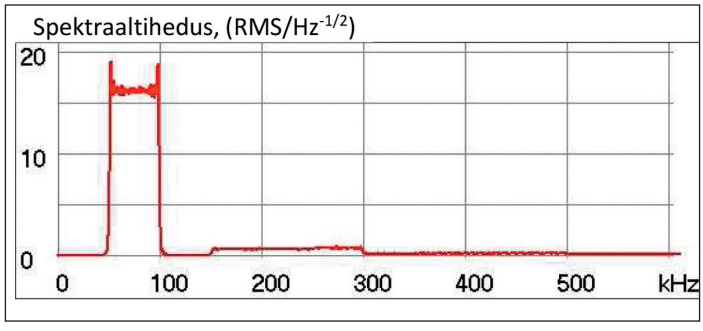
Joonis 13. Binaarse signaali (joonis 12) spekter, mis sisaldab nelja (4) võrdse amplituudiga spektraalkomponenti (harmoonilist signaali) sagedustel f_1, $3f_1$, $5f_1$, ja $7f_1$.

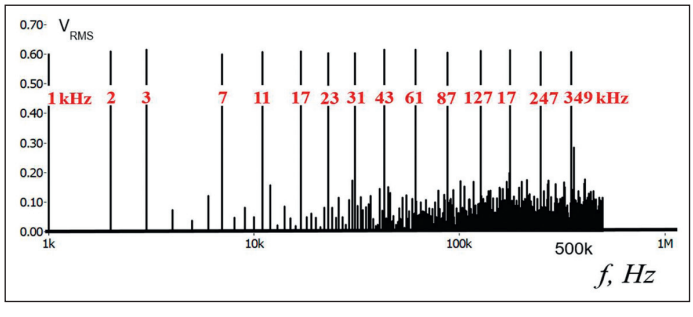




Joonis 14. Binaarse siristus-signaali kuju lineaarses esituses: impulsside kestus lüheneb ajas võrdsete suhteliste muutuste kaupa.

Joonis 15. Binaarse siristus-signaali (*chirp*) pidevspekter vahemikus 50–100 Hz.





Joonis 16. Impedants-spektroskoopia seadme QUADRA binaarse ergutussignaali spekter.

ülearused signaalikomponendid, nagu näiteks sagedusel $9f$ asetsev komponent (joonis 13).

Sellisel viisil pöörasime impulss-signaalide suurima puuduse – kõrgemate harmooniliste sisalduse – miinusest plussiks. Kavalalt koostatud (sünteesitud) binaarse jada abil saame mõõtmise muuta impedants-spektroskoopiaks ehk samaaegseks mõõtmiseks paljudel sagedustel ühekorraga. Niimoodi saame palju kordi suurema informatiivsuse samas ajaintervallis. Rikka spektraalsisaldusega binaarse ergutusvoolu kasutamine on patenditud Eestis ning patentimisel USAs.

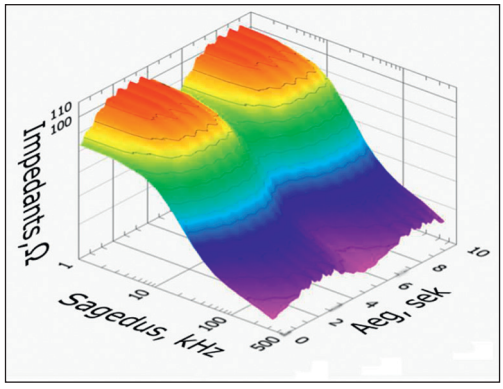
Joonisel 13 toodud spektrikomponendid asuvad ette määratud diskreetsetel sagedustel. Vahepealsetel sagedustel pole seda tüüpi ergutussignaaliga võimalik mõõta. Paljudel juhtudel on aga vaja katta teatud sagedusvahemik f_1 kuni f_2 ühtegi sagedust vahele jätmata (pidev spekter). Sel juhul sobib hästi binaarne siristus-signaal (ingl *chirp*), mis on kujutatud joonisel 14.

Sellisel signaalil on ühtlase spektraaltihedusega [V/Hz$^{-1/2}$] pidevspekter (joonis 15) vahemikus 50–100 Hz. Näeme, et osa ergutust läheb „raisku", eriti just sagedusvahemikus 150–300 Hz, kuid selle osa efektiivväärtus pole just määrav. Reaktsioonisignaali V_Z töötlus impedantsi Z väärtuste saamiseks (joonis 10) toimub signaali-protsessorisse ehitatud diskreetse Fourier' teisenduse (DFT) algoritmi alusel, näiteks firma Texas Instruments (USA) Piccolo seeria protsessoreid kasutades. Ülaltoodud meetodi alusel töötab meil impedants-spektroskoopia seade QUADRA (joonis 17), mis annab impedantsi $Z(j\omega)$ spektri sagedustel 1 kHz kuni 349 kHz välja iga 1 ms järel binaarse ergutussignaali (joonis 16) toimel.

Füsioloogiliste uuringute ning meditsiinidiagnostika tarvis on meil vaja analüüsida impedantsi ajalisi muutusi $Z(t)$, sest keha ja elavorganite impedants muutub hingamise, südametöö ja vere pulseerimise rütmis. Kuna QUADRA võimaldab

Joonis 17. Spektromeeter QUADRA: kolm seadet ühtse kolmesisendilise süsteemina.

teha mõõtmisi iga 1 ms järel, osutub aparatuur ideaalseks bioimpedantsi ajaliste muutuste analüsaatoriks. Veelgi enam, kuna QUADRA võimaldab mõõta 15 sagedusel korraga (joonis 16), saame teha impedantsi aeg-sagedus analüüsi ehk arendada ajas muutuvate (mittestatsionaarsete) süsteemide impedants-spektroskoopiat $Z(j\omega, t)$. Üks inimese rindkere impedants-spektroskoopia tulemus on esitatud joonisel 18, kus hingamise tekitatud suured ja aeglased impedantsi muutused ning südametööst tulenevad väiksemad ja kiiremad muutused, mis joonisel 18 on esitatud ajas 0–10 sekundit mõõtesageduste 1–349 kHz taustal.



Joonis 18. Seadmega QUADRA mõõdetud rindkere impedantsi spektrogramm.

Veelgi edasi minnes, kiire mõõtmine QUADRA aparatuuriga võimaldab lahendada impedants-tomograafia ülesandeid (mõõtetulemuste esitamine kolmemõõtmelises ruumis). Selleks tuleb kasutada mitmest aparaadist koosnevat süsteemi (joonisel 17 on kasutatud kolme aparaati, mis annab kiire paralleeltöö versiooni) või siis tuua täiendavalt juurde mõõte-elektroodide kommutaatori ehk multipleksori (saame ajas järjestikku töötava süsteemi). Kuna mõõta saab paljudel sagedustel üheaegselt, jõuame tänapäeva kõige täiuslikuma aparatuurini, mis töötab üheaegselt nii aja kui sageduse vallas toimiva impedants-spektrotomograafia süsteemina *(time-frequency domain impedance spectro-tomography system)*. Just selles suunas on praegu käimas töö koos Tampere tehnikaülikooliga, mille sihiks on rakukultuuride kasvu, elu ja surma jälgimine (Paul Annus).

RAKENDUSED

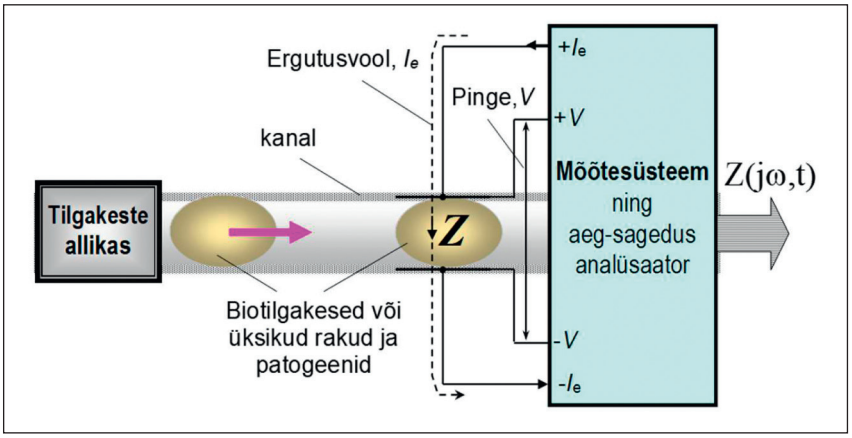
1) Müntide identifitseerimine ning nende väärtuse määramine. Samas ei tegele me üksnes bioloogiliste objektidega. Põnevad on olnud meie tööd näiteks metallistruktuuride uurimise vallas, seda eriti just müntide ehtsuse kontrolli osas (joonis 19). Võitsime Euroopa võltsingutevastase büroo OLAF hanke euromüntide ehtsuse kiire tuvastamise protseduuri väljatöötamiseks (Olev Märtens, EU project OLAF 2007–2009: *Study of the Euro Coin conductivity calibration procedure for obtaining certified reference standard*).

Euroopale tegi muret euromüntide kehv eristamine mitmete teiste riikide müntidest eurotsoonis kasutuses olnud mündiautomaatides. Meie väljatöötatud impedantsi pöörisvooludega mõõtmise meetod sai järgneva Euroopa Liidu toe 7. raamprogrammi projektiga FP7-SME-SAFEMETAL: *Increasing EU citizen security by utilizing innovative intelligent signal processing systems for Euro-coin validation and metal quality testing* (2010–2012), (vt Leiutis, millega saab mõõta…, 2011; Min, 2010). Tööstuslikud rakendused läksid seekord Inglise ja Slovakkia firmadele.

Joonis 19. Euromüntide ehtsuse ja väärtuse tuvastamise meetodi testimine pöörleva karusselliga, tõstes sujuvalt pöörete arvu ajaühikus kuni maksimaalse tuvastuskiiruse saavutamiseni.

Töö metallstruktuuride omaduste ja nendest valmistatud detailide kvaliteedi hindamiseks Eestis jätkub tööstuse toel, näiteks Autoliv gruppi (Rootsi) kuuluva firmaga Norma sõlmitud lepingu (2017–2018) raames.

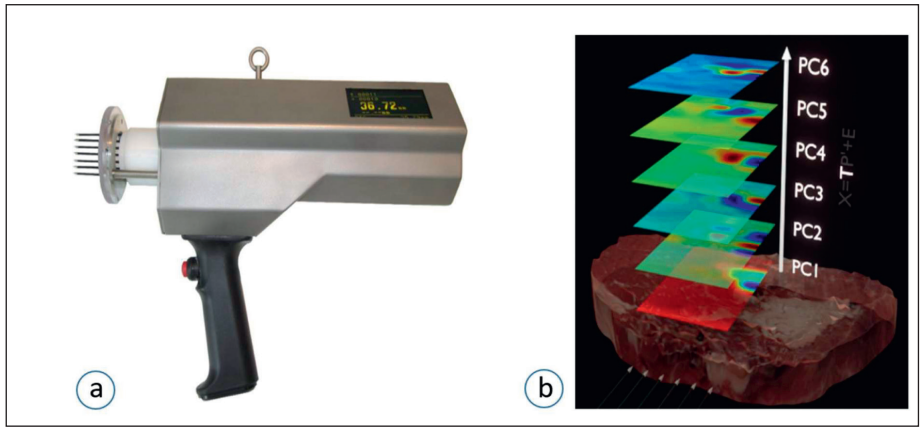
2) Kiiplabori väljatöötamine (Jaan Ojarand). Kõige uuemaks töölõiguks on kujunenud mikrovedelikega töötavate kiiplaborite loomine haigusi tekitavate bakterite ja viiruste avastamiseks ja määratlemiseks impedants-spektroskoopia abil (joonis 20) seal, kus tekib vajadus – kas kodus, tööl ja puhkehetkel või koguni sõjaväljal *(point-of-need detection)*. Töö jätkub Eesti teaduse tippkeskuse EXCITE raames ning ASTRA programmi toel. Peamisteks arendustöö sihtideks on doonorvere kvaliteedi kiiranalüüs ning sugulisel teel levivate patogeenide varajane avastamine.



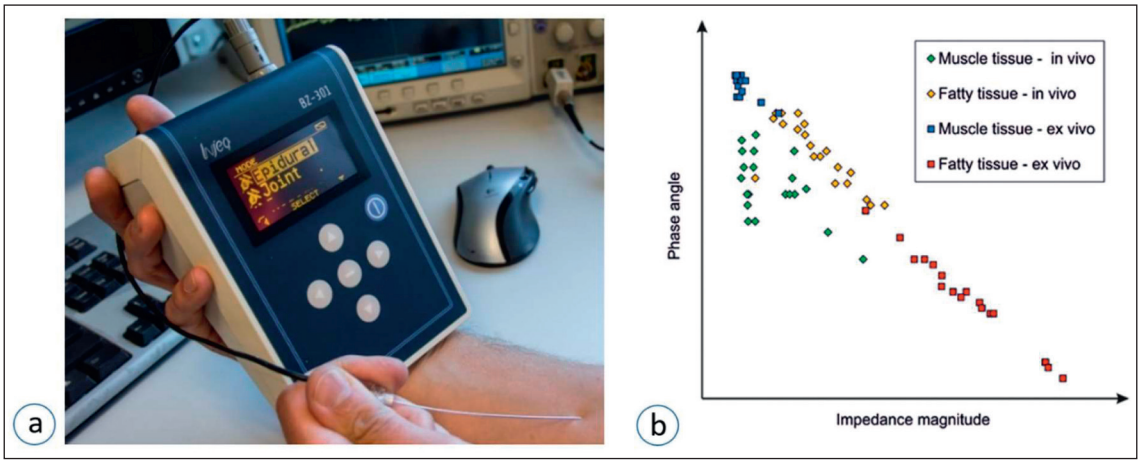
Joonis 20. Mikrovedelikega töötav kiiplabor (*lab-on-a-chip*) mikrokanalites liikuvate biotilgakeste (*droplets*) omaduste ja üksikrakkude määramiseks ning haigustekitajate (bakterite ja viiruste) avastamiseks nende bioimpedantsi *Z* mõõtmise ja analüüsi kaudu.

3) Liha kvaliteedi analüsaator (2013–2014). Elektrilise bioimpedantsi meetodi rakendus liha kvaliteedi hindamiseks toimus koostöös Taani firmaga Carometec A/S läbi TAK ELIKO. Põhjuse andis soov importida lambaliha Euroopa Liitu nii Austraaliast kui Uus-Meremaalt. Impordiloa saamiseks tuli välja töötada aparatuur liha kvaliteedi kontrolliks nii eksportööri kui importööri juures. Selle väljatöötamise ja valmistamise võttis enda peale Taani firma Carometec A/S (joonis 21a), kes pöördus omakorda TTÜ poole bioimpedantsi rakendamise osas. Lähedast põhimõtet kasutasime liha küpsetamise kvaliteedi jälgimise projekti juures firma Electrolux Itaalia (endine Zanussi) tellimusel juba varem, 2012. aastal. Lõppeesmärgiks oli liha küpsetamise automatiseerimine gurmeetoitude valmistamise jaoks vajalikku kvaliteeti kaotamata (joonis 21b).

4) Organismi kudede nõelanalüsaator (2014, jätkub). Projekt sai alguse 2014. aastal Soome firma Injeq Oy tellimusel läbi tehnoloogia arenduskeskuse TAK ELIKO. Töö sisuks on inimkudede tervisliku seisundi määramine ja seire peene elektroodi viimisel ettemääratud paika diagnoositavas koes või organis (joonis 22b). Meetodi aluseks on eluskoe kompleksimpedantsi spektri mõõtmine ja analüüsimine. Tehtud on hulgaliselt katsetusi nii *ex vivo* kui *in vivo*. Välja töötatud sai aparaat BZ-301 (joonis 22a). Meditsiinilised katsetused on edukalt läbitud, käimas on tööstusliku



Joonis 21. (a) Liha koostise ja kvaliteedi määramise aparaat ning (b) lihastruktuuri kahemõõtmelised impedantskujutised PC1–PC6, sõltuvana elektroodide sügavusest liha sees.

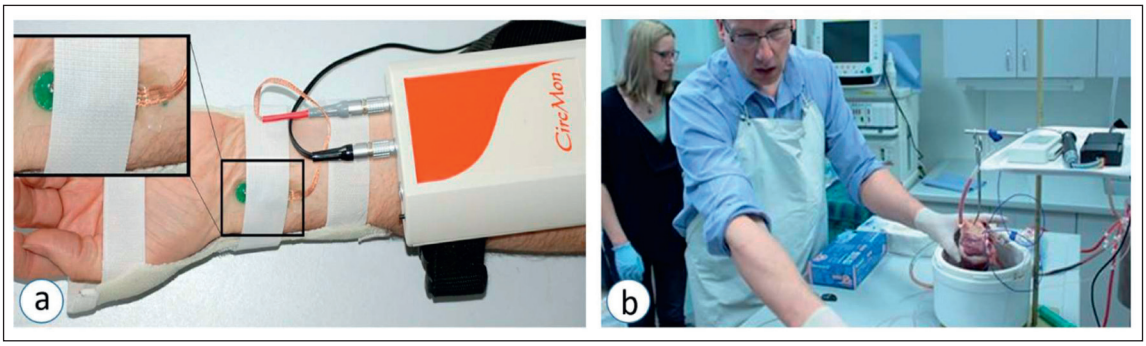


Joonis 22. (a) Pika nõelelektroodiga kudede analüsaator BZ-301 koos (b) kudede määramise aluseks oleva kompleksimpedantsi mõõtetulemuste kahemõõtmelise (moodul ja faas) diagrammiga.

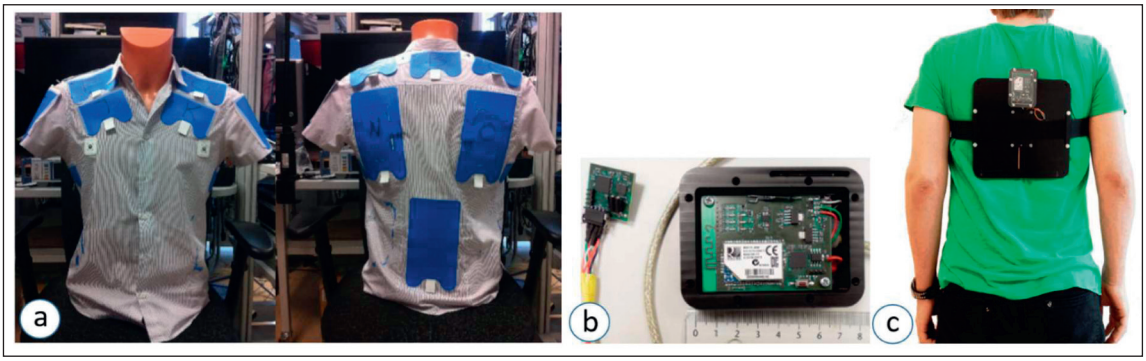
evitamise protsess. Sõlmitud on litsentsileping TTÜ leiutiste kasutusele andmiseks firmale Injeq Oy.

5) Aordi vererõhukõvera mitteinvasiivne analüüs (2016–2021). Selle töö algatas Ida-Tallinna keskhaigla südamekeskus (dr Tiina Uuetoa). Probleemiks sai aordikaare vererõhu kõvera saamine mitteinvasiivsel teel randme radiaalarteri impedantsi mõõtmise kaudu (joonis 23). Seni oli kasutatud vaid invasiivset meetodit rõhuanduri viimisega aorti kubemearteri kaudu. Haigla partneriteks on TTÜ ja TAK ELIKO ning firma JR Medical OÜ. Haigla võttis enda peale inimkatsete tegemise ja nende tulemuste analüüsi. TTÜ osaks on impedantsi kõvera mõõtmine ning selle matemaatiline seostamine aordikaare vererõhuga. Toetavaks uurimuseks on Euroopa teadusruumi nn lipulaevtehnoloogiate (*flagship technology in European Research Area*) võrgustiku H2020 FLAG-ERA JTP2016: CONVERGENCE projekti täitmine aordi vererõhu monitoorimise vallas.

6) Tark päästevest külmadel meredel kasutamiseks (2015–2016). Arendustöö viidi läbi Eesti firma LADE OÜ (Saksa firma MarinePool GmbH tütarfirma) tellimusel, partneriks oli TAK



Joonis 23. (a) Sensor ja rakis ning meditsiiniline bioimpedantsi mõõtur CircMon (JR Medical) radiaalarteri impedantsi mõõtmiseks ning (b) katsetused eraldatud seasüdame ja veresoonkonnaga.

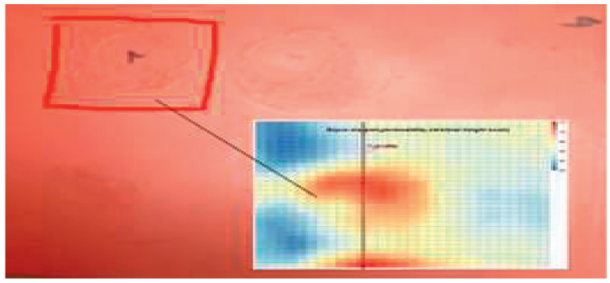


Joonis 24. (a) Mahtuvuslike elektroodide asetus rindkerel, (b) elektroonikalülitus rindkere bioimpedantsi mõõtmiseks ning (c) mõõte- ja sideelektroonika paigutus selja piirkonnas.

ELIKO kui vedav pool rakenduste osas. Töötasime välja bioimpedantsi mõõtmisel baseeruva aparatuuri (joonis 24) õnnetuse tõttu jääkülma vette kukkunud päästetava (meremees, turist, polaaruurija, naftaplatformi töötaja jne) hingamise ja südametöö hindamiseks. Sihiks oli päästetava tervisliku seisundi analüüs kuni küsimuseni: kas elus või surnud? Jõudsime esialgsete positiivse tulemini katsetustega Haapsalu lahe vetes. Kuigi toote edasiarendus läks Saksa emafirmale, saime kasuliku kogemuse impedantsmeetodi uute rakendusvõimaluste osas.

7) Terase omaduste määramine pöörisvooluga (Olev Märtens). Erinevate terasemarkide identifitseerimise töö tellijaks oli Invest Science OÜ (2014). Töös uuriti terase (ennekõike süsinikterase) omaduste määramise võimalusi impedantsi mõõtmisega indutseeritud pöörisvoolude abil (joonis 25). Resultaadid olid positiivsed, kuid nende rakendamine nõuab täiendavat arendustööd.

Terase korrosiooni (rooste) mõõtmise rakendusuuring viidi läbi 2015. aastal. Töö toimus TTÜ ja TAK ELIKO koostöölepingu raames, töö tellijaks oli Eesti innovatsiooni instituut (Suurbritannia firma PERA allüksus). Tööst selgus, et pöörisvoolu impedantsiga saab edukalt hinnata nii roostealade pindade suurust kui sügavust. Impedantsmeetodi rakendamine on võimalik, aparatuuri loomine on reaalne. Konkreetne rakendus metalldetailide sisestruktuuride hindamiseks on tehtud Tallinnas firmas Autoliv-Norma.



Joonis 25. Värvikihi all oleva terase rooste avastamine ning roosteastme määramine.

KOKKUVÕTE

Järjepidevust hoides on TTÜ elektroonikud jõudnud impedantsiuuringutes maailmas silmapaistvale positsioonile (El Khaled jt, 2018). Tähelepanu osutamine innovatsioonile ning tootearendusele koostöös Eesti, Euroopa ja USA ettevõtetega on võimaldanud leida ja tules hoida aktuaalseid probleeme baasuuringute osas. Eriline tähtsus meie

arengu hüvanguks kuulub aastatepikku koostööd teinud haiglatele (Põhja-Eesti regionaalhaigla ja Ida-Tallinna keskhaigla) ning eriti just neis töötavatele meedikutele (Andres Kink, Indrek Rätsep, Tiina Uuetoa ja Hasso Uuetoa). Me ei unusta meeldejäävat koostööd Tartu ja Oslo ülikooliga, Tampere tehnikaülikooliga ja KTHga Stockholmis. Mitmed meie teadurid on saanud pikemalt praktiseerida Saksamaal, nii Müncheni ülikoolides kui Thüringeni uurimisinstituudis IBA Heilbad Heiligenstadtis.

Autor tänab oma varasemaid kaastöötajaid (Toomas Parve, Toivo Paavle, Härmo Härm) samuti nagu praeguseidki, kes on osalised sellegi kirjatüki valmimises (Paul Annus, Olev Märtens, Raul Land, Jaan Ojarand, Marek Rist). Autor tunnustab ligi paarikümmet doktoranti, kes on panustanud teema arendamisse, ning oma arvukaid partnereid Euroopa Liidu raamprogrammide projektides.

VIITED

El Khaled, D., Novas, N., Gazquez, J.-A., Manzano-Agugliaro, F. 2018. Dielectric and bioimpedance research studies: A scientometric approach using the Scopus database. – MDPI Publication, 6 (1), doi: 10.3390/publications6010006

Kosmos on meie! Kuidas Eesti kosmoseriigiks sai. 2016. https://sputnik-news.ee/events/20160412/1133929.html

Leiutis, millega saab mõõta müntide parameetreid ning hinnata nende vastavust etteantud suurustele. 2011. – Kell, K. (toim). Euro tulek Eestisse. Eesti Pank, Tallinn, 108–109.

Maidla, M. 2016a. Kognitiivelektroonika on elektroonika tulevik. – Sirp, 23. september.

Maidla, M. 2016b. Südame südames. – Sirp, 23. september.

Min, M. 2010. Euromüntide ehtsusest: kuidas Ohm ja eestlased eurot hoiavad? – Horisont, 4, 6.

Min, M. 2011a. Südame täitumismahuga seostuv energiatarve: projekt ETF212 „Südame täitumismahuga seostuv energiatarve“, 2007–2009. – Eesti teadusfondi aastaraamat 2010–2011. Eesti teadusfond, 17–18.

Min, M. 2011b. Südamerütmurid aitavad elada ehk kus tuleb mängu elektriline bioimpedants. – Horisont, 1, 8–15.

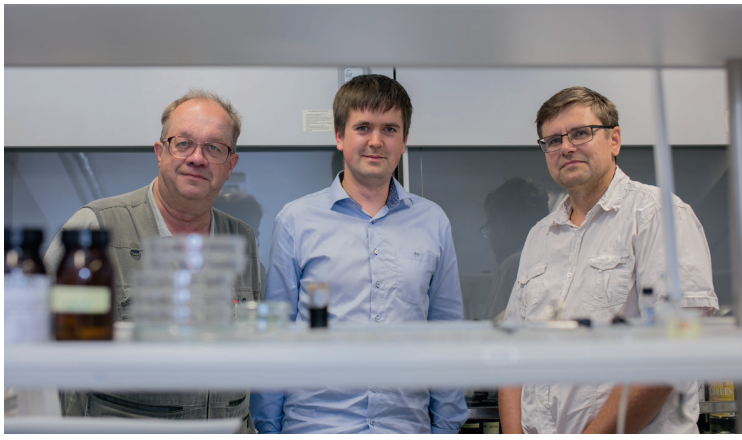
Mäeniit, P., Olesk, A. 2017. Impedantsil põhinev südamerütmur. – Mäeniit, P., Olesk, A. Head eesti asjad, leidused ja leiutajad. Tänapäev, Tallinn, 139–141.

Püramiidi tipus – Mart Min ja impedants, ERR, 12.02.2011. – ERR arhiiv, 2011-002880-0005, http://arhiiv.err.ee/guid/20110214043954501001000208101517C41A040000004028B00000D0F005941

LIHASROBOTID[10]

Indrek Must, Andres Punning, Alvo Aabloo
Tartu ülikooli tehnoloogiainstituut

Elusorganismidega ühildumine, õrnade objektide käsitsemine ning liikumine struktureerimata keskkonnas on loomuomased elusolenditele, kuid keerulised tänapäeva robotitele. Pehmerobotid seevastu imiteerivad oma omadustes ja käitumises loodust, rajades nii teed uudsetele meditsiinirakendustele. Tartu ülikooli tehnoloogiainstituudis arendatakse tehislihaseid, mis jäljendavad looduslike lihaste toimimist enda kuju muutes ning pakuvad uudse platvormi pehmerobotite arendamiseks. Elektroaktiivsete täiturite arendamine kaasab üha enam keemiaalast oskusteavet, rakendamine seevastu lõikab igal sammul kasu biomehaanika printsiipide tundmaõppimisest ja mõistmisest. Pehmed lihasrobotid võimaldavad väga lihtsa ehituse juures jäljendada komplekssseid liikumismehhanisme, näiteks on konstrueeritud alla ühe grammi kaaluv, vaksavast röövikust inspireeritud lihasrobot. Pehmed, kujumuutvad robotid on ohutud kokkupuutes inimesega, pakkudes eriti sobiliku platvormi rakenduslikult huvipakkuvate personaalsete tervise monitoorimise seadmete ja minimaalselt invasiivsete meditsiiniinstrumentide arendamiseks.



Autorid (vasakult): Andres Punning, Indrek Must, Alvo Aabloo.

PEHME VÕIB OLLA PAREM KUI JÄIK

Tänapäeva robotid on efektiivsed ja võivad kaugelt ületada inimese võimekust eelkõige toimingutes, mis vajavad kõrget täpsust, suurt kiirust ja tugevat jõudu. Samas võib hõlpsalt veenduda, et näiteks inimkäe motoorne võimekus ületab kaugelt parimate tänapäevaste robotkäte võimekust, kuid seda üksnes kindla eripäraga talitlustes. Eriti väljakutsuvaid rakenduslikke olukordi, mille lahendamine täpsete ja väljakujunenud, aga jäikade robootikavahenditega on iseäranis keerukad, võib välja tuua kolm: esiteks ühildumine elusorganismidega (sh inimkehaga), teiseks õrnade objektide käsitsemine ning kolmandaks liikumine struktureerimata tehis- ja looduskeskkondades (Laschi jt, 2016). Avastasime, et kolm väljatoodud, robootikale kaelamurdvat rakenduslikku juhtumit on, vastupidi, eelissobivad ja isegi loomuomased elusorganismidele – näiteks on inimkeha toestamisel teine inimene reeglina (jäigast) robotist efektiivsem. Samal ajal süveneb üha vajadus uudsete personaalse meditsiini abivahendite ja minimaalselt invasiivsete meditsiiniinstrumentide järgi, mis esmajoones eeldavad suurepärast ühilduvust inimkehaga (Polygerinos jt, 2017). Loogilise järeldusena omandab robootika

[10] Tehislihaste abil liikuv robot (uudissõna).

uue väljakutse üha enam sarnaneda nii omaduste kui liigutusmehhanismide poolest elusorganismidega (Kim jt, 2013; Yang jt, 2018).

Miks on inimesed seniajani teatud toimingutes robotitest efektiivsemad? Pehmus ja muganevus[11] on tuvastatud elusloodusele loomuomaste omadustena, mis on võtmetähtsusega just neis funktsioonides, milles robotid inimesele veel alla jäävad. Tõepoolest, nüüdisaegsed robotid pigem tungivad keskkonda peale ja haaravad objektide järele, kui muganevad konkreetsete keskkonnaoludega sobivaks ja puudutavad objekte. Nii osutuvad pehmus ja muganevus olemuslikeks eeldusteks ka efektiivse vastastikmõju saavutamisel roboti ja inimese vahel. Hüpe sissejuurdunud robootika tasemelt bioinspireeritud pehmerobootika suunas on järsk ja paradigmasid murdev, hõlmates ja vajades üha enam nii keemia- kui materjaliteadusalast kompetentsi. Ühtlasi selgub, et esmapilgul triviaalsetena näivate pehmete interaktsioonide, näiteks puudutuse biomehaanilised aspektid on suures osas teadusele kirjeldamata. Seega omandab pehmerobootika esmalt vajaduse ja ülesande paremini aru saada looduslikest pehmetest interaktsioonidest ning seejärel defineerivad loodusest õpitud printsiibid raamistiku pehmerobotite edasiseks arendamiseks.

TEHISLIHASED TÄITURITENA ROBOOTIKAS

Pehmerobootikat on arvatavasti enim inspireerinud loomorganismides suure võimsustihedusega liigutuste saavutamine lihaste kokkutõmbumise teel. Lihaste fenomenaalset toimet kujumuutuse abil ülejäänud organismi liikuma panna jäljendatakse tehislihastes – elektromorfsetes[12] materjalides, mis rakendavad liigutuse tekitamiseks laia füüsikaliste ja keemiliste toimemehhanismide spektrit (Hines jt, 2016; Mirvakili, Hunter, 2018).

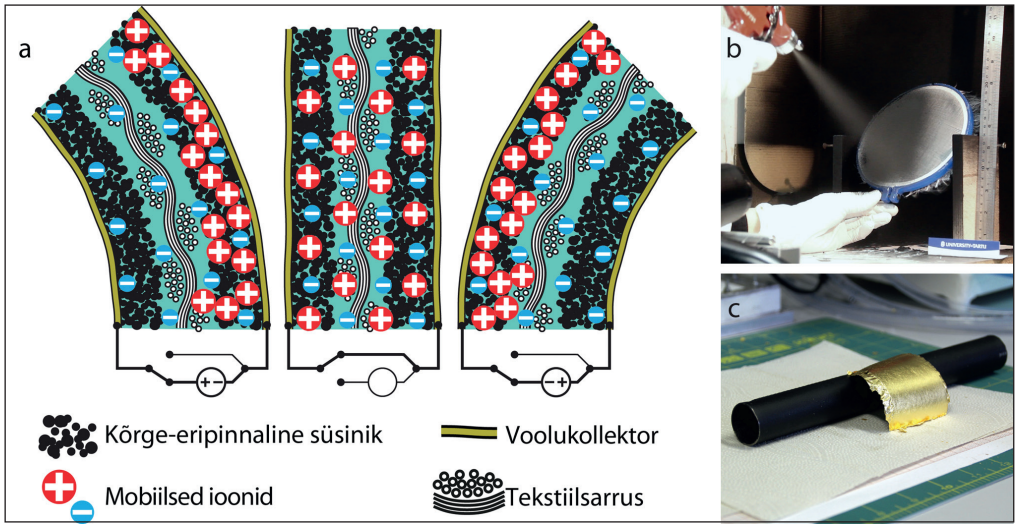
Tartu ülikooli tehnoloogiainstituudis on aktiivselt arendatud tulevaste meditsiinitehnikapõlvkondade jaoks võtmetähtsusega pehmeid „ehituskive“, aga tegelikult ka laiemalt ette valmistatud pehmerobootika „tööriistakomplekti“ kogu robootikavaldkonnale juba ligikaudu 2006. aastast alates. Konkreetsemalt on lihastoimet imiteerivate täiturite arendamisel keskendutud ioonsetele elektroaktiivsetele süsteemidele, kus tehislihase kujumuutus saavutatakse materjali ulatuses elektrivälja abil mobiilsete ioonide ümberpaigutamise või -orienteerumise tagajärjel. Kuigi praegusaegsete tehislihaste toimemehhanismid erinevad veel olulisel määral looduslikest lihastest, on ioonsed elektroaktiivsed süsteemid oma olemuselt seni parimad tehnoloogilised lähendused analoogidele elusloodusest, võimaldades tehislihases potentsiaalselt rakendada elusorganismideski levinud elektrolüüte ja struktuurseid materjale. Näiteks kuuluvad pehmerobootikale huvipakkuvate materjalide hulka tselluloos (Nevstrueva jt, 2018), koorikloomade kestades leiduv kiudaine kitosaan (Lee jt, 2013) ning loomsetest kudedest saadav tardaine želatiin (Harjo jt, 2017).

Looduslähedaste materjalide ja ka toimemehhanismide rakendamine annab pehmerobotitele tugevaid eeliseid ja uudseid võimalusi ning suurendab ohutust. Just ohutus on inimesega kokkupuutes olevate robotite arendamisel esmatähtis. Pehmerobotite ohutus on tagatud ühelt poolt roboti konstruktsioonis sisalduvate materjalide madala toksilisusega, teiselt poolt madalapingeliste elektriliste juhtsignaalide kasutamisega, vastandudes nii traditsioonilistele robotitele, mis sageli sisaldavad liiga reaktiivseid materjale ja võivad hõlmata kõrgepingelisi sisendsignaale.

Ioonse toimemehhanismiga robootikatäiturite arendamine hõlmab ja vajab lisaks mehaanika- ja

[11] Ingl *compliance*; järele andes või kuju muutmise abil ühilduma korrapäratu struktuuriga pindade või teiste objektidega.

[12] Elektrilise signaali toimel kuju muutev.



Joonis 1. Tehislihase valmistamine. a) Tehislihase toimemehhanism, kus kõrge-eripinnalisest süsinikust elektroodidega kihilisele elektroaktiivsele materjalile rakendatud elektripinge paigutab materjali ulatuses ümber ioone, põhjustades negatiivselt polariseeritud elektroodi suhtelise pikenemise positiivselt polariseeritud elektroodi suhtes, mis omakorda avaldub kogu laminaatmaterjali paindumises. b) Elektroodi pihustamine klaasriidega sarrustatud membraanile. c) Valmis tehislihas kullast voolukollektoritega. Fotod: Inna Baranova.

elektriinsenerioskustele üha ulatuslikumat keemia- ja materjaliteadusalast kompetentsi, tasandades varasemate lahusvaldkondade mõisteid ja leides uusi sünergilisi omadusi. Üheks valdkondadevahelise ja multidistsiplinaarse koostöö edulooks on mikropoorsete kõrge-eripinnaliste süsinikmaterjalide tuvastamine tehislihastele sobivate elektroodimaterjalidena. Tartu ülikooli keemia instituudis arendatavate energiasalvestite, elektrilise kaksikkihi kondensaatorite juures tuvastati süsinikmaterjalist elektroodide paisumine laadumisel ning otsiti praktilisi lahendusi vastavate ruumalaefektide minimeerimiseks. Kui energiasalvesti paisumine on reeglina ebasoovitav omadus, sest võib kaasa tuua hermeetiliselt kapseldatud seadmekomponendi purunemise, leidis paisumisfenomen efektse rakenduse tehislihase näol. Veelgi enam, pehme täiturmaterjal säilitas olulise osa oma energiasalvestusomadustest (Kaasik jt, 2017; Torop jt, 2011), võimaldades disainida multifunktsionaalseid seadmeid, kus liigutuse esilekutsumiseks materjali sisestatud elektrilaeng hiljem taas kokku korjatakse. Joonisel 1a on toodud kõrge-eripinnaliste süsinikelektroodidega tehislihase struktuur. Pidades keha küljes kantavaid tervise jälgimise seadmeid silmas tehislihaste perspektiivse rakendusena, on välja töötatud meetod tehislihase elektroaktiivsete komponentide kandmiseks tekstiilsarrusele (Kaasik jt, 2017); etapp tööprotsessist ning valmis tehislihas on kujutatud vastavalt joonisel 1b ja 1c.

LIHASROBOTID LOODUSLIKE LIIKUMISMEHHANISMIDE JÄLJENDAMISEL

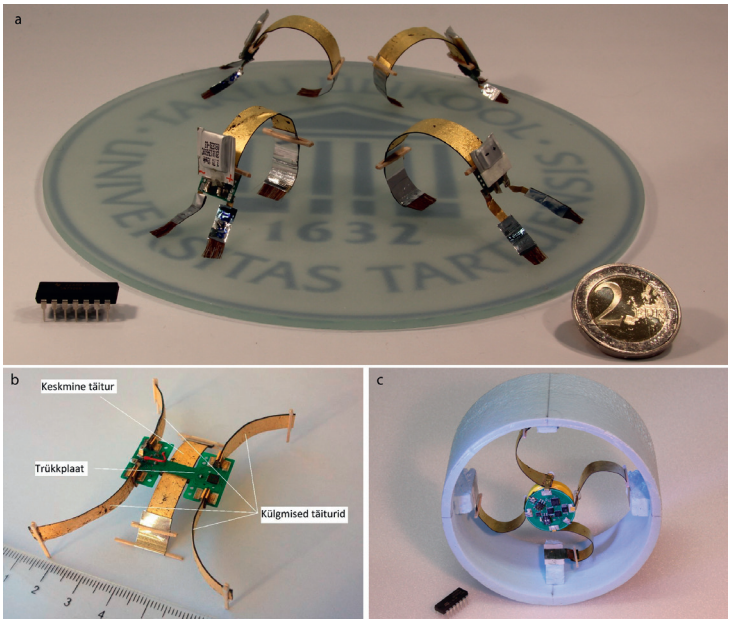
Kui harjumuspärased robootikatäiturid kannavad jõu robotile üle kas pöörleva võlli või sirgjooneliselt liikuva hoova kaudu, siis tehislihased muudavad omaenda kuju. Liikumine kujumuutuse abil loob perspektiivi kasutada tehislihaseid ühtlasi roboti

konstruktsioonielemendina, millest omakorda tuleneb, et ka kogu lihasrobot liigub või manipuleerib objektidega eelistatult omaenda kuju muutes. See eriline võimekus nõuab kontseptuaalselt uut lähenemist kogu roboti arhitektuurile – väljatöötatud, pöörd- ja lineaarliikumisega ajamite käitajana ei osutu tehislihased kuigi konkurentsivõimeliseks, seevastu on robootikutel pehmete täiturite abil võimalik disainida lahendusi, mis oleks väga kohmakad lahendatuna tuntud vahendite abil. Veelgi enam, tehislihaste kõrge jõudluski avaldub eelkõige vahetult roboti kuju muutes, mitte aga võlle ja hammasrattaid liikuma pannes. Seega ei asenda pehmerobootika lahendused „jäika" robootikat ega isegi konkureeri sellega vastava haardeala rakendustes, vaid avab täiesti uue akna uudsete võimalustega. Arusaadavalt seisab pehmerobootikateadlaste ees ülesanne esmalt luua ja seejärel lisada moodsa robootika tööriistakasti pehmetele täiturmaterjalidele eriomased meetodid kujumuutvate robotite disainimiseks, arvestades seejuures ühilduvust olemasolevate juhtelektroonika- ja toitelahendustega.

Sobivate disainilahenduste leidmisel tasub pehmerobootikutel taas pöörata pilgud looduse suunas – kui tehislihaste kontseptsioon kuju muutes liigutada juba on „laenatud" elusorganismidelt, osutub viljakaks järgmiseks sammuks just loodusest üle võtta ka liikumis- ja liigutusmehhanisme, mis on spetsiifilised just lihastele. Võrreldes traditsioonilise robootikaga, mis keskendub looduses peaaegu mitteesinevale pöördliikumisele, lähevad lihasrobootika arendajate silmad ruttu kirjuks looduses esinevatest loendamatutest efektsetest ja efektiivsetest liikumismehhanismidest. Konkreetse kujumuutuse taga olev kinemaatiline ahel on organismis sageli raskesti eristatav kõrge pakketiheduse tõttu. Ülesande lihtsustamiseks tuleb meenutada, et tehislihased ei kopeeri looduslikke lihaseid kaugeltki igas aspektis. Jätkusuutlik on elusorganismis identifitseerida ja piiritleda minimaalset alamsüsteemi, milles avalduvad eelnevalt tuvastatud biomehaanilised aspektid (näiteks roomates liikumine). Seejärel osutub võimalikuks tuvastatud funktsionaalsete süsteemide lahendamine tehisstruktuurides pehmete täiturite abil.

Tartu ülikooli tehnoloogiainstituudis on katsetatud mitmete tehislihaste abil liikuvate robotitega. Juba 2004. aastal konstrueeriti raikalast inspireeritud, vee keskkonnas ujuv robot (Punning jt, 2004), mida viisid edasi roboti perimeetri peale kinnitatud 16 tehislihase tekitatud lainetused. Selle roboti oluliseks strateegiliseks eeliseks oli suurepärane ühildumine veekeskkonnaga: kasutatud tehislihasetüüp mitte ainult ei olnud võimeline vette sukeldatuna töötama, vaid selle toimemehhanism hõlmas ümbritsevast keskkonnast pärineva vee pumpamist laminaatmaterjali ulatuses elektriväljast mõjutatud ioonide abil. Analoogse liikumismehhanismiga roboti lahendamine vette sukeldatud pöörlevate elektrimootorite abil osutuks suuremaks väljakutseks.

Ioonvedelike, toatemperatuuril vedelal kujul esinevate soolade kasutuselevõtt tehislihases



Joonis 2. Lihasrobotid. a) Neli vaksavast röövikust inspireeritud energiaautonoomset lihasrobotit, igaühe mass alla ühe grammi. (Foto: Indrek Must) b) Putukat imiteeriv, viie tehislihase abil kõndiv lihasrobot. (Teostus ja foto: Mart Weber). c) Rattakujuline lihasrobot, mis veereb tasakaalukeskme muutuse tagajärjel. Roboti rumm ja pöid on ühendatud nelja tehislihasest kodaraga, mille pikkuse varieerimisega saavutatakse rummu nihe pöia suhtes. (Teostus ja foto: Toomas Kaasik).

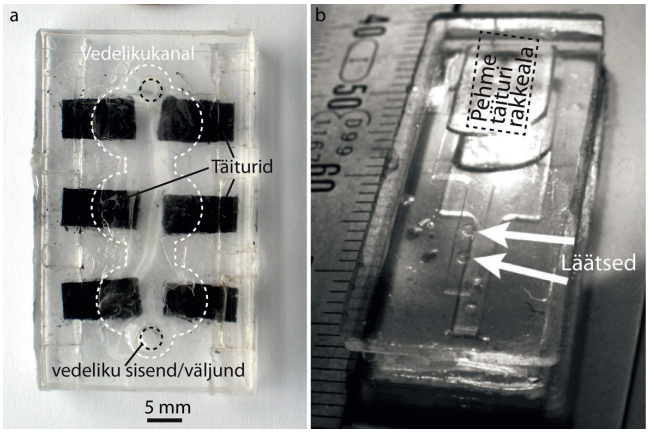
2010. aasta paiku avanes võimalus õhu keskkonnas liikuvate lihasrobotite disainimiseks. Ennekõike avalduvad kuivamaa-lihasrobotite juures eelised miniatuurses skaalas. Kuigi ka traditsioonilise robootika vahenditega on võimalik konstrueerida imeväikeseid mootoreid, hõlmab „jäik“ robot reeglina lisaks mehaanilisi jõuülekandestruktuure, nagu liigendeid ja hoobasid, suurendades paratamatult roboti mõõtmeid ning põhjustades miniatuurses skaalas arvestatavat energiakadu hõõrdumise tõttu liigendühendustes. Seevastu on ka pisim pehme täitur roboti struktuuri osana kohe funktsionaalne, vajamata ühtegi välist mehaanilist ülekannet ja sisaldamata ühtegi hõõrdele alluvat detaili. Väheoluline pole ka lihasroboti lihtne ehitus koostu väikese detailide arvu tõttu.

Lihasroboti energiaga varustamine on võtmetähtsusega mitmetes perspektiivsetes rakendustes, kus juhtme abil toiteenergia edastamine osutub võimatuks: näiteks looduskeskkonnas või katastroofipiirkonnas vaatlusülesannete täitmisel, aga ka kehasiseste meditsiiniliste robotite puhul. Tartu ülikooli tehnoloogiainstituudis 2014. aastal disainitud lihasrobot, mis imiteeris vaksavale[13] röövikule iseloomulikku liikumisviisi (joonis 2a), oli teadaolevalt esimene täielikult energiaautonoomne kuival maal liikuv lihasrobot maailmas – ta jaksas oma toiteallikat kaasas kanda (Must jt, 2015a). Kogu roboti mass, kaasa arvatud liitium-polümeeraku toiteallikana, jäi seejuures alla ühe grammi (võrdluseks – ülalmainitud raikalaroboti toiteallikana kasutati nelja autoakut), tõendades veelgi lihasrobotite eeliseid miniatuurses suurusskaalas. Ühe tehislihasega lahendatud vaksavale röövikule järgnes juba kuuejalgne, kõndivat putukat imiteeriv lihasrobot (joonis 2b). Kui nii vaksav kui kõndiv liikumisviis on otseselt laenatud loodusest, siis järgmine, veerev rattakujuline lihasrobot (Must jt, 2015b) (joonis 2c) ei tekita esmapilgul seost ühegi elusolendiga. Kuid siin tuleb bioinspireeritud lähenemist otsida mõnevõrra laiemalt pinnalt – nimelt veeres robot edasi oma tasakaalupunkti nihutamise abil, mis on oluline komponent paljude loomariigi esindajate kõnnakus.

[13] Liikumisviis, kus röövik sirutab keha esiosa liikumispinna kaugeima kättesaadava punkti poole, haarab sellest rindmikujalgadega ning seejärel tõmbab tagakeha järele.

TEEL UUTE BIOMEDITSIINILISTE RAKENDUSTE SUUNAS

Loomupäraselt hea inimkehaga ühildumine tänu nii kõrgele ohutusele töös kui pehmete eluskudedega võrreldavale jäikusele on pehmete lihasrobotite unikaalne omadus, pakkudes sobiva platvormi tervishoiu- ja meditsiiniseadmete disainimiseks. Esimeseks väga atraktiivseks suunaks on inimese tervisenäitajate jälgimine reaalajas keha küljes kantavate pehmete robotseadmetega. Selle arendussuuna esindajaks on Tartu ülikooli tehnoloogiainstituudis disainitud, rõhuanduritega varustatud sisetald kõnnakuhäirete tuvastamiseks reaalajas (Tamm jt, 2014). Järgmiste põlvkondade lihasrobotite esindajaid võib juba ette kujutada inimese välisskeletina, mis aitab kompenseerida kahjustunud või nõrgenenud kehalisi funktsioone. Veelgi aktuaalsem on nii implanteeritavate[14] abivahendite kui minimaalselt invasiivsete meditsiinitööriistade arendamine, kus hea ühildumine eluskudedega ja kõrge ohutusfaktor on määrava tähtsusega. Tartu ülikooli tehnoloogiainstituudis on see arendussuund olnud aktuaalne juba pikemat aega. Esimeste teostusnäidete hulgast võib tuua näiteks pehme pumba prototüübi ravimite kontrollitud manustamiseks või kehavedelike manipuleerimiseks *in vivo* (joonis 3a), samuti muutuva fookuskaugusega pehme läätse prototüübi (Vunder jt, 2011) (joonis 3b), mis on oluline samm silmaläätseimplantaadi arendamise suunas.



Joonis 3. Täispehmed seadmed biomeditsiinirakendustesse. a) Kuue pehme täituriga peristaltilise vedelikupumba prototüüp, mis pakub huvi *in vivo* ravimidosaatorina või muudes biomeditsiinirakendustes. (Teostus ja foto: Pille Rinne) b) Tehislihase juhitava täispehme, muutuva fookuskaugusega optilise läätse prototüüp. (Teostus ja foto: Veiko Vunder)

KOKKUVÕTTEKS

Pehmete lihasrobotite disainimisel on elusloodus ammendamatu ja rikas inspiratsiooniallikas. Nii pehmeroboti kontrollitud kujumuutus iseenesest kui ka kujumuutuse abil saavutatud liigutused ja liikumisviisid keskkonnas on efektiivsed eelkõige ülesannetes, mis langevad olulises osas kokku nende bioloogiliste eeskujudega. Võttes arvesse ka asjaolu, et ühe elusolendiga suhtlemisel on seni olnud ületamatu efektiivsusega teine elusolend, näiteks inimene, osutub bioinspireeritud lihasrobot eelissobivaks inimesega liidestatud rakendustes ning annab tugeva vihje pehmerobootika perspektiivile täita senine tühimik tehnoloogiakaardil.

Indrek Must asus 1. juunil 2018 ametisse pehmerobootika dotsendina.

[14] Meditsiiniseade, mis asendab, kompenseerib või täiendab keha bioloogilisi struktuure.

VIITED

Harjo, M., Kesküla, A., Leemets, K., Khorram, M. S., Saar, R., Järvekülg, M., Tamm, T., Kiefer, R. 2017. Polypyrrole coatings on gelatin fiber scaffolds: Material and electrochemical characterizations in organic and aqueous electrolyte. – Synthetic Metals, 232, 25–30.

Hines, L., Petersen, K., Lum, G. Z., Sitti, M. 2016. Soft actuators for small-scale robotics. – Advanced Materials, 29, 1603483.

Kaasik, F., Must, I., Baranova, I., Põldsalu, I., Lust, E., Johanson, U., Punning, A., Aabloo, A. 2017. Scalable fabrication of ionic and capacitive laminate actuators for soft robotics. – Sensors Actuators B: Chemical, 246, 154–163.

Kim, S., Laschi, C., Trimmer, B. 2013. Soft robotics: A bioinspired evolution in robotics. – Trends in Biotechnology, 31, 287–294.

Laschi, C., Mazzolai, B., Cianchetti, M. 2016. Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities. – Science Robotics, 1, eaar7650.

Lee, R.-J., Temmer, R., Tamm, T., Aabloo, A., Kiefer, R. 2013. Renewable antioxidant properties of suspensible chitosan–polypyrrole composites. – Reactive and Functional Polymers, 73, 1072–1077.

Mirvakili, S. M., Hunter, I. W. 2018. Artificial muscles: Mechanisms, applications, and challenges. – Advanced Materials, 30, 1704407.

Must, I., Kaasik, F., Poldsalu, I., Mihkels, L., Johanson, U., Punning, A., Aabloo, A. 2015a. Ionic and capacitive artificial muscle for biomimetic soft robotics. – Advanced Engineering Materials, 17, 84–94.

Must, I., Kaasik, T., Baranova, I., Johanson, U., Punning, A., Aabloo, A. 2015b. A power-autonomous self-rolling wheel using ionic and capacitive actuators. – Proceedings of SPIE, 94300Q.

Nevstrueva, D., Murashko, K., Vunder, V., Aabloo, A., Pihlajamäki, A., Mänttäri, M., Pyrhönen, J., Koiranen, T., Torop, J. 2018. Natural cellulose ionogels for soft artificial muscles. – Colloids and Surfaces B: Biointerface, 161, 244–251.

Polygerinos, P., Correll, N., Morin, S. A., Mosadegh, B., Onal, C. D., Petersen, K., Cianchetti, M., Tolley, M. T., Shepherd, R. F. 2017. Soft robotics: Review of fluid-driven intrinsically soft devices. Manufacturing, sensing, control, and applications in human-robot interaction. – Advanced Engineering Materials, 19, 1700016.

Punning, A., Anton, M., Kruusmaa, M., Aabloo, A., 2004. A biologically inspired ray-like underwater robot with electroactive polymer pectoral fins. – Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and robotics (MechRob2004), 2, 241–245.

Tamm, T., Pärlin, K., Tiimus, T., Leemets, K., Terasmaa, T., Must, I. 2014. Smart insole sensors for sports and rehabilitation. – Proceedings of SPIE, 9060, 90600L.

Torop, J., Palmre, V., Arulepp, M., Sugino, T., Asaka, K., Aabloo, A. 2011. Flexible supercapacitor-like actuator with carbide-derived carbon electrodes. – Carbon, 49, 3113–3119.

Vunder, V., Punning, A., Aabloo, A. 2011. Variable-focal lens using electroactive polymer actuator. – Proceedings of SPIE, 7977, 79771E.

Yang, G.-Z., Bellingham, J., Dupont, P. E., Fischer, P., Floridi, L., Full, R., Jacobstein, N., Kumar, V., McNutt, M., Merrifield, R., Nelson, B. J., Scassellati, B., Taddeo, M., Taylor, R., Veloso, M., Wang, Z. L., Wood, R. 2018. The grand challenges of Science Robotics. – Science Robotics, 3, eaar7650.

KÜTUSE PÕLETAMINE LÄMMASTIKUVABAS KESKKONNAS

Arvo Ots
Tallinna tehnikaülikooli emeriitprofessor

Kirjutise eesmärk on tutvustada laiemale lugejaskonnale kütuse põletustehnika suundumusi lähtuvalt uuest pidepunktist. Põletustehnika arengus on olnud eesmärgiks kütuse põlemise täiuslikkus ja vabaneva soojuse tõhus kasutus energiamuundusseadmetes, arvestades kehtivate keskkonnakaitseliste piirangutega. Kõigi kütuste põlemisel tekib kasvuhooneefekti andev ja atmosfääri temperatuuri mõjutav süsihappegaas. Häda on selles, et kütuse õhukeskkonnas põletamisel korstna kaudu atmosfääri paisatavas gaasis (põlemisgaas) moodustab süsihappegaas ainult 12–16 protsenti, mis teeb selle lahutamise ülejäänud komponentidest tehniliselt ülikeerukaks ja hinnalt kalliks. Siin peetakse silmas näiteks süsihappegaasi atmosfääri sattumise vältimiseks selle maa-alust ladustamist. Uute põletustehnikate arendamisel on lähtutud teisest teekonnast, põletades kütust õhu hapnikku kaasates selliselt, et põletusseadmest väljuv gaas oleks puhas süsihappegaas (tegelikult 85–90 protsenti).

PROBLEEMI OLEMUS

Maad ümbritseb gaasiline atmosfäär, mis koosneb lämmastikust (N_2, 78%), hapnikust (O_2, 21%) ja veel mitmetest muudest komponentidest (1%). Viimaste hulgas on inertgaasid (peamiselt argoon, ~0,9%) ja kliimat mõjutavad kasvuhoonegaasid. Kasvuhoonegaasid on veeaur (H_2O), süsihappegaas (CO_2), metaan (CH_4), dilämmastikoksiid (N_2O) ning osoon (O_3). Atmosfäär sisaldab erinevates kohtades erineval hulgal veeauru.

Kasvuhoonegaaside esile kutsutav nn kasvuhooneefekt on loodusnähtus, mis määrab atmosfääri ja maapinna temperatuuri ning on vajalik siinsele elustikule. Kasvuhoonegaaside efekti olemus seisneb järgnevas. Kiirgusenergia levib ruumis kindla energia hulgaga elektromagnetiliste lainetena. Kõik kehad, mille temperatuur on absoluutsest nulltemperatuurist kõrgemad, kiirgavad energiat. Keha temperatuur määrab lähetava kiirgusenergia sageduse spektri. Mida kõrgem temperatuur, seda suurem osatähtsus on lühilainelisel kiirgusel. Päikese, mille pinnatemperatuur on 5490 °C, kiirgus on lühilaineline (ultraviolett- ja nähtava kiirguse piirkond lainepikkusega < 3 μm). Maa temperatuur, mis on Päikese temperatuurist palju kordi madalam, kiirgab aga pikalainelist infrapunast kiirgust.

Atmosfääris sisalduvad kasvuhoonegaasid lasevad Päikeselt saabuva lühilainelise kiirguse läbi, kuid neelavad maapinnalt lähtuva pikalainelise kiirguse.

Kasvuhoonegaaside neelatav, maapinnalt lähtuv energia tõstab Maad ümbritseva atmosfääri temperatuuri ja koos sellega ka maapinna temperatuuri. Kasvuhooneefekt on seda mõjusam, mida suurem on kasvuhoonegaaside kontsentratsioon atmosfääris. Kasvuhoonegaaside nimetus tuleb sellest, et need toimivad nagu kasvuhoone klaasist ümbris, lastes läbi Päikeselt lähtuva kiirguse, kuid takistades energia tagasisuundumist maailmaruumi.

Kasvuhooneefekt on Maa kui elukeskkonna olemasolule väga tähtis. Kasvuhooneefekti puudumisel oleks Maa keskmine temperatuur −18 °C, praegu on Maa keskmine temperatuur +15 °C.

Kasvuhoonegaasid tekivad peamiselt looduses toimivate nähtuste kaudu, kuid nende kontsentratsiooni atmosfääris mõjutab ka inimtegevus. Veeauru on atmosfääris võrreldes teiste kasvuhoonegaasidega kõige rohkem ning selle panus Maa temperatuurirežiimile on suurim. Inimtegevus veeauru toimet ei mõjuta.

Seoses inimtegevusega peetakse tähtsaimaks kasvuhoonegaasiks süsihappegaasi. Selle aluseks loetakse süsihappegaasi kontsentratsiooni pidevat tõusu atmosfääris. Kui enne tööstusrevolutsiooni (1750. a) kõikus süsihappegaasi kontsentratsioon sadade tuhandete aastate jooksul kindlates piirides, asudes vahemikus 180–300 ppm (*parts per million* ehk kontsentratsioon miljondikes), siis sellele järgnenud aja jooksul on see näitaja tõusnud alates 280 ppm-ist praeguse tasemeni 400 ppm, moodustades õhu koostisest 0,04 protsenti. Inimtegevusest põhjustatud süsihappegaasi kontsentratsiooni kasv atmosfääris viib selle looduslikust tasakaalust välja ning mõjutab kiirguse kaudu atmosfääri keskmise temperatuuri pidevat kasvu.

Süsihappegaasi kontsentratsiooni järjekindlat kasvu atmosfääris seostatakse eriti fossiilkütuste (kivisüsi, põlevkivi, maagaas, vedelkütus) põletamisega elektrijaamades, tööstusettevõtetes, jm. Biokütuste põletamisel toimub süsihappegaasi ringlus: kasvustaadiumis fotosünteesi reaktsioonides seotav süsinik on pärit atmosfäärist, mis kütuse põlemisel suundub sinna tagasi.

Ollakse seisukohal, et kütuste põletamisest põhjustatud süsihappegaasi kontsentratsiooni juurdekasvu osa atmosfääris moodustab praegu 80–87 protsenti. Süsihappegaasi algallikaks on kütustes sisalduv süsinik (orgaaniline süsinik), mille ühinemine hapnikuga põlemisprotsessis toimub reaktsiooni kohaselt

$$C + O_2 \rightarrow CO_2.$$

Tuleb rõhutada veel järgmist. Mitmed kütused, sealhulgas põlevkivi, sisaldavad orgaanilise süsiniku kõrval ka mineraalset süsinikku. Viimane on seotud peamiselt kaltsiidi ($CaCO_3$), magnesiidi ($MgCO_3$) või dolomiidiga ($CaO{\cdot}MgO(CO_3)_2$). Need mineraalid kütuse põlemise käigus lagunevad, näiteks

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2,$$

andes samuti süsihappegaasi.

Mainitud mineraale suunatakse vajaduse korral lisaks kütusele ka koldesse (eriti keevkihtpõletustehnika puhul), eesmärgiga siduda kütuses sisalduvat väävlit, vältimaks põlemisel moodustuva vääveldioksiidi (SO_2) paiskumist atmosfääri. Vastava karbonaatmineraali poolt väävli sidumise käigus eraldub samuti süsihappegaas.

Kütuse põlemisprotsessis tekkiv süsihappegaas saab atmosfääri osaks, kasvatades pidevalt selle sisaldust õhus.

Siit kerkib küsimus: kuidas on võimalik pidurdada süsihappegaasi kontsentratsiooni kasvu atmosfääris ja leevendada selle kaudu õhu temperatuuri tõusu? Selleks on peamiselt kaks võimalust: vähendada fossiilkütuste tarbimist või kasutada põletustehnikaid, mis väldivad või leevendavad süsihappegaasi paiskumist atmosfääri. Energiatarbimise bilansist sõltuvalt ei ole lähitulevikus tõenäoline fossiilkütuste tarbimisest loobumine. Seetõttu on viimasel ajal suurt tähelepanu pööratud

komplekstehnika arendamisele, et võimaldada fossiilkütuse põlemisel moodustuva süsihappegaasi atmosfääri paiskumist ära hoida või seda vähendada. Mainitud komplekstehnika üheks osaks on süsihappegaasi viimine ja ladustamine näiteks maapõue. Kuid siin on üks oluline probleem. Eelnevalt mainisin, et kütuse põlemisel moodustuvat gaasilist keskkonda tuntakse põlemisgaasina või ka suitsugaasina (näiteks gaas, mis korstna kaudu väljub atmosfääri). Nimelt läheb kütuse põletamisel õhukeskkonnas (põlemiseks vajalik hapnik saadakse õhust) süsinikust tekkiv süsihappegaas suures koguses lämmastikku sisaldavasse põlemisgaasi. Põlemiseks kuluva hapniku arvel tekkiva süsihappegaasi tõttu hapniku hulk põlemisgaasis väheneb, kuid lämmastiku kogus säilib. Süsihappegaasi kontsentratsioon on kuivas (veeauru mitte sisaldavas) põlemisgaasis tavaliselt vahemikus 12–16 protsenti. Põlemisgaas sisaldab mõningal määral ka hapnikku (3–6 protsenti), kuna kütuse põlemine korraldatakse nii, et selleks vajalikku hapnikku oleks rohkem, kui seda on vaja kütuse komponentide täielikuks põlemiseks. Ülejäänud põlemisgaasi osa on lämmastik. Seega peab eesmärgiks olema kütuse hapnikuga reageerimisel võimalikult kõrge süsihappegaasi kontsentratsiooniga põlemisgaasi saamine.

Alljärgnevalt tutvume kahe võimaliku kütuse põletustehnikaga, eesmärgiga saada lämmastikuvaba põlemisgaasi. Nendeks on hapnik-kütus (ingl *oxy-fuel combustion*) ja kahe reaktori keemilise sidestusega põletustehnikad.

HAPNIK-KÜTUS PÕLETUSTEHNIKA

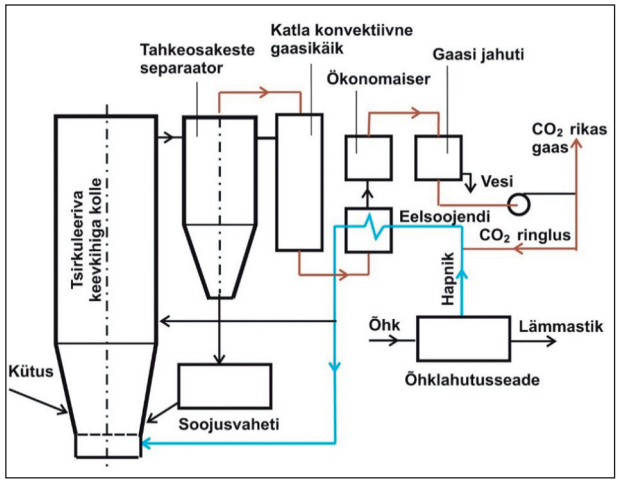
Hapnik-kütus põletustehnika on oma olemuselt kütuse põlemine ligilähedaselt puhta hapniku keskkonnas, erinevalt traditsioonilisest põletamisest suure lämmastikusisaldusega õhus. Sel juhul koosneb põlemisgaas peamiselt süsihappegaasist, veeaurust ja kütuse täielikul põlemisel kasutamata jäänud hapnikust. Sellises põlemisgaasis on süsihappegaasi enam kui 80 protsenti. Veeaur eraldub põlemisgaasist selle jahtumisel veena. Hapnik-kütus põletustehnika korral on vaja hapnikku puhtusastmega 95–99 protsenti.

Hapnik-kütus põletustehnikat on käsitletud teoreetilisel tasemel ning uuritud ka laboratoorsetel ja pilootseadmetel. Tööstusliku rakenduseni ei ole veel jõutud.

Joonisel 1 kujutatud skeem annab ülevaate hapnik-kütus tahkekütuse põletusprotsessist, kui põletamine toimub tsirkuleeriva keevkihiga katlas. Hapnik-kütus seade koosneb kahest põhikompleksist – hapniku eraldamise seadmest õhust (õhulahutist) ja kütuse põletusseadmest.

Üheks põhiküsimuseks hapnik-kütus põletustehnika puhul on puhta hapniku saamine. Selleks on sobivaim Linde gaaside lahutamise meetod, mis põhineb lämmastiku (−196 °C) ja hapniku (−183 °C) veeldustemperatuuride erinevusel. Mainitutest kõrgematel temperatuuridel ei ole võimalik gaase üksteisest lahutada. Seega on puhta hapniku saamine õhust seotud madala temperatuuri saamisega.

Linde protsess toimub järgmise põhimõtte kohaselt. Õhu rõhk tõstetakse kompressoris 0,5–0,8 MPa-ni.



Joonis 1. Hapnik-kütus protsessi lihtsustatud skeem.

Komprimeerimise käigus õhu temperatuur kasvab. Kompressorist väljuv õhk jahutatakse ja seejärel paisutatakse. Gaasi paisudes temperatuur alaneb. Olles saavutanud hapniku veeldumistemperatuuri, hapnik kondenseerub ja eraldub vedelikuna õhust, kuid kõrgema veeldumistemperatuuriga lämmastik jääb seejuures gaasilisse olekusse. Faasidevaheline lahutamine leiab aset separatsioonikolonnis, kus rõhk on atmosfäärirõhust veidi kõrgem. Hapnik on vedelikuna kolonni põhjas, lämmastik aga selle peal. Gaasi paisumine ja temperatuuri alanemine võib toimuda turbiinis. Gaasi paisumisel saadavat energiat kasutakse sagedamini turbiinis kompressori käitamiseks (kompressor ja turbiin on ühisel võllil). Madala temperatuuri saamiseks võib kasutada ka Joule'i-Thomsoni efektil töötavat seadet, mille kohaselt gaasi temperatuur langeb siirdumisel madalama rõhuga keskkonda kohaliku hüdrodünaamilise takistuse (drosselventiili) läbimisel.

Energiakulu õhu lahutamiseks on küllaltki suur, eelduslikult 10–15 protsenti energiaplokis genereeritavast elektrist.

Kütuse võimalik kõrgeim põlemistemperatuur sõltub hapniku kontsentratsioonist keskkonnas. Põlemisel puhtas hapnikus võib temperatuur ulatuda kuni 3500 °C-ni. Traditsiooniliste põletustehnikate puhul on kütuse põlemistemperatuuri soojusmahtuvuslikult alandavaks teguriks põlemisõhus sisalduv lämmastik. Kütuse põletamine puhtas hapnikukeskkonnas on tehniliselt raskesti realiseeritav kõrge temperatuuri ja põlemise väga intensiivse kulgemise tõttu.

Ratsionaalseks peetakse tahkekütuse keevkihtpõletustehnika rakendamist hapnik-kütuse protsessi puhul. Oluline on asjaolu, et keevkiht-põletustehnika puhul toimub kütuse põlemine suhteliselt madalal temperatuuril – 800–900 °C (tuntakse ka kütuse madalatemperatuurse põletamisena). Kütuse madalatemperatuursel põletamisel on näiteks üldtuntud kõrgtemperatuurse tolmpõletusega võrreldes mitmeid eeliseid. Selleks et hoida temperatuuri tsirkuleeriva keevkihiga koldes mainitud tasemel ja tagada soojusbilanss, peab hapniku kontsentratsioon koldesse suunduvas gaasis olema 30 protsendi ringis. Kuna puhtal hapnikul on küllalki kõrge hind (õhk ja selles sisalduv hapnik on küllaltki tasuta), tuleb põlemine korraldada selliselt, et protsessi täiuslikkuse seisukohalt hapniku kontsentratsioon seadmest väljuvas gaasis oleks minimaalne.

Kirjeldatud probleemi lahendamiseks segatakse õhu lahutist väljuv ja koldesse siirduv hapnik seadmest väljuva süsihappegaasiga, nagu on näidatud ka joonisel 1. Süsihappegaasi tagasisuunamist koldesse tuntakse süsihappegaasi retsirkulatsioonina.

Kaltsiumkarbonaati ($CaCO_3$) sisaldavate tahkekütuste (põlevkivi) põletamisel hapnik-kütuse protsessis $CaCO_3$ keevkiht-põletustehnika kasutamisel ei lagune ega eraldu täiendavat süsihappegaasi, vastavalt eespool toodud valemile. Põhjuseks on keevkihi temperatuurile vastav kõrge süsihappegaasi kontsentratsioon (rõhk) keskkonnas, mis termodünaamika seaduste kohaselt takistab $CaCO_3$ lagunemist. See vähendab omakorda süsihappegaasi kogust põlemisgaasis. Kuna $CaCO_3$ termiline lagunemine on soojust vajav reaktsioon, suurendab karbonaatmineraalide lagunematus mõningal määral kütuse põlemisel eralduvat soojushulka.

Mis puudutab hapnik-kütus põletustehnika seadme konstruktsioonilisi lahendusi, siis need on sarnased traditsiooniliste tahkekütuse põletusseadmega. Erinevad on küll alasüsteemide proportsioonid, kuid säilivad töötamise põhimõtted. Suurimat mõju hapnik-kütus põletustehnikale avaldab kõigepealt gaasi kulu vähenemine lämmastiku puudumisest põlemisgaasis, samuti gaasi soojus- ja kiirgusomaduste muutused.

Keevkihttehnika protsessi puhul viiakse osakeste kiht restil staatilisest seisakust dünaamilisse olekusse. Selline üleminek saab toimuda kihti läbiva gaasi kiirusel, mis ületab teatud minimaalse

väärtuse. Gaasi minimaalse kiiruse saavutamisel osakeste kaal võrdsustub kihi hüdrodünaamilise takistusega. Keevkihi tekitamiseks vajalikust gaasi kiirusest tunduvalt suuremal kiirusel hakkavad osakesed kanduma kihist välja. Selleks et kiht osakestest ei tühjeneks, püütakse need separaatoris (joonis 1) kinni ning suunatakse koldesse tagasi. Tahkeosakestest moodustub kinnine ringlus- ehk tsirkulatsioonikontuur. Sellest ka vastava põletustehnika nimetus.

Kolle ei ole mitte ainult seade, kus toimub kütuse põlemine ja soojuse eraldumine, vaid siin esineb samuti soojusvoogude siirdumine läbi soojusülekandepindade kuumutatavale kehale. Viimaseks on soojusjõuseadmes ringlev vesi ja aur. Tänapäeva aurujõuseadme üheks elemendiks on elektrigeneraatoriga ühendatud auruturbiin. Soojusülekandepinnad osakeste ringluskontuuris tsirkuleeriva keevkihiga koldes ei paikne mitte ainult koldes eneses, vaid ka separaatorijärgsetes soojusvahetites, nagu see on märgitud ka joonisel 1. Kahe nähtuse, milleks on kütuse põlemine ja soojuse eraldumine ühelt poolt ning soojuse siire läbi soojusülekandepindade teiselt poolt, koosmõju võimaldab keevkiht-põletustehnikal põletada stabiilselt kütust suhteliselt madalal temperatuuril (800–900 °C).

Tahkeosakeste separaatorist väljuva gaasi energiat kasutatakse samuti veele ja veeaurule siirdamiseks nii katla konvektiivses gaasikäigus asetsevate soojusülekandepindade kaudu kui ka ökonomaiseris. Joonisel on samuti näidatud koldesse suunduva, hapnikku sisaldava gaasi eelsoojendus põlemisgaasi energia arvel. Eelsoojendus on oluline kütuse põlemise stabiilsuse seisukohalt.

Gaas jahutatakse enne komprimeerimist maha, vähendamaks energiakulu komprimeerimisel. See võimaldab ühtlasi eraldada niiskuse.

KEEMILISE SIDESTUSEGA PÕLETUSTEHNIKA

Kui hapnik-kütus põletustehnika puhul on kütuse põlemisprotsessis osalev hapnik gaasilises olekus, siis keemilise sidestusega põletustehnika puhul on tegemist hapnikku siduva metallioksiidi osakestega. Kas puhas metall või hapniku puudujäägiga metallioksiid reageerib vastavas reaktoris (õhu reaktoris), kuhu suunatakse õhu voolus, õhu hapnikuga. Õhu reaktorist sellega ühenduses olevasse kütuse reaktorisse juhitav metallioksiidis sisalduv hapnik ühineb taandusreaktsiooni käigus sinna suunatava kütuses sisalduva süsiniku ja vesinikuga. Põlemissaadusteks on süsihappegaas ja veeaur. Veeaur on põlemisgaasist kergesti eraldatav kondenseerumisega. Süsihappegaas moodustub, vajamata selleks energiat hapniku eraldamiseks õhust. Puudub õhulahuti.

Kütuse põlemise seisukohalt on keemilise sidestusega protsess teatud määral sarnane hapnik-kütus protsessiga, kuna kütuse ühinemine hapnikuga toimub samuti lämmastikuvabas keskkonnas. Kokkuvõtlikult öeldes koosneb keemilise sidestusega kütuse põletusseade põhimõtteliselt kahest paralleelselt töötavast reaktorist, mille vahel tsirkuleerib tahkes olekus hapnikukandja.

Selles vallas on alanud ulatuslikud uurimistööd. Seejuures üheks uurimuste keskseks küsimuseks on erinevate metallide oksiidide moodustumine, nende termodünaamilised ja soojuslikud omadused ning reageerimisvõime kütuse komponentidega.

Esialgne tähelepanu oli peamiselt pööratud gaaskütuse kui hõlpsamini keemilise sidestusega seadmes põletatavale kütusele. Viimase 10–15 aasta jooksul on alustatud tahkekütuse põletamise uuringuid, peamiselt 50–100 kW võimsusega laboratoorsetel seadmetel. Suurema võimsusega pilootseadmeid pole. On ka töid suurevõimsuseliste keemiliselt sidestatud tahkekütuse keevkiht põletustehnikal põhinevatel võimalikel tehnilistel lahendustel.

Õhu reaktoris toimub kütuse reaktorist saabuva osaliselt oksüdeerunud metalli oksiidi Me_xO_{y-1} või ka puhta metalli ühinemine hapnikuga. Seda kajastab reaktsioon

$$Me_xO_{y-1} + O_2 \rightarrow Me_xO_y.$$

Õhu reaktorist väljuv gaas koosneb peamiselt lämmastikust, sisaldades samuti metalliga mittereageerinud hapnikku ning vähesel määral ka koos õhuga reaktorisse kanduvat veeauru.

Sobivaks temperatuuriks õhureaktoris on 950–1050 °C. Metalli oksüdeerumisprotsess on eksotermiline, eraldades suurel hulgal soojust. Eralduva soojuse eemaldamiseks ja sobiva temperatuuri saavutamiseks paigutatakse reaktorisse soojusülekandepinnad. Soojuskandjaks, sarnaselt hapnikkütus seadmega, võib olla soojusjõuseadmes ringlev vesi ja aur.

Tahke hapnikukandja ringleb õhu- ja kütusereaktorite vahel. Kütus kütusereaktoris oksüdeerub, mis on oma olemuselt soojust eraldav (eksotermiline) nähtus. Keemilisest seisukohast vaadatuna metallioksiid taandub, mis on aga soojust vajav (endotermiline) protsess. Kütuse oksüdeerumine ja metallioksiidi taandamine on soojusbilansi seisukohalt tasakaalus.

Tähistame lihtsustatult süsinikust ja vesinikust koosneva kütuse koostise C_nH_{2m}, siis metallioksiidi taandusreaktsioon ehk sellega ekvivalentne kütuse põlemisreaktsioon, milles süsinik täies ulatuses konverteerub süsihappegaasiks ja vesinik veeks, näeb välja selliselt

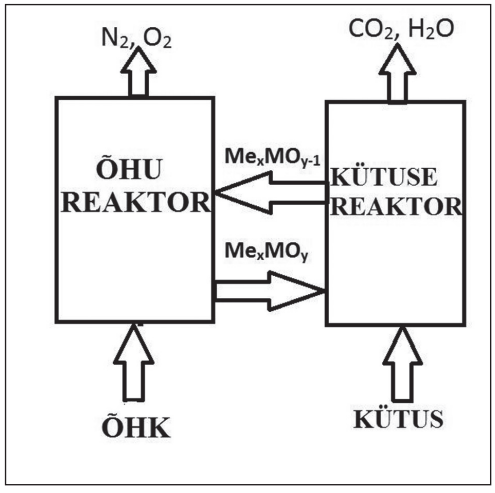
$$(2n + m)Me_xO_y + C_nH_{2m} \rightarrow$$
$$\rightarrow (2n + m)Me_xO_{y-1} + nCO_2 + mH_2O.$$

Siin Me_xO_y tähistab õhu reaktoris oksüdeerumisprotsessi vältel tekkinud metallioksiidi, mis oksüdeerumisprotsessi täiuslikkuse korral on hapnikuga küllastunud ühendiks. Kütuse põlemise käigus metallioksiid kaotab hapnikku, mida näitab väiksema hapnikusisaldusega ühend Me_xO_{y-1}, kui seda võrrelda kütuse reaktorisse saabuva oksiidiga Me_xO_y.

Kuna kütuse reaktoris on süsihappegaasi kontsentratsioon kõrge, ei lagune need põlevkivi tüüpi karbonaatmineraale sisaldavate kütuste põletamisel, vähendades niimoodi seadmest väljuvat süsihappegaasi kogust.

Kütuse reaktorist väljub süsihappegaas ja veeaur. Reaktorist väljuva gaasi jahtumisel aur kondenseerub ning järele jääb süsihappegaas.

Õhu reaktoris eralduv soojus on ekvivalentne kütuse kütteväärtusega, st sama, mis tavalises põletusseadmes, kuna kütuse reaktoris metallioksiidi taandusreaktsioonisoojus on võrdne kütuse hapnikuga ühinemisel eralduvaga (kütteväärtusega).



Joonis 2. Keemilise sidestusega reaktorite skeem.

Temperatuur kütuse reaktoris on madalam kui õhu reaktoris, jäädes vahemikku 850–950 °C. Kuna kütuse oksüdatsiooni ja metallioksiidi soojusbilanss on tasakaalus, on temperatuur kütuse reaktoris määratud sinna suunduva hapnikku kandvate osakeste temperatuuriga ning energia vajadusega reaktorisisesteks protsessideks, näiteks niiskuse aurustumiseks reaktorisse antavas kütuses.

Joonisel 2 on kokkuvõtlikult näidatud eespool kirjeldatud reaktsioonide realiseerimise skeem. Õhureaktorist väljub gaasina lämmastik ja hapnikukandjaga reageerimata hapnik. Kõrgetemperatuuriline tahkes olekus metallioksiid kui hapnikukandja juhitakse kütuse reaktorisse, milles sisalduv hapnik taandusreaktsioonides ühineb sinna suunatava kütuse orgaaniliste komponentidega, moodustub süsihappegaas ja veeaur. Hapnikku sisaldavad osakesed on samaaegselt ka soojuskandjaks kütuse reaktoris keemilisteks reaktsioonideks vajaliku temperatuuri tarvis. Pärast hapniku kaotust suunatakse osakesed tagasi õhu reaktorisse regenereerimiseks hapnikuga. Hapniku kandmiseks vajalikud osakesed moodustavad reaktoritevahelise tsirkulatsioonikontuuri, mille ülesandeks on hapniku siirdamine õhu reaktorist kütuse reaktorisse.

Keemilise sidestusega keevkiht-põletustehnika on lihtsamini realiseeritav gaaskütuse puhul, kus viimane on ühtlasi keevkihti tekitavaks gaasiks. Ka vedelkütus on mainitud seadmes suhteliselt lihtsalt põletatav. Kõige keerulisem lugu on aga tahke kütusega.

Vaatleme tahkekütuse põletamise probleeme keemiliselt sidestatud reaktorite puhul veidi lähemalt.

Kütuse osakesed reaktoris lagunevad kaheks komponendiks – gaasilises olekus lendaineks ja järele jäävaks tahkeks koksiks. Lendaine ja koksi hulga vahekord on erinevatele kütustele erinev. Põlevkivi on nn lendainerikas kütus, sisaldades seda põlevaines 85–90 protsenti. Lendaine ühineb vahetult hapnikukandja hapnikuga heterogeense reaktsioonina (üks osapool on gaasilises, teine aga tahkes olekus; tahkis-gaas). Koks kui tahke aine ei ole võimeline ühinema tahkes olekus hapnikukandjas sisalduva hapnikuga (tahkis-tahkis reaktsioon). Et see ühinemine siiski toimuks, on peamiselt kaks võimalust. Esiteks, koks gaasistatakse vaheetapina veeauru ja süsihappegaasi sisaldavas keskkonnas. Tekib süsinikmonooksiid (CO) ja vesinik (H_2). Põlevkomponendid reageerivad heterogeense reaktsioonina hapnikukandja hapnikuga (sarnaselt lendaine põlemisega). See protsess on aeglane, vajades pikka reaktsiooniaega.

Teiseks võimaluseks on, et kütuse reaktoris eraldub hapnikukandjast sinna jõudmisel osakestest gaasifaasis hapnik, mis ühineb tahkes olekus koksi osakestega (gaas-tahkis reaktsioon), andes süsiniku põlemisel süsihappegaasi. See reaktsioon on kiire ning määratud süsiniku põlemise tingimustega.

Gaasifaasis hapniku eraldumise võimalus tahke hapnikukandja osakestest sõltub ühelt poolt osakese koostisest ja teiselt poolt osakest ümbritseva keskkonna parameetritest. Lähtepunktiks on süsteemi termodünaamiline tasakaaluolek, millele vastavate parameetrite juures osakese hapnikuga reageerimise- ja taandamiskiirused on võrdsed. Sellisele olekule vastavaid parameetreid tuntakse termodünaamiliste tasakaaluparameetritena. Tasakaalust kõrvalekalle võib vaadeldavat reaktsiooni mõjutada kas ühes või teises suunas (oksüdeerumine või taandamine).

Üheks väga oluliseks termodünaamilist tasakaalu väljendavaks parameetriks on hapniku kontsentratsioon ehk osarõhk osakest ümbritsevas keskkonnas. Hapniku osarõhk on kütusereaktoris väiksem kui õhureaktoris. Järelikult peab eespool mainitud protsessi teostamiseks hapnikukandja vastama termodünaamilistelt sellistele omadustele, mis tagavad gaasilises olekus hapniku väljumise osakesest selle sattumisel kütusereaktorisse. Seetõttu on hapnikukandja liik ja koostis keemilise sidestusega tahkekütuse põletustehnikas eriti oluline. Ta peab rahuldama järgmisi tingimusi: suur hapnikukandevõime, suure aktiivsusega nii oksüdatsiooni- kui ka taandusreaktsioonides, peenendumise seisukohalt mehaaniliselt tugev, kõrge paakumistemperatuuriga osakestevahelise aglomeratsiooni vältimiseks, suur aktiivsuse kestus jt. Hapnikukandja valikul tuleb arvestada samuti põletatava kütuse omadustega.

Juhime tähelepanu ka sellele, et koksi osakeste ja gaasilises olekus hapniku ühinemisel peab hapnikku olema enam, kui seda on vaja kütuse täielikuks põlemiseks, st kütuse reaktorist väljuv põlemisgaas sisaldab ka mõningal määral hapnikku.

Hapnikukandaja sobilikkuse seisukohalt on enim uuritud nikli (Ni), raua (Fe), mangaani (Mn), koobalti (Co) ja vase (Cu) oksiide. Nikkel üldiselt ei sobi tahkele kütusele, kuna kaotab väävli toimel kiiresti aktiivsuse.

Hapniku gaasilises olekus eraldumise korral peab hapniku tasakaalurõhk, mis sõltub temperatuurist, olema küllalt kõrge. Tasakaalurõhk kasvab temperatuuri tõustes. See on oluliseks lähtekohaks protsessi temperatuuri valikul. Sobivateks hapnikku kandvateks metallideks tahkekütuse puhul loetakse vaske, mangaani ja koobaltit.

Sobilikemaks peetakse keevkihttehnikal töötavaid õhu- ja kütusereaktoreid. Seejuures on tsirkuleerival keevkihtkütusereaktoril märgatav eelis statsionaarse keevkihiga reaktori ees. Nimelt suundub kütuse reaktoris statsionaarse keevkihi korral kütusest eralduv lendaine kergelt kihipealsesse ruumi, kus kontakteerumine hapnikku kandvate osakestega on raskendatud. Tsirkuleeriva keevkihi korral on aga hapnikku kandvate osakestega täidetud kogu keevkihipealne ruum. Suurema vajaliku hapnikukandja ja hapniku vahelise kontaktaja saamiseks peab olema võimalikult suur osakeste tsirkulatsioonikordarv.

Kütusereaktori geomeetrilised mõõdud, võrreldes õhureaktori ja ka traditsioonilise keevkihtkolde mõõtmetega, kujunevad palju väiksemaks põlemisgaasi väikese mahu tõttu (puudub lämmastik, mis võtab enda alla suurema osa põlemisgaasi mahust). Soojusbilansi seisukohalt on kütusereaktor ligilähedane nn adiabaatsele koldele (kolle, milles puuduvad soojusülekandepinnad), kuna kütuse oksüdeerumise soojuse ja metalli osakeste taandumissoojuse algebraline summa võrdub nulliga.

Tehnilisest seisukohast on keemilise sidestusega tahkekütuse keevkiht-põletustehnika rakendamisel probleemiks tuhaärastus. Tuhk tuleb eemaldada keevkihtprotsessis. Koos tuhaga eraldub paratamatult ka hapnikukandjat ja põlemata (peamiselt süsinikku sisaldavaid) osakesi. Hapnikukandja on vaja tuhast ja põlemata kütuse osakestest eraldada. Tuleb vältida põlemata kütuse osakeste sattumist õhureaktorisse. Selle üheks võimaluseks on osaliselt põlenud kütuse osakeste hapnikuga reageerimine kahe reaktori vahelises täiendavas põletusseadmes.

Probleemiks on ka reaktorite vahel tsirkuleeriva hapnikukandja aktiivsuse ajaline langus ja osakesesiseste pooride sulgumine, mida kiirendab nende kokkupuude tuhaga. See loob vajaduse hapnikku kandvate osakeste pidevaks uuendamiseks.

SÜSIHAPPEGAASI LADUSTAMISEST

Selleks et kütuse põlemisel moodustuv süsihappegaas ei satuks atmosfääri, tuleb seda ladustada. Selleks on põhimõtteliselt kolm järgmist võimalust: maa alla, ookeani sügavustesse või keemiliselt siduda mineraalidega.

Süsihappegaasi maa alla geoloogilistesse struktuuridesse ladustamisel tuleb tagada eraldatus atmosfäärist teatud paksusega kihiga, mis takistaks ladustatava gaasi läbimist. Küllaldaseks loetakse süsihappegaasi ladustamissügavust vähemalt 800 meetrit. See kindlustab vajaliku paksusega läbimatu kivististe kihi, mille all on olemas poorne või vedel gaasi lahustav keskkond.

Lisaks maa-alustele struktuuridele sobivad süsihappegaasi ladustamiseks ka teatud tingimuste korral kivisöe- ja soolalademed.

Mainime, et ülekriitilises olekus süsihappegaasi ladustamise võimalus maa alla on kasutatav ka nafta- ja gaasimaardlates toodangu suurendamiseks.

Süsihappegaasi on võimalik ladustada ka ookeani sügavustesse. Siin tuleb arvestada järgmist. Ookeanivee pindmine kiht on küllastunud süsihappegaasist ning asub termodünaamilise tasakaalu seisundis, mida mõjutab süsihappegaasi kontsentratsioon atmosfääris. Kui kasvab süsihappegaasi hulk atmosfääris, suureneb selle kogus ka ookeani pindmises kihis. Süsihappegaasi suunamisel ookeani madalamatesse kihtidesse see küll lahustub seal, kuid süsteemi termodünaamilise tasakaalu tõttu siirdub aja jooksul atmosfääri. Olukord on teine, kui süsihappegaas juhtida ookeanis sügavamale kui 3 km – siis on see vedelas olekus ning võib säilida seal sellisena pikka aega.

Põhimõtteliselt võib leelismuldmetallide oksiide sisaldavaid looduslikke silikaatseid mineraale kasutada süsihappegaasi sidumiseks. Kokkupuutes süsihappegaasiga tekib karbonaatne ühend. Sellisteks enam levinud oksiidideks on eksotermse moodustumissoojusega kaltsiumoksiid (CaO) ja magneesiumoksiid (MgO). Suure aktiivsuse tõttu neid looduses ei esine. Tuleb märkide, et silikaatmineraalide karboniseerumine on väga aeglane ja raskelt realiseeritav.

EESTI TEADUSE NÄHTAMATUD HIIGLASED

Jaan Raik
Tallinna tehnikaülikooli arvutisüsteemide instituut

NÄHTAMATU HIIGLANE

Arvutid on mind lapsest peale paelunud. Kui olin 5. klassis, lugesin Giordano Repossi raamatut „Nähtamatud hiiglased“, mis räägib elektroonika ajaloost. Alustades Maxwelli elektromagnetismi ja Marconi raadiosaatjatega ja lõpetades tolle aja uusimate arvutitega. Mida raamatu autor ja tõenäoliselt ka enamik tema kaasaegsetest tol hetkel ei adunud, on võimalused, milleni arvutite areng mõne järgneva kümnendiga viib. Ilmselt ei ole kellelgi meist tänapäevalgi selget pilti, kuhu me tehnoloogia progressiga lähitulevikus välja võime jõuda. Isegi kõige suurematel visionääridel mitte. Kui inglise ulmekirjaniku Arthur C. Clarke'i käest küsiti, mida ta peab inimkonna kõige hämmastavamaks avastuseks, vastas ta: „Kiibid. Keegi meist ei osanud sellist arengut ette näha.“ Samas oli ta muu hulgas ennustanud geostatsionaarsete sidesatelliitide kasutuselevõttu palju enne kosmoseajastu algust.

Olles 1990ndate algul TTÜ esimestel kursustel, õpetati meile arvutite ajalugu. Saime teada, et esimene elektronarvuti oli 1946. aastal valminud ameeriklaste ENIAC. Alles hiljem kuulsin, et britid olid jänkidest ligi kolm aastat varem maha saanud elektronarvutiga Colossus. Paraku pidasid ametnikud vajalikuks projekti aastakümneteks salastada. Esimesed killud salaprojektist hakkasid lekkima 1970ndatel. Oma väljateenitud koha arvutiloos võitis Colossus alles pärast oma poolesajandat juubelisünnipäeva 1993. aastal ning praeguseks on selle arvuti tekkelugu tänu filmile „The Imitation Game“ juba laiemat tuntust leidnud.

Colossusega juhtunu võib tagasi vaadates tunduda jabur. Kuid üsna ilmselt poldud tol ajal teadlikud

Moore'i seaduse olemasolust. 1965. aastal avaldas hilisem Inteli kaasasutaja Gordon Moore artikli, milles püüdis ennustada arvutikiipide keerukuse kasvu tulevikus. Võttes arvesse ka hilisemad täpsustused, avastas Moore, et komponentide arv kiibis kahekordistub iga pooleteise aasta järel. Tähelepanek hakkas kandma Moore'i seaduse nime. Praegu, rohkem kui 50 aastat hiljem, kehtib see seadus endiselt.

Miks on Moore'i tähelepanek sedavõrd oluline? Kui me võtame 1965. aasta arvutikiibi, siis saame ennustada, et 1980. aasta kiibis peab olema 2 astmes N, kus $N = (1980 - 1965)/1{,}5 = 10$ ehk 1024 korda rohkem elemente ehk transistore. Nimetatud seaduse järgi oleks neid 2025. aastal juba triljon (!) korda rohkem kui oli 1965. aastal. Teisisõnu on kiipide keerukuse ja seega võimekuse kasv eksponentsiaalne. Areng toimub plahvatuslikult, aina kiirenevas tempos. See tehnoloogiline plahvatus on lühikese ajaga viinud inimkonna täiesti uuele

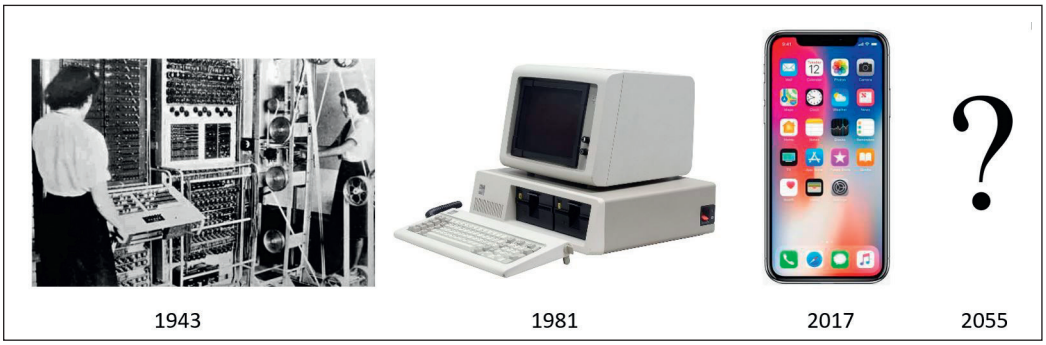


Foto 1. Arvutustehnika areng: esimene elektronarvuti, esimene personaalarvuti ja moodne nutitelefon.

arengutasemele ning võimaldanud interneti, mobiilside ja muud moodsad hüved, mis tänapäeval tunduvad enesestmõistetavana.

Fotol 1 on kujutatud 1943. aastal valminud esimene elektronarvuti Colossus, 1981. aastal loodud personaalarvuti IBM PC 5150 ja 2017. aastal välja lastud nutitelefon Apple X. Need kolm tehnikasaavutust mahuvad keskmise inimese eluea sisse! Võime vaid oletada, milline saab olema järgmine verstapost näiteks 2055. aastal...

Giordano Repossi pidas oma raamatu pealkirja valikul silmas asjaolu, et elekter on silmale nähtamatu. Kuid on veel põhjuseid, miks nimetada tänapäeva arvutikiipe nähtamatuteks hiiglasteks. Esiteks on need tõepoolest muutunud nähtamatuks. Valguse lainepikkus jääb vahemikku 400–700 nm. Parimad liitmikroskoobid on võimelised eristama detaile 200 nm täpsusega. Kiibitehnoloogia aga on jõudnud suurusteni, mis on peenemad kui 10 nm... Vaatamata miniatuursetele mõõtmetele on tänapäeva kiibid aga tõelised hiiglased. Ühe kiibi tillukesel pinnal võib olla kümneid miljardeid elektroonilisi lüliteid ehk transistore. Seda on rohkem kui inimesi sellel planeedil.

Selles loos tahaksin lugejat valgustada, millega tegeleb tänapäeva kiibiteadus ning kuidas Eesti teadlased kiipide arengule on kaasa aidanud ja kuidas nad seda endiselt teevad. Ma keskendun peamiselt enda ja teiste akadeemik Raimund Ubari käe alt välja kasvanud teadlastele ja nende teadussaavutustele.

PLD LABORI LUGU: KRÜPTOKIIP PLD001

1990. aastal astusin Tallinna tehnikaülikooli automaatika erialale. Mu hea sõber, praegune kolleeg TTÜ füüsika osakonnast Veljo Sinivee andis mulle kasutada omaehitatud Sinclair ZX Spectrum arvuti, millele sai helikassetilt mänge lugeda. Ta õpetas mulle ka BASIC keele põhjal programmeerimise aluseid. Ostsime tollal vennaga kioskist soomekeelse ajakirja Mikrobitti ja Prosessori numbreid, et uusi BASICu nippe õppida ja neid Spectrumil järele proovida. Samuti lugesime huviga uudiseid räniorust: uutest protsessoritest ja arvutitest. Kõik see tundus tohutult põnev. Samas tundus 1990ndate Eesti muu maailmaga võrreldes mahajäänud ja oli raske uskuda, et siin oleks võimalik tipptehnoloogia vallas sõna sekka öelda.

Seda suurem oli mu üllatus, kui 1993. aasta märtsis 3. kursuse tudengina akadeemik Ubari PLD labori uksest sisse astudes nägin insener Jüri Põldret ja toonast Ubari magistranti Ahto Buldast uue SUN tööjaama taga kiibikribu uurimas. Olin tol ajal just alustanud Ubari jaoks kursuseprojektina testiprogrammide realiseerimisega. Täiesti uskumatu oli, et TTÜs oli olemas kogu professionaalne

tarkvara kiipide projekteerimiseks. Sisuliselt oli tarvis kirjeldada kiip spetsiaalses riistvara kirjeldamise keeles ja seejärel nupule vajutada, mille järel tekkis ekraanile kiibi struktuur. See näis tõelise imena. Ja akadeemik Ubari hinnangul oli seda „imet“ TTÜ PLD laboris 50 miljoni Eesti krooni ulatuses. See tähendab, et nii palju oleks maksma läinud kogu selle tarkvara kommertslitsents. Õnneks oli TTÜ Ubari initsiatiivil liitunud organisatsiooniga Eurochip (praegune Europractice), mis võimaldas oma akadeemilistele liikmetele juurdepääsu tarkvarale üsna taskukohase hinnaga.

Edaspidine oli PLD labori tudengite jaoks ainult „ole mees ja õpi!“. Kõik võimalused olid valla ja seda siinsamas Mustamäe mändide all, TTÜ üliõpilaslinnakus. Akadeemik Ubaril oli käsil Euroopa Liidu TEMPUS projekt, mis võimaldas teadlaste ja tudengite vahetust TTÜ ja Lääne-Euroopa suurte mikroelektroonikakeskuste Grenoble'i ja Darmstadti vahel. 1994. aasta veebruaris lähetati mind projekti raames Darmstadti ja Euroopa mikroelektroonika Mekasse Grenoble'isse TIMA laboratooriumisse. Darmstadtis läbisin TTÜ tudengite grupiga, millesse kuulus ka praegune akadeemik Maarja Kruusmaa, *hands-on* kursuse mikroprotsessori projekteerimiseks. TIMAt külastasin ka 1995. aasta juulis-augustis. Seal oli mul au viibida koos Jüri Põldrega ja jälgida kõrvalt tema ponnistusi oma krüptokiibi PLD001 arendamisel. Kiip valmis 1997. aasta veebruaris ja see toodeti TTÜ küberneetika instituudi kuludega. Eesti esimene nähtamatu hiiglane oli sündinud!

ÜHEKSA KORDA MÕÕDA, ÜKS KORD LÕIKA

Kiibiteaduse peavool tegeleb teemaga, kuidas projekteerida kiiremaid, keerukamaid ja säästlikumaid kiipe. Teadlased TTÜs leidsid aga endale niši kiipide usaldusväärsuses. Esiteks on sellel ajaloolised põhjused. Akadeemik Ubar oli juba sel ajal aktiivne diagnostika vallas. 1991. aastaks oli tal

Foto 2. Jüri Põldre krüptokiip PLD001 väljatrükiga.

välja kujunenud väga lai kontaktide võrgustik Nõukogude diagnostikalaboritega. Hiljem suutis ta kiiresti ja edukalt ümber orienteeruda Lääne kiipide testimise ja diagnostika kogukonda. Teiseks põhjuseks on asjaolu, et just kiipide usaldusväärsuses on peamised väljakutsed ning see teema on aasta-aastalt muutunud ajakohasemaks. Seega aeg on näidanud, et eespool kirjeldatud spetsialiseerumine on end ära tasunud.

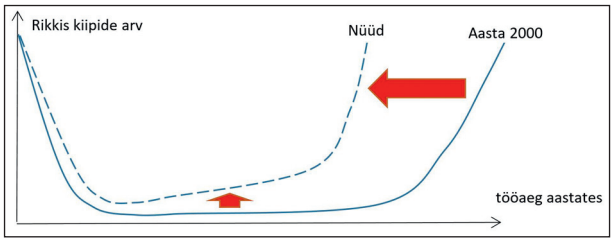
2000. aastate esimese kümnendi keskpaigani tegeles labor peamiselt tootmisdefektide testi ja diagnostika probleemidega. Hiljem laienes temaatika verifitseerimise ja tõrkekindlusega, viimasel ajal aga ka arvutiriistvara turbe küsimustega. Põhjuseks on siin hiljuti esile kerkinud turvaprobleemid, mis on seotud kiipidega. Näiteks Infineoni kiibi probleemid Eesti ID-kaardis, 2018. aasta algul avastatud protsessorite turvaaugud Meltdown ja Spectre, AMD protsessorites avastatud tagauksed.

Eestis praeguse seisuga kiipide turvalisuse kompetentsi pole.

Miks on kiipide usaldusväärsusest saanud sedavõrd suur väljakutse? Ühest küljest seetõttu, et tegu on nähtamatu hiiglasega. Kiip on hiiglane, ja Moore'i seaduse järgi aina keerukam hiiglane. Mida rohkematest komponentidest kiip koosneb ja mida laiem on selle funktsionaalsus, seda raskem on kindlaks teha, kas kiip käitub alati ja igas olukorras korrektselt. Tänapäeval moodustab kiibi õigsuse kontroll ehk verifitseerimine umbes 70 protsenti kiibi väljatöötamise kuludest. Ühe kiibiprojekteerija kohta läheb tarvis tavaliselt kaks kuni neli verifitseerimisinseneri.

Teiseks on kiibid muutunud aina miniatuursemaks ning on seetõttu üha tundlikumad erinevatele välismõjudele. Joonisel 1 on kujutatud nn vanni kõver. Kõver iseloomustab kiipide rikkiminemise tõenäosust ajas, alates nende tootmisest tehases. Traditsioonilist olukorda iseloomustab pidev joon. Vahetult pärast tootmist on teatud osa kiipe defektsed ja lähevad kiiresti rivist välja. Need defektsed kiibid praagitakse pärast koormustestimist välja. Algab kiibi stabiilne eluiga, kus vaid üksikud juhuslikud kiibid üles ütlevad. Pärast aastaid kestnud tööd hakkab materjal degradeeruma ning kasvama tõenäosus kiibi läbipõlemiseks.

Paraku on uuemates, miniatuursemates tehnoloogiates hakanud „vanni kõver" nihkuma punaste nooltega tähistatud suunas. See tähendab, et uutel kiipidel ei ole enam varasemaga sarnast stabiilset eluetappi, rikete tõenäosus on kogu kasutusaja jooksul varasemast suurem ning varasema paarikümne aasta asemel võib uuemate kiipide oodatav eluiga jääda vaid kahe-kolme aasta juurde. On mitmeid rakendusi, kus selline olukord pole aktsepteeritav.



Joonis 1. „Vanni kõver" (ingl *bathtub curve*).

Seega on kiipide vananemine nanoelektroonika valdkonnas üha tõsisem probleem. Nimetatud probleemiga on aktiivselt tegelenud TTÜ teadlane Maksim Jenihhin, kes töötas välja meetodi kiipide „noorendamiseks". Selle uurimistöö eest omistati dr Jenihhinile 2017. aastal vabariigi presidendi kultuurirahastu noore IT-teadlase preemia.

KAKSKÜMMEND AASTAT HILJEM

Veel üks oluline uurimisteema, millega TTÜ arvutisüsteemide instituudi teadlased tegelevad, on mitmetuumalised süsteemid. Alates 2000. aastate algusest pole füüsikaliste piiride (võimsustarve, temperatuur) tõttu olnud enam võimalik protsessorite töösagedust tõsta. Seega oli ainus viis Moore'i seadusega jätkata mitme protsessori ehk tuuma kasutamine samal kiibil. Seetõttu on meil tänapäeval müügil olevates arvutites ja nutitelefonides aasta-aastalt üha rohkem tuumasid.

Juba lähitulevikus tulevad kasutusele kiibid, millel on tuhandeid tuumasid. Paljutuumalised kiibid mõjutavad muu hulgas ka viisi, kuidas tulevikus arvutite jaoks programme kirjutatakse. Samuti annavad need uue võimaluse üha kasvava rikete hulgaga toimetulemiseks. Paljutuumalistes süsteemides tõrkekindluse saavutamiseks piisab rikkis tuuma isoleerimisest ja programmi laadimisest teistele, töökorras tuumadele.

Tuumadevaheline suhtlus toimub läbi kiibile ehitatud arvutivõrgu ehk kiipvõrgu (ingl *network-on-chip*). Kiipvõrk toimib üsna sarnaselt tavalise arvutivõrguga: tuumad vahetavad andmepakette, mida edastavad võrguruuterid. 2015. aastal alustas grupp TTÜ doktorante ja magistrante ühe sellise tõrkekindla kiipvõrgu ruuteri projekteerimisega. Projekti nimeks sai Bonfire ja selle eestvedaja oli

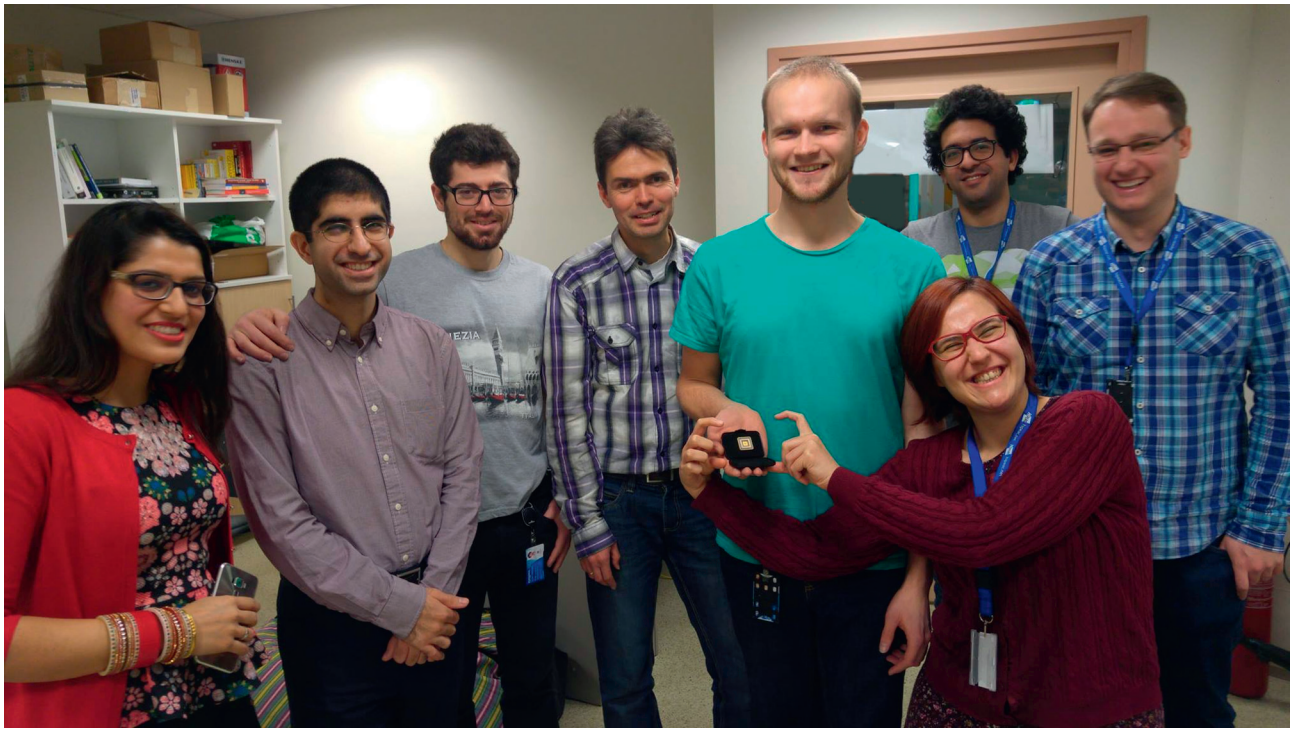


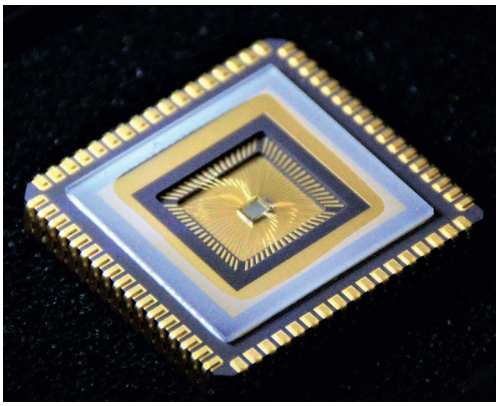
Foto 3. Bonfire kiibi projekteerijad. Vasakult Apneet Kaur Sandhu, Behrad Niazmand, Tsotne Putkaradze, artikli autor, Hardi Selg, Siavoosh Payandeh Azad ja Karl Janson. Esiplaanil TTÜ majandustudeng Gülçin Yıldırım. Foto: Gert Jervan.

doktorant Siavoosh Payandeh Azad. Uudsus seisnes senisest tõhusamate rikketuvastusmehhanismide kasutamises. Bonfire projekteerimise raames valmis neli magistritööd.

2016. aastal taotlesin organisatsioonilt Europractice raha Bonfire ruuteri põhjal kiibi tootmiseks. Välja oli kuulutatud konkurss, mille raames Europractice finantseeris kümne Euroopa ülikooli kiibiprojekte. Sõelale jäi ka TTÜ uurimisgrupp. Bonfire kiibi tootis 2016. aasta detsembris Fraunhoferi Erlangeni instituut Saksamaal, kasutades 180 nm tehnoloogiat ning selle pindalaks oli 2,5 mm^2. Seega 20 aastat hiljem kui Jüri Põldre ja Ahto Buldase loodud krüptoprotsessor. Kiipide tehnoloogia miniaturiseerimine oli aga viimasel kahel aastakümnel peadpööritava kiirusega edasi liikunud. Tollal kasutusel olnud tehnoloogia oli praegusega võrreldes 30–40 korda kohmakam. Hetkel on samal uurimisgrupil käsil juba uued 65 nm ja 40 nm kiibiprojektid.

EESTLASED EUROOPA KIIBITEADUSE VEDURINA

Vaevalt et Eestis on veel teadusgruppe, kes osalesid Euroopa Liidu teadusprojektides juba kolmandast raamprogrammist alates. Kuid akadeemik Ubar kutsuti ESPRIT europrojekti ATSEC konsortsiumisse aastail 1993–1995. Tol ajal ei olnud Eestil võimalust osaleda täisõigusliku partnerina ning seega kaasati Ubar allhankijana. Ka minul oli au sellesse üritusse oma tagasihoidlik panus anda skeemiliidese programmi realiseerimise ja



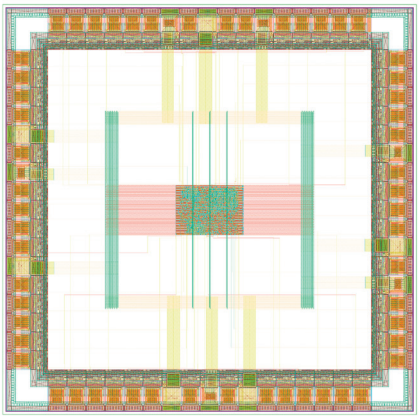


Foto 4. 2016. aastal TTÜ toodetud Bonfire kiip.

lõpparuande küljendamise näol. Projektile ATSEC järgnenud kümmekonna aasta vältel osales Ubari teadusgrupp veel mitmes europrojektis, mis polnud küll otseselt uurimisprojektid, vaid teadusvõrgustikud. Alles 2006. aastal saime järgmise Euroopa teadusprojekti VERTIGO, mis tegeles kiipide verifitseerimise temaatikaga ja millel olin TTÜ-poolne juht.

2009. aastal toimus aga tõeline arenguhüpe. Enam ei oodanud meie kiibiteadlased, et meid projekti kampa võetakse, vaid hakkasime ise projekte koordineerima. Mida aga kujutab endast ühe IKT valdkonna europrojekti edukas koordineerimine? Esiteks tuleb koordinaatoril välja pakkuda uudne teaduslik kontseptsioon ja koondada selle ümber Euroopa juhtivatest firmadest ja ülikoolidest koosnev meeskond ehk konsortsium. Seejärel tuleb koostada kuni 70 lk pikkune taotlus ja sellega kandideerida nn projektikutsel, kus konkureeritakse oma valdkonna paremikuga. Projektide edukusprotsent on samas ääretult madal. IKT valdkonna teadusprojektides jääb see viie protsendi kanti.

Uurimisgrupi esimene pääsuke oli praeguse TTÜ IT-teaduskonna dekaani Gert Jervani koordineeritud REGPOT projekt CREDES (2009–2012). Kõige säravamaks saavutuseks minu enda jaoks oli uurimisprojekti DIAMOND edukas koordineerimine aastail 2010–2012. Partnerite hulgas olid muu hulgas suurfirmad Ericsson ja IBM, Eesti oma tehnoloogiafirma Testonica Lab OÜ ja Euroopa juhtivad ülikoolid. Projekti idee oli väga ambitsioonikas: töötada välja algoritme, mis oleks võimelised vead ja rikked kiipides automaatselt parandama. Kuna DIAMONDi kohtumistel viskasid partnerid tihti nalja Eesti külma kliima üle, sai projekti lõppretsensiooni raames konsortsium Harku järvele jääpüügile viidud.

DIAMONDile järgnes dr Artur Jutmani koordineeritud 7. raamprogrammi uurimisprojekt BASTION (2014–2017) ning esimene Eesti koordineeritud Horisont 2020 IKT uurimisprojekt IMMORTAL (2015–2018, koordinaatoriks kirjutise autor). Hetkel jätkuvad veel minu koordineeritav Twinning-programmi projekt TUTORIAL ja dr Maksim Jenihhini koordineeritav Marie Skłodowska-Curie ITN projekt RESCUE. Kokkuvõttes võib tõdeda, et praeguseks on TTÜ kiibiteadlased asunud selgelt dikteerima teadusteemasid, mida üleeuroopalistes konsortsiumites käsitletakse.

Foto 5. Euroopa Liidu 7. raamprogrammi uurimisprojekti DIAMOND konsortsium jääpüügil Harku järvel.

KIIBITEADUSE KASUST MEIE RIIGILE

Kiibid on küll ülimalt keerukad seadmed ja vaieldamatult tipptehnoloogia, kuid milleks on siiski Eestile kiibiteadust tarvis? Eestis pole ju ühtegi kiibitehast. Isegi mujal maailmas on kiipe tootvaid ettevõtteid aina vähem. Selleks et kiibi tootmine end majanduslikult ära tasuks, tuleks neid müüa vähemalt pool miljonit eksemplari aastas.

Esiteks ei tegele kiibiteadlased ainult ja peamiselt uute kiipide väljatöötamisega. Suurem osa väiksema tiraažiga arvutisüsteemidest põhineb programmeeritavatel loogikamaatriksitel (ingl *Field-Programmable Gate Array* ehk FPGA) ning laiatarbeprotsessoritel ja -komponentidel. Seega on objektideks nii uued, tulevikukiibid kui ka süsteemide realisatsioonid olemasolevatel FPGAdel ja/või kommertskiipidel.

Teiseks jääb kiibiteadus endiselt nii Eesti kui ka Euroopa jaoks strateegiliselt oluliseks valdkonnaks. Kriitiline infrastruktuur, riigikaitse ja küberturvalisus on tihedalt seotud arvutisüsteemidega. Kogu selle valdkonna haldamise usaldamine riigist välja oleks tõsine turvarisk.

Ka tarkvarateaduse viljelemine oleks tõsiste piirangutega juhul, kui puudub arusaam tuleviku arvutisüsteemidest ja trendidest. Ehk teisisõnu, ilma riistvarateaduse teaduskompetentsita ei saa meil olla ka laiapõhjalist tarkvarateadust.

Teadlaste roll ei peaks olema ettevõtetele tellimustöö tegemine. Teaduse tõeline kasu majandusele seisneb rahvusvahelise tasemega tippspetsialistide kasvatamises, kes looksid suurt lisaväärtust tootvaid iduettevõtteid ja seega uusi töökohti. Arvutisüsteemide projekteerimise valdkonna firmad põhinevad kõrgtehnoloogilisel kompetentsil ja kuuluvad just sedasorti ettevõtete hulka.

QUO VADIS, EESTI?

Arvan, et Eesti kiibiteaduse lugu on olnud tõeline edulugu. Akadeemik Ubaril õnnestus raskuste kiuste koondada enda ümber kriitiline mass noortest teadlastest, kes moodustavad praegu TTÜ usaldusväärsete arvutisüsteemide uurimisgrupi tuumiku. Kindlasti on tegu Lääne-Euroopa mõistes arvutite riistvara valdkonna väga tugeva ja tunnustatud keskusega, millega endisest Ida- ja

Kesk-Euroopast suudavad konkureerida vaid mõned Poola laborid.

Paraku on Eestis teaduse finantseerimisega olukord nii nagu on. Kui enne 2012. aasta teaduse rahastamise reformi liikusid asjad paremuse suunas, siis pärast muutusi on riigi poolt teadusele eraldatav raha kindlalt ja pidevalt vähenenud. Nüüdseks oleme jõudnud olukorda, kus sisuliselt pole meie riigis enam võimalik konkurentsivõimelist teadust elus hoida. Kui olukord samas vaimus jätkub, jõuame punkti, kust tagasiteed enam pole. Ka suur rahalaev ei tooks enam tagasi kaotatud koolkonda, ehkki tugevate teadlaste ostmine väljastpoolt oleks endiselt võimalik. Samas, mets ei ole ju pelgalt üksikute puude kogum!

Kokkuvõttes on kurb tõdeda, et kindlasti ei ole Eesti hetkel teel teadmistepõhise majanduse ega arenenud maailma suunas. Kuid usun ja loodan, et rahvuslikul tippteadusel ei lasta siiski päriselt hääbuda ja Eesti teaduse senine edulugu saab tulevikus väärika jätku.

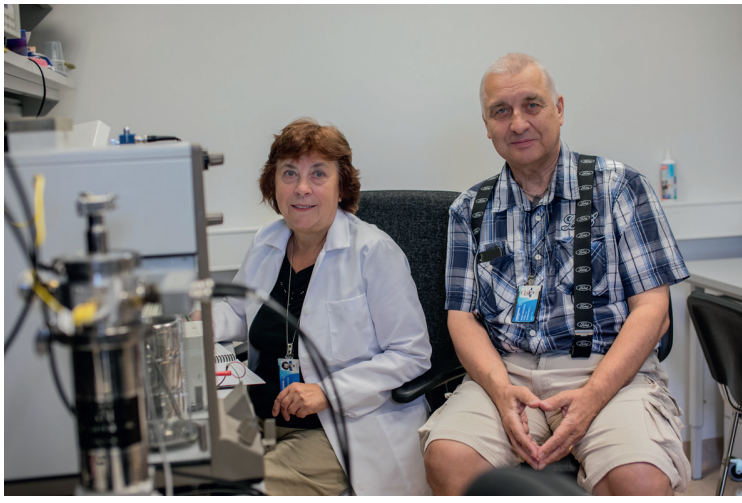
LAIA KEELUTSOONIGA POOLJUHTMATERJALIDEL PÕHINEVAD POOLJUHTSEADISED

Toomas Rang, Galina Rang
Tallinna tehnikaülikooli Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut

SISSEJUHATUS

2007. aastal kirjutasime sarnasel teemal kokkuvõtte senitehtust (Rang, Rang, 2007). Seekordne kirjatükk on eelnenu otsene järg ning katab uurimistöö olulisemaid tulemusi aastatel 2007–2017. Eelnimetatud artiklis käsitlesime põhiliselt SiC-l põhinevate jõustruktuuride loomisega seotud probleeme, kus materjalide kvaliteet määras olulisel määral valmisseadiste väljatulekut. Praeguseks on enamiku laia keelutsooniga materjalide, k.a SiC, plaatide valmistamistehnoloogiad arenenud sellisele tasemele, et puudused materjalide kvaliteedis (kahemõõtmelised ehk 2D-defektid ja kolmemõõtmelised ehk 3D-defektid, pinnaolekute määramatused jmt) ei ole enam määrava tähtsusega nendest materjalidest valmistatud seadiste kvaliteedile ja ka saagisele (*yield*). Tehnoloogia areng on viinud ka lähtematerjalide kvaliteedi sellisele tasemele, et me suudame kõneleda laia keelutsooniga materjalidest valmistatavatest polütüüpsetest heterosiiretest, grafeen-multiskalaarsetest pindadest või kohtfokuseeritud radiatsioonkiiritusega disainitud ultravioletse valguse detektoritest. Olulise uurimistegevusena kõigi eelnimetatud lahenduste tarbeks on kujunenud sügavate energeetiliste nivoode uurimine, mis on tuntud ka sügavate nivoode spektroskoopia (*Deep Level Transient Spectroscopy*, DLTS) nime all.

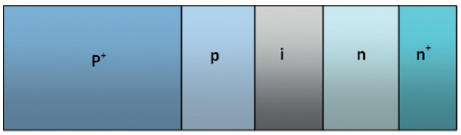
Seekordses kirjutises käsitleme DLTSi tulemusi ja tutvustame viimaseid saavutusi, mida oleme Tallinna tehnikaülikooli Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituudis saavutanud polütüüpsete heterosiirete ning multiskalaarsete pindnähtuste



alal. Artikkel põhineb avaldatud publikatsioonidel (Korolkov jt, 2016, 2017; Rashid jt, 2017; Toompuu jt, 2016; Ivanov jt, 2011; Koel jt, 2011) ning nendes kasutatud viidetel.

SÜGAVAD ENERGEETILISED NIVOOD

Pooljuhtstruktuuride valmistamisel toimub nii lisandite sisseviimisel, epitaksiaalkihtide kasvatamisel ja isegi metalliseerimisprotsesside käigus kristalli atomaarsete struktuuride ja energeetiliste tasemete mõjutamine. Kuna kõik eelnimetatud tehnoloogilised protsessid mõjutavad ka struktuuride elektrilisi karakteristikuid, siis näiteks energeetilistel nivoodel toimuvad muudatused võimaldavad edukalt uurida vastavate tehnoloogiliste ettevõtmiste mõju elektrilistele karakteristikutele piisavalt täpsete füüsikaliste parameetrite muutumiste kaudu. Need uuringud on



Joonis 1. GaAs p^+-*pin*-n^+ struktuur.

olulise tähtsusega struktuuride valmistamistehnoloogiate optimeerimist silmas pidades.

Praktilise näitena kirjeldame sügavate energeetiliste nivoode uurimist DLTS-meetodiga GaAs struktuurides, kus uurisime joonisel 1 kujutatud p^+-*pin*-n^+ struktuuri.

Uuritud p^+-*pin*-n^+ struktuur kasvatati p^+ GaAs alusele, mille lisandikontsentratsioon oli N_a = 10^{18} cm^{-3} kasutades vedelepitaksia (LPE) ja n^+ ala doonorlisandi kontsentratsioon on N_d = 10^{18} cm^{-3}. Oomilised kontaktid sadestati p^+- ja n^+- pindadele, kasutades multimetalle Ni/Ag ja Au/Ge/Ag. Struktuurid valmistati standardse diameetriga GaAs plaatidele ning iga struktuurse kiibi mõõtmed olid 3 × 3 mm^2.

Teostatud mõõtmistest ei ole võimalik identifitseerida otseselt energeetiliste nivoode asukohta, kuid joonistelt on selgelt määratletav elektron- ja auk-tüüpi sügavate nivoode olemasolu kõikides näidistes ning kõikide näidiste gruppides on spektri konfiguratsioonid sarnased. Energeetiliselt sarnaste parameetritega näidiste defektide olemasolu viitabki spektri piigi moonutustele, mis raskendab nende täpset identifitseerimist. Toetudes varasematele uuringutele, võime käesolevate mõõtmiste tulemuste põhjal siiski väita, et LPE *pin*-ala sisaldab taustal H2 auk-tüüpi lõkse, mis viitavad A auk-tüüpi aktivatsioonienergiatega E_v = +0,41 eV ja E_v = +0,68 eV lõksudele. Seda teades võime siduda H2 tipu ka B tsentritega, mille spekter jääb vahemikku (+0,530 eV ... +0,681 eV).

DLTS spektrite uuringud p^+-*pin*-n^+-struktuuridega tõestasid elektron- ja auk-tüüpi sügavate nivoode olemasolu (joonis 2). Tulemuste põhjal võime väita, et defektide allikad on permanentsed ja korratavad ning need on määratletud epitaksiaalkihi kasvatamise tehnoloogiaga. A ja B tsentrite võtmeparameetrite määratlemise kaudu on võimalik luua *on-line* DLTS ekspresstoodete monitoorimise vahend, mis omakorda võimaldab realiseerida planeeritud karakteristikutega dioodstruktuuride valmistamist.

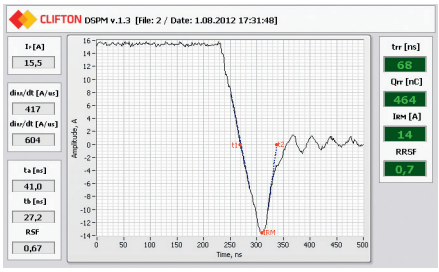
Sügavate nivoode temaatikaga on tugevalt seotud ka numbriliste eksperimentide läbiviimine SiC-l põhinevatele Schottky struktuuridele. Viimaste aastate uuringud *n*-ja *p*-aladega 6H- ja 4H-SiC Schottky ja *pn*-dioodide puhul avastasime Schottky struktuuride staatiliste karakteristikute ebareeglipärase käitumise, mida saab siduda sügavate energeetiliste nivoodega, mis tekivad kontaktide valmistamisel difusioonkeevituse metalliseerimistehnoloogiat kasutades. On teada, et keskmise energeetilise tasemega generatsiooni ja rekombinatsiooni tsentrid on tõenäoliselt laengukandjate eluea põhilised tapjad. Samal ajal on teada, et kõrge kvaliteediga *n*-tüüpi 4H-SiC epialades sügavad energeetilised nivood näitavad piisavalt suurt stabiilsust temperatuuri muutuste suhtes, millest järeldub nende oluliselt nõrgem mõju struktuuride elektrilistele karakteristikutele.

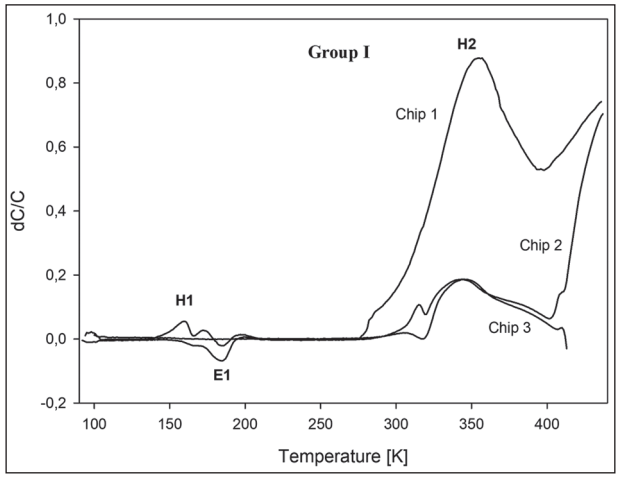
Numbrilised eksperimendid viidi läbi joonisel 3 esitatud geomeetriaga struktuuridel.

Sügavate nivoode ja defektide modelleerimiseks kasutasime modifitseeritud Poissoni võrrandit:

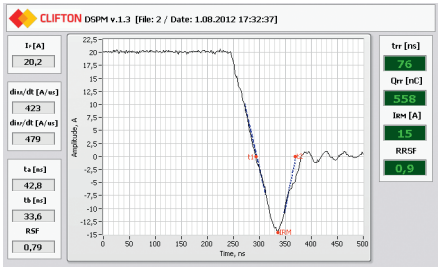
$$\mathrm{div}\left(\varepsilon \nabla \psi\right) = q\left(n - p - N_D^+ + N_A^-\right) - Q_T, \qquad (1)$$

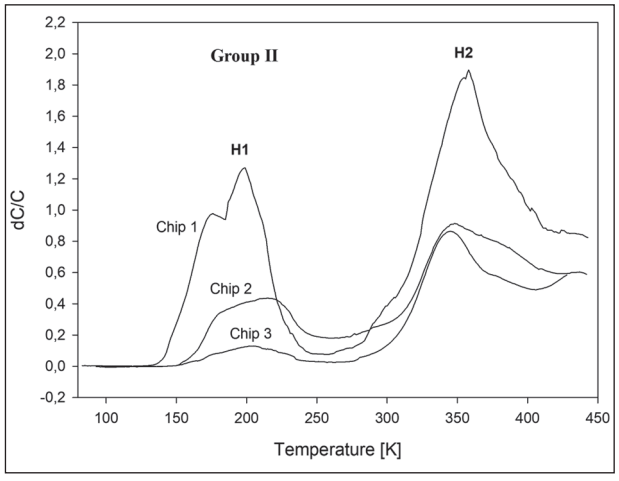
kus ε on materjali läbitavust iseloomustav koefitsient, ψ on potentsiaal, q on elektroni laeng, n ja p on elektronide ja aukude kontsentratsioon (vastavalt); N_D^+ ning N_A^- on ioniseeritud lisandite kontsentratsioonid; Q_T kirjeldab lõksude ja defektide tekitatud laengut. Lõksude energia (täiendavad energia tasemed keelutsoonis) mõjutab kogulaengut valents- ja juhtivustsoonide emissiooni kaudu, muutes rekombinatsiooni kiirust pooljuht-alus-



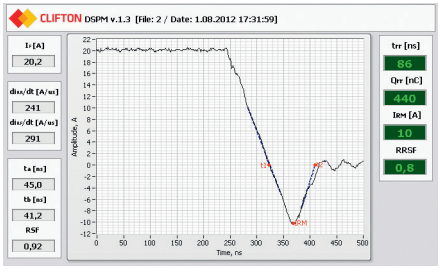


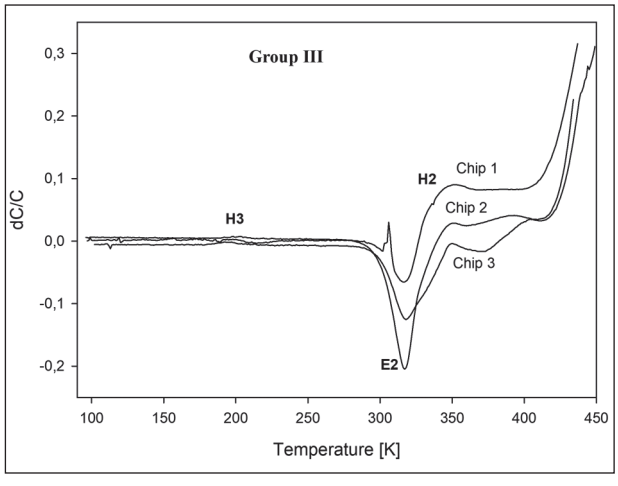
a)





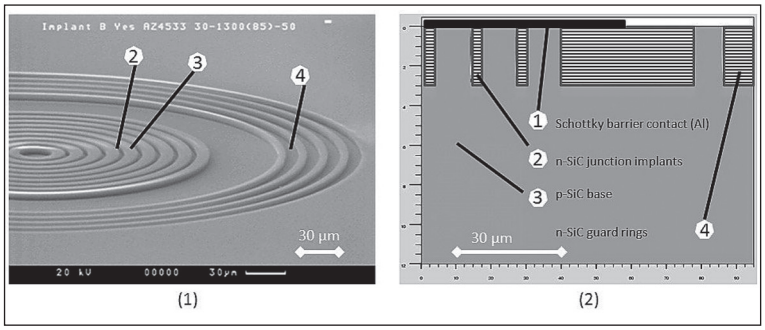
b)





c)

Joonis 2. Sügavate nivoode spekter p^+-*pin*-n^+ struktuurides (vasakul) ja vastavad väljalülitumise karakteristikud (paremal); vastupingel U_r = –10 V, impulsi täitumise U_1 = 1 V, ja sagedusel $f = 500$ Hz erinevate partiide tarbeks: (a – Group I, b – Group II, c – Group III).



Joonis 3. Eletronmikroskoobi pilt reaalsest JBS-dioodi struktuurist ja 2D mudeli ristlõige, mida kasutasime numbriliste eksperimentide läbiviimiseks.

materjalis. Doonor- ja aktseptor-tüüpi lõksude tihedus määratakse seosega

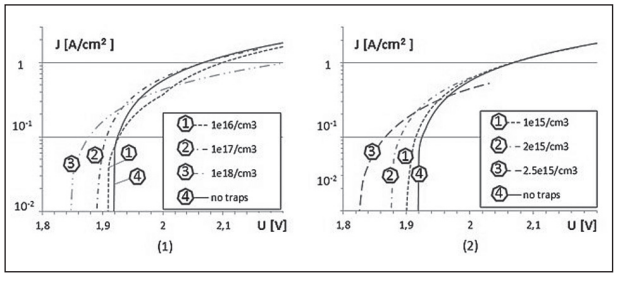
$$Q_T = q\left(N_{tD}^{+} - N_{tA}^{-}\right), \tag{2}$$

kus N_{td}^{+} ja N_{tA}^{-} on ioniseeritud lisandite doonori- ja aktseptorisarnaste lõksude kontsentratsioon (vastavalt). Kogulaeng (lõksude tihedus) määratakse seosest

$$N_{tD}^{+} = \sum_{\alpha=1}^{k} N_{tD\alpha}^{+}\,,\; N_{tA}^{-} = \sum_{\beta=1}^{m} N_{tA\beta}^{-}\,, \tag{3}$$

kus *k* ja *m* on doonor- ja aktseptor-tüüpi lõksude arv (vastavalt).

Ioniseerimise tõenäosus arvutatakse eeldusel, et haarde ristlõiked on konstantsed kõikidel energeetilistel nivoodel ning selle tulemusena modifitseerub Shockley-Readi-Halli (SRH) rekombinatsiooni mudel, mis arvestab ka laengukandjate tunnelmehhanismi.



Joonis 4. Lõksude tiheduse mõju I–U karakteristikutele 20 °C juures. (1) Lõksude energiatase $E_v + 0{,}125$ eV. (2) Lõksude energiatase E_v + 0,52 eV.

Joonisel 4 on toodud lõksude tiheduse mõju voolu pinge (I–U) karakteristikutele 20 kraadi Celsiuse juures. Selgelt on näha doonori sarnaste lõksude mõju I–U karakteristikutele. Samal ajal on laengukandjate haarde ristlõigete, mis muutusid vahemikus $1 \times 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-2}$ kuni $1 \times 10^{17}\,\mathrm{cm}^{-2}$, mõju marginaalne. Keelutsooni keskosa lähedal paiknevate lõksude mõju I–U karakteristikutele on madalam kui kesknivoost kaugemal olevate lõksude mõju.

Numbrilised eksperimendid näitasid selgelt, et pärikarakteristikute temperatuurisõltuvuse anomaaliad *p*-SiC Schottky struktuuride puhul on määratud sügavate doonor-tüüpi nivoode olemasoluga, mis tekivad kontaktide valmistamisel difusioonkeevituse tehnoloogiaga materjali deformatsioonidest, mida toetavad ka üleminekuala TEM uuringud.

Eespool kirjeldatud uuringute tulemusi rakendatakse vertikaalsete kõrgepingeliste SiC Schottky tulpade (*stacks*) realiseerimisel.

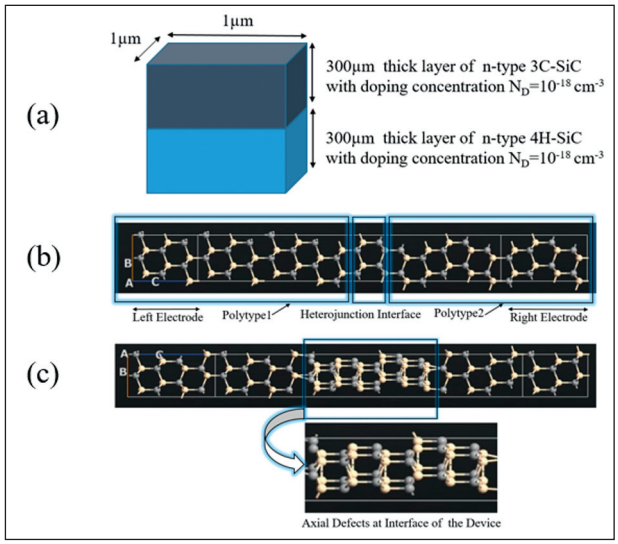
POLÜTÜÜPSED HETEROSIIRDED

Polütüüpsete heterosiirete valmistamine on tehnoloogiliselt ülimalt väljakutsuv protsess. Keerukus seisneb selles, et erinevate polütüüpide formeerimine integreeritud üleminekualaga struktuuriks realiseerub traditsiooniliste kristallikasvatuse meetoditega väga raskelt, tingituna suure arvu defektide tekkest. Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituudi loodud difusioonkeevituse

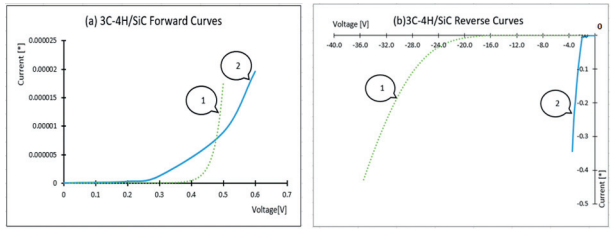
tehnoloogia oleks selliste lahenduste loomiseks sobiv, kuid probleemiks kujuneb atomaarse plastilise deformatsiooni esilekutsumine ülimalt kõvade ja inertse pinnaga erineva polütüüpsusega SiC-plaatide ühendamiseks. Neid raskusi on loodetavasti võimalik ületada, kasutades plastilist atomaar-vahekihti nimetatud polütüüpsete plaatide vahel. Tänapäeval teatakse kokku üle 200 erineva SiC polütüübi, kuid pooljuhtelektroonikas on nendest kasutatavad vaid kolm: 3C-SiC, 4H-SiC, ja 6H-SiC. Valmistamise probleemidest võib lähemalt lugeda mitmest meie uurimisgrupi varasemast artiklist.

Kasutades numbrilist modelleerimist, uurisime polütüüpsete heterosiirete omadusi (mikroskaalas SILVACO ATLAS keskkonda ning nanoskaalas QuantumWise Atomistix Toolkitti (ATK) koos Virtual Nanolab (VNL) kasutajaliidesega). Joonisel 5 on toodud nanoskaalas heterosiirete struktuur, mis annab parema ettekujutuse probleemist.

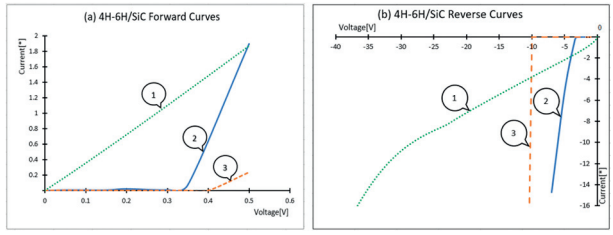
3C-SiC orientatsioon on (111) ning 4H-SiC puhul (0001). Teine kombinatsioon moodustub paarist 4H-SiC ja 6H-SiC, kus mõlema pinnaorientatsioon



Joonis 5. 3C/4H-SiC *nn*-siirde struktuur (a); ilma defektideta (b); defektid üleminekualas (c).



Joonis 6. Päri- ja vastukarakteristikud 3C/4H-SiC struktuuridele. (1) mikroskaala simulatsioonid, (2) nanoskaala simulatsioonid.



Joonis 7. Päri- ja vastukarakteristikud 4H/6H-SiC struktuuridele. (1) Mikroskaala simulatsioonid, (2) nanoskaala simulatsioonid.

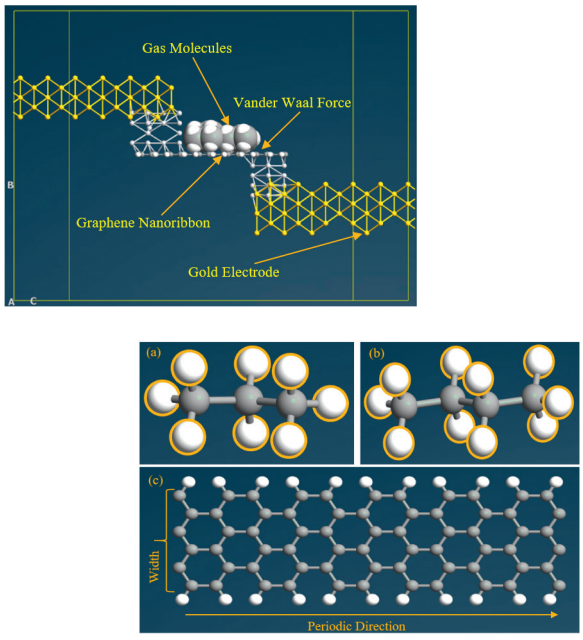
on (0001). Kontaktide mõõdud piki *Z*-telge on 0,76 nm ja keskmise ala mõõtmed 3,53 nm.

Joonisel 6 on näidatud mõlema polütüüpse heterosiirde päri- ja vastukarakteristikud nii mikro- kui ka nanoskaalas arvutatuna.

Mikroskaala simulatsioonid 3C/4H-SiC struktuuridele näitavad karakteristikute sarnast käitumist tavalisele *pn*-siirdele, kus potentsiaali barjääri kõrgus ja ka läbipaistvus defineerivad laengukandjate liikumise alusel voolu. Vastukarakteristikul on selgelt näha tunnelleerumise ja laviinpaljunemise koosmõju pinge-voolu kõvera kujunemisel. Seega on mikroskaala simulatsioonid oluliste lihtsustuste tõttu struktuuride kirjeldamisel ebatäpsed ning korrektsetes uuringutes kasutatavad ainult kvalitatiivsete tulemuste saamiseks.

Nanoskaala arvutuste puhul arvestatakse elektronide transpordil aga täiendavaid kvantfüüsikalisi nähtuseid, nagu kvantvangistus, tunnelnähtused, elektron-elektron vastastikune mõju (*Coulomb*

interaction), aga ka energiatasemete kvantiseerumist, mis on omane SiC polütüüpsetele struktuuridele supervõre tekke tõttu, ning elektronide mitte-elastset keskmistatud vabahajumise teekonda. Simulatsioonide tulemused näitavad selgelt karakteristikute erinevusi, mille tõeväärtus on määratud simuleeritava struktuuri mõõtmetega ja nende mõõtmete suhtestumisega vabahajumise teekonna pikkusesse (näiteks 4H-SiC puhul elektronide vabahajumise teekond on 22,64 Å siirdealas, ja keskmises alas 35 Å). Numbriliste eksperimentide tulemusel võime siiski nentida, et mikro- ja nanoskaala simulatsioonide puhul on pärikarakteristikute kokkulangevus piisavalt hea, kuid vastukarakteristikute lahknevus on silmanähtav. Viimane on ilmselt põhjustatud asjaolust, et nanoskaalas tunneleerumist ja laengukandjate paljunemist (ioniseerumise mudel) kirjeldavad parameetrid vajavad täpsustamist mõõteeksperimentide abil.



Joonis 8. Grafeenist nanotriip-tüüpi sensor (vasakpoolne pilt) ning simulatsioonides kasutatud mudel (a) propaani, (b) butaani ja (c) nanotriibu enda jaoks.

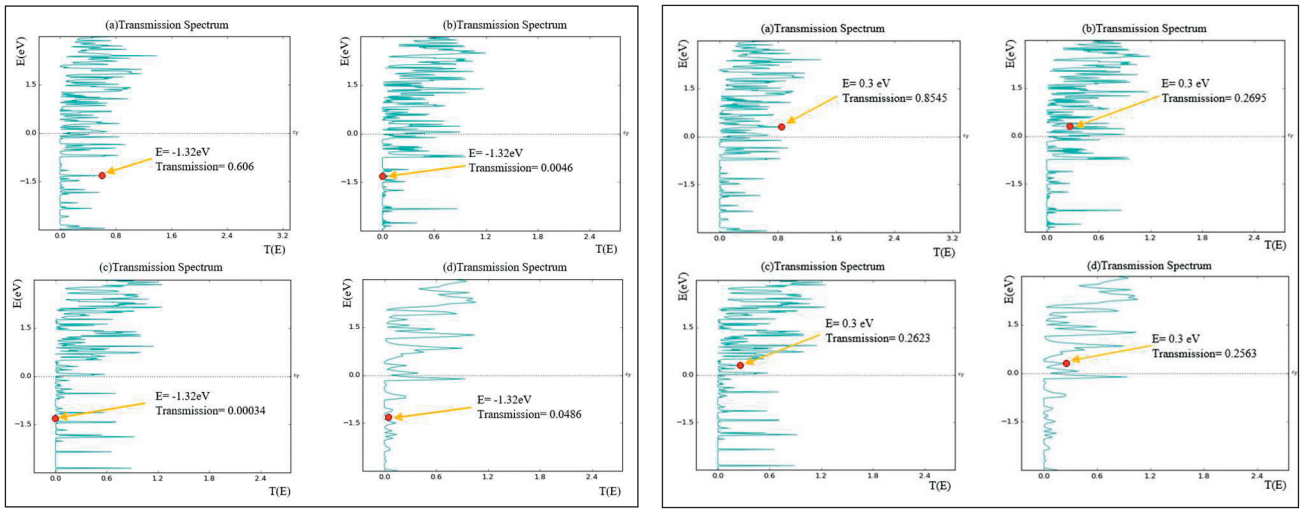
MULTISKALAARSED PINDNÄHTUSED

Enamik nüüdisaegseid sensoreid töötab erinevate pindade üleminekualadel toimuvate füüsikaliste ja keemiliste protsesside fikseerimiseks ja sealsest keskkonnast elektrilise signaali kättesaamiseks. Viimase viie aasta jooksul on grafeenist ja selle derivaatidest kujunenud multiskalaarsetel pindnähtustel põhinevate sensorite praktiliseks kasutamiseks enim arendatav valdkond. Grafeenil põhinevad sensorid hakkavad aina enam leidma kasutust rakendustes, mida kasutatakse biomolekulide, kemikaalide ja gaasi molekulide detekteerimiseks. Oleme ka oma uurimisgrupiga selliste eripäraste heterosiiretega seotud temaatikaga tegelema asunud.

Põnevaks teeb grafeeni kui materjali kasutamise asjaolu, et grafeenkile paksusega 0,35–1,6 nm on samal ajal 2D materjal Diraci koonustega. Grafeeni tuntakse ka kui null-keelutsoonilaiusega materjali, millel on võimekus tuunida keelutsooni laiust. Laengukandjate transport jääb väidetavalt ballistiliseks kuni kihi paksusteni 0,3 µm ja 300 °K. Gaaside adsorptsioon kutsub esile grafeeni juhtivuse muutuse, millel põhinevadki selle rakendused sensorina. Kasutasime numbriliste eksperimentide läbiviimiseks reaalselt toodetavaid nanotriipude kujulisi grafeenist struktuure, detekteerimaks propaani (C_3H_8) ja butaani (C_4H_{10}).

Joonisel 8 on näidatud QuantumWise Atomistixi (ATK) abil kirjeldatud grafeenist valmistatud nanotriipu koos adsobeeruvate gaasidega. Gaaside aatomite ja grafeeni vaheline interaktsioon toimub Van der Waalsi jõudude toimel. Nanotriibu mõõtmed piki perioodilist suunda: pikkus 21,31 Å; riba laius 8,05 Å.

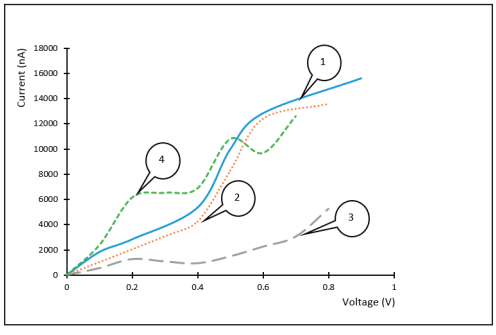
Laskumata kogu eksperimenti kirjeldava matemaatilise aparatuuri peensustesse, esitame mõned esmased ja huvitavad tulemused. Numbrilised eksperimendid näitasid selgelt pinnaolekute tihe-



Joonis 9. Erinevatele energiatasemetele (E = 1,32 eV ja E = 0,3 eV) vastavad arvutatud läbivspektrid. (a) Grafeeni pinnal ei ole gaasi molekule, (b) grafeeni pinnal on propaani molekulid, (c) grafeeni pinnal on butaani molekulid ja (d) grafeeni pinnal on nii propaani kui ka butaani molekulid.

duse energeetiliste spektrite erinevusi. Energiaspektril on selgesti eristuvad piigid, mis on mõjutatud kõikide pindolekute tiheduse spektri poolt. Tulemused on jälgitavad joonisel 9 esitatud läbivspektrite võrdlusena erinevatel energianivoodel, mis arvutatakse kõikide laengukandjate energianivoode koosmõju kaudu.

Jooniselt saame selgelt määratleda erinevate energianivoodele E vastavad läbivspektrid, mis on tuletatud pindolekute tihedusest ja on spektri piikide väärtustega kooskõlas erinevate gaaside molekulide olemasolu või puudumisega grafeeni pinnal. Seniste väidetega on hästi kooskõlas ka nanotriip-tüüpi sensorite voolu-pinge (I–U) karakteristikud, nagu on näha joonisel 10. Gaasimolekulide puudumisel nanotriip-tüüpi anduri pinnal (joonis 10) on I–U karakteristik piisavalt lineaarse kujuga, kuid karakteristik muutub oluliselt gaasimolekulide olemasolul grafeeni pinnal.



Joonis 10. Voolupinge kõverad arvutatuna nanotriip-grafeenist anduritele. (1) Grafeeni pinnal ei ole gaasi molekule, (2) grafeeni pinnal on propaani molekulid, (3) grafeeni pinnal on butaani molekulid ja (4) grafeeni pinnal on propaani ja butaani molekulid.

Eeltoodut kokku võttes võime numbriliste eksperimentide alusel väita, et gaaside molekulide puudumine või kohalolek grafeeni pinnal kujundab nanotriip-tüüpi grafeenanduri elektrilisi karakteristikuid, mis on otseses sõltuvuses erinevatel energianivoodel määratud läbivspektrite kuju ja piikide asukohtade numbriliste väärtustega. Sarnase metoodika alusel oleme teinud arvutusi ka fenoolide ja metanooli molekulide koosmõju uurimiseks grafeen-nanotriipudega.

Kuid on ilmselge, et nimetatud numbrilised eksperimendid vajavad kinnitust ka reaalsete mõõtetulemustega.

KOKKUVÕTTEKS

Kirjutises näitasime, et DLTS-meetod koos numbriliste eksperimentidega pakub pooljuhtstruktuuride valmistajatele võimsa vahendi valmistatavate pooljuhtstruktuuride elektriliste karakteristikute sihipärasel kujundamisel. Uuringute tulemusi on rakendatud firmas Clifton ja Ioffe instituudis.

Polütüüpsete heterosiirete valmistamise tehnoloogia on hüpoteeside kontrollimise järgus, kuid numbriliste eksperimentide tulemusel oleme jõudnud paremale arusaamisele laengukandjate käitumisest ja teistest kvantfüüsikalistest protsessidest, mis mõjutavad oluliselt loodavate struktuuride elektrilisi parameetreid.

Multiskalaarsete pindnähtuste uurimisel on osutunud ülimalt efektiivseks tööriistaks QuantumWise Atomistix (ATK) keskkond, mille abil oleme uurinud võimalusi luua grafeenil põhinevaid sensoreid erinevate gaasiliste ja vedelainete molekulide detekteerimiseks. Saadud numbriliste eksperimentide tulemuste kinnitamiseks on vajalikud reaalsetel mõõtmistel põhinevad eksperimendid. Eesmärgiks on efektiivsete portatiivsete sensor-lahenduste loomine kiiplaborite tarbeks.

Tänuavaldus. Autorid tänavad dr Ants Koeli, doktorant Haroon Rashidi, dr Oleg Korolkovi, dr Natalja Sleptšuki ja dr Jana Toompuud, kellega koostöös valmisid selle kirjutise aluseks olnud viidatud publikatsioonid. Samuti täname Eesti teadusagentuuri toetuse eest kirjeldatud uuringute läbiviimiseks (projektid IUT1911 ja PUT1435).

VIITED

Ivanov, P., Korolkov, O., Samsonova, T., Sleptsuk, N., Potapov, A., Toompuu, J., Rang, T. 2011. DLTS measurements on 4H-SiC JBS-diodes with boron implanted local *p-n* junction. – Materials Science Forum, 679–680, 409–412.

Koel, A., Rang, T., Rang, G. 2011. Simulation of deep energy traps to explain the VAC temperature dependence anomaly of diffusion welded Schottky contacts. – International Conference on Silicon Carbide and Related Materials, 11–16 September, 2011, Cleveland Ohio, USA. Trans Tech Publications, 340.

Korolkov, O., Sleptšuk, N., Annus, P., Land, R., Rang, T. 2016. High-voltage diffusion-welded stacks based on SiC Schottky diodes. – Roccaforte, F., La Via, F., Nipoti, R., Crippa, D., Giannazzo, F., Saggio, M. (eds). Silicon Carbide and Related Materials/Materials Science Forum. Trans Tech Publications, 790–794.

Korolkov, O., Kozlovski, V., Lebedev, A., Land, R., Sleptšuk, N., Toompuu, J., Rang, T. 2017. *SiC* Schottky diode rectifier bridge represented as diffusion-welded stack. – Materials Science Forum, 897, 697–700.

Rang, T., Rang, G. 2007. Räänikarbiidil põhinevate jõupooljuhtseadiste disain ja karakteriseerimine. – Teadusmõte Eestis (IV). Tehnikateadused (II). Eesti Teaduste Akadeemia, Tallinn, 121–131.

Rashid, H. M., Koel, A., Rang, T., Gähviler, R., Grosberg, M., Jõema, R. 2017. Nanoscale and microscale simulations of *n-n* junction heterostructures of 3C-4H silicon carbide. – Northwood, D. O., De Hosson, J., Rang, T., Brebbia, C. A. (eds). Materials and Contact Characterization VIII. WIT Press, 235–250.

Toompuu, J., Sleptšuk, N., Korolkov, O., Rang, T. 2016. Method of samples preparation intended for research of deep centers in *i*-, *n*-, and *p*-layers of GaAs p^+-*pin*-n^+ structures and result of analysis. – Rang, T., Ellervee, P. (eds). Baltic Electronics Conference. The 15th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2016): 15th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2016) Tallinn, Estonia, 3–5 October, 2016. TTU Press, Tallinn, 35–38.

LÄÄNEMERE RAHUTUTE RANNIKUTE PÕNEVAD SALADUSED

Tarmo Soomere
Tallinna tehnikaülikooli loodusteaduskonna küberneetika instituut
ning inseneriteaduskonna ehituse ja arhitektuuri instituut

Eelmisel kümnendil ja osalt kuni 2013. aastani lainetuse dünaamika laboris (wavelab.ioc.ee) läbi viidud uuringute peamised tulemused on eesti keeles kajastatud kogumikus „Teadusmõte Eestis VII. Meri. Järved. Rannik“ (Didenkulova, 2011; Soomere, 2011a) ja kirjutistes (Soomere, 2013a, 2014a). Need edusammud peegeldasid labori kollektiivi kasvamist esimese seitsme koos töötatud aasta vältel, millest labor omaette üksusena oli eksisteerinud vähem kui viis aastat. Selleks ajaks olid esmakordselt süstemaatiliselt määratletud Läänemere pinnalainetuse ajalis-ruumilise muutlikkuse mustrid.

Selle informatsiooni kombineerimise kaudu sise-lainete ja laevalainete uuringutega õnnestus avada mitmed lainete ja ranniku vastasmõju senitundmatud aspektid. Kirsina tordil loodi avamere omaduste uut tüüpi kvantifitseerimisel ning rannikute kaitse pöördülesande ligikaudsel lahendamisel põhinev tehnoloogia potentsiaalselt ohtliku inimtegevuse optimeerimiseks (Soomere, 2011b). Loogiliseks jätkuks lainekliima ja selle muutuste uuringutele kujunes analüüs, kuidas lained randa mõjutavad ning mida on rannikuinseneridel ja ranniku haldajatel sellest õppida.

LAINED ON EFEKTIIVSED TÖÖTEGIJAD

Veepind on pikemate pinnalainete jaoks peaaegu perfektne lainejuht. Seetõttu jõuab suur osa tuule poolt lainetesse süstitud energiast varem või hiljem randa. Tulemusena on rannavöönd Maa üks kõige suurema energiatihedusega piirkondi, jäädes selgelt maha vaid vulkaanipursete, maavärinate ja asteroidide löökide mõjualadest.

Tagasihoidliku tõusu-mõõna amplituudiga veekogudes nagu Läänemeri on tuulelainete osakaal rannaprotsessides ja setete liikumises ranniku lähistel palju suurem kui avaookeani rannikul. Murdlained panevad liikuma mitte ainult suure hulga setteosakesi, vaid isegi üsna suuri kivikobakaid. Kuigi kõrged lained nihutavad kivirahne veepiirist ootamatult kaugel (Cox jt, 2012), sünnib põhiosa lainete vallandatud settematerjali transpordist murdlainete vööndis. Setteosakesed liiguvad intensiivselt risti randa (ehk üles-alla) ainult uhtealal, mille laius enamasti vaid mõned meetrid. Piki randa võivad lained materjali kanda aga sadade kilomeetrite kaugusele. Selle transpordi ehk settevoolu omaduste määratlemine on rannikuteaduse üks keskseid küsimusi.

Laineharjade liuglemine on palja silmaga selgelt näha. Meie silmad ei erista tavaliselt üht liivatera või klibutükki teistest, mistõttu me enamasti ei

märka liiva ja väikeste kivide liikumist. Rannasetete edasikandumine muutub nähtavaks siis, kui rannas on mingi tõke, olgu siis looduslik neemik või inimeste ehitatud muul, lainemurdja või hoopis süvendatud laevatee (nagu Rukkirahu kanal, mille põhja kipuvad setted kogunema). Settevoolu intensiivsust saab mõõta tõkke taha või laevatee põhja kuhjuva liiva või kruusa hulgaga.

Lained transpordivad rannaliiva ja kruusa vahel päris nobedasti. Mida suurema nurga all laine randa jõuab, seda kiiremini kivid liiguvad. Edasikande kiirust saab hinnata üksikute eristatavate (nt värvitud) kivide asendi jälgimise abil (Pindsoo jt, 2014; Tõnisson jt, 2014). Aegna lõunarannikul jõudis otse sealse muuli kõrval asuvale rannale 2013. aastal korraldatud eksperimendis iga päev kokku mõnikümmend 50–80 cm kõrgust laevalainet. Need liigutasid 1–10 cm läbimõõduga paetükke päeva jooksul keskmiselt kaks-kolm meetrit piki randa. Suuremad kivid liikusid kiiremini kui väiksemad. Kiireim kivi kattis ühe päevaga 18 meetrit (Pindsoo jt, 2014). Üks tavaline torm kestab meie rannikul päris mitu tundi. Selle ajaga jõuab randa mitu tuhat märksa kõrgemat lainet. Seega pole selles midagi imelikku, et mõne tormiga liigub terve liivarand kilomeetrite jagu teise kohta.

Nii setete liikumise kui ka lainetranspordi modelleerimine on valdkonnad, kus veel tänapäeval tuleb arvestada nii mitmete sisuliste probleemidega kui ka suurte ebatäpsuste ja määramatusega. Need pärinevad mitmest allikast, alatest muredest mere kohal puhuva tuule omaduste ja mustrite rekonstrueerimisega (Služenikina, Männik, 2016) ja probleemidest merejää mõju arvestamisel lainetuse levimisele (Zaitseva-Pärnaste, Soomere, 2013; Björkqvist jt, 2018) ning lõpetades sellega, et rannas paikneva materjali omaduste ja hulga kohta on andmed sageli puudulikud või lausa olematud. Nende kitsaskohtade kiuste on suhteliselt lihtsakoelised lainetranspordi arvutused avanud põnevaid aspekte nii materjali liikumise ajalis-ruumiliste mustrite kui ka tuulte omaduste muutumise kohta meie merel ning nende taga olevate kliimamuutuste kohta.

LAINETRANSPORDI KVANTITATIIVNE MUDEL

Lainetuse dünaamika laboris on piki rannajoont suunatud lainetranspordi modelleerimiseks rakendatud juba enam kui kümme aastat (Soomere, 2007) nn CERCi (Coastal Engineering Research Council ehk rannikutehnika nõukoda) meetodit (USACE, 2002). Selle USA armee insenerikorpuses välja töötatud meetodi lähtekohaks on pragmaatiline ja füüsikaliselt korrektne arusaam, et kui on tegemist eksklusiivselt lainetuse mõjuga, siis peab toimuvate protsesside intensiivsus olema laineenergia E randa saabumise määra teatav funktsioon. Klassikaliste lineaarsete (ehk siinuslainete) energia mere pinnaühiku kohta on $E = \rho g h^2/8$, kus ρ on vee tihedus, g = 9,81 m/s^2 on gravitatsioonikiirendus ja h on lainekõrgus. Laineenergia kandub edasi nn rühmakiirusega c_g, mis pinnalainete puhul on enamasti laineharjadest märksa aeglasem. Laineenergia voog (ka võimsus) $P = Ec_g$ esitab energia liikumist laineharja pikkusühiku kohta.

Selles kontekstis on igati loogiline, et esimeses lähenduses (st parema puudumisel) postuleeritakse, et setete transpordi nn potentsiaalne intensiivsus massiühikutes $I = KP$ on igal ajahetkel võrdeline randa jõudva laineenergia vooga. See voog arvutatakse murdlainete vööndi merepoolse serva jaoks (st kohas, kus lained just hakkavad murduma). Kui laineharjade ja põhja samasügavusjoonte vaheline nurk selles kohas on θ_b, siis $P = E_b c_{gb} \sin\theta_b \cos\theta_b$, kus alaindeks „*b*“ tähistab lainete omadusi just selles kohas. Kui h_b on just murduma hakkavate lainete kõrgus ja d_b selle koha sügavus (ka murdumissügavus), siis $E_b = \rho g h_b^2/8$ ja tegemist on pikkade lainetega, mistõttu $c_g = \sqrt{g d_b}$.

Edasikantud settematerjali maht Q leitakse lihtsast empiirilisest seosest $I = (\rho_s - \rho) g (1-p) Q$.

Konkreetset randa iseloomustavate suuruste nagu liiva ρ_s ja merevee ρ tavaline tihedus, vastavalt $\rho_s \approx 2650$ kg/m^3 ja $\rho \approx 1015$ kg/m^3, ning poorsuse koefitsiendi $p = 0{,}4$ väärtused on arvutustes valitud sellised, mis on tüüpilised Läänemere idarannikul Läti ja Leedu kandis. Suurus K on teatav dimensioonitu koefitsient. Seost $I = KP$ nimetatakse tavaliselt CERCi valemiks; vahel ka lainetuse võimsuse või energia voo meetodiks.

Vanemates arvutustes loeti K sageli konstandiks, mis määrati kohapealsetest vaatlustest või mõõtmistest. USACE (2002) soovitab kasutada empiirilist valemit $K = 0{,}05 + 2{,}6 \sin^2 2\theta_b + 0{,}007 u_{mb}/w_f$,

kus $u_{mb} = (h_b/2)\sqrt{g/d_b} = \sqrt{g\gamma_b h_b}/2$ on maksimaalne põhjalähedane orbitaalkiirus murduma hakkavas laines lineaarse laineteooria alusel ning $w_f = 1{,}6\sqrt{g d_{50}(\rho_s - \rho)/\rho}$ on nn langemiskiiruse (*fall velocity*) lähisväärtus (USACE, 2002). Nendes seostes $\gamma_d = h_b/d_b$ tähistab murdumisindeksit ehk murduva laine kõrguse h_b ja vee sügavuse d_b suhet ja d_{50} on liivaterade või kruusakivide keskmine diameeter.

Esitatud mudel on üks lihtsamaid võimalusi piki randa toimuva setete liikumise ligikaudseks kirjeldamiseks. Rannikuprotsesside modelleerimine on aga keerukas ja tänamatu ettevõtmine. Tehtud lihtsustustest ja korrektsest arvutuseeskirja järgimisest üldjuhul ei piisa näiteks liiva edasikande määratlemiseks. Nõnda leitud lainetranspordi potentsiaalne intensiivsus (massiühikutes või ruumalaühikutes ajaühiku kohta) väljendab piki rannajoont edasi kantava materjali hulka ideaalsetes tingimustes. Tulemus erineb üldiselt tegelikkusest juba selle tõttu, et merepõhi ei ole murdlainete vööndis homogeenne ning rannajoon on harva sirge. Mudeli väljastatud transpordi potentsiaalne intensiivsus on adekvaatne vaid selliste randade jaoks, kus liiva või muud peeneteralist materjali (kruus, klibu) on väga palju. Läänemere randades on liiva vähe ja tegelik transpordi maht moodustab vaid murdosa, enamasti mõni kuni mõnikümmend protsenti arvutatust. Seetõttu ei kajasta selliselt leitud transpordi potentsiaalne intensiivsus enamasti kuigi täpselt settevoolu tugevust ning arvutustulemustesse tuleb suhtuda ettevaatusega. Mõistlik on lähtuda seisukohast, et parimal juhul on ära tabatud suurusjärk, teisisõnu, tegelikkus erineb mudeli prognoosist vähem kui kolm-neli korda.

Kuigi CERCi mudelit rakendatakse sageli ka lainetranspordi mahu hindamiseks, on sisuliselt tegemist kontseptuaalse mudeliga. Kuna eeldatakse, et lainetranspordi intensiivsus on võrdeline randa saabuva laineenergia vooga (ehk võimsusega), on kogu transpordi füüsika seega taandatud võrdeteguri ehk

CERCi teguri arvutamisele. Transpordi parameetrid on määratud lainete omadustega murdlainete vööndi merepoolsel serval ning neid modifitseerivad vaid tagasihoidlikul määral setete omadused (Viška, Soomere, 2013; Soomere, Viška, 2014). Seetõttu on seda tüüpi mudelid väga head abivahendid hoopis lainetuse ja tuulte omaduste muutumise analüüsil.

CERCi mudeli klassikalises versioonis ei sõltu lainete poolt mingil ajavahemikul tekitatud transport üldse analoogilisest transpordist minevikus. Seetõttu on transpordi omadused pikemate ajavahemike jooksul täielikult määratud lainetuse parameetrite kolmemõõtmelise tõenäosustiheduse jaotusega. Olulised suurused on siin lainete kõrgus, periood ja levikusuund. Praktikas on küll lihtsam mudelisse sisestada lainetuse parameetrite väärtuste jadad mingi uuritava ajavahemiku jaoks. See tähendab aga, et mitmed ranniku funktsioneerimise jaoks olulised muutujad (nt millised on üksikute tormide omadused, järjestus või ajastus) ei ole seda tüüpi mudelites kajastatud.

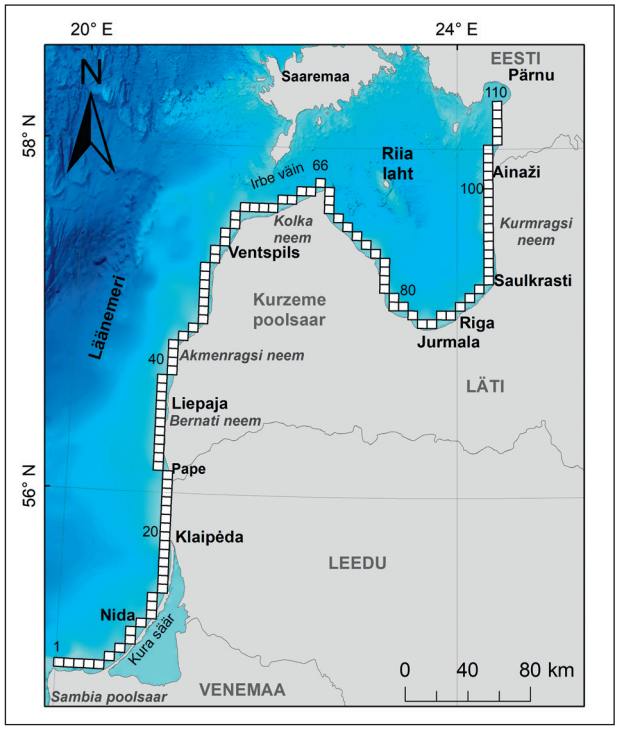
Suurtest määramatustest hoolimata võib mudeli mitmeid väljundeid usaldada. Kuigi mudel ei pruugi adekvaatselt kajastada lainetranspordi mahtu, peegeldab see hästi transpordi mustrite neid omadusi, mis sõltuvad lainete parameetritest. Sellisteks on näiteks setete liikumise suund ja settevoolu suhteline intensiivsus eri rannaosades. Teisisõnu, lainetranspordi muutumist (nii piki randa kui ka ajas) reprodutseerib mudel usaldusväärselt. Samuti on üsna usaldusväärne potentsiaalse netotranspordi ja brutotranspordi suhe. Transpordi hetkeväärtuste summa ehk netotransport iseloomustab setete transiidi intensiivsust ning selle märk näitab settevoolu domineerivat suunda. Transpordi absoluutväärtuste summa ehk brutotransport iseloomustab aga edasi-tagasi liikuva materjali kogust. Kui netotransport on palju kordi suurem brutotranspordist, ei toimu vastavas rannalõigus märkimisväärset setete transiiti. Need omadused on sageli invariantsed mudeli valiku või ülesehituse suhtes (nt kuidas on arvestatud settematerjali omadusi või kui palju setteid paikneb eri rannalõikudes).

PIKK TEEKOND LÄÄNEMERE IDARANNIKUL

Läänemere idaranniku ligikaudu 700 kilomeetri pikkune lõik Kaliningradi oblastis paiknevast Samlandi (Sambia) poolsaarest kuni Pärnu laheni (joonis 1) on meie mere kõige pikem kaasaegsete rannasetete süsteem. Liivaterad, mida lained Tarani neemel liigutama hakkavad, võivad kanduda piki Leedu ja Läti randu kuni Pärnu laheni. Paljude liivaterade jaoks lõpeb teekond Kolka neeme juures, kuid mingi osa liigub sealt edasi, möödub Riiast ja jõuab Eesti vetesse. See muster, kus lained liigutavad materjali peamiselt vastupäeva, identifitseeriti juba möödunud sajandi keskel Läti rannikute geoloogia spetsialisti Robert Knapsi töödes (Knaps, 1966). Päripäeva liiguvad liiv ja kruus vaid üksikutes kohtades (Eberhards, 2003; Eberhards, Lapinskis, 2008).

Siiski tekib siin üks lihtne küsimus. Kaliningradi ja Leedu rannikutel leidub palju merevaiku. Kui lainetransport toimib nõnda, nagu kirjeldatud, peaks merevaik Pärnu kandis olema üsna tavaline. Viimase paarisaja aasta jooksul on lainetransporti küll seganud või isegi tõkestanud suurte sadamate lainemurdjad, aga mineviku jäljed ei tohiks nii kiiresti kaduda. Seetõttu on loogiline arvata, et lainetranspordi muster on tegelikult märksa keerukam. Samuti pole välistatud, et selles mustris on toimunud mingid muutused, mida palja silmaga ei ole näha.

Tugevad tuuled puhuvad Läänemere põhjaosas peamiselt kahest suunast – edelast ja põhjaloodest (Soomere, Keevallik, 2001). Kõrged lained, mis tekitavad suurema osa transpordist, levivad enamvähem samas suunas. Edelatuultega Leedu ja Läti randa jõudvad lained liigutavad setteid põhja poole, kuid põhjaloode tormides tekkinud lained viivad



Joonis 1. Lainemudeli WAM rannalähedased võrgupunktid ja neile vastavad ligikaudu 5,5 km pikkused rannalõigud Läänemere idarannikul. Joonise tegi Katri Pindsoo.

vt lähemalt Soomere, 2011a, 2013). Mudeli sisendina kasutas ta nn geostroofilist tuult (Soomere, Räämet, 2011). See info on arvutatud õhurõhu ruumilisest jaotusest ning seega esitab tuule omadusi atmosfääri kõrgemates kihtides. Kuigi see ei pruugi kajastada üksikute tormide spetsiifikat (Räämet jt, 2009), kajastab see kindlasti tuulekliima omaduste suuremaid muutusi vaadeldavas piirkonnas.

DELIKAATNE MURE: KUIDAS LEIDA MURDUVATE LAINETE PARAMEETRID MEIE MERES

Üks delikaatne probleem niisuguste arvutuste juures on lainemudelis rehkendatud parameetritest murduma hakkavate lainete omaduste leidmine. Avaookeanis, kus lained saabuvad randa enamasti peaaegu risti rannajoonega, saab seda teha kas suhteliselt lihtsate lineaarse laineteooria võtetega (Dean, Dalrymple, 1991, 2002) või siis natuke täpsemalt ligikaudsete ilmutatud valemite abil (Larson jt, 2010). Läänemerel seevastu saabuvad lained tihti randa suure nurga all (joonis 2). Eesti põhjarannikul on selline pilt lausa igapäevane.

setteid lõuna poole tagasi. Ranna areng peegeldab nende kahe mõjuri tasakaalu. Nii pole üldse kindel, kas kohtvaatluste alusel koostatud transpordi muster alati tegelikkusele vastab.

Sellist laadi küsimustele vastamiseks on ülal kirjeldatud CERCi mudel igati sobiv. Isegi kui sellega rehkendatud lainetranspordi intensiivsus on ebatäpne, on transpordi suund ja pikiranda muutumine usaldatavad niipea, kui lainetuse omadused ja rannajoone orientatsioon on teada. Lainetuse parameetrite aegread, mida CERCi mudelis kasutati, rehkendas dr Andrus Räämet nüüdisaegse lainemudeliga WAM kogu Läänemere jaoks 3-miilise lahutusvõimega (ehk sammuga ligikaudu 5,5 km;

Joonis 2. Tüüpiline laineharjade muster Läänemere rannikul. Autori foto.

Probleem on selles, et lainete murdumise koht (või sellele vastav sügavus d_b) pole ette teada. See sõltub lainete kõrgusest, perioodist ning levikusuuna ja põhja samasügavusjoonte vahelisest nurgast. Seetõttu tuleb arvutada madalas vees aset leidva refraktsiooni ja teravdumise (*shoaling* ehk lainekõrguse kasvamine) koosmõju mudeli reprodutseeritud lainete parameetritele. Seda ülesannet saab täpselt lahendada juhul, kui merepõhi on vaadeldav kaldus tasapinnana ning rannale lähenevat lainesüsteemi tohib lugeda monokromaatiliseks (Soomere jt, 2013; Viška, Soomere, 2013). Liivarannale saabuva lauge ummiklainetuse puhul on selline lähendus adekvaatne, kuid tormilainete puhul võrdlemisi jäme tegelikkuse kirjeldus, sest näiteks laineharjade osalist murdumist, tuulelt lainetele edasi antud energiat, energiakadu põhjahõõrde läbi jm tegureid on sellistes arvutustes raske arvesse võtta. Küll aga kehtib see iga lainekomponendi jaoks.

Kui lainemudel on rehkendanud lainekõrguse h_0, perioodi T ja lainete levikusuuna (või selle nurga θ_0, mille moodustavad laineharjad põhja samasügavusjoontega) mingil kaugusel rannast, saab nende kaudu teoreetiliselt leida murduvate lainete kõrguse h_b järgmiselt (Dean, Dalrymple, 1991):

$$h_b = h_0 \sqrt{\frac{c_{g0}\cos\theta_0}{c_{gb}\cos\theta_b}}. \qquad (1)$$

Selles valemis tähistab c_{g0} lainete rühmakiirust lainemudeli arvutuspunktis. Sisuliselt esitab valem lainekõrguse muutumist teravdumise ja refraktsiooni kaudu. Probleem on selles, et nii c_{gb} kui ka θ_b sõltuvad murduvate lainete kõrgusest. Lainete levikusuuna muutumist varieeruva sügavusega meres kirjeldab Snelli seadus, mille kohaselt iga lainekomponendi puhul iga konkreetse laine jaoks suurus $\sin\theta/c_f$ on konstantne igas mere punktis. Suurus c_f on faasikiirus ehk laineharjade liikumise kiirus. Nõnda saame formaalselt avaldada $\sin\theta_b = \sin\theta_0 c_{fb}/c_{f0}$, kus c_{f0} on faasikiirus lainemudeli arvutuspunktis ja c_{fb} on faasikiirus murdlainete vööndi merepoolsel serval. Nii faasikiirus kui ka rühmakiirus arvutatakse dispersiooniseosest $\omega = \sqrt{gk\tanh kd}$, kus $\omega = 2\pi/T$ on ringsagedus, k on lainearv ja d on vee sügavus.

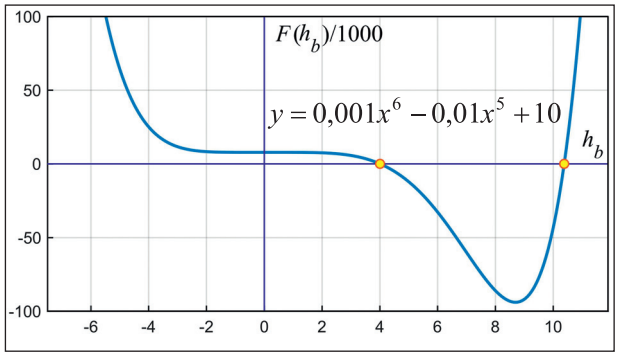
Kui need avaldised asetada kõnesolevasse võrrandisse, jääb sinna ikka veel kaks tundmatut suurust: vee sügavus ja lainete kõrgus murdumise hetkel. Sellest probleemist saadakse üle teatava empiirilise seose kaudu. Nimelt on enamasti murduva laine kõrguse h_b ja vee sügavuse d_b suhe praktiliselt konstantne. Seetõttu eeldatakse, et murdumisindeks $\gamma_b = h_b/d_b$ on konstantne suurus. Murdumisindeksi täpse väärtuse üle käivad vaidlused (vt lähemalt Soomere jt, 2013), kuid enamasti kasutatakse arvutustes suurust $\gamma_b = 0{,}8$ (USACE, 2002; Dean, Dalrymple, 1991, 2002). Viimase lihtsustusena peetakse silmas, et murduvaid laineid tohib üldiselt lugeda nn pikkadeks laineteks, mille puhul $c_g = \sqrt{gd_b} = \sqrt{gh_b/\gamma_b}$.

Kõigi nende avaldiste rakendamine võrrandis (1) annab tulemuseks kuuendat järku algebralise võrrandi murduma hakkavate lainete kõrguse h_b jaoks:

$$h_b^6 \frac{g^2 \sin^2\theta_b}{\gamma_b^2 c_{f0}^2} - h_b^5 \frac{g}{\gamma_b} + h_b^4 c_{g0}^2 \left(1 - \sin^2\theta_0\right) = 0. \qquad (2)$$

Peaaegu otse randa saabuvate lainete puhul on $\sin^2\theta_b$ väike ning võrrandi esimest liiget tohib ignoreerida. Selline lähendus annab tulemuseks klassikalise seose $h_b^5 = h_0^4 c_{g0}^2 \gamma_b / g$ murduvate lainete kõrguse jaoks (Komar, Gaughan, 1972; Dean, Dalrymple, 1991: 115).

Kuna sellel võrrandil on vaid kolm liiget, millest esimene ja viimane on positiivsed ja teine negatiivne, on sellel paarisarv reaalarvulisi lahendeid. Võrrandi (2) vasakut poolt esitaval polünoomil $F(h)$ on täpselt üks miinimumkoht $\widetilde{h} = 5\gamma_b c_{f0}^2 / \left(6g\sin^2\theta_0\right)$. Seetõttu on võrrandil (2)

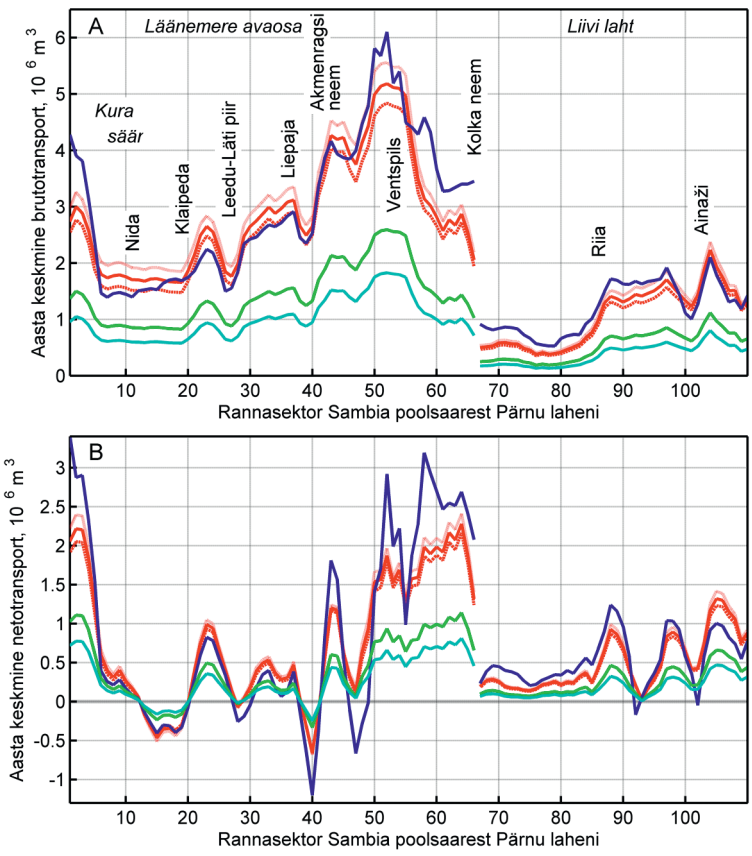


Joonis 3. Murduvate lainete kõrgust kirjeldavale võrrandile (2) vastava joone geomeetria ja võrrandi lahendite paiknemine.

kaks reaalarvulist lahendit juhul, kui $F(\tilde{h}) < 0$, kahekordne lahend siis, kui $F(\tilde{h}) = 0$, ning lahendid puuduvad, kui $F(\tilde{h}) > 0$ (Soomere jt, 2013). Murduvate lainete kõrgust esitab võrrandi (2) väiksem lahend (Viška, Soomere, 2013). Võrrandit (2) kasutati paralleelselt meie töödega Junije Dengi doktoritöös (Deng, 2013), kuid ilma selle lahendite omaduste analüüsita.

NÄHTAMATUD BARJÄÄRID LÄÄNEMERE RANNAL

Ülal kirjeldatud mudeli eri versioonidega arvutatud brutotranspordi absoluutväärtused erinevad kuni kolm korda, kuid selle muutused piki randa toimuvad kõigil juhtudel ühes taktis (joonis 4). Sisuliselt peegeldavad need muutused lainekliima ja ranna orientatsiooni kombinatsiooni, täpsemalt, randa jõudvate lainete levikusuuna ja ranna normaali vahelise nurga muutumist piki uuringuala. Kahes kohas (Samlandi ja Kuramaa põhjaosa rannas) saabuvad selles kandis sagedaste edelatuultega kõrged lained suhteliselt suure nurga all ja kannavad setteid jõuliselt põhja poole. Sageduselt teise suunaga tormituulte (põhjaloode tuuled; Soomere, Keevallik, 2001) tekitatud lained jõuavad neis kohtades randa peaaegu risti rannaga.



Joonis 4. CERCi mudeli erinevate versioonidega arvutatud aasta keskmine potentsiaalse brutotranspordi (A) ja netotranspordi (B) maht Läänemere idarannikul 1970–2007 (Viška, Soomere, 2013; Soomere, 2016). Sektorite numeratsioon vt joonisel 1. Kõik jooned esitavad üle kolme naaberpunkti silutud väärtusi. Sinine: d_{50} = 0,17 mm, teravdumine arvutatud lihtsa ekspressvalemiga, lainekõrgusena kasutatud olulist lainekõrgust (Soomere, Viška, 2014). Teised jooned kajastavad võrrandi (2) lahenditele tuginevaid arvutusi. Punane: sisendiks oluline lainekõrgus; punktiir (ülemine joon): d_{50} = 0,063 mm, pidev joon (keskmine joon): d_{50} = 0,17 mm, katkendjoon (alumine joon): d_{50} = 1,0 mm. Roheline: d_{50} = 0,17 mm; sisendiks ruutkeskmine lainekõrgus, kuid murduvate lainete rühmakiiruse arvutamisel kasutatud olulist lainekõrgust. Helesinine: d_{50} = 0,17 mm, sisendiks ruutkeskmine lainekõrgus.

Joonis 5. Rannale uhutud vrakk Klaipėda lähistel (vasakul, 12. nov 2014) ja Akmenragsi tuletorni abihoone varemed (paremal, 16. nov 2013). Autori fotod.

Tulemusena liiguvad setted neis rannalõikudes kiiresti kirde poole.

Liivi lahes on kõnesolev transport palju nõrgem lihtsalt selle tõttu, et lained on seal madalamad ja lühemad (Eelsalu jt, 2014), mistõttu randa jõuab ajaühikus märksa vähem laineenergiat. Kuna arvutuslik transport on CERCi valemis võrdeline lainekõrgusega astmes 2,5, tähendab lainekõrguse üsna väike kahanemine või suurenemine palju suuremaid muutusi transpordi intensiivsuses.

Netotranspordi muutumise muster piki uuringuala sisaldab uut ja teatavas mõttes ootamatut informatsiooni. Kuigi mõned mudeli versioonid hindavad netotranspordi intensiivsust kuni kaks korda üle, peegeldavad selle suuruse kvalitatiivsed muutused tegelikkust päris hästi (Viška, Soomere, 2013). Kõige intensiivsem (kuni miljon kuupmeetrit aastas, Knaps, 1966) on netotransport vaatluste alusel Kuramaa looderannikul.

Netotranspordi positiivseks suunaks loetakse liikumist merele vaatava inimese vasakult poolt paremale; meie mere rannikul seega vastupäeva. Kõige huvitavamad kohad rannikul on need, kus netotransporti üldse pole. Selliseid nullkohti on kaht tüüpi. Ühed vastavad settevoolu konvergentsile ehk liiva kuhjumisele kohtades, kus vastupäeva transport kohtub päripäeva transpordiga, teised divergentsile ehk liiva ärakandumisele kohtades, kus transpordi suund lahkneb.

Läänemere idaranniku avaosa kahes kohas (Kura sääre põhjaosas Leedu rannikul ning Akmenragsi neemest lõunas Läti rannikul) liiguvad setted kõigil aastatel aasta keskmisena lõuna poole ehk päripäeva (joonis 4). Põhimõtteliselt on settevoolu seda aspekti varem kirjeldatud (Ulsts, 1998), kuid peetud ajutiseks ja/või lokaalseks nähtuseks. Settevoolu divergentsikohtades ehk Klaipėda lähistel ja Akmenragsi neeme piirkonnas taganeb rand kiiresti. Akmenragsi tuletorni 1926. aastal ehitatud abihoonest on alles vaid vundament (joonis 5). Klaipėdas tõid lained 2014. aasta sügisel veepiirile enam kui 100 aasta eest uppunud laeva (joonis 5). Konvergentsialal Nida ümbruses on seevastu väga kõrged ja kohati veel aktiivsed luited. Teisel konvergentsialal Akmenragsi neemest paarkümmend kilomeetrit lõunas on rannikumeres samuti palju liiva (Viška, Soomere, 2013).

Akmenragsi neeme juures paiknev püsiv netotranspordi divergentsi ehk lahknemise koht jagab Läänemere idaranniku rannasetete süsteemi kaheks peaaegu sõltumatuks alamsüsteemiks. Ligi 40 aasta vältel (1970–2007) kandsid lained vaid ühel aastal (1984) arvestatava hulga liiva sellest neemest mööda (Soomere, Viška, 2014). Nõnda kujutab Akmenragsi neem endast nähtamatut barjääri, mis tõkestab peaaegu täielikult settematerjali liikumise lõunast põhja poole. Seda tüüpi analüüs ja osaliselt või täielikult isoleeritud rannasetete süsteemide identifitseerimine ja kvantifitseerimine on üks praegusaja rannikuteaduse keskseid ülesandeid (Thom jt, 2018).

Sellele lisandub veel üks joon süsteemis: materjal kandub intensiivselt Kuramaa looderannikult Liivi lahte, kuid vastupidine transport ei ole võimalik. Kui midagi Akmenragsi neemest ebatavaliste tuulte ja lainete suundade puhul mööda kantaksegi, settib see enamasti Kolka neeme juures. Väga tõenäoliselt nimelt nende kahe asjaolu tõttu ongi Liivi lahes ja meie rannikul merevaiku vähe.

KLIIMAMUUTUSED PAISTAVAD RANNIKUL KÕIGE PAREMINI SILMA

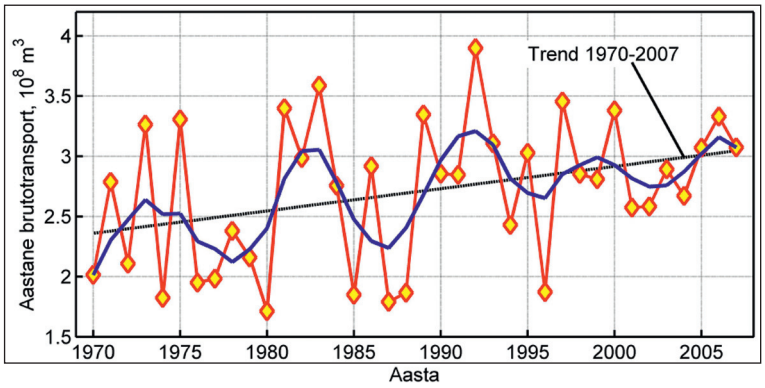
Kõnesoleva meetodiga arvutatud rannikuprotsesside käik peegeldab omapärasel moel muutusi nii lainete kui ka neid tekitavate tuulte ja seega ilmamustrite omadustes. Randa jõudvate lainete omadused kajastavad üldistatud kujul merel puhunud tuulte omadusi. Muutused lainete parameetrites kajastuvad omakorda pikemate ajavahemike vältel mingis kohas aset leidnud idealiseeritud settetranspordis. Suurtes rannalõikudes aasta jooksul edasi-tagasi või kindlas suunas liikunud settematerjali kogus esindab seega üldistatud pilti terves regioonis toimunud protsessidest.

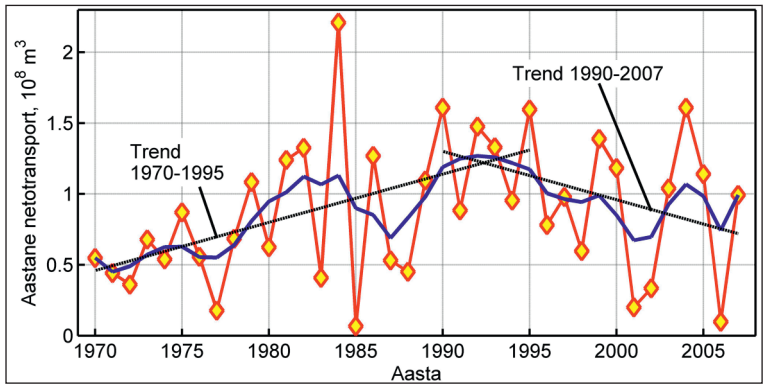
Esmase kuvandi Läänemere lainetuse muutustest annab kogu uuringualal 38 aasta jooksul aset leidnud brutotranspordi teisenemine (joonis 6). See lainete tööd iseloomustav suurus on selgelt (statistiliselt usaldusväärselt 95 protsendi tasemel) kasvanud (Soomere jt, 2015). Selline trend on teatavas mõttes loomulik, kuna näiteks Utö saarel mõõdetud aasta keskmise tuule kiirus on samuti selgelt kasvanud (Räämet, Soomere, 2011). Nõnda võiks arvata, et tegemist on kogu Läänemere idaosa lainekõrguste järjepideva kasvamisega.

Summaarse netotranspordi ajaline käik (joonis 6) näitab aga midagi märksa huvitavamat. Mõlemas indikaatoris on enam-vähem sünkroonsed 10–15-aastase tsükliga rütmilised muutused. Netotranspordi intensiivsus kasvas (seejuures statistiliselt usaldusväärselt 95 protsendi tasemel) aga vaid kuni 1980. aastate lõpuni. Alates 1990. aastast on netotransport hoopis kahanenud. Kahaneva trendi statistiline usaldusväärsus on veidi madalam (89 protsendi nivool, Soomere jt, 2015).

Selline asjade käik peegeldab päris kindlasti teatavat olulist muutust kogu Läänemere tuulte ja lainete süsteemis (Soomere jt, 2017). Kõnesolevas mudelis saab brutotransport kasvada ja netotransport kahaneda vaid siis, kui lainelevi suund on muutunud. See tähendab omakorda tugevate tuulte suuna muutumist vähemalt osas tormidest. Hagen ja Feistel (2005) adusid sellist võimalust nende enda välja töötatud Läänemere talvede kliima indeksi WIBIX muutuste alusel. Sama tüüpi muutusele viitas ka geostroofilise tuule alusel simuleeritud lainekõrguste kiire kahanemine Gotlandist lõunas (Soomere, Räämet, 2011; vt ka Soomere, 2013).

Geostroofilise tuule analüüs tõi esile, et 1988/89. aasta sügisel ja talvel asendus Läänemere lõunaosas senine enam-vähem läänest itta suundunud õhuvool idakagu-suunalise vooluga (Soomere, Räämet, 2014; Soomere jt, 2015). Erinevalt „tavapärastest" võrdlemisi aeglaselt aset leidvatest kliimamuutustest toimus see nihe vaid mõne kuu jooksul. Läänemere lõunaosas ei olnud varasem olukord taastunud veel 2007. aastaks. Analoogiline järsk õhuvoolu suuna muutus väisas ka meid 1988. aasta lõpul, kuid Soome lahe laiuskraadidel taastus õhuvoolu





Joonis 6. Aasta summaarse potentsiaalse brutotranspordi (ülemine joonis) ja netotranspordi (alumine joonis) maht kogu Läänemere idarannikul 1970–2007 (Soomere jt, 2015). Kollased rombid: konkreetsele aastale vastav transport, sinine joon: kolme aasta keskmine, punktiirjooned: lineaarsed trendid.

algne suund juba 1994. aastal (Keevallik, Soomere, 2014).

Sellist tüüpi kliimamuutuste üks suuremaid ohtusid on mõne seni stabiilsena püsinud rannaosa intensiivne erosioon. Eestis on sellised rannad (nt Harilaid) inimasustusest kaugel, kuid Läänemere ida- ja lõunarannikul on piirkondi, mida tõenäoliselt ei saa erosiooni eest kaitsta ning mis mingi aja pärast tuleb lihtsalt maha jätta (Harff jt, 2017).

Üks kõige tundlikumaid ja praeguse tuule ning lainetuse kliimaga kõige paremini kohastunud kohti on Kura säär. Aastail 1970–2007 moodustas arvutuslik netotransport seal vaid ligikaudu ühe protsendi brutotranspordist (Viška, Soomere, 2012; Soomere jt, 2017). Teisisõnu, lained liigutasid liiva vaid edasi-tagasi ning liiva ärakanne sellelt pinnavormilt oli tühine. Kui tuul ja lained peaksid süstemaatiliselt pöörduma mistahes suunas, kasvab netotransport kiiresti. Lainelevi suuna pöördumine emmale-kummale poole vaid 10 kraadi võrra võib tähendada kogu Kura sääre kadumist mõnesaja aastaga (Viška, Soomere, 2012).

Siit ka teistpidi huvitav tähelepanek. See pinnavorm on eksisteerinud enam-vähem praegusel kujul juba mitu tuhat aastat. Järelikult on tuulte valdavad suunad ja enam-vähem ka praegune tasakaal eri suundadest puhuvate tuulte vahel püsinud vähemalt sama kaua. Seetõttu võivad kliima modelleerijad täie õigusega eeldada, et Läänemere tuulte muster on statistiliselt statsionaarne ka tulevikus ning et ülal kirjeldatud hüpped tuulte ja õhuvoolude omadustes püsivad maksimaalselt sadakond aastat (Soomere jt, 2017).

Läänemere avaosa suhteliselt sirgetel rannikutel piisab rannasetete süsteemi käitumise peamiste joonte määratlemiseks 3-miilise (5,5 km) lahutus-

võimega andmetest. Eesti rannikul peab analoogiliste arvutuste tegemisel kasutama märksa parema lahutusvõimega lainemudeleid. Meie põhjarannikul toimivad enam-vähem adekvaatselt ligikaudu 500-meetrise sammuga tehtud arvutused. Tallinna lahe kontekstis selgitasid niisugused arvutused, et Russalka juures kasvava ranna liiv pärineb väga tõenäoliselt Maarjamäe-esise mereala põhjast ning et meremüüri nihutamine Reidi tee ehitamise käigus mere poole võib tähendada seda, et see liiv hakkab juba paarikümne aasta pärast üsna nobedasti kanduma Vanasadama sissesõiduteele (Käärd jt, 2016).

LÕPETUSEKS

on meeldiv tõdeda, et tehniliselt võrdlemisi lihtsate arvutuste kaudu oli võimalik jälile saada meie regiooni kliimamuutuste mitmetele eripäradele, aga ka olulisel määral täpsustada Läänemere idaranniku lainete tekitatud settevoolu omadusi ja sisemist struktuuri. Nende teadmistega relvastatuna ei ole mitmed kliimamuutuse aspektid enam hirmutavad, isegi kui nendega kaasnevad suhteliselt suured muutused rannaprotsessides (Harff jt, 2017).

Kuigi seesugustes arvutustes peab võrrandites kirjeldama hulga parameetreid, määrab tegelikult toimuva selline lihtne füüsikaline suurus nagu laineenergia voog. Selle suuruse omadustest sõltub, kui palju laineenergiat peitub meie rannavetes, millised on randade veealuse osa mõõtmed (Soomere jt, 2017a) ja kuidas hakkab rand oma elu elama pärast inimese vahelesegamist (Käärd jt, 2016).

Isegi kui rannasetete omaduste kohta on väga vähe informatsiooni, saab pelgalt laineenergia voo detailide ja rannajoone orientatsiooni alusel üsna täpselt määratleda settevoo sellised praktikas äärmiselt olulised struktuursed omadused nagu suund, suhteline intensiivsus eri rannaosades ja divergentsi- ja konvergentsipiirkonnad, kus vastavalt erosioon ja kuhjumine on kõige intensiivsemad. Kuigi tehtud arvutused ei lükanud ümber klassikalist ettekujutust setete ümberpaiknemise mustrist Läänemere idarannikul, selgus (osaliselt institutsionaalse uurimistoetuse IUT3-33 toetusel) mitu põnevat aspekti, nende seas lihtne selgitus, miks meie kandis on merevaik haruldane.

VIITED

Björkqvist, J. V., Lukas, I., Alari, V., van Vledder, G. P., Hulst, S., Pettersson, H., Behrens, A., Männik, A. 2018. Comparing a 41-year model hindcast with decades of wave measurements from the Baltic Sea. – Ocean Engineering, 152, 57–71.

Cox, R., Zentner, D. B., Kirchner, B. J., Cook, M. S. 2012. Boulder ridges on the Aran Islands (Ireland): Recent movements caused by storm waves, not tsunamis. – Journal of Geology, 120 (3), 249–272.

Dean R. G., Dalrymple, R. A. 1991. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. World Scientific.

Dean R. G., Dalrymple, R. A. 2002. Coastal Processes with Engineering Applications. Cambridge University Press, Cambridge.

Deng, J. 2013. Modelling of coastal morphogenesis – past and future projection (examples from the southern Baltic Sea). PhD thesis. Szczecin University.

Didenkulova, I. 2011. Lainepõhised ohud rannavööndis. – Soomere, T., Nõges, T. (toim). Teadusmõte Eestis VII. Meri. Järved. Rannik. Eesti Teaduste Akadeemia, Tallinn, 103–115.

Eberhards, G. 2003. The Sea Coast of Latvia (Morphology. Structure. Coastal Processes. Risk Zones. Forecast. Coastal Protection and Monitoring). University of Latvia, Riga.

Eberhards, G., Lapinskis, J. 2008. Processes on the Latvian Coast of the Baltic Sea. Atlas. University of Latvia, Riga.

Eelsalu, M., Org, M., Soomere, T. 2014. Visually observed wave climate in the Gulf of Riga. – The 6th IEEE/OES Baltic Symposium Measuring and Modeling of Multi-Scale Interactions in the Marine Environment, 26–29 May, Tallinn, Estonia. IEEE Conference Publications, doi: 10.1109/BALTIC.2014.6887829

Hagen, E., Feistel, R. 2005. Climatic turning points and regime shifts in the Baltic Sea region: The Baltic winter index (WIBIX) 1659–2002. – Boreal Environment Research, 10 (3), 211–224.

Harff, J., Deng, J., Dudzińska-Nowak, J., Fröhle, P., Groh, A., Hünicke, B., Soomere, T., Zhang, W. 2017. What determines the change of coastlines in the Baltic Sea? – Harff, J., Furmańczyk, K., von Storch, H. (eds). Coastline Changes of the Baltic Sea from South to East. Past and Future Projection. Springer, Cham, Šveits, 15–35.

Keevallik, S., Soomere, T. 2014. Regime shifts in the surface-level average air flow over the Gulf of Finland during 1981–2010. – Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 63 (4), 428–437.

Komar, P. D., Gaughan, M. K. 1972. Airy wave theory and breaker wave height prediction. – Proceedings of the 13th Conference on Coastal Engineering, 10–14 July, 1972, Vancouver. ASCE, New York, 405–418.

Knaps, R. 1966. Sediment transport near the coasts of the Eastern Baltic. – Development of Sea Shores Under the Conditions of Oscillations of the Earth's Crust. Valgus, Tallinn, 21–29.

Käärd, A. Valdmann, A., Eelsalu, M., Pindsoo, K., Männikus, R., Soomere, T. 2016. Preventive management of undesired changes in alongshore sediment transport in planning of waterfront infrastructure. – Brebbia, C. A., Galiano-Garrigos, A. (eds). Sustainable City 2016. WIT Press, Ashurst, Southampton, UK, 419–430. (WIT Transactions on Ecology and the Environment; 204).

Larson, M., Hoan, L. X., Hanson, H. 2010. Direct formula to compute wave height and angle at incipient breaking. – Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 136, 119–122.

Pindsoo, K., Eelsalu, M., Soomere, T., Tõnisson, H. 2014. An estimate of the impact of vessel wakes on coastal processes: A case study for Aegna, Estonia. – The 6th IEEE/OES Baltic Symposium Measuring and Modeling of Multi-Scale Interactions in the Marine Environment, 26–29 May, 2014, Tallinn, Estonia. IEEE Conference Publications, doi: 10.1109/BALTIC.2014.6887859

Räämet, A., Soomere, T. 2011. Spatial variations in the wave climate change in the Baltic Sea. – Journal of Coastal Research, Special Issue 64, 240–244.

Räämet, A., Suursaar, Ü., Kullas, T., Soomere, T. 2009. Reconsidering uncertainties of wave conditions in the coastal areas of the northern Baltic Sea. – Journal of Coastal Research, Special Issue 56, 257–261.

Služenikina, J., Männik, A. 2016. Impact of the ASCAT scatterometer winds on the quality of HIRLAM analysis in case of severe storms. – Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 65 (3), 177–194.

Soomere, T. 2007. Pirita ranna liivade liikumised – mudelid ja tegelikkus. – Verš, E., Amon, L. (toim). Mudelid ja modelleerimine. Eesti Looduseuurijate Selts, Tartu, 70–76. (Schola Geologica; 3).

Soomere, T. 2011a. Läänemere lainekliima Eesti ranniku kontekstis. – Soomere, T., Nõges, T. (toim). Teadusmõte Eestis VII. Meri. Järved. Rannik. Eesti Teaduste Akadeemia, Tallinn, 69–82.

Soomere, T. 2011b. Preventiivsed meetodid ranniku kaitseks mere sisemise dünaamika abil. – Soomere, T., Nõges, T. (toim). Teadusmõte Eestis VII. Meri. Järved. Rannik. Eesti Teaduste Akadeemia, Tallinn, 197–211.

Soomere, T. 2013. Teaduspreemia tehnikateaduste alal uurimuste tsükli „Merelt lähtuvate ohtude

kvantifitseerimine ja minimeerimine Läänemere ranniku kontekstis“ eest. – Eesti Vabariigi teaduspreemiad 2013. Eesti Teaduste Akadeemia, Tallinn, 64–115.

Soomere, T. 2014. Merelt lähtuvate ohtude kvantifitseerimine ja minimeerimine Läänemere ranniku kontekstis. – Tallinna Tehnikaülikooli aastaraamat 2013. TTÜ kirjastus, Tallinn, 170–190.

Soomere, T. 2016. Nähtav transport ja nähtamatud tõkked Läänemere idarannikul. – Nemliher, R., Nirgi, T., Amon-Veskimeister, L. (toim). Meri. Eesti Loodusuurijate Selts, Tartu, 15–23. (Schola Geologica; 12).

Soomere, T., Keevallik, S. 2001. Anisotropy of moderate and strong winds in the Baltic Proper. – Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Engineering, 7, 35–49.

Soomere, T., Räämet, A. 2011. Spatial patterns of the wave climate in the Baltic Proper and the Gulf of Finland. – Oceanologia, 53 (1-TI), 335–371.

Soomere, T., Räämet, A. 2014. Decadal changes in the Baltic Sea wave heights. – Journal of Marine Systems, 129, 86–95.

Soomere, T., Viška, M. 2014. Simulated sediment transport along the eastern coast of the Baltic Sea. – Journal of Marine Systems, 129, 96–105.

Soomere, T., Bishop, S. R., Viška, M., Räämet, A. 2015. An abrupt change in winds that may radically affect the coasts and deep sections of the Baltic Sea. – Climate Research, 62, 163–171.

Soomere, T., Männikus, R., Pindsoo, K., Kudryavtseva, N., Eelsalu, M. 2017a. Modification of closure depths by synchronisation of severe seas and high water levels. – Geo-Marine Letters, 37 (1), 35–46.

Soomere, T., Viška, M., Pindsoo, K. 2017b. Retrieving the signal of climate change from numerically simulated sediment transport along the eastern Baltic Sea coast. – Harff, J., Furmańczyk, K., von Storch, H. (eds). Coastline Changes of the Baltic Sea from South to East. Past and Future Projection. Springer, Cham, Šveits, 327–361.

Zaitseva-Pärnaste, I., Soomere, T. 2013. Interannual variations of ice cover and wave energy flux in the north-eastern Baltic Sea. – Annals of Glaciology, 54 (62), 175–182.

Thom, B. G., Eliot, I., Eliot, M., Harvey, N., Rissik, D., Sharples, C., Short, A. D., Woodroffe, C. D. 2018. National sediment compartment framework for Australian coastal management. – Ocean & Coastal Management, 154, 103–120.

Tõnisson, H., Suursaar, Ü., Kont, A., Orviku, K., Rivis, R., Szava-Kovats, R., Vilumaa, K., Aarna, T., Eelsalu, M., Pindsoo, K., Palginõmm, V., Ratas, U. 2014. Field experiments with different fractions of painted sediments to study material transport in three coastal sites in Estonia. – Journal of Coastal Research, Special Issue 70, 229–234.

Ulsts, V. 1998. Latvian Coastal Zone of the Baltic Sea. State Geological Survey of Latvia, Riga.

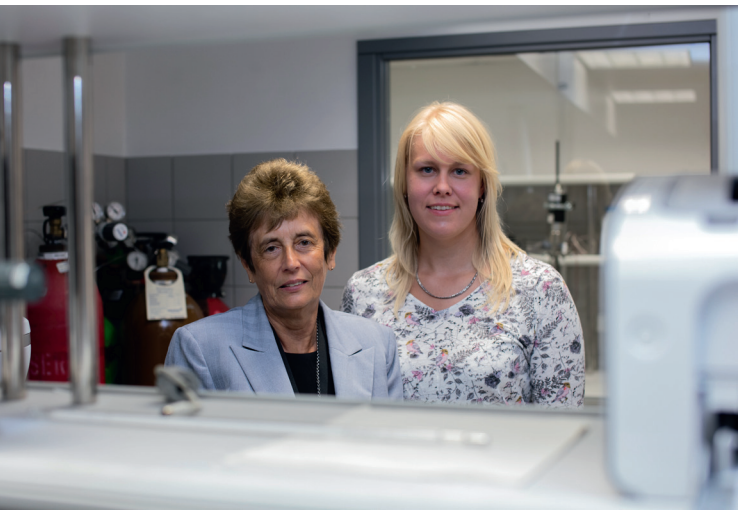
USACE = Coastal Engineering Manual, 2002. Department of the Army. U.S. Army Corps of Engineers. Manual No. 1110-2-1100.

Viška, M., Soomere, T. 2012. Hindcast of sediment flow along the Curonian Spit under different wave climates. – Proceedings of the IEEE/OES Baltic 2012 International Symposium „Ocean: Past, Present and Future. Climate Change Research, Ocean Observation & Advanced Technologies for Regional Sustainability“, 8–11 May, 2012, Klaipėda, Lithuania. IEEE Conference Publications, doi: 10.1109/BALTIC.2012.6249195

Viška, M., Soomere, T. 2013. Simulated and observed reversals of wave-driven alongshore sediment transport at the eastern Baltic Sea coast. – Baltica, 26 (2), 145–156.

21. SAJANDI KESKKONNATEHNOLOOGIA VÄLJAKUTSE – MIKROSAASTEAINED

Marina Trapido (vasakul) ja Eneliis Kattel
Tallinna tehnikaülikooli materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

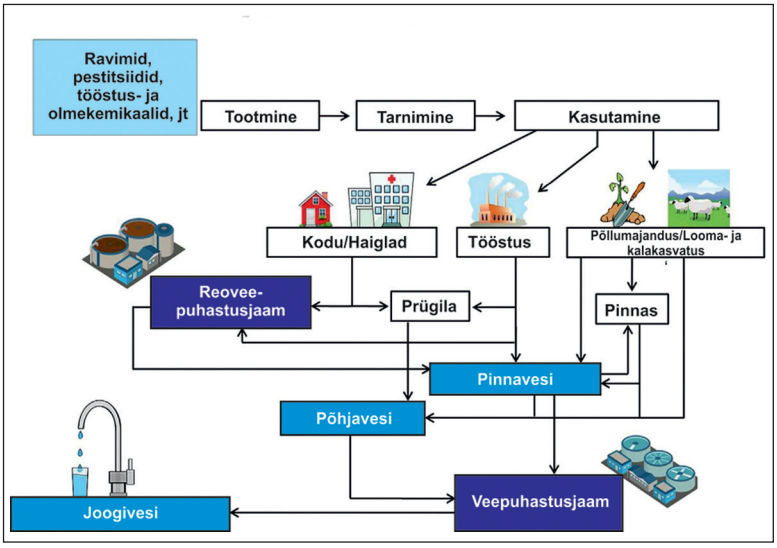


Pidevalt kasvav antropogeenne surve keskkonnale nõuab ühiskonnalt üha rohkem jõupingutusi, et vältida või vähendada saasteainete sattumist keskkonda. Strateegiline viis probleemi lahendamiseks oleks tootmistehnoloogiate radikaalne ümberkujundamine, et minimeerida saasteainete heiteid. Ehkki selline lähenemisviis on kahtlemata vajalik, ei ole võimalik tarvilikke muudatusi ellu viia suhteliselt lühikese aja (mõne aastakümne) jooksul. Seega on nüüd ja lähitulevikus „toruotsa-tehnoloogiate“ (ingl *end-of-pipes technologies*) täiustamine olulise tähtsusega.

Üldises lähenemises saastekontrollile on toimunud olulised muutused. Näiteks 20. sajandi teisel poolel pöörati reoveepuhastuses põhitähelepanu üldorgaanika ja toitainete vähendamisele. Selle tulemusena on võimalik tunduvalt vähendada saastekoormust ning parandada suublate hapnikurežiimi ja ära hoida nende eutrofeerumist. Tavapärases reoveepuhastuses kasutatakse orgaaniliste ühendite eemaldamiseks biokeemilist oksüdatsiooni, mille tulemusena on võimalik reovees esinevaid saasteaineid enam-vähem tõhusalt muundada bioloogiliselt kergesti lagundatavateks ühenditeks. Sellised on näiteks olmereovete koostisosad.

Keemilise sünteesi kiire areng ning nõudluse kasv erinevate kemikaalide järele tööstuses, põllumajanduses, meditsiinis ja igapäevaelus on 21. sajandil kaasa toonud uued keskkonnasaastatuse probleemid. Selliseid ühendeid nagu pestitsiidid, biotsiidid, ravimid, isikliku hügieeni vahendid avastatakse nüüd kogu maailmas üliväikestes kontsentratsioonides (tavaliselt mõni nanogramm liitri kohta ehk ng/l, kuid vahel ka kuni paarsada või isegi mõni tuhat mikrogrammi liitri kohta ehk µg/l) pinna-, põhja- ja isegi joogivees ning neid käsitletakse kui esilekerkivaid mikrosaasteaineid.

Nimetatud ühendite üldisteks omadusteks on kõrge toksilisus ja madal biolagundatavus. Enamik mikrosaasteainetest ei lagune tavalises reovee töötlusprotsessis ning need jõuavad veekogudesse, pinnasesse ja isegi põhjavette. Mikrosaasteained jõuavad inim- ja loomorganismi joogiveega või toiduahela kaudu ning kujutavad endast pikaajalist riski elusloodusele ja inimese tervisele. Nende väliskeskkonda sattumise viisid võtab kokku joonis 1. Mikrosaasteained võivad olla looduslikud või antropogeense päritoluga, kuid suurem osa nendest on inimeste loodud ning nende põhilised allikad on järgmised: (I) tööstus- ja olmereovesi; (II) põllumajanduse, loomakasvatuse ja akvakultuuri äravool; (III) prügilad; (IV) olme- ja haiglajäätmed (Barbosa jt, 2016).



Joonis 1. Mikrosaasteainete põhilised tekkeallikad ning levi väliskeskkonnas (modifitseeritud, Mompelat jt, 2009; Petrović jt, 2003).

Mikrosaasteainete leviku ja käitumise kohta keskkonnas, samuti ohtude kohta keskkonnale ja inimeste tervisele puuduvad usaldusväärsed andmed (Gavrilescu jt, 2015). Paljude mikrosaasteainete puhul on kindlaks tehtud märkimisväärne kahjulik mõju elusorganismidele ja keskkonnale nende kõrgendatud kontsentratsioonide korral. Madalate kontsentratsioonide puhul, mis on iseloomulikud väliskeskkonnale ning mida on tuvastatud veekogudes, veevoogudes ja joogivees, pole praeguseks täielikult välja selgitatud pikaajalist mõju elusorganismidele. Sellest hoolimata peetakse potentsiaalset ohtu märkimisväärseks isegi väga madalate kontsentratsioonide juures (Schwarzenbach jt, 2010; Seiler, 2002): näiteks võivad ravimite toimel välja areneda resistentsed mikroorganismid, sh patogeenid (Sørum, 2006).

Mikrosaasteainete olemasolu veekogudes, reovees ja põhjavees käsitletakse kiiret lahendust nõudva probleemina Euroopa Liidus ja kogu maailmas (Responding to global challenge…, 2010; Hernando jt, 2011). Mahukasse mikrosaasteainete nimekirja, mille leidumine keskkonnas nõuab kõrgendatud tähelepanu, kuuluvad väga erinevates eluvaldkondades kasutusel olevad keemilised ained: ravimid (kodeiin, ibuprofeen, atsetüülsalitsüülhape, diklofenak, fenoprofeen, diasepaam, propanolool jt), endokriinset talitlust mõjutavad steroidid ja hormoonid (estradiool, estroon, estriool jt), lõhnaained (nitro-, polü- ja makrotsüklilised ühendid), päikesekiirgust ekraneerivad ained (bensofenoon, metüülbensülidiin kamper jt), putukatõrjevahendid (N,N-dietüültoluamiid), erinevad pestitsiidid, antiseptikud (triklosaan, klorofeen), polütsüklilised aromaatsed süsivesinikud (PAH), pindaktiivsed ained (4-nonüülfenool, 4-oktüülfenool, alküülfenool karboksülaadid jt), leegiaeglustid (polübromeeritud difenüül eetrid (PBDE), tetrabromo bisfenool A jt), tööstuslikud lisandid ja ühendid (kelaadid (EDTA); aromaatsed sulfonaadid jt), bensiinilisandid (dialküülestrid, tert-butüülmetüüleeter (MTBE) jt), antioksüdandid (2,6-di-tert-butüül-4-metüülfenool) jt.

Mõne eriti keskkonnaohtliku aine, nt pestitsiidide kasutamine on tänapäeval rangelt piiratud või isegi keelatud. Siiski on suhteliselt keeruline ette kujutada nüüdisaegset elu eespool mainitud keemiliste aineteta (tabel 1). Tänu analüüsitehnika kiirele arengule on vesikeskkonnas ehk reo-, pinna- ja põhjavees praeguseks tuvastatud üle tuhande saasteaine (Bu jt, 2015), mida võib käsitleda mikrosaasteainetena. Areng on toimunud mikrosaasteainete eeldatavate toimet mitteavaldavate kontsentratsioonide (ingl *predicted no effect concentrations*, PNEC) kindlakstegemise ning selle alusel heit- ja joogiveele vastavate piirnormide kehtestamise suunas (Barbosa jt, 2016; Gavrilescu jt, 2015; Luo jt, 2014). Kuigi enamik

Tabel 1. Mikrosaasteainete kategooriad ning keskkonda sattumise viisid.

Mikrosaasteainete kategooriad	Tähtsamad alamkategooriad	Põhilised allikad	
		Kohalikud	Teised allikad
Ravimid	Antibiootikumid, valuvaigistid, krambivastased ravimid, ainevahetuse regulaatorid, β-blokaatorid	Olmereoveed, haiglate reoveed, loomakasvatuse reoveed ja kalakasvatuse veed	Tööstusreoveed (vastavate ainete tootmisest) ja prügilate nõrgveed
Olmekemikaalid ja hügieenitooted	Lõhnaained, desinfitseerimisained, UV-filtrid, putukatõrjevahendid	Olmereoveed	
Steroidhormoonid	Östrogeenid	Olmereoveed, loomakasvatuse reoveed ja kalakasvatuse veed	
Pindaktiivsed ained	Mitteioonsed detergendid	Olmereoveed, tööstusreoveed, pesumajade reovesi	
Tööstuskemikaalid	Plastifikaatorid, tulekustutusvahendid	Olmereoveed (toodetest lekkimine) ja reoveed kemikaalide tootmisest	
Pestitsiidid	Insektitsiidid, herbitsiidid, fungitsiidid jm	Olmereoveed, reoveed nende tootmisest ja kasutamisest, põllumajanduses tekkivad nõrgveed	

vees määratud mikrosaasteainete kontsentratsioonidest jääb hetkel teadaolevatele toimet mitte avaldavatele kontsentratsioonidele alla, ei ole piiratud andmete tõttu nende väga madalate kontsentratsioonide mõju inimesele ja teistele elusolenditele päris selge. Veel vähem on teada mitme mikrosaasteaine samaaegsest mõjust ning eriti võimalikest võimendusefektidest. Mõnes piirkonnas ulatuvad üksikute mikrosaasteainete kontsentratsioonid pinnavees 50–1000 µg/l ja põhjavees 3–4 µg/l (Luo jt, 2014) ning ületavad seega eeldatavaid toimet mitteavaldavaid kontsentratsioone. Arvatakse, et mõne mikrosaasteaine puhul on joogiveega inimorganismi sattumise tee vähem tähtis, võrreldes näiteks toidu ja kosmeetikaga (Enault jt, 2015). Siiski jääb tõhus vee/reovee puhastamine nende ainete levikule oluliseks barjääriks ja sellele on pühendatud nii teadusuuringud kui ka seadusandjate üha suuremad jõupingutused rangete keskkonnanormide kehtestamiseks. Selleks on vaja uusi algatusi teaduslikul, tehnoloogilisel ja poliitilisel tasandil.

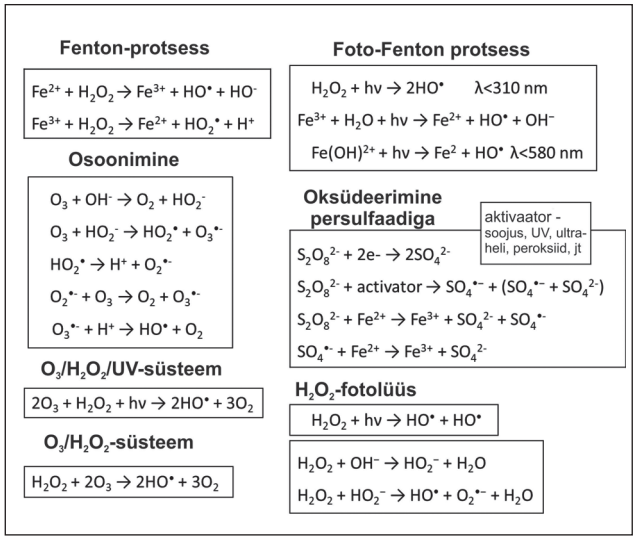
Mikrosaasteained satuvad väliskeskkonda nende tootmisel, kasutamisel olmes, tööstuses, põllumajanduses ning märkimisväärsed kogused jõuavad vesikeskkonda ka heitvee koostisosadena (Bueno jt, 2012; Reemtsma jt, 2006). Põhiliseks probleemiks on paljude mikrosaasteainete madal biolagundatavus ehk mikroorganismide vähene võime neid lagundada nii biopuhastuse käigus kui ka looduses isepuhastusprotsesside käigus, mis võib omakorda põhjustada kontsentratsioonide suurenemist toiduahelates ja nende akumuleerumist põhja-

setetes. Tavapärast biopuhastust kasutatavates reoveepuhastusjaamades on mikrosaasteainete eemaldamisel täheldatud suurt erinevust (6–100 protsenti), kuid enamikul juhtudest jääb efektiivsus alla 70 protsendi (Luo jt, 2014). Suurem osa eemaldamisest pole seotud mitte mikrosaasteainete lagundamisega, vaid nende sidumisega biomudasse. Membraanbioreaktorite kasutamise puhul, kus aktiivmudaga biopuhastus on kombineeritud membraaneraldusega, mis on maailmas uus ja kiiresti arenev trend, jääb mikrosaasteainete eemaldamine olenevalt ainest 20 ja 90 protsendi vahele ning on tavaliselt mõnevõrra kõrgem võrreldes tavapärase biopuhastusega (Barbosa jt, 2016; Enault jt, 2015).

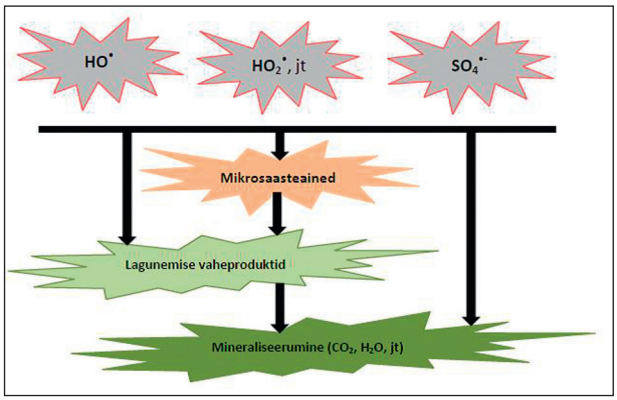
Madala biolagundatavuse tõttu pole mikrosaasteainete kõrvaldamine reoveest tavalise biopuhastuse käigus vajalikul määral võimalik, selleks tuleb skeemi lisada täiendav töötluse aste. Selleks võivad olla nii keemilised meetodid (oksüdatsioon või taandamine, mis viivad sihtkomponendi lagunemiseni) või füüsikalised meetodid (näiteks adsorptsioon, mis viib saasteaine veest tahke kandja pinnale). Käimas on vastavate protsesside teadusuuringud ning tehnoloogiate rakendamine katseseadmetel ja töötavates reoveepuhastusjaamades. Praktikas on rakendatud põhiliselt kaht protsessi – aktiivsöeadsorptsiooni ja keemilist oksüdatsiooni osooniga (Hernandez-Leal jt, 2011; Reungoat jt, 2012; Altmann jt, 2014). Esimese puhul toimub saasteainete siirdumine veest aktiivsöele ning teise puhul ainete keemiline lagundamine.

Vee ja reovee keemiliste töötlusmeetodite areng on viinud uute tehnoloogiliste protsesside – süvaoksüdatsiooniprotsesside (ingl *advanced oxidation processes*) – väljatöötamiseni vee, õhu ja pinnase puhastamiseks (Parsons, 2004; Gogate, Prandit, 2004a, b). Süvaoksüdatsiooniprotsessid põhinevad äärmiselt aktiivsete hüdroksüülradikaalide ($HO^{\bullet}$) genereerimisel, mis reageerivad peaaegu mitteselektiivselt ja väga kiiresti orgaaniliste saasteainetega. Peale selle on leitud, et süvaoksüdatsioonisüsteemides kulgeb arvukalt reaktsioone ning peale $HO^{\bullet}$ osalevad nendes veel teised aktiivsed radikaalid (joonis 2). Siia kuuluvad sellised protsessid nagu katalüütiline osoonimine, Fentoni reaktiiv ja selle modifikatsioonid, fotolüütilised ja fotokatalüütilised protsessid, oksüdeerimine peroksü-ühenditega, töötlemine ultraheliga jt. Tänu nende võimele saasteaineid täielikult mineraliseerida (ehk muundada veeks, süsihappegaasiks ja teisteks lihtsateks anorgaanilisteks aineteks) nimetatakse süvaoksüdatsiooniprotsesse 21. sajandi veetöötlusprotsessideks (ingl *water treatment processes of the 21st century*). Süvaoksüdatsiooniprotsessid ei ole aga universaalne lahendus, kuna erinevad protsessid võivad saasteaineid erineva kiirusega lagundada, sõltuvalt reaktsioonisüsteemi parameetritest, ning mõned ained on ka nende suhtes püsivad. Nende protsesside üheks uueks rakendusalaks on kujunemas ka mikrosaastainete lagundamine.

Süvaoksüdatsiooniprotsesside kasutamine tundub olevat ainus kompleksne lahendus



Joonis 2. Radikaalide teke erinevates süvaoksüdatsiooniprotsessides.



Joonis 3. Mikrosaasteainete lagundamine HO• toimel.

mikrosaasteainete efektiivseks lagundamiseks (joonis 3), ehkki süvaoksüdatsiooniprotsesside rakendamine praktikas ja nende efektiivsuse määramine ei ole mitmel põhjusel lihtne. Esiteks pole ükski oksüdatsioonimeetod eraldi võetuna universaalne ega kõrge efektiivsusega erinevat liiki saasteainete lagundamisel. Näiteks on selgunud, et osoon, mida kasutatakse laialdaselt joogivee puhastuses, ei ole võimeline lagundama selliseid mikrosaasteaineid nagu endokriinse toimega preparaadid ja ravimid. Teiseks sõltub süvaoksüdatsiooniprotsesside efektiivsus suurel määral keskkonnast (looduslik vesi, saastatud vesi või pinnase maatriksi kvaliteet), mille toimet tänapäeval täielikult veel ei mõisteta. Ja lõpuks, süvaoksüdatsiooniprotsesside rakendamisel tuleb alati arvesse võtta nende seadmete installatsiooni ja ekspluatatsiooni maksumust.

Uurimistöö Tallinna tehnikaülikooli keskkonnatehnoloogia laboris on pühendatud erinevate süvaoksüdatsiooniprotsesside mehhanismide ja rakendatavuse uuringutele, et laiendada nende kasutamist keskkonnakaitses uute esilekerkivate mikrosaasteainete eemaldamiseks. Teadustöö arenes järgmiselt: uutele saasteainete klassidele suunatud uuringud, nende lagunemismehhanismide ja vaheproduktide määramine; uute oksüdatsioonisüsteemide, ultraviolettkiirguses (UV-kiirguses) ja nähtavas valguses aktiivsete katalüsaatorite uurimine ning oksüdatsiooniprotsesside edasise aktiveerimise ja kiirendamise võimaluste uurimine; reaktsioonikeskkonna (maatriksi) mõju hindamine (looduslik vesi, reovesi, radikaalide püüdjate olemasolu jt) mikrosaasteainete lagunemise efektiivsusele; süvaoksüdatsiooniprotsesside kombineerimine teiste puhastusprotsessidega, et saavutada väiksemate kuludega maksimaalset puhastusefekti.

Tegeleti erineva päritolu ja omadustega orgaaniliste mikrosaasteainetega, mida on väliskeskkonnas tuvastatud üle kogu maailma, sh ka Eestis: ravimitega, sh antibiootikumid (sulfametoksasool, doksütsükliin, amoksütsilliin, sulfametisool, levofloksatsiin), mittesteroidsed põletikuvastased ravimid ja valuvaigistid (ibuprofeen, diklofenak ja naprokseen ning kortikosteroidne prednisoloon); pestitsiididega (diuroon ja alakloor); endokriinsüsteemi kahjustava nonüülfenooliga; väga toksiliste ja kantserogeensete polüklooritud bifenüülidega ning toksiliste fenoolidega; kloori sisaldavate orgaaniliste ühenditega (klorofeen, p-diklorobenseen, klorotümool, p-kloro-m-kresooli, 2,4,6-trikloorfenool) ning võrdlemisi uue mikrosaasteaine, sünteetilise magusainega (atsesulfaam). Nende lagundamiseks rakendati erinevaid süvaoksüdatsioonitehnoloogiaid vees, heitvees, reovees ja pinnases (Trapido jt, 2014; Kattel jt, 2017; Dulov jt, 2013; Epold jt, 2012; Viisimaa jt, 2013). Mikrosaasteainete lagundamiseks kasutati erinevaid oksüdatsiooniprotsesse ja -süsteeme, uuriti reaktsioonikineetikat ja -mehhanisme, reaktsioonikeskkonna mõju protsesside kulgemisele; tuvastati laguprodukte ning hinnati protsessides tekkinud laguprodukte keskkonnatoksikoloogia vaatevinklist. Selline kompleksne lähenemine võimaldas pakkuda kõige tõhusamat tehnoloogiat erinevate mikrosaasteainete lagundamiseks. Uuringute tulemused on teoreetiliseks aluseks süva-

oksüdatsiooniprotsesside juurutamisel mikrosaasteainete kõrvaldamiseks.

Fenton-protsess on süvaoksüdatsiooniprotsessidest üks tõhusam ja lihtsalt teostatavam ning seetõttu ka madala maksumusega, kuna hüdroksüülradikaalide tekkeks on selle protsessi puhul vaja ainult vesinikperoksiidi ja rauasoola ning happelist keskkonda ($pH < 5{,}5$). Paljude uuritud mikrosaasteainete lagundamiseks oli see efektiivne, kuid mõne ravimi (nt ibuprofeeni, levofloksatsiini, diklofenaki) ja sünteetilise magusaine atsesulfaami täielikuks lagundamiseks vajalikud oksüdandidoosid olid suured ja lagunemise kiirus üsna madal. Looduslikus ja reovees olevad lisandid võivad aeglustada lagundamist ja suurendada oksüdandi mitteotstarbelist kasutamist ning seega lagundamiseks vajalike oksüdantide doose. Eelnimetatud ainete efektiivseks lagundamiseks võib edukalt rakendada foto-Fenton protsessi, mis on aga võrreldes tavalise Fenton-protsessiga keerulisem ja kallim. Üheks oluliseks tulemuseks on Fenton-protsessis tekkiva rauasettega seotud probleemi lahendamine, mis saavutati selle oksüdatsioonisüsteemi toimemehhanismide uuringute käigus. Nimelt järelsadestamise käigus tekkinud rauasette protsessi tagasisuunamine taandajate juuresolekul võimaldab odava ja efektiivse Fenton-protsessi jäätmevabalt läbi viia.

Kiiresti arenevaks suunaks süvaoksüdatsiooniprotsesside valdkonnas on oksüdatsioonisüsteemid persulfaadi baasil. Viidi läbi uute oksüdatsioonitehnoloogiate, nimelt aktiveeritud persulfaadi rakendatavuse uuringud mikrosaasteainete lagundamiseks vesikeskkonnas (sealhulgas heitvees ja põhjavees). Võrreldi erinevate persulfaadi aktiveerimismeetodite, nagu näiteks UVC- ja UVA-kiirguse, vesinikperoksiidi, leeliselise pH, kahevalentse raua, sidrunhappega kelateeritud kahevalentse raua ning Fentoni reaktiivi, efektiivsust mikrosaasteainete oksüdeerimisel. Oksüdatsioonimehhanismide uuringute käigus selgus, et kahest süsteemis olevast põhilisest radikaalist – sulfaat- ja

hüdroksüülradikaal – domineerib üks või teine, sõltuvalt persulfaadi aktiveerimise meetodist ja uuritavast ainest. Aktiveeritud persulfaadiga oksüdeerimine osutus eriti perspektiivseks edaspidiseks rakendamiseks orgaaniliste mikrosaasteainete lagundamiseks rauarikaste põhjavete puhastamisel. Võrreldes Fentoni reaktiiviga võimaldas persulfaadipõhise oksüdeerimise rakendamine elimineerida kiiret temperatuuri tõusu ja liigset vahu moodustumist (Epold jt, 2015).

Keemiline oksüdatsioon peroksü-ühenditega osutus perspektiivseks innovaatiliseks tehnoloogiaks erinevate mikrosaasteainete lagundamiseks

jäätmete ladestus- või lekkealade pinnases. Katalüütilisel oksüdatsioonil vesinikperoksiidiga on sageli puuduseks intensiivne eksotermiline reaktsioon, vajadus reguleerida *pH*-d ja oksüdeerija kiire tarbimine. Uute taastamiskemikaalide nagu persulfaadi, perkarbonaadi, kaltsium- ja magneesiumperoksiidide kasutamine võimaldas neid probleeme vältida. Tehti kindlaks, et oksüdeerijate mitte-radikaalilise lagunemise vältimiseks ning mikrosaasteainete samaaegse keemilise ja biokeemilise oksüdatsiooni soodustamiseks tuleks kasutada pikemat töötlemisaega ja mõõdukaid tahkete peroksü-ühendite doose (Bolobajev jt, 2015). Uueks paljutõotavaks pinnase taastamise meetodiks osutus integreeritud meetod – keemiline oksüdatsioon peroksü-ühendite mõõdukate doosidega koos samaaegse biokeemilise oksüdatsiooni ja biopindaktiivsete ainete kasutamisega. Koosmõju tulemusena paranes nii saasteainete lagundamise efektiivsus kui ka pinnase mikroobne hingamine ja aktiivsus, mis näitab, et sellise töötlemise käigus säilivad pinnase mikroorganismid, mis vastutavad biokeemilise oksüdatsiooni eest. Ultraheli ja osoonimise integreerimine keemilise oksüdatsiooni protsessidega (vesinikperoksiidi ja persulfaadi) võimaldas ka tugevasti sorbeerunud saasteainete lagundamist (Goi, Viisimaa, 2015).

Kuigi UV- ja UV/H_2O_2-protsesside suutlikkus erinevaid mikrosaasteaineid eemaldada erineb tunduvalt, võib neid sageli kasutada veepuhastamisel tõhusaks barjääriks mikrosaasteainete leviku tõkestamiseks. Nende rakendatavust mikrosaasteainete lagundamiseks tuleb aga laborikatsetega ja võimalusel ka pilootseadmel tõestada. Seega peaks maatriksi mõju hoolikalt uurima. On teada, et kui vesi on hägune, siis UV-kiirgus ei tungi piisavalt sügavale ning saasteainete lagundamist ja ka mikroorganismide hävitamist ei toimu. Meie uuringud näitasid, et nii ravimite kui ka pestitsiidide lagundamiseks on UV- ja UV/H_2O_2-protsessid väga efektiivsed ning vesinikperoksiidi lisamine lühendab oluliselt lagundamiseks vajalikku aega, suurendab lähteainete mineraliseerimist ja teeb protsessi odavamaks võrreldes tavalise UV-fotolüüsiga. Sellel protsessil on potentsiaal mikrosaasteainete eemaldamiseks vee-/reovee puhastamise käigus (Trapido jt, 2014; Dulov jt, 2013; Epold jt, 2012).

Hüdroksüülradikaalid reageerivad mitteselektiivselt erinevate ühenditega, mistõttu nende protsesside efektiivsus võib suurel määral oleneda vees olevatest teistest lisanditest: nii loodusliku päritoluga lisanditest, näiteks karbonaadid ja bikarbonaadid, kui ka inimtegevuse tagajärjel tekkinutest, mille olemasolu võib aeglustada või mõnel juhul ka kiirendada (katalüüsida) sihtühendite lagunemist. Viimased võivad olla näiteks vees sisalduvad lahustunud rauaühendid. Seega tuleb kindlasti arvestada vees olevate lisandite (nn maatriksi) mõjuga süvaoksüdatsiooniprotsesside praktilise rakendamise puhul. Oleme tõestanud, et kuigi mõne lisandi juuresolekul mikrosaasteainete lagunemiskiirus teatud määral langeb, ei piira see protsesside kasutamist.

Kõik uuritud oksüdatsioonitehnoloogiad tõid kaasa sihtainete rohkem kui 80-protsendilise, enamikul juhtudest 95–99-protsendilise lagunemise. Fenton- ja foto-Fenton protsess, oksüdeerimine aktiveeritud persulfaadiga, töötlemine ultraheliga, fotolüüs ja fotolüüs vesinikperoksiidi lisamisega ning erinevate süvaoksüdatsiooniprotsesside kombineerimine osutusid mikrosaasteainete kõrvaldamisel efektiivseks, olenemata sellest, kas tegu oli puhta veega, loodusliku veega või reoveega. Kuid ükski meetod ei osutunud eelistatavaks tehnoloogiaks kõikide orgaaniliste mikrosaasteainete lagundamiseks, kuna nende efektiivsus sõltus konkreetsest saasteainest, maatriksist (pinnavesi, põhjavesi, reovesi, bioloogiliselt puhastatud heitvesi) ning töötlemistingimustest (oksüdant, reaktsioonikeskkonna pH, oksüdandi ja katalüsaatori kogused, kontaktaeg jm). Meie läbi viidud uuringu tulemuste kohaselt oli

UV-kiirgusel põhinevatel meetoditel kõige suurem potentsiaal erinevate klasside orgaaniliste mikrosaasteainete esindajate eemaldamiseks. Vesinikperoksiidi lisamine suurendas tunduvalt mikrosaasteainete kõrvaldamist võrreldes otsese UV-fotolüüsiga. Üldiselt võib ultraviolettkiirgusega töötlemist soovitada praktiliseks rakendamiseks uuritud orgaaniliste mikrosaasteainete lagunemiseks vees ja reovees. Selline tehnoloogia on keskkonnasõbralik, kuna tegu on üheainsa kemikaaliga, mida tuleb süsteemi lisada ning jäägid lagunevad väliskeskkonnas ohututeks ühenditeks – veeks ja hapnikuks. Kui UV-süsteem on vee/reovee desinfitseerimiseks juba paigaldatud, võib seda laiendada UV/H_2O_2-protsessiks töötlemiskulude olulise suurenemiseta.

Meie uuringud tõestasid, et püsivate ja toksiliste saasteainete eraldamise efektiivsust reoveest ja pinnasest saab suhteliselt mõõdukate kulutuste juures tunduvalt tõsta, kombineerides süvaoksüdatsiooniprotsesse bioloogilise oksüdatsiooniga. Kui süvaoksüdatsiooniprotsesse kasutatakse koos bioloogilise oksüdatsiooniga, on nende ülesandeks lagundada püsivad saasteained biolagunevateks fragmentideks, mis on baktermassi poolt omastatavad. Selline strateegia on tõhus püsivate saasteainete kõrgete kontsentratsioonide puhul, näiteks keemilise sünteesi ja neid aineid sisaldavate preparaatide tootmisest pärinevate reovete puhastamisel.

Kas inimkond on valmis loobuma ravimitest, kodus kasutatavatest kemikaalidest ning pestitsiididest? Kahtlemata on praegu kindel vastus, et ei ole. Aga 21. sajandil tuleb leida lahendusi, et inimesed ja elukeskkond ei oleks mikrosaasteainete kasutamise tõttu ohustatud. Selleks vajalikud keskkonnatehnoloogiad on kiiresti arenemas ning nende seas on üheks prioriteetseks valikuks süvaoksüdatsiooniprotsesside laialdasem kasutamine. Süvaoksüdatsiooniprotsesside uuringud toimuvad intensiivselt ning üle kogu maailma ilmub üha uusi teateid protsesside kommertslikust rakendamisest mikrosaasteainete eemaldamiseks (Hollander jt, 2009; Baig jt, 2010; Bui jt, 2016). Kuid reoveepuhastusjaamadest pärinevad veed ei ole ainsaks mikrosaasteainete leviku põhjuseks. Need saasteained satuvad loodusvette hajareostusena põllumajandusest, loomakasvatusest ja tööstusest. Tõhus reovee töötlemine võib tunduvalt vähendada mikrosaasteainete kontsentratsioone vesikeskkonnas. Selleks on süvaoksüdatsiooniprotsessid väga sobivad, kuna nende peamiseks eeliseks on saasteainete kiire oksüdatsioon ohututeks ühenditeks. Strateegiline lähenemisviis probleemi lahendamiseks hõlmab kindlasti ka meetmeid, mis üldiselt välistavad mikrosaasteainete sattumise väliskeskkonda (tarbimise vähendamine, kemikaalide asendamine vähem kahjulike ühenditega, tõhus olme- ja tööstuskemikaalide ja ravimite jääkide utiliseerimine jne). Siin on väga tähtsal kohal inimeste informeerimine probleemi olemusest.

Tänuavaldus. Tallinna tehnikaülikoolis läbi viidud uuringud eesmärgiga laiendada süvaoksüdatsiooniprotsesside rakendusi keskkonnakaitses prioriteetsete ja uute esilekerkivate mikrosaasteainete eemaldamiseks said teoks tänu Eesti teadusagentuuri institutsionaalsele uurimistoetusele IUT1-7.

VIITED

Altmann, J., Ruhl, A. S., Zietzschmann, F., Jekel, M. 2014. Direct comparison of ozonation and adsorption onto powdered activated carbon for micropollutant removal in advanced wastewater treatment. – Water Research, 55, 185–193.

Baig, S., Houbert, J. M., Ruel, S. M., Esperanza, M., Budzinski, H., Miege, C., Coquery, M. 2010. Ozone disinfection of urban wastewater at full scale – Impact on persistent pollutants. – Proceedings of the Int. Conf. „Ozone & Related Oxidants: Solutions for Emerging Pollutants of Concern to the Water

and the Environment“, Geneva, Switzerland, 298–303.

Barbosa, M. O., Moreira, N. F. F., Ribeiro, A. R., Pereira, M. F. R., Silva, A. M. T. 2016. Occurrence and removal of organic micropollutants: An overview of the watch list of EU Decision 2015/495. – Water Research, 94, 257–279.

Bolobajev, J., Bilgin Öncü, N., Viisimaa, M., Trapido, M., Balcioglu, I., Goi, A. 2015. Column experiment on activation aids and biosurfactant application to the persulphate treatment of chlorophene-contaminated soil. – Environmental Technology, 36, 348–357.

Bu, Q., Luo, Q., Wang, D., Rao, K., Wang, Z., Yu, G. 2015. Screening for over 1000 organic micropollutants in surfake water and sediments in the Liaohe River watershed. – Chemosphere, 138, 519–525.

Bueno, M. J. M., Gomez, M. J., Herrera, S., Hernando, M. D., Aguera, A., Fernandez-Alba, A. R. 2012. Occurrence and persistence of organic emerging contaminants and priority pollutants in five sewage treatment plants of Spain: two years pilot survey monitoring. – Environmental Pollution, 164, 267–273.

Bui, X. T., Vo, T. P. T., Ngo, H. H., Guo, W. S., Nguyen, T. T. 2016. Multicriteria assessment of advanced treatment technologies for micropollutants removal at large-scale applications. – Science of the Total Environment, 563–564, 1050–1067.

Dulov, A., Dulova, N., Trapido, M. 2013. Photochemical degradation of nonylphenol in aqueous solution: The impact of pH and hydroxyl radical promoters. – Journal of Environmental Sciences, 25, 1326–1330.

Enault, J., Robert, S., Schlosser, O., de Thé, C., Loret, J. F. 2015. Drinking water, diet, indoor air: Comparison of the contribution to environmental micropollutants exposure. – International Journal of Hygiene and Environmental Health, 218, 723–730.

Epold, I., Dulova, N., Veressinina, Y., Trapido, M. 2012. Application of ozonation, UV photolysis, Fenton treatment and other related processes for degradation of ibuprofen and sulfamethoxazole in different aqueous matrices. – Journal of Advanced Oxidation Technologies, 15 (2), 354–364.

Epold, I., Trapido, M., Dulova, N. 2015. Degradation of levofloxacin in aqueous solutions by Fenton, ferrous ion-activated persulfate and combined Fenton/persulfate systems. – Chemical Engineering Journal, 279, 452–462.

Gavrilescu, M., Demnerová, K., Aamand, J., Agathos, S., Fava, F. 2015. Emerging pollutants in the environment: present and future challenges in biomonitoring, ecological risks and bioremediation. – New Biotechnology, 32, 147–156.

Gogate, P. R., Pandit, A. B. 2004a. A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions. – Advances in Environmental Research, 8, 501–551.

Gogate, P. R., Pandit, A. B. 2004b. A review of imperative technologies for wastewater treatment II: hybrid methods. – Advances in Environmental Research, 8, 553–597.

Goi, A., Viisimaa, M. 2015. Integration of ozonation and sonication with hydrogen peroxide and persulfate oxidation for polychlorinated biphenyls-contaminated soil treatment. – Journal of Environmental Chemical Engineering, 3, 2839–2847.

Hernandez-Leal, L., Temmink, H., Zeeman, G., Buisman, C. J. N. 2011. Removal of micropollutants from aerobically treated grey water via ozone and activated carbon. – Water Research, 45, 2887–2896.

Hernando, M. D., Rodriguez, A., Vaquero, J. J., Fernandez-Alba, A. R., Garcia, E. 2011. Environmental risk assessment of emerging pollutants in water: Approaches under horizontal and vertical

EU legislation. – Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 41, 699–731.

Hollender, J., Zimmermann, S. G., Koepke, S., Krauss, M., McArdell, C. S., Ort, C., Singer, H., Von Gunten, U., Siegristet, H. 2009. Elimination of organic micropollutants in a municipal wastewater treatment plant upgraded with a full-scale post-ozonation followed by sand filtration. – Environmental Science & Technology, 43, 7862–7869.

Kattel, E., Trapido, M., Dulova, N. 2017. Oxidative degradation of emerging micropollutant acesulfame in aqueous matrices by UVA-induced H_2O_2/Fe^{2+} and $S_2O_8^{2-}/Fe^{2+}$ processes. – Chemosphere, 171, 528–536.

Luo, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Nghiem, L. D., Hai, F. I, Zhang, J., Liang, S., Wang, X. C. 2014. A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. – Science of the Total Environment, 473–474, 619–641.

Mompelat, S., LeBot, B., Thomas, O. 2009. Occurrence and fate of pharmaceutical products and by-products, from resource to drinking water. – Environment International, 35, 803–814.

Parsons, S. 2004. Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment. IWA Publishing, London.

Petrović, M., Gonzalez, S., Barceló, D. 2003. Analysis and removal of emerging contaminants in wastewater and drinking water. – Trends in Analytical Chemistry, 22, 685–696.

Reemtsma, T., Weiss, S., Mueller, J., Petrovic, M., Gonzalez, S., Barcelo, D., Ventura, F., Knepper, T. P. 2006. Polar pollutants entry into the water cycle by municipal wastewater: a European perspective. – Environmental Science & Technology, 40, 5451–5458.

Responding to global challenge – prevention, wise use and abatement. 2010. World Water Week in Stockholm, 5−11 September, 2010, https://www.ircwash.org/sites/default/files/SIWI-2010-WorldConclusions.pdf

Reungoat, J., Escher, B. I., Macova, M., Argaud, F. X., Gernjak, W., Keller, J. 2012. Ozonation and biological activated carbon filtration of wastewater treatment plant effluents. – Water Research, 46, 863–872.

Schwarzenbach, R. P., Egli, T., Hofstetter, T. B., von Gunten, U., Wehrli, B. 2010. Global water pollution and human health. – Annual Review of Environment and Resources, 35, 109−136.

Seiler, J. P. 2002. Pharmacodynamic activity of drugs and ecotoxicology – can the two be connected? – Toxicology Letters, 131, 105−115.

Sørum, H. 2006. Antimicrobial drug resistance in fish pathogens. – Aarestrup, F. M. (ed). Antimicrobial Resistance in Bacteria of Animal Origin. American Society for Microbiology Press, Washington, 213−238.

Trapido, M., Epold, I., Bolobajev, J., Dulova, N. 2014. Emerging micropollutants in water/wastewater: Growing demand on removal technologies. – Environmental Science and Pollution Research, 21, 12217−12222.

Viisimaa, M., Karpenko, O., Novikov, V., Trapido, M., Goi, A. 2013. Influence of biosurfactant on combined chemical-biological treatment of PCB-contaminated soil. – Chemical Engineering Journal, 220, 352−359.

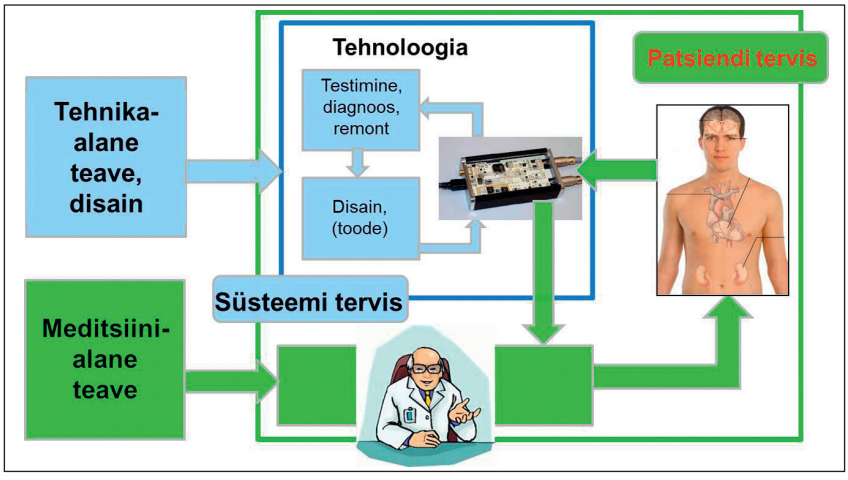
„TERVIS RUUDUS" EHK TIPPKESKUSE CEBE LUGU

Raimund Ubar
Eesti teaduse tippkeskuse CEBE juht

Eesti teadustippkeskuse CEBE (2007–2015) motoks ja lipukirjaks oli „Tervis ruudus", mille tähendus seisnes ühelt poolt inimese tervisele viitamises ja teiselt poolt inimese tervise eest hoolitseva doktori kasutada oleva aparatuuri „tervise" ehk usaldusväärsuse tagamises.

Selle kauni moto elluviimisesse panustasid kolm TTÜ struktuuriüksust: tehnomeedikum (TM, direktor Kalju Meigas), Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut (ELIN, direktor Toomas Rang) ja arvutitehnika instituut (ATI, direktor Margus Kruus), liites ühisesse koostöösse kolm uurimisgruppi, mille kompetentsideks olid biosignaalide interpreteerimine meditsiinitehnikas (TM, prof Ivo Fridolin), missioonikriitilised elektroonsed sardsüsteemid (ELIN, prof Mart Min) ning elektroonikasüsteemide disain ja diagnostika (ATI, prof Raimund Ubar).

Keskuse lipukiri kujundas meie uurimistöö fookuseks inimese tervise ja meditsiini toetamise usaldusväärse tehnoloogia abil. Patsient ja doktor on ravitsüklis haaratud tagasisidega, kus oluliseks lüliks on tehnoloogia – mõõte- ja diagnostikaaparatuur, sensorvõrgud ning madala energiatarbega, kiired miniatuursed eriprotsessorid signaalitöötluseks. Seda tagasisidega haaratud süsteemi – „doktor – patsient – tehnoloogia – doktor" – võiksime nimetada esimese taseme „terviseringiks".



CEBE missioon ja lipukiri „Tervis ruudus".

Tehnoloogia usaldusväärsusest sõltub aga nii arsti pandud diagnoosi täpsus kui sellest tulenev patsiendi tervis. Selle usaldusväärsuse ehk „tehnoloogia tervise“ tagamiseks on vajalik omakorda luua veel üks teise taseme „tervisering“ ehk siis täiendav riist- ja tarkvara, mis kontrollib, testib, diagnoosib ja vajadusel ka automaatselt parandab doktorit teenindavat aparatuuri selle töös.

Niisuguse kahe tsüklilise teineteisega tihedalt seotud „terviseringi“ loomine ehk matemaatilise kujundina „ruutu võetud tervishoiu“ tagamine inimest teenindavates meditsiinisüsteemides tähendaski nii CEBE fookust, missiooni kui ka identiteeti.

CEBE rahvusvaheline nõukoda koos mõne CEBE esindajaga.

TIPPKESKUSE TEGEVUSE ALGUS

CEBE sünnilugu jääb 2008. aastasse, kui sihtasutus Archimedes viis haridus- ja teadusministeeriumi korraldusel läbi konkursi Eesti teaduse tippkeskuste loomiseks. Konkursile laekus 24 taotlust, millest valiti välja seitse keskust, kes hakkasid saama toetust Euroopa struktuurifondide rahast. Üheks õnnelikuks nende seitsme hulgas oli integreeritud elektroonikasüsteemide ja biomeditsiinitehnika tippkeskus CEBE (Centre for Integrated Electronic Systems and Biomedical Engineering).

Tippkeskus avati 18. septembril 2008 TTÜ 90. aastapäeva pidustuste raames, millega ühitati ka esimene CEBE kolme uurimisrühma vaheline teaduskonverents eesmärgiga tutvustada üksteisele oma uurimistöö hiljutisi tulemusi. Ehkki keskuse loomisele oli eelnenud küllaltki konkreetsete eesmärkide seadmine ja ühiste projektide kavandamine, oli see siiski toimunud alles keskuse taotlemise staadiumis ja seetõttu läbi viidud vaid kontseptuaalsel tasandil. Töö alustamiseks tuli nüüd kiiresti pead kokku panna ja konkreetsed tööplaanid paika seada.

Tippkeskusesse, mida hakkas juhtima allakirjutanu, kuulus koos doktorantidega kokku ligi 80 teadlast. Tööd hakkas koordineerima tippkeskuse üheksaliikmeline nõukogu, kuhu kuulusid kolme instituudi direktorid (Margus Kruus, Toomas Rang, Kalju Meigas), kolme sihtfinantseeritava teema juhid (Raimund Ubar, Mart Min, Ivo Fridolin), kaks teadussekretäri (Gert Jervan, Maksim Jenihhin) ja finantskorralduse juht (Alvar Kurrel).

Keskuse töö paremaks koordineerimiseks Euroopas läbiviidavate tippuuringutega loodi keskuse rahvusvaheline nõuandev kogu (RNK) prominentsetest Euroopa teadlastest: prof Bernard Courtois (TIMA laboratoorium) ja prof Ahmed Jerraya (CEA-LETI, MINATEC) Prantsusmaalt, dr Rainer Dorsch (IBM), prof Manfred Glesner (Darmstadti tehnikaülikool), prof Jürgen Bommer (dialüüsikeskus) ja dr Uwe Pliquett (bioprotsesside

ja mõõtetehnika keskus) Saksamaalt, prof Bashir M. Al-Hashimi (Southamptoni ülikool) Inglismaalt, prof Marta Rencz (Budapesti tehnoloogiaülikool) Ungarist ning prof Jaakko Malmivuo (Tampere tehnoloogiaülikool) Soomest.

Keskuse nõukogu koosolekud hakkasid toimuma regulaarselt kord kuus, iga kahe aasta tagant korraldati keskuse ülevaatelisi seminare-konverentse ja iga 1,5 aasta tagant toimusid RNK istungid Tallinnas, millega kaasnesid CEBE konverentsid ja RNK liikmete külalisloengud. Tippkeskuse juhtimisega seotud tegevuste alla kuulusid ka regulaarsed tehnilised koosolekud tippkeskuse partnerite vahel, regulaarsete seminaride läbiviimine partnerite juures, tippkeskuse kodulehe (http://www.cebe.ttu.ee) loomine ja selle hooldamine, tippkeskust tutvustava infomaterjali ning pressiteadete levitamine. Tippkeskus andis kord aastas regulaarselt välja uudiskirja.

CEBE töögruppide ja inimeste omavaheliseks tutvustamiseks ning lähimate sihtide seadmiseks organiseerisime juba esimese kuu jooksul kahepäevase ajurünnaku, mille tulemusena õnnestus välja selgitada hulk teemasid, mis pakkusid huvi rohkem kui ühele uurimisgrupile või nõudsid erinevate gruppide teadmisi. Nende teemade põhjal kavandati tippkeskuses interdistsiplinaarne koostöö ühiste seminaride ja ühisprojektide läbiviimise vormis.

Keskuse eestvedamisel ja organiseerimisel viidi juba esimese poole aasta jooksul läbi kolm rahvusvahelist konverentsi: Balti elektroonika konverents ning kaks Põhjamaade suurüritust – NORCHIP konverents ja Nordic Test Forum. Konverentsid pakkusid hea võimaluse tippkeskuse tutvustamiseks rahvusvahelisele üldsusele ja tippkeskuse töötajatele huvitavate külaliste kutsumiseks.

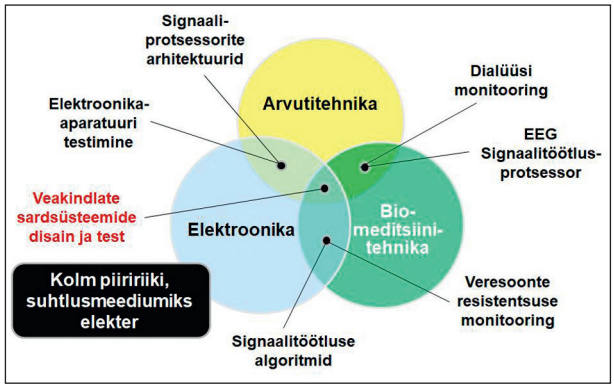
Tippkeskuse CEBE rajamine TTÜ infotehnoloogia teaduskonda lõi nii võimaluse, motivatsiooni kui ka kohustuse ühitada seni eraldi seisnud ja „omaette“ tegutsenud instituutide jõupingutusi rünnata aktuaalseid ja väga olulisi teadusprobleeme nii alus- kui ka rakendusteaduste valdkonnas. Seejuures viitab märksõna „võimalus“ suurenenud teadmiste ja oskuste kriitilise massile, märksõna „motivatsioon“ vihjab tõsiste ja tähtsate probleemide lahendamise suuremale tõenäosusele ning märksõna „kohustus“ viitab vajadusele õigustada teaduse tippkeskuse nime kandmist.

Esmajärjekorras oli sihikule seatud ühendada biomeditsiinitehnika teadlaste biosignaalide interpreteerimise tarkus, elektroonikute uudsed ideed signaalitöötluse algoritmide loomiseks ja arvutitehnika uurijate teadmised eriprotsessorite sünteesi ja ja süsteemide veakindluse alal. Oli mitmeidki teisi huvitavaid ideid, näiteks uurida, kas oleks võimalik ühitada bioloogiliste süsteemide ja tehissüsteemide diagnostikameetodeid, otsida neis sarnasusi, mida saaks üldistada, ületades niiviisi täiesti erinevate teadusvaldkondade piire.

KOLM PIIRIRIIKI

Kuid ega olnudki kerge alustada koostööd kolme uurimisrühma vahel, kelle senistel uurimistöö temaatikatel ei olnud peaaegu mingit ühisosa. Oli loodud keskus, kus partnerid uurisid täiesti erinevaid asju – biosignaale, elektroonikat ja arvutisüsteeme. Need olid kõik iseseisvad „riigid“, kus räägiti täiesti erinevaid „keeli“, kus nii teadusruumid kui ka teaduskultuuri traditsioonid olid erinevad. Seda ahvatlevamatena tundusid aga eelseisvad piiriületused, kus iga seiklus uude ja võõrasse keskkonda pidi kaasa tooma eksootikat ja põnevust. CEBE kujutas endast ühendriiki, kus eesmärgiks oli saanud põimida kokku elus- ja tehisloodust, analoogelektroonikat digitaalsega, disaini ja diagnoosi, sünteesi ja analüüsi.

Biosignaalide, transistoride ja bittide keeled olid küll erinevad, kuid ühendatud osariikides ehk siis uues ühendriigis oli siiski kasutusel „ühisvaluuta“ – elekter, mis vahendas inimrakkude ja -kudede krüpteeritud põnevuslugusid ühtses meedias.



CEBE partnerite kompetentsid ja uurimisvaldkonnad.

CEBE unikaalsus põhines analüüsi ja sünteesi sünergial. Meditsiin diagnoosib elavat loodust – inimest –, kuid vajab selleks tehnilisi seadmeid. Et elusloodust analüüsida ja diagnoosida, tuleb niisiis sünteesida tehisloodust – elektroonilisi mõõtesüsteeme. Et niisugused süsteemid töötaksid veatult, tuleb neidki analüüsida ja diagnoosida. Nii me töötasimegi keskuses: tehnomeedikum analüüsis ja interpreteeris inimese biosignaalidesse peidetud sisu, elektroonikud analüüsisid signaale ja sünteesisid neid algoritmilisse kõnepruuki, arvutitehnika instituudi disainerid analüüsisid algoritme ja sünteesisid neist digitaalarhitektuure, mis aitasid välja arvutada biosignaalide mõistukõne saladusi. Aga neid digitaalsüsteeme tuli omakorda testida ja diagnoosida, et tagada nende töökindlust ja usaldatavust.

Tehismaailm meie ümber toetub arvutitele. Aga vaid tühine osa kogu maailma arvutitest on universaalsed – desktopid ja laptopid. Kõik ülejäänud on rakendusarvutid, mis on kuhugi „ära peidetud“, mida me harilikult ei näe, mis mõõdavad mingeid signaale – rõhku, kiirust, temperatuuri, analüüsivad mõõtetulemusi ja reageerivad signaalidele mingite konkreetsete tegevustega. Need on sardsüsteemid (*embedded systems*). Reaalajas toimuva töö tõttu ei tohi need süsteemid arvutamisel hilineda – õige tulemus, aga hilja, on vale tulemus. Need on pisikesed, mobiilsed ja erinõudeks neile on energia kokkuhoid.

Keskuse praktilisteks eesmärkideks said missioonikriitiliste sardsüsteemide loomine, madala energiatarbega veakindlate eriprotsessorite ja sensorvõrkude projekteerimine, nende rakendamine infohõiveks ja -töötlemiseks biomeditsiinitehnika valdkonnas ning uute meetodite, algoritmide ja tööriistade väljatöötamine süsteemide disaini ja diagnostika automatiseerimiseks. See on kiiresti arenev valdkond, mis põhineb suurt lisandväärtust ja tootlikkuse kasvu pakkuvatel tehnoloogiatel ning peaks seetõttu olema üks prioriteetsemaid T&A suundi Eestis.

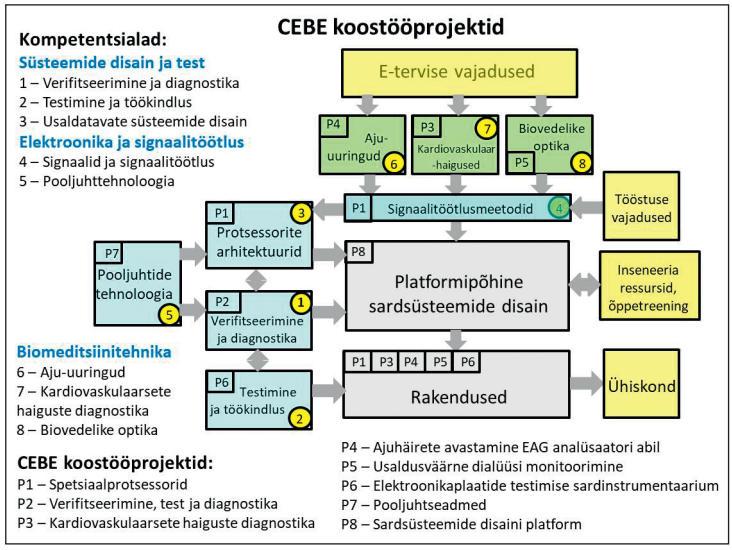
Keskuse partnerid olid üksteisest sõltumatult juba aastaid viljakalt tegutsenud omaenda konkreetsetes valdkondades ja saanud märkimisväärseid teadustulemusi. Samas tahaks ühiskond oma teadlastelt midagi rohkemat kui ainult publikatsioone.

Et näiteks sünniks praktiline rakendus biomeditsiinitehnikas, on lisaks biosignaalidest arusaamise oskusele vaja ka tarkust signaalitöötlemiseks ning teadmisi selleks vajaliku aparatuuri ja tarkvara loomiseks. Eeskätt just praktiliste rakendusteni jõudmiseks loodigi kõne all olev keskus, et ühendada oma teadmisi ja oskusi eri valdkondadest.

CEBE avastas endas kahte tüüpi sünergeetilist ressurssi – sissepoole koonduvat ja väljapoole avarduvat. „Sisesünergia“ pidi tähendama läbimurret mingis ühe partneri konkreetses valdkonnas koostöö toel teise partneriga mingist teisest valdkonnast. Niisuguseks näiteks sai tehnomeedikumi väljatöötatud meetod dialüüsravi doosi hindamiseks optilisel meetodil reaalajas ilma vereproove võtmata. Probleemiks osutusid selle meetodi puhul häired optiliste signaalide töötlemisel. Koostöös arvutitehnika instituudiga õnnestus aga üllatuslikult rakendada elektroonikasüsteemide diagnostikas kasutatavaid ideesid bioprotsesside analüüsil, mille tulemusena saavutati mitte üksnes häirete mahasurumine, vaid loodi ka võimalus

dialüüsiprotsesside kulgemise täpsemaks prognoosimiseks.

„Välissünergia“ all pidasime aga silmas partnerite kompetentside ühendamist tehnomeedikumi teoreetiliste tulemuste praktikasse viimiseks konkreetsete rakendustena biomeditsiinitehniliste seadmete väljatöötamise teel, kaasates elektroonikainstituudi kompetentsi signaalitöötluses ja arvutitehnika instituudi teadmisi eriprotsessorite disaini, verifitseerimise ja testimise alal.



CEBE KOOSTÖÖPROJEKTID

Oma kompetentside ja oskuste ühitamise koordineerimiseks algatati keskuses terve rida koostööprojekte, kus igaühes oli kaasa haaratud mitu töörühma kõigi kolme partneri juurest. Pildil esitatud võrkskeem kujutab funktsionaalseid seoseid kolme valdkonda kuuluva kaheksa uurimisgrupi koos oma erikompetentside ja kaheksa konkreetse koostööprojekti vahel, millega alustati omaalgatuslikult kohe keskuse algperioodil ja mille ülesanded pidevalt täienesid kooskõlas uute saavutatud tulemustega.

Uurimisgrupid ja nende juhid olid:

- verifitseerimine ja diagnostika – Jaan Raik, Raimund Ubar (ATI)
- testimine ja töökindlus – Artur Jutman, Maksim Jenihhin (ATI)
- usaldatavate süsteemide projekteerimine – Peeter Ellervee, Gert Jervan (ATI)
- signaalid ja signaalitöötlus – Mart Min (ELIN)
- pooljuhttehnoloogia – Toomas Rang (ELIN)
- aju-uuringud – Hiie Hinrikus, Maie Bachmann (TM)
- kardiovaskulaarne diagnostika – Kalju Meigas (TM)
- biovedelike optika – Ivo Fridolin (TM).

Uurimisgrupid ja projektipõhised töögrupid täienesid jooksva töö käigus mitmete oma väitekirju kaitsnud doktorantidega, kelle hulgast eriliselt tuleb esile tõsta Maksim Jenihhinit, kellest hiljem kujunes dekaaniks siirdunud prof Jervani asendajana CEBE teadussekretär, Paul Annust, Maie Bachmanni, Sergei Devadzet, Merike Lumani, Kristjan Pilti, Anton Tsertovit jt, kellest arenesid välja vastutustundlikud ja initsiatiivikad uurimistöö liidrid. Samuti tuleb esile tõsta keskusesse lisandunud uue välisprofessori Thomas Hollsteini panust projekti P8 juhtimisel.

KOOSTÖÖPROJEKTID KUI ILMAKAARED CEBE KOMPASSIL

Koostööprojektide toetamiseks kasutati keskuse enda, aga ka mitmeid muid Euroopa projektide ja rahvuslike ETFi grantide vahendeid. Projektide eesmärgiks oli uute, eeskätt praktiliste tulemuste saavutamine, toetudes interdistsiplinaarsest koostööst tulenevale sünergiale. Allpool on toodud koostööprojektide loetelu koos juhtide nimedega.

P1. Rakendusspetsiifilised protsessorid signaalitöötluseks (Peeter Ellervee, Mart Min)

P2. Digitaalsüsteemide diagnostika (Raimund Ubar, Jaan Raik)

P3. Optilised ja bioimpedantsmeetodid kardiovaskulaarses diagnostikas (Kalju Meigas)

P4. EEG analüsaator aju-uuringuteks (Maksim Jenihhin, Hiie Hinrikus)

P5. Neeruasendusravi häirevaba monitooring (Ivo Fridolin)

P6. Elektroonikasüsteemide testimine (Artur Jutman)

P7. Pooljuhtseadiste uurimine (Toomas Rang)

P8. Sardsüsteemide projekteerimise platvorm (Thomas Hollstein)

CEBE koostööprojektide raames läbi viidud teadusuuringud olid fokusseeritud missioonikriitiliste usaldatavate ehk töökindlate sardsüsteemide loomisele. Biomeditsiinitehnika on valdkond, mis esitab kasutatavale tehnoloogiale väga rangeid nõudeid just usaldatavuse ja töökindluse seisukohast. Missioonikriitilisuse nõue on seotud ühelt poolt süsteemide töökiirusega, mis on oluline reaalajas toimuvaks kõrgsageduslike signaalide töötlemiseks, ja teiselt poolt madala energiakuluga, näiteks mobiilsete meditsiiniseadmete puhul. Edukaks tehnoloogiasiirdeks CEBE uurimisgruppide fundamentaaluuringutelt rakendusse oligi koostöö organiseeritud projektipõhiselt. Iga projekti tegevusvoog kulges suunas, mis algas biosignaalide kogumise ja mõõtmisega TMi ja ELINi uurimisgruppides, haaras kaasa signaalitöötlusalgoritmide loomise kõikides CEBE töögruppides ning saavutas kulminatsiooni eriprotsessorite väljatöötamisega ELINi ja ATI uurimisgruppides koos protsessorite verifitseerimise ja testimisprobleemide lahendamisega ATI kompetentse kasutades.

Iga koostööpartner nendes projektides arendas teooriat ning eksperimenteeris oma valdkonnas, aga rakendas saadud tulemusi ühises koostööprotsessis mingi konkreetse eesmärgi saavutamiseks. Kaudseks stiimuliks oli sünergia otsimine ja saavutamine. Selles protsessis avastaski CEBE endas uurimistöö kulgedes kahte tüüpi sünergeetilist ressurssi – „sisse koonduvat“ ja „välja avarduvat“ sünergiat.

CEBE TEADUSTULEMUSED

Tippkeskuse CEBE uurimistöö võib klassifitseerida temaatiliselt kolme tehnikateaduste alasse: biomeditsiinitehnika, signaalitöötlus ja usaldusväärsete elektroonikasüsteemide projekteerimine. Uurimistööd on sidunud interdistsiplinaarne haare terviklike lahenduste ja ühtse platvormi näol biomeditsiinitehnika seadmete projekteerimiseks, kus teoreetilised eripärad on leidnud fookuse CEBE praktilistes rakendustes.

Biomeditsiinitehnika vallas töötati välja uued optilised meetodid neeruasendusravi kvaliteedi operatiivseks hindamiseks, vererõhu mõõtmiseks, varase ateroskleroosi statistikaks ning aju elektriliste signaalide analüüsiks, et avastada depressiooni ja hinnata aju funktsionaalset seisundit.

Signaalitöötluse valdkonda iseloomustavad uued originaalsed meetodid dünaamiliste objektide (töötav südamelihas, kardiovaskulaarsüsteem, hingavad kopsud) omaduste kiireks analüüsiks elektrilise impedantsi (ehk näivtakistuse) mõõtmise abil ning impedants-spektroskoopia rakendused ateroskleroosi varasel avastamisel, metallisulamite omaduste määramisel (nt võltsmüntide tuvastamine), lihakvaliteedi hindamisel ja mujal. Elektroonikasüsteemide projekteerimise alal loodi uusi meetodeid, mudeleid ja tarkvaratööriistu, et tõsta süsteemide usaldusväärsust, verifitseerimise ja diagnostika efektiivsust ning automatiseerida keeruliste testprogrammide koostamist, projekteerimisvigade ülesleidmist ja koguni parandamist.

Alljärgnevalt on toodud läbilõige teadustulemustest, mis on saadud CEBE projektide raames interdistsiplinaarses koostöös partnerite vahel.

Prof Mart Min viib läbi diskussiooni RNK liikmetega. Vasakult Manfred Glesner, Marta Rencz, Raimund Ubar, Rainer Dorsch ja Mart Min.

Projekti P1 juht prof Peeter Ellervee.

Projekt 1. Rakendusspetsiifiliste protsessorite projekti (P1) tulemusena töötati välja meetodeid bioimpedantsi mõõtmiseks vajalike reaalajas töötavate andmekogumis- ja filtreerimisprotsessorite ning signaaligeneraatorite loomiseks. Uurimistöös tuli välja töötada uusi signaalitöötlusalgoritme ning lahendada probleeme sobivaima tasakaalu leidmiseks jõudluse ja ressursinõuete vahel, tagada kõrget mõõtmistäpsust, suurt arvutuskiirust ja minimaalset energiatarvet. Projekti juhid olid Peeter Ellervee ja Mart Min.

Projekt 2. Süsteemide verifitseerimise ja diagnostika projekti (P2) tulemusena töötati välja uut tüüpi elektroonikaskeemide rikete simulaator, mille töökiirus ületas ligi viis korda analoogilisi professionaalseid tööriistu, mida kasutati elektroonika tipptööstuses. Töötati välja ka uusi ja senistest efektiivsemaid meetodeid digitaalskeemide hübriidseks isetestimiseks ja testide optimeerimiseks, süsteemide verifitseerimiseks ja projekteerimisvigade lokaliseerimiseks. Meetodid realiseeriti uute tarkvaratööriistade loomise näol, mis võimaldavad tõsta elektroonikaskeemide projekteerimise kiirust ja kvaliteeti. Projekti juhid olid Jaan Raik ja allakirjutanu.

Projekt 3. Kardiovaskulaarse diagnostika projekti (P3) eesmärgiks oli töötada välja kiiretoimelisi meetodeid diagnoosi kvaliteedi tõstmiseks kardioloogias. Töötati välja uus pulsilaine kiiruse ja kuju analüüsil põhinev optiline meetod vererõhu mitteinvasiivseks löögilt-löögile-mõõtmiseks, kus põhiideeks on arterite jäikuse mõõtmine, mis võimaldab diagnoosida väga varaseid arteri seina mehhaanilisi muutusi. Tehniliselt oli tegu komplekssе ülesandega, mis nõudis erinevate signaalitöötlusvahendite kasutamist optiliste ja elektriliste signaalide ahelates. Ehitati ka terviklik mõõtekompleks arterite erinevate parameetrite uurimiseks nii optilisel kui ka bioimpedantsmeetodil.

Uued meetodid ja algoritmid on panus nii rahvusvahelisse teadusesse kui tervishoidu, kuna võimaldavad tõsta kardioloogilise meditsiiniteenuse kvaliteeti olukorras, kus südame-veresoonkonnahaigused on üks põhilisi surmapõhjuseid nii Eestis

Projektide P2 ja P4 juhid Jaan Raik ja Maksim Jenihhin.

CEBE konverents. CEBE juhtkomitee liikmed (paremalt) Toomas Rang, Kalju Meigas, Ivo Fridolin.

kui ka Euroopas. Uus mõõtekompleks läks kasutusse kõrgvererõhku ja diabeeti põdevate patsientide uurimisel Põhja-Eesti regionaalhaiglas. Projekti juhid olid Kalju Meigas ja Margus Viigimaa.

Projekt 4. Aju seisundi hindamise projekti (P4) eesmärgiks oli välja töötada portatiivne EEG signaalide analüsaator vaimsete häirete hindamiseks. Projekt viidi läbi kolmes järgus: (1) EEG signaalide analüüsi algoritmide ja indikaatorite väljatöötamine aju häirete hindamiseks, (2) algoritmide realiseerimine spetsiaalsete signaalitöötlusprotsessorite kujul ja (3) eriotstarbelise portatiivse EEG analüsaatori väljatöötamine. Väljatöötatud spetsiaalne väikesegabariidiline portatiivne ja lihtsalt käsitatav EEG analüsaator võimaldab leida kasutust aju seisundi hindamisel nii kõrge vastutusastmega töötajate (politseinikud, päästetöötajad, militaartöötajad) kui ka kogu elanikkonna regulaarsel tervisekontrollil.

Projekti tulemuste tähtsust rõhutab see, et kiirenev elutempo on toonud kaasa stressi suurenemise ning aju häirete pideva kasvu. Nii kannatab USA terviseinstituudi andmetel depressiooni all umbes viis protsenti maailma elanikkonnast ja see arv on viimase kümne aastaga 40 korda suurenenud. Aju häireid avastatakse reeglina hilja, kui aset leidnud muutused ajus on juba patsiendi elukvaliteeti oluliselt kahjustanud. Ajuhäirete varase avastamise võimalus tervise regulaarsel kontrollil, näiteks perearsti juures, peaaegu puudub. Projekti juhid olid Hiie Hinrikus, Maie Bachman ja Maksim Jenihhin.

Projekt 5. Neeruasendusravi häirevaba monitooringu projekti (P5) eesmärgiks oli dialüüsravi doosi hindamine optilise meetodiga reaalajas ilma vereproove võtmata. Uurimistöö tulemusena töötati välja uudsed signaalitöötlusalgoritmid, mis võimaldavad maksimaalselt stabiilset ja häirevaba

Prof Hiie Hinrikus koos CEBE RNK liikme prof Jaakko Malmivuoga.

Projekti P5 juht prof Ivo Fridolin.

Testonica Lab direktor Artur Jutman.

dialüüsravi doosi hinnangute saamist dialüüsravi käigus reaalajas optilise monitori abil. Tulemused on võrreldavad traditsiooniliste vereproovide baasil leitud doosi väärtustega, mistõttu uus meetod võimaldabki ravikäigu jälgimisel loobuda vereproovide võtmisest.

Uus meetod aitab parandada ravi kuluefektiivsust ning võimaldab haigla meditsiinipersonalil otsustada, kas dialüüsi efektiivsus vastab patsiendi kliinilisele seisundile ja neeruasendusravi nõuetele, panustades seega oluliselt nii meditsiiniteadusesse kui ka konkreetselt personaalse raviteenuse arengusse. Projekti juhid olid Ivo Fridolin ja allakirjutanu.

Projekt 6. Elektroonikasüsteemide testimise projekti (P6) eesmärgiks oli töötada välja vahendeid elektroonika trükkplaatide testimiseks ja rikete lokaliseerimiseks. Töötati välja nn legoklotsidel põhinev uudne testide sünteesi kontseptsioon, kus testprogrammid struktureeritakse arhiveeritavateks šabloonideks (legoklotsideks) ning automaatne testigeneraator sünteesib nendest klotsidest lõpliku testprogrammi, mis kohandatakse

automaatselt konkreetse plaadi ja konkreetsete testimiseesmärkidega seatud tingimustele.

Kuna elektroonika trükkplaatide testprogrammide koostamine on olnud töö, mida seni polnud õnnestunud automatiseerida, oli see projekt äärmiselt aktuaalne nii teaduslikus kui ka praktilises mõttes. Käsitsitöö on aeglane ja keerukate süsteemide puhul ka vigaderohke, testimisele kuluva aja märgatav vähendamine testide programmeerimise automatiseerimise abil võimaldab aga elektroonikatoodete turule jõudmise kiirendamist ehk siis tootjaettevõttele olulist eelist konkureerivate firmade ees. Projekti juht oli Artur Jutman.

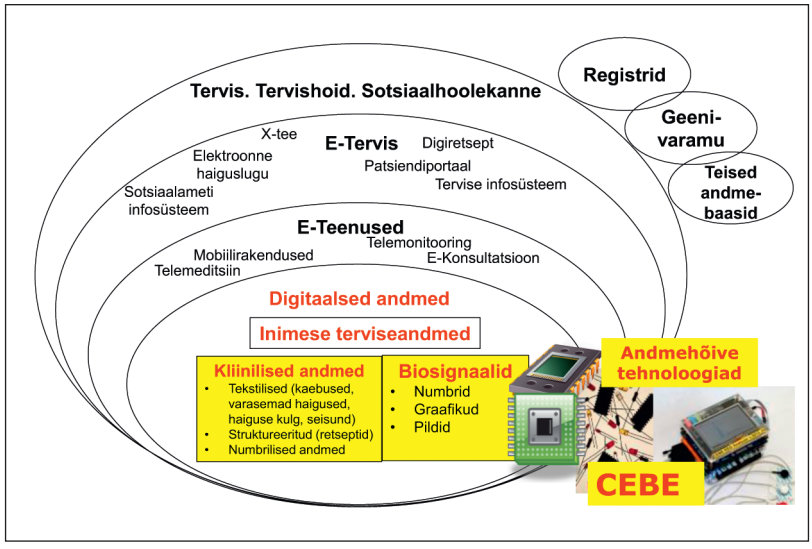
CEBE EESTI-SISESEST KOOSTÖÖST

CEBE eripära peaaegu kõigi teiste Eesti 12 teadustippkeskuse hulgas oli olemuslik interdistsiplinaarsus, kus ühendusid biomeditsiinitehnika, elektroonika ja IT-alased kompetentsid tehnomeedikumist, elektroonika- ja arvutitehnika instituutidest. Kõige olulisemaks keskuse interdistsiplinaarseks rakendusvaldkonnaks kujunes tervishoiule suunatud biomeditsiinitehnika, millele esitatakse väga rangeid nõudeid, nagu ülisuur täpsus, minimaalne energiatarve ja väga kõrge veakindlus. Tänapäevane ja jätkusuutlik tervishoid nõuab nüüdisaegsete digitaalsete tehnoloogiate ja e-Tervise lahenduste rakendamist. Projekti lõpuperioodil organiseeris CEBE Eesti e-Tervise võtmetegijaid kaasates ümarlaua teemal „Tarvilikud tehnikad tervikliku e-Tervise toeks“, kus CEBE tutvustas oma tegevusi ja tulemusi e-Tervise ja personaalmeditsiini võtmes, määratledes end kui konkreetse lisandväärtuse võimalikku allikat praeguse kliinilise meditsiini andmehaldusele kontsentreerunud e-Tervise kontseptsioonile.

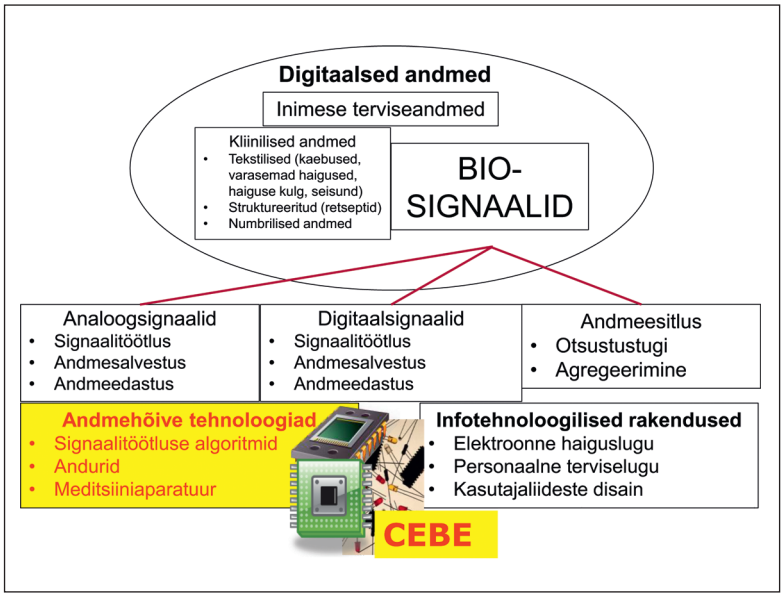
Mõttetalgutel kujunes välja ühine arusaam vajadusest luua Eestis terviklik riist- ja tarkvarakeskkond, mille baasil võiks realiseeruda eluvõimeline ja toimiv e-Tervise kontseptsioon, mis eeldaks tihedat koostööd meedikute ja patsientidega, töötamaks välja innovaatilisi e-Tervise lahendusi. CEBE positsioneerumist selles kontseptsioonis on illustreeritud kahe kõrval oleva skeemiga, kus kollase värviga on eristatud CEBE potentsiaalne roll.

CEBE tegevus TTÜs, aga ka teadus-arendus-keskuses ELIKO ja viimasega kaasatud Eesti firmades, mis on seotud teadusliku uurimistöö ning seniste rakenduslike tulemustega terviseinfo kogumisel sensorite ning sellele järgneva signaalitöötluse ja signaalide interpreteerimise vallas spetsialiseeritud riistvara abil, omas suurt potentsiaali oluliselt täiendada tehnilist baasi ning vähendada lõhet Eestis olemasolevate tehniliste võimaluste ja nende kasutamise vahel.

Elektroonika vallas toimus CEBE koostöö Eesti firmade ja haiglatega peamiselt ELIKO kaudu, mis oli orienteeritud eeskätt rakendus- ja



CEBE positsioneerumine Eesti e-Tervise süsteemis.



CEBE digitaalsete terviseandmete generaatorina.

tööstusuuringutele. Vahetuid uuringuid viidi läbi ka otseses koostöös firmadega, nagu näiteks AS Clifton (elektroonika pooljuhtkomponendid) ja OÜ Smartimplant (südamestimulaatorid ja -monitorid ning kudede analüsaatorid) jt.

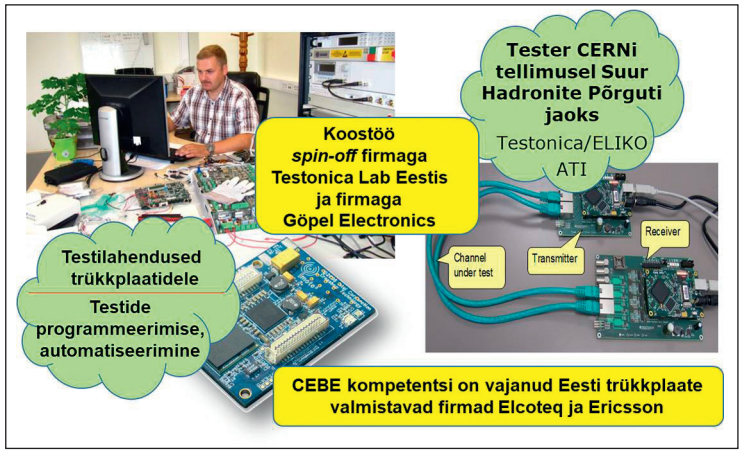
Biomeditsiinitehnika suunal olid CEBE arendustöö vältimatud ja lahutamatud koostööpartnerid Eesti haiglad. CEBE oli astunud tihedasse ja tulemuslikku koostöösse Põhja-Eesti regionaalhaiglaga, mis on Eesti suurim haigla, ja Ida-Tallinna keskhaiglaga. CEBE integreeris oma uurimisgruppidesse meditsiinidoktoreid haiglatest, mis oli oluliseks võtmeks probleemide püstitamisel ja teabesiirdel. Samuti tegime tihedat koostööd mitme Eesti *spin-off* ettevõttega nagu Tensiotrace OÜ ja Optofluid Technologies OÜ. Erialaliitudest, kes olid toeks nii valdkonna teadus- kui õppetöös, tuleb mainida Eesti biomeditsiinitehnika ja meditsiinifüüsika ühingut.

Elektroonikasüsteemide usaldatavuse valdkonnas töötas CEBE kogu oma eksistentsi perioodil tihedalt koos TTÜ *spin-off* firmaga Testonica Lab mitmete koostööprojektide raames nii Eesti kui ka rahvusvahelises mastaabis. Praeguseks on firmast saanud maailmas tunnustatud pioneer ja liider automaatsete sardinstrumentide loomisel elektroonikasüsteemide isetestimiseks, mida võib vaadelda ka kui ühte CEBE kaudset tulemust. Testonica klientideks on maailma tööstusliidrid telekommunikatsiooni valdkonnas, auto- ja lennukitööstuses, kaitse- ja töötlevas tööstuses, tarbe- ja meelelahutuselektroonika, aga ka fundamentaaluuringute valdkonnas (nt koostöö CERNiga). Testonica on toodetele orienteeritud firma, kes müüb litsentse oma tööriistadele üle terve maailma strateegilistele partneritele, eeskätt näiteks firmale Goepel Electronic GmbH. Tänu teadusuuringutel põhinevale intellektuaalsele omandile kuulub firma käibest üle 70 protsendi kõrgteadusmahukatele toodetele.

CEBE koostöö Testonicaga on toimunud IKT programmi raames Archimedese koordineeritavas projektis „Fusetest“. Koostöö ulatus ka TAK ELIKO raamidesse projekti „Test Verification and Diagnosis of Distributed and Embedded Systems“ näol. Märkimisväärne sünergia saavutati koostöös doktorantide kasvatamisel, kus mitmed väitekirja teemad formuleeris Testonica ning firma pakkus doktorantidele ka töökohti.

Aastatel 2011–2013 toimus CEBE koostöö Testonicaga viimase poolt koordineeritud FP7 programmi EUROSTARS raames projektis „Comboard“, mille tulemusena õnnestus luua unikaalne testimise sardinstrumentaariumi tehnoloogia ja viia see uuele kvalitatiivsele tasandile nii efektiivsuse kui ka paindlikkuse mõttes. Aastatel

2010–2012 osales CEBE koos firmaga FP7 projektis „Diamond“, mida koordineeris CEBE teadur Jaan Raik ja kus anti märkimisväärne panus uue standardi IJTAG väljatöötamisel ning selle toetamiseks uute diagnostikalahenduste ja tarkvaraliste tööriistade näol. Samuti koordineeris firma hiljuti lõppenud FP7 projekti „Bastion“, kus üheks partneriks oli CEBE.



Eesti lokaalset majandust silmas pidades on nii Eesti ettevõtetes toodetavate kui ka imporditud süsteemide töökorras hoidmiseks vaja oskusteavet väga keerulise elektroonika testimiseks, rikete diagnostikaks ja parandamiseks, millesse on CEBE nii oma uurimistulemuste kui ka uue kaadri kasvatamise näol andnud märkimisväärse panuse.

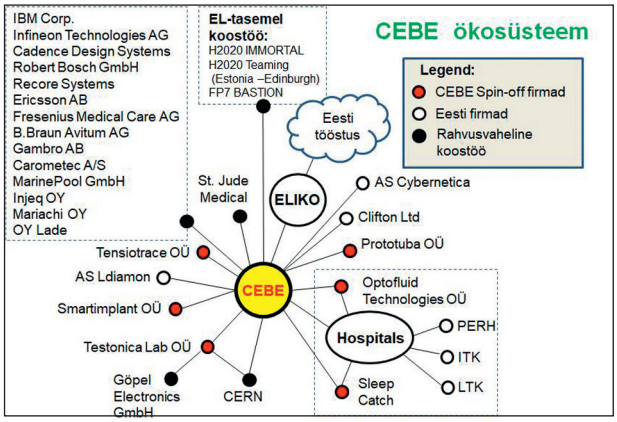
CEBE partner Testonica Lab on praegu Eestis ainus firma, kes tegeleb infotehnoloogia riistvara – trükkplaatide ja süsteemide – testimiseks vajaliku instrumentaariumi ja tehnoloogia väljatöötamisega ning on oma toodetega jõudnud välja maailmaturule. Arvestades äärmiselt kõrget konkurentsi maailmas selles valdkonnas ja seda, et põhiliselt määravad tehnoloogia arengutrende ja -poliitikat suurfirmad, on Testonica läbimurre ja omaenda niši leidmine märkimisväärne saavutus. Eelduseks on siin olnud pikaaegne teadusuuringute kogemus koostöös CEBEga, mille rüpes Testonica Lab on arenenud ja kasvanud. Pooled Testonica Labi inseneridest on olnud ühtaegu CEBE doktorandid, mistõttu teadusuuringud nii CEBEs kui Testonicas toimusidki praktiliselt ühiselt. Sünergial oli kahepoolne efekt: CEBE teadusuuringud leidsid ühelt poolt Testonicas kohe rakendust ja teiselt poolt stimuleerisid Testonica enda arendustöös esile kerkinud uued probleemid uurimistöö arengut CEBE ja Testonica koostöös.

CEBEs viljeldud koostöö Eesti firmadega lõi häid võimalusi interdistsiplinaarseks uurimistööks ja rakendustele suunatud teadusuuringute toetamiseks eesmärgiga arendada innovatilist teadusmahukat ettevõtlust. Teisest küljest, CEBE ja Testonica Labi koostöö on suurepärane näide, kus tudengite varane kaasamine reaalse elu inseneriprobleemidesse tuleb kasuks nii tudengite kõrghariduse parandamisel kui ka ettevõtluse enda edendamisel. Ja arvutustehnika testimine, diagnostika ning arvutisüsteemide usaldatavuse tõstmine on alad, mis on eriti praktilised ja insenerlikku mõtlemist arendavad.

CEBE ÖKOSÜSTEEMI LOOMINE

CEBE visioone kirjeldavaks missiooniks oli arendada teoreetilist baasi ning selle alusel välja töötada ajakohaseid meetodeid missioonikriitiliste süsteemide projekteerimiseks, haarates nii süsteemide arhitektuure, komponente kui ka sensorvõrke, ning rakendada saavutatud tulemusi biomeditsiinitehnikas, energeetikas, toiduainetetööstuses ja mujal. Seejuures lähtuti riiklikust strateegiast „Teaduspõhine Eesti 2007–2013“ ja selle jätkust, Eesti teadus- ja arendustegevuse ning innovatsiooni strateegiast 2014–2020 „Teadmistepõhine Eesti“.

CEBE eripäraks oli interdistsiplinaarsus ja eesmärkideks olid ühelt poolt kõrge teadustase oma kompetentsialadel ning teiselt poolt sünergia kaudu jõuda oluliste rakendusteni. Seitsmeaastase koostööperioodi jooksul saavutati tasakaal



teadusrühmade terviklikus konsortsiumis nii laiahaardelise koostöö intensiivsuse kui ka kitsamate suundadega eriuuringute koordineerimisel. CEBE koguväljundit iseloomustas teadustulemuste kõrgetasemeline publitseerimine, intensiivne leiutiste ja avastuste patenteerimine ning kõrge rahvusvaheline renomee, mille selgeks väljenduseks on terve hulga europrojektide üldkoordinaatori staatus programmide FP7 ja Horizon 2020 raames.

Eesti ühiskonna huvide seisukohast sai CEBE eksistentsi kõige märkimisväärsemaks produktiks ökosüsteem keskmega TTÜs ehk CEBEs, mis koosnes nii rahvusvahelisest kui ka kodumaisest koostöövõrgustikust nii akadeemilises kui ka tööstusmaailmas, kus CEBE-l oli õnnestunud praktilisi tulemusi saavutada ehk koostöös ettevõtetega toodeteni jõuda, ja kus erilisel kohal olid kõik need *spin-off* firmad, mis CEBE rüpes olid sündinud ja tuult tiibadesse saanud.

CEBE ökosüsteem haaras potentsiaalseid koostööpartnereid ettevõtlussfääris tuleviku arenguid silmas pidades ja aitas määratleda CEBE konkreetset nišši ning viidata ka senistele edulugudele ettevõtluse valdkonnas, mõistmaks ühtlasi paremini CEBE olulisust ja perspektiivsust Eesti majandusele.

CEBE partneriteks Eestis on olnud kaks kliinikut, neli haiglat ning rohkem kui kümme firmat.

CEBE ja tema ökosüsteemi rolli formuleerisime järgmiste seoste näol tööstuse ja majandusega nii Eestis kui rahvusvaheliselt kolme sümboolse võtmesõna abil, millised pakkus välja CEBE üks juhtidest professor Toomas Rang.

- MADE-BY-ESTONIA – CEBE teadusloome, uued teadustulemused ja sellega kaasnev teaduse eksport ehk Eestisse toodud rahvusvahelised projektid ja muu koostöö, mis on leidnud rakenduse toodetena välisriikide ettevõtluskeskkonnas
- MADE-IN-ESTONIA – teadustulemused, mis on loodud CEBEs ja ühtlasi ka juurutatud tootmisse Eesti ettevõtetes (nt ELIKOs või teistes firmades) või mis on CEBE tegevuse tulemusena stimuleerinud uute *spin-off* ettevõtete tekkimist
- WELCOME-TO-ESTONIA – CEBE kompetents oma valdkonnas, mis on stimuleerinud uute välisfirmade tuleku Eestisse otseselt koostööle kas CEBEga või CEBEst võrsunud firmadega (nt Ericsson, kes tõi Eestisse oma teadus- ja arendusosakonna), või siis avarduvad uued võimalused CEBE tegevuseks seoses uute firmade, eeskätt tööstusliidrite tulekuga Eestisse (nt IBM Eesti, XILINX Eesti, Telia-Sonera (Elion + EMT), Elisa, Skype jt).

Oma tulevikku nägi tippkeskuse kollektiiv oma seniste tulemuste ja saavutatud kompetentsi panustamises sellesse ökosüsteemi. Väljavõte CEBE senistest märkimisväärsematest rakendustulemustest, mis võiksid Eesti tööstusele tootearenduse aluseks saada, on toodud alljärgnevas tabelis, kus on loetletud CEBEs väljatöötatud tooted, CEBE koostööprojektide numbrid, milliste raames vastav uurimistöö on läbi viidud, ja koostööfirmad, milliste vahetul osalemisel kas toimus või oli planeeritud tootmine. Kavas olnud jätkuprojekt

„CEBE-2“ jäi siiski ellu viimata. Praegu osalevad CEBE partnerid uues laiema ampluaaga IT tippkeskuses EXCITE, mida juhib professor Maarja Kruusmaa.

CEBE rakendusi:

CEBEs väljaarendatud kompetentside oluliseks võimalikuks rakendusvaldkonnaks Eestis on inimesekeskne tervise- ja tervishoiuteenus, mis hõlmab tervise- ja meditsiinidiagnostika andmete standardiseeritud ja struktureeritud kättesaadavust

No	Toote nimetus	CEBE projekt	Koostööfirma
1	Südamestimulaator	P1	St. Jude Medical (USA)
2	Diagnostikasüsteem Turbo-Tester	P2, P6	Litsentseeritud rohkem kui 100 teadus-asutuses ja 40 riigis
3	Signaaliprotsessorite seeria	P1, P2	CEBE uurimistöökeskkond
4	Verifitseerimise ja testimise keskkond APRICOT	P2	
5	QUADRA^{R} – impedants-spektroskoopia mõõteseade	P1	TAK ELIKO, Prototuba OÜ
6	Meditsiiniseade bioloogiliste kudede seisundite analüüsiks	P1	SmartImplant OÜ
7	Holteri monitooringuseadmete tarkvara	P3	Tensiotrace OÜ, Põhja-Eesti regionaalhaigla (PERH)
8	EEG analüsaator	P4	PERH
9	Meditsiiniseade Diasens dialüüsi doosi jälgimiseks	P5	AS Ldiamon, PERH
10	Dialüüsisensor Optofluid Dialysis	P5	Optofluid Technologies OÜ, haiglad (PERH, Linköpingi ülikooli haigla)
11	Mikroprotsessorite diagnostikamudelid	P6	Testonica Lab, Göpel Electronics GmbH (Saksamaa)
12	Sardinstrumentaarium elektroonika-plaatide ja -kiipide testimiseks		
13	Signaalide testimisseade BERT		CERN
14	LPE tehnoloogial põhinevad ülikiired GaAs struktuurid	P7	Ioffe-nimeline füüsika-tehnoloogia instituut (Venemaa), Clifton Ltd

CEBE lõpetamine. Vasakult Margus Kruus, RNK esimees Manfred Glesner, Toomas Rang, Mart Min.

koos infotehnoloogiliste võimalustega andmeid koguda, töödelda ja esitada. Teiseks võimalikuks näiteks on elanike personaalne tervisemonitooring, mis aitaks ennetada riske ja tagada kõrget elukvaliteeti. CEBE nägi oma potentsiaali lahenduste väljatöötamises koostöös e-Tervise lahenduste kasutajatega, tehnoloogia targaks kasutamiseks, mis aitaks riske varakult avastada ning haigeid jälgida, pakkudes personaalseid tervisetehnoloogilisi lahendusi.

CEBE teadlaste saavutatud teadustulemused ja praktilised rakendused koos tehnoloogiasiirdega Eesti tööstusse olid panuseks aidata kaasa Eesti tööstuse konkurentsivõime tõstmisele nii toodete turule jõudmise kiirendamise (*time-to-market*) kui ka toodete kvaliteedi ja usaldatavuse suurendamise teel. Mõjutades Eesti tööstuse konkurentsivõimet teadus-arendustöö võimekuse tõstmise abil infotehnoloogias ja biomeditsiinitehnikas, on CEBE ühtlasi panustanud Eesti sotsiaal-majanduslike probleemide lahendamisse, mis puudutavad igat Eesti kodanikku ja peavad silmas nii tervishoidu, üldist heaolu kui ka infoühiskonda tervikuna.

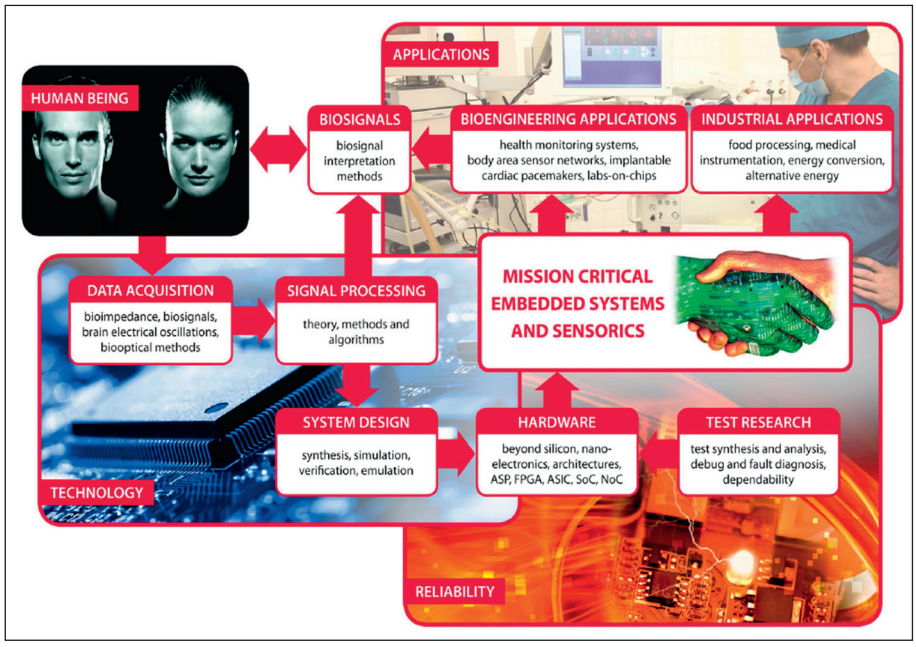
LÕPETUSEKS

Olles juhtinud tippkeskust CEBE, tahan eriliselt rõhutada seda fantastilist elamust, mille võtsime kaasa sellest seitsmest pingelise, aga põneva koostöö aastast. See oli tõeline suur ühisseiklus, mis seisnes üksteise tugevuste kokkupanemises ja igasuguse omavahelise konkurentsi puudumises. Suures üksmeeles töötas CEBE juhtkomitee. Me poleks paljuski suutnud olla nii edukad oma ideede ja ambitsioonide elluviimises, kui meil poleks olnud meie finantskorralduse juhi Alvar Kurreli ennastsalgavat organisatoorset tööd ja toetust, kes hoolitses kogu koormava sidepidamise eest administratiivse „välismaailmaga“ ning maandas kõik ebatasasused ja mured, mis aeg-ajalt tekkisid aruandluses ja muudes bürokraatia labürintides.

See projekt oli akadeemilise vabaduse positiivse toimimise musternäide, kus me ei olnud seotud päevakajaliste „konkreetsete ülesannete“ täitmisega, vaid meid juhtisid üksnes projekti taotluses üles seatud üldisemad eesmärgid ja visioonid, mille suunas liikuda. Kitsendused ja ahelad meie „tegevusvabaduses“ tulenesid vaid teiste majja toodud projektidega seotud kohustustest. CEBE vahendid olid selleks, et nende „muude“ kohustuste täitmist toetada ja seejuures lisaväärtust ehk kõrvalefekti uute CEBE rakenduste näol luua.

CEBE akadeemiline missioon ja roll seisnesidki selles, et anda teadustööga seotud inimestele võimalus haarata hoopis avarama pilgu ja teoga iga muud uurimistöö ülesannet partnerite projektiportfellides ja nõndaviisi tõsta ühelt poolt nende ülesan-

CEBE reklaamposter.



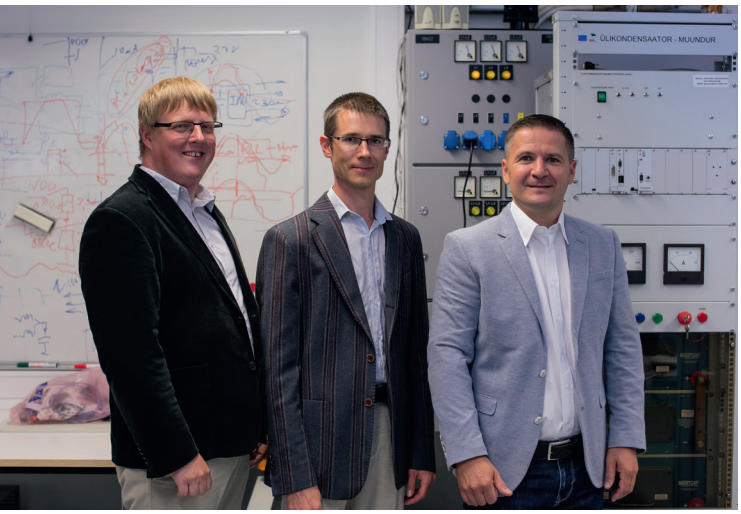
nete täitmise kvaliteeti, aga teiselt poolt näha neid konkreetseid rakenduslikke ülesandeid ka ühe suure katuse all, leida üldistusi ja arendada teooriaid ning jõuda selle kaudu kaalukamate teadustulemusteni kui seda võimaldanuksid üksikud projektid eraldi.

Paraku, teaduses on juba nii, et ühegi üksiku projekti finantsvõimalused ei suuda kunagi katta uurimistöö tegelikke vajadusi, mistõttu püsib CEBE-taoliste toetavate „katuste“ puudumise korral ülikoolimaailmas ka pidev oht, et üksikutest projektidest ja lepingulistest töödest võivad kujuneda mitte niivõrd teaduslikud uurimisaktsioonid, vaid teaduse mõttes vähem ambitsioonikad tehnilised tellimustööd. Niisugune olukord ülikoolis, kus professori põhiülesandeks peab kujunema „ülikooli raha toomine“ oma uurimisgrupi ülalpidamiseks ettevõtlusturult saadud tellimustööde abil ehk sealsete „päevaülesannete“ täitmiseks, tähendaks koos akadeemilise, vabaduse kadumisega ka tõeliselt akadeemilise uudishimul põhineva teadustöö märkamatut hääbumist.

Kõike ülaltoodut silmas pidades täitis CEBE väärikalt Euroopa struktuurifondide missiooni, sest seitsme aasta jooksul kaitstud 36 doktoritööd, 550 eelretsenseeritud teadusartiklit, 13 monograafiat, 21 patenti ja kümme patenditaotlust, 17 rakendust toodete prototüüpidena koostöös ettevõtetega, kuus uut CEBE keskkonnas võrsunud *spin-off* firmat, üheksa maaletoodud europrojekti programmide FP6, FP7 ja HORIZON 2020 raames (kogueelarve sama suur kui CEBE toetus struktuurifondidest), milles tervelt viit projekti üldkoordineerisid CEBE teadlased koostööna selliste tippfirmadega nagu IBM, Bosch, Ericsson, Infineon – kõik see kokku rääkis CEBE teadlaste kõrgest rahvusvahelisest tunnustusest ning tähendas kaalukat panust mitte üksnes teadusesse, vaid ka Eesti majandusse. Üksikasjalikuma ülevaate CEBE tegevusest ja tulemusest leiab aadressil http://cebe.ttu.ee.

UUDSED ALALISPINGEMUUNDURID TAASTUVENERGEETIKAS

Dmitri Vinnikov, Tanel Jalakas, Indrek Roasto
Tallinna tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

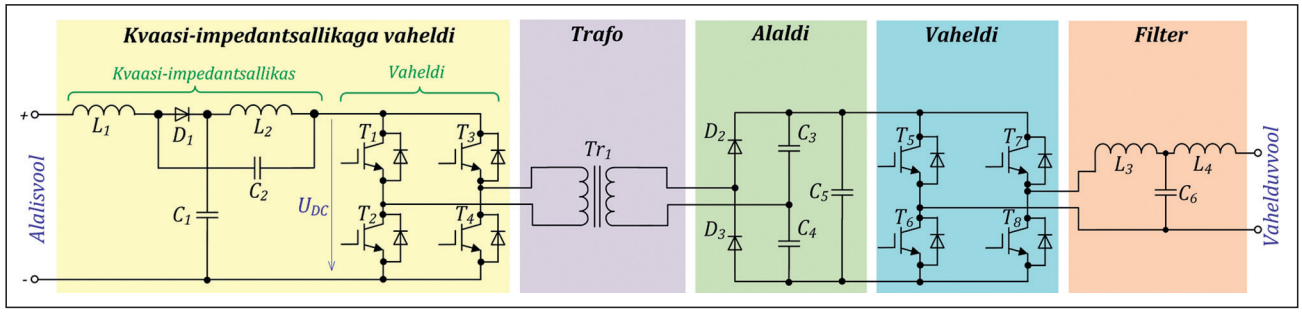


Autorid (vasakult): Tanel Jalakas, Indrek Roasto, Dmitri Vinnikov.

Me elame muutuvas energianäljases maailmas. Vähenevate ressursside taustal pööratakse üha rohkem tähelepanu taastuvatele energiaallikatele. Need allikad on küll taastuvad, ent energia kättesaamine neist on ebamugav, kallis ning seotud paljude probleemidega. Teadlastele meeldivad probleemid, mis annavad neile huvitavat peamurdmist, võimaldavad luua uusi väärtusi ning muuta kättesaadavaks seni kättesaamatu. Tallinna tehnikaülikooli (TTÜ) elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis tegutseva jõuelektroonika uurimisrühma liikmed pole selles suhtes erandid, sest nende teadustöö põhisuunaks on uudsete jõuelektroonika muundurite väljatöötamine taastuvenergeetika rakendustele.

Taastuvenergeetika põhiprobleem on energiatootmise ebaühtlus ning sellest tulenev vajadus energia lühi- ja pikaajaliseks salvestamiseks. Energia lühiajaliseks salvestamiseks sobivad kas elektrokeemilised akud või ülikondensaatorid, pikaajaliseks salvestamiseks on sobiv vesinik (salvestamise ajavahemik – päevad, nädalad, kuud, aastad). Vesinikku saab elektrienergiaks muundada kütuseelementide abil. Kütuseelemendi sidumiseks tavalise elektrivõrgu või standardset võrgupinget (3 × 400 V või 230 V, 50 Hz) tarbivate elektriseadmetega on vaja kõigepealt stabiliseerida kütuseelemendi väljundpinge, tõsta see kas 400 (ühe faasi puhul) või 600 voldini (kolme faasi puhul), muundada vahelduvvooluks (vaheldada) ja filtreerida. Selle juures ei tohi unustada tõsiasja, et kütuseelement on äärmiselt tundlik voolu pulsatsioonile, mis vähendab oluliselt kalli aparaadi eluiga. Kütuseelemendi muundur koosneb tavaliselt alalispingemuundurist, vaheldist ja väljundfiltrist. Alalispingemuundur stabiliseerib kütuseelemendi pinget ja tõstab selle soovitud tasemele, vaheldi muudab stabiliseeritud alalispinge vahelduvaks võrgupingeks ja filter silub pinget nii, et tagatud oleks nõutud kvaliteediga siinus. Samasuguseid muundusseadmeid kasutatakse ka päikesepaneelidest ning mikrotuulikutest saadava energia elektrivõrku suunamiseks.

2009. aasta mais pakkus TTÜ jõuelektroonika uurimisrühm välja maailmas ainulaadse skeemilahendusega muunduri, mis oli algselt mõeldud vesiniku-kütuseelementidele, kuid sobib suurepäraselt ka päikesepaneelidele. Tegu on pinget tõstva alalispingemuunduriga, mille teeb ainulaadseks muunduris kasutatud kvaasi-impedantsallikaga vaheldi (ingl *quasi-Z-source inverter*). Joonisel 1 on kujutatud tüüpilist kasutusala nimetatud seadmele: kvaasi-impedantsallikaga

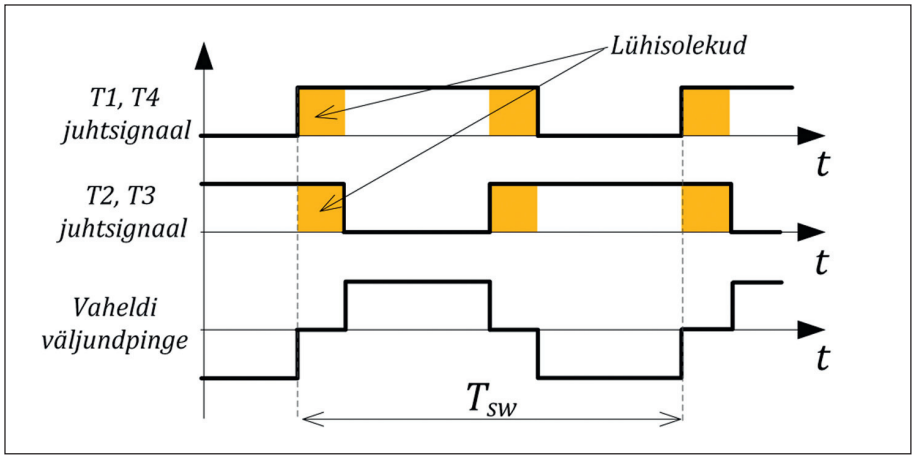


Joonis 1. Kvaasi-impedantsallikaga kütuseelemendi või päikesepaneeli ühefaasilise sidumismuunduri skeemilahendus.

ühefaasiline muundur kütuseelementide või päikesepaneelide sidumiseks elektrivõrguga. Selles näites on lisatud pinget tõstvale alalispingemuundurile ka võrguvaheldi ja vastav filter. Võrreldes teiste pinget tõstvate alalispingemuunduritega on uus muundur lihtsama ehitusega ja realiseeritav väiksema transistoride arvuga, seetõttu ka odavam. Tänu topoloogia iseärasustele on tagatud transistoride täielik kaitse lühise vastu ning vähendatud on ka kütuseelemendi eluiga mõjutavat voolupulsatsiooni.

Sisendpinge stabiliseerimiseks vajalik reguleeritav pingetõus alalispingesiinil U_{DC} saadakse vaheldi transistoride lülitusimpulssides eriliste lühisolekute tekitamisega. Lühisolekute kestel salvestub energia induktiivsustes L_1 ja L_2, mis pärast lühisoleku lõppu tõstavad pinget kondensaatoritel C_1 ja C_2. Lühisoleku suhteline kestus on seotud sisendpinge pingetõusuga, muutes seda tüüpi muundurite juhtimise hõlpsaks.

Muunduri esimene katseseade valmis 2009. aasta suvel tihedas koostöös Poola Gdynia mereakadeemia teadlastega TTÜ baasfinantseerimise (BF113) toetusel. Esimesi tulemusi tutvustati erialaspetsialistidele IEEE tööstuselektroonika seltsi aastakonverentsil Portugalis (35th Annual

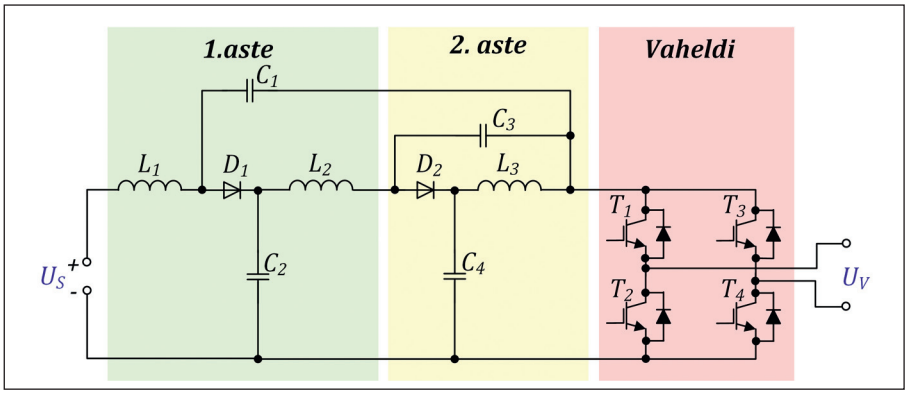


Joonis 2. Kvaasi-impedantsallikaga alalispingemuunduri juhtsignaalid ja lühisolekute tekitamine.

Conference of the IEEE Industrial Electronics Society) 2009. aasta novembris (Vinnikov jt, 2009). Sama aasta detsembris väljatöötatud lahendus on kaitstud Eesti kasuliku mudeliga „Pinget tõstev galvaaniliselt isoleeritud alalispingemuundur“ (kasuliku mudeli prioriteedinumber U201000150, vt Vinnikov jt, 2010a). Vastava uurimistöö tulemused on avaldatud maailma jõuelektroonika tippajakirjas IEEE Transactions on Industrial Electronics (Vinnikov, Roasto, 2011), mis on võrreldav ajakirjaga Nature loodusteaduste valdkonnas, ning oma populaarsuse ja tsiteeritavuse tõttu sai see artikkel 2011. aastal 277 artikli seas 11. koha. Sama artikkel pälvis ka TTÜ aasta teadusartikli auhinna tehnika ja tehnoloogia valdkonnas. 2015. aasta lõpus anti TTÜ jõuelektroonika uurimisrühma teadlastele USA patent US 9214876 B2 „Method of shoot-through generation for modified sine wave Z-source, quasi-Z-source and trans-Z-source inverters“. Koostöös ettevõtetega on patenteeritud lahendust asutud kommertsialiseerima. Näiteks võib tuua Eesti firma Ubik Solutions OÜ tootmisesse juurutatavad päikese-mikromuundurid Optiverter S350.

Aastatel 2010–2011 viidi läbi teadustöö kvaasi-impedantsallikaga muunduriperekonna töörežiimide ja omaduste edasiseks uurimiseks. Katsetuste käigus selgus nii mõndagi huvitavat. Lisaks eelistele paljastusid ka pakutava skeemilahenduse miinusküljed, mis on uusi teadmisi kasutades õnneks siiski välditavad. Tehti kindlaks, et lisaks tavapärasele püsivoolu-töörežiimile võib kvaasi-impedantsallikaga muundur töötada ka katkevvoolutalitluses, mis põhjustab liigset sisendpinge tõusu. Katkevvoolutalitluse kestel muutub muundur ebastabiilseks, halvendades muunduri dünaamikat. Samas langeb muunduri sisendvool kirjeldatud režiimil töötades perioodiliselt nullini, rikkudes sellega antud topoloogia suurima eelise – püsiva sisendvoolu. Leiti, et liigset pingetõusu saab kompenseerida hoolikalt valitud kvaasi-impedantsallika skeemielementide väärtuste ja lülitussageduse muutmisega. Saavutatud teadmiste tulemusel koostati uudne metoodika kvaasi-impedantsallika induktiivpoolide minimaalse nõutava induktiivsuse arvutamiseks ning protsessi matemaatiliseks kirjeldamiseks (Strzelecki, Vinnikov, 2010; Vinnikov jt, 2011b, c, d; Roasto, Vinnikov, 2012).

Kui vesinik on sobiv energia pikaajaliseks salvestamiseks, siis ülikondensaatorid sobivad energia lühiajaliseks salvestamiseks tüüpiliselt 1 – 20 minutit. Sarnaselt kütuseelementidega on tegemist üpriski madalapingeliste alalisvooluseadmetega,



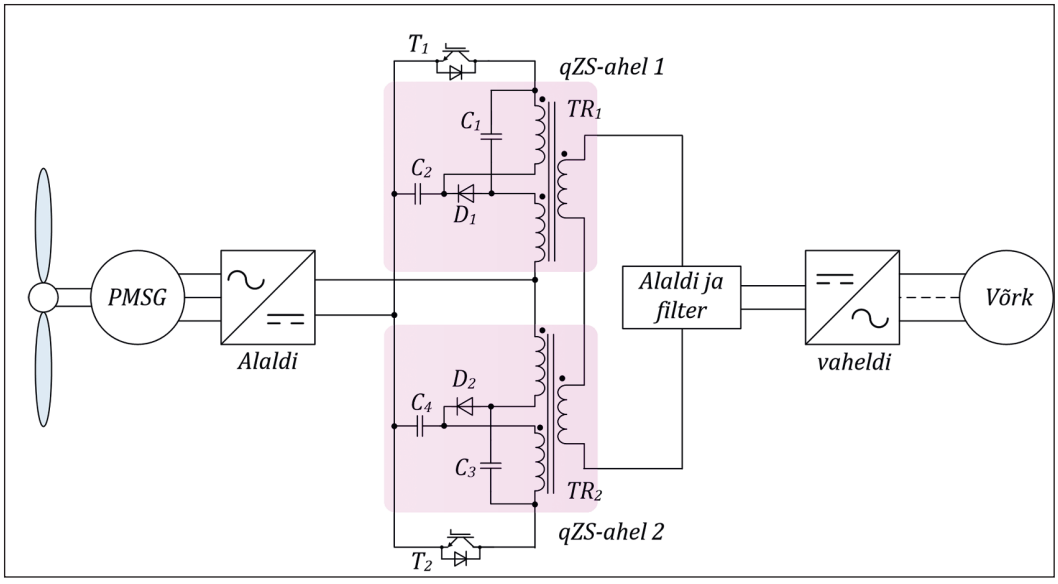
Joonis 3. Kaskaadlülituses kvaasi-impedantsallikaga vaheldi.

mille väljundpinge väärtus pole püsiv. Seega tuleb ülikondensaatoreid siduda tarbijatega läbi spetsiaalsete muundurite. Erinevalt kütuseelementidest on vajalik kahesuunaline energiavoog kondensaatorite laadimiseks ja tühjendamiseks. 2010. aastal pakkus uurimisrühm välja uue kvaasi-impedantsallikal põhineva kahesuunalise alalispingemuunduri ülikondensaatorite sidumiseks elektrivõrguga (Vinnikov jt, 2010b; Zakis jt, 2011). Kirjeldatav seade töötab ülikondensaatori laadimisel pinget madaldavas režiimis ja tühjendamisel pinget tõstvas režiimis. Uurimistöö käigus tuli välja, et ülikondensaatori laadimisrežiimis toimib kvaasi-impedantsallikas madalpääsfiltrina, siludes ülikondensaatori laadimisvoolu (Zakis jt, 2012). Lisaks kütuseelementidele ja ülikondensaatoritele sobib kvaasi-impedantsallikal põhinev kahesuunaline alalispingemuundur suurepäraselt ka elektrokeemiliste akudega salvestussüsteemidesse (Chub jt, 2017b).

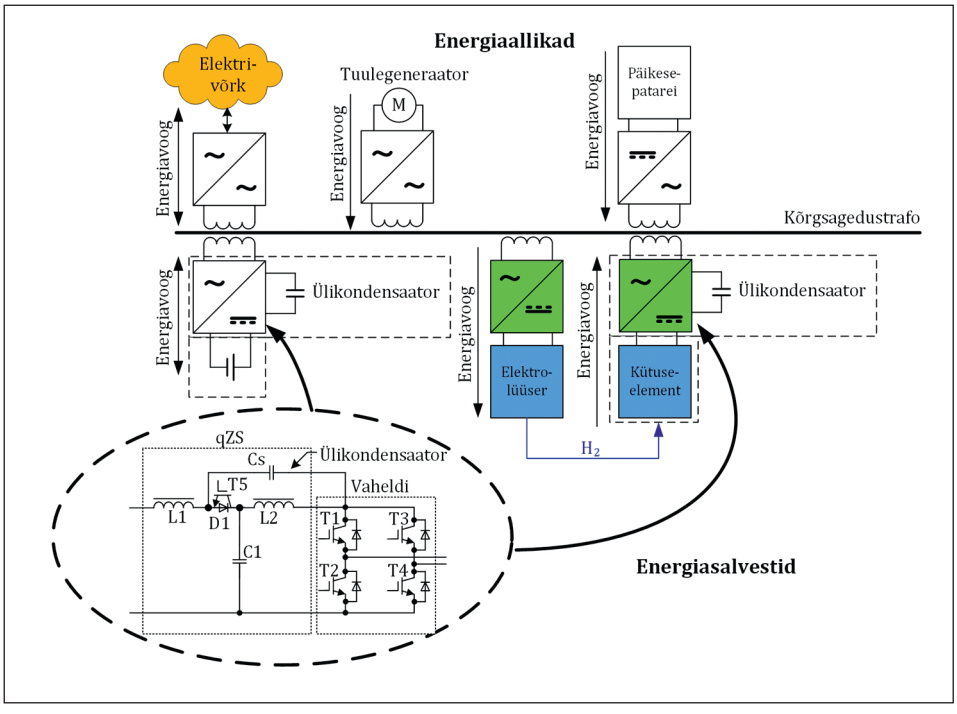
Senise uurimistöö tulemusena loodud kvaasi-impedantsallikaga alalispingemuundurid on küll heade omadustega, ent pinge tõstmine üle kolme korra on seotud suurte tehniliste probleemidega. Osaliselt lahendab probleemi mitmeastmeline kvaasi-impedatsallikaga vaheldi. Teoreetiliselt on võimalik koostada *n*-astmeline muundur, mis suudab ideaalis lõpmatult pinget tõsta. Reaalsuses kaasnevad aga iga astmega suuremad kaod ja suureneb seadme keerukus. Seega tuleb leida mingi tasakaal astmete arvu ja kadude vahel. Uuringute tulemusel jõuti järeldusele, et optimaalne lahendus on kaheastmeline kaskaadlülituses kvaasi-impedantsallikaga vaheldi. Aastatel 2011–2013 loodi parendatud pingetõstmisvõimega ja püsiva sisendvooluga kaskaadlülituses kvaasi-impedantsallikaga muundurid (joonis 3), mida seejärel ka katsetati ja patenteeriti (Vinnikov jt, 2010, 2012a, b).

2012. aasta veebruaris tutvustati maailma suurimal jõuelektroonika konverentsil (Applied Power Electronics Conference) USAs esmakordselt laiemale spetsialistide hulgale uut kvaasi-impedantsallikaga pinget tõstvat vastastakt-tüüpi alalispingemuundurit (Vinnikov jt, 2012c). See muundur sobib kasutamiseks suurt pingetõstmisvõimet nõudvates rakendustes, kus on nõutud ka sisendi ja väljundi galvaaniline eraldatus (joonis 4). Huvitava edasiarendusena võib välja tuua kvaasi-impedantsallika induktorid, mis on integreeritud eraldustrafo primaarmähisesse. See rakendus tõstab kogu seadme võimsustihedust vähemalt 15 protsenti. Lihtne juhtimisalgoritm, hea lühisekindlus, väike koostisosade arv, lai sisendpinge ulatus, hea häiringukindlus ja suures ulatuses muudetav koormus võimaldavad sellel topoloogial edukalt asendada traditsioonilisi täissillaga, resonantslüliga poolsillaga ning kahe pooljuhtlülitiga pinget tõstvaid alalispingemuundureid. Aastatel 2013−2016 viis TTÜ jõuelektroonika uurimisrühm läbi põhjaliku analüütilise uuringu, et kirjeldada uue muunduritopoloogia toimimist. Laborikatsed olid hea täiendus teoreetilistele uuringutele (Husev jt, 2013; Blinov jt, 2013). Seadme põhjalik kirjeldus ilmus 2017. aastal väljaandes IEEE Transactions on Industrial Electronics (Chub jt, 2017a).

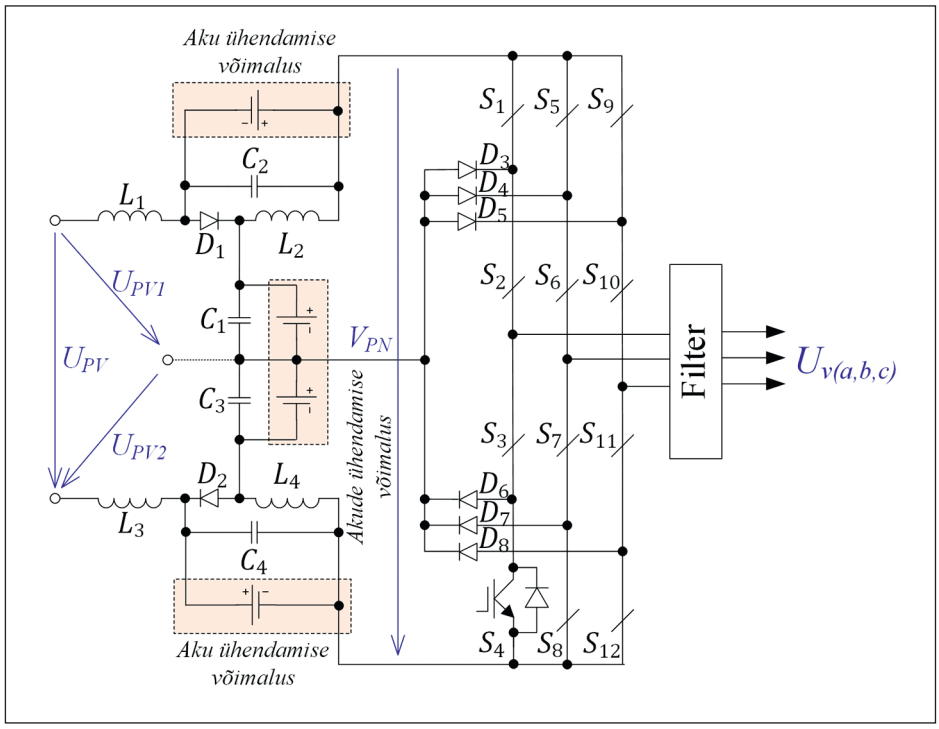
Kütuseelemendi sidumine elektrivõrguga on energia salvestamise seisukohalt ainult poolik lahendus. Elektrienergia abil vesiniku tootmiseks on vaja elektrolüüserit. Seetõttu hakati aastail 2011−2013 uurima ka elektrolüüsiks sobilikke muundureid ning prooviti leida lahendus, mis integreeriks kütuseelemendi ja elektrolüüseri ühtseks lahenduseks. Tulemusena pakuti välja kolme väljundiga magnetiliselt sidestatud alalispingemuunduri konsept (Joonis 5). Tänu sellele skeemilahendusele võib tunduvalt vähendada energia muundamise astmeid vesiniku-energiasalvestit teenindavates muundurites, mis omakorda lihtsustab juhtalgoritmi, vähendab kadusid, komponentide arvu ja seadme kogumaksumust (Vinnikov jt, 2011a; Andrijanovits jt, 2012a, b).



Joonis 4. Vastastaktlülituses kvaasi-impedantsallikaga alalispingemuunduri kasutamine tuulegeneraatorit elektrivõrguga siduvas muundusseadmes.



Joonis 5. Ühise magnetahelaga vesiniku-energiasalvesti koos rohelise energia allikatega (tuul, päike).



Joonis 6. Kvaasi-impedantsallikaga kolmetasandiline neutraaliühtlustiga vaheldi.

2015. aastal pakkus TTÜ jõuelektroonika uurimisrühm välja kolmetasandilise neutraaliühtlustiga vaheldi uue modifikatsiooni (joonis 6), mis alates 2016. aasta sügisest on kaitstud rahvusvahelise patendiga WO2016155762 „Method and system of carrier-based modulation for multilevel single stage buck-boost inverters“ (Husev jt, 2016e). Uus muundur suudab pinget tõsta ja langetada, omab head lühisekindlust ning seda on võimalik ehitada suure võimsustihedusega. Kvaasi-impedantsallikaga skeemilahendus võimaldab küllaltki lihtsat energiasalvestuselemendi lisamist (nt elektrokeemiline aku). Aku ühendatakse kvaasi-impedantsallika kondensaatoritega paralleelselt (joonis 6). Aku laadimisvoolu reguleeritakse vaheldi transistoride lühisoleku kestust muutes. Seega saab niisuguse skeemilahenduse korral kasutada energiasalvesteid ilma seadmesse komponente lisamata. Tänu neile eelistele on kvaasi-impedantsallikas üks paljulubavamaid skeemilahendusi päikesepaneele teenindavatele muunduritele. Matemaatilised mudelid, simulatsioonimudelid, juhtalgoritmid ja prototüübi katsetulemused avaldati 2015–2017. aasta jooksul mitmes kõrgetasemelises teadusajakirjas (Husev jt, 2016a, b, c, d).

Aastatel 2009–2016 tegeles uurimisrühm uute kvaasi-impedantsallikaga alalispingemuundurite topoloogiate sünteesi, analüüsi ja eksperimentaalsete katsetega, mille põhitulemused on avaldatud 2016. aastal ajakirjas IEEE Transactions on Industrial Electronics ilmunud 21-leheküljelises ülevaatlikus artiklis „A Review of Galvanically Isolated Impedance-Source DC–DC Converters“ (Chub jt, 2016). Kõik loodud topoloogiad sisaldavad sisendis

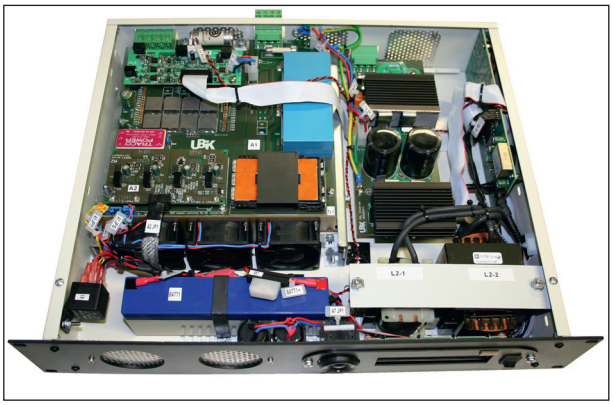
induktiivsust, mis puhverdab muunduri sisendvoolu. See tähendab, et püsivoolurežiimil ei lange muunduri sisendvool kunagi nulli ja väheneb ka väljundvoolu pulsatsioon, mis on eriti tähtis omadus taastuv- ja alternatiivenergia allikate puhul.

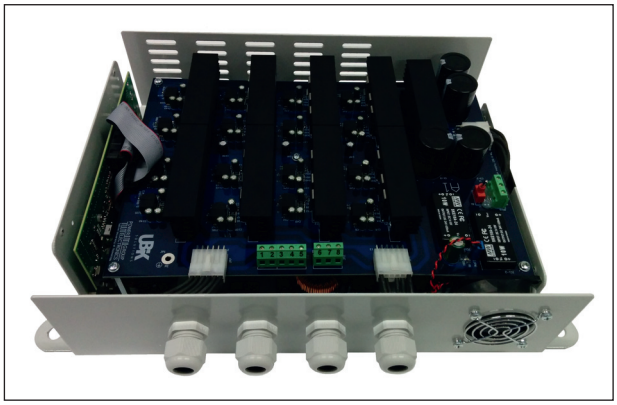
TTÜ jõuelektroonikud on kvaasi-impedantsallikaga muundurite uurimistöö kohta aastatel 2009–2017 avaldanud kokku üle 120 teadusartikli, millest 50 on ilmunud rahvusvahelistes eelretsenseeritavates teadusajakirjades. Ülejäänud, kuid teaduslikust vaatevinklist mitte vähem tähtsad teadusartiklid on avaldatud rahvusvaheliste konverentside kogumikes, mis on refereeritavad sellistes rahvusvaheliselt tunnustatud andmebaasides nagu IEEE, INSPEC, SCOPUS ja WOS. Vähem tähtsaks ei saa lugeda ka selle aja jooksul teadusliku tegevusega paralleelselt läbi viidud õppetööd uute teadlaste ettevalmistamisel. Seisuga 31.12.2017 on uurimistöö baasil kaitstud kuus doktoritööd. Märkimisväärsete teadustulemuste eest tunnustati jõuelektroonika uurimisrühma tööd 2014. aastal Eesti Vabariigi teaduspreemiaga.

Eelkirjeldatud uurimistöö läbiviimiseks ning osalt ka selle käigus on loodud TTÜ elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis nüüdisaegne jõuelektroonika teaduslabor uudsete jõuelektroonika muundurite ja komponentide teoreetiliseks ja praktiliseks uurimiseks. Labor liidab jõuelektroonika valdkonnas elektroonika ja elektrotehnika ala teadlasi ning on loonud hea baasi rahvusvaheliseks koostööks teiste ülikoolidega. Alates oktoobrist 2011 on TTÜ jõuelektroonika labor Euroopa jõuelektroonika keskuse (ECPE) aktiivne liige ning kannab ka Euroopa jõuelektroonika kompetentsikeskuse tiitlit. 2012. aastal moodustati uurimisrühma juhi Dmitri Vinnikovi initsiatiivil aktiivsete energiaülekandevõrkude konsortsium, mille raames käib aktiivne koostöö Euroopa jõuelektroonika uurimiskeskuste ja -asutustega ning kuhu kuuluvad TTÜ elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, Extremadura ülikool (Hispaania), Universidade Nova de Lisboa (Portugal), Kempteni rakendusülikool (Saksamaa), Gdynia mereülikool (Poola), Zielona Gora ülikool (Poola), Kataloonia polütehniline ülikool (Hispaania), Ålborgi ülikool (Taani), Varssavi tehnikaülikool (Poola) ja Lappeenranta tehnikaülikool (Soome). Aastail 2012–2017 avaldati ühiselt üle 30 artikli, millest 15 teadusajakirjades (kategooriad 1.1 ja 1.2) ja 20 rahvusvaheliste konverentside ettekannete kogumikes (kategooria 3.1). Sama konsortsiumi liikmed organiseerivad ka iga-aastastel IEEE tööstuselektroonika ühingu (IEEE-IES) aastakonverentsidel IECON, ISIE ja ICIT teadlaste hulgas tunnustatud ja populaarset jõuelektroonika ja aktiivsete elektrivõrkude sessiooni.

Rakendusliku taustaga teadustööd on raske teha ilma ettevõtete moraalse, finantsilise ja infoalase toeta. Mitmed tehnoloogiaettevõtted on andnud väärtuslikku infot turul valitsevate tingimuste ja vajaduste kohta, teised on alltöövõtjatena panustanud teadusesse oma teadmiste, kogemuste ning seadmetega. Uurimisrühma põhilised koostööpartnerid on Ubik Solutions OÜ, Estel Elektro AS, 4 Energia AS, Balti Trafo AS ja Vardar Eurus AS.

Teadustöö tulemusena on suudetud kvaasi-impedants tüüpi allikaga muunduritehnoloogia tuua praktilistesse rakendustesse. Tallinna tehnikaülikooli jõuelektroonika uurimisrühm on koostöös Eesti firmaga Ubik Solutions OÜ välja arendanud ning turule toonud uudse väikestes ja keskmistes energiasüsteemides päikesepaneelidega kasutatava jõupooljuhtmuunduri tehnoloogia Optiverter®. Optiverter® on hübriidtehnoloogia, mis esmakordselt seob endas päikese-mikroinverterite (ingl *PV Microinverter*) ning võimsuse optimeerijate (ingl *PV power optimizer*) põhiomadusi nagu varjutusest sõltumatu maksimaalse võimsuspunkti jälgimine (MPPT), galvaaniline isolatsioon, otsene ühilduvus vahelduvvooluvõrguga, energiatootluse





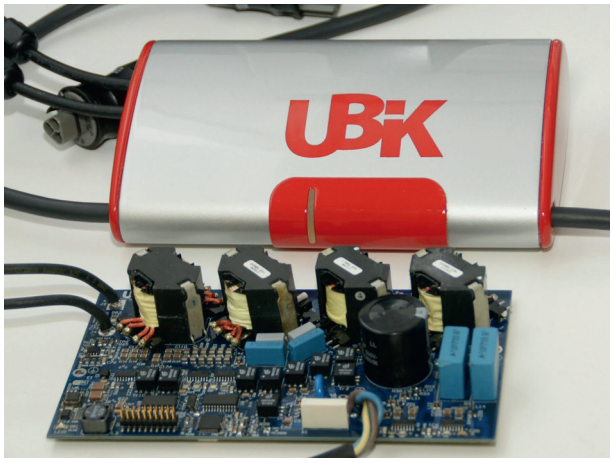
Joonis 7. Firmale Ubik Solutions OÜ loodud kvaasi-impedantsallikaga kütuseelemendi sidumismuundur (vasakul) ja päikesepaneele teenindava muunduri prototüüp Euroopa jõuelektroonika keskusele ECPE (paremal).

ja päikesepaneelide olukorra jälgimine, süsteemi madal maksumus ning kogu päikeseenergiasüsteemi paindlikkus ja laiendatavus.

Kirjeldatud tehnoloogia võimaldab kõrget kasutegurit kõigis päikesepaneeli töörežiimides, suuremat muunduri energiatihedust ja paneeli varjutusest sõltumatut maksimaalse võimsuspunkti jälgimist. Viimane omadus koos laia sisendpinge vahemikuga võimaldab efektiivset energiatootmist isegi oluliselt varjutatud päikesepaneelidega. Ehitised, puud, pilved, tolm, lumi ja puulehed võivad osaliselt varjutada päikesepaneele. Piisab ühest varjutatud päikesepaneeli elemendist, et nullida terve paneeli energiatoodang. Tagamaks efektiivset energiatootmist osaliselt varjutatud paneelide puhul, on vaja laia sisendpinge vahemikuga muundureid. Optiverteritel on tänu patenteeritud juhtimismeetodile sisendpinge vahemik kuni neli korda laiem kui seni kasutatud päikese-mikromuunduritel. Sarnaselt päikesepaneelidega kasutatavate võimsuse optimeerijatega tagatakse maksimaalne energiatootlus isegi siis, kui paneeli kaks elemendijada kolmest on kas lume või puulehtede tõttu täielikult või osaliselt varjutatud. Osaliselt varjutatud paneeli tõttu tekkivate energiakadude vältimine on Optiverter-tehnoloogia vaieldamatu eelis olemasolevate päikese-mikromuundurite ees.

Piiratud töövõimsuse ja sisendpinge tõttu sobivad olemasolevad mikromuundurid enamasti kuni 60-elemendiste päikesepaneelidega väljundvõimsusega kuni 280 W. Tänu materjalitehnoloogia võidukäigule on aga nüüdisaegsed päikesepaneelid kiiresti kasvanud nii väljundvõimsuse kui ka kasuteguri poolest ja olemasolevad mikromuundurid on selliste uute paneelide jaoks nõrgaks jäänud. Optiverterid võimaldavad suure väljundvõimsusega paneelide kasutamist. Suurenenud väljundvõimsus hoiab ära ka seadme ülekoormusest tingitud võimsuspiiramist, mis on iseloomulik hetkel kasutusel olevatele seadmetele. Uudne tehnoloogia on mõeldud kasutamiseks kõigi olemasolevate 60–72 mooduliga kuni 350 W ja kuni 60 V päikesepaneelidega.

Erinevalt võimsusoptimeerijatel põhinevast päikeseenergiasüsteemist, mis vajab keskset jõupooljuhtmuundurit energia elektrivõrku saatmiseks, võimaldab Optiverter otsest ühendust madalpinge vahelduvvooluvõrguga. See omakorda tagab mikromuunduritega võrreldava süsteemi paindlikkuse ja laiendatavuse. Elektrivõrgu poolelt on



Joonis 8. Ubik S350 Optiverter.

Joonis 9. Ubik S350 Optiverter Pärnumaal asuvas päikeseenergiasüsteemis.

Optivertereid võimalik lihtsalt paralleelühendusse lülitada. Võimsuse optimeerijate rakendamisel peab kasutama pikki lisajuhtmeid paneelidelt muundusseadmeteni. Paljude paneelide järjestikühenduse tõttu on neis süsteemides kasutusel ohtlikult kõrge alalispinge. Tänu madalale sisendpingele ja lihtsale sisendjuhtmestikule on Optiverterit hea kasutada kõrget turvalisust nõudvates paigalduskohtades, nagu elu- ja tootmishooned. Kirjeldatav tehnoloogia võimaldab ka päikesepaneelide ja elektrivõrgu galvaanilist eraldust ning vähendab lekkevoolusid.

Praeguseks on firma Ubik Solutions OÜ tootnud esimese väikepartii Optivertereid (joonis 8) ning käivad ettevalmistused täismõõduliseks masstootmiseks ja turustamiseks. Esimesest partiist on antud seadmeid paljudele ülikoolidele, päikeseenergiasüsteeme ehitavatele firmadele ja huvitatud eraisikutele katsetamiseks ja tutvumiseks. Eestis on loodud viis ja Lõuna-Euroopas kolm katselist energiasüsteemi Ubik S350 Optiverteritega ning veel kaks on loomisel (joonis 9).

Kokkuvõtvalt võib öelda, et kirjeldatud tegevusest on kasu saanud nii taastuvenergeetika kui ka Eesti teadus, seda nii teadmiste kui ka uurimistöö käigus kraadiõppe läbinud uue teadlaste põlvkonna näol. Firma Ubik Solutions OÜ toel toimub teadustulemuste siirdamine tööstusesse ja kirjeldatud seadmete tootmise ettevalmistamine. Võib öelda, et väljatöötatud tehnoloogia kasutamine kütuseelemente ja ülikondensaatoreid, päikesepaneele ja väikseid elektrituulikuid elektrivõrguga siduvates seadmetes aitab kaasa nii nende tehnoloogiate massidesse jõudmisele kui ka taastuvenergeetika võidukäigule üldiselt. Samas on kirjeldatud tehnoloogia kasutatav palju laiemalt kui selles artiklis käsitletu. Võimalikud kasutusalad oleks veel telekommunikatsioonis, maismaatranspordis või lennunduses kasutatavad muundusseadmed ning elektrokeemiliste akude kiirlaadijad elektrisõidukitele. Seega pole uurimis- ja arendustöö veel kaugeltki lõppenud, vaid on alles alguses.

Andrijanovits, A., Blinov, A., Husev, O., Vinnikov, D. 2012a. Multiport converter with integrated energy storage for hydrogen buffer interfacing with renewable energy systems. – IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 19–21 March, 2012, 230–235.

Andrijanovits, A., Blinov, A., Vinnikov, D., Martins, J. 2012b. Magnetically coupled multiport converter with integrated energy storage. – Przeglad Elektrotechniczny, 88 (7b), 171–176.

Blinov, A., Vinnikov, D., Husev, O., Chub, A. 2013. Experimental analysis of wide input voltage range qZS-derived push-pull DC/DC converter for PMSG-based wind turbines. – Proceedings of PCIM Europe 2013, Nuremberg, Germany, 14–16 May, 2013. VDE Verlag GMBH, Berlin, 1435–1444.

Chub, A., Vinnikov, D., Blaabjerg, F., Peng, F. Z. 2016. A review of galvanically isolated impedance-source DC–DC converters. – IEEE Transactions on Power Electronics, 31 (4), 2808–2828.

Chub, A., Husev, O., Blinov, A., Vinnikov, D. 2017a. Novel isolated power conditioning unit for micro wind turbine applications. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64 (7), 5984–5993.

Chub, A., Vinnikov, D., Liivik, E. 2017b. Reverse power flow control possibilities of galvanically isolated impedance-source DC-DC converters. – 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Cadiz, 2017, 522–527.

Husev, O., Blinov, A., Vinnikov, D., Chub, A. 2013. Steady-state analysis of qZS-derived push-pull DC/DC converter with wide input voltage regulation range. – 8th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics (CPE2013), Ljubljana, Slovenia, 5–7 June, 2013. IEEE, 320–325.

Husev, O., Blaabjerg, F., Roncero-Clemente, C., Romero-Cadaval, E., Vinnikov, D., Siwakoti, Y. P., Strzelecki, R. 2016a. Comparison of impedance-source networks for two and multilevel buck-boost inverter applications. – IEEE Transactions on Power Electronics, 31 (11), 7564–7579.

Husev, O., Chub, A., Romero-Cadaval, E., Roncero-Clemente, C., Vinnikov, D. 2016b. Hysteresis current control with distributed shoot-through states for impedance source inverters. – International Journal of Circuit Theory and Applications, 4 (44), 783–797.

Husev, O., Roncero-Clemente, C., Romero-Cadaval, E., Vinnikov, D., Jalakas, T. 2016c. Three-level three-phase quasi-Z-source neutral-point-clamped inverter with novel modulation technique for photovoltaic application. – Electric Power Systems Research, 130, 10–21.

Husev, O., Strzelecki, R., Blaabjerg, F., Chopyk, V., Vinnikov, D. 2016d. Novel family of single-phase modified impedance-source buck-boost multilevel inverters with reduced switch count. – IEEE Transactions on Power Electronics, 31 (11), 7580–7591.

Husev, O., Vinnikov, D., Romero-Cadaval, E., Roncero-Clemente, C. 2016e. Method and system of carrier-based modulation for multilevel single stage buck-boost inverters. Patentne leiutis; PCT/EP2015/056787.

Roasto, I., Vinnikov, D. 2012. Impact of component losses on the voltage boost properties and efficiency of the qZS-converter family. – COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 31 (6), 1945–1963.

Strzelecki, R., Vinnikov, D. 2010. Models of the qZ-converters. – Przeglad Elektrotechniczny, 86 (6), 80–84.

Zakis, J., Vinnikov, D., Roasto, I., Ribickis, L. 2011. Quasi-Z-source inverter based bi-directional DC/DC converter: Analysis of experimental results. – 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics (CPE), 1–3 June, 2011, 394–399.

Zakis, J., Vinnikov, D., Husev, O., Rankis, I. 2012. Dynamic behaviour of qZS-based bi-directional DC/DC converter in supercapacitor charging mode. – International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 20–22 June, 2012, 764–768.

Vinnikov, D., Roasto, I. 2011. Quasi-Z-source-based isolated DC/DC converters for distributed power g eneration. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 58 (1), 192–201.

Vinnikov, D., Roasto, I., Jalakas, T. 2009. New step-up DC/DC converter with high-frequency isolation. – 35th Annual IEEE Conference of Industrial Electronics, IECON '09, 3–5 November, 2009, 670–675.

Vinnikov, D., Jalakas, T., Roasto, I., Lehtla, T., Laugis, J. 2010a. Voltage-fed quasi-impedance-source inverter. Utility Model Registration EE00930U1.

Vinnikov, D., Roasto, I., Zakis, J. 2010b. New bi-directional DC/DC converter for supercapacitor interfacing in high-power applications. – Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010, Ohrid, Republic of Macedonia, 6–8 September, 2010, T11-38–T11-43.

Vinnikov, D., Andrijanovitš, A., Roasto, I., Jalakas, T. 2011a. Experimental study of new integrated DC/DC converter for hydrogen-based energy storage. – 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC´11), Rome, Italy, May 2011. IEEE, 1–4.

Vinnikov, D., Husev, O., Roasto, I. 2011b. Lossless dynamic models of the quasi-Z-source converter family. – Scientific Journal of Riga Techical University: Power and Electrical Engineering, 29, 73–78.

Vinnikov, D., Roasto, I., Strzelecki, R., Adamowicz, M. 2011c. CCM and DCM operation analysis of cascaded quasi-Z-source inverter. – Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE'2011, Gdansk, Poland, 27–30 June, 2011, 159–164.

Vinnikov, D., Roasto, I., Zakis, J., Strzelecki, R. 2011d. New step-up DC/DC converter for fuel cell powered distributed generation systems: Some design guidelines. – Przeglad Elektrotechniczny, 86 (8), 245–252.

Vinnikov, D., Roasto, I., Jalakas, T., Strzelecki, R., Adamowicz, M. 2012a. Analytical comparison between capacitor assisted and diode assisted cascaded quasi-Z-source inverters. – Przeglad Elektrotechniczny, 88 (1a), 212–217.

Vinnikov, D., Roasto, I., Strzelecki, R., Adamowicz, M. 2012b. Step-up DC/DC converters with cascaded quasi-Z-source Network. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59 (10), 3727–3736.

Vinnikov, D., Zakis, J., Husev, O., Strzelecki, R. 2012c. New high-gain step-up DC/DC converter with high-frequency isolation. – Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 5–9 February, 2012, 1204–1209.

SENSORMATERJALID MOLEKULAARSELT JÄLJENDATUD POLÜMEERIDEST MEDITSIINILISEKS DIAGNOSTIKAKS JA KESKKONNASEIREKS

Andres Öpik, Vitali Sõritski ja Jekaterina Reut

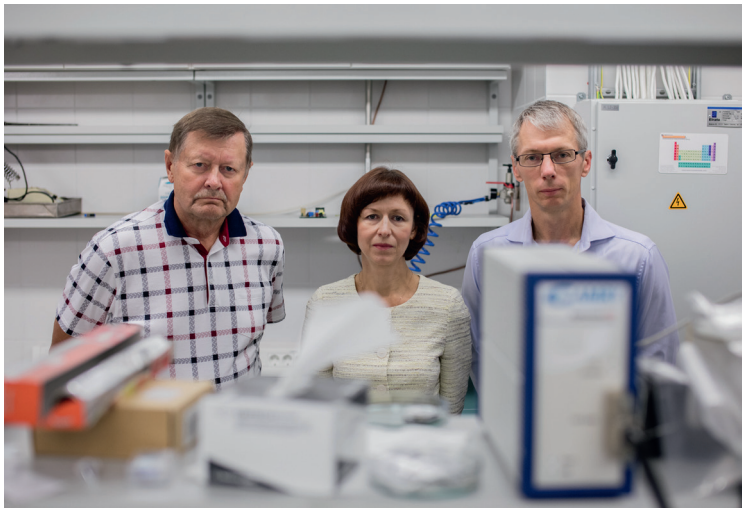
Tallinna tehnikaülikooli materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

SISSEJUHATUS

Keemilised sensorid, sealhulgas biosensorid, on omandanud kindla koha tänu pidevalt kasvavale nõudlusele kiirete, suure tundlikkuse ja selektiivsusega usaldusväärsete analüüsimeetodite järele. Selliste meetodite järele on vajadus kiiresti arenevas kliinilises analüüsis, keskkonnaseisundi jälgimisel ning paljudes teistes valdkondades. Vaatamata edusammudele biosensorite väljatöötamisel on praegu probleemiks looduslike bioloogiliste retseptorite füüsikaliste ja keemiliste omaduste ebastabiilsus. Üheks selle probleemi võimalikuks lahenduseks on bioloogiliste retseptorite asemel omadustelt oluliselt stabiilsemate sünteetiliste retseptorite väljatöötamine.

Sünteetiliste retseptorite loomise üheks võimaluseks on „molekulaarse jäljendamise“ tehnoloogia kasutamine, mis võimaldab polümeeri maatriksis tekitada meid huvitavate sihtmolekulide jäljendid. Sellised jäljendid valmistatakse polümerisatsiooni teel sihtmolekuli ja funktsionaalse monomeeri juuresolekul ning sellele järgneva sihtmolekuli eemaldamisega polümeeri maatriksist. Protsessi tulemusena tekivad polümeeri maatriksis tühjad mälupesad, mis järgnevalt uuesti sihtmolekulidega kohtudes on võimelised neid efektiivselt siduma (joonis 1).

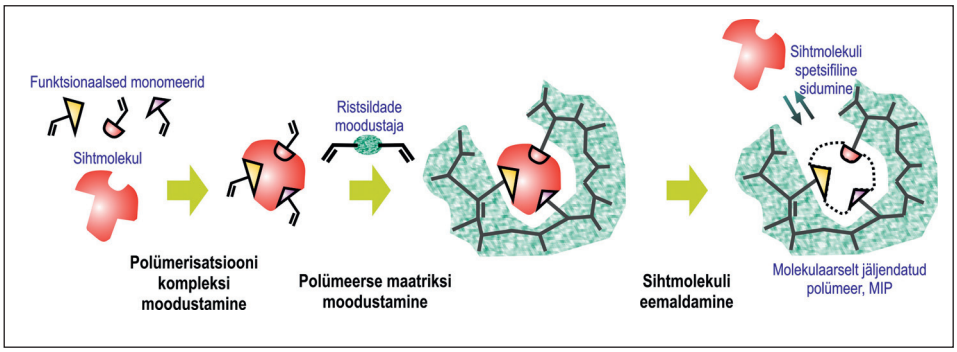
Molekulaarselt jäljendatud polümeere (MIP), erinevalt looduslikest retseptoritest, iseloomustab nende hea keemiline ja termiline stabiilsus, omaduste reprodutseeritavus ja valmistamise tehnoloogia odavus. Tänu sellistele omadustele peetakse MIPe väga perspektiivseteks materjalideks analüütilises keemias, keskkonna puhastamisel, keskkonnaseires või kliinilises diagnostikas.



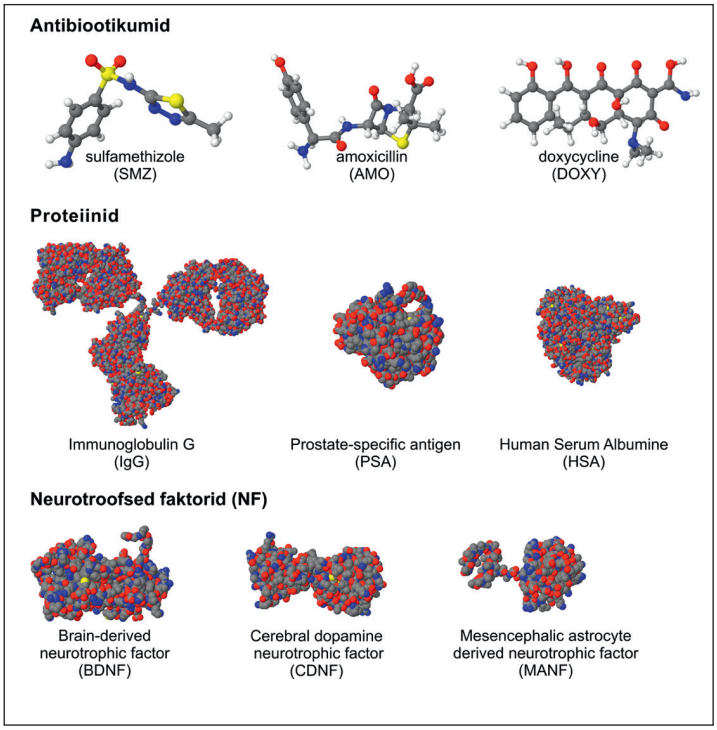
Autorid (vasakult): Andres Öpik, Jekaterina Reut, Vitali Sõritski.

Kliinilises diagnostikas on selge vajadus erinevate haiguste efektiivsemaks avastamiseks ja jälgimiseks haigustele vastavate tunnusmarkerite leidmiseks. Eriti oluline on leida tunnusmarkereid vähihaigustele, neuroloogilistele ja mentaalsetele haigustele ning luua võimalused nende avastamiseks ja jälgimiseks juba haiguse algstaadiumis. Näiteks võib teatud valke (neurotroofsed faktorid, NF) seostada neuroloogiliste haigustega, nagu Alzheimeri ja Parkinsoni tõbi, ning hinnates nimetatud NFi kui haigustega seotud biomarkerite kontsentratsiooni, saab teha järeldusi haiguse arengu kohta, ja seda ka haiguse varajases staadiumis.

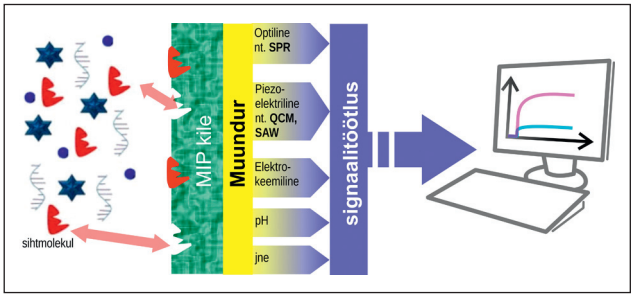
Keskkonnaanalüütikas on suureks probleemiks järjest kasvav ravimijääkide rohkus eeskätt vesikeskkonnas. Ravimijääkide hulk (SMZ, AMO, DOXY jt) ja võimalik toksilisus võivad kasvada lähitulevikus sel määral, et ohustavad omakorda



Joonis 1. Molekulaarse jäljendamise protsessi põhimõtteline skeem.



Joonis 2. Valik erinevaid sihtmolekule molekulaarseks jäljendamiseks.



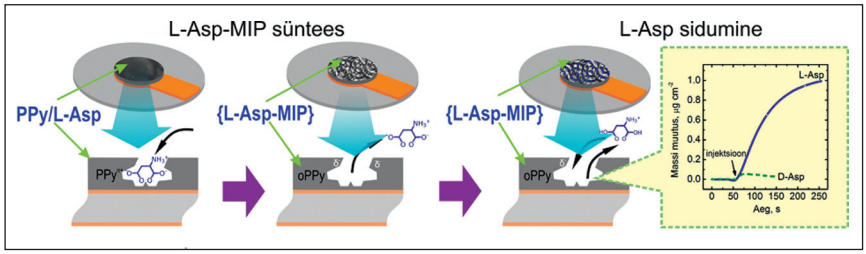
Joonis 3. MIP sensori põhimõtteline skeem.

meie tervist. Sama võib väita erinevate pestitsiidide leviku kohta meie elukeskkonnas.

Praeguseks on meie teadustöö suunatud just eelnimetatud valdkondades kasutatavate sensormaterjalide arendamiseks, kus molekulaarselt jäljendatud õhukesel kilel aset leidev keemiline või füüsikaline muutus muudetakse elektrilise või optilise signaali kujul hinnatavaks väärtuseks (joonis 2, 3).

MIP SENSORMATERJALIDE DISAIN JA ARENDUS

Väikeste molekulide jäljendamine. Esimesed katsed MIP süsteemide valmistamiseks tegime nn väikeste molekulidega, nagu L-aspartaamhappega (L-Asp) jäljendatud õhukeste polümeersete kiledega (L-Asp-MIP), eesmärgiga uurida nende võimet eristada L-Asp ja D-Asp optilisi isomeere. L-Asp-MIP kiled valmistati pürrooli elektrokeemilise polümerisatsiooni teel piesoelektrilise kvartskristalli (QCM) pinnal, tekitades polüpürrooli (PPy) üleoksüdeerimisega (oPPy) spetsiifilised mälupesad L-aspartaamhappe suhtes (L-Asp-MIP). Molekulaarse jäljendamise protsessi efektiivsust hinnati QCM resonantssageduse muutuse järgi (joonis 4). Leidsime, et L-Asp-MIP kilede enantioselektiivsus sõltub peamiselt sünteesi tingimustest, nagu elektrolüüdi koostis ja pH väärtus. Tulemused



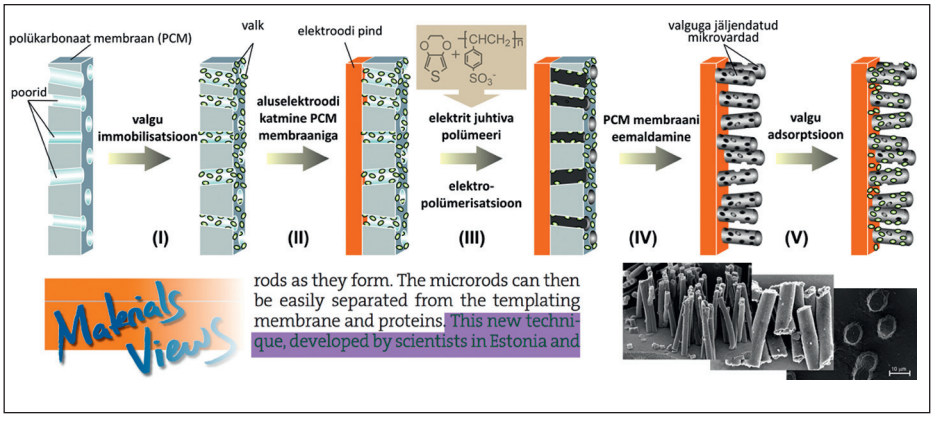
Joonis 4. Piesoelektrilise kvartskristall-resonaatori kasutamine elektrokeemilisel polümerisatsioonil L-aspartaamhappe sidumiseks polüpürroolist maatriksiga ja järgnevaks sihtmolekuli vabastamiseks / uueks sidumiseks (Syritski jt, 2008).

tõestasid, et leeliselises keskkonnas (pH 11) sünteesitud L-Asp-MIP kile on ligi 20 korda suurema selektiivsusega L-aspartaamhappe suhtes võrreldes D-Asp-ga (Syritski jt, 2008).

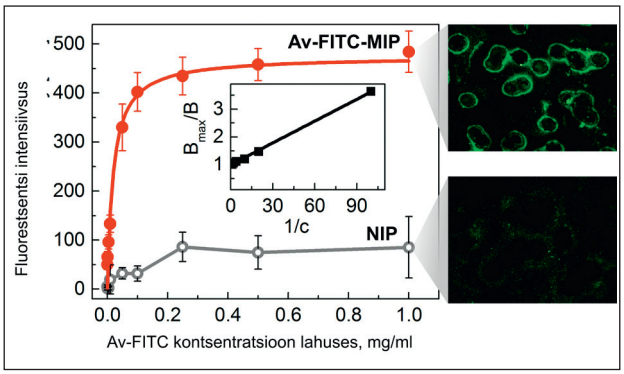
Makromolekulide jäljendamine. Biotehnoloogias ja biomeditsiinis pakub suurt huvi nn makromolekulide, nagu valgud, äratundmine, eristamine ja analüüs ning see on põhjustanud biomolekulidega jäljendatud MIPde valmistamise tehnoloogia kiire arengu. Siiski on makromolekulide molekulaarse jäljendamise protsessis veel piisavalt probleeme. Piiravaks asjaoluks on suurte biomolekulide raskendatud liikumine ristseotud polümeeri maatriksis. Pindmiste mälupesadega MIPde valmistamine on sellele probleemile hea lahendus. Pindmised mälupesad on sihtmolekulidele paremini ligipääsetavad ning tagavad kiirema massiülekande ja sihtmolekulide sidumise.

Sellest johtuvalt uurisime võimalusi pindmiste mälupesadega polümeersete mikrostruktuuride valmistamiseks, eesmärgiga siduda spetsiifiliselt erinevaid valgu molekule. Meie uurimisrühm pakkus välja uue funktsionaalse materjali – pindmiste mälupesadega polümeersed mikrovardad elektrit juhtiva polümeeri, 3,4 polüetüleendioksütiofeeni (PEDOT/PSS) baasil, mis on võimeline spetsiifiliselt siduma avidiini sihtmolekule (joonis 5) (Menaker jt, 2009).

Fluorestsentsmikroskoopia abil saadud tulemused näitasid, et pindmiste mälupesadega avidiini suhtes jäljendatud mikrovarrastel (Av-FITC-MIP) on adsorbeerunud valgu fluorestsentsi intensiivsus



Joonis 5. Valguga jäljendatud pindmiste mälupesadega PEDOT/PSS mikrovarraste valmistamise skeem.



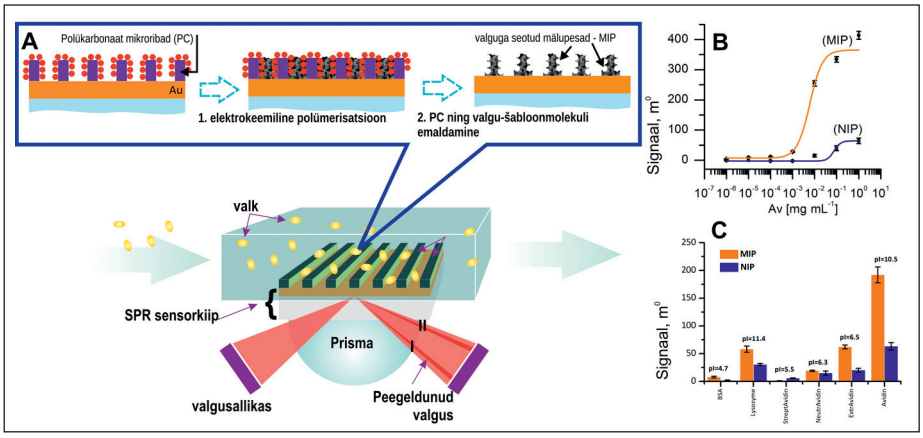
Joonis 6. Fluorestsentsmikroskoobi pildid ning fluorestsentsi intensiivsuse sõltuvus valgu Av-FITC kontsentratsioonist jäljendatud (MIP) ja mitte jäljendatud (NIP) PEDOT/PSS mikrostruktuuridel (Menaker jt, 2009).

oluliselt suurem, võrreldes mitte jäljendatud PEDOT/PSS mikrovarrastega (NIP) (joonis 6) (Menaker jt, 2009).

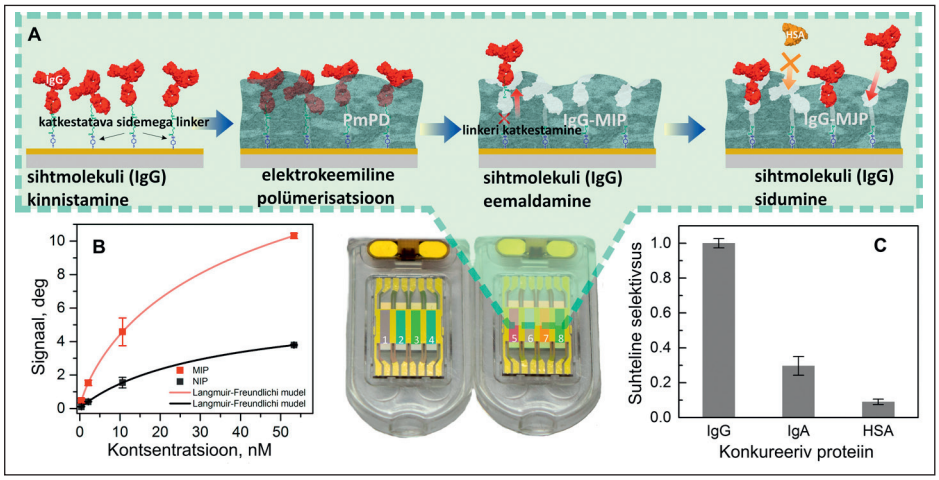
Tuleb aga märkida, et selles töös kasutasime avidiini spetsiifilise sidumise efektiivsuse hindamiseks fluorofooriga märgistatud avidiini (Av-FITC), mida saab jälgida fluorestsentsmikroskoopia abil. See meetod on igapäevaseks diagnoosimiseks keeruline ja kallis ning seetõttu läksime edaspidi üle nn märgisevabadele meetoditele, nagu SPR või SAW, kasutades klassikalist fotolitograafia põhimõtet polümeermaatriksi valmistamiseks mikrokiibile (joonis 7). Selline tehnoloogia võimaldab oluliselt suurendada jäljendatud pesade arvu ja tekitada ühele mikrokiibile rohkem kui ühte liiki jäljendatud pesi. Näiteks avidiiniga jäljendatud mikrokiipidel saadi ligikaudu suurusjärgu võrra parem sidumisefekt, võrreldes mittejäljendatud polümeermaatriksiga (joonis 7B) (Lautner jt, 2011).

Immunoglobuliin G (IgG) on üks enim esindatud antikehi inimese seerumis ja põhiline immuunsuse garant viirushaiguste vastu. Immunoglobuliini kiire ja täpne määramine inimese organismis on äärmiselt tähtis erinevate haiguste varasel diagnoosimisel. Seepärast seadsime oma töö eesmärgiks kiire, efektiivse ja odava tehnoloogia väljatöötamise IgG määramiseks, kasutades molekulaarse jäljendamise tehnoloogiat (joonis 8a) (Tretjakov jt, 2013, 2016; Boroznjak jt, 2017).

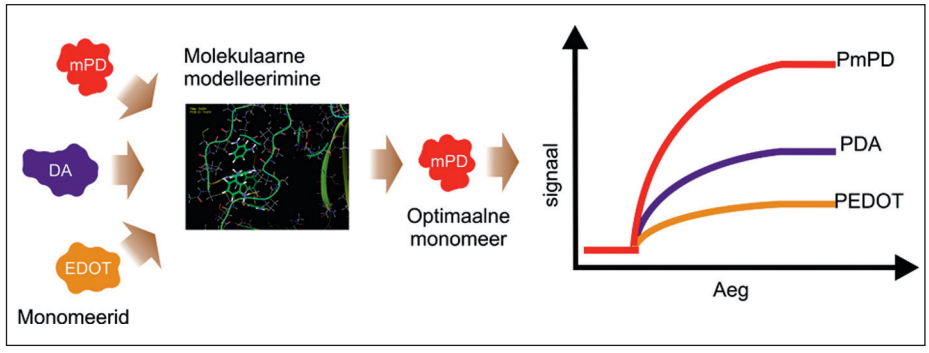
IgG jäljendamise protsessi optimeerimiseks kasutasime esmakordselt monomeeride valiku protsessi molekulaarset modelleerimist (joonis 9) (Boroznjak jt, 2017). Oma töös täiendasime molekulaarsildamise meetodit kvantkeemiliste arvutustega, võttes arvesse vesiniksidemete summaarset energiat, mis tekib monomeeri prooton-doonor gruppide ja proteiini prooton-aktseptor gruppide vahel, kasutades lisaks kvantmehaaniliselt



Joonis 7. (a) Avidiin-MIP mikrokiibi valmistamine, (b) SPR signaali muutus sõltuvalt avidiini kontsentratsioonist, mis näitab avidiini-MIP kiibi oluliselt paremat sidumisefekti mittejäljendatud (NIP) kiibi suhtes, (c) SPR sensori signaali sõltuvus erinevate valkude juuresolekust lahuses avidiini-MIP ja NIP mikrostruktuuridel valgu kontsentratsioonil 10^{-2} mg/ml.



Joonis 8. (a) Immuunoglobuliini IgG suhtes jäljendatud polümeeri valmistamise ja mõõtmise põhimõtteline skeem akustilise laine nihke põhimõttel töötavatel SAW kiipidel. (b) IgG adsorptsiooni isotermid jäljendatud (MIP) ja mittejäljendatud (NIP) SAW sensorkiibil. Adsorptsiooni isoterm on tuletatud Langmuiri-Freundlichi mudeli alusel. (c) Molekulaarselt jäljendatud IgG-MIP selektiivsus konkureerivate valkude IgA ja HSA suhtes.

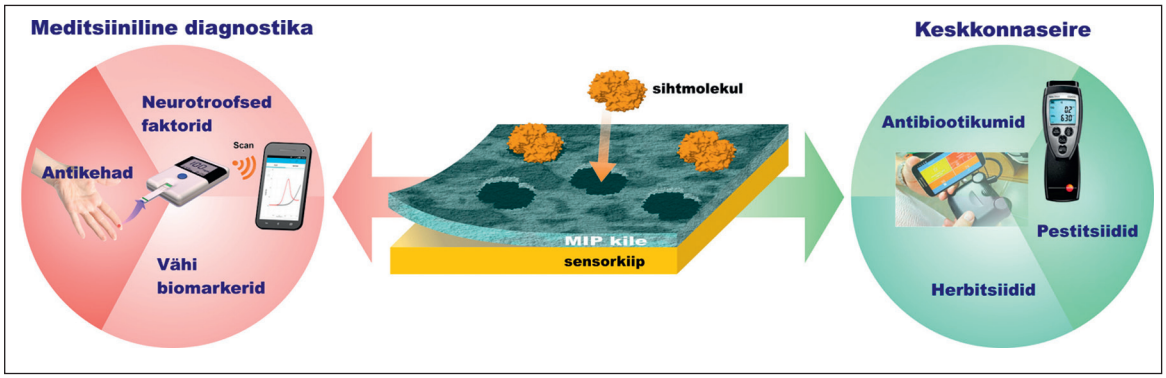


Joonis 9. Molekulaarse modelleerimise põhimõtteline skeem optimaalse monomeeri valikuks.

polariseeritud ligandi sildamise lähendust. Artiklis välja pakutud molekulaarse modelleerimise meetod optimaalse monomeeri leidmiseks makromolekulaarsete sihtmolekulide (IgG) jaoks töötas hästi, mida kinnitasid ka IgG-MIP sidumise efektiivsuse analüüsi tulemused (joonis 8b ja c). Leidsime, et IgG-MIPs olid IgG spetsiifilise sidumise efektiivsust väljendavad IF (*Imprinting factor*) väärtused vahemikus 2,8–4,0 ja dissotsiatsiooni konstandi K_D väärtus 0,17 nM ning selektiivsus konkureerivate valkude IgA ja HSA suhtes vastavalt 3,4 ja 10 korda kõrgem (joonis 8b ja c). IgG-MIP reprodutseeritavus ja määramise efektiivsus säilis vähemalt nelja regenereerimise tsükli järel. Kokkuvõttes võib järeldada, et IgG molekulaarne jäljendamine mitmekanalilise SAW muunduri pinnal loob eeldused efektiivse ja odava biosensori valmistamiseks, mis võimaldab reaalajas määrata piisava täpsusega erinevaid bioloogilisi sihtmolekule.

NÄITEID SENSORMATERJALIDE VÕIMALIKEST RAKENDUSTEST

Praktikas on ennekõike vajadus selliste sensormaterjalide ja rakenduste järele, mis võimaldavad kiiranalüüse teha vahetult sündmuskohal, patsiendimanustena või isegi patsiendil ise (*point-of-care testing*, PoCT). Vahetult sündmuskohal tehtavate testide tingimuseks on analüüdi sidumise ja loetavaks signaaliks muundamise protsessi lihtsus ja kiirus, säilitades samal ajal ka piisava tundlikkuse

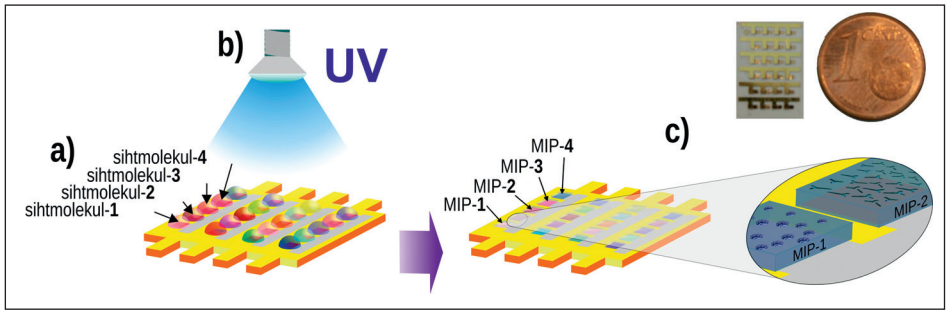


Joonis 10. Valik erinevaid võimalusi molekulaarselt jäljendatud polümeeride kui sensormaterjalide kasutamiseks meditsiinilises diagnostikas ja keskkonnaseires.

analüüdi suhtes. Sellistel meetoditel põhinevaid mõõtmisi on ka võimalik ühendada nutiseadmetega (joonis 10).

2011. aasta seisuga oli *in vitro* diagnostiliste uuringute maht hinnanguliselt suurem kui 50 miljardit USA dollarit (USD), mis hõlmas laboratoorseid uuringuid, patsiendimanuseid uuringuid, vähi diagnostikat ja teisi uuringuid. Nende hulgas patsiendimanuste uuringute maht ligines 15 miljardile USD-le. Patsiendimanuste testide (PoCT) osakaalu kasvu prognoositakse maailmas ligikaudu neli protsenti aastas ja uuringute maht peaks seega kasvama 2018. aastaks 19 miljardi USD-ni. Patsiendimanuseid teste kasutatakse praegu näiteks veresuhkru määramisel, kardioloogiliste markerite hindamisel, narkootikumide testimisel, rasedustestides, hemoglobiini määramisel, kolesterooli mõõtmisel ja muude testide puhul. Patsiendimanused testid on asjakohased haiguste käigu jälgimisel, samuti ravi edukuse jooksval monitoorimisel. Usaldusväärsed ja odavad PoCT testid on olulisel kohal erinevate haiguste varajasel avastamisel ja jälgimisel. Oluline on, et PoCT teste saab läbi viia patsiendi juures, seevastu tavaliselt teostatakse uuringuid spetsiaalsetes laboratooriumides ja uuritava materjali sinna toimetamine ja vastuse ootamine võtab aega. PoCT testid ei pruugi olla võrreldes traditsiooniliste laboritestidega nii täpsed, kuid annavad piisava usaldusväärsusega teavet patsiendil toimunud muutustest ja nende suundumustest. Vajadusel võib siis alati täpsemate testide juurde pöörduda.

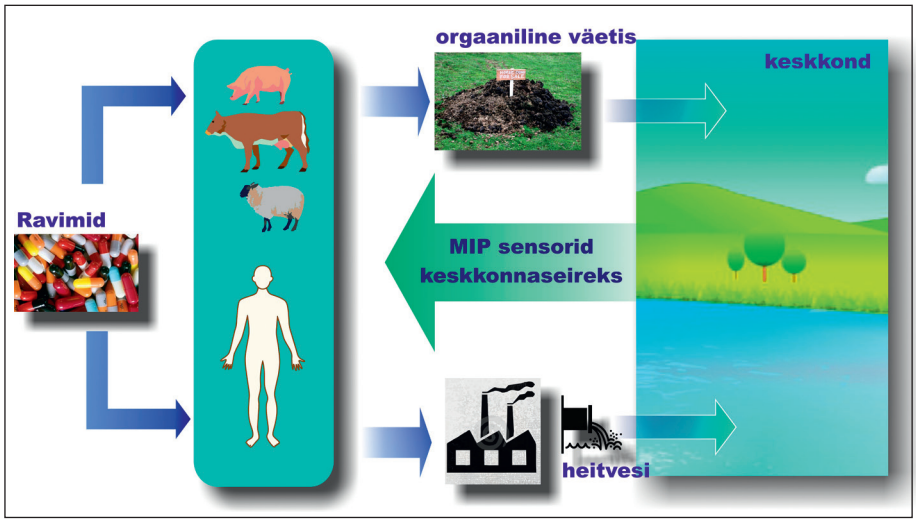
PoCT testidele esitatavaid nõudeid võivad edukalt täita sensorid, mis põhinevad sünteetilistel retseptoritel. Sünteetiliste retseptorite valmistamise üheks võimaluseks on molekulaarse jäljendamise tehnoloogia. Tuleb märkida, et praegused biotundlikud diagnostikasüsteemid kasutavad põhiliselt bioloogilisi retseptoreid, nagu ensüümid, DNA ja erinevad teised antikehad. Sellised looduslikud retseptorid on küll tundlikud erinevate analüütide suhtes, kuid samal ajal ebapüsivad, mis omakorda tõstab oluliselt selliste testide hinda ja analüüsideks kuluvat aega. Oluliselt odavam on sellistel eesmärkidel bioloogiliste retseptorite asemel kasutada sünteetilisi retseptoreid. Ühendades selliselt valmistatud sünteetilised retseptorid efektiivsete mikrokiipidel põhinevate sensorplatvormidega (elektrokeemilised, SAW, SPR, QCM tehnoloogia), saab vältida bioloogiliste retseptorite puudusi ja luua erinevaid kiireid ja odavaid testseadmeid. See võimaldab omakorda tõsta molekulaarselt jäljendatud sensorplatvormide



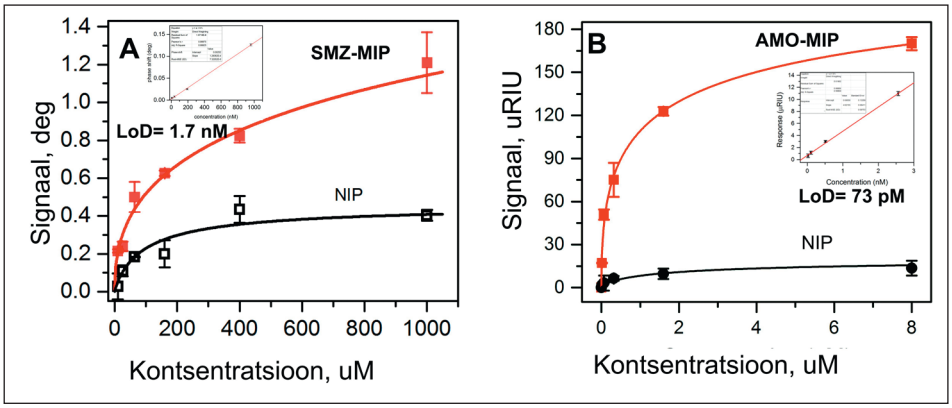
Joonis 11. Molekulaarselt jäljendatud multipleksete mikrokiipide valmistamise põhimõtteline skeem fotopolümerisatsiooni meetodil: a) multipleksne sensorkiip kaetakse sihtmolekulidega (valkudega) ja valitud monomeeriga, b) ultraviolettkiirguse abil moodustatakse sensorkiibile molekulaarselt jäljendatud pesad, c) multipleksne sensorkiip (SAW kiip) on valmis sihtmolekulide määramiseks PoCT seadmes.

analüüsivõimekust, suurendades kiibi mõõtekanalite ja samaaegselt analüüsitavate sihtmolekulide arvu (joonis 11).

Sensormaterjalid keskkonnaseireks. Tänapäeva keskkonnaanalüütikas on pidevalt kasvav vajadus kiirete, suure tundlikkuse ja selektiivsusega usaldusväärsete analüüsimeetodite järele, mis samal ajal on odavad, portatiivsed ja mugavad analüüside läbiviimiseks vahetult sündmuskohal (*point-of-care*). Näiteks erinevate antibiootikumide lai kasutamine meditsiinis ja veterinaarias võib põhjustada nende jääkide laialdase sattumise keskkonda, põhjustades omakorda terviseprobleeme (joonis 12). Esile võib tõsta suurt rühma antibiootikume, nagu sulfoonamiidid (sulfametisool, SMZ) või penitsiliinid (amoksitsülliin, AMO). Selletõttu



Joonis 12. Antibiootikumide intensiivne kasutamine meditsiinis ja veterinaarias põhjustab nende jääkide laialdase sattumise keskkonda.

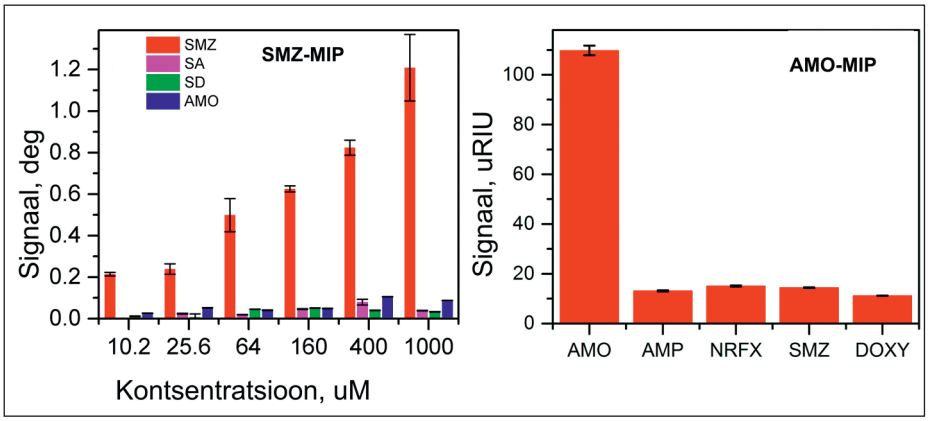


Joonis 13. SMZ-MIP (a) ja AMO-MIP (b) ja vastavalt mittejäljendatud (NIP) kilede adsorptsiooni isotermid Langmuiri-Freundlichi mudeli alusel.

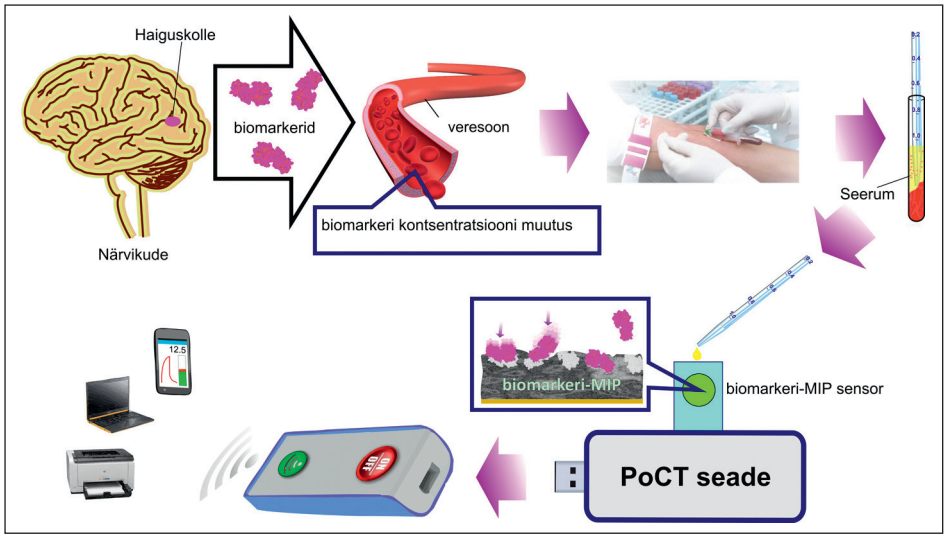
on selliste ravimijääkide täpne ja operatiivne määramine ja seire näiteks vesikeskkonnas väga oluline.

Molekulaarse jäljendamise meetod pakub siinkohal täpset, lihtsat ja odavat lahendust. Oleme välja töötanud tehnoloogia, mis põhineb molekulaarselt jäljendatud õhukestel kiledel, kantuna spetsiaalsele platvormile, mis võimaldab otse, lihtsalt ja täpselt hinnata seotud sihtmolekuli (saasteaine) kontsentratsiooni. Oleme välja pakkunud originaalse tehnoloogilise lahenduse molekulaarselt jäljendatud SAW kiipide valmistamiseks, mis on osutunud oluliselt paremaks seni tuntud lahendustest (joonis 13) (Ayankojo jt, 2016). Mudelsihtmolekuliks valisime sulfonamiidide tüüpilise esindaja sulfametisooli (SMZ), mida võib lugeda valkudega võrreldes „väikeseks" molekuliks. Paralleelselt SAW tehnoloogiaga kasutasime piesoelektrilisel kvartskristallil (QCM) põhinevat sensorlahendust amoksitsülliini (AMO) molekulaarseks jäljendamiseks ja määramiseks vesilahusest (Ayankojo jt, 2018).

SMZi suhtes molekulaarselt jäljendatud õhukesed kiled (SMZ-MIP) valmistati elektrokeemilise polümerisatsiooni teel otse SAW kiibi pinnale ja AMO suhtes jäljendatud kiled (AMO-MIP) QCM sensori pinnale. Jooniselt 13 nähtub, et SMZ-MIP ja AMO-MIP kilede tundlikkus on mittejäljendatud (NIP) kile suhtes oluliselt suurem. Uurides sidumise



Joonis 14. SMZ-MIP ja AMO-MIP kilede sidumise efektiivsus erinevate antibiootikumide suhtes (Ayankojo jt, 2016, 2018).

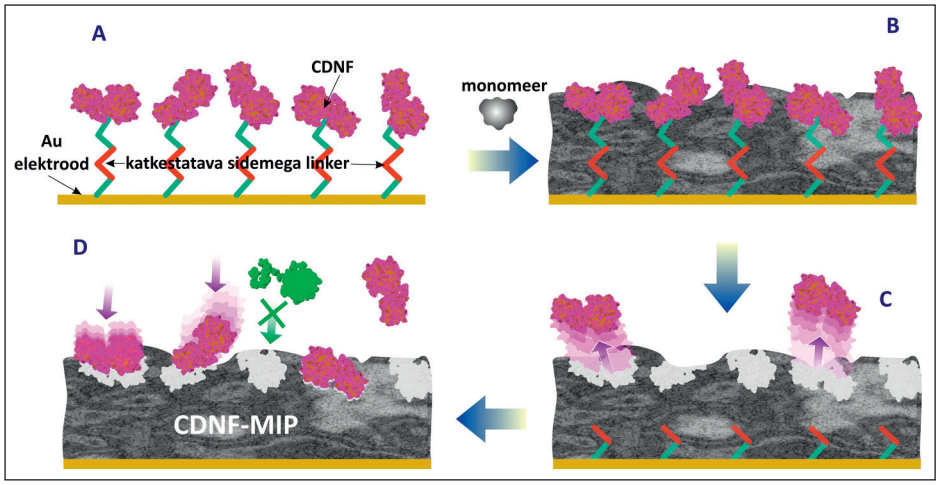


Joonis 15. Põhimõtteline skeem erinevatele haigustele vastavatele biomarkerite määramiseks MIP-PoCT meetodil.

efektiivsust teiste antibiootikumide, nagu sulfadimetoksiin (SD), sulfonüülamiidi (SA) ja amoksitsilliini (AMO) suhtes, näeme jooniselt 14 nii SMZ-MIP kilede kui ka AMO-MIP kilede suurepärast selektiivsust sihtmolekuli suhtes. SMZ-MIP kilede stabiilsus oli samuti hea – kolme sidumise-puhastamise tsükli järel kaotasid jäljendatud kiled oma efektiivsusest u 15 protsenti. Väljatöötatud tehnoloogiad võimaldasid saavutada avastamispiiri (LoD) 1,7 nM *SMZ* ja 73 pM AMO jaoks, mis loob eeldused oluliselt odavamate, täpsemate ja kiiremate keskkonnasensorite valmistamiseks molekulaarse jäljendamise tehnoloogia alusel.

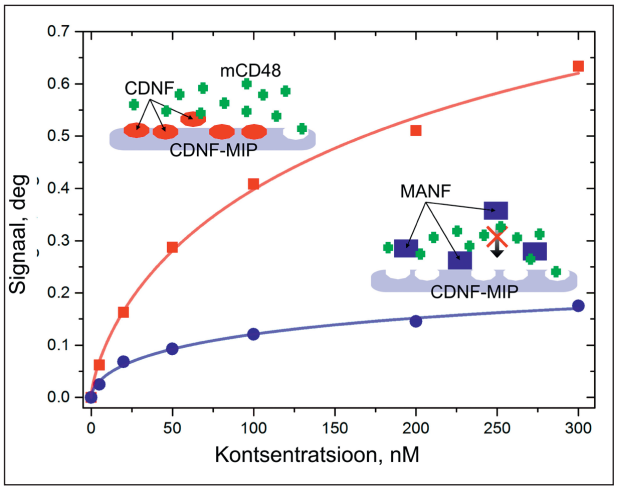
Sensormaterjalid meditsiiniliseks diagnostikaks. Kliinilise diagnostika tarbeks on olemas palju erinevaid analüüsimeetodeid, nagu immunoloogiline analüüs või kromatograafia, mis on täpsed meetodid, kuid samas väga kallid, tööd ja ajakulu nõudvad ning reeglina paigutatud kontsentreeritult suurtesse laboratooriumidesse. Lisaks nõuavad tuntumad immunoloogilised meetodid, nagu ELISA, uuritavate molekulide nn märgistamist ja see võib omakorda mõjutada uuringute tulemusi või ei luba meetodit üldse kasutada. Järelikult on selge vajadus odavamate ja kiiremate testide järele ka kliinilises diagnostikas. Selliste eesmärkide seadmiseks annavad aluse meie varasemad edukad uuringud valkude (IgG) suhtes jäljendatud polümeermaterjalidega.

Tuginedes meie juba olemasolevale kompetentsile, on meditsiinilist diagnostikat silmas pidades meie huviorbiidis neuroloogiliste haigustega seostatavad biomarkerid, nagu näiteks BDNF, GDNF, CDNF, MANF, ja mitmed vähihaigustega seostatavad biomarkerid, nagu PSA, sarkosiin jt (joonis 15). Loetletud sihtmolekulide suhtes selektiivsete ja efektiivselt töötavate MIPde valmistamiseks tuleb õhukesekilelised sensormaterjalid siduda kandjatega, mis omakorda võimaldavad sensormaterjalil toimuva muutuse kiireks ja moonutusteta ülekandmiseks mõõdetava signaali kujule. Kandjateks sobivad näiteks mitmekanalilised mikrokiibid või elektrokeemilised sensorkiibid, mis on ka selliste testsüsteemide masstootmise eelduseks.



Joonis 16. Pindmiste mälupesadega molekulaarselt jäljendatud polümeeri valmistamise skeem: a) sihtmolekuli CDNF immobiliseerimine aluselektroodi pinnale, b) elektrokeemiline polümerisatsioon, c) sihtmolekuli eemaldamine polümeeri maatriksist, d) sihtmolekuli *CDNF* taas sidumine uuritavast keskkonnast.

Kuna see strateegia leidis kinnitust IgG suhtes jäljendatud polümeeriga, võime eeldada ka analoogilise strateegia toimimist neurotroofsete faktorite sidumisel (joonis 16). Meie eeluuringud näitavad, et CDNF-MIP SAW sensor töötab edukalt



Joonis 17. CDNF ja MANF adsorptsiooni isotermid CDNF-MIP-l HSA (10 mg/mL) ja mCD48 (1,25 mg/mL) juuresolekul.

CDNF kontsentratsioonidel 0,5–300 nM, säilitades sihtmolekuli suhtes tundlikkuse ja selektiivsuse ka konkureerivate proteiinide foonil (nt HSA, mCD48, IgG, MANF).

KOKKUVÕTE

Mida teha uute ja efektiivsete testseadiste väljatöötamiseks molekulaarse jäljendamise tehnoloogia alusel?

- Arendada edasi molekulaarse jäljendamise tehnoloogiaid, pöörates tähelepanu nanoskaalas jäljendamise võimalustele, pidades sealjuures silmas nende tehnoloogiate ühildatavust vahetult sündmuskohal *(*PoCT) rakendatavate platvormidega (mikrofluidsed SAW või elektrokeemilised planaartehnoloogias valmistatud platvormid).
- Tõsta molekulaarselt jäljendatud sensorplatvormide analüüsivõimekust, suurendades kiibi mõõtekanalite arvu, mis omakorda võimaldab suurendada samaaegselt analüüsitavate sihtmolekulide arvu.

- Täiustada molekulaarse jäljendamise tehnoloogiaid, et suurendada tundlikkust ja selektiivsust spetsiifiliste sihtmolekulide suhtes tööks keskkondades, mis sisaldavad mitmeid erinevad potentsiaalseid sihtmolekule.
- Protsessi efektiivsust aitab tõsta optimaalse monomeeri valik molekulaarse modelleerimise võimalusi kasutades.

Oleme välja töötanud molekulaarse jäljendamise tehnoloogia, mille kohaselt sünteesitakse etteantud omadustega polümeermaterjale erinevate haiguste suhtes relevantsete valkude või keskkonna saasteainete määramiseks, mis võimaldavad integreerituna mitmekanaliliste sensoritega kvantitatiivselt hinnata uuritavate sihtmolekulide sidumise efektiivsust märgisevabalt, usaldusväärselt, odavalt, reaalajas ja piisava tundlikkusega. Tehnoloogia koos nüüdisaegse nutilahendusega avab täiesti uued võimalused odavamate, töökindlamate portatiivsete sensorite valmistamiseks meditsiiniliste või keskkonna ekspressanalüüside teostamiseks vahetult sündmuskohal (*point-of-care testing*).

VIITED

Ayankojo, A. G., Tretjakoy, A., Reut, J., Boroznjak, R., Öpik, A., Rappich, J., Furchner, A., Hinrichs, K., Syritski, V. 2016. Molecularly imprinted polymer integrated with a surface acoustic wave technique for detection of sulfamethizole. – Analytical Chemistry, 88, 1476−1484.

Ayankojo, A. G., Reut, J., Boroznjak, R., Öpik, A., Syritski, V. 2018. Molecularly imprinted poly(metaphenylenediamine) based QCM sensor for detecting Amoxicillin. – Sensors and Actuators B: Chemical, 258, 766–774.

Boroznjak, R., Reut, J., Tretjakov, A., Lomaka, A., Opik, A., Syritski, V. 2017. A computational approach to study functional monomer-protein molecular interactions to optimize protein molecular imprinting. – Journal of Molecular Recognition, 30, 1–9.

Lautner, G., Kaev, J., Reut, J., Opik, A., Rappich, J., Syritski, V., Gyurcsányi, R. E. 2011. Selective artificial receptors based on micropatterned surface-imprinted polymers for label-free detection of proteins by SPR Imaging. – Advanced Functional Materials, 21, 591–597.

Menaker, A., Syritski, V., Reut, J., Opik, A., Horvath, V., Gyurcsanyi, R. E. 2009. Electrosynthesized surface-imprinted conducting polymer microrods for selective protein recognition. – Advanced Materials, 21, 2271−2275.

Syritski, V., Reut, J., Menaker, A., Gyurcsanyi, R. E., Oepik, A. 2008. Electrosynthesized molecularly imprinted polypyrrole films for enantioselective recognition of L-aspartic acid. – Electrochimica Acta, 53, 2729−2736.

Tretjakov, A., Syritski, V., Reut, J., Boroznjak, R., Volobujeva, O., Öpik, A. 2013. Surface molecularly imprinted polydopamine films for recognition of immunoglobulin G. – Microchimica Acta, 180, 1433−1442.

Tretjakov, A., Syritski, V., Reut, J., Boroznjak, R., Öpik, A. 2016. Molecularly imprinted polymer film interfaced with Surface Acoustic Wave technology as a sensing platform for label-free protein detection. – Analytica Chimica Acta, 902, 182−188.