

# Estonian Centres of Excellence

Eesti teaduse  
tippkeskused



## Table of Contents | Sisukord

Tekstide autor: Kaur Maran

Toimetaja ja tõlkija: Marina Maran

Illustratsioonid: Markus Kasemaa

Kujundus: Helen Puistaja, disainistuudio Ruum 414

DOI: <https://doi.org/10.58009/aere-perennius0072>

Trükitud trükikojas K-Print OÜ

Tartu, 2023

Tippkeskuste tegevust on toetanud Riigi Tugiteenuste Keskus Euroopa Liidu Regionaalarengu Fondi meetmest „Eesti teadus- ja arendusasutuste rahvusvaheliselt kõrge kvaliteediga teadus- ja arendustegevuse toetamine ja jätkusuutlikkuse tagamine ning sellega eelduste loomine Eesti teaduse koostöö- ja konkurentsivõime tugevdamiseks Euroopa teadusruumis“.

12	GenTransMed – Centre of Excellence for Genomics and Translational Medicine	GenTransMed – Genoomika ja siirdemeditiini tippkeskus
22	CEMCE – Centre of Excellence in Molecular Cell Engineering	CEMCE – Molekulaarse rakutehnoloogia tippkeskus
34	EXCITE – Centre of Excellence in IT in Estonia	EXCITE – Eesti infotehnoloogia tippkeskus
46	The Dark Side of the Universe	Tume universum
56	EQUiTANT – Emerging Orders in Quantum and Nanomaterials	EQUiTANT – Kontrollitud korrastatus kvant- ja nanomaterjalides
68	EcolChange – Ecology of Global Change: Natural and Managed Ecosystems	EcolChange – Globaalmuutuste ökoloogia looduslikes ja põllumajanduskooslustes
80	HiTechDevices – Novel Materials and High Technology Equipment for Energy Storage and Conversion Systems	HiTechDevices – Uudsed materjalid ja kõrgtehnoloogilised seadmed energia salvestamise ja muundamise süsteemidele
92	ZEBE – Centre of Excellence for Zero Energy and Resource Efficient Smart Buildings and Districts	ZEBE – Teadmistepõhise ehituse tippkeskus
104	CEES – Centre of Excellence in Estonian Studies	CEES – Eesti-uuringute tippkeskus



# Preface

Saateks

## Preface

The challenges facing society are becoming increasingly significant, and solutions do not seem to be arriving. Nevertheless, there is a fair consensus both in global and local discussions that it is no longer possible to face the future without a solid base of knowledge.

Taking into account the experience of international cooperation, we have built up our scientific system in Estonia focusing on quality, which is determined in tough competition. The state has recognized excellence in science in various ways.

The Ministry of Education and Research has supported Centres of Excellence in science from the budgets of all previous periods of the European Union's Structural Funds available to Estonia. During the first period, from 2004 to 2006, the main goal was to modernise the infrastructure required for research and development.

## Saateks

Ühiskonna ees seisvad väljakutsed muutuvad järjest suuremaks ja lahendused ei näi saabuvat. Siiski ollakse nii globaalsetes kui ka kohalikes aruteludes üsna ühte meelt, et ilma teadmisteta tulevikule vastu minna ei ole enam võimalik.

Me oleme Eestis oma teadussüsteemi ehitanud üles rahvusvahelise koostöö kogemusi arvestades, keskendudes kvaliteedile, mis selgitatakse välja karmis konkurentsis. Tippteadust on riik tunnustanud erinevatel viisidel.

Teaduse tippkeskusi on Haridus- ja Teadusministeerium toetanud kõigi seniste Eestile avatud Euroopa Liidu struktuurivahendite perioodide eelarvest. Esimesel perioodil, aastatel 2004–2006, oli peamine eesmärk teadus- ja arendustegevuseks vajaliku taristu kaasajastamine.

Edaspidi seati eesmärkideks ka kõrgetasemelise teadus- ja arendustöö, innovatsiooni

Subsequently, the objectives also included support for high-level research and development, innovation, and graduate education, as well as promoting collaboration among research groups and creating better conditions for international research and development. Modernisation of research infrastructure also continued.

In 2023, nine centres from the most recent round of funding completed their activities. Their operation was supported through the European Union's Regional Development Fund under the 2014–2020 activity "Support for Centres of Excellence in science with a view to strengthening the international competitiveness and highest possible quality of research", with the aim of:

1. ensuring high-quality scientific research, including through collaboration between research and development institutions, universities, and businesses, while considering the strategic framework for smart specialisation;
2. enhancing the competitiveness of Estonian researchers in applying for international research grants, and increasing their participation in international cooperation;
3. ensuring the high level and diversity of scientific research, including the training and development of a new generation of top experts.

This collection compiles brief descriptions of the nine Centres of Excellence. We can see from these results that cutting-edge research has made a significant impact on the development of Estonia and dissemination of our research achievements worldwide. The effectiveness of the Centres of Excellence is driven by highly competent scientists, who simultaneously play many

ja kraadiõppe toetamine, uurimiserühmade koostöö edendamine ja paremate eelduste loomine rahvusvaheliseks teadus- ja arendustegevuseks ning jätkus ka teadustaristu ajakohastamine.

2023. aastal viisid oma tegevuse lõpuni üheksa seni viimase vooru keskust, mis said toetust Euroopa Regionaalarengu Fondi perioodi 2014–2020 tegevuse „Teaduse tippkeskuste toetamine teaduse rahvusvahelise konkurentsivõime ning tippkvaliteedi tugevdamiseks“ vahendusel, eesmärgiga:

1. tagada kõrge kvaliteediga teadusuuringute läbiviimine, sealhulgas teadus- ja arendusasutuste, ülikoolide ja ettevõtete vahelise koostöö kaudu ja arvestades nutika spetsialiseerumise strateegilist raamistikku;
2. suurendada Eesti teadlaste konkurentsivõimet rahvusvaheliste teadusgrantide taotlemisel ja osalemist rahvusvahelises koostöös;
3. tagada teaduse kõrge tase ja mitmekesisus, sealhulgas tippspetsialistide koolitamine ja järelkasv.

Käesolevasse kogumikku on koondatud nende üheksa tippkeskuse lühikirjeldused. Neist tulemustest näeme, et tippteaduse mõju Eesti arengule ja meie teadussaavutuste levitamisele üle kogu maailma on olnud väga suur. Tippkeskuste tulemuslikkuse loovad oma kõrge teadusliku kompetentsiga teadlased, kes täidavad samal ajal teadussüsteemis ka paljusid teisi rolle – juhendavad järelkasvu, viivad läbi õppetööd ning teevad koostööd ettevõtetega. Järjest on kasvanud ka vajadus erinevate valdkondlike poliitikate nõustamise järele ning paraku kasvab aina hoogsamalt ka halduskoormus.

other roles within the scientific system, mentoring the next generation, delivering courses, and collaborating with businesses. There is also a growing need for advising on various specialised policies and, unfortunately, administrative burdens are also growing at an accelerating pace.

This collection is a tribute to all the researchers who have contributed their work to make Estonia greater. Their research has inspired the artist Markus Kasemaa, whose original illustrations adorn this collection. The collection itself, in turn, was inspired by the efforts of Academician Jüri Engelbrecht, who has made it his mission to convey the results of previous Centres of Excellence to the public.

We can be proud of our researchers' work in Estonia. There are actually many more excellent researchers and research teams than those who participated in the completed Centres of Excellence. New ideas have been born, and new challenges await solutions. A new round for the selection of the next Centres of Excellence has also begun. This is undoubtedly a significant effort for all participants but, in any case, Estonian science will win, and Estonia will win.

Anu Noorma, Director General of the  
Estonian Research Council

See kogumik on tänuavaldus kõigile teadlastele, kes on oma tööga teinud Eesti suuremaks. Nende teadustöö on inspireerinud kunstnik Markus Kasemaa, kelle loodud originaalsed illustratsioonid kogumikku kaunistavad. Kogumiku koostamiseks andis omakorda inspiratsiooni akadeemik Jüri Engelbrecht, kes on oma südameasjaks võtnud varasemate tippkeskuste tulemusi avalikkusele vahendada.

Me võime Eestis olla oma teadlaste töö üle uhked. Väga suurepäraseid teadlasi ning uurimisrühmi on tegelikult palju rohkem kui neid, kes osalesid lõpetanud tippkeskustes. Sündinud on uued ideed ja lahendamist ootavad uued väljakutsed. Alanud on ka uus voor järgmiste tippkeskuste valikuks. Kindlasti on see suur pingutus kõigile osalejatele, aga igal juhul võidab Eesti teadus, võidab Eesti.

Anu Noorma, Eesti Teadusagentuuri  
juhatuse esimees

**This collection is a tribute to all the researchers who have contributed their work to make Estonia greater. We Estonians can be proud of our researchers' work.**

See kogumik on tänuavaldus kõikidele teadlastele, kes on oma tööga teinud Eesti suuremaks. Me võime Eestis olla oma teadlaste töö üle uhked.

Anu Noorma



1

# GenTransMed – Centre of Excellence for Genomics and Translational Medicine

Genoomika ja siirdemeditiini tippkeskus



## Bringing Genomics and Medicine Under One Roof

In addition to enabling cutting-edge research, one of the roles of Centres of Excellence has always been to bring together research groups within a field of research and make use of the emerging synergy to create new possibilities. Yet in the case of the Centre of Excellence for Genomics and Translational Medicine (GenTransMed), a bridge was built between genomics and medicine, which have so far followed different paths in many respects.

“The Centre of Excellence was created with the idea of getting professors, researchers and PhD students to collaborate more closely and understand what data we have got and what is their value,” says Professor Andres Metspalu, Head of the Centre of Excellence.

## Genoomika ja meditsiin ühe katuse alla

Lisaks kõrgetasemelise teadustöö võimaldamisele on üks tippkeskuste rolle alati olnud ühe teemaga tegelevaid uurimisrühmi kokku tuua ning tekkivast sünergiast uusi võimalusi luua. Genoomika ja siirdemeditsiini tippkeskuse puhul ehitati aga sild seni mõneski mõttes eri radu käinud genoomika ja meditsiini vahele.

„Tippkeskus saigi kokku pandud selle mõttega, et professorid, teadlased ja doktorandid hakkaksid rohkem koos töötama ja saaksid aru, mis andmed meil olemas on ja mis on nende väärtus,“ ütleb tippkeskuse juht, professor Andres Metspalu.

Niisiis toodi tippkeskuses n-ö ühe katuse alla kokku Eesti Biokeskuse juures tegutsenud genoomika tippkeskuse ja neuroimmu-

Hence, the Centre of Excellence brought together under one roof, so to say, the research groups of the Centre of Excellence for Genomics, which operated under the Estonian Biocentre, and the Centre of Excellence for Translational Medicine. As bioinformatics has been playing an increasingly important role in both disciplines, the research group of the Institute of Molecular and Cell Biology (IMCB) of the University of Tartu was also included, headed by Professor Maido Remm. To provide the Centre of Excellence with stronger expert knowledge in animal models, the Centre also engaged Professor Tõnis Timmus of Tallinn University of Technology (TalTech), who is one of the best experts of lab mice in Estonia.

This resulted in what Professor Metspalu calls a “perfect package” of 11 (later 12) research groups, all of which contributed their skills and knowledge to turn the achievements of fundamental research into actual applications.

### From test tube to hospital ward

As is often discussed in medicine, the so-called “bench to bedside” period, or the time it takes for benefits from a new fundamental discovery to reach patients, tends to be very long. When the COVID-19 pandemic broke out in 2020, it provided a good example of how already existing fundamental knowledge of how something works, which seems at first glance to have no applications, can turn out to be extremely necessary as new challenges arise.

Namely, the research group led by Pärt Peterson, Professor of Molecular Immunology at the University of Tartu, explores the human immune system and its capabilities, with a focus largely on human ageing, which is being studied at the level of single

noloogiliste haiguste siirdemeditsiini tippkeskuse teadustöörühmad. Kuna mõlemas teadusharus on aina olulisemaks kujunenud bioinformaatika, kaasati ka Tartu Ülikooli molekulaar- ja rakubioloogia instituudi (TÜMRI) töörühm eesotsas professor Maido Remmiga. Et tuua tippkeskusesse tugevamad eksperditeadmised ka loomudelite alal, kutsuti osalema ka Tallinna Tehnikaülikooli professor Tõnis Timmus, kes on üks Eesti parimaid laborihiirte eksperte.

Lõpuks sai professor Metspalu sõnul kokku ideaalne pakett, kuhu kuulus 11 (hiljem 12) uurimisrühma, kes kõik panustasid oma oskuste ja teadmistega sellesse, et viia fundamentaalteadustes tehtud saavutused reaalse rakendusteni.

### Katseklaasist palatisse

Meditsiinis räägitakse sageli, et niinimetatud *bench to bedside* periood ehk aeg, mis kulub uuest fundamentaalsest avastusest saadava kasu jõudmiseks patsientideni, kipub olema väga pikk. 2020. aastal lahvatanud koroonapandeemia pakkus aga näite, kuidas olemasolev ja esmapilgul otsese rakenduseta fundamentaaltasandi teadmine sellest, kuidas miski töötab, võib osutada muutunud oludes äärmiselt vajalikuks.

Nimelt tegeleb Tartu Ülikooli molekulaarimmunoloogia professori Pärt Petersoni töörühm inimese immuunsüsteemi ja selle võimekuse uurimisega. Suuresti on fookuses inimese vananemine ja seda uuritakse üksikute antikeha tüüpide tasemel. Saadav immunoloogiline profiil võiks anda võimaluse muuta näiteks nõrgenenud immuunreaktsiooniga vanemate inimeste vaktsiinikuure või leida seletusi vanema eaga seostatavatele haigustele.

antibody types. The resulting immunological profile could open the possibility to improve the vaccination schemes of older people with a weakened immune response or find explanations to diseases associated with old age.

With the arrival of the pandemic, people's immunological profiles became extremely important almost overnight. Research conducted by Peterson and his colleagues identified e.g. antibody profiles that would later allow researchers to forecast who would be more severely affected by the disease. Peterson's group also described the patients' immune response to Pfizer's Comirnaty vaccine and was one of the first to describe the immune response to a third vaccine dose outside clinical trials.

## With the arrival of the coronavirus pandemic, people's immunological profiles became extremely important almost overnight.

Koroonapandeemia tulekuga muutusid inimeste immunoloogilised profiilid peaaegu üleöö ääretult oluliseks.

Their research showed that three months after receiving the third dose, vaccinated individuals had developed both a CD4 and CD8 cell-mediated immune response to the spike protein and that those vaccinated with three doses had a significantly higher immune response.

The research field developed by Peterson can be summarised as "personalised immunology". While personalised medicine is associated mainly with genetics (heredi-

Pandeemia tulekuga muutusid inimeste immunoloogilised profiilid peaaegu üleöö ääretult oluliseks. Petersoni ja tema kolleegide uuringud tegid näiteks kindlaks antikehade profiilid, mille abil oli hiljem võimalik prognoosida, kellele haigus eriti rängalt mõjub. Kirjeldati ka patsientide immunoloogilist reaktsiooni Pfizeri Comirnaty vaktsiinile ja nende tiim oli esimeste seas, kes kirjeldasid väljaspool kliinilisi uuringuid kolmanda vaktsiinidoosi immunoloogilist reaktsiooni.

Selgus, et kolm kuud peale kolmandat doosi oli vaktsineeritud tekkinud nii CD4- kui ka CD8-rakuline immuunvastus ogavalgule ja et kolme doosiga vaktsineeritud immuunreaktsioon oli märgatavalt parem.

Petersoni arendatava suuna võiks kokku võtta terminiga personaalimmunoloogia. Kui personaalmeditsiini seostatakse peamiselt geneetika ehk päriliku infoga ja selle pakutavate võimalustega ning institutsiooni poolest Eestis Geenivaramuga, on samal ajal teada, et geenid ei suuda seletada inimese elu jooksul omandatud iseärasusi, mis kajastuvad enamasti just immuunsüsteemis. Nende iseärasuste arvesse võtmine võimaldaks oluliselt täpsemaid ja kvaliteetsemaid raviotsuseid.

tary information) and the possibilities that genomic information provides, and supported institutionally in Estonia by the Estonian Genome Project, it is also known that genes cannot explain the traits acquired during an individual's lifetime, which are reflected mostly in the immune system. Taking these traits into account would allow health professionals to make considerably more accurate and higher-quality treatment decisions.

An important role in collecting and analysing research material for many studies was played by the Estonian Gene Project along with its Core Facility of Genomics established in 2018. For example, Peterson was able to summon the necessary number of individuals with the genetic profile under investigation to collect the necessary samples from them. Genomic methods were also used as part of collaboration with the Research Group of Translational Neuropsychiatry led by Professor Eero Vasar, and researchers from TalTech's Research Group of Molecular Neurobiology led by Professor Tõnis Timmusk visited Tartu to use the Genomics Facility there.

## Smart cancer medicines

One of the most progressive areas of research in the Centre of Excellence was that of the Research Group of Cancer Biology led by Professor Tambet Teesalu, which works on new nanotechnological methods in cancer treatment – in a nutshell, on how to deliver drugs to cancer cells in a patient's organism so that they do not reach any wrong places. For that purpose, researchers are working on smart nanodrugs, which attach to cancer-specific molecular targets in the blood and thereby reach the tumour more precisely. Several cooperation projects were launched on this

Paljudes uuringutes mängis uurimismaterjali kogumises ja analüüsimises olulist rolli Geenivaramu koos selle juurde 2018. aastal moodustatud genoomika tuumiklaboriga. Näiteks sai Peterson Geenivaramu abil kokku kutsuda vajaliku hulga uuritava geeni-profiilliga inimesi, et koguda neilt vajalikud proovid. Genoomika meetodeid kasutati ka koostöö tegemisel professor Eero Vasara juhitud neuropsühhiaatria siirdemeditsiini uurimiserühmaga ning ka Tallinna Tehnikaülikooli professori Tõnis Timmuski juhitud molekulaarse neurobioloogia töörühmast käidi Tartus genoomika laborit kasutamas.

## Targad vähiravimid

Üks tippkeskuse progressiivsemaid uurimissuundi oli professor Tambet Teesalu juhitud vähibioloogia töörühmal, kes tegeleb uute nanotehnoloogiliste meetoditega vähiravis – kokkuvõtvalt sellega, et viia ravimid patsiendi organismis vähirakkudeni nii, et need valedesse kohtadesse ei jõuaks. Selleks arendatakse nn nutikaid nanoravimeid, mis kinnituvad veres vähile iseloomulike molekulaarsete märklaudade külge ja jõuavad seeläbi täpsemini kasvajani. Sel teemal käivitati mitmeid koostöid, mis võivad tulevikus viia ka eksperimentaal-teraapiateni.

Eriti problemaatilised on selles valguses ajukasvajad, kuna aju on ülejäänud organismist nn vere-aju barjääriga eraldatud. Selle probleemi lahendamiseks on Teesalu koostöös oma varasema, Santa Barbara California Ülikooli juures tegutseva laboriga töötanud välja peptiide, mis on võimelised seda barjääri läbistama ning mida saab ka täppismetooditega vähikolletesse transportida.

Tippkeskus alustas oma tööd 11 töörühmaga, aga lõpetab 12ga. Põhjuseks on see,



topic, potentially leading to experimental treatments in future.

Brain tumours are particularly problematic in this respect because the brain is separated from the rest of the body by the so-called blood-brain barrier. To solve this problem, Teesalu in collaboration with his previous lab at the University of California, Santa Barbara, have developed peptides that are capable of penetrating the barrier and can be transported to cancer foci using precision methods.

et tippkeskuse tegutsemise ajal saabus USAst Eestisse tagasi TÜ vanemteadur (alates 2023. aastast professor) Elin Org, kes käivitas siin mikrobioomika uurimisuuna. Tema rühma töö tulemusena rikastati Geenivaramu andmekogu 2510 geenidoonori soolestiku ja suu mikrobioomi proovidega. Moodustunud Eesti mikrobioomi valim võimaldab läbi viia mitmesuguseid uuringuid inimeses elavate mikroobide ja inimese tervise seoste kohta. Muu hulgas on juba praegu käivitatud projektid jämesoolevähi, põletikuliste soolehaiguste ja

## Women are currently invited to screening from the age of 50 but many women have already died from cancer by then. Now they could be saved.

Praegu kutsutakse naised sõeluuringule alates viiekümnendast eluaastast, aga paljud on selleks ajaks juba vähki surnud. Nüüd saaks neid päästa.

Andres Metspalu

The Centre of Excellence started its work with 11 research groups but ended it with 12. This was because Elin Org, Senior Research Fellow (since 2023, Professor) of the University of Tartu, returned to Estonia from the United States and established a new field of research here – microbiomics. As a result of the work her research group has done, the database of the Genome Project was enriched with the gut and mouth microbiome samples of 2,510 gene donors. The resulting sample of the Estonian microbiome allows various studies on the linkage between the human microbiome and health

diabeedi mikrobioomi-seoste uurimises, mis võib viia nende haiguste varasema diagnoosimiseni.

Geenivaramu olulisust teadustöös näitas prof Andres Metspalu haiguste genoomika uurimisrühma projekt, kus uuriti koos arstidega akne geneetikat. Prof Külli Kingo tõi sellesse uurimusse kogu oma kliinilise kompetentsi akne alal ja see projekt kinnitas Geenivaramu algset ideed, et koostööd tehes saab olulisi teadusprojekte viia läbi kiirelt ning ilma uusi proove kogumata ja molekulaarseid analüüse tegemata, sest

to be carried out. Projects to study the relationships of colorectal cancer, inflammatory bowel disease and diabetes with the microbiome have already started, amongst others, which may lead to earlier diagnosing of these diseases.

The importance of the Estonian Genome Project in research was demonstrated by a project where Professor Andres Metspalu's Human Disease Genomics Working Group collaborated with medical researchers to study the genetics of acne. Professor Külli Kingo brought all of her clinical expertise in acne into this research and the project confirmed the original idea behind the Genome Project: that cooperation would allow important research projects to be carried out quickly and without the need to collect new samples and conduct molecular analyses because everything already exists in the databases of the Genome Project. All you need is to come up with an idea, obtain the authorisation of the Ethics Committee, do the statistical calculations, repeat the findings in other biobanks, interpret the results, and write and publish a paper.

## Winds of change take research back to the roots

On the side of genomics, the greatest achievements were about the transition from genome-wide association studies to polygenic risk scores, or PRSs. This transition means that instead of focusing on the links of single genes with certain diseases, as was done earlier, researchers now look at the interactions of different genes to calculate the risk of different diseases.

One of the greatest successes in this field is the breast cancer screening programme to be launched in 2024: for the first time, women with a higher risk score will be

kõik on Geenivaramu andmebaasides juba olemas. Vaja on vaid ideed, eetikakomitee luba, teha statistilised arvutused, korrata leiud teistes biopankades, interpreteerida tulemused ning kirjutada ja avaldada artikkel.

## Uued tuuled toovad juurte juurde tagasi

Genoomika poolelt olid suurimad edusammud seotud üleminekuga ülegenoomselt assotsiatsiooniuringutelt polügeensetele riskiskooridele ehk PRSidele. See tähendab, et kui varem keskenduti üksikute geenide seostele teatud haigustega, siis nüüd vaadatakse eri geene koosmõjus, et arvutada välja erinevate haiguste tekkimise risk.

Selles valdkonnas on üks suuremaid edusamme Eestis 2024. aastast käivituv rinnavähi sõeluuring, mis tehakse esmakordselt nii, et kõrgema riskiskooriga naised kutsutakse mammograafiauringutele teistest kümme aastat varem. Kuigi siia andis oma panuse ka riiklik PerMed projekt, tuli projekti käivitanud alusteadus ikkagi tippkeskuse poolt.

„Praegu kutsutakse naised sõeluuringule alates viiekümnendast eluaastast, aga paljud on selleks ajaks juba vähki surnud. Nüüd saaks neid päästa. Ma arvan, et see on kogu Euroopas üks esimesi näiteid, kus PRSi kasutatakse reaalses tervishoius,“ märgib Metspalu.

Kui siiani on palju rõhku läinud geneetiliste analüüside, statistika ja biostatistika peale, siis nüüdseks on see lähenemisviis end tõestanud ja Eesti genoomika end maailma liidrite sekka töötanud.

„Praegu on meil palju statistikuid ja ITd, aga vähe nn märgade katsete tegijaid. Me peame

invited to mammography screening ten years earlier than others. Although the national PerMed project also contributed to this, the fundamental research behind the project was done under the Centre of Excellence.

“Women are currently invited to screening from the age of 50 but many women have already died from cancer by then. Now they could be saved. I believe this is one of the first examples in the whole of Europe where PRS is used in actual health care,” Metspalu notes.

While researchers have so far put much effort into genetic analyses, statistics and biostatistics, the new approach has proved itself by now and Estonian genomics has worked its way to being one of the world's leaders in the field.

“Today we have many statisticians and IT people but few researchers making the so-called “wet” experiments. We have to return to classical molecular biology because statistics alone will no longer suffice. We can use today's methods to establish a hypothesis and say that there is some kind of a connection between a gene and a health issue, but in order to find out precisely how the thing works, we have to use the methods of molecular biology,” Metspalu explains.

jälle klassikalise molekulaarbioloogia juurde tagasi minema, kuna ainult statistikaga enam ei saa. Praeguste meetoditega saame luua hüpoteesi ja öelda, et mingi geeni ja terviseprobleemi vahel on seos, aga kuidas see asi täpselt töötab, seda tuleb uurida ikka molekulaarbioloogiliste meetoditega,” tõdeb Metspalu.

<b>Publications</b>	763
<b>Institutions</b>	2 University of Tartu, Tallinn University of Technology
<b>Scientists involved</b>	85
<b>Head of the Centre</b>	Andres Metspalu
<b>Lead institution of the Centre</b>	University of Tartu

<b>Publikatsioone</b>	763
<b>Asutusi</b>	2 Tartu Ülikool, Tallinna Tehnikaülikool
<b>Kaasatud teadlasi</b>	85
<b>Tippkeskuse juht</b>	Andres Metspalu
<b>Tippkeskuse juhtasutus</b>	Tartu Ülikool

The data is based on the final report of the Centre of Excellence. Andmed põhinevad tippkeskuse lõpparuandel.

<b>Lead / Vastutav täitja</b>	<b>Research groups</b>	<b>Uurimisrühmad</b>
Allen Kaasik	Mitochondrial Medicine	Mitokondriaalne meditsiin
Pärt Peterson	Molecular Pathology	Molekulaarpatoloogia
Mihkel Zilmer	Metabolomical and Functional-Structural Phenotyping	Metaboloomiline ja struktuur-funktsionaalne fenotüüpimine
Tambet Teesalu	Laboratory of Cancer Biology	Vähibioloogia labor
Eero Vasar	Translational Neuropsychiatry	Siirdeuuringud neuropsühhiaatrias
Ana Rebane	RNA Biology	RNA bioloogia
Mait Metspalu	Evolutionary Human Genetics	Inimese evolutsiooniline geneetika
Tõnis Timmus	Molecular Neurobiology	Molekulaarne neurobioloogia
Tõnu Esko	Functional Genomics	Funktsionaalne genomika
Andres Metspalu	Human Diseases Genomics	Haiguste genomika
Neeme Tõnisson	Cancer and Clinical Genomics	Vähiuuringud ja kliiniline genomika
Maido Remm	Bioinformatics	Bioinformaatika
Elin Org	Microbiomics	Mikrobiomika

The data is from the Estonian Research Information System. Andmed on võetud Eesti Teadusinfosüsteemist.

2

CEMCE –  
Centre of Excellence  
in Molecular Cell  
Engineering

Molekulaarse rakutehnoloogia tippkeskus





## Research into the Building Blocks of Life Saves Lives and Promotes Industries

Molecular-level research into living organisms has taken a giant leap forward in recent decades and opened new possibilities in many fields. Studying and manipulating the fundamental molecules of life – DNA, proteins, RNA, etc. – is becoming an integral part of bioeconomy, and the merging of biology, medicine, chemistry and physics has even spawned a new discipline called cellular and molecular biotechnology.

This is a science that studies from different angles how various cells could be modified so that humans could benefit from them, and this is also precisely what the Centre of Excellence in Molecular Cell Engineering, or CEMCE, explored. Areas where research conducted under the Centre of Excellence

## Elu ehitusklotside uurimine päästab elu ja arendab tööstust

Viimastel aastakümnetel on elusorganismide molekulaarsel tasemel uurimine teinud tohutu arenguhüppe ning avanud võimalusi paljudes valdkondades. Biomajanduse lahutamatuks osaks on kujunemas elu alusmolekulide – DNA, valkude, RNA jpm – tundmaõppimine ja mõjutamine ning mitmel pool maailmas räägitaksegi juba bioloogia, meditsiini, keemia ja füüsika koondumisel tekkinud erialast nimetusega raku- ja molekulaarne biotehnoloogia.

See on teadus, mis uurib eri nurkade alt, kuidas erinevaid rakke niimoodi muuta, et inimene võiks neist kasu saada, ning just sellega tegeles ka molekulaarse rakutehnoloogia tippkeskus CEMCE (ingl Centre of Excellence in Molecular Cell Engineering). Alad, kus tippkeskuse raames tehtud

could find applications range from medicine to wood processing and crop production, and the research objects range from viruses to plant and mammalian cells.

“The concept of our Centre of Excellence was based on the fact that modern science has produced various tools for modifying cells to give them new properties. Further development of such technologies has been one of the cross-cutting topics of the Centre of Excellence,” explains Tanel Tenson, Professor of Antimicrobial Technologies at the University of Tartu and Head of the Centre of Excellence.

### Modern science has produced various tools for modifying cells to give them new properties.

Tänapäeval on tekkinud mitmesuguseid tehnoloogiaid, mille abil saab rakke muuta, et anda neile uusi omadusi.

Tanel Tenson

A look at the seven research teams of the Centre of Excellence gives an idea of the two main approaches applied under the name of molecular cell engineering. Broadly speaking, one can say that cells were modified using genetic manipulation or specific chemical agents.

### Applications of new knowledge

The best known of the gene editing tools used in modern cell engineering is certainly the CRISPR-Cas9 technique known colloquially as the “gene scissors”, which revolutionised biotechnology and earned

teadustöö võib väljundeid leida, ulatuvad meditsiinist puidutöötluste ja taimekasvatusele ning uurimisobjektid viirustest taime- ja imetajarakkudeni.

„Nagu nimigi ütleb, rajanes meie tippkeskus sellele, et tänapäeval on tekkinud mitmesuguseid tehnoloogiaid, mille abil saab rakke muuta, et anda neile uusi omadusi. Selliste tehnoloogiate edasiarendamine on olnud ka üks tippkeskuse läbivatest teemadest,“ selgitab tippkeskuse juht, Tartu Ülikooli antimikroobsete tehnoloogiate professor Tanel Tenson.

Pilk tippkeskuse seitsmele töörühmale annab aimu kahest eri lähenemisviisist, mida molekulaarse rakutehnoloogia nimetuse all rakendati. Laias laastus võib öelda, et rakkude muutmiseks kasutati nii geenidega manipuleerimist kui ka spetsiifilisi kemikaale.

### Uute teadmiste rakendused

Rakutehnoloogias kasutusel olevatest geenitehnoloogiatest on kahtlemata kuulsaim nn geenikäridena tuntud ja biotehnoloogias revolutsiooni kaasa toonud CRISPR-Cas9, mille eest selle avastajad Emmanuelle Charpentier ja Jennifer Doudna said 2020.



its discoverers, Emmanuelle Charpentier and Jennifer Doudna the 2020 Nobel Prize in Chemistry. While investigating antiviral self-defence mechanisms of bacteria, they discovered essentially a new molecular mechanism, whereby the bacterium “records” bits of viral genes into its own genome. The gene editing method har-

aastal ka Nobeli preemia. Sisuliselt avastasid nad bakterite viirusevastast enesekaitset uurides uue molekulaarse mehhanismi, kus bakter „salvestab“ enda genoomi viiruse äratundmist võimaldavaid geenijuppe. Sellest teadmistest arendatud geenitehnoloogia meetod on nüüdseks üks levinumaid DNA manipuleerimise tööriistu.

## As climate change becomes ever more severe, such precision breeding will play an increasingly important role in safeguarding food security.

Kliimamuutuste süvenedes mängib selline täppisaretus toidujulgeoleku tagamisel aina olulisemat rolli.

nessed from this discovery is now one of the most widely used tools for DNA manipulation.

This technology was used in the framework of the Centre of Excellence e.g. by the Plant Signal Research Team led by Hannes Kollist, Professor of Molecular Plant Biology. One of their greatest practical achievements was the creation of more drought-tolerant plants. The research group was mainly interested in stomata – cell complexes on the plant leaf surface that control the plant’s gas exchange and its metabolism more generally.

By editing the genes that control the behaviour of stomata, Kollist and his colleagues were able to create tomato and pea plants whose water consumption is nearly 50 per cent lower than in the varieties used today. As climate change becomes ever more severe, such precision breeding will play an

Tippkeskuse raames kasutas seda tehnoloogiat näiteks molekulaarse taimebioloogia professori Hannes Kollisti töörühm, kelle üks suuremaid praktilisi saavutusi on põuakindlamate taimede loomine. Töörühma peamiseks huviobjektiks on õhulõhed – taimelehe pinnal asuvad rakukompleksid, mis kontrollivad taime hingamist ja seeläbi ka ainevahetust laiemalt. Õhulõhede käitumist reguleerivate valkude geene muutes õnnestus Kollistil ja tema kolleegidel luua tomati- ja hernetaimed, mille veevajadus on ligi 50 protsenti väiksem kui praegu kasutatavatel kultuuridel. Kliimamuutuste süvenedes mängib selline täppisaretus toidujulgeoleku tagamisel aina olulisemat rolli, arvab Kollist.

Samal ajal tegeles professor Mart Loogi juhitud süsteemibioloogia ja sünteetilise bioloogia töörühm pärmirakkudega, ja seda nii nende fundamentaalse uurimise kui ka tööstuses rakendamise sihiga. Uuriti,

increasingly important role in safeguarding food security, believes Kollist.

At the same time, the Research Team for Systems and Synthetic Biology led by Professor Mart Loog worked with yeast cells, with the aim of both fundamental research into and industrial application of yeasts. They investigated how the cell cycle of yeasts works in general and in which situations obstacles occur. The latter is particularly important because if control over growth is lost in a cell, it may lead to the development of cancer, while better understanding of such processes takes us a step closer to understanding e.g. the formation of tumours. Loog’s research team, working with companies such as Graanul Invest, also used the processes involving yeasts to investigate the possibilities for high-tech valorisation of wood and wood sugars.

Synthetic biology is also the focus of the start-up company Gearbox BioSciences, a direct spin-off of the work done at the Centre of Excellence, led by Associate Professor Arvi Jõers. The company’s activities are centred on the novel pop-out-plasmid technology developed in the Centre of Excellence, which can be used to make genetically modified bacterial cells produce large quantities of different proteins. One of the great advantages of this technology is the fact that it does not require antibiotics or chemical catalysts and is therefore cheaper and also safer than the protein production technologies currently in use.

### Computer models showing the way

The above-mentioned CRISPR-Cas9 and genetic modification represent just one side of the methods used in the Centre of Excellence to modify the fundamental

kuidas pärmide rakutsükkel üldse toimib ja mis olukordades tekivad selles takistused. Viimane on eriti oluline, kuna kui rakus kaob kontroll kasvu üle, võib see viia vähi tekkeni. Selliste protsesside parem mõistmine viib aga sammu lähemale näiteks kasvajate tekke mõistmisele. Pärmseentega seotud protsesse kasutas Loogi töörühm ära ka puidu ja puidusuhkrute kõrgtehnoloogilise väärimise võimaluste uurimiseks, tehes seejuures koostööd selliste firmadega nagu Graanul Invest.

Sünteetilise bioloogiaga on seotud ka otseselt tippkeskuse tegevusest välja kasvanud idufirma Gearbox BioSciences, mida juhib TÜ kaasprofessor Arvi Jõers. Firma tegevuse keskmes on tippkeskuses välja arendatud uudne *pop-out-plasmid*-tehnoloogia, mille abil on võimalik panna geenmuundatud bakterirakke tootma suures koguses erinevaid valke. Selle tehnoloogia üks suur eelis on, et see ei vaja antibiootikume ega keemilisi katalüsaatoreid ning on seetõttu praegu kasutuses olevatest valgu tootmise tehnikatest odavam ja ka ohutum.

### Arvutimudelid näitavad teed

Eespool nimetatud CRISPR-Cas9 ja geenmuundamine on vaid üks pool elu molekulide muutmise meetoditest, millega tippkeskuses tegeleti. Nendega paralleelselt kasutati rakumehhanismide muutmiseks ka keemilise bioloogia meetodeid. Rakkude kemikaalidega mõjutamiseks tuleb aga mõista rakus toimuvaid molekulaarseid protsesse ja vastastikmõjusid, mis kõik mõjutavad juba bioloogiliste süsteemide – viiruste, bakterite, taime- ja imetajarakkude – toimimist. Nende vastastikmõjude tundmaõppimisega ja seeläbi ka uudsete molekulaartehnoloogia meetodite väljatöötamisega võib tegeleda eksperimentaalselt,

molecules of life. In parallel with these, cellular mechanisms were also modified using the methods of chemical biology.

However, in order to manipulate cells with chemicals, you have to first understand the molecular processes and interactions at work in cells, all of which affect the functioning of biological systems – viruses, bacteria, plant and mammalian cells, etc. These interactions can be studied – and thereby also novel molecular engineering methods developed – experimentally, by testing the effects of different chemicals at different concentrations and under different condi-

katsetades eri kemikaalide mõju erinevatel kontsentratsioonidel ja tingimustel, aga tänapäeval on aina olulisemal kohal arvutuslik meetod, kus tulemusi prognoositakse arvutimodelleerimise teel.

Sellega tegeleski molekulaardisaini töörühm eesotsas Mati Karelsoni ja Uko Maraniga. Tanel Tenson toob välja, et paljud uurimisrühmad leidsid tippkeskuse tegevustekäigus koostöös molekulaardisaini töörühmaga loodud teoreetiliste mudelite abil sihtmärgid, mida kemikaalidega mõjutada, et kutsuda rakkudes ellu soovitud muutusi.

## Many research groups used theoretical models created to find the targets for manipulation with chemicals to bring about the desired changes in cells.

Paljud uurimisrühmad leidsid teoreetiliste mudelite abil sihtmärgid, mida kemikaalidega mõjutada, et kutsuda rakkudes esile soovitud muutusi.

tions, but researchers are increasingly using computational methods, where the results are predicted by computer modelling.

This was what the Research Team for Molecular Design led by Mati Karelson and Uko Maran worked on. Professor Tenson points out that many research teams of the Centre of Excellence used the theoretical models created in collaboration with this research team to find the targets for manipulation with chemicals to bring about the desired changes in cells.

Mudelite loomisega, kuigi hoopis teise nurga alt, tegeles ka rakendusviroloogia professori Andres Meritsa viiruste ja imetajarakkude manipuleerimise töörühm, kelle töö leidis otsest rakendust koroonapandeemia kontekstis. Nimelt on kõigile selge, et inimesele ohtliku viirusega töötada on keeruline, tülikas ja seetõttu ka kallis, kuna see nõuab spetsiaalseid bioohutuse tasemega laboreid, milliseid Eestis ei olnudki. Tippkeskuse raames löid Merits ja tema kolleegid aga uuest koroonaviirusest inimesele ohtud mudelsüsteemid, mis võimaldavad viirusega turvaliselt töötada, et uurida võimalikke viirusevastaseid aineid või muid

Creation of models was also what the Research Team for Viral and Mammalian Cell Engineering led by Andres Merits, Professor of Applied Virology, worked on, although from a very different angle. Their work found direct application in the context of the coronavirus pandemic. Namely, it is obvious that working with a deadly virus is complicated, troublesome and therefore also expensive because it requires special biosafety laboratories, which Estonia did not even have.

In the framework of the Centre of Excellence, Merits and his colleagues created human-safe model systems of the novel coronavirus, which allow researchers to investigate possible antiviral substances or other circumstances pertaining to the functioning of the virus.

Among others, Merits's team participated in an international cooperation project in which a technology was developed for controlling the spread of the mosquito-borne Chikungunya virus, which spreads in waves in tropical countries. This required delving into the mutual adaptations of the virus and the mosquito species and determining how the mosquito transmits the virus at the molecular level. Working with British researchers, the team also developed a technology for a so-called "antiviral mosquito", which can likely be used to stop a developing Chikungunya outbreak.

On the medicine side, one of the most important fields of research of the Centre of Excellence was that of antibiotics and molecular microbiology, which was led by Professor Tenson himself and focused on the effect of antimicrobial compounds. Namely, antibiotics are currently administered in such a way that the administered drug begins to spread in the organism through natural pathways and hopefully

viiruse toimimisega seotud asjaolusid.

Muu hulgas osales Meritsa juhitud töörühm rahvusvahelises koostööprojektis, mille raames töötati välja tehnoloogia troopilistes riikides sääskede vahendusel lainetena leviva Chikungunya viiruse leviku piiramiseks. Selleks tuli aga süveneda viiruse ja teda kandva sääseliigi omavaheliste kohastumuste uurimisse ning teha molekulaarsel tasandil kindlaks, kuidas sääsk viirust edasi kannab. Koostöös Briti teadlastega töötati välja ka nn viirusevastase sääse tehnoloogia, mida peaks olema võimalik kasutada areneva Chikungunya-puhangu peatamiseks.

Biomeditsiini poole pealt oli tippkeskuse üheks olulisemaks suunaks professor Tensoni enda juhitud antibiootikumide ja molekulaarse mikrobioloogia suund, mille fookuses oli antimikroobsete ühendite mõju küsimus. Nimelt käib antibiootikumide manustamine praegu enamasti nii, et manustatud ravim hakkab organismis loomulike teid pidi levima ning jõuab loodetavasti ka haigustekitajateni. Kui edukalt see täpselt toimib, on aga tihti peale halvasti teada.

## Reporterbakterid ja uudsed ravimid

Selleks, et uurida erinevate ühendite mõju, on Tensoni uurimisrühm arendanud biosensorite tehnoloogiat, kus uuritavale ainele tundlike elementide rolli mängivad erinevad bioloogilised süsteemid. Näiteks antibiootikumide mõju määramiseks loodi nn reporterbakterite kontseptsioon, kus bakterivalgud disainiti biotehnoloogiliste võetega selliseks, et nad muudavad antibiootikumiga kokkupuutel värvi.

Niisugune reporterbakter on vajalik, kuna arstiteaduses kirjeldatakse aina sagedamini

also reaches the pathogens. The exact effectiveness of this is, however, often poorly known.

## Reporter bacteria and novel medicines

To investigate the effect of different compounds, Tenson's research team has further developed the technology of biosensors, where the role of elements sensitive to the substance under observation is tested in various biological systems. For example, to determine the effect of antibiotics, the team created the concept of the so-called "reporter bacteria" by using biotechnological techniques to engineer bacterial proteins to change colour when exposed to antibiotics.

Such reporter bacteria are necessary because medical science has been increasingly describing situations where an antibiotic is effective in an organism, destroying a myriad of microbes, but does not reach the focal point of the disease – the site where it is most needed. Reporter bacteria allow researchers to see after a drug is administered to test animals how the antibiotic reaches a point of infection, how it works there and, in the longer run, to apply this technology also in developing new antibiotics.

An important role in investigating both antibiotics and antiviral compounds was played by TalTech Professor Margus Lopp's research team, which synthesised molecules that other teams could then test in biological systems – on real bacteria, viruses or other test organisms. Researchers of Lopp's team developed a number of new synthesis methods for the purpose.

olukordi, kus antibiootikum on küll organismis efektiivne ja hävitab suure hulga mikroobe, kuid ei jõua ühel või teisel põhjusel haiguskoldeni ehk kohani, kus teda kõige rohkem vaja on. Reporterbakterid võimaldavad pärast ravimi katseloomadele manustamist vaadata, kuidas antibiootikum ühte või teise nakkuskoldesse jõuab ja kuidas ta seal mõjub, ning pikemas perspektiivis rakendada seda tehnoloogiat ka uute antibiootikumide arendamisel.

Nii antibiootikumide kui ka viirusevastaste ühendite uurimises oli oluline roll Tallinna Tehnikaülikooli professori Margus Loppi töörühmal, kes sünteesis molekule, mida teised töörühmad said seejärel bioloogilistes süsteemides – reaalsete bakterite, viiruste või muude katseorganismide peal – proovida. Selleks töötasid Loppi rühma teadlased välja terve hulga uusi sünteesimeetodeid.

Vajalikud ained tuleb aga ka kuidagi rakuni viia, hoidudes seejuures rakke kahjustamast. Sellega tegeles professor Ülo Langeli juhitud molekulaarse biotehnoloogia töörühm, kelle töö keskmes olid 5–30 aminohapest koosnevad molekulid, mida nimetatakse peptiidideks. Nende erivõime ongi see, et nad suudavad vajalikud molekulid endaga siduda ja läbi rakumembraani transportida. Seejuures on peptiidid rakule endale ohutud ning pärast oma töö tegemist lagunevad nad taas aminohapeteks – raku ehitusplokkideks.

Viimastel aastakümnetel on mitmed paljulubavad vähi ja muude haiguste ravimikandidaadid kõrvale heidetud, kuna need pole olnud kas oma suuruse või laengu tõttu võimelised raku sisenema. Peptiidide uuringud võivad mitmed neist taas fookusesse tuua. Ravimite täpsem haiguskoldeni viimine töötab märkimisväärselt vähendada kõrvaltoimete probleemi ja ka resistentsuse teket.

The necessary agents also need to be delivered to the cell somehow, while avoiding causing damage to the cells. This was what the Research Team for Molecular Biotechnology led by Professor Ülo Langel worked on. Their work centred on 5–30-amino-acid molecules called peptides. These have the special ability to bind the necessary molecules and transport them through cell membranes, while being harmless to the cell itself. After their work is done, they break up again into amino acids – the building blocks of cells.

A number of promising drug candidates against cancer and other diseases have been discarded in recent decades because they have been unable to enter the cell due to their size or charge. Studies into peptides may bring many of them back into the focus. More precise delivery of drugs to the affected area promises to significantly reduce the problem of side effects and also the emergence of drug resistance.

As can be expected from a Centre of Excellence in biomedicine, the competence gathered in several research teams of the Centre found application during the COVID-19 pandemic. Professor Merits as a member of the Scientific Advisory Board to the Government of Estonia became one of the best-known researchers in Estonia and participated also in developing different vaccine candidates. A number of researchers of the Centre of Excellence were also involved in the development of the prophylactic nasal spray BioBlock, and Professor Tenson became the main spokesman of the wastewater study showing the extent of the actual spread of the virus.

"We simply had experts competent in this field available at that moment. But, naturally, we also focused simultaneously on various other medicines and biomedical

Nagu biomeditsiini tippkeskuselt oodata võib, leidis mitmesse töörühma koondunud kompetents rakendust Covid-19 pandeemia ajal. Professor Merits kujunes valitsust nõustava teadusnõukoja liikmena üheks Eesti tuntuimaks teadlaseks ja osales ka erinevate vaktsiinikandidaatide väljatöötamises. Mitmed tippkeskusega seotud teadlased olid seotud ka profülaktilise ninasprei BioBlock väljatöötamisega ning professor Tensonist sai viiruse reaalse leviku ulatust näitava reoveeuuringu peamine kõneisik.

„Eks tol hetkel olid meil võtta spetsialistid, kes seda ala jagavad. Aga loomulikult olid siin samal ajal fookuses ka igasuguste teiste ravimite ja biomeditsiini väljakutsetega seotud küsimused,“ rõhutab Tenson.

Lead / Vastutav täitja	Research groups	Uurimisrühmad
Margus Lopp	Chemical Synthesis and Engineering	Keemiline süntees ja tehnoloogia
Mati Karelson	Molecular Design	Molekulaardisain
Hannes Kollist	Plant Signal Research	Taimsed signaalid
Mart Loog	Systems and Synthetic Biology	Süsteemibioloogia ja sünteetiline bioloogia
Tanel Tenson	Antibiotics and Molecular Microbiology	Antibiootikumid ja molekulaarne mikrobioloogia
Ülo Langel	Molecular Biotechnology	Molekulaarne biotehnoloogia
Andres Merits	Virus and Mammalian Cell Engineering	Viiruste ja imetajarakkude kavandamine ja manipuleerimine

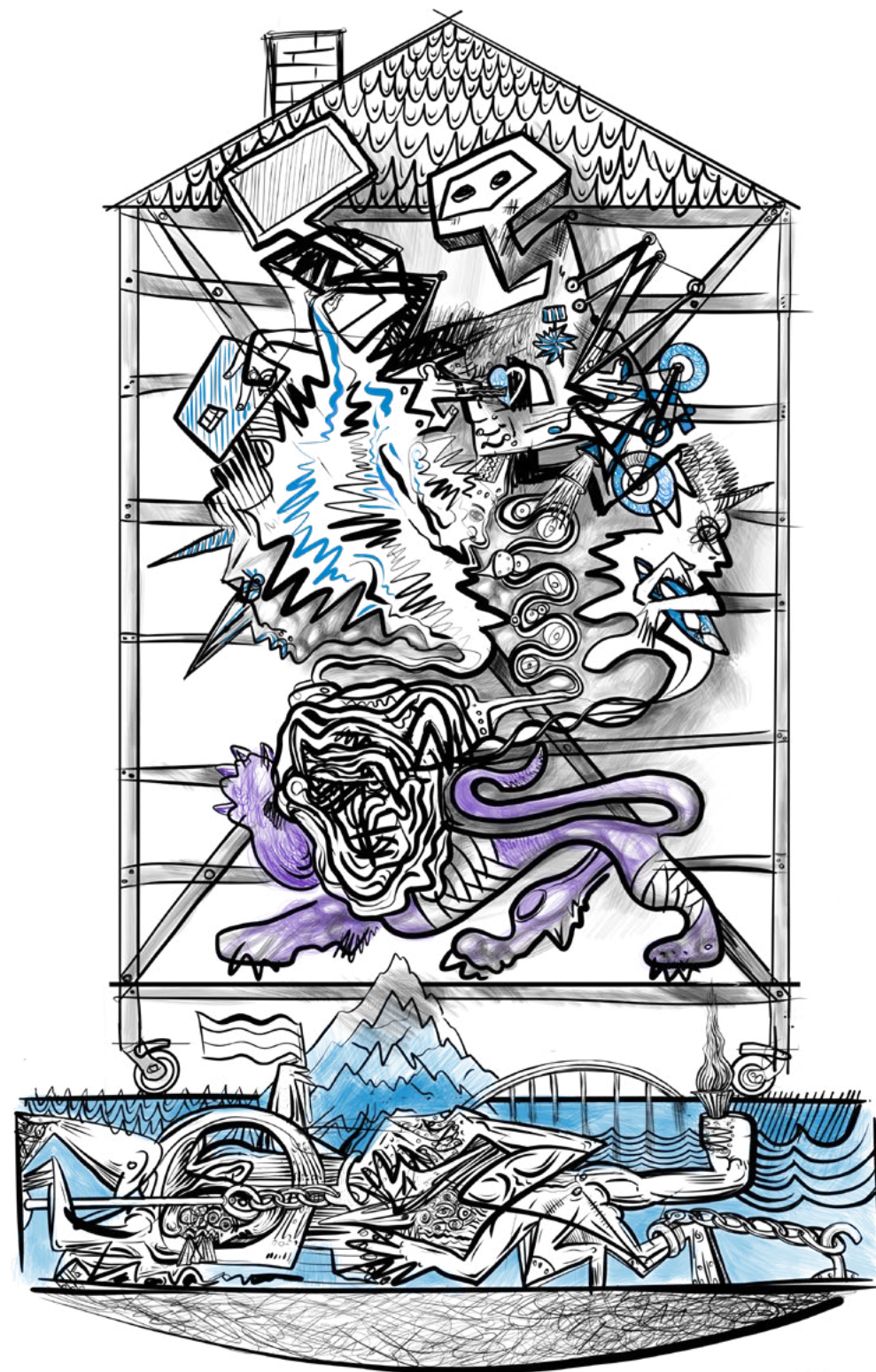
The data is from the Estonian Research Information System.  
Andmed on võetud Eesti Teadusinfosüsteemist.



3

# EXCITE – Centre of Excellence in IT in Estonia

Eesti infotehnoloogia tippkeskus



## IT Systems That Do Not Need Constant Updating

Although IT applications have come to play an increasingly important role in nearly all areas of modern life, the work of the Centre of Excellence EXCITE focused on fundamental IT research. All of its 16 research teams attempted to solve, in one way or another, a global issue in IT research.

Namely, although the mind-boggling development of information technologies affects all but a few people worldwide, almost all IT systems have a major shortcoming due to historical reasons. Professor Maarja Kruusmaa of Tallinn University of Technology (TalTech), the first coordinator and one of the launchers of the Centre of Excellence EXCITE, explains this by recalling her student years, when a professor of hers noted that if houses were built on the same principle as the one used by programmers to

## IT-süsteemid, mis ei vaja pidevat uuendamist

Kuigi IT-rakendused mängivad tänapäeval peaaegu igas eluvaldkonnas aina suuremat rolli, keskendus tippkeskus EXCITE oma töös fundamentaalsele infotehnoloogiateadusele. Kõik 16 uurimisrühma üritasid üht- või teistviisi lahendada üht IT-teaduse globaalset valupunkti.

Nimelt, kuigi maailmas on vähe inimesi, keda infotehnoloogia peadpööriv areng ei puuduta, on peaaegu kõigis IT-süsteemides ajaloolistel põhjustel suur puudujääk. Tippkeskuse EXCITE esimene koordinaator ja üks käivitajatest, Tallinna Tehnikaülikooli professor Maarja Kruusmaa selgitab seda läbi meenutuse oma õpingute ajast, mil üks tema õppejõud nentis, et kui maju ehitataks samal põhimõttel nagu programmeerijad loovad programme, siis hävitaks esimene rahn tsivilisatsiooni.

create programmes, the first woodpecker would destroy the civilization.

“Construction is such an old discipline that it would be absolutely unthinkable that someone would say as a researcher that they study systems for ‘secure construction’. It is, after all, self-evident that houses need to be built so that they do not collapse. Yet, TalTech has a Centre for Dependable Computing Systems, led by Professor (and member of the Centre of Excellence – ed.) Jaan Raik. Consequently, the entire field has some kind of a systemic problem,” Kruusmaa explains.

### Isolated researchers brought together

Or in other words, how would you react if a builder turned up at your door wanting to renovate the hydro insulation of your house? And a week later someone who wants to replace a roof beam, and the following week someone who wants to bring the foundation of your house up to date? Yet for a computer user, frequent updating of e.g. operating systems and programmes is a completely habitual and customary procedure. It happens all too often that systems are built up and only then does one begin to test them and check how reliable they are.

Part of the problem lies in the fact that IT systems are not secure and sustainable in their basic design. And, clearly, the more complex they become, the more complicated it is to ensure and check their security and reliability. Hence, the main mission of the Centre of Excellence EXCITE was to bring into IT research the paradigm of building systems and services in such a way that they would at once be “ready”, secure, and reliable.

„Ehitus on nii vana distsipliin, et oleks täiesti mõeldamatu, et keegi teataks, et uurib teadlasena turvalise ehitamise süsteeme. On ju iseenesest mõistetav, et maju peab ehitama ikka sellisena, et need kokku ei kukuks. Tallinna Tehnikaülikoolis on aga olemas usaldusväärsete arvutisüsteemide keskus, mida juhib professor (ja tippkeskuse liige – *toim*) Jaan Raik. Järelikult on kogu valdkonnal mingi süsteemne probleem,“ selgitab Kruusmaa.

### Üksi nokitsejad toodi kokku

Või teisisõnu – kuidas te reageeriksite, kui teile ilmuks ukse taha keegi ehitaja sooviga uuendada teie maja hüdroisolatsiooni? Ja siis järgmisel nädalal keegi, kes soovib asendada katusetala ning sellest järgmisel nädalal keegi, kes tahab ajakohastada teie maja vundamenti? Arvutikasutajale on aga näiteks operatsioonisüsteemide ja programme sage uuendamine täiesti sisse harjunud ja tavapärase protseduur. Pahatihti käib asi nii, et süsteemid ehitatakse üles ning alles seejärel hakatakse neid testimata ja vaatama, kui usaldusväärsed need on.

Osa probleemist seisnebki selles, et IT-süsteemid ei ole oma põhiülesehitiselt turvalised ja jätkusuutlikud. Seejuures on selge, et mida keerukamaks IT-süsteemid kasvavad, seda keerulisem on ka tagada ja kontrollida nende turvalisust ja kasutuskindlust. Tippkeskuse EXCITE keskne missioon oligi tuua IT-teadusesse sisse paradigmat, kuidas ehitada süsteeme ja teenuseid nii, et need oleksid kohe n-õ valmis, turvalised ja kindlad.

Seda missiooni täites seati endale ka lisaeesmärke, näiteks võeti eesmärgiks tuua Eesti võrdlemisi killustunud IT-teaduse kogukonnad ühe katuse alla kokku. Kui teistes teadusharudes on üsna tavaline,

While fulfilling this mission, the Centre also set itself additional aims, such as bringing the comparatively fragmented IT research communities of Estonia together under one roof. While in other areas of research it is quite common that different teams gather around, for instance, a certain research device or database, many top IT researchers are capable of solving large fundamental problems alone just with a paper and pen.

## As Estonian IT research in general received a high rating from foreign experts, a large number of research groups had to be admitted to the Centre of Excellence.

Kuna välisekspertide hinnang oli Eesti IT-teadusele üldiselt väga kõrge, tuligi tippkeskuste vastu võtta palju uurimisrühmi.

This means, however, that contacts between different research teams have remained rather weak, and although Estonia's IT research is world-renowned, such fragmentation has certainly held back development.

### PhD students supervised jointly

To solve this problem, and also to train the next generation of IT researchers, a system of joint supervision of PhD students was created in the Centre of Excellence early on: teams with different research areas formulated a joint research problem, recruited joint supervisees and were thereby also able to learn from one another's approaches.

et eri rühmad koonduvad mõne uurimis-seadme või andmekogu ümber, siis info-tehnoloogias suudavad mitmed tipud suuri fundamentaalseid probleeme lahendada ka paberi ja pliiatsiga.

See tähendab aga, et uurimisrühmade kokkupuude jääb küllaltki nõrgaks, ning kuigi Eesti IT-teadus on maailmas kõrgelt hinnatud, on selline killustumine kahtlemata arengut tagasi hoidnud.

### Doktorante juhendati ühiselt

Selle probleemi lahendamiseks ja ka järgmise põlvkonna IT-teadlaste koolitamiseks loodi tippkeskuses juba algusest peale doktorantide ühisjuhendamise süsteem: eri uurimissuundadega rühmad seadsid endale ühise uurimisprobleemi, võtsid sellega tegelema ühised juhendatavad ja said seeläbi ka üksteise käsitlusviisidest õppida.

Näiteks tegeleb professor Kruusmaa uurimisrühm allveerobotite arendamisega, kuid tippkeskuse raames tehti koostööd ka TalTechi juhtivteaduri Ülle Kottaga, kelle fookuses on pigem juhtimisteooria matemaatilised mudelid. Koostöös arendati robotitele välja uudsed juhtimisalgoritmid, mis võimaldavad suurendada nende vea-

For example, the research team of Professor Kruusmaa develops underwater robots but collaborated under the Centre of Excellence with TalTech's leading researcher Ülle Kotta, who focuses on mathematical models of control theory. Their collaboration resulted in the development of novel control algorithms for underwater robots, which allow their fault tolerance to be improved. Sustainable operation of system hardware was developed meanwhile under the guidance of Professor Jaan Raik's research team.

Raik's team also joined forces with Professor Tarmo Uustalu's team, which studies at a very theoretical level how to create programming languages and algorithms in such a way that their fault tolerance could be mathematically proved.

Likewise, researchers of secure e-state services Professor Vitaly Skachek from the University of Tartu and Research Director of Cybernetica Inc. (and Professor of the University of Tartu) Peeter Laud also joined forces. A potential threat – but also an opportunity – for all secure systems is posed by the development of quantum computing, which is studied in the University of Tartu by Dominique Unruh.

Health technologies were developed under the Centre of Excellence both in the field of physical health (by Professors Alvo Aabloo, Ivo Fridolin, Mart Min, Yannick Le Moullec, and Jaak Vilo) and in the field of mental health (by Professors Raul Vicente Zafra and Maie Bachmann).

This is just a fraction of various cooperation topics that the research teams of EXCITE found, and each of them meant a defended doctoral thesis. Such joint supervision resulted in the defence of a total of 25 doctoral theses and publication of 718 scientific papers – considerably more than

kindlust. Samal ajal arendati süsteemi riistvara jätkusuutlikku toimimist professor Jaan Raiki uurimisrühma juhendamisel.

Raiki rühm ühendas jõud ka professor Tarmo Uustalu rühmaga, mis tegeleb väga teoreetilisel tasandil uurimisega, kuidas luua programmeerimiskeeli ja algoritme nii, et veakindlust oleks võimalik matemaatiliselt tõestada.

Samamoodi liitsid oma jõud turvaliste e-riigi teenuste uurijad professor Vitaly Skachek Tartu Ülikoolist ja aktsiaseltsi Cybernetica teadusdirektor (ja ühtlasi Tartu Ülikooli professor) Peeter Laud. Kõigi turvaliste süsteemide potentsiaalseks ohustajaks, aga ka võimaluseks on kvantarvutuse areng, mida uurib Tartu Ülikoolis Dominique Unruh.

Tervisetehnoloogiate arendamisega tegeleti tippkeskuse raames nii füüsilise tervise (professorid Alvo Aabloo, Ivo Fridolin, Mart Min, Yannick Le Moullec ja Jaak Vilo) kui ka vaimse tervise vallas (professorid Raul Vicente Zafra ja Maie Bachmann).

See on vaid väike osa erinevatest koostööteemadest, mille EXCITE-i uurimisrühmad leidsid, ja igaüks neist tähendas üht kaitstud doktoritööd. Kokku kaitsti sellise ühise juhendamise tulemusena 25 doktoritööd ja avaldati 718 teadusartiklit, mida on märgatavalt enam kui oli tippkeskuse moodustamisel sihiks seatud. Selline ühisjuhendamine ja loomulikult ka ühiste publikatsioonide koostamine ja avaldamine oli kogu tippkeskuse tegevuses kesksel kohal ning selle käigus loodi rühmade vahel uusi silde ja sidemeid.



was targeted at the inception of the Centre of Excellence. Such joint supervision and naturally also the preparation and publishing of joint publications occupied a central place in the entire work of the Centre of Excellence and led to building new bridges and ties between the teams.

## The form was determined by evaluation

The Centre of Excellence EXCITE had many more research teams than other Centres of Excellence, which is due to the logic of its formation. Namely, IT research in Estonia was internationally evaluated before the formation of EXCITE. Foreign experts came over, acquainted themselves with the work of all teams and gave their assessment on the work of each team. During the formation of the Centre of Excellence, its council quickly reached the decision that only the teams rated as very good or excellent by the evaluators must be admitted. However, as Estonian IT research in general received a high rating from foreign experts, a large number of research teams had to be admitted to the Centre of Excellence.

The acronym EXCITE was proposed by Tarmo Uustalu, leading researcher of TalTech and Professor of the University of Reykjavik, and stands for “Excellence in IT in Estonia”.

Since information technology as a research discipline is constantly under the eye of the public, the Centre of Excellence EXCITE also put a lot of effort into public communication. A big conference of the Centre of Excellence was held in March 2022 for various interest groups from the research and development sector, corporate sector, and public sector. The aim of the conference was to popularise the top research carried out as part

## Vormi määras hindamine

Tippkeskuses EXCITE on märgatavalt rohkem uurimisrühmi kui teistes tippkeskustes, mis tuleneb EXCITE-i moodustamise loogikast. Nimelt toimus enne EXCITE-i moodustamist Eesti IT-teaduse rahvusvaheline hindamine. Kohal käisid välisekspertid, kes tutvusid kõigi rühmade tööga ja andsid igale rühmale oma hinnangu. Tippkeskust kokku pannes jõudis selle nõukogu kiiresti otsusele, et sisse peavad saama vaid need rühmad, kes saavad evalveerijalt hinnanguks kas *very good* või *excellent* (‘väga hea’ või ‘suurepärase’). Kuna aga välisekspertide hinnang oli Eesti IT-teadusele üldiselt väga kõrge, tuligi tippkeskusesse vastu võtta palju uurimisrühmi.

Akronüümi EXCITE pakkus aga välja Tallinna Tehnikaülikooli juhtivteadur ja Reykjaviki Ülikooli professor Tarmo Uustalu ning see tuleb sõnadest „Excellence in IT in Estonia“.

Kuna infotehnoloogia kui teadusdistsipliin on pidevalt avalikkuse silme all, nähti tippkeskuses EXCITE ka kõvasti vaeva avalikkusega suhtlemise nimel. 2022. aasta märtsis korraldati suur tippkeskuse konverents, kuhu olid kutsutud erinevad huvirühmad teadus-arenduse, ettevõtluse ja avalikust sektorist. Konverentsi eesmärk oli tutvustada EXCITE-i raames tehtavat tippteadust ning seeläbi leida võimalikke valdkondi ülikoolide ning IT sektori ja avaliku sektori asutuste koostööks. Peale selle anti välja tippkeskuse tegevusest rääkiv eriajakiri Eesti IT Tippkeskus EXCITE.

Kuna IT mõjutab igat valdkonda, tunnetasid EXCITE-i teadlased algusest peale vajadust oma eriala laiemalt selgitada. Nagu ütleb professor Kruusmaa – kui teaduskogukond ise sellega ei tegele, siis kaevab ta endale hauda. Näiteks on tehisintellekti areng toonud praeguseks kaasa eraldi distsipliini

of EXCITE and thereby find possible areas for collaboration between universities, the IT sector, and public institutions. A special magazine about the activities of the Centre entitled *Estonian Centre of Excellence in ICT Research EXCITE* was also issued.

*explainable AI* (‘selgitatav ehk läbipaistva otsustusprotsessiga tehisintellekt’), mis tegeleb tehisaru süsteemide selgitamisega eri osapooltele. Olukorras, kus plahvatuslikult arenev tehisintellekt tekitab paljudes inimestes tõsist muret, on see teema teadlaste avalikes aruteludes aina olulisem,

**It would be unthinkable for someone to say that they study systems for ‘secure construction’. Yet, TalTech has a Centre for Dependable Computing Systems. Consequently, the entire field has some kind of a systemic problem.**

Oleks mõeldamatu, et keegi teataks, et uurib teadlasena turvalise ehitamise süsteeme. TTÜ-s on aga olemas usaldusväärsete arvutisüsteemide keskus. Järelikult on valdkonnal süsteemne probleem.

Maarja Kruusmaa

Since IT affects all areas of life, the researchers of EXCITE felt from the beginning that they needed to explain their subject field more widely. As Professor Kruusmaa puts it – if the research community itself does not do this, it is digging its own grave. For example, the development of artificial intelligence has already led to the emergence of a separate discipline called *explainable AI*, which deals with explaining artificial intelligence systems to different parties.

In a situation where the explosively developing artificial intelligence represents a serious concern for many people, the topic is increasingly important in the public discus-

sest kui teadlased ise uute tehnoloogiate kaasmõjudega ei tegele, võib kogu distsipliini maine kannatada, nii et seda on hiljem raske uuesti üles ehitada, tõdeb professor Kruusmaa.

Tippkeskuse edukuse märgina toob ta välja tõsiasja, et kaks selle vastutavat uurijat, äriprotsesside tehisintellektipõhist optimeerimist uuriv Marlon Dumas ja kvantkrüptograafiat arendav Dominique Unruh, said maineka Euroopa Teadusnõukogu granti tegelemiseks teemadega, mis on otseselt seotud ka nende tööga tippkeskuses.



sions of researchers because if researchers themselves do not handle the side-effects of new technologies, the reputation of the entire discipline may suffer and be difficult to rebuild later, Professor Kruusmaa notes.

As a sign of the success of the Centre of Excellence, she points out the fact that two of its leading researchers, Marlon Dumas, who studies AI-based optimization of business processes, and Dominique Unruh, who develops quantum cryptography, were awarded the prestigious European Research Council grant for research into topics directly related also to their work in the Centre of Excellence.

Professor Ivo Fridolin, who took over the coordination of the Centre of Excellence from Professor Kruusmaa in 2020 after she assumed the position of Vice Rector for Research of TalTech, points out that the benefits from the Centre of Excellence will last for years after the end of the project thanks to establishing a closer cooperation between different IT research institutions of Estonia.

“It is also important to note the project’s significance in establishing a new generation of IT researchers, which helped to bring new people into research. In the coming years, they will contribute to the continuation in Estonia of both doing top-level IT research and providing top level IT education that meets the needs of society and economy,” says Fridolin.

2020. aastal, pärast professor Kruusmaa asumist TTÜ teadusprorektori kohale temalt tippkeskuse koordineerimise üle võtnud professor Ivo Fridolin tõdeb, et tänu tihedama koostöö tekitamisele Eesti IT teadusasutuste vahel kestab sellest saadav kasu ka aastaid pärast projekti lõppemist.

„Märkimata ei saa jätta ka projekti olulisust IT-teadlaste järelkasvu tekkimisele, mis aitas tuua teadusesse uusi inimesi, kes annavad järgnevatel aastatel oma panuse, et Eestis jätkuks nii kõrgetasemelise IT tippteaduse tegemine kui ka tipptasemel IT hariduse andmine, mis vastaks ühiskonna ja majanduse vajadustele,“ ütleb Fridolin.

**Many top IT researchers  
are capable of solving large  
fundamental problems alone just  
with a paper and pen.**

Infotehnoloogias suudavad mitmed tipud suuri  
fundamentaalseid probleeme lahendada ka paberi  
ja pliiatsiga.

<b>Publications</b>	362	<b>Publikatsioone</b>	362
<b>Institutions</b>	3 Tallinn University of Technology, Cybernetica, University of Tartu	<b>Asutusi</b>	3 Tallinna Tehnikaülikool, Cybernetica, Tartu Ülikool
<b>Scientists involved</b>	273	<b>Kaasatud teadlasi</b>	273
<b>Head of the Centre</b>	Maarja Kruusmaa / Ivo Fridolin	<b>Tippkeskuse juht</b>	Maarja Kruusmaa / Ivo Fridolin
<b>Lead institution of the Centre</b>	Tallinn University of Technology	<b>Tippkeskuse juhtasutus</b>	Tallinna Tehnikaülikool

The data is based on the final report of the Centre of Excellence. Andmed põhinevad tippkeskuse lõpparuandel.

<b>Lead / Vastutav täitja</b>	<b>Research groups</b>	<b>Uurimisrühmad</b>
Peeter Laud	Information Security Institute	Infoturbeinstituut
Mart Min / Yannick Le Moullec	Sensing and Signal Processing	Seire ja signaalitöötlus
Jaan Raik	Dependable Multi-Core Computing Systems	Usaldusväärsed mitmetuumalised arvutisüsteemid
Maarja Kruusmaa	Centre for Biorobotics	Biorobotika keskus
Marlon Dumas	Software Engineering	Tarkvaratehnika ja infosüsteemid
Satish Narayana Srirama	Mobile and Cloud Computing Laboratory	Mobiili- ja pilvearvutuste labor
Dominique Peer Ghislain Dr Unruh	Provably Secure and Verifiable Systems	Tõestatavalt turvalised ja korrektsed arvutisüsteemid
Vitaly Skachek	Coding and Information Transmission	Kodeerimisteooria ja infoedastus
Jaak Vilo	Bioinformatics, Algorithmics and Data Mining Group BIIT	Bioinformaatika ja IT uurimisrühm BIIT
Helger Lipmaa	Efficient Cryptographic Protocols	Efektivesed krüptograafilised protokollid
Raul Vicente Zafra	Computational Neuroscience	Arvutuslik neuroteadus
Alvo Aabloo	Intelligent Systems and Materials Lab	Intelligentsete süsteemide ja materjalide labor
Wolfgang Jeltsch	Functional Reactive Programming	Funktsionaalne reaktiivne programmeerimine
Maris Tõnso	Control Systems Laboratory	Juhtimissüsteemide laboratoorium
Tarmo Uustalu	Trustworthy Software Technology	Usaldusväärne tarkvaratehnoloogia
Ivo Fridolin	Biooptical and Bioelectrical Signals in Biomedical Engineering	Biooptilised ja bioelektrilised signaalid meditsiinitehnikas

The data is from the Estonian Research Information System. Andmed on võetud Eesti Teadusinfosüsteemist.

# 4

## The Dark Side of the Universe

Tume universum





## The Advent of “Talking Pictures” Changed Space Research

The central question for the Centre of Excellence “The Dark Side of the Universe” was precisely what the name implies – the so-called “dark” side, or unknown part, of the Universe. As we know, humankind has explored just five per cent of the Universe and the remaining 95 per cent have remained elusive to us. We know that it exists because it has a gravitational pull but we do not know much more about it, and search for dark matter has become one of the big questions of physics and space research – a question to which answers have been sought for decades.

In the work of the Centre of Excellence, the Universe was seen as a giant laboratory where research into the largest structures known to humans allows conclusions to be

## „Helifilmi“ tulek muutis ilmaruumi uuringuid

Tumeda universumi tippkeskuse keskne küsimus oli täpselt see, millele nimi viitab – meie ilmaruumi nn tume pool ehk tundmatu osa. Kosmosega on teatavasti selline lugu, et inimkond teab praeguseks vaid ligi viit protsenti universumist ning kogu ülejäänud 95 protsenti on seni jäänud meile tundmatuks. Me teame, et see on olemas, kuna sellel on gravitatsioon, aga me ei tea selle kohta kuigi palju enam, ning tumeaine otsingud on kujunenud üheks füüsika ja kosmoseuuringute suurtest küsimustest, millele on vastuseid otsitud juba aastakümneid.

Tippkeskuse töös käsitati universumit hiigellaboratooriumina, kus saab kõige suuremate struktuuride uurimise kaudu teha järeldusi kõige väiksemate osakeste kohta,

drawn on the smallest particles, and vice versa – closer investigation of the tiniest particles can yield answers to big fundamental questions, such as how was the Universe born and what is its structure like on the largest scale.

The job of the particle physicists of the Centre was to study the smallest known particles and participate in the work of the world’s leading scientific institutions such as the European Organisation for Nuclear Research (CERN) and in the experiments of its Large Hadron Collider, where elementary particles are collided to find out whether this process reveals something that could lead to an update of the current Standard Model of particle physics and thereby bring winds of change to research into dark matter. On the other hand, the Centre of Excellence also included astronomers, who are interested in the largest objects in the Universe – galaxies, nebulae and the general structure of the entire Universe. In these subjects, the studies of Jaan Einasto, a grandmaster of Estonian astronomy and member of the Centre of Excellence, have brought about global paradigm shifts.

### It all comes down to gravitation

Because all of this is held together by gravitation, and even the existence of dark matter is known to us first and foremost due to its gravitational force, the central question of the Centre of Excellence was originally formulated as how are the visible Universe and the dark Universe interconnected, aside from their already known connection through gravity?

The keywords of this interdisciplinary research are dark matter, dark energy, inflation (the explosive expansion of the Universe immediately after the Big Bang),

ja vastupidi – kõige pisemate osakeste lähem uurimine võib tuua vastuseid suurtele fundamentaalsetele küsimustele, näiteks kuidas universum alguse sai ja milline on selle struktuur kõige suuremas skaalas.

Osakestefüüsikute töö oli uurida kõige väiksemaid teadaolevaid osakesi ning osaleda maailma juhtivate teadusasutuste, näiteks Euroopa Tuumauuringute Organisatsiooni (CERN) töös ja sealse Suure Osakestepõrguti eksperimentides, kus põrgatatakse kokku elementaarosakesi, et teha kindlaks, kas selle käigus ilmneb midagi, mis võiks viia kehtiva osakestefüüsika standardmudeli uuendamiseni ja tuua seeläbi ka uusi tuuli tumeaine uurimisesse. Teiselt poolt osalesid tippkeskuses aga ka astronoomid, kelle huvi on universumi kõige suuremad objektid – galaktikad, udukogud ja kogu ilmaruumi üldine struktuur. Nendes teemades on maailma tasemel paradigma muutusi toonud tippkeskuse liikme, Eesti astronoomia suurmehe Jaan Einasto uurimused.

### Kõige keskmes gravitatsioon

Kuna kõike seda hoiab koos gravitatsioon ja tumeainestki oleme me teadlikud enne-kõike tema raskusjõu tõttu, seati algne keskne küsimus nii: kuidas on nähtav ja tume universum omavahel seotud, lisaks juba teadaolevale, gravitatsiooni kaudu seotud olemisele?

Selle distsipliinideülese teadustöö märksõnadeks võib lugeda tumeainet, tumeenergiat, inflatsiooni ehk universumi plahvatuslikku laienemist vahetult pärast Suurt Pauku, juba mainitud gravitatsiooni ja nende kõigi omavahelisi seoseid. Tumemat universumit saab uurida väga erinevate nurkade alt ja tippkeskuse mõte oligi need eri lähenemisviisid kokku tuua, selgitab



the already mentioned gravitation, and interrelations between all of them. The dark Universe can be studied from a variety of perspectives, and so the idea of the Centre of Excellence was to bring the different approaches together, explains Martti Raidal, Leading Researcher at the National Institute of Chemical Physics and Biophysics (NICPB) and hHead of the Centre of Excellence.

While the earlier Centre of Excellence called “Dark Matter in (Astro)Particle Physics and Cosmology” looked at dark matter mainly

tippkeskuse juht, Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi (KBFI) juhtivteadur Martti Raidal.

Kui varasemas tippkeskuses nimega „Tumeaine (astro)osakeste füüsikas ja kosmoloogias“ vaadati tumeainet ennekõike läbi tollal populaarse kosmilise kiirguse prisma, siis seekord oli fookuses tumeaine kõigis selle vormides. Teoreetikud pakkusid välja teooriaid, milline tumeaine üldse olla võiks – kas tegu on eraldi osakestega või suuremate kosmiliste kehadega. Välja käidi hulk

## For each theory you can, after all, find some oddballs working on it but, in general, large-scale bodies of dark matter were previously not on the table.

Eks iga teooria puhul leiab mõne veidriku, kes sellega tegeleb, aga üldiselt ei olnud suuremõõtmelised tumeaine kehad varem eriti laual.

Martti Raidal

through the then-popular lens of cosmic radiation, the focus this time was on dark matter in all of its forms. Theoreticians suggested theories about what dark matter would look like – whether it represents separate particles or larger cosmic bodies. Many theories were proposed, theorising dark matter both as a separate particle type and as a larger body, such as a primordial black hole originating from the first moments of the Universe.

To find possible answers to these questions, researchers at the Centre of Excellence investigated different theories on the development and inflation of the early Universe

teooriaid, mille kohaselt võib tumeaine olla nii eraldi osakesetüüp kui ka suurem keha, näiteks ürgne, universumi algusaegadest pärit must auk.

Nendele küsimustele võimalike vastuste leidmiseks uuriti erinevaid teooriaid varajase universumi arengu ja inflatsiooni kohta ning KBFI arvutuskeskuse võimalusi ära kasutades modelleeriti, kas varajases universumis tekkis musti auke.

Tippkeskuse juht Martti Raidal rõhutab nende modelleeringute eripära: „See on ikka väga spetsiifiline tegevus. Üldiselt on lihtne teha mudeleid, kus universum täitub sellise

and, making use of the Computing Facility of the NICBP, modelled whether black holes were even produced in the early Universe.

Martti Raidal, hHead of the Centre of Excellence, emphasises the specific character of this modelling: “This is a very specific thing to do. In general, it is easy to generate models where the Universe gets filled with the sort of matter that we can see and from there on, things develop on their own. But if you want to model something unexpected, you have to tinker with and alter the entire original theory, and this is a real challenge.”

## Detection of gravitational waves

The work of the Centre of Excellence was kicked off with a bang when, just a month and a half after its launch, the novel gravitational wave observatories LIGO and Virgo announced that they had, for the first time ever, detected a gravitational wave – a wave in the fabric of spacetime produced by a collision of two black holes. The prediction that collisions of celestial bodies with a large mass produce such ripples in the entire spacetime and these ripples spread out across the Universe dates back to Einstein’s theory of general relativity but no-one had so far confirmed their existence by observational evidence, let alone measured them.

The detection of the waves provided direct-observation confirmation that general relativity works and that black holes actually exist and, at a more general level, supported several previously only indirectly derived theories about the workings of the Universe.

Even more importantly, the measuring of gravitational waves gave dark matter searchers, and space researchers more

ainega, mida me näeme, ja asjad hakkavad omasoodu arenema. Aga kui sa tahad teha midagi ootamatut, siis pead kogu algset teooriat mudima ja muutma ning see on juba tõeline väljakutse.“

## Gravitatsioonilainete registreerimine

Tumeda universumi tippkeskuse töö sai suure avalöögi, kui vaid poolteist kuud pärast keskuse tegutsemise algust teatasid uued gravitatsioonilainete observatooriumid LIGO ja Virgo, et olid esmakordselt tuvastanud neid läbinud gravitatsioonilaine – aegruumi paindumise, mis oli tekkinud kahe musta augu kokkupõrkel. Ennustus, et suure massiga kehade kokkupõrkel hakkab kogu aegruum lainetama ning need lained levivad üle ilmaruumi, pärineb juba Einsteini üldrelatiivsusteooriast, aga seni ei olnud keegi neid laineid veel vaatluslikult kinnitanud, mõõtmisest rääkimata.

Lainete tuvastamine andis otsevaatluse kaudu kinnituse, et üldrelatiivsus töötab ja ka mustad augud on päriselt olemas, ning üldisemalt toetas see mitmeid seni vaid kaudselt tuletatud teooriaid ilmaruumi toimimise kohta.

Mis aga veel olulisem – gravitatsioonilainete mõõtmine andis tumeaine otsijatele ja kosmoseteadlastele laiemalt uue meediumi, mille abil oma tööd teha. Seda muutust on populaarteaduslikus kirjanduses võrreldud nii tummfilmilt helifilmile üleminekuga kui ka täiesti uue meelega tekkimisega. Märgin oli näiteks 2017. aasta augustis aset leidnud kahe neutrontähe kokkupõrge, millest jõudsid Maani nii gravitatsioonilained kui ka nähtav valgus – kujundlikult öeldes oli seda sündmust nii näha kui ka kuulda. “Lisameel” tõi kaasa tohutu hüppe ilmaruumi uurimises. Näiteks õnnestus

generally, a new medium for their work. This change has been compared in popular scientific literature with the transition from silent film to talking pictures and with gaining a completely new sense. A landmark moment for research occurred e.g. when two neutron stars collided in August 2017 and both the gravitational waves and light from the event were detected on Earth – or figuratively speaking, the event could be both seen and “heard”. The newly acquired

laias teadusmaailmas kindlaks teha, et tsirkooniumist raskemad elemendid pärinevad just sellistest kataklüsmidest.

Tippkeskuse juhi Martti Raidali sõnul oli gravitatsioonilainete tuvastamine ja tekkinud „lisameel“ tippkeskuse töö alguses tõeline *jackpot*. Niipea kui info nende lainete tuvastamisest Eestisse jõudis, teadsid füüsikud kohe, mida teha, ja n-ö lülitusid otsekohe ümber seda uurima.

## First you have to do fundamental research, then applied research, and only then can you think of applications.

Kõigepealt tuleb ära teha ikka fundamentaalteadus, siis rakendusteadus ning alles siis võib mõelda rakendustele.

Martti Raidal

additional sense brought a huge leap in space research. For example, the scientific world was able to ascertain that it is this kind of cataclysm that any elements heavier than zirconium originate from.

According to Martti Raidal, hHead of the Centre of Excellence, the detection of gravitational waves and acquiring of an additional sense early after the launch of the Centre of Excellence was like hitting a jackpot. As soon as information on the detection of the waves reached Estonia, the physicists here knew what to do right away and immediately switched to investigating them.

“This was a breakthrough for us. While dark matter was earlier believed to be some kind

„Meie jaoks oli see läbimurre. Kui seni arvati, et tumeaine on mingi osake või mingi mikro-mõõtetes asi, siis tänu sellele avastusele tekkisid automaatselt võimalused, et ta võib olla ikkagi ka midagi makroskoopilises skaalas. Loomulikult olid ennegi olemas vastavad teooriad, aga peavoolu teadus oli siiani suhtunud neisse pigem kui millessegi väga eksootilisse. Eks iga teooria puhul leiab mõne veidriku, kes sellega tegeleb, aga üldiselt ei olnud suuremõõtmelised tumeaine kehad varem eriti laual. Nüüd aga saime aru, mida on vaja teha, ja lülitusime automaatselt sellele ümber,“ seletab Raidal.

Gravitatsioonilainete kinnipüüdmisega avanes teadlastele tohutu uus uurimissuund, mille tormiline areng jätkub tõenäoliselt

of a particle or something micro-scale, the discovery opened the possibility that it might still be something macroscopic. The relevant theories already existed, of course, but mainstream science had regarded them rather as something very exotic. For each theory you can, after all, find some oddballs working on it but, in general, large-scale bodies of dark matter were previously not on the table. But now we understood what needs to be done and automatically switched to this,“ explains Raidal.

The capture of gravitational waves opened up a vast new field of research, whose breakneck development is likely to continue for decades. By now, half a floor of people work on gravitational waves at NICPB, participating *inter alia* in preparations for the next great European experiment on gravitational waves.

## Estonia becomes a member of CERN

In addition to the networks of LIGO and Virgo, researchers of the Centre of Excellence also collaborated with the world's largest scientific institutions such as the European Space Agency (ESA) and CERN, with Estonia achieving membership in the latter during the period of the Centre of Excellence.

They participated in experiments to detect dark matter particles directly, such as XENINnT and LUX, and indirect detection experiments Fermi, AMS2, HESS and HAWK. Researchers of Tartu Observatory of the University of Tartu took part in the work or planning or data analysis for the Hubble Space Telescope and space telescopes Chandra, SDSS, BOSS and Gaia and contributed to the completion of the new European space telescope 4MOST.

veel aastaid. Praeguseks tegeleb KBFIs gravitatsioonilainetega poole korruse jagu inimesi, kes osalevad muu hulgas ka Euroopa järgmise suure gravitatsioonilainete eksperimendi LISA väljatöötamises.

## Eesti CERNi liikmeks

Lisaks LIGO ja Virgo võrgustikele tegid tippkeskuse teadlased koostööd ka maailma suurimate teadusasutustega, näiteks Euroopa Kosmoseagentuuri (ESA) ja CERNiga, mille liikmelisuse Eesti ka tippkeskuse perioodi jooksul saavutas. Osaleti tumeaine osakeste otsese tuvastamise eksperimentides XENONnT ja LUX ning kaudse tuvastamise eksperimentides Fermi, AMS2, HESS ja HAWK. Tartu Ülikooli Tartu observatooriumi teadlased osalesid Hubble'i kosmoseteleskoobi ning kosmoseteleskoopide Chandra, SDSS, BOSS ja Gaia töös, töö planeerimises või andmete analüüsis ning panustasid ka Euroopa uue kosmoseteleskoobi 4MOST valmimisse.

Kõige suurem töö tehti aga ära CERNi suunal. Tippkeskuse ühe suurema saavutusena toobki Raidal otseselt välja Eesti liitumise CERNiga. Tegu on olnud pika protsessiga, mis ei ole veel läbi – praegu on Eesti veel täisliitumisele eelnevas assotsieerunud liikme staatuses, kuid juba mõne aasta pärast võib öelda, et Eesti on maailma suurima osakestefüüsika labori osanik.

Tippkeskusest kõneldes rõhutab Martti Raidal korduvalt, et tumeda universumi tippkeskuses tegeldi rõhutatult fundamentaalteadusega, mille põhjal võivad rakendused tekkida alles aastakümnete pärast.

„Kõigepealt tuleb ära teha ikka fundamentaalteadus, siis rakendusteadus ning alles siis võib mõelda rakendustele. On põhimõtteliselt vale soovida, et teadlased

The greatest progress was, however, made in accession to CERN. Raidal singles out Estonia's accession to CERN as one of the greatest achievements of the Centre of Excellence. This has been a long process and is not over yet – Estonia currently has the status of associate member but in just a few years from now it will become a full partner in the world's largest laboratory of particle physics.

Talking about the Centre of Excellence, Martti Raidal repeatedly stresses that the Centre of Excellence “Dark Side of the Universe” emphatically focused on fundamental research, which may give rise to applications only after decades.

“First you have to do fundamental research, then applied research, and only then can you think of applications. It is fundamentally wrong to expect researchers to do cutting-edge research and want this research to bring in money at once.”

This emphasis on fundamental research will be the guiding principle also in the next Centre of Excellence, for which an application is already being prepared. The planned Centre of Excellence has not been given a name yet but Raidal points out already now that the central idea of the new Centre of Excellence will be Estonia's fundamental research in CERN and ESA. In addition to particle physics and cosmology, the new Centre of Excellence would also cover topics like quantum information and quantum computers.

teeksid tippteadust ja see tooks samal ajal kohe ka raha sisse.“

Sellest vaimust saab kantud ka järgmine tippkeskus, mille jaoks hetkel taotlust koostatakse. Kavandatava tippkeskuse nimi ei ole veel teada, aga Raidal toob juba praegu välja, et selle kandvaks ideeks saab olema Eesti fundamentaalteadus CERNis ja ESAs. Lisaks osakestefüüsikale ja kosmoloogiale kataks uus tippkeskus ka selliseid teemasid nagu kvantinformatsioon ja kvantarvutid.

<b>Publications</b>	1686	<b>Publikatsioone</b>	1686
<b>Institutions</b>	3 National Institute of Chemical Physics and Biophysics, University of Tartu, Tartu Observatory	<b>Asutusi</b>	3 Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut, Tartu Ülikool, Tartu Observatoorium
<b>Scientists involved</b>	37	<b>Kaasatud teadlasi</b>	37
<b>Head of the Centre</b>	Martti Raidal	<b>Tippkeskuse juht</b>	Martti Raidal
<b>Lead institution of the Centre</b>	National Institute of Chemical Physics and Biophysics	<b>Tippkeskuse juhtasutus</b>	Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut

The data is based on the final report of the Centre of Excellence. Andmed põhinevad tippkeskuse lõpparuandel.

<b>Lead / Vastutav täitja</b>	<b>Research groups</b>	<b>Uurimisrühmad</b>
Martti Raidal	Theoretical Particle Physics and Astroparticle Physics	Teoreetiline füüsika ja astroosakeste füüsika
Mario Kadastik	Experimental High-Energy Physics and Computations	Eksperimentaalne osakestefüüsika ja arvutusfüüsika
Elmo Tempel	Cosmology and Large-Scale Structure Formation	Kosmoloogia ja universumi struktuuri tekkimine
Manuel Hohmann	Gravity and Theoretical Cosmology	Gravitatsioon ja teoreetiline kosmoloogia

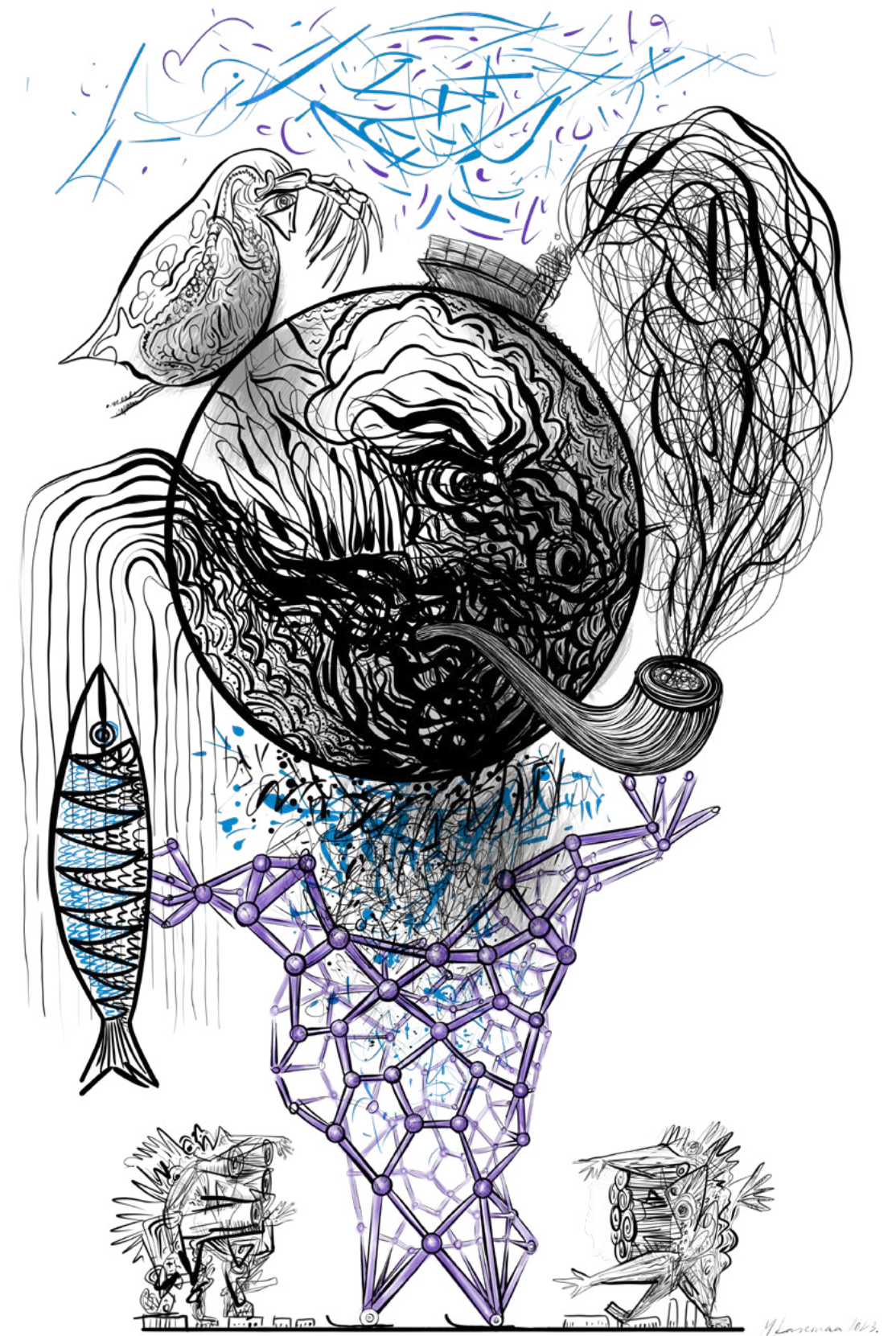
The data is from the Estonian Research Information System. Andmed on võetud Eesti Teadusinfosüsteemist.



# 5

## EQUiTANT – Emerging Orders in Quantum and Nanomaterials

Kontrollitud korrastatus kvant- ja  
nanomaterjalides





## Research into the Secrets of Matter Spawns New Technologies

**The Centre of Excellence on experimental physics and materials science “Emerging Orders in Quantum and Nanomaterials”, or EQUiTANT, focused on materials in the broadest sense and their properties – on how materials are structured and why they are the way they are. The centre consolidated mostly physicists but also included chemists and microbiologists.**

According to one of the researchers of the Centre of Excellence, EQUiTANT was distinct in that it was essentially a fundamental research Centre of Excellence doing globally cutting-edge experimental physics – not the so-to-say “usual” studies but completely unique ones. At the same time, it also had comparatively applied areas of

## Materia saladuste uurimisest sünnivad uued tehnoloogiad

**Eksperimentaalse füüsika ja materjaliteaduse tippkeskuse „Kontrollitud korrastatus kvant- ja nanomaterjalides“ fookuses olid materjalid nende kõige laiemas tähenduses ja materjalide omadused – kuidas on materjalid üles ehitatud ja miks on nad sellised nagu on. Põhiliselt koondas see tippkeskus füüsikuid, kuid leidis ka keemikuid ja mikrobiolooge.**

Nagu ütles üks tippkeskuse teadlastest, oli tippkeskuse EQUiTANT omapäraks see, et põhimõtteliselt oli tegu fundamentaaluuringute tippkeskusega, kus tehti maailma tipptasemel eksperimentaalfüüsikat – mitte nii-öelda harilikke uurimusi, vaid täiesti unikaalseid. Samal ajal leidis ka võrdlemisi rakenduslikke uurimissuundi, mis võivad

research that may, for instance, dramatically enhance the possibilities of analytical chemistry or bring new solutions into wastewater treatment.

As the name of the Centre of Excellence implies, the central word of the centre’s activity was order. Namely, physicists have long observed that some materials exhibit the property of self-ordering under certain conditions. Crystals formed from the freezing of water are one of the simplest examples but this is just the tip of the iceberg and a large variety of different orders may emerge under different conditions. For example, ordering of the magnetic moments of particles in certain metals results in a magnetic field, or substances form various crystal structures under suitable conditions.

### Bothersome properties of nature

The amount of orders with different symmetry properties potentially affecting the behaviour of substances and materials is nearly endless.

Spontaneous ordering may pose a real headache for researchers developing novel materials because nature does not behave the way they would like it to behave and materials “refuse” to take the necessary forms. Without understanding the physics of ordering, it is complicated to work with these materials.

As Urmas Nagel, head of the Centre of Excellence and research professor at the National Institute of Chemical Physics and Biophysics (NICBP) explains, the studies were aimed at finding out why crystals have certain properties. And once something is understood, it can also be applied.

näiteks hüppeliselt suurendada analüütilise keemia võimalusi või tuua uusi lahendusi reoveekäitlusse.

Nagu tippkeskuse nimest nähtub, oli kogu tegevuse keskne sõna korrastatus. Nimelt on füüsikud juba ammu täheldanud, et mõnedel materjalidel on omadus teatud tingimustel iseeneslikult korrastuda. Üks kõige lihtsam näide on vee jäätmisel tekkivad kristallid, kuid see on vaid jäämäe tipp ning eri tingimustel võib tekkida väga palju erinevaid korrastatusi. Näiteks tekib teatud metallides osakeste magnetmomentide korrastumise tagajärjel magnetväli või sobivate tingimuste olemasolul moodustavad ained mitmesuguseid kristallstruktuure.

### Looduse tüütud omadused

Erinevate sümmeetriaomadustega korrastatusi, mis võivad ainete ja materjalide käitumist mõjutada, on peaaegu otsatult.

Uudseid materjale arendavatele materjaliteadlastele võib iseeneslik korrastumine põhjustada tõsist peavalu, kuna loodus ei käitu nii, nagu nemad sooviksid, ning materjalid nii-öelda keelduvad vajalikke vorme võtmast. Ilma korrastumise füüsikat mõistmata on raske ka nende materjalidega töötada.

Nagu seletas tippkeskuse juht, Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi (KBFI) juhtivteadur Urmas Nagel, oli nende uuringute mõte teha kindlaks, miks kristallidel on mingid omadused. Ning kui millestki juba aru saadakse, on seda võimalik kuidagi ka rakendada.

„See on umbes nagu värvidega – kui sa nende omavahelisi seoseid ei mõista, võid kõik värvid kokku kallata ja ükskõik mis järjekorras sa seda teed, saad lõpuks ikka

“It’s like with colours – if you don’t understand their relations, you can mix all colours together and, no matter what order you do it in, you end up with some sort of brown mush. But if you know what you are doing, you can create all kinds of pictures,” Nagel explains.

In recent decades, researchers have begun to actively study multiferroics – materials that display both a magnetic moment and charge ordering. Such substances are

mingisuguse pruuni lõga. Kui aga tead, mida teed, saab luua igasuguseid pilte,” selgitab Nagel.

Viimasel paaril kümnendil on hakatud aktiivselt uurima multiferroide ehk aineid, kus toimivad korraga nii magnetmoment kui ka elektrilaengute korrastumine. Sellised ained on tehnoloogiliselt huvitavad, kuna nende magnetmomente saab elektriväljaga kontrolli all hoida ja nende korrapära mõistmine võimaldab sünteesida uusi

**If you don’t understand the relations between colours, you can mix them all together and, no matter what order you do it in, you end up with some sort of brown mush.**

**Kui sa värvide omavahelisi seoseid ei mõista, võid kõik nad kokku kallata ja ükskõik mis järjekorras sa seda teed, saad lõpuks ikka mingisuguse pruuni lõga.**

**Urmas Nagel**

technologically interesting because their magnetic moments can be controlled with an electric field, and understanding their regularities makes it possible to synthesise new materials that can find applications in many future technologies, from data storage to quantum computers.

Potential applications of multiferroics were studied by the Laboratory of Thin Film Technology of the Institute of Physics, University of Tartu. In this context, thin film technology means various techniques already used in several industries for depositing single-atom-thick layers of different materials to

materjale, mis võivad leida rakendusi paljudes tulevikutehnoloogiates, andmesalvestusest kvantarvutiteni.

Multiferroide võimalike rakendusviiside uurimisega tegeles tippkeskuse raames Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi kiletehnoloogia labor. Tasub märkida, et selles kontekstis tähendab kiletehnoloogia mitmetes tööstustes juba praegu kasutatavaid võtteid, millega sadestatakse erinevatele pindadele, olgu selleks prilliklaas või kõvaketta, transistori või millegi muu pind, üksikute aatomite paksuseid kihte erinevaid materjale.

various surfaces, be it spectacle lenses or the surface of a hard disk, transistor, or something else.

## **Super powerful magnets and superconductors**

Thin film technology as such has already proven itself but researchers and developers keep looking for new possibilities to move forward with it. One option is to use multiferroic materials in thin film technologies. Potential applications could range from novel memory materials and quantum computers to space technologies.

The Laboratory of Thin Film Technology and the magnetism researchers of NICBP actively collaborated during the period of the Centre of Excellence – the two had received a common grant, and the magnetic properties of structures created in the Laboratory of Thin Film Technology in Tartu were measured in the NICBP’s system for measuring physical variables to find out how the structures respond to changes in the magnetic field at different temperatures.

Order is generated in many metals also at extremely low temperatures when superconductivity emerges. This is a phenomenon where the electrons causing electrical conductivity in some metals at low temperatures form pairs that move without resistance because there is simply no thermal energy at such low temperatures to break up the pairs. Low temperature is important because the orders are weak and heat always causes fluctuations that break them up.

Superconductivity finds applications in the development of quantum computers, but also in super strong magnets, which in turn are absolutely indispensable in magnetic resonance imaging, or MRI. The super-

## **Ülivõimsad magnetid ja ülijuhid**

Kiletehnoloogia ise on end tõestanud, kuid teadusarendustegevuse käigus otsitakse pidevalt uusi võimalusi sellega edasi minna. Üks variant ongi kasutada kiletehnoloogiates multiferroidmaterjale. Võimalikud rakendusvaldkonnad võiksid ulatuda uudestest malmaterjalidest ja kvantarvutitest kosmosetehnoloogiani.

Kiletehnoloogia labor ja KBFI magnetismiuurijad tegid tippkeskuse perioodi jooksul aktiivset koostööd – kahepeale oli saadud ühine grant ning Tartus valmistatud struktuuride magnetilisi omadusi käidi mõõtmata KBFI füüsikaliste suuruste mõõtmise süsteemis, et teada saada, kuidas need struktuurid reageerivad eri temperatuuridel magnetvälja muutmisele.

Korrastatus kujuneb paljudes metallides ka äärmuslikult madalatel temperatuuridel, kui tekib ülijuhtivus. See on nähtus, kus mõnedes metallides madalal temperatuuril elektrijuhtivust põhjustavad elektronid moodustavad paare, mis liiguvad ilma takistusega, kuna sel madalal temperatuuril lihtsalt ei ole paaride lõhkumiseks vajalikku soojusenergiat. Madal temperatuur on tähtis, kuna tegu on nõrkade korrastumistega ning soojusega tekib alati fluktuatsioone, mis neid lõhuvad.

Ülijuhtivus leiab rakendust kvantarvutite arenduses, aga ka ülivõimsates magnetites, mis omakorda on täiesti asendamatud magnetresonantstomograafides ehk MRT seadmetes. Kui näiteks MRT seadmete ülijuhid töötavad 4 Kelvini kraadi juures (-269,15 °C) – temperatuuril, kus heelium muutub vedelaks –, siis KBFI krüostaatides on veelgi madalamaid temperatuure, mille eesmärgiks ongi uurida, kuidas korrastatud üldse toimivad. Nagu selgitab Urmas Nagel: „Kui on selge, kuidas kristallid

conductors in MRI scanners, for instance, operate at 4 degrees Kelvin (-269.15 °C) – at the temperature where helium condenses into a liquid –, but NICBP's cryostats can achieve even lower temperatures, which are intended for studying how orders function.

“Once it is clear how crystals and metals behave in such cold conditions, we can already start thinking of what happens at higher temperatures,” Urmas Nagel explains. While the underlying mechanism

ja metallid nii külmas käituvad, siis saab juba hakata mõtlema, mis juhtub kõrgematel temperatuuridel.” Kui tavaliste metallide ülijuhtivuse tekkemehhanism on teada, siis pisut kõrgemal temperatuuril ülijuhtideks muutuvates keraamilistes materjalides toimuv ei ole lõpuni selge, ehkki sellistest materjalidest osatakse juba mõnda aega ehitada magneteid ja mootoreid ning kadudeta elektriliine

Üks tavamõistusele hoomamatum uurimis-

## One field of research less comprehensible to the layman is connected with the breaking of time symmetry in superconductors.

Üks tavamõistusele hoomamatum uurimisvaldkond on seotud ajasümmeetria rikkumisega ülijuhtides.

of superconductivity in ordinary metals is known, it is not fully clear what happens in ceramic materials that become superconductors at slightly higher temperatures, although technologies for building magnets, engines, and lossless transmission lines of such materials have existed for some time already.

One field of research less comprehensible to the layman is connected with the breaking of time symmetry in superconductors. Namely, an interesting regularity occurs in quantum mechanics: all mechanisms work regardless of the direction of the flow of time. In some superconductors, however, order may emerge under certain conditions, leading to spontaneous breaking of time symmetry.

valdkond on seotud ajasümmeetria rikkumisega ülijuhtides. Kvantmehaanikas ilmneb nimelt huvitav seaduspära, et kõik mehhanismid toimivad sõltumata sellest, kumba pidi aeg liigub. Mõnedes ülijuhtides võib aga teatud tingimustel tekkida korrastatus, mille käigus ajasümmeetria spontaanselt ära kaob.

Ajasümmeetria kadumist uuriti KBFI terahertsspektroskoopia tööruhmas. Nimelt võib see, kas valgus metallis neeldub, sellelt peegeldub või kas valguse polarisatsioon muutub, olla märk, et metallis on ajasümmeetria rikutud või aine sees esineb erinevaid korrastatusi.

The loss of time symmetry was studied by the working group on terahertz spectroscopy of NICBP. Whether light is absorbed in a metal, reflected from it or the polarisation of light changes may, namely, be a sign that time symmetry is violated in the metal or some kind of order is present in the substance.

## Fundamental studies promise applications

While layman's contacts with superconductors are mostly limited to medical examinations and MRI, the working group of Indrek Reile, senior research fellow of NICBP, developed the nuclear magnetic resonance (NMR) technology further using hyperpolarisation. The latter involves a set of different techniques that allow for the magnetic resonance signal to be made dozens, hundreds, or even thousands of times stronger. Researchers around the world have been working on hyperpolarisation for quite some time already but the research done under the Centre of Excellence has led to a leap forward in this field.

For example, in one experiment, NICBP's researchers were able to gather within a four-second scan an amount of information that would have taken traditional MRI nearly four months to gather. This opens up new horizons in medical applications by raising the sensitivity of analyses to such a high level that it becomes possible to study so-called metabolic dark matter, or molecules that have so far remained undetected by research equipment due to their low concentrations.

In an experiment to prove the concept, ten smokers were asked to quit their bad habit, while scientists monitored the decrease of nicotine degradation products in their urine.

## Fundamentaalsed uuringud töötavad rakendusi

Kui tavainimestele on üks kõige argisemaid kokkupuuteid ülijuhtidega seotud meditsiiniliste uuringute ja MRTga, siis KBFI vanem-teaduri Indrek Reile tööühm arendas magnetresonantsi (NMR) tehnoloogiat edasi, kasutades selleks hüperpolarisatsiooni tehnoloogiat. Viimane hõlmab tervet kogumit erinevaid tehnikaid, mis võimaldavad teha magnetresonantsi signaali kümneid, sadu või isegi tuhandeid kordi tugevamaks. Hüperpolarisatsiooniga on teadlased üle maailma tegutsenud juba mõnda aega, kuid tippkeskuse raames tehtud teadustöö on toonud siin olulise arenguhüppe.

Ühes eksperimendis suudeti näiteks ühe nelja-sekundise skaneerimisega koguda infohulk, mille kogumiseks kulunuks traditsioonilise NMRi puhul ligi neli kuud. Meditsiinilistes rakendustes tähendab see uute horisontide avanemist, kuna viib analüüsi tundlikkuse nii suureks, et tekib võimalus hakata uurima niinimetatud metaboolset tumeainet ehk molekule, mis on seni jäänud oma madala kontsentratsiooni tõttu uurimisseadmetele märkamatuks.

Selle kontseptsiooni tõestamiseks tehti eksperiment, kus kümnel suitsetajal paluti oma halb harjumus maha jätta ning jälgiti nikotiini laguproduktide vähenemist nende uriinis. Tundlikkus, mis saavutati, oli muljet avaldav – näha oli isegi proovi andmisele eelnenud päeva passiivne suitsetamine. Hüperpolarisatsiooni abil suudeti näha inimese uriinis aineid, mida leidis seal enam kui tuhat korda alla klassikalise NMR-i tundlikkuse piiri.

Teiselt poolt uurisid Liis Seinberg ja tema kolleegid nanoosakesi, mida saaks inimestesse süstida ja mis toimiksid tuuma-

The sensitivity achieved was impressive – even passive smoking experienced on the day prior to testing was detectable. Using hyperpolarisation, researchers were able to detect in human urine substances whose concentrations were more than a thousand times below the sensitivity limit of classical NMR.

Liis Seinberg and her colleagues studied nanoparticles that could be injected into humans to act as contrast agents for nuclear magnetic resonance spectroscopy. By now, these R&D activities continue in the private sector company LSMedical Ltd. In the field of environmental toxicology, the focus was on novel magnetic nanoparticles that could be used for removing drug residues from wastewater.

magnetresonantstomograafi pildi tegemisel kontrastainena. Praeguseks jätkub see arendustegevus juba erasektoris osahingus LSMedical.

Keskkonnatoksikoloogia suunal vaadati aga uudseid magnetiliste omadustega nanosakesi, mida võiks kunagi olla võimalik kasutada näiteks reovee puhastamisel ravimijääkidest.

Juhtivteadur Aleksander Rebase juhtimisel arendati aga mittelineaarset optikat, kus aines neelduva valguse hulk sõltub valgustugevuse ruudust, mitte ei ole sellega võrdeline, nagu oleme tavaelus harjunud. Kui tavaolukorras neelduvad näiteks sinise valguse osakesed (footonid) ühekaupa, siis väga suure intensiivsuse korral võivad kaks

## Once it is clear how crystals and metals behave in such cold conditions, we can already start thinking of what happens at higher temperatures.

Kui on selge, kuidas kristallid ja metallid nii külmas käituvad, siis saab juba hakata mõtlema, mis juhtub kõrgematel temperatuuridel.

Urmas Nagel

The working group led by Aleksander Rebane, leading researcher of NICBP, further developed the field of nonlinear optics, where the amount of light absorbed in a substance depends on the square of light intensity instead of being proportional to it as we are used to in everyday life. While in normal circumstances the particles (photons) of blue light, for instance, are

punastfootonit korraga neeldudes ergastada üht ja sama kvantsiiret. Selliseid nähtusi saab ära kasutada näiteks mitteinvasiivseks inimese naha alla vaatamiseks. Enne tege like rakenduste loomist on aga vaja seda nähtust põhjalikult kirjeldada. Sellega mittelineaarse optika suunal koostöös AS MetroSertiga tegeletigi.

absorbed one by one, very high intensity may lead to two red photons being absorbed at a time and exciting one and the same quantum transition. Such phenomena can be used, for example, for non-invasive imaging of tissues beneath human skin. However, before creating the actual applications, the phenomenon needs to be scrupulously described. This was done as part of the research area of nonlinear optics in collaboration with the company MetroSert.

Although the Centre of Excellence actively collaborated with private companies – energy companies such as Elcogen and PowerUp as well as the ones already mentioned –, the main focus was still on doing fundamental research and training a new generation of top researchers.

“PhD students had a chance to do practical work and a number of people have emerged by now who are able to do such work anywhere and understand physics. And what’s best, new ideas and topics have been generated, and they work. There has been progress,” Urmas Nagel sums up the work of the Centre of Excellence.

Kuigi tippkeskusel oli rohkelt koostööd erafirmadega – lisaks juba mainitutele ka selliste energeetika ettevõtetega nagu Elcogen ja PowerUp –, oli tegevuse põhituum siiski fundamentaalteaduse tegemine ja uue põlvkonna tippteadlaste välja koolitamine.

„Doktorandid said teha praktilist tööd ja praeguseks on tekkinud terve hulk inimesi, kes on võimelised tegema sellist tööd ükskõik kus ja saavad füüsikast aru. Ja kõige parem on see, et tekkinud on uued ideed ja teemad ning need töötavad. On toimunud areng,“ võtab Urmas Nagel tippkeskuse töö kokku.



<b>Publications</b>	323
<b>Institutions</b>	3 National Institute of Chemical Physics and Biophysics, University of Tartu, Tartu Observatory
<b>Scientists involved</b>	47
<b>Head of the Centre</b>	Urmas Nagel
<b>Lead institution of the Centre</b>	National Institute of Chemical Physics and Biophysics

The data is based on the final report of the Centre of Excellence. Andmed põhinevad tippkeskuse lõpparuandel.

<b>Publikatsioone</b>	323
<b>Asutusi</b>	3 Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut, Tartu Ülikool, Tartu Observatoorium
<b>Kaasatud teadlasi</b>	47
<b>Tippkeskuse juht</b>	Urmas Nagel
<b>Tippkeskuse juhtasutus</b>	Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut

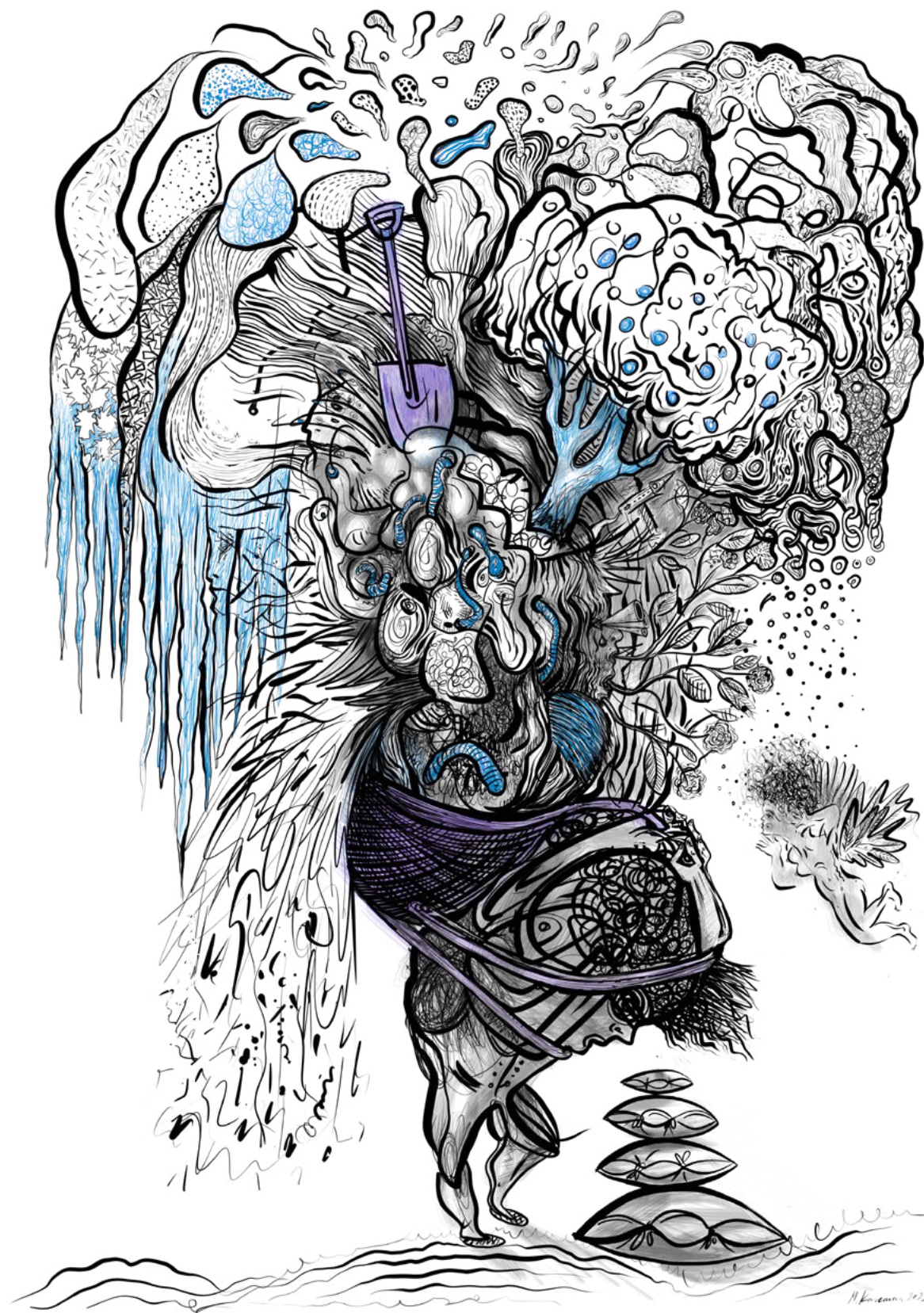
<b>Lead / Vastutav täitja</b>	<b>Research groups</b>	<b>Uurimisrühmad</b>
Toomas Rõõm	Interaction of THz Radiation with Magnetic Excitations	THz kiirguse vastasmõju magnetiliste ergastustega
Raivo Stern	Emerging Quantum Frustrated Magnets	Adaptiivsed kvant-frustreeritud magnetid
Ivo Heinmaa	NMR Investigations of the Local Structure and Dynamics in Solids and Solutions	Tahkiste ja vedelike lokaalse struktuuri ja dünaamika uuringud TMR meetoditega
Aleksander Rebane	Nonlinear Optical Spectroscopy	Mittelineaarne optiline spektroskoopia
Angela Ivask	Nanoecotoxicology, Synthesis and Study of Nanoparticles	Nanoökotoksikoloogia, nanoosakeste uurimine ja süntees
Urmas Nagel	Energy Technologies	Energiatehnoloogiad
Aile Tamm	Atomic Layer Deposition of Nanostructures	Nanostruktuuride aatomkihtsadestamine
Erwan Yann Rauwel	Synthesis of Stable Metal Nanoparticles	Stabiilsete metalli nanoosakeste süntees

The data is from the Estonian Research Information System. Andmed on võetud Eesti Teadusinfosüsteemist.

# 6

## EcolChange – Ecology of Global Change: Natural and Managed Ecosystems

Globaalmuutuste ökoloogia looduslikes  
ja põllumajanduskooslustes



## What do plants do in a changing world?

The world around us is constantly changing, and although the inevitability of climate change is by now an undisputed fact for nearly everyone, the exact nature of the changes and their effects on the natural environment are largely unknown because the future in all its complexity is hard to predict.

The Centre of Excellence EcolChange (Ecology of Global Change: Natural and Managed Ecosystems) was established with the aim of looking into the future and trying to understand how e.g. hotter or moister weather would affect the world's plant communities. In particular, which species or plant functional groups might emerge from the changes as winners and which might suffer more severe stress or disappear entirely.

## Mida teevad taimed muutuv maailmas?

Meid ümbritsev maailm on pidevas muutumises, ning kuigi kliimamuutuste paratamatus on praeguseks pea kõigile selge fakt, on nende muutuste täpne iseloom ja tagajärjed looduskeskkonnale paljuski teadmata, kuna tulevikku kogu tema keerukuses prognoosida on keeruline.

Tippkeskuse EcolChange ehk „Gloobalmuutuste ökoloogia looduslikes ja põllumajanduskooslustes“ eesmärk oligi vaadata tulevikku ja üritada aru saada, mida tooks näiteks kuumemad või niiskemad ilmad kaasa maailma taimekooslustele – millised liigid või taimede funktsionaalsed rühmad võivad tulla muutustest välja võitjatena ja millised langeda tugevamasse stressi ja hääbuda. Nagu nimi viitab, vaadati lisaks looduslikele kooslustele ka seda, millised põllukultuurid võiksid eelseisvate muutuste

As the name implies, the Centre looked not just at natural communities but also at which crops could become more widely used in Estonia in the coming decades and which are more likely to lose their significance in future.

As with several previous Centres of Excellence, this one also had its predecessors. Namely, Ülo Niinemets, Professor of Plant Physiology at the Estonian University of Life Sciences, headed the Centre of Excellence in Environmental Adaptation in 2008–2015 and Martin Zobel, Professor of Plant Ecology at the University of Tartu, headed the Centre of Excellence Frontiers in Biodiversity Research in the same period. „Ecology of Global Change“ resulted from the merging of the two areas of research.

### Natural science with new methods

“While researchers sometimes team up just to obtain funding to continue their usual work, our different areas of research clearly supported each other. The ecologists of the University of Tartu focused on biodiversity, that is, on what drives species coexistence in certain habitats and how biodiversity affects the behaviour and services of an ecosystem. They also looked at the underground diversity of microorganisms. The research team at the Estonian University of Life Sciences looked at what happens to vegetation as climate changes, how and to which extent it adapts and thereby, in turn, influences the climate, and what role different species play in the interaction of plants and the climate. From there, it's only logical to ask how species diversity, the role of plants in climate and adaptation of plant communities to climate change are inter-related. Thus, synergy was definitely there,” Niinemets explains.

käigus Eesti alal laiemat kasutust leida ja millised pigem ei ole tulevikus enam perspektiivikad.

Nagu paljudel tippkeskustel, olid ka sellel omad eelkäijad. Nimelt juhtis Eesti Maaülikooli taimefüsioloogia professor Ülo Niinemets aastatel 2008–2015 „Keskkonnamuutustega kohanemise tippkeskust“ ja Tartu Ülikooli taimeökoloogia professor Martin Zobel samal perioodil „Bioloogilise mitmekesisuse tippkeskust“. „Gloobalmuutuste ökoloogiani“ jõuti nende kahe uurimisuuna ühendamisel.

„Kui vahel pannakse seljad kokku, et lihtsalt raha saada ja oma tavapärase tööga jätkata, siis meie erinevad uurimissuunad selgelt toetasid teineteist. Tartu Ülikooli ökoloogide põhitähelepanu oli elurikkusel, st sellel, mis taimed teatud kasvukohtades kasvavad ning kuidas elurikkus mõjutab ökosüsteemi käitumist ja teenuseid. Nende fookus oli suuresti suunatud ka mikroorganismide maa-alusele mitmekesisusele. Maaülikooli töörühma teadustöö keskendus sellele, mis taimestikuga kliima muutudes juhtub, kuidas see kohaneb või ei kohane ja seda tehes omakorda keskkonda mõjutab ning mis rolli mängivad eri liigid taimede ja kliima vastastikmõjus. Siit on loogiline küsida, kuidas on liigiline mitmekesisus ning taimede roll kliimas ja koosluste kohanemine kliimamuutustega omavahel seotud. Nii et sünergia oli täiesti olemas,“ selgitab Niinemets.

### Loodusteadus uute meetoditega

Nii nagu inimestele ja metsloomadele, põhjustavad ekstreemsed kliimaolud, mida tulevikuks ennustatakse, stressi ka taimedele. Kuigi taimede füsioloogilist talitlust on uuritud juba aastasadu, piirduvad selle aja



The extreme climate conditions projected for the future will cause stress not only to humans and wild animals but also to plants. Although the physiological functions of plants have been studied already for centuries, the knowledge gathered over this time has been largely limited to the “normal”, non-stressed state of plants, while knowledge of their stress behaviour and adaptation to extreme conditions has been scarcer, and this is what Professor Niinemets’ research team has been studying.

## The University of Tartu has become one of the leading centres for studying the plant-fungus symbiosis and species diversity.

Tartu Ülikoolist on kujunenud üks olulisemaid taim-seen sümbioosi ja liigilise mitmekesisuse uurimise keskusi.

Much of the underground biodiversity and its relationships with the above-ground biodiversity have also been rather poorly known because it is only in recent decades that technological possibilities have reached the necessary level. The University of Tartu has become one of the leading centres for studying the plant-fungus symbiosis and species diversity. Research into this topic is carried out there by Professors Martin Zobel and Urmas Kõljalg and the research teams that have arisen around them, with the groups led by Leho Tedersoo and Maarja Öpik being the most successful of these.

Botany Professor Meelis Pärtel of the University of Tartu has even introduced a new term “dark biodiversity” in large-scale

jooksul kogutud teadmised suuresti taimede n-ö tavaolekuga, stressikäitumise kohta ja ekstreemsete oludega kohanemise kohta on teadmisi vähem ning just seda professor Niinemetsa töörühm uuribki.

Suur osa maa-alusest elurikkusest ja selle seostest maapealsega on siiani samuti küllaltki vähetuntud, kuna tehnoloogilised võimalused on alles viimastel aastakümnetel nii kaugele jõudnud. Seejuures on Tartu Ülikoolist kujunenud üks olulisemaid taim-

seen sümbioosi ja liigilise mitmekesisuse uurimise keskusi, kus selle teema veduriteks on professorid Martin Zobel ja Urmas Kõljalg ja nende ümber kujunenud uurimisrühmad, kelle seast on edukamad Leho Tedersoo ja Maarja Öpiku juhitud rühmad.

Elurikkuse laiahaardelises uurimises on TÜ botaanika professor Meelis Pärtel toonud käibesse koguni uue mõiste „tume elurikkus“, mis tähistab seda osa elurikkusest, mis on koosluse liigifondist puudu, ehk mis kooslusesse sobiksid, aga mida mingil põhjusel ei esine.

Kuna suur osa elurikkusest elutseb maa all mikroorganismidena, on nüüdisaegne loodusteadus juba ammu loobunud katsetest kõiki liike kirjeldada. Selle asemel

biodiversity research to describe the part of biodiversity that is absent from the species pool of a community, or species that would fit into a community but do not occur there for some reason.

As a large part of biodiversity lives underground in the form of microorganisms, modern natural science has already long given up attempting to describe all species. Instead, the presence of species is identified on the basis of DNA, which, however, means rethinking of entire central concepts, such as how to define a species, and creating the IT solutions to handle the data necessary for these approaches. This has been the focus of Professor Urmas Kõljalg and his research team for decades.

There has also been a huge gap in the quantitative assessment of the greenhouse gas emissions of wetlands globally, particularly in the tropics. Filling this gap has been the goal of the research team of Professor Ülo Mander of the University of Tartu, despite the fact that the tropics is an inhospitable environment and carrying scientific instruments there is no simple task. Along with measuring greenhouse gases, Manders's group has also described the species composition of wetlands using the metagenomics methods.

All these biodiversity studies make it possible to conduct comprehensive metagenomic research and draw conclusions on global supra-community patterns.

In addition to the research teams already mentioned, individual researcher Jaan Liira studied the complex relationships at play in border areas between agricultural and natural ecosystems.

määratakse liikide olemasolu DNA põhjal, mis tähendab aga tervete eluslooduse kesksete kontseptsioonide, näiteks liigi definitsiooni ümbermõtestamist ja uue käsituse rakendamiseks vajalike IT-lahenduste loomist, mis on olnud professor Urmas Kõljala ja tema töörühma pikaajalise töö fookus.

Globaalsel tasandil on tohtu lünk ka näiteks märgalade kasvuhoonegaaside emissiooni kvantitatiivses hindamises, eriti troopikas. See on aga töö, millega tegeleb TÜ professor Ülo Manderi töörühm, ehkki tegu on väga keerulise keskkonnaga, kuhu on raske mõõteseadmeid tassida. Koos kasvuhoonegaaside mõõtmistega kirjeldab Manderi töörühm ka märgalade mikroobide liigilist koosseisu metagenoomika meetoditega.

Kõik need eluslooduse uuringud võimaldavad viia läbi ulatuslikke metagenoomika uuringuid ning teha selle põhjal järeltõlge suurte kooslusteüleste seaduspärade kohta.

Individuaaluuriija Jaan Liira uuris aga põllumajanduslike ja looduslike ökosüsteemide piirialadel valitsevaid keerulisi seoseid.

### Ainulaadne eksperiment

Ilmekas näide ühistest uuringutest on Tartumaal Järveljal läbi viidud, maailmas teadaolevalt ainulaadne üleujutuse eksperiment, mille käigus ujutati üle umbes hektarisuurune ala, et simuleerida üleujutusi, mille sagenemist kliimamudelid prognoosivad. Niinemetsa ja Manderi töörühmad seadsid metsa alla üles suure hulga mõõteseadmeid, et mõõta erinevate gaaside liikumist eri metsa osades, ning iga päev toodi lähedal asuvast Apna jõest tuletõrjeauto paagi täis vett, mis uuringualale laiali pitsiti.



## Unique experiment

As a vivid example of joint research, the research teams of Niinemets and Mander conducted a flood experiment at Järvselja, Tartu County, to simulate floods, which are projected by climate models to become more frequent in future. In this experiment, an area of about one hectare was flooded in situ, an array of instruments was set up in the forest to measure the movement of various trace gases in different parts of the forest, and thousands of litres of water was brought from the nearby Apna River daily with a fire truck to the research area to maintain the “flood” conditions.

In this experiment, Mander’s group was interested in the movement of greenhouse gases – e.g. carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) – between the atmosphere and biosphere, both in the soil and in all layers of the forest. At the same time, Niinemets’ group measured the volatile organic compounds – such as ethanol, acetaldehyde and acetic acid, etc. – emitted by vegetation in the event of a flood, or as he himself puts it, they measured everything that was possible to measure.

According to Mander, the most important insight of the study was the fact that tree canopies play a very important role as sinks of nitrous oxide. The metabolic pathways of this greenhouse gas – or how exactly it is absorbed in trees – are, however, still unknown.

This is just a fragment of the scientific knowledge obtained from these studies, but by conducting similar measurements across the world one can interpret the dynamics of flows of matter globally, and the fragments combine to form a new whole body of knowledge, which may influence

Ülo Manderi uurimisrühma huvi oligi mõõta selle eksperimendi käigus kasvuhoonegaaside – näiteks süsihappegaasi (CO<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>) ja naerugaasi (N<sub>2</sub>O) – liikumist atmosfääri ja biosfääri vahel nii mullas kui ka kõigis metsa rinetes. Niinemetsa rühm mõõtis aga taimedest üleujutuse korral eralduvate lenduvate ühendite, näiteks etanooli, atseetaldehüüdi ja äädikhappe koguseid, kuigi nagu ta ise ütleb, mõõdeti kõike, mida üldse mõõta sai.

Manderi sõnul saadi uuringu kõige olulisema tulemusena teada, et puuvõradel on väga oluline roll just naerugaasi sidujana. Mis ainevahetusradu pidi selle kasvuhoonegaasi metabolism puudes toimub, on aga seniajani teadmata.

See on vaid üks kild neist uuringutest selgunud teaduslikest teadmistest, kuid samalaadseid mõõtmisi üle maailma läbi viies saab juba mõtestada, kuidas ainevood globaalselt toimivad, ning nendest kildudest koguneb uus teadmiste tervik, mis võib näiteks Valitsustevahelise Kliimamuutuste Nõukogu kaudu mõjutada suuri kliimapolitiilisi otsuseid. Kohalikul tasandil on sellised uuringud aga oluliseks sisendiks Eesti kliimamuutustega kohanemise strateegiasse ja Eesti kasvuhoonegaaside bilansi arvutustesse.

Mander on käinud palju ekspeditsioonidel troopikas ning mõõtnud sealsetel märgaladel samu näitajaid mis Järvselja eksperimendiski. Ta toob välja, et globaalsel tasandil on troopika senijäänud emissioonide hindamisel piisava tähelepanuta, kuigi sealset emissioone võib pidada kogu maailma kõige probleemsemateks. Kliimamuutustega kaasas käivad üleujutused ja põuad võivad aga kogu aineringsüsteemi pea peale pöörata.

„Olud, mida meie praegu loeme ekstreem-

big decisions on climate policy through e.g. the Intergovernmental Panel on Climate Change. At the local level, such studies constitute a significant input to Estonia’s strategy for climate change adaptation and calculations of the balance of greenhouse gases.

seks, võivad kliima muutudes kujuneda täiesti tavaliseks. See tähendab, et elu läheb igal juhul stressirohkemaks, ning uurides praegu taimi, mis kasvavad stressirohketes paikades, saame ennustada tulevikku – panna üldise ökoloogilise teooria tulevikumuutuste konteksti,“ summeerib professor Niinemets.

## Circumstances we consider extreme today may become completely normal with climate change.

Olud, mida meie praegu loeme ekstreemseks, võivad kliima muutudes kujuneda täiesti tavaliseks.

Ülo Niinemets

Mander has conducted many expeditions in the tropics, measuring the same parameters in the wetlands there as in the Järvselja experiment. He points out that emissions from the tropics have so far received insufficient global attention, although they could be considered the most problematic worldwide. The floods and droughts accompanying climate change may, however, turn the entire matter cycle upside down.

“The circumstances we consider extreme today may become completely normal with climate change. This means that life will become more stressful in any case, and by studying plants growing in high-stress places now, we can predict the future by placing general ecological theory into the context of future changes,” Professor Niinemets sums up the topic.

Tippkeskus panustas ka üldise ökoloogia teooria arengusse: tippkeskuse tegevuse ajal lahendati muu hulgas üks biogeograafia vanematest mõistatustest. Nimelt on juba alates biogeograafia rajaja Alexander von Humboldti aegadest täheldatud, et soojemas kliimas on taimedel pigem suuremad lehed, samas kui külmades tingimustes kasvavatel liikidel on lehed sageli päris pisikesed või koguni okasteks muundunud, selle erinevuse põhjust aga seni ei teatud. 2017. aastal ilmus ajakirjas Science tippkeskuse EcolChange osavõtul valminud rahvusvaheline uuring, kus see seaduspära lehtede sees ja pinnal toimivate füüsikaliste protsesside kaudu ära seletati.

Tegu oli küll fundamentaalse avastusega, kuid just selline info on vajalik nii stressi- kindlamate taimesortide aretamisel kui ka globaalsete taimestik mudelite loomisel ning globaalsete muutuste prognoosimisel.

The Centre of Excellence also contributed to the development of general ecological theory by solving, among others, one of the oldest mysteries of biogeography. Namely, naturalists had observed already since the time of Alexander von Humboldt, the father of the science of biogeography, that plants growing in warmer climates tend to have larger leaves, while the leaves of plants growing in cold conditions are often tiny or even modified into needles. However, the reason behind this difference was not known. An international study carried out with the involvement of the Centre of Excellence EcolChange and published in Science in 2017 explained this pattern by physical processes taking place in leaves and on their surface.

Although this was a fundamental discovery, it was just the kind of information that is necessary both for breeding more stress-tolerant plant varieties and for creating global vegetation models and predicting global changes.

### Peeking into the future with the help of plants

Not just natural communities but also agricultural landscapes are changing along with the climate. As the global supply of nutrients is directly linked to climate change, research into agricultural landscapes can be considered one of the key issues of food security in the coming decades. To contribute to these questions, researchers at the Centre of Excellence studied potential new crops in the experimental fields of the University of Life Sciences. One of the more promising of these seems to be the sweet potato. True enough, it is much more fragile than the potato traditionally grown in Estonia and requires special cultivation techniques but if the climate continues to change, it may

### Taimede abil tulevikku piilumine

Kliimaga koos ei muutu ainult looduslikud kooslused, vaid ka põllumajandusmaastikud. Kuna toitainete varustuskindlus on otseselt kliimamuutustega seotud, võib põllumajandusmaastike uurimist pidada lähiaastakümnetel koguni toidujulgeoleku üheks keskseks küsimuseks. Maaülikooli katsepõldudel uuriti tippkeskuse raames võimalikke uusi kultuure, millest üks paljutootavam paistab olevat maguskartul ehk bataat. Tõsi, võrreldes Eestis traditsiooniliselt kasvatatava kartuliga on bataat oluliselt tundlikum ja nõuab spetsiaalseid kasvatusvõtteid, kuid kliima jätkuva soojenemise korral võib sellest kujuneda meie põldudel aina enam kasvatatav kultuur. Teraviljadest võib tulevikus põldudel näha aga kõva ehk durum-nisu ja hirssi, mida on samuti juba katsepõldudel kasvatatud.

Ühes teises uuringus, mida vedasid professorid Zobel ja Pärtel, aga kus osales kogu tippkeskus, kogusid tudengid Tartu linna eri paigust mullaproove, et kaardistada mullas elavad mikroorganismid ja nende mitmekesisus, mis nüüdseks kajastub professor Kõljala juhitud elurikkuse andmebaasis PlutoF. Viimane on tänaseks kujunenud üheks maailma olulisemaks mitmekesisuse DNA-põhise uurimise tööriistaks.

Avalikkuses pälvis aga ehk enim tähelepanu Eestist alguse saanud kodanikuteaduse projekt „Eesti otsib nurmenukke“, mis laienes koostöös tippkeskusega üle 20 Euroopa riigi. Talgute käigus kogutud andmete põhjal hinnati nurmenukkude käekäiku, aga selle kaudu laiemalt ka üldse niitude ja teiste elupaikade seisundit.

Kõik tippkeskuse raames tehtud eksperimentid muidugi edukad ei olnud. Ühe näitena toob Niinemets katse, kus üritati

become an increasingly popular crop in our fields. Among cereals, durum wheat and millet may be seen growing in the fields of Estonia in future – both have already been grown in our experimental fields.

kasvatada liblikõielisi taimi ilma nendega tavaliselt sümbioosis elavate mügarbakteriteta. Viimased on võimelised õhust lämmastikku siduma ja taime sellega varustama.

## There is no such thing as a sterile plant and every organism is in essence a holobiont, inseparably connected with microbes and the surrounding environment in some way.

Steriilset taime ei olegi olemas ning iga organism on mingil kujul mikroobide ja ümbritseva keskkonnaga lahutamatult seotud holobiont.

Ülo Niinemets

In another study, which was led by Professors Zobel and Pärtel and involved the entire Centre of Excellence, graduate students collected soil samples from different places of Tartu to map soil microorganisms and their diversity, which is now reflected in the biodiversity database PlutoF headed by Professor Kõljalg. This database has by now developed into one of the world's most important tools of DNA-based research of biodiversity.

The project that attracted perhaps the most public attention was the citizen science project “Looking for Cowslips” initiated in Estonia, which has by now expanded to more than 20 European countries in collaboration with the Centre of Excellence. The collected data were used to assess the status of cowslips and through that, the broader status of meadows and other habitats in general.

Selles katses üritasid teadlased teha kindlaks, kuidas taimed ilma mügarbakteriteta hakkama saaksid, kuid pidid pärast põhjalikke ponnistusi tõdema, et seda on keeruline uurida, kuna taime ja bakterit eraldada on raske – mügarbakter on tihti olemas juba taime seemnes ning üht liiki teisest eralda ei saagi.

„Eks see näitab, et steriilset taime ei olegi olemas ning iga organism on mingil kujul mikroobide ja ümbritseva keskkonnaga lahutamatult seotud holobiont,“ tõdeb Niinemets sellisegi eksperimendi õpetlikkust. See tähendab aga, et globaalsete muutuste ja nende tagajärgede mõistmiseks peab paratamatult arvestama kõiki eluslooduse omavahelisi seoseid.

Not all of the experiments conducted under the Centre of Excellence were successful of course. As an example, Niinemets points out an experiment where researchers attempted to grow legumes without the rhizobia, which normally live in symbiosis with them, fixing nitrogen from the air and supplying the plant with it.

In this experiment, researchers tried to find out how plants would cope without rhizobia but had to admit after painstaking efforts that this is complicated to study because it is difficult to separate the plant and the bacterium – the rhizobium is often present already in the plant's seed and separation of the two species is impossible.

“This shows that there is no such thing as a sterile plant and that every organism is in essence a holobiont, inseparably connected with microbes and the surrounding environment in some way,” Niinemets concludes from even this kind of an experiment. This means, however, that global changes and their effects can only be understood if all relationships present in nature are taken

<b>Publications</b>	772	<b>Publikatsioone</b>	772
<b>Institutions</b>	2 University of Tartu, Estonian University of Life Sciences	<b>Asutusi</b>	2 Tartu Ülikool, Eesti Maaülikool
<b>Scientists involved</b>	145	<b>Kaasatud teadlasi</b>	145
<b>Head of the Centre</b>	Ülo Niinemets	<b>Tippkeskuse juht</b>	Ülo Niinemets
<b>Lead institution of the Centre</b>	Estonian University of Life Sciences	<b>Tippkeskuse juhtasutus</b>	Eesti Maaülikool

The data is based on the final report of the Centre of Excellence.  
Andmed põhinevad tippkeskuse lõpparuandel.

<b>Lead / Vastutav täitja</b>	<b>Research groups</b>	<b>Uurimisrühmad</b>
Ülo Niinemets	Plant Ecophysiology and Biosphere-Atmosphere Interactions	Taimede ökofüsioloogia ja biosfääri-atmosfääri vastastikmõjud
Urmas Kõljalg	Global Biodiversity	Globaalne elurikkus
Martin Zobel	Plant Ecology and Diversity	Taimeökoloogia ja bioloogiline mitmekesisus
Meelis Pärtel	Macroecology and Ecoinformatics	Makroökoloogia ja ökoinformaatika
Jaan Liira	Conservation and Agricultural Ecology	Põllumajandusmaastike loodushoid ja ökoloogia
Ülo Mander	Ecotechnology and Landscape Biogeochemistry	Ökotehnoloogia ja maastike biogeokeemia

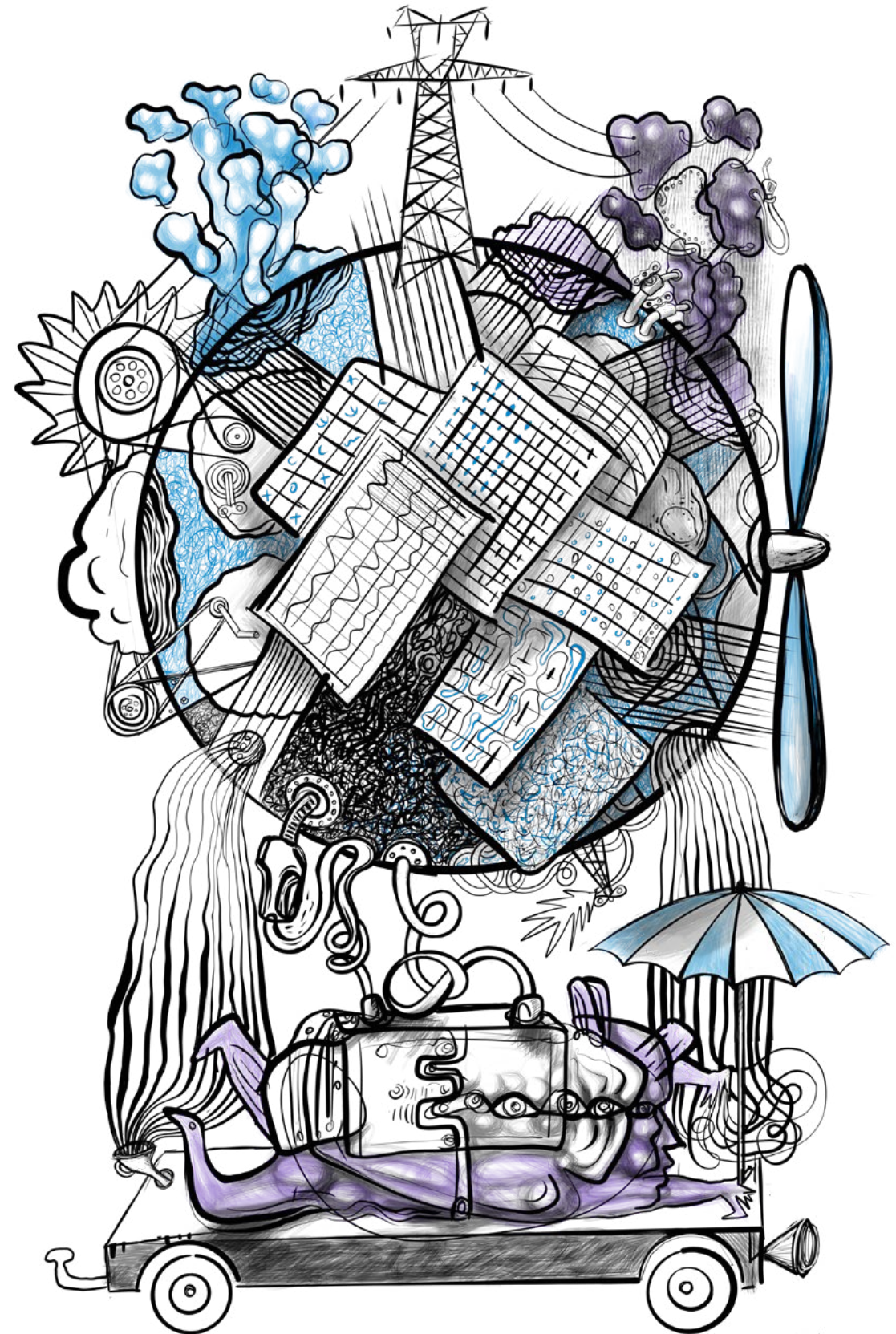
The data is from the Estonian Research Information System.  
Andmed on võetud Eesti Teadusinfosüsteemist.



# 7

## HiTechDevices – Novel Materials and High Technology Equipment for Energy Storage and Conversion Systems

Uudsed materjalid ja kõrgtehnoloogilised  
seadmed energia salvestamise ja  
muundamise süsteemidele





## New Materials Solving the Energy Crisis

Climate change has unfortunately become an inescapable process, but the need for humankind to change its behaviour, adapt and reduce its CO2 emissions seems equally inescapable. This is, however, not possible without new technologies.

All new high-tech equipment is, however, based on new materials, explains Enn Lust, Professor of Physical Chemistry at the University of Tartu, who headed the Centre of Excellence for Novel Materials and High Technology Equipment for Energy Storage and Conversion Systems, where investigation into new materials and technical solutions necessary for this research was the main focus.

## Uued materjalid võimaldavad puhas energiat

Kliima muutumine on praeguseks paraku vääramatu protsess, kuid sama vääramatu paistab ka see, et inimkond peab oma tegutsemist muutma, kohanema ja ka CO2-heitmeid vähendama. Ilma uute tehnoloogiateta see aga võimalik ei ole.

Nagu seletab Tartu Ülikooli füüsikalise keemia professor Enn Lust, põhinevad kõik uued kõrgtehnoloogilised seadmed aga uutel materjalidel, mille uurimise ja selleks vajalike tehnoloogiliste lahendustega tema juhitud tippkeskus „Uudsed materjalid ja kõrgtehnoloogilised seadmed energia salvestamise ja muundamise süsteemidele“ tegeleski.

The research was based on the understanding that the energy solutions of the future will certainly be complex, involving different energy sources and energy conversion and storage solutions that are not widely used as yet.

Such technologies include e.g. supercapacitors (impulse power supply units allowing the storage of large amounts of energy) and fuel cells producing energy from different fuels through electrochemical reactions. One of the potential key energy carriers is hydrogen, which can be produced from water using renewable energy powered electrolyzers and used as a fuel in fuel cells to produce electricity, with heat and water as byproducts.

Several events in the wider world during the period of the Centre of Excellence have further increased the need for developing such technologies. A pioneering role in the EU has been played by Germany, where over 300 hydrogen refuelling stations are planned to be built in the coming years. At the same time, a recent analysis in the United States showed that wind and solar power combined with high-voltage direct current power lines are capable of supplying the energy demand of the entire country without any need for storage capacities.

According to Lust, the events in Ukraine have highlighted the extreme vulnerability of centralised power systems, which has motivated President Joe Biden to launch a national action plan for establishing a network of fast charging stations, spaced 50 to 100 kilometres apart, along the country's highways wherever it is possible to produce local renewable energy. The network will also include hydrogen stations, which will be spaced 150 to 200 kilometres apart, depending on population density and traffic intensity.

Lähtuti arusaamast, et tuleviku energia-lahendus saab igal juhul olema kompleksne ning hõlmama erinevaid energiaallikaid ja energia muundamise ja salvestamise lahendusi, millesuguseid tänapäeval veel kuigi palju kasutuses ei ole.

Sellised tehnoloogiad on näiteks superkondensaatorid (suurte energiakoguste salvestamist võimaldavad impulss-vooluallikad) ja erinevatest kütustest elektrokeemilise reaktsiooni teel energiat tootvad kütuseelemendid. Ühe keskse energia-kandjana nähakse tänapäeval vesinikku, mida on võimalik taastuenergia ja elektro-lüüserite abil veest toota ning seejärel kütuseelementides kütusena kasutada, kusjuures protsessi saadusteks on elekter, soojus ja vesi.

Mitmed tippkeskuse tegutsemisperioodi jooksul maailmas aset leidnud sündmused on selliste tehnoloogiate arendamise vajadust veelgi süvendanud. Euroopa Liidus on teerajaja olnud Saksamaa, kus plaanitakse lähiaastatel rajada üle 300 vesinikutankla. Samal ajal näitas üks hiljuti Ameerika Ühendriikides tehtud analüüs, et tuul ja päike kombineerituna alalisvoolu kõrgepingeliinidega on võimelised täitma kogu riigi energiavajaduse nii, et midagi ei oleks vaja salvestadagi.

Lusti sõnul on Ukraina sündmused näidanud tsentraalsete energiasüsteemide ülimat haavatavust, mistõttu on president Joe Biden algatanud riikliku tegevuskava, mille järgi alustakse riigi maanteedele, kus vähegi võimalik kohalikku taastuenergiat toota, 50–100 kilomeetrise vahega kiir-laadimispunktide võrgustiku rajamist. Võrgustiku juurde kuuluvate vesiniku-jaamade vahemaaks plaanitakse 150–200 kilomeetrit, olenevalt asustus- ja liiklus-tihedusest.

All this requires the necessary technologies to be rapidly developed and become operational.

Talking about the greatest achievements of the Centre of Excellence, Professor Lust points out joint research carried out in collaboration with the Institute of Physics at University of Tartu into electrochemical systems in operando conditions. "Operando" means that the devices are investigated while they are in real operation, which allows conclusions to be drawn on what is happening e.g. on the electrodes of a supercapacitor when the supercapacitor is overpolarised or in a fuel cell when exhaust gases or reactants with contaminating additions are directed into it.

For example, Gunnar Nurk, Associate Professor of Electrochemistry at the University of Tartu, developed a method for simultaneous investigation of the oxidation and reduction processes taking place at the two electrodes of a fuel cell. The method is unique in the world, with the capability existing only in Tartu University and the MaxIV Laboratory in Lund, Sweden. The University of Tartu plans to significantly expand the application of this method to operando investigation of other devices in collaboration with other research centres possessing a source of synchrotron radiation

## Useful defects

Neutron diffraction studies conducted in collaboration with researchers of the Helmholtz Centre in Berlin make it possible to identify the shape of pores in the electrodes and membranes of supercapacitors or fuel cells. As the shape of the pores affects the work of all devices using porous materials, it is extremely important to have a better

See kõik eeldab vajalike tehnoloogiate kiiret arendamist ja kasutusküpseks saamist.

Tippkeskuse ühe suurema saavutusena toob professor Lust välja elektrokeemiliste süsteemide uurimise *operando* tingimustes koostöös TÜ füüsika instituudiga. *Operando* tingimustes uurimine tähendab, et seadmeid uuritakse nende töö käigus, ja see võimaldab teha järeldusi selle kohta, mis toimub näiteks superkondensaatori elektroodidel, kui superkondensaator üle polariseerida, või kütuseelemendis, kui juhtida sellesse saastegaase või vedelikke.

Näiteks töötas TÜ füüsikalise ja elektrokeemia kaasprofessor Gunnar Nurk välja viisi, kuidas uurida kütuseelemendi kahel elektroodil toimuvaid oksüdeerimis- ja redutseerimisprotsesse samaaegselt. Tegu on maailmas ainulaadse arendusega, milleks on võimekus hetkel olemas vaid Tartus ja Lundi MaxIV laboris. Selle meetodi rakendamist on TÜ-I koostöös teiste sünkrotronkiirusallikat omavate uurimiskeskustega kavas oluliselt laiendada ka muude seadmete *operando* uurimisele.

## Kasulikud defektid

Koostöös Berliini Helmholtzi Keskuse teadlastega neutronhajumise meetodil läbi viidud uuringud võimaldavad teha kindlaks, millise kujuga on superkondensaatorite või kütuseelemendi elektroodides ja membraanides olevad poorid. Kuna poori kuju mõjutab kõigi poorseid materjale kasutatavate seadmete tööd, on ülioluline seda paremini mõista: teada, kas enamik poore on pilukujulised, kerakujulised, silindrilised jne. Samuti näidati, et Tartus Chemicumis sünteesitud elektroodide ja membraanide poorid on pinnadefektiga ja nende seinad ei ole siledad, vaid on karedad.

understanding of it, i.e. to know whether the majority of the pores are slit-shaped, round, cylindrical, etc. In these studies, the researchers also showed that the pores of the electrodes and membranes synthesised in the Institute of Chemistry in Tartu have a surface defect, making their walls not smooth but rough.

See osutus aga heaks uudiseks, kuna sellised membraanid salvestavad vesinikku oluliselt paremini, ning kui katta see membraan veel õhukese kihina metallhüdriidiga, on sellistest membraanidest kokku pandav plahvatuskindel vesinikusalvesti võimeline salvestama poolteist kuni 1,7 korda rohkem vesinikku kui praegu kasutuses olevad salvestid.

## One of the potential key energy carriers is hydrogen.

Ühe keskse energiakandjana nähakse tänapäeval vesinikku.

However, this turned out to be good news because such membranes are significantly better at storing hydrogen, and when the membrane is further covered with a thin layer of metal hydride, the explosion-proof hydrogen storage unit composed of such membranes is capable of storing 1.5 to 1.7 times more hydrogen than the storage units in use today.

The working group led by Kaido Tammeveski studied the processes taking place in microheterogeneous and nanoscale catalyst systems and the relevant technological applications with the aim of overcoming one of the bottlenecks of the fuel cell technology: the need to use platinum. Although platinum-free fuel cells already exist and seem to work, they degrade over time and lose their catalytic activity, that is, they go inactive.

Besides, platinum is simply too scarce in the world. Even if all of the world's banks were emptied of platinum and the reserves

Kaido Tammeveski juhitud tööühm uuris mikroheterogeensetes ja nanomõõtmetes katalüsaatorsüsteemides toimuvaid protsesse ning vastavaid tehnoloogilisi rakendusi, et ületada üks kütuseelementide tehnoloogia kitsaskohtadest: vajadus kasutada plaatina. Tõsi, platinavabad kütuseelemendid on praegugi olemas ja esmapilgul ka töötavad, kuid pikema aja peale need degradeeruvad ja kaotavad katalüütilise aktiivsuse, ehk siis riknevad.

Peale selle on plaatina maailmas lihtsalt liiga vähe. Isegi kui kõik maailma pangad platinast tühjaks teha ja inimeste käes olevad varud kokku koguda, saaks sellega rahuldada vaid viis kuni seitse protsenti energiaseadmete platinavajadusest, selgitab Lust.

Samal ajal otsiti lahendust ka tahke-oksüdsete kütuseelementide laialdasemat kasutuselevõttu takistavale probleemile. Nimelt, kui kasutada neis elementides voolu saamiseks maagaasi, tuleb gaas

held by individuals collected, the resulting amount would still cover only 5 to 7 per cent of the platinum demand of energy installations, says Lust.

A solution was also sought to a problem inhibiting the wider introduction of solid oxide fuel cells. Namely, if natural gas is used in the cells to produce a electricity,

## Even if all of the world's banks were emptied of platinum and the reserves held by individuals collected, the resulting amount would still cover only 5 to 7 per cent of the platinum demand of energy installations.

Isegi kui kõik maailma pangad platinast tühjaks teha ja inimeste käes olevad varud kokku koguda, saaks sellega rahuldada vaid viis kuni seitse protsenti energiaseadmete platinavajadusest.

the gas has to be purified of sulphur compounds because the nanoclusters of nickel and cobalt contained in fuel cell membranes bind sulphur very actively, which has a destructive effect on the fuel cell's electrodes. Researchers in Tartu further developed fully ceramic fuel cell and electrolyser materials that could work with unpurified gas as well.

An important role in low temperature development efforts was played by Professor Ivo Leito's research group, which synthesises new superacids and superbases, new ionic liquids and novel salts, all of which have proved necessary for developing green supercapacitors and sodium-ion batteries with high energy density. At the same

enne väävliühenditest puhastada, kuna kütuseelementide membraanides sisalduvad nikli ja koobalti nanoklastrid seovad väävlit väga aktiivselt, mis mõjub aga kütuseelemendi elektrodidele laastavalt. Tartus arendati edasi täiskeraamiliste kütuseelementide ja elektrolüüserite materjale, mis peaksid töötama ka puhastamata gaasiga.

Paljudes uuringutes ja arendustes osales ka professor Ivo Leito tööühm, kes sünteesib uusi ülihappeid ja -aluseid, uusi ioonseid vedelikke ja eksootilisi soolasisid, mida kõiki on läinud vaja uudsete suure energiatihedusega superkondensaatorite ja naatriumioonpatareide arendamiseks. Ove Olli juhtimisel töötati aga välja uudne meetodika, mis võimaldab ekstraheerida Eesti fosforiidi või graptoliitargilliidi happelistest lahustest haruldasi ja hajutatud muldmetalle, mis on väga vajalikud tahkeoksiidsete kütuseelementide ja elektrolüüserite valmistamiseks.

Energia salvestamise rindel arendati edasi naatriumioon- ja tsinkioonpatareide tehnoloogiat. Need patareid on küll väiksema

time, researchers led by Ove Oll developed a novel method that makes it possible to extract rare and distributed earth metals, which are necessary for producing solid oxide fuel cells and electrolyzers, from the acidic solutions of the Estonian phosphorite or graptolite argillite.

In the field of energy storage, the technology of sodium-ion and zinc-ion batteries was developed further. These batteries have lower energy capacity than the lithium-based batteries currently dominating the market but, on the other hand, sodium and zinc are much more widely distributed in nature. Such batteries would therefore be considerably cheaper and enable larger energy storage capacities. One of the drawbacks of such batteries has also been the fact that researchers have been unable to prepare a good material for the positive electrode of sodium-ion batteries. To overcome this drawback, researchers at the Centre of Excellence looked at whether various complex oxides and other complex compounds could be suitable for this purpose, and this work continues.

## Solar cells are changing, too

Development of technologies for the storage and conversion of energy may be one of the biggest bottlenecks in the transition to renewable energy but it all begins with generation of electricity from solar radiation or wind. With that in mind, the partners of the Centre of Excellence from Tallinn University of Technology worked on novel solar cell technologies.

Unlike the silicon-based solar cells found in the solar farms in fields across Estonia, the solar cells developed in TalTech are based on a semiconductor compound called kesterite, which has several advantages over

energiamahutavusega kui praegu turul domineerivad liitiumipõhised patareid, kuid samas on naatrium ja tsink looduses oluliselt laiemalt levinud, mistõttu need patareid oleksid märkimisväärselt odavamad ja nende olemasolu võimaldaks rajada suuremaid elektrisalvestusvõimsusi. Selliste patareide üks kitsaskoht on seni olnud ka tõsiasi, et siiani ei ole leitud head materjali naatriumioonpatareide positiivse elektroodi valmistamiseks. Tippkeskuses uuriti, kas selleks võiksid sobida erinevad kompleksoksiidid ja muud kompleksühendid, ning see töö jätkub.

## Päikesepaneelidki muutuvad

TaastuvenergiALE ülemineku üks suuremaid kitsaskohti võib olla küll salvestus- ja energia muundamise tehnoloogiate arendamine, kuid kõik saab siiski alguse elektri tootmisest päikesest või tuulest. Tippkeskuse partnerid Tallinna Tehnikaülikoolist tegelesidki uut laadi päikesepaneelide tehnoloogia arendamisega.

Erinevalt ränipõhistest päikesepaneelidest, mida võib näha peaaegu kõikjal üle Eesti põldudele rajatud päikeseparkides, on TTÜs arendatavates paneelides kesksel kohal pooljuhtühend nimega kesteriit, millel on rani ees mitmeid eeliseid. Kui ränist tehtud päikeseelemendid on jäigad, siis kesteriidipõhised elemendid võivad olla painduvad, mistõttu on neid võimalik kasutada ka mitmesugustel kumeratel pindadel. Samuti on neile võimalik anda erinevat päikesekiirguse läbilaskvust ja muu hulgas ka eri värve, mistõttu neid saaks integreerida näiteks akendesse, aga ka paljudesse teistesse hoone osadesse. Tagatipuks koosneb kesteriit sellistest looduses laialt levinud elementidest nagu vask, tsink, tina ja väävel ning ei sisalda haruldasi ja kalleid elemente.

silicon. While the solar cells made of silicon are rigid, the kesterite-based ones can be flexible, which allows them to be used on various curved surfaces. They can also be given different levels of permeability to solar radiation and, among other features, different colours, which allows them to be integrated into windows but also into many other parts of a building. On top of it all, kesterite consists of widely available elements such as copper, zinc, tin and sulphur and does not contain rare or expensive elements.

## Development of energy storage and conversion technologies may be one of the biggest bottlenecks in the transition to renewable energy but it all begins with generation of power from solar radiation or wind.

Taastuenergiade ülemineku üks kitsaskohti võib olla salvestus- ja energia muundamise tehnoloogiate arendamine, kuid kõik saab siiski alguse elektri tootmisest päikesest või tuulest.

As tends to happen all too often, the praise is followed by a big “but”. Namely, the efficiency of kesterite-based solar cells tends to remain below 10 per cent and cannot compete with that of silicon-based cells. Researchers at TalTech led by Professor Maarja Grossberg-Kuusk achieved a kind of world record, creating kesterite cells that are capable of converting 15–16 per cent of the solar radiation falling on them into usable electric energy.

Nagu pahatihti juhtuma kipub, järgneb kiidulaulule aga üks suur „aga“. Nimelt kipub kesteriidipõhiste päikeseelementide tootlus jääma alla kümne protsendi ega suuda ränipõhistega konkureerida. Tehnikaülikooli teadlased eesotsas professor Maarja Grossberg-Kuusega saavutasid kesteriidist päikeseelementide arendamises omamoodi maailmarekordi, luues elemendid, mis suudavad muundada elektriks 15–16 protsenti elemendile langevast päikesevalgusest.

### Demokeskus näitab, mis on võimalik

Tippkeskuse üheks olulisemaks saavutuseks võib pidada ka realselt toimiva hajutatud energiatootmise demokeskuse rajamist Tartu Ülikooli Chemicumi juurde professor Lusti enda töörühma juhtimisel. Sealsele süsteemile toodavad elektrit päikesepaneelid, saadav vool salvestatakse patareides ja seejärel toidetakse sellega elektrolüüsereid, mis toodavad veest

### A Demo Centre Shows What is Possible

The establishment of a fully functioning demo centre for green energy production at the Chemicum building of the Institute of Chemistry, University of Tartu, led by Professor Lust's working group can be considered one of the greatest achievements of the Centre of Excellence. Power for the system is generated by solar cells, stored in batteries and then used to feed electrolyzers that produce hydrogen from water. The hydrogen is then stored in pressurised steel cylinders for later use in fuel cells to produce electricity and heat.

All these technologies have their specific traits, and combining them is comparable to assembling a complex jigsaw puzzle, where all pieces have to fit to form a complete picture. Yet this was necessary to prove that such an approach works. By now, the system supplies the hydrogen demand of the whole of Chemicum, and a car running on hydrogen fuel cells has also been built in collaboration with Auvetech Ltd.

The demo centre has clearly shown that during a crisis, be it a military conflict or a natural disaster, the novel energy technologies developed as part of the work of the Centre of Excellence may prove more reliable and, naturally, environmentally friendlier than the current central energy production. More importantly though, it has shown how produced renewable energy could be collected and converted in future and how a complex green energy infrastructure could work.

vesinikku. Vesinik hoiustatakse 300-atmosfäärise rõhu all terasballoonides, et kasutada seda hiljem kütuseelementides elektri ja soojuse tootmiseks.

Kõik need tehnoloogiad on oma eripäradega ning nende kombineerimist saab võrrelda keeruka pusle kokkupanemisega, kus kõik tükid peavad omavahel klappima, et moodustada tervikpilt. See oli aga vajalik, et tõestada, et selline lähenemine töötab. Praeguseks katab süsteem kogu Chemicumi vesinikuvajaduse ja koostöös ettevõttega Auvetech on ehitatud valmis ka vesinikkütuseelemendiga isesõitev auto.

Demokeskuse käitamine on selgelt näidanud, kuidas tippkeskuse töös arendatud uued energiatehnoloogiad võivad kriisi ajal, olgu selleks sõjaline konflikt või looduskatastroof, osutada praegusest tsentraalsest energiatootmisest töökindlamaks ja loomulikult ka keskkonnasõbralikumaks. Mis aga veelgi olulisem, selle toimimine on näidanud, kuidas tulevikus võiks hajutatult toodetud puhast energiat koguda ja muundada ning kuidas saaks toimida tuleviku energiasüsteem.

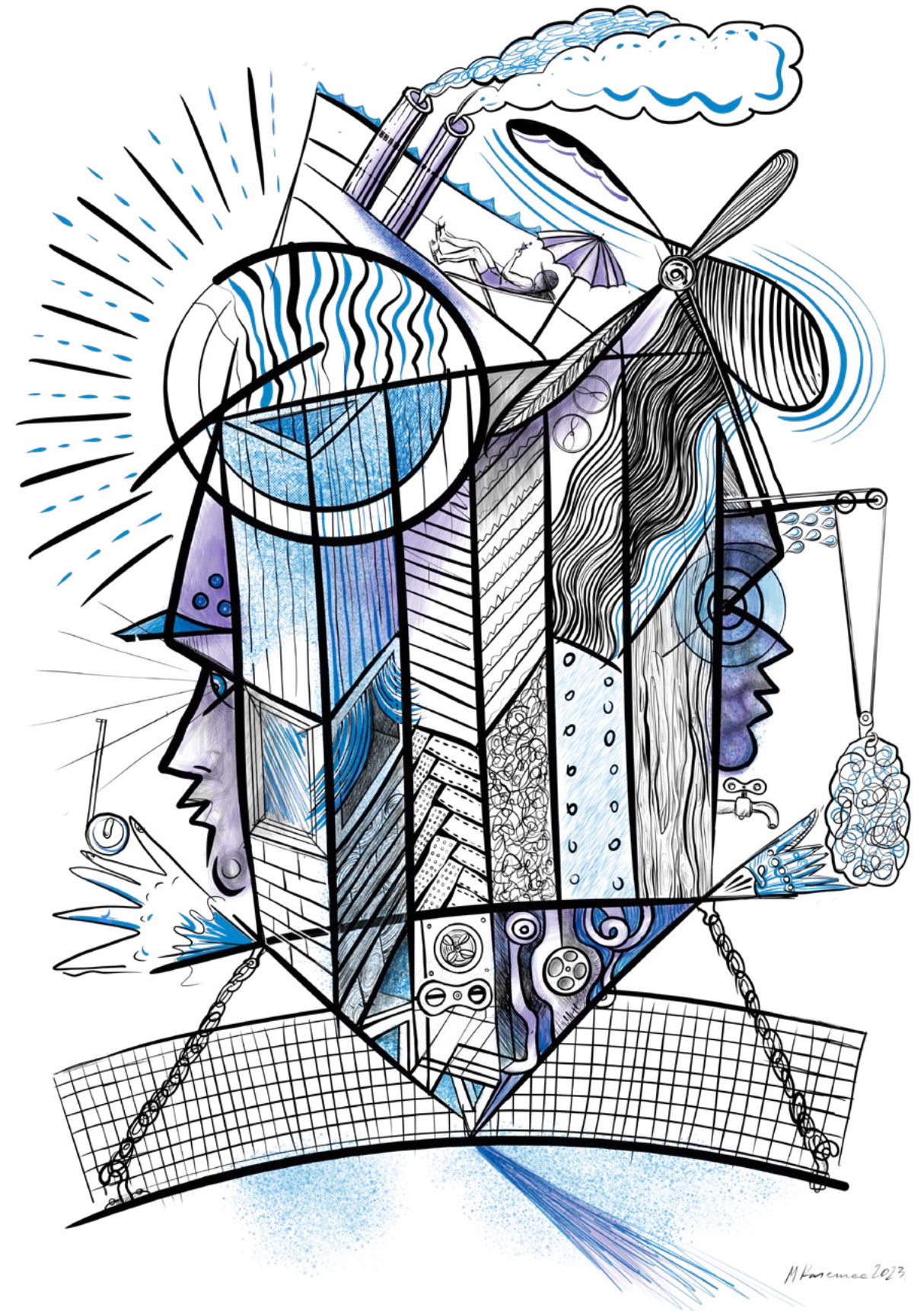


Lead / Vastutav täitja	Research groups	Uurimisrühmad
Dieter Meissner	CZTS (Kesterite) Monograin Membranes for Photoelectrochemical Water Splitting	CZTS (Kesteriit) monoterakihid kui võimalus vee elektro-keemiliseks lagundamiseks
Malle Krunks	Thin Films and Nanomaterials by Wet-Chemical Methods for Next-Generation Photovoltaics	Õhukesed kiled ja nanomaterjalid keemilistel vedelikesadestusmeetoditel uue põlvkonna fotovoltseadistele
Maarja Grossberg-Kuusk	New Materials and Technologies for Solar Energetics	Uued materjalid ja tehnoloogiad päikeseenergeetikale
Ergo Nõmmiste † Vambola Kisand	Structure Sensitive Interaction Mechanisms in Functional Materials at Nanoscale	Struktuuritundlikud interaktsioonimehhanismid funktsionaalsetes materjalides nanoskaalas (IUT)
Väino Sammelselg	Thin-Film Structures for Nanoelectronic Applications and Functional Coatings	Kilestruktuurid nanoelektronika rakendusteks ja funktsionaalseteks pinnakateteks
Mikhail Brik	Marie-Curie ITN LUMINET - European Network on Luminescent Materials	Marie Curie esmase koolituse võrgustik LUMINET – Euroopa luminescentsmaterjalide võrgustik
Ivo Leito	The Chemistry of Superacids and Superbases and Its Hi-Tech Applications	Superhapete ja superaluste keemia ja selle kõrgtehnoloogilised rakendused
Rasmus Palm	Physical and Electrochemical Properties of Hydrogen, Different Solutions and Hydrids in Micro-/Mesoporous Carbon Materials	Vesiniku, erinevate lahuste ja hüdriidide füüsikaliste ja elektrokeemiliste omaduste uurimine mikro-/mesopoorsetes süsinikmaterjalides
Enn Lust	Functional Micro/Mesoporous Materials for Novel Energy Conversion and Storage Systems	Funktsionaalsed mikro/mesopoorused materjalid kõrgefektiivsete energia muundamise ja salvestamise süsteemides
Kaido Tammeveski	Investigation of Processes in Microheterogeneous and Nanoscale Systems and Related Technological Applications	Mikroheterogeensetes ja nanomõõtmetes süsteemides toimivate protsesside uurimine ning vastavad tehnoloogilised rakendused

# 8

## ZEBE – Centre of Excellence for Zero Energy and Resource Efficient Smart Buildings and Districts

Teadmistepõhise ehituse tippkeskus



## Building Science Solving Three Crises

The activities of the Centre of Excellence for Zero Energy and Resource Efficient Smart Buildings and Districts, or ZEBE, were driven by a specific problem: the excessive energy consumption of buildings. By the end of the seven-year project, however, the Centre found itself in the middle of three crises: the climate crisis, COVID, and energy crisis, with building engineers playing an increasingly important role in finding solutions to each of these.

The creation of the Centre of Excellence was in a way a credit to Estonia's building science because there had previously been no Centre of Excellence in this field. The hHead of ZEBE, Professor Jarek Kurnitski from Tallinn University of Technology (TalTech), explains this by the fact that the level

## Ehitusteadus kui kolme kriisi lahendaja

„Teadmistepõhise ehituse“ tippkeskuse tegevus oli ajendatud konkreetsest probleemist: hoonete liiga suurest energiatarbest. Seitsmeaastase projekti lõpuks leiti end aga keset nii kliima-, koroona- kui ka energiakriisi, mille kõigi lahendamises mängivad ehitusinsenerid aina suuremat rolli.

Eesti ehitusteadusele oli tippkeskuse loomine omamoodi tunnustus, kuna varem ei ole selles valdkonnas tippkeskust moodustatud. „Teadmistepõhise ehituse“ juht, TTÜ professor Jarek Kurnitski toob selle põhjusena välja, et varem ei ole ehitusteadus lihtsalt piisaval tasemel olnud.

„Tippkeskuse loomisest on konkurents ikka äärmiselt kõva ja arvan, et varasema tipp-

of building science has previously just not measured up.

“The competition to establish a Centre of Excellence is extremely tough, and I believe the absence of an earlier Centre of Excellence simply reflects the fact that although building science has a long tradition in Estonia, there was an interruption after such renowned constructors as Valdek Kulbach and Karl Õiger. After the social transition (from the Soviet social order to independence), civil engineering was the last discipline in TalTech to undergo a generational shift,” Kurnitski points out.

The wind of change has brought a younger generation of top researchers into building science and shifted the focus to topics such as near-zero energy buildings, flexibility services, improvement of energy efficiency, local renewable energy production, wood construction, and even artificial intelligence.

Research under the Centre of Excellence was broadly divided into two areas: energy efficiency and management of energy consumption along with local energy production.

### A good house feels good to be in

As part of the research area of energy efficiency, the Centre's researchers developed the fundamental concept of how to ensure the well-being of the users of buildings in an energy and cost-efficient way, both in new construction and in renovating older residential buildings.

Statistics show that over a half of Estonia's final energy consumption takes place inside buildings, with the bulk of the country's building stock made up of old apartment buildings with enormous energy consump-

keskuse puudumine peegeldab lihtsalt olukorda, et ehitusteadus on meil küll pikkade traditsioonidega, aga pärast selliseid kuulsaid konstruktoreid nagu Valdek Kulbach ja Karl Õiger tekkis mingisugune katkestus. Peale ühiskonnakorra muutust oli ehitus Tehnikaülikoolis viimane eriala, kus toimus põlvkondade vahetus,” tõdeb Kurnitski.

Uued tuuled on ehitusteadusesse toonud noorema põlvkonna tippteadlased ja tähelepanu keskmesse sellised teemad nagu liginullenergiahooned, paindlikkusteenused, energiatõhususe parandamine, lokaalne energiatootmine, puitehitus ja isegi tehisintellekt.

Laias laastus jagunes tippkeskuse tegevus kaheks uurimissuunaks: energiatõhusus ning tarbimise juhtimine ja lokaalse energia tootmine.

### Heas majas peab olema hea olla

Energiatõhususe uurimissuuna raames loodi põhjarusaam, kuidas tagada hoonete kasutajate heaolu energia- ja kulutõhusal viisil, ja seda nii uute hoonete ehitamisel kui ka vanemate elamute renoveerimisel.

Statistika näitab, et Eestis toimub üle poole energia lõpptarbimisest hoonetes, kusjuures väga suure osa kogu riigi hoonefondist moodustavad vanad korterelamud, mille energiakulud on tohutud ja mis vajavad ka juba üldise amortiseerumise tõttu renoveerimist. Kuna aga tegu on inimeste elukeskkonnaga, ei saa renoveerimine keskenduda vaid energiatõhususele, oluline on ka hea sisekliima saavutamine.

Nüüdisaegne energiatõhus hoone hõlmab ka n-õ loomuliku intelligentsiga arusaadavaid elemente, nagu hästi soojustatud välispiirded, soojapidavad aknad ja ukсед,



tion and in need of renovation even just because of their general state of disrepair. However, as they provide a living environment for people, renovation cannot focus on energy efficiency only – it is also important to achieve a good indoor climate and comfort.

korralik soojustagastusega ventilatsioon ja efektiivne küttesüsteem, aga ka lokaalne taastuvenergia tootmine. Neid teemasid arendasid professor Kurnitski juhitud liginullenergiahoonete töörühma teadlased. Nende töö tulemusena on uute hoonete energiapööre Eestis tehtud. Alates 2020

## Since 2020 all new buildings have been built in compliance with the technical standard for near-zero energy buildings.

Alates 2020. aastast ehitatakse kõik uued hooned liginullenergiahoone standardile vastavalt.

A modern energy-efficient building includes such “common-sense” elements as well-insulated building envelopes, energy-efficient windows and doors, heat recovery ventilation systems and efficient heating systems as well as local production of renewable energy. These were further developed by researchers of the Near-Zero Energy Buildings Research Group led by Professor Kurnitski. As a result of their work, the energy transition of new buildings was completed in Estonia and since 2020 all new buildings have been built in compliance with the technical standard for near-zero energy buildings.

The energy consumption and indoor climate of buildings are in constant change depending on outdoor climate and the use of the buildings, making it important to manage their utility systems in a demand-controlled fashion. The demand for cooling, for instance, is a highly dynamic process

aastast ehitatakse kõik uued hooned liginullenergiahoone standardile vastavalt.

Hoonete energiakasutust ja sisekliimat iseloomustab pidev muutumine vastavalt väliskliimale ja hoonete kasutamisele, mistõttu on oluline juhtida hoone tehnosüsteeme nõudluspõhiselt. Näiteks jahutusvajadus on ülimalt dünaamiline protsess, mis sõltub suuresti soojuse neeldumisest tarinditesse ja sealt viivitusega vabanemisest. Väga dünaamiline protsess on ka päikesepaneelidega toodetud elektri kasutamine hoones, selle puhul on nii toodang kui tarbimine pidevas muutumises.

Kuna enamik hooned on unikaalsed, algab nende energiatarbimise kavandamine ja tehnoloogia loomine nullist. Igast hoonest luuakse arvutimudel ehk niinimetatud digitaalne kaksik, mis hõlmab kõiki hoone konstruktsioone, neid läbivaid energiavooge ja kõiki tehnosüsteeme, sensoreid ja

that depends largely on the absorption and delayed release of solar heat by structures. The use of electricity generated by solar photovoltaic panels is also very dynamic, with both the production output and demand constantly changing.

As most buildings are unique, planning their energy performance and creating the relevant technology has to start from scratch. A computer model, or a so-called “digital twin”, is created of each building, including all of its structures, energy flows through them as well as all building technical systems, sensors, controllers and control algorithms. Such digital twins allow all key indicators to be predicted on an hourly basis and can be used to study the effect of e.g. the thickness of insulation, window size or changes in heating, ventilation and air conditioning or lighting systems on the energy use and indoor climate of a building, but also to explore its energy consumption and possibilities for on-site renewable energy production.

Modelling of the energy consumption of buildings has brought a significant change in the building regulations of Estonia. Modelling of energy and indoor climate now starts already in the preliminary design phase, when compliance with requirements is demonstrated while applying for a building permit. Since 2008, building regulations in Estonia no longer dictate specific technical solutions to be used but instead provide a performance based maximum value for the primary energy value, that is total weighted energy consumption, leaving all decisions and choices about how to achieve this number up to the builder.

juhtimisalgoritme ning võimaldab kõiki olulisi näitajaid tunnipõhiselt prognoosida. Kaksiku abil on võimalik uurida näiteks soojustuse paksuse, akna suuruse või tehnosüsteemides tehtavate muudatuste mõju hoone energiakasutusele ja sisekliimale, aga ka energiakulu ja võimalikku taastuvenergia tootmist.

Hoonete energiatarbe modelleerimine on toonud kaasa olulise muutuse kogu Eesti ehitusregulatsioonides. Energia ja sisekliima modelleerimisega alustatakse juba eelprojekti faasis, mil tõendatakse nõuete täitmist ehitusloa taotluse jaoks. 2008. aastast kehtib Eestis põhimõte, et enam ei öelda regulatsioonides ehitajale ette konkreetseid tehnilisi lahendusi, mida ta peab kasutama, vaid antakse ette energiatõhususarvu ehk summaarse kaalutud energiakasutuse piirväärtus ning kõik otsused ja valikud, kuidas seda saavutada, jäävad ehitaja teha.

### Tark ehitus tähendab tarku materjale

Energiatõhususarvu põhine reguleerimine ja digitaalsed kaksikud ongi viinud selleni, et kinnisvaraarendajad püüavad liigseid kilovatt-tunde „maha lõigata“ võimalikult väikese rahalise kuluga – euro on siin parim konsultant. Eesti riik on suhtunud tõsiselt kuluoptimaalsete energiatarbimise nõuete ehk energiatarbimisele piisavalt mada- late piirväärtuste kehtestamisse, mille tõttu Eestis ehitatakse praegu juba väiksema energiakuluga hooned kui näiteks Soomes ja Rootsis.

Modelleerimisega paralleelselt tegelesid teised töörühmad ehitusmaterjalide arendamisega. Tartu Ülikooli poolt osalesid tippkeskuse töös näiteks füüsikud professor Martin Timuski juhtimisel. Nad tegelesid nutikate akendega, mille puhul oleks võima-



## Smart building means smart materials

Such performance-based regulation and digital twins have led to real estate developers trying to “cut off” excessive kilowatt hours at as low costs as possible – the euro is the best consultant here. As the government of Estonia has taken seriously the establishment of cost-effective energy efficiency requirements resulting in very low limit values for energy performance values, new buildings are already more energy-efficient in Estonia than e.g. in Finland and Sweden.

## The competitiveness of wood construction has improved and wood is already being used more to build large buildings, from school buildings to various public buildings.

Puitehituse konkurentsivõime on nüüdseks paranenud ja puust ehitatakse juba igasuguseid hooneid, koolimajadest avalike hooneteni.

In parallel with modelling, other research groups worked on developing building materials. On the part of the University of Tartu, the Centre of Excellence included e.g. physicists headed by Professor Martin Timusk. They worked on smart windows whose transmittance to visible light could be controlled, thereby reducing the chance of rooms being overheated.

The Research Group on Natural Building Materials of the Estonian University of Life Sciences studied the possibilities for using

lik muuta aknaklaaside nähtava valguse läbivust ja vähendada seeläbi tubade ülekuumenemise võimalust.

Maaülikooli looduslike ehitusvahendite töörühmas uuriti samal ajal looduslike soojusmaterjalide, näiteks põhu, saepuru ja pilliroo kasutusvõimalusi liginullenergiahoonetes. Võrreldes tänapäevaste villmaterjalide ja vahtplastidega on nende kättesaadavus ja hind küll paremad, kuid sama efekti saamiseks peaks soojustuskiht olema kuni kaks korda paksem. Kui need probleemid lahendada, võimaldaksid looduslikud ehitusmaterjalid aga oluliselt vähendada ehitamise keskkonnajalajälge.

TTÜ insenerid töötasid puitehituse kallal. Kuigi puit on kohalik ja keskkonnasõbralik materjal, on see viimase poolsajandi jooksul olnud soosingust väljas. Probleeme on nähtud nii tule- ja niiskuskindluses kui ka hinnas. Tippkeskuse jooksul tehtud töö tulemusena on puitehituse konkurentsivõime nüüdseks paranenud ja puust ehitatakse juba igasuguseid hooneid, koolimajadest avalike hooneteni.

Üks valdkond, kus liginullenergiahoonetega seotud teadustegevus tegi tippkeskuse

natural insulation materials such as straw, sawdust and reed in near-zero energy buildings. Although these materials are more widely available and cheaper than modern wool materials and plastic foams, the insulation layer would need to be twice as thick to achieve the same effect. However, if these problems could be solved, natural building materials would allow significant reduction in the carbon footprint of building.

The engineers of TalTech worked on wood construction. Although wood is a local and environmentally friendly material, it has been out of favour for larger buildings during the last half century. Both its moisture and fire resistance and the price have been seen as problematic. As a result of the work done under the Centre of Excellence, the competitiveness of wood construction has improved and wood is already being used more to build large buildings, from school buildings to various public buildings.

One area where research related to near-zero energy buildings took a great leap forward during the period of the Centre of Excellence is ventilation. In fact, an entirely new area of research emerged in ventilation studies because the breakout of the COVID-19 pandemic in early 2020 added a new focus: the “pandemic-proofness” vs. lockdown of non-residential buildings.

While the transmission mechanism of the disease was unclear at the beginning of the pandemic, the World Health Organization soon came to the conclusion that COVID-19 is a droplet infection whose spread has to be controlled by washing hands and disinfecting surfaces. By now we know that this is not true. A breakthrough was achieved when 36 top researchers published a paper proving evidence that the virus is transmitted by airborne exhaled small particles, aerosols.

perioodi jooksul suure arenguhüppe, on ventilatsioon. Õigupoolest tekkis ventilatsiooniuuringutesse täiesti uus suund, kuna 2020. aasta alguses lahvatanud koroonapandeemia tõi teiste teemade kõrval fookusesse hoonete pandeemiakindluse.

Kui pandeemia alguses oli ebaselge, kuidas haigus levib, siis õige pea jõudis Maailma Terviseorganisatsioon seisukohale, et tegu on piisknakkusega, mille leviku piiramiseks tuleb pesta käsi ja desinfitseerida pindu. Praeguseks teame, et see arusaam oli ekslik. Murrangu tõi 36 tippteadlase avaldatud artikkel, kus tõestati, et haigus levib siiski õhus hõljuvate osakeste ehk aerosoolidena.

Niinimetatud grupp 36 töös osalenud Jarek Kurnitski meenutab, et võimalikule aerosoolsele levikule viitasid juba 2003. aasta SARSi epideemia kogemused, millest oli näiteks teada, et viirus oli levinud ühe pilvelõhkujaga kümnendalt korruselt neljakümnendale, väidetavalt mööda lahtise otsaga kanalisatsioonitorustikku. Viiruse mõõtmise õhust, väljahingatavate piiskade ja aerosoolide suurusjaotuse uurimine ning muud katsed näitasid, et selle koroonaviiruse nakkus saadakse õhu kaudu.

## Ehitusteadus jõuab standarditesse

Tippkeskuse töö tulemusena sündis uus käsitlus hoonete pandeemiakindlast ventilatsioonist, milleks oli terviklik meetodika varem puudunud. 2022. aastaks jõuti ventilatsiooni projekteerimismeetodi ettepanekuni, mis võimaldab luua etteantud sündmuse nakatumiskordaja väärtusele vastava õhuvahetuse, mille puhul on oluline nii ventilatsiooni siseneva välisõhu vooluhulk kui ka õhujaotusmeetod.

Professor Jarek Kurnitski, one of the participants of the so-called “Group 36”, recalls that previous experience from the SARS epidemic of 2003 had already pointed to possible aerosol transmission. It was known, for example, that the virus had spread in a skyscraper from the 10th floor to the 40th floor, reportedly through an open-ended plumbing system. Virus measurements from the air and studies of exhaled droplets and aerosol size distribution as well as other experiments showed that the new coronavirus is transmitted through the air with aerosols.

Muu hulgas loodi ka COVID-19 ventilatsiooni kalkulaator ja Euroopa ventilatsiooni juhised, mis olid tõlgete kaudu kasutuses 13 keeles ja eri riikide dokumentides. Töö käib, et viia loodud projekteerimismeetod Euroopa standardisse EN 16798-1.

Hoonete dünaamilise energiasimulatsiooni arvutused mängivad tähtsat rolli ka tippkeskuse teises suuremas uurimissuunas, mis on seotud energiatarbimise juhtimise ja lokaalse energiatootmisega. Näiteks tegeleb professor Dmitri Vinnikovi juhitud jõuelektronika uurimisrühm alalis- ja vahel-

## Transition to renewable energy brings many changes to the building sector.

Taastuvenergiade üleminek toob ehitusse hulgaliselt muutusi.

### Building science incorporated into standards

The work of the Centre of Excellence led to a new approach to pandemic-proof ventilation systems of buildings, for which a holistic methodology had previously been absent. By 2022, researchers of the Centre developed a proposal for a infection-risk based ventilation system design method that allows for creating an ventilation and air distribution solution in accordance with the given basic reproduction number representing risk level of new disease cases, where both the rate of outdoor air flow and the air distribution method play a role.

duvvoolu kasutamise küsimusega. Paljud seadmed, näiteks kodused soojendavad soojuspumbad kasutavad alalisvoolu, kuid peavad selle saamiseks muundama keskest vooluvõrgust pärit vahelduvvoolu. Iga sellise muundamisega kaasnevad kaod. Kuna kohalikku taastuvenergiat toodetakse alalisvooluna, võib olla otstarbekas elektrisüsteem kas osaliselt või täielikult alalisvoolule üle viia.

Taastuvenergiade üleminek toob ehitusse hulgaliselt muutusi, kuna nagu viimaste aastate kogemus on näidanud, muutub aina olulisemaks hoonete energiatarbimise tark juhtimine, mis suudaks optimeerida näiteks kütet või jahutust vastavalt nii elektri

Researchers of the Centre also created a COVID-19 Ventilation Calculator and European guidelines for ventilation systems, which were in use through translations in 13 languages and in various national documents of different countries. Work is underway to incorporate the new design method into the EU standard EN 16798-1.

Calculations of dynamic energy simulation of buildings also play an important role in the other key area of research of the Centre of Excellence: management of energy consumption and local energy production. For example, the Research Group on Power Electronics led by TalTech Professor Dmitri Vinnikov works on the issue of using alternating and direct current. Many devices, for instance the heat pumps of homes, use direct current but have to convert the alternating current supplied by the central power grid. Each such conversion involves losses. Considering that local renewable energy is produced as direct current, it may be reasonable to move to the electrical system either partly or entirely based on direct current.

Transition to renewable energy brings many changes to the building sector because, as experience from recent years has shown, it is becoming increasingly important to manage the energy consumption of buildings smartly so that e.g. the heating or cooling could be optimised according to the market price of electricity and weather forecasts. Development of such so-called “flexibility services” and storage systems has been one of the strengths of the Working Group on Power Electronics.

Applications of renewable energy in buildings were also explored by the Working Group on Distributed Energy of the Estonian University of Life Sciences. They looked at how solar power, which is common in local

börsihinnale kui ka ilmaprognoosidele. Selliste niinimetatud paindlikkusteenuste ja salvestuse arendamine on olnud üks jõuelektronika uurimisrühma tugevaid külgi.

Taastuvenergiade rakendustega hoonetes tegeles ka Maaülikooli hajaenergeetika uurimisrühm. Nemat vaatlesid lokaalse taastuvelektritootmiseltavapärased päikeseelektri kombineerimist tuuleenergiaga, mis võimaldab omatoodangut ja selle kasutust oluliselt suurendada.

Praeguseks on energiatõhususe alal tehtud teadustööl juba otseselt nähtavad tulemused – kuue aastaga on uute hoonete energiatõhusus paranenud kahe energiamärgise klassi võrra ja Eesti liginull-energiahooned on kujunenud koos Taani omadega Euroopa Liidu külma kliimaga maade kõige ambitsioonikamateks.

production of renewable electricity, could be combined with wind power to allow a significant increase in self-production and the use of self-produced energy.

Research into energy efficiency has already yielded visible results – within six years, the energy efficiency of new buildings in Estonia has improved by two energy performance classes and Estonia's near-zero energy requirements have become, along with those of Denmark, the most ambitious among the cold-climate countries of the EU.

<b>Publications</b>	520	<b>Publikatsioonid</b>	520
<b>Institutions</b>	3 Tallinn University of Technology, University of Tartu, Estonian University of Life Sciences	<b>Asutusi</b>	3 Tallinna Tehnikaülikool, Tartu Ülikool, Eesti Maaülikool
<b>Scientists involved</b>	40	<b>Kaasatud teadlasi</b>	40
<b>Head of the Centre</b>	Jarek Kurnitski	<b>Tippkeskuse juht</b>	Jarek Kurnitski
<b>Lead institution of the Centre</b>	Tallinn University of Technology	<b>Tippkeskuse juhtasutus</b>	Tallinna Tehnikaülikool

The data is based on the final report of the Centre of Excellence.  
Andmed põhinevad tippkeskuse lõpparuandel.

<b>Lead / Vastutav täitja</b>	<b>Research groups</b>	<b>Uurimisrühmad</b>
Targo Kalamees	Zero Energy and Resource Efficient Smart Buildings	Nullenergiahooned ja ressursitõhusus
Dmitri Vinnikov	Intelligent and Efficient Energy Management for ZEB	Arukad ja tõhusad elektrisüsteemid nullenergiahoonetele
Meelis Pohlak	Resource Efficient Wooden Structures and Composites	Ressursisäästlikud puit- ja komposiitkonstruktsioonid

The data is from the Estonian Research Information System.  
Andmed on võetud Eesti Teadusinfosüsteemist.



9

CEES –  
Centre of Excellence in  
Estonian Studies

Eesti-uuringute tippkeskus





## The Power of Words is Stronger than the Power of War

The Centre of Excellence in Estonian Studies, the only Centre of Excellence in Estonia (CEES) that carried the flag of humanities researchers, was launched with the aim of bringing together researchers from different institutions to conduct joint studies and work together to create new tools for analysing cultural and social phenomena and processes.

Fresh academic results were needed in many fields of research related to Estonia. While the research teams of other Centres of Excellence were formed largely of already existing units of research institutions, completely new integrated and interinstitutional teams were assembled for the work of the Centre of Excellence in Estonian Studies, with researchers from different universities and institutes jointly investigating various

## Sõna vägi on tugevam kui sõja vägi

Tippkeskustest ainsana humanitaaride lippu kandnud Eesti-uuringute tippkeskuse käivitamise eesmärk oli kokku tuua eri uurimisasutuste teadlased, et viia läbi ühiseid uuringuid ning luua koostöö uusi tööriistu kultuuriliste ja ühiskondlike nähtuste ja protsesside analüüsimiseks. Värskeid akadeemilisi tulemusi oli vaja paljudes Eestiga seotud valdkondades.

Kui teistes tippkeskustes moodustusid uurimisrühmad suuresti juba olemasolevatest teadusasutuste üksustest, siis Eesti-uuringute tippkeskuse tööks loodi täiesti uued integreeritud ja asutusteülesed rühmad, kus eri ülikoolide ja instituutide teadlased lahkasid koos erinevaid nähtusi. Haaratud oli enamik humanitaaria distsipliine ja tulemused joonistavad nüansirohke kultuurilise kuvandi.

phenomena. Most of the disciplines of the humanities were included and the outcomes draw a nuanced cultural image.

“The idea was to create an integrated community for fundamental research involving strong researchers from different institutions and to generate synergy between them. Although interdisciplinarity is widely favoured today, interinstitutional collaboration has not been very widespread,” says Mare Kõiva, Leading Researcher at the Estonian Literary Museum and Head of the Centre of Excellence.

For example, the Research Team for Textual Culture and Literary Studies was led by the University of Tartu but also included researchers from Tallinn University and the Estonian Literary Museum. All research teams of CEES were interinstitutional, with some researchers contributing to the work of several teams. The same applied to the 16 international conferences organised as part of the Centre of Excellence, where a number of new topics were initiated (for instance, linguists called on monitoring variation and working on subjectivity and intersubjectivity), and e.g. the interactions between culture and nature were looked at from the perspective of different fields of humanities.

For the entire period of the Centre of Excellence, its work was centred on five partly overlapping fields of research: 1) fundamental research into the Estonian language and culture, 2) research into Estonian diasporas and ethnic groups in Estonia, 3) research into the adoption of global cultural phenomena, 4) documentation of and finding models for contemporary cultural phenomena, including transmediality, and 5) development of new digital methodological models and solutions.

„Idee oli luua integreeritud ja omavahelist sünergia pakkuv süvauuringutega tegelev koostöö, milles osaleksid tugevad teadlased eri asutustest. Kuigi interdistsiplinaarsus on tänapäeval soositud, ei ole asutusteülene koostöö kuigi levinud,” tõdes tippkeskuse juht, Eesti Kirjandusmuuseumi juhtivteadur Mare Kõiva.

Näiteks kirjakultuuri ja kirjandusuuringute tööühma juhtis Tartu Ülikool, kuid selles osalesid ka Tallinna Ülikooli ja Eesti Kirjandusmuuseumi teadlased. Asutusteülesed olid kõik uurimisrühmad, kusjuures osa teadlasi panustas mitme rühma töösse. Sama kehtis tippkeskuse raames korraldatud 16 rahvusvahelise konverentsi kohta, kus algatati mitmeid uusi teemasid (näiteks kutsusid keeleteadlased jälgima varieerumist ning tegelema subjektiivsuse ja intersubjektiivsusega) ning vaadeldi näiteks kultuuri ja looduse vastastikmõjusid eri humanitaarvaldkondade perspektiivist.

Terve tegutsemisaja jooksul oli tippkeskuse teadustegevuse keskmeks viis osaliselt kattuvat valdkonda: 1) eesti keele ja kultuuri alusuuringud, 2) diasporaade ja Eesti etniliste rühmade uuringud, 3) üleilmsete kultuurinähtuste omaksvõtu uurimine, 4) kaasaja kultuurinähtuste, sealhulgas transmediaalsuse dokumenteerimine ja sellele mudelite leidmine ning 5) uute digipõhiste metodoloogiliste mudelite ja lahenduste väljatöötamine.

### Digihumanitaaria näitab musklit

Eraldi tähtsustati humanitaariale vajalike uute töövahendite arendamist IT- ja muude tehniliste rakenduste loomise kaudu. Tippkeskuse ühe enim rakendust leidnud edusammuna toob Kõiva välja keele- ja kõnetuvastuse arendused, mis võimaldavad intervjuusid ja muid salvestisi kiiresti läbi

## Digital humanities flexes its muscles

Special attention was paid to developing new tools for humanities by creating IT and other technological applications. Among the achievements of the Centre of Excellence that have found the most application, Kõiva points out the language and speech recognition tools allowing fast processing of interviews and other recordings. The speech recognition applications developed at TalTech, at the Institute of the Estonian Language and at the University of Tartu are now used in Riigikogu, in radio and TV production and in medicine.

Technical developments have long been a trend among musicologists and linguists but have now significantly expanded also into other fields, which has led to remarkable improvement of the analysis capability there. One example is the comparison of textual motifs in the large runic song corpora of Finland and Estonia. Experiments show that a computer is able to determine motifs and find linkages between them significantly faster than human researchers, making the song landscape much easier to research.

“Even just the time saving for researchers is huge. A researcher can work with substantive generalisations and see whether the motifs work the same way in Finland or to what extent they overlap with e.g. the Germanic tradition, etc. I am not saying that this is a miracle tool but the change is comparable to when printing technology replaced the hand-copying of manuscripts in monasteries,” Kõiva explained the significance of the change.

Digital solutions are helpful also in literary studies, for example in mythological and folktales research or humour studies, where

töötada. Tallinna Tehnikaülikoolis, Eesti Keele Instituudis ja Tartu Ülikoolis välja töötatud kõnetuvastuse rakendused on nüüdseks kasutusel Riigikogus, raadios, teles ja meditsiinis.

Tehnilised arendused on kaua aega olnud muusika-uurijate ja keeleteadlaste suundumus, nüüd on need oluliselt laienenud ka teistesse valdkondadesse ning toonud seal kaasa analüüsivõimekuse märkimisväärse kasvu. Üks näide on Soome ja Eesti suurte regilaulukorpuste tekstimotiivide võrdlemine. Katsetused näitavad, et arvuti suudab määrata motiive ja leida nende vahel seoseid oluliselt kiiremini kui inimene ning laulumaastik on seeläbi palju paremini uuritav.

„Juba teadlase ajavõit on tänu neile IT-arendustele tohutu. Teadlane saab töötada sisuliste üldistustega ja vaadata, kas motiivid töötavad Soomes samamoodi või kui suur on haakuvus näiteks germaani traditsiooniga jne. Ma ei taha öelda, et see on imevahend, aga muutus on võrreldav sellega, kui käsikirjade ümberkirjutamine kloostrites asendus trükitehnikaga,“ kirjeldas Kõiva selle muutuse olulisust.

Samamoodi on digilahendused abiks kirjandusteaduses, näiteks mütoloogia ja rahvajuttude uurimisel ning ka huumori-uuringutes, kus tuleb suurte andmehulkade põhjal luua tüpoloogiad, kaardistada motiive või luua suuremaid üldistusi. Varem tähendas see pikki mahukaid eeltöid ja statistika loomine oli pikaldane. Uued abivahendid teevad selle töö ära sekunditega. Sedalaadi töövahenditega on modelleeritud nii rahvusliku mõtteloo muutumist ajas kui ka veebikommunikatsiooni.

Eestlaste kui rahva loomu kohta ütlevad nii mõndagi suhtlusmuustrite uuringud, mille käigus tippkeskuse Tehnikaülikooli-

one also has to create typologies, map motifs or make broader generalisations on the basis of large volumes of data. This used to mean long and extensive preparations and the creation of statistics was time-consuming. The new tools do the job in seconds. Such tools have been used to model e.g. web communication and temporal changes in the national intellectual history.

poolsed partnerid salvestasid koosolekuid ja eri vanuserühmade kõnet, mis võimaldas määrata keeleteadlaste soolisi ja vanuselisi erinevusi. Järeldus – võrreldes teiste rahvastega on eestlased mitteformaalsema dialoogikultuuriga, ehk teisisõnu, räägitakse korraka, segatakse üksteisele vahele ja vestlejate vahel on hierarhilised seosed pigem nõrgad.

**Even just the time saving for researchers is huge. The change is comparable to when printing technology replaced the hand-copying of manuscripts in monasteries.**

**Juba teadlase ajavõit on tänu IT-arendustele tohutu. Muutus on võrreldav sellega, kui käsikirjade ümberkirjutamine kloostrites asendus trükitehnikaga.**

**Mare Kõiva**

Telling details about the character of Estonians as a nation were revealed by studies of communication patterns, in which the Centre of Excellence's partners from TalTech recorded meetings and the speech of different age groups, which allowed researchers to identify gender and age differences in the use of language. They concluded that Estonians have a more informal dialogue culture as compared to other nations, that is, they tend to overlap and interrupt in conversation and the hierarchical relationships between individuals engaged in conversation are rather weak.

The choice of topics at the Centre of Excellence was guided by the need to introduce new areas of research that have been less represented in Estonia but for which a need exists in society, such as narrative studies,

Teemade valikul lähtuti vajadusest tuua „lavale“ uusi uurimissuundi, mis on Eestis seni vähem esindatud, aga mille järele on ühiskonnas vajadus olemas, nagu narratiiviuuringud, kompleksed tänapäeva-uuringud ja soouuringud. Soouuringute töörühma tegevusega õnnestus see paljude uuenduste tagajärjel killustunud valdkond korrastada.

## Uued reeglid ja korpused

Uue hingamise sai biograafika, mis tõi fookusesse tavaliste inimeste autobiograafilised tekstid – päevikud, kirjad, autobiograafiad – ja omas ajas olulised loojad, kes ei ole ühel või teisel põhjusel saanud piisavalt mitmekülgset tähelepanu või kriitilist analüütikat, nagu näiteks Ilmar

complex studies of the contemporary era and gender studies. The Research Team on Gender Studies was able to bring order to the area of gender studies, which had formerly been fragmented due to many innovations and changes.

## New rules and corpora

A new impetus was given to biographical research, bringing into focus ordinary people's autobiographical texts – diaries, letters, autobiographies – as well as creators who were significant in their time but have not received diverse enough attention or critical analysis, such as Ilmar Laaban, Artur Alliksaar and Uku Masing but also such groundbreaking creators as Jaan Kaplinski and Paul-Eerik Rummo, who are widely known and recognised but whose works are yet to be complexly analysed.

Kõiva is also pleased with the Centre's collaboration with philosophers, who formulated the ethical standards for researchers, and with the inclusion of a new generation of researchers in humanities research – a total of 81 PhD theses were defended and 13 doctoral schools held during the period of the Centre of Excellence.

Researchers at the Centre of Excellence also actively researched modern religion and worldview, looking e.g. at how the widespread trope of Estonians as a forest people is manifested in past and contemporary sources and how this (self)image has been formed. They studied local religious practices and complemented narrative sources with the introduction of additional types of material sources, which make research into religion and worldview more nuanced and multi-layered.

Laaban, Artur Alliksaar ja Uku Masing, aga ka sellised murrangulised loojad nagu Jaan Kaplinski ja Paul-Eerik Rummo, kes on laialdaselt tuntud ja teadvustatud, kuid kelle teoste kompleksed lahkamised alles algavad.

Kõiva tõdeb, et hea meel oli töötada ka koos filosoofidega, kes sõnastasid teadlastele eetikareeglid, ning edendada noore humanitaaride põlvkonna kaasamist teadustöösse – kokku kaitsti tippkeskuse tegevusaja vältel 81 doktorikraadi ja toimus 13 doktorikooli.

Tippkeskuse raames tegeldi aktiivselt ka tänapäevase religiooni ja maailmapildi uuringutega – vaadati, kuidas avaldub väga levinud troop eestlastest kui metsarahvast mineviku ja tänapäeva allikates ning kuidas selline (enese)kuvand on kujunenud. Uuriti kohalikke usukombeid ja toodi narratiivsete allikate kõrval enam käibebe materiaalseid allikaliike, mis muudavad religiooni ja maailmavaadete uurimise nüansirikkamaks ja mitmekihilisemaks.

Tänapäeva kultuuri ja meediauuringute töörühm analüüsis varasemate kultuurinähtuste arenguid, muutumisi ja taaskasutust uudsetes kontekstides, sh osalusmeedias. Avaldati teedrajavaid artikleid intertekstuaalsusest ja globaalsete trendide kohalikust tõlgendamisest. Jälgiti huumori rolli sellistes traumaatilistes olukordades nagu pandeemiad, sõjad ja kliimakatastroofid ning tavaolukordades, näidates, et peale hakkamasaamist toetava funktsiooni on huumoril ka oluline roll diskussiooni tekitamises, avalikus arutelus ning ootamatu vaatepunkti pakkumises.

Suur osa tippkeskuse tööst põhines erinevatel loomuliku keele tekstikorpustel. Huvitavaid tulemusi andis näiteks valla-kohtute korpuse analüüs, mis näitas, et

The Research Team on Modern Culture and Media Studies analysed the developments, changes and reuse of past cultural phenomena in new contexts, including social media. Pioneering papers were published on intertextuality and local interpretation of global trends. The team also looked at the role of humour in traumatic situations such as pandemics, wars and climate disasters and in normal situations, showing that in addition to the function of helping people cope, humour also plays an important role in generating discussion, promoting public debate and offering an unexpected point of view.

**Estonians have a more informal dialogue culture as compared to other nations. They tend to overlap and interrupt in conversation and the hierarchical relationships between individuals engaged in conversation are rather weak.**

**Võrreldes teiste rahvastega on eestlased mitteformaalsema dialoogikultuuriga. Räägitakse korraka, segatakse üksteisele vahele ja vestlejate vahel on hierarhilised seosed pigem nõrgad.**

Much of the work of the Centre of Excellence was based on different text corpora of natural language. Interesting results were obtained e.g. from the analysis of the text corpus of municipal courts, which showed that – contrary to the popular perception, which is probably based on the magnum opus "Truth and Justice" by the writer Anton Hansen Tammsaare, which is one of the foundational works of Estonian literature – it was not so common in the 19th century

erinevalt levinud arusaamast, millele pani tõenäoselt aluse Tammsaare teos, ei olnud talupoegade omavaheline kohut käimine 19. sajandil kuigi tavaline.

Loodi ka uus tekstikorpused, mis sisaldab keelematerjali kolmest tänapäeva eesti keele pearegistrist – suulisest keelest, netikeelest ja trükitekstidest – ning võimaldab võrrelda paljude tekstiliikide keelekasutust ja välja tuua iga tekstiliigi erijooni. Näiteks ilmnes, et selliseid ebakindlust väljendavaid ja pehmeid vahendeid nagu pragmaatilised partiklid („vist“, „ilmselt“, „nagu“) ja verbilised markerid („arvan“, „loodan“) ei kasutata kõige rohkem suulis

suhtluses, nagu seni arvatud, vaid netisuhtluses, mille juures ei mängi kaasa silmast silma kontakt ja kõik nüansid tuleb väljendada sõnadega.

Suulises suhtluses, kus sõnaseadmisega on kiire, kasutatakse piiratud valikut partikleid. Tõesust ja objektiivsust taotlevates teadustekstides välditakse partikleid, eelistades öeldu tõenäosust hinnata hoopis modaalverbide, näiteks „võima“ abil. Põne-

for peasants to seek justice against one another in courts of law.

A new text corpus was also created, containing natural language material from three main registers of the modern Estonian language – spoken language, internet language and printed texts –, which allowed researchers to compare the language usage in different types of text and identify the specific features of each type register.

It was ascertained, for example, that devices softening the text and expressing uncertainty, such as pragmatic particles *vist* ('perhaps, probably'), *ilmselt* ('apparently') and *nagu* ('like') and verb markers like *arvan* ('I think') or *lootan* ('I hope'), are not used the most in oral communication as was previously thought but in internet communication, where eye to eye contact does not play a role and all nuances need to be expressed in words.

In oral communication, where words need to be chosen fast, people use a limited selection of particles. Particles are avoided in scientific texts, which strive for truth and objectivity and where authors prefer to assess the truthfulness of what is said using modal verbs such as *võima* ('may') instead. Exciting results were obtained from the analysis of linguistic biographies and research into small talk on their basis, and the studies confirmed the hypothesis that different groups in Estonia communicate using different referential devices.

### Monograph as a scientific medium

To solve the research questions, it was inevitable to collect new data through fieldwork, which ultimately resulted in the creation of 32 new corpora and databases

vate tulemustega kulges keeleteaduse elu- lugude analüüs ja small talk'i uurimine nende põhjal ning kinnitust leidis hüpoteesi, et Eesti eri rühmad kasutavad suhtlemisel erinevaid referentsiaalseid vahendeid.

### Monograafia kui teaduslik meedium

Uurimisküsimuste lahendamiseks oli möödapääsmatu koguda välitöödel uusi andmeid, ning lõpuks sündis tippkeskuse tegevusajal 32 uut korpust ja andmebaasi. Eriti aktuaalne on uute andmete kogumine muusika, keele ja kultuuri tänapäevase arengu uurimisel noorte seas, kuna noorema põlvkonna eripärane kõnepruuk on üks põhilisi kohti, kust jõuavad keelde muutused.

Seetõttu oli oluline luua noorte kultuuri jäädvustavad korpused. Näiteks lõi Kirjandusmuuseumi teadlased 3717 noore abiga noorte enesetaju, väärtusi ja traditsioone väljendava korpuse ning Tartu Ülikooli teadlased kogusid andmeid noorte keelekasutuse kohta, samuti kirjeldati andmepõhiselt kultuuritarbimise suundi ja inglise keele mõju tänapäeva noorte keelekasutusele.

Tippkeskuse juhtpartner Eesti Kirjandusmuuseum suunas paljude tööühmade tegemisi, kaasates ka assotsieerunud välisliikmeid Poolast, Bulgaariast, Komist, Udmurtiast, Solveeniast, Soomest ja mujalt.

Kui teistes teadusharudes on kujunenud keskseks uute teadmiste kommunikatsioonimeediumiks teadusartikkel, siis humanitaarias on endiselt oluline ka monograafia. Tippkeskusega seotud teadlased andsid selle aja jooksul välja terve hulga märgilisi teoseid. Näidetena võib nimetada Kristiina Rossi, Kai Tafenau ja Aivar Põldvere

during the period of the Centre of Excellence. Collecting new data is particularly topical in research into the contemporary development of music, language and culture among young people because the specific lingo of the younger generation is one of the main sources of changes to a language.

raamatut „See kuningas sest auvust, põrgukonn ja armutaim. Eesti keelemõte 1632–1739“, Liina Lukase juhtimisel valminud teost „Balti kirjakeele ajalugu I. Keskused ja kandjad“, Tõnno Jonuksi „Eesti muinasusundeid“, Marina Grišakova ja Maria Poulaki monograafiat „Narrative Complexity: Cognition, Embodiment, Evolution“, Vana Kandle köiteid ning rohkeid teisi, kus

## Collecting new data is particularly topical in research into the development of music, language and culture among young people because the specific lingo of the younger generation is one of the main sources of changes to a language.

Eriti aktuaalne on uute andmete kogumine noorte seas, kuna noorema põlvkonna eripärane kõnepruuk on üks põhilisi kohti, kust jõuavad keelde muutused.

This necessitated the creation of corpora capturing youth culture. For example, researchers of the Estonian Literary Museum, helped by 3717 youngsters, created a corpus expressing the self-perception, values and traditions of the young, and researchers of the University of Tartu collected data on the language use of young people. A data-based description of trends in the cultural consumption of today's youth and the impact of the English language on their language use was also compiled.

The Estonian Literary Museum, the leading partner of the Centre of Excellence, led the activities of many research teams, also

teemaks Eesti kõnekäänud, muinasjutud, loitsud ja muu.

Digihumanitaariaedasiseksarendamiseks on tippkeskuses osalenud teadlased nüüdseks asutanud Digihumanitaaria ja Infoühiskonna Keskuse. Ühiseid jätkuprojekte on muusika ja kõne uuringute tööühmal, usundi-uurijatel, kirjandusteadlastel ja nüüdis-kultuuri uurijatel ning kindlasti jätkuvad ka varasemate partnerite koostööl põhinevad mitteformaalsed mentaalsuse vormide uuringud. Paljud korpused ootavad arendamist, innovatsioonid edasist juurutamist ja väärt mõtled arendamist.



involving associated foreign members from Poland, Bulgaria, Komi, Udmurtia, Slovenia, Finland and elsewhere.

While academic papers have become the key medium for communicating new knowledge in other disciplines, monographs remain important in humanities. Researchers involved in the Centre of Excellence published a number of landmark works during this period. Examples include the monograph entitled *See kuningas sest auvust, põrgukonn ja armutaim. Eesti keele mõte 1632–1739* ('The King from the Hole, the Hell Frog and the Love Plant. Estonian language thought 1672–1739') by Kristiina Ross, Kai Tafenau and Aivar Põldvere; the overview *Balti kirjakeele ajalugu I. Keskused ja kandjad* ('History of Literary Language in the Baltics. Centres and Carriers') by Liina Lukas (leading author) and others; *Eesti muinasusundid* ('Prehistoric Religions in Estonia') by Tõnno Jonuks; *Narrative Complexity: Cognition, Embodiment, Evolution* by Marina Grišakova and Maria Poulak; issues of *Vana Kannel* (a series of scholarly publications of Estonian runic songs); and many others, dealing with locutions, fairy tales, charms, etc.

To further develop digital humanities research, researchers who participated in the Centre of Excellence have by now founded the Centre for Digital Humanities and Information Society. Joint follow-up projects are being carried out in music and speech studies, religious studies, literary studies and studies of contemporary culture, and informal joint research by former partners into the forms of mentality will certainly also continue. Many corpora are yet to be developed, innovations further introduced and valuable ideas expanded upon.

<b>Publications</b>	675	<b>Publikatsioone</b>	675
<b>Institutions</b>	5 Estonian Literary Museum, University of Tartu, Tallinn University of Technology, Institute of the Estonian Language, Tallinn University	<b>Asutusi</b>	5 Eesti Kirjandusmuuseum, Tartu Ülikool, Tallinna Tehnikaülikool, Eesti Keele Instituut, Tallinna Ülikool
<b>Scientists involved</b>	198	<b>Kaasatud teadlasi</b>	198
<b>Head of the Centre</b>	Mare Kõiva	<b>Tippkeskuse juht</b>	Mare Kõiva
<b>Lead institution of the Centre</b>	Estonian Literary Museum	<b>Tippkeskuse juhtasutus</b>	Eesti Kirjandusmuuseum

The data is based on the final report of the Centre of Excellence. Andmed põhinevad tippkeskuse lõpparuandel.

Leads / Vastutavad täitjad	Research groups	Uurimisrühmad
Epp Annus, Kristiina Ross, Mari Sarv	Historical Expression and Cultural Practices	Kõnestiilid, lauseprosoodia, ajaloolised väljendus- ja kultuuripraktikad
Irina Belobrovtseva, Maarja Hollo	Life Writing Studies	Biograafika
Liina Lindström, Einar Meister, Mari Sarv	Digital Humanities and Linguistic Technologies	Digitaalhumanitaaria ja keeletehnoloogia
Margit Sutrop	Ethics and Philosophy of Mind and Language	Eetika, keele- ja vaimufilosoofia
Liina Lukas, Arne Merilai	Literary Studies and Textual Culture	Kirjakultuur ja kirjandusuuringud
Heiki-Jaan Kaalep, Helle Metslang	Corpus-Based Linguistic, Literary, and Folklore Studies	Korpuspõhised keele-, kirjanduse ja folklooriuuringud
Jaan Ross, Marju Raju	Speech and Music Studies	Kõne ja muusika
Leena Kurvet-Käosaar, Triinu Ojamaa	Migration and Diaspora Studies	Migratsiooni- ja diasporaa-uuringud
Marina Grišakova, Eda Kalmre	Narrative Studies	Narratiivi-uuringud
Liisi Laineste, Saša Babič	Studies of Contemporary Culture (Incl. the Media)	Nüüdiskultuuri (sh meedia) uuringud
Eve Annuk	Gender Studies	Soouuringud
Tõnno Jonuks, Mare Kõiva	Religiosity and Myth Studies	Usundi- ja müüdiuuringud

The data is from the Estonian Research Information System.  
Andmed on võetud Eesti Teadusinfosüsteemist.