

\ Söivatehnoloogiate alternatiivsed arengutrajektorid ja nende tähendus Eestile

LÖPPARUANNE

Juuli 2023



Euroopa Liit
Euroopa
Regionaalarengu Fond



Eesti
tuleviku heaks

STARTUP
ESTONIA



EAS
Enterprise Estonia

KREDEX

Analüüsi viis läbi Civitta Eesti AS. Analüüs on rahastatud Startup Estonia programmi (EU50651) raames Euroopa Regionaalarengu Fondi vahenditest. Startup Estonia programmi viib ellu EASi ja KredExi ühendasutus.

Uuringu autorid:

Kaupo Koppel (CIVITTA)

Alar Kuusik (TalTech)

Kadri Arrak (CIVITTA)

Jaan Raik (TalTech)

Allan Niidu (TalTech)

Kerttu-Liis Kõks (CIVITTA)

Petri-Jaan Lahtvee (TalTech)

Aruande valmimisele aitasid kaasa Piia-Viks Binsol, Kadri Tirs ja Vadim Konov (CIVITTA); Uku Varblane ja Tea Danilov (Arenguseire Keskus); Erik Terk (Tallinna Ülikool) ning arvukad kolleegid TalTechist.

Tellijat esindas Vaido Mikheim.

Täname kõiki intervjuueerituid eksperte nii ettevõtetest kui ka teadusasutustest: TalTech (tervisetehnoloogiate instituut, keemia ja biotehnoloogia instituut, ettevõtlusosakond), Tartu Ülikool (arvutiteaduste instituut, tehnoloogiainstituut, keemia instituut), STACC OÜ, Gelatex Technologies OÜ, TFTAK AS, Icosagen Cell Factory OÜ, Krakul OÜ, Fibenol OÜ.

Viitamine: Koppel, K., Kuusik, A., Arrak, K., Raik, J., Niidu, A., Kõks, K., Lahtvee, P. (2023). „Süvatehnoloogiate alternatiivsed arengutrajektorid ja nende tähendus Eestile“. Civitta Eesti AS.

Tiitellehe foto: Microsoft Photo Stock

Sisulehtede fotod: www.istockphoto.com

SISUKORD

PÕHISÕNUMID	4
EXECUTIVE SUMMARY	6
1. SISSEJUHATUS.....	8
1.1. Analüüsi taust ja eesmärk	8
1.2. Süvatehnoloogiate valikuprotsess.....	9
2. LIHA ALTERNATIIVNE TOOTMINE	13
3. PUIDU BIORAFINEERIMINE	20
4. RAKUTÜVEDE DIGITALISEERITUD ARENDAMINE	26
5. SARDSÜSTEEMID JA KIIBITEHNOLOOGIAD	33
6. TEHISINTELLEKT JA MASINÕPE	42
7. VESINIKTEHNOLOOGIA.....	56
8. TEHNOLOOGIATE POTENTSIAALIST PROBLEEMINI	64
8.1. Ideaal maailm	64
8.2. Väljakutsed	65
9. AVALIKU SEKTORI OTSUSTUSKOHAD.....	70
9.1. Liha alternatiivne tootmine	71
9.2. Puidu biorafineerimine.....	73
9.3. Rakutüvede digitaliseeritud arendamine	76
9.4. Tehisintellekt ja masinõpe.....	79
9.5. Sardüsteemid ja kiibitehnoloogiad	83
9.6. Vesiniktehnoloogia	89
9.7. Prioriteetsed otsustuskohad	93

PÕHISÕNUMID

1. **Uuringus analüüsiti süvitsi kuute süvatehnoloogiat või nende komplekti, mille potentsiaalne läbimurre on Eestis eeldatavalt suurima mõjuga:** liha alternatiivne tootmine, puidu biorafineerimine, rakutüvede digitaliseeritud arendamine, sardsüsteemid ja kiibitehnoloogiad, tehisintellekt ja masinõpe, vesiniktehnoloogia. Valikul arvestati nii Eesti tehnoloogiate arendamise, tootmise ja kommersialiseerimise potentsiaaliga, ent ka majandus-, sotsiaal- ning tervise-, keskkonna- ning ka julgeolekuvaldkonna mõjudega.
2. Eesti suurim süvatehnoloogiatega seotud potentsiaal avaldub enamasti teadus-arendustegevuses. Tootmine on ülisuurte kapitaliinvesteeringute tõttu realistlik enim vesiniktehnoloogia ja puidu biorafineerimise puhul ning Eesti kui süvatehnoloogiate tarbija on turuna pigem marginaalne. Kõige enam looks riigile väärtust **patenteerimise** senisest märksa ulatuslikum kasutamine, mis on senini tugevalt alarakendatud ning mille kompetentsid on liikunud ülikoolidest teadusparkidesse ning T&A tugistruktuuridesse.
3. Eesti majandus laiemalt võidab süvatehnoloogiate rakendamisel, kui teadlaste ja ettevõtete koostöös püstitatakse süstemaatiliselt **väärtusahelaid** ja määratletakse neis oma koht ning eesmärgid. Teisisõnu – T&A tegevusest peab tulema kõrgel tasemel uus teadmus ja tööstusest peavad tulema rakenduslikud vajadused, ent ka senisest suurem teadustegevuse rahastus. Suure potentsiaaliga valdkonnad koostöök on geneetika, biokeemia ja materjalitööstus, vesiniktehnoloogia, biomassi väärimine või toidutööstus.
4. Iga süvatehnoloogia **on oma olemuselt energiakulukas, mida on tehnoloogiate arendamisel ja kasutuselevõtul vaja ennetavalt teadvustada ning leevendada.** Süvatehnoloogiate laiem valdkondlik mõju on positiivne vaid siis, kui neid riske otseselt adresseerida. Näiteks vähendab tehisintellekti kasutamine keskkonnamõju vaid siis, kui ta on otseselt suunatud energiaefektiivsuse suurenemisele. Vastasel juhul on vältimatu, et arvutusvõimsuse tõusu ning mudelite treenimisega kaasnev energiakulu vaid suurendab ühiskonna üldist keskkonna jalajälge. Analoogsed väljakutsed avalduvad kõikide süvatehnoloogiatega ja mitmel juhul väljenduvad väljakutsed ka julgeoleku valdkonna riskides.
5. Ennetavat lahendamist vajav mure on süvatehnoloogiate potentsiaal **süvendada tänast ebavõrdsust** nii eraisikute, ettevõtete kui ka riikide vahel. Mitmetel juhtudel domineerivad nii tootmist kui ka uute arenduste patenteerimist üksikud oligopoolses seisundis mastaapsed globaallettevõtted. Tehnoloogiate endi turule jõudmist ennustatakse esimesena rikastes riikides, kus toote kõrge hinna tõttu on esimesed tarbijad nende riikide jõukamad kodanikud. Samuti toob tehisintellekti areng kaasa tööturu ümberjaotuse ja madalama nõutud kvalifikatsiooniga töökohtade vajaduse senisest veelgi kiirema vähenemise, millega kaasneb omakorda sissetulekute ebavõrdsuse suurenemine.
6. **Liha alternatiivsed tootmise** tehnoloogiad on uuenduslikud lähenemised valguallikate tootmisel, mis asendavad või vähendavad sõltuvust traditsioonilisest loomakasvatusest. Aruandes käsitletakse mitmeid alternatiive: kultiveeritud liha, taimedest ja seentest toodetud liha, liha mikroobsed alternatiivid sh vetikad ning putukatest toodetud liha. Tehnoloogia suurim potentsiaal on vähendada toidutootmise globaalset keskkonnamõju maa- ja veekasutuse vähenemise läbi, suurendada toidujulgeolekut ning vähendada kliimamuutuste mõju toidu tootmisele. Eestis peituvad võimalused eelkõige tehnoloogiate arendamisel ja omamisel. Tootmisvõimalused on mõnevõrra väiksemad, kuid otsustuskohaks on näiteks modulaarsete bioreaktorite tootmine. Suur potentsiaal võib olla ka mikroobsetes liha alternatiivides, kus maailmaturu konkurents on veel väike. Olenemata potentsiaalselt väga suurest mõjust rahvatervisele, on prognoositav mõju liha tarbimise muutusele Eestis ilmselt väike ja avaldub pigem pikema aja jooksul.
7. **Puidu biorafineerimise** läbimurded on seotud tooraine sortimendi laienemisega, mis aitaks kaasa toodete mitmekesisustumisele ning tagaks lähteainete varud. Lahendamist vajavad biorafineerimise saaduste kõrge hind ning masstootmisega tekkiv sobiva biotoorme nappus. Ehkki Eestis peitub

kaasaegsete tehnoloogiliste lahenduste kasutamisel suur majanduslik potentsiaal ka suurema tootmisüksuse loomisel, võib takistuseks saada tehaste rajamise sotsiaalne mõju. Sellegipoolest pakub biorafineerimine koos vesiniktehnoloogiaga Eestile võimalusi nii teadusarenduses, tootmises kui ka laiemas kommertsialiseerimises. Samal ajal on puidu biorafineerimisel oluline positiivne mõju regionaalarengu toetamisel.

8. **Rakutüvede digitaliseeritud arendamine** on horisontaalne tehnoloogia ja fundamentaalne tööriist, kus olenevalt sellest, kui laialdaselt seda rakendatakse, avaldub mõju rohkele erinevatele teaduse ja tehnoloogia valdkondadele. Valdkonna areng tõstatab siiski olulisi eetilisi, õiguslikke ja sotsiaalseid lahendamist vajavaid küsimusi, sealhulgas küsimusi ohutuse, turvalisuse ja geneetilise teabe omandiõiguse kohta. Eesti potentsiaal on investeeringute korral suur, kuid prioriteetsena tuleb lahendada patenteerimise alakasutatud võimalused. Alternatiive laiendab geenitehnoloogia, bioloogia jt oomika-erialade kõrge teaduslik tase.
9. **Sardsüsteemid- ja kiibitehnoloogiad** on ülemaailmselt plahvatuslikult kiire levikuga, võimaldades revolutsiooni tervishoius, keskkonnaseires või transpordis, ent tuues levimisel kaasa ka selged julgeolekuriskid. Globaalses kiibitootmises defineerivad turgu üksikud globaalsed suurettevõtted ning kiipidest on kiiresti saamas kogu maailma majanduse uus süda. Eesti võimalik väljund avaldub tervisetehnoloogiates ja tehnoloogiate litsentsimises, ent suur potentsiaal peitub kiibidisainis ning turvalisuse standardite väljatöötamise vedamisel ja testimisel. Tarvilik vajadus on kiibistrateegia loomine.
10. **Tehisintellekt ja masinõpe** on kõige horisontaalsema mõjuga süvatehnoloogiad, kujundades juba täna ümber või integreerudes sisuliselt iga eluvaldkonnaga. Järgmised suuremad läbimurded võivad olla seotud seletava tehisintellektiga, mõneti kaugem on energiasäästliku nn „rohelise“ tehisintellekti areng. Eesti võimalus on tehisintellekti väga kiire integreerimine e-valitsemises, poliitikakujundamises ent ka hariduses, mis võiksid kiire ning õnnestunud rakendamise korral saada riigi uueks ekspordiartiklaks.
11. **Vesiniktehnoloogia** puhul peab järgmine globaalne läbimurre tulema vesiniku tootmises, kuid tänapäeval toimub see jätkuvalt peamiselt fossiilsete kütuste toel. Erinevalt teistest süvatehnoloogiatest on Eesti potentsiaal arvestatav korraga nii teadusarenduses, tootmises kui ka tehnoloogia rakendamises. Ulatuslik majanduslik kasu võib avalduda taristu arendamisel, näiteks süvasadamate muutmisel vesinikku transportivateks, vesiniktorustiku rajamisel ja päikese- ning tuuleparkide ja nende taristute integreerimisel vesinikuga.

EXECUTIVE SUMMARY

1. The study examined six deep technologies or their combinations, the potential breakthroughs of which are expected to have the greatest impact in Estonia: alternative meat production, wood biorefining, digitalized development of cell strains, embedded systems and nanochip technologies, artificial intelligence and machine learning, and hydrogen technology. The selection took into account Estonian technology' research, manufacturing, and commercialization potential, as well as the economic, social, and health, environmental, and security implications.

2. The majority of Estonia's deep technology potential is represented in research and development activities. Production is feasible primarily for hydrogen technology and wood biorefining due to large capital requirements, and Estonia as a consumer of deep technologies is a marginal market. The greatest benefit to the country would be a considerably more extensive use of patenting, which has previously been chronically neglected and whose competencies have shifted from universities to research parks and R&D support institutions.

3. The wider Estonian economy will benefit from the application of deep technologies, if value chains are systematically established in cooperation between researchers and companies and their place and goals are defined in them. In other words, new information must come from high-level R&D activities, and applied demands must come from industry, but there must also be more money for research activities than previously. Genetics, biochemistry and the materials industry, hydrogen technology, biomass valorization, and the food business all have a great potential for collaboration.

4. Any deep technology is inherently energy-intensive, which needs to be proactively recognized and mitigated when developing and deploying technologies. The broader sectoral impact of deep technologies will only be positive if these risks are directly addressed. For example, the use of artificial intelligence reduces the environmental impact only if it is directly aimed at increasing energy efficiency. Otherwise, it is inevitable that the energy consumption associated with the increase in computing power and the training of models will only increase society's overall environmental footprint. Analogous challenges are manifested with all deep technologies, and in many cases the challenges are also expressed in risks in the field of security.

5. The potential for deep technologies to increase today's inequalities between individuals, businesses, and governments is a worry that must be addressed head on. In many cases, both production and patenting of new developments are dominated by single large-scale global companies in an oligopolistic state. The technologies themselves are expected to reach the market first in rich countries, where the initial users will be the wealthiest inhabitants of those countries due to the high price of the product. Furthermore, the advancement of artificial intelligence causes a redistribution of the labor market and an even faster decline in the demand for employment with lower necessary credentials, resulting in an increase in income disparity.

6. Alternative meat production methods are new approaches to protein production that replace or lessen reliance on traditional livestock farming. The research covers numerous alternatives, including cultured meat, meat from plants and fungus, microbial meat substitutes such as algae, and meat from insects. The technology's biggest promise is to reduce the global environmental impact of food production by reducing land and water use, increasing food security, and reducing the impact of climate change on food production. In Estonia, opportunities lie primarily in the development and ownership of technologies. The production possibilities are somewhat smaller, but one the decision point is, for example, the production of modular bioreactors. There may also be greater potential in microbial meat alternatives, where competition on the world market is still small. Regardless of the potentially very large impact on public health, the predicted impact on the change in meat consumption in Estonia is most likely small and manifests itself over a longer period of time.

7. Breakthroughs in wood biorefining are related to the growth of the spectrum of raw materials, which would contribute to product diversification of products and ensure the supply of raw materials. The high cost of biorefining products, as well as the scarcity of acceptable bio-raw materials as a result of mass manufacturing, must be addressed. Although there is significant economic potential in using current technical solutions to create a larger production unit in Estonia, the social impact of expanding factories can be an impediment. Nonetheless, biorefining along with hydrogen technology provides Estonia with potential in research and development, production, and wider commercialization. Simultaneously, wood biorefining has a significant positive impact on regional development.

8. Digitized cell line development is a horizontal technology and a vital instrument that will have an impact on many different sectors of science and technology depending on how broadly it is used. However, improvements in the subject create significant ethical, legal, and social concerns, including issues of safety, security, and genetic information ownership. Estonia has a lot of investment potential; however the neglected patenting opportunities must be addressed first. The high scientific level of genetic engineering, biology, and other omics disciplines broadens the options.

9. Embedded systems and chip technologies are rapidly spreading throughout the world, allowing a revolution in healthcare, environmental monitoring, and transportation but also posing significant security dangers and environmental footprint. A few global giants define the worldwide chip manufacturing business, and nanochips are quickly becoming the new heart of the whole global economy. The potential output of Estonia may be seen in health technologies and technology licensing, but even more it can be seen in chip design, development and testing of security standards and creation of Nanochip strategy.

10. Artificial intelligence and machine learning are the deep technologies with the most horizontal impact, altering or merging with nearly every aspect of life today. The next important discoveries may be related to explanatory artificial intelligence, whereas the development of energy-efficient so-called "green" artificial intelligence is somewhat further away. Estonia's opportunity is the rapid integration of artificial intelligence with e-governance, policy-making, and education, which, if executed quickly and successfully, may become the country's next export item.

11. In the case of hydrogen technology, the worldwide breakthrough must occur in hydrogen generation, yet it is currently mostly supported by fossil fuels. Unlike other deep technologies, Estonia has significant potential in research, development, production, and application of technology. Extensive economic gains can be realized through infrastructure development, such as converting deep ports to carry hydrogen, constructing hydrogen pipelines, and integrating solar and wind farms and associated infrastructures with hydrogen.



1. SISSEJUHATUS

1.1. ANALÜÜSI TAUST JA EESMÄRK

Teadus- ja arendustegevuse, innovatsiooni ning ettevõtluse arengukava 2021–2035 (TAIE) seab üheks visiooniks, et aastal 2035 on kõikjal Eestis rahvusvaheliselt konkurentsivõimelised tingimused suure lisandväärtusega ettevõtluseks.

Ettevõtlussektori kasvuedur on teaduspõhine arendustegevus ja innovatsioon. Viimane on omakorda tihedalt seotud süvatehnoloogiatega (ingl k „Deep Tech“) (edaspidi nimetatud ka tehnoloogia), mille arendamine võib täna veel olla väheselt teostatav, ent mis märkimisväärse intellektuaalse ja majandusliku kapitali olemasolu korral võib saada kiiresti üldkasutatavaks ning tuua kaasa suure mõjuga muutusi majanduskeskkonnas ja ühiskonnas tervikuna.

Eesti on juba praegu tuntud uute tehnoloogiliste lahenduste väljatöötajana ja kasutusele võtjana ning tugeva iduettevõtluse kasvulavana, millest oluline osa ongi keskendunud süvatehnoloogiatel põhinevale ettevõtlusele. Vaatamata mitmetele süvatehnoloogiate arengut toetavatele programmidele, konverentsidele, toetustele jms tegevustele esineb tervikuna siiski kitsaskohti, mis pidurdavad süvatehnoloogiate kiiremat arengut ja kasutusele võtmist. Sellised on näiteks vähene koostöö teadusasutuste ja ettevõtete vahel, ettevõtete väikesed investeeringud või kvalifitseeritud tööjõu puudus.

Süvatehnoloogiatel on võtmeroll mitmete majandusele ja ühiskonnale oluliste probleemide lahendamisel ning globaalselt oluliste eesmärkide saavutamisel – näiteks kiiremaks energiakriisi lahendamiseks ja rohepöörde eesmärkide saavutamiseks. Süvatehnoloogiaid saab rakendada kõikides eluvaldkondades ja majandussektorites, kusjuures üks tehnoloogia võib osutada kasulikuks mitme erineva valdkonna probleemi lahendamisel. Kuivõrd tegemist on tuleviktehnoloogiatega, siis ei pruugi me tänasel päeval hoomata ega aru saada, millist probleemi konkreetne tehnoloogia lõpuks lahendada võiks või kuidas see toimuks. Seega vajavad süvatehnoloogiad kasutaja probleemist lähtuvat lähenemist ning samaaegselt ettevõtjate, teadlaste, investorite ja riigi väga tihedat koostööd. Nii on kriitiline mõista, millised tänased

teadmised ja praktikad süvatehnoloogitest võiksid tulevikus Eesti tegevuskeskkonda kujundada ning omada suurimat positiivset mõju.

Uuringu eesmärk on selgitada süvatehnoloogiatel põhinevate tehnoloogiliste lahenduste arengutrajektoore ning hinnata, milline on süvatehnoloogia ettevõtluse arengut toetav tegevuskeskkond. Töö tulemusel tuvastatakse süvatehnoloogiate läbimurdeks tarvilikud eeldused ehk teisisõnu – millised tingimused peavad olema täidetud, et süvatehnoloogia osutub läbimurdeliseks ning mis on selle kaasnevad mõjud eri valdkondades.

Projekti käigus koostati valdkondade kaupa ülevaade kõige kaasaegsematest süvatehnoloogiatest, mis võivad valdkonnas kaasa tuua murrangu. Analüüsi neid tehnoloogiaid, mille puhul on vähemalt läbi viidud kontseptsiooni katseline tõestus laboris ehk tehnoloogia valmidusaste (TRL¹) on 4 või kõrgem. Analüüsi ei hõlmatud neid tehnoloogiaid, mis on madalamatel valmidusastmetel või mille puhul on äärmiselt ebatõenäoline, et need muutuvad enne 2050. aastat turuküpseks.

Iga tehnoloogia puhul vaadati horisontaalsete teemadena mõju keskkonnale ja rohepöörde eesmärkide saavutamisele ning energiatõhususe ja elanikkonna tervise parendamisele. Süvatehnoloogiate kaardistuse koostamisel keskenduti lahendustele, mis võivad valdkondade arengus tuua olulisi pöörded ja muutuda laialt kasutatavaks. Seejärel selgitati tehnoloogiate kaupa erinevate alternatiivide rakendumise võimalikku tähendust Eesti jaoks. Ekspertide hinnangutele ja kogutud andmetele tuginedes valiti välja kuus süvatehnoloogiate kimpu, mille mõju hinnati Eesti kontekstis suurimaks ja mille rakendumiseks on Eesti enim valmis. **Viimaks koostati nende kuue tehnoloogiakimbu kohta läbimurretega seotud arengutrajektoored ehk tarvilikud tingimused tehnoloogiate rakendumiseks ning hinnati sellega kaasnevat mõju eri valdkondadele.** Antud töös käsitletud süvatehnoloogiate valikuprotsessi on lähemalt kirjeldatud järgmises alapeatükis.

Aruannet lugedes tuleb iga tehnoloogia puhul läbivalt arvesse võtta järgnevaid tõsiasju, mida aruanne ise ulatuslikult ei kajasta:

- Nii kuue valitud süvatehnoloogia valik kui nende sisene alamtehnoloogiate valik on tahes-tahtmata teatud piiril subjektiivne ning sõltub ekspertide taustast. Tehnoloogiakimpude valikul arvestati teadlikult nende mitmekesisusega, et ei jääks domineerima vaid ühe valdkonna süvatehnoloogiad.
- Kõikide süvatehnoloogiate puhul töid nii intervjueritud eksperdid ning enamasti ka relevantne akadeemiline või rakenduslik kirjandus välja valdkonna ekspertide puuduse ja ettevalmistuse, mis on süvatehnoloogiate riigisiseseks läbilöögiks praktikas seadusloome kõrval olulisim takistavam tegur.
- Kõikide analüüsitud tehnoloogiate tegelik mõju keskkonnale sõltub otseselt sellest, kas neid kasutatakse keskkonnahoiuks sihtotstarbeliselt. Süvatehnoloogiatega kaasneb tootmisel paratamatult suurenev energiakulu. Mitmetel juhtudel kaasneb tootmisel ning lõpptarbimisel ka suurel määral ohtlike jäätmete teke ja väga ulatuslik veekasutus, kus parimaks näiteks on kiibitootmine. Nii on selles aruandes toodud tehnoloogiate valik vaid esmane sissevaade, leidmaks Eestile enim tähenduslikke suuremaid süvatehnoloogiate valdkondi. Edasises tehnoloogiate kitsamas käsitluses tuleb neid mõjusid juba konkreetsemalt arvesse võtta.

1.2. SÜVATEHNOLOOGIATE VALIKUPROTSESS

TEHNOLOOGIATE ESMANE VALIK

Uuringu keskmes on koostöös tellijaga valitud viis suuremat süvatehnoloogiate valdkonda: (1) energia; (2) bioressursside väärimine ja toidutehnoloogiad; (3) jäätmekäitlus ja ringlussevõtt; (4) rohepöörde seisukohalt olulised materjalitehnoloogiad; (5) arvutus- ja sidesüsteemid.

¹ https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf

Analüüsiti neid tehnoloogiaid, mille puhul on vähemalt läbi viidud kontseptsiooni katseline tõestus (TRL tase 4 või kõrgem). Lisaks arvestati esialgsete tehnoloogiate valikul järgnevate kriteeriumitega:

- Tegemist on süva- ja mitte rakendustehnoloogiaga;
- Olulisus Eesti kontekstis – vääriduspotentsiaal ehk tegemist on tehnoloogiatega, mis võiks Eestile majanduslikku tulu tuua;
- Tehnoloogia läbimurdelisus on lahtine – ei ole selge, millal toimub ja milline on edasine areng;
- Ajatelg – mis arengutasemel tehnoloogiaid hetkel on ning kas hoomatavas ajahorisondis on oodata praktilist rakendust;
- Panus energiatõhususse ja rohepöördesse.

Lähtudes valitud valdkondadest ja kriteeriumitest koostati esialgne nimekiri ligi 40st tehnoloogiast (vt Tabel 1. Esmane tehnoloogiate nimekiri). Iga tehnoloogia kohta koostati dokumendianalüüsil ning teadlaste ja ekspertidega tehtud intervjuudel² põhinevad kirjeldused, mis sisaldasid järgmist informatsiooni:

1. Tehnoloogia lühikirjeldus;
2. Millist probleemi lahendab tänastest tehnoloogiatega paremini;
3. Tehnoloogia läbimurdeliseks osutumise võimalik tähendus valdkonnale;
4. Hinnang tehnoloogia küpsusele TRL järgi;
5. Peamised globaalsed takistused tehnoloogia laiaks rakendumiseks;
6. Tehnoloogiasuunaga tegelevate tähtsamate Eesti ettevõtete (sh start-up'id) kaardistus;
7. Lühikirjeldus seosest läbivate ehk horisontaalsete teemadega, milleks valiti rohepöörde eesmärkide ja energiatõhususe saavutamise. Järgmises, tehnoloogiate kitsama valiku protsessis arvestati läbiva teemana ka mõju tervisele.

Valminud süvatehnoloogiate nimekiri ja kirjeldused esitati vahearuandena tellijale, et koostöös tellija ja ekspertidega teha kitsam valik süvatehnoloogiatega, mille läbimurdeid ja mõju eri valdkondades süvitsi analüüsida.

TABEL 1. ESMANE TEHNOLOOGIATE NIMEKIRI

VALDKOND	TEHNOLOOGIA RÜHM	SÜVATEHNOLOOGIA
Energia	Biokütused	SAF
		Lipiidid vetikatest
		Sahhariidid vetikatest
	Energia tootmine	Päikesepaneelide arendus
		Magnetite tootmine
		Tuumaenergia
		Kütuseelemendid
		Geotermaleenergia
	Salvestustehnoloogiad	Akud
		Vesiniku tootmine
Bioressursside väärimine ja toidutehnoloogiad	Toidutootmise tehnoloogiad	Kultiveeritud liha
		Mikroobsed liha alternatiivid
		Taimsed liha alternatiivid
		Putukate valk
		Rakutüvede digitaliseeritud arendamine
	Toidutootmine linnas	Seened
	Maakasutuse tehnoloogiad	Puidupõhised materjalid
		Biorafineerimine

² Tehnoloogiade kirjeldamise, valiku ja hilisema analüüsi ja trajektoore kujundamise käigus intervjueritud ekspertide nimekiri on asutuse tasemel toodud aruande alguses autorite lehel.

VALDKOND	TEHNOLOOGIA RÜHM	SÜVATEHNOLOOGIA
Jäätmekäitlus ja ringlussevõtt	Jäätmekäitlus	Jäätmematerjali biorafineerimine
		Metallide bioleostamine
		Jäätmekäitlus ühiselt biokütuste tehnoloogiaga
Rohepöörde seisukohalt olulised materjalitehnoloogiad	Rohepöördega seotud materjalid	Kihtlisandustehnoloogiad
		Iseparanevad materjalid
		Katalüsaatorid
		Pooljuhtmaterjalid
		Orgaanilised pooljuhid
Arvutus- ja sidesüsteemid	Arvutussüsteemid	Nanokiibid ja sardsüsteemid
		Tehisintellekt ja masinõpe
		Autonoomsed süsteemid
	Sensortehnika	Keskkonna sensortehnika
		Biosensortehnika
	Telekommunikatsioon	6G
	Arvutisüsteemide turvalisus	Arvutiriistvara turvalisus
		Kvantkrüptograafia
	Kvantarvutid	Kvantarvutid

Allikas: autorite koostatud

TEHNOLOOGIATE KITSAM VALIK

Tehnoloogiate nimekirja kitsendamisel toetuti Riigikantselei ja Justiitsministeeriumi loodud mõjude hindamise metoodikale³ ning Euroopa Komisjoni süsteemsele aruandele *“100 Radical Innovation Breakthroughs for the future”*.⁴ Protss tugines kombineeritud eksperthinnangutele, kus kümme eksperti Civittast ja TalTechist hindasid iga esialgses nimekirjas oleva tehnoloogia jaoks (1) mõju ulatuse ja (2) mõju tugevuse. Tehnoloogiade lõplik valik tugines nende kahe koosmõju alusel kujunenud järjestusele.

Protss ise oli järgnev:

I RAAMISTIK

1. Defineeriti kuus kategooriat, milles mõju hinnati: sotsiaalvaldkond, riigi julgeolek ja välissuhted, majandus, loodus- ja elukeskkond, regionaalareng, avaliku sektori asutuste korraldus ja tulud.
2. Iga kategooria all hinnati omakorda 3–10 alamkategooriat (näiteks sotsiaalvaldkonna kategoorias hinnati mõju tervisele, toimetulekule, töösuhetele, võrdõiguslikkusele jne). Alamkategooriate kaupa hindamisel olid omakorda abiks jah-ei küsimused mõju avaldumise kohta (näiteks toimetuleku alamkategooria all: „Kas tehnoloogia läbimurdel on mõju vaesuse määrale?“)
3. Mõju hindamiseks koostati skaala vahemikus 0 (mõju puudub) – 5 (mõju on väga suur). Mõju ulatus on suur, kui sihtrühma (inimene, ettevõtte, keskkond) senine toimimine võib muutuda märkimisväärselt võrreldes varasemaga ning eeldab sihiteadlikku kohanemist.

II HINDAMINE

4. Kõik eksperdid hindasid esialgsesse nimekirja valitud tehnoloogiaid kuue kategooria ja alamkategooriate lõikes punktidega 0 kuni 5. Hindamiseks kasutati MS Exceli tabelisse kujundatud maatriksit, kus veergudes olid valdkondade kaupa grupeeritud tehnoloogiad (samad valdkonnad ja tehnoloogiad on toodud ka Tabel 1) ning ridades kuus kategooriat, nende alamkategooriad ja hindamise abiküsimused. Iga ekspert lähtus hinnangute (ehk punktide 0 kuni 5) andmisel enda ekspertteadmistest ja varem koostatud tehnoloogiate kirjeldustest ning täitis iseseisvalt enda maatriksit.

³ https://www.just.ee/sites/www.just.ee/files/elfinder/article_files/mojude_hindamise_metoodika.pdf

⁴ https://www.researchgate.net/publication/335661904_100_Radical_Innovation_Breakthroughs_for_the_future

III TEHNOLOOGIATE JÄRJESTUS

5. Ekspertide poolt täidetud maatriksid koguti kokku ja arvutati keskmised kategooriate skoorid. Esmalt arvutati iga eksperdi alamkategooriatele antud punktide põhjal keskmine skoor igale kategooriale. Seejärel leiti ekspertide antud skooride keskmised iga tehnoloogia igale kategooriale. Selliselt moodustusi esialgsesse nimekirja valitud ca 40 tehnoloogia kohta kuue kriteeriumi lõikes keskmised koondhinnangud skaalal 0 kuni 5.
6. Kõige **ulatuslikuma mõjuga** süvatehnoloogiate leidmiseks loeti iga tehnoloogia all kokku, kui mitmes kategoorias on keskmine skoor vähemalt 2. Teisisõnu otsiti neid juhte, kus mõju ulatus on tehnoloogia rakendusel vähemalt keskmine. Tulemuseks oli iga tehnoloogia mõju ulatuse lõplik skoor (0-6).
7. Kõige **suurema mõjuga** süvatehnoloogiate leidmiseks arvutati igale tehnoloogiale kategooriate skooride keskmine. Tulemuseks on mõju suuruse lõplik skoor (0-5).
8. Eelneva tulemusel tekkis igale tehnoloogiale kaks koondskoori – mõju suuruse ja mõju ulatuse iseloomustamiseks. Järjestuses näidati kõrgemal need tehnoloogiad, kus kahe skoori koondnäitaja oli kõrgem.

Sellisel meetodil saadi lõpptulemuseks tehnoloogiate järjestus mõju ulatust ja suurust iseloomustava skoori järgi. Tulemuse põhjal tehti kitsam valik süvatehnoloogiatest, mille läbimurdeid ja mõju eri valdkondades antud töö käigus süvitsi analüüsida. Valiku tegemisel arvestati:

- Igat tehnoloogiat hindasid sõltumatult mitu eksperti. Ekspertid teineteise skoori ei näinud, v.a Civitta analüütik, kes arvutas keskmised ja koondas tulemused järjestuseks kokku.
- Eraldi vaadati juhte, kus mõnes kategoorias olid ekspertide hinnangud väga erinevad. Sellised juhud arutati ekspertrühmas hiljem läbi.

Järjestuses kõrgemale positsioneerunud tehnoloogiad olid: tehisintellekt ja masinõpe, autonoomsed süsteemid: isejuhitavad sõidukid, nanokiibid ja sardsüsteemid, biosensortehnika, kultiveeritud liha, mikroobsed liha alternatiivid, taimsed liha alternatiivid, keskkonna sensortehnika, tuumaenergia, rakutüvede digitaliseeritud arendamine, putukate valk, kvantarvutid, kvantkrüptograafia, arvutiriistvara turvalisus, biorafineerimine.

Meetodi tundlikkuse testimiseks rakendati erinevaid viise mõju ulatuse ja mõju suuruse skoori kombineerimiseks (liitmine, tasandil kauguse leidmine) ja ka erinevatele valdkondadele suuremate kaalude andmist (eelkõige testiti keskkonnamõju ning majandusmõju osatähtsuse suurendamist). Muutused toimusid valdavalt nimekirja teises pooles ja üksikud erinevused kõrgemal hinnatud tehnoloogiate järjestuses ei olnud olulised.

Edasiseks süvakäsitluseks sobivate tehnoloogiate valik tehti koos tellijaga. Selle käigus kombineeriti mitmed omavahel lähedased valdkonnad üheks tehnoloogiate kimbuks – näiteks liha alternatiivse tootmise alla koondati nii kultiveeritud liha, taimsed alternatiivid, mikroobsed alternatiivid ja seemned. Üksikud omavahel väga lähedastel seotud tehnoloogiad jäeti kõrvale. Näiteks jäeti kitsamast valikust kõrvale autonoomsed süsteemid kui sisuliselt tehisintellekti üks rakendusviis. Tellija soovil kaasati edasisse süvakäsitlusse vesiniktehnoloogia.

Lõplik tehnoloogiate valik edasiseks sügavamaks analüüsiks oli: liha alternatiivne tootmine, puidu biorafineerimine, rakutüvede digitaliseeritud arendamine, sardsüsteemid ja kiibitehnoloogiad, tehisintellekt ja masinõpe, vesiniktehnoloogia.



2. LIHA ALTERNATIIVNE TOOTMINE

TEHNOLOOGIA LÜHIKIRJELDUS

Loomse valgu asendamise katusteemat käsitletakse siin analüüsis eelkõige liha alternatiivse tootmise mõiste all. Alternatiivsed liha tootmise tehnoloogiad on uuenduslikud lähenemised valguallikate tootmisel, mis asendavad või vähendavad sõltuvust traditsioonilisest loomakasvatusest. Tehnoloogiad lahendavad keskkonna-, eetika- ja tervishoiuprobleeme, mis on seotud traditsioonilise liha tootmisega. Analüüsis käsitletakse mitmeid selliseid alternatiive: **kultiveeritud liha**, **taimedest ja seentest toodetud liha**, **liha mikroobsed alternatiivid** sh **vetikad**, **putukatest toodetud liha**.

- 1) **Kultiveeritud liha** ehk rakupõhine liha või laboriliha on lihatootmise meetod, mis põhineb tervete loomsete tüvirakkude kasvatamisel laboratoorsetel tingimustel. Liha toodetakse bioreaktorite ehk kultivaatorite kontrollitud keskkonnas toitainete rikkas söödas, mis võimaldab rakkudel kiiresti kasvada ja paljuneda. Kui rakkude kogus on piisavalt suur, eraldatakse need üksteisest ning pannakse spetsiaalsesse keskkonda, kus neid saab diferentseerida lihaakkudeks. TRL hinnang – 5.
- 2) **Mikroobne liha** on loodud mikroorganismide rakkude (nt bakterid, pärm või seenerakud) kasutamisel. Sellised mikroobid suudavad sünteesida lihasarnaseid valke, mida saab kasutada liha asemel toiduainetes. Ka mikroobse liha valmistamise protsess hõlmab tavaliselt mikroobide kasvatamist spetsiaalselt loodud bioreaktorites. TRL 5 (uudsed mikroobid) – 8 (mükoproteiinist alternatiivid).
- 3) **Taimsed lihaalternatiivid** on valmistatud taimsetest valguallikatest, nagu soja, herned, nisu, kaunviljad, kartulid ja riis. Tootmisprotsess hõlmab taimsete valkude eraldamist, töötlemist ja nende koostisosade kombineerimist, et saavutada liha sarnane tekstuur ja maitse. Taimseid valke saab töödelda ekstrusiooni (taimsed valgud segatakse õlide, maitseainete ja toiduvärvidega ning kuumutatakse), kõrgsurveprotsesside või fermenteerimise abil. Eri meetodite eesmärk on parandada valkude maitset, tekstuuri ja seeduvust. TRL hinnang – 5.
- 4) **Putukatest valmistatud alternatiivid** põhinevad putukate kasutamisel toiduvalguallikana. Tootmiseks kasvatatakse putukaid (kriketid, söödavaks mõeldud ussid, herilased ja kärbid) spetsiaalses keskkonnas. Putukad tapetakse eetilisel viisil, kuivatatakse ja jahvatatakse putukapulbriks, mida saab kasutada toiduainetööstuses. Seni on putuka valgu kätte saamiseks kasutusel ainult putukate otsene tarbimine või nende pulbriks tegemine ja olemasolevatesse toodetesse lisamine. TRL hinnang – 6-7.

Lihaasenduste globaalne turumaht kokku 2022. aastal oli hinnanguliselt 2 miljardit eurot aastas.

MILLISE TÄNASE PROBLEEMI SÜVATEHNOLOOGIA LAHENDAB?

Loomse valgu tootmine kasutab 80% kogu põllumajandusmaast, ent toodab 30% inimeste tarbitavast valgust. Loomse valgu asendamiseks on tarvis kasutusele võtta alternatiivid, mis on toiteväärtuselt samaväärsed, kuid keskkonnasõbralikumad, tervislikumad ning taskukohase hinnaga.

- **Koormus keskkonnale:** Liha kultiveerimine ja muu alternatiivne tootmine vähendab oluliselt kasvuhoonegaaside heitkoguseid ning loomakasvatusest tulenevat maa- ja veekasutust. Väheneb surve ökosüsteemidele.
- **Toidujulgeolek:** Kohalike tootmisprotsesside väljaarendamine ja toidutootmise negatiivse mõju vähendamine kliimale suurendab toidujulgeolekut.
- **Tervis:** Tehnoloogia kasutamise tulemusel toimub zoonootiliste haiguste ohu vähenemine ja tervise paranemine läbi liha ületarbimise vähenemise. Väheneb pestitsiidide, antibiootikumide ja väetiste kasutamine liha tootmises.
- **Eetilised küsimused:** Laboratoorsed, mikroobsed või taimsed alternatiivid võimaldavad vähendada loomade heaoluga seotud eetilisi probleeme.
- **Jäätmete vähendamine:** Mikroobsete valkude ja rasvade tootmine biotehnoloogilisi protsesse kasutades võimaldab väärindada tööstuslikke toidu tootmises tekkinud jääke valguallikatenä. Vähenevad pakendamisel kasutatavad jäätmed.

LÄBIMURDED JA NENDE EELDUSED

1. Tarbijate eelistuse muutumine

Tarbijate eelistuste muutumine puudutab intervjueritud valdkonna ekspertide sõnul eelkõige valmisolekut proovida kultiveeritud ja mikroobset liha ning otseseid maitse-eelistusi juba turul olevate taimsete ja putukatest tehtud alternatiivide osas.

Viimaste aastate uuringud viitavad, et ehkki Euroopa ja USA tarbijad on mõõdukalt avatud kultiveeritud liha proovimisele, siis laiem valmisolek tarbimiseks veel puudub. Nii on Euroopas valmis kultiveeritud liha maitsema 70%, ent tarbimisel vahetama 40% elanikkonnast. Tegelik valmisolek tarbida võib olla veelgi madalam küsitluses kinnitatust. Kultiveeritud liha tarbimisele on avatumad eelkõige nooremad põlvkonnad.⁵ Alternatiivselt toodetud liha puhul näevad tarbijad vähest otsest isiklikku kasu, ent avatumad ollakse tajuma üldist ühiskondlikku tulu seoses negatiivsete keskkonna mõjude ja ülemaailmse toidujulgeolekuga.⁶

Valmisolekut liha alternatiive tarbida mõjutavad üldine teadlikkus konkreetsest liha alternatiivist, toidu tajutud loomulikkus ehk tekstuur ja maitse ning toiduga seotud riskide tajumine. Nii isiklikud kui ka ühiskondlikud riskid on seotud ebakindlusega ohutuse ja tervise suhtes ning võimalike negatiivsete ühiskondlike tagajärgedega, mis on seotud põllumajanduse ja toidutraditsioonide ning maapiirkondade elatusallikate kadumisega.⁷

Horvaatia, Kreeka ja Hispaania tarbijauuringute põhjal on vähemalt kultiveeritud liha puhul kriitiline ka selle taskukohane hind⁸. Pakenditel eelistatakse mõisteid "kultiveeritud" või „kultuurliha“ sõnadele

⁵ Szejda, K., Bryant, C. J., & Urbanovich, T. (2021). US and UK Consumer Adoption of Cultivated Meat: A Segmentation Study. *Foods*, 10(5), 1050. MDPI AG.

⁶ Verbeke, W., Marcu, A., Rutsaert, P., Gaspar, R., Seibt, B., Fletcher, D., & Barnett, J. (2015). 'Would you eat cultured meat?': Consumers' reactions and attitude formation in Belgium, Portugal and the United Kingdom. *Meat science*, 102, 49-58.

⁷ Pakseresht, A., Kaliji, S. A., & Canavari, M. (2022). Review of factors affecting consumer acceptance of cultured meat. *Appetite*, 170, 105829.

⁸ Franceković, P., García-Torralba, L., Sakoulogorga, E., Vučković, T., & Perez-Cueto, F. J. (2021). How do consumers perceive cultured meat in Croatia, Greece, and Spain?. *Nutrients*, 13(4), 1284.

"rakupõhine" ja "rakukultuurne", ent veelgi olulisem on pakendil olev märgistus, mis osutab valitsuse heakskiidule.⁹

Projektis usutletud ekspertide sõnul võib Eestis kirjeldatud kartuste ja eelistuse muutumine kui ka **tegelik üleminek alternatiivsele lihale juhtuda teiste lääneriikidega võrreldes pigem aeglaselt tempos**. Eesti tarbijal on keeruline mõista alternatiivse liha tarbimisel otsest isiklikku kasu, mis tuleneb nii kultuurilisest ja ajaloolisest taustast (liha tähtsus toidutradsioonides) kui ka eelistusest ja tajutud potentsiaalselt väiksemast kasust keskkonnale. Isiklikku keskkonnajalajälge tajutakse eelkõige jäätmete sorteerimise osas. Keskkonnasäästlikemaid alternatiive tunnetatakse sagedasti pigem pealesurutuna, ent paradoksaalselt oodatakse süsteemseid muudatusi (tootja või riigi vastutus).

Eestis on liha alternatiivse tootmise tehnoloogiaga seotud TA arendus- ja taustsüsteem süsteem on kõrgel tasemel ning suurim potentsiaal peitub tehnoloogia arendamises ja omamises, mida on omakorda võimalik tootmisettevõtetele müüa. Konkurentsieelise tekkimine tootmises on väga keeruline. Kümnetesse või sadadesse miljonitesse ulatuvad investeeringud tuleks suunata bioreaktorite tootmisse. Eestis on tarbimise potentsiaal pigem marginaalne, mida mõjutab eelkõige väga väike tarbijate arv.

2. Regulatiivne heakskiit

Kultiveeritud liha kui uuendtoidu¹⁰ käsitlemiseks ja turustamiseks on vaja Euroopa Komisjoni luba. Loa saamiseks on omakorda vaja Euroopa Toiduohutusametile tõendada, et uuendtoit on ohutu, toiteväärtuslik ning samuti hinnatakse keskkonnamõju. Lubade taotlemise protsess võib potentsiaalselt kesta mitu aastat, mis seab tehnoloogiate arendamisele ja turustamisele piiranguid. Lisaks on aeganõudev erinevate riikide regulatsioonide kooskõlastamine, eriti kui toode liigub üle riigipiiride. Eestis ja Euroopa Liidus ei ole uuendtoidu luba aruande kirjutamise hetkega senini taotletud ning ka mujal maailmas on kultiveeritud liha tootmise luba suurriikidest saadud vaid Singapuris (2020) ja USAs (2022).

„On palju riske, mida me täna ei teagi. Meditsiinisektoris on sarnane tehnoloogia olnud juba 20 aastat kasutusel. Siia maani pole neid toiduks kasutatud. Mis mõju nad inimesele omavad – suur küsimärk. Iga ettevõtte on välja töötanud oma rakusöötme, mille mõju tuleks kõik läbi uurida. Sama rakusvsubstraadi kohta.“¹¹

Ekspertide sõnul võibki paljuski regulatiivsetest tingimustest tulenevalt suuremas mahus laboriliha turule esimesena jõuda pigem Lähis-Idas, Singapuris või USAs. Euroopa turg on ettevõtjale väga suurte sisenemisbarjääridega, olles ühe intervjuueeritud valdkonna ettevõtja sõnul „*maailma ebaatraktiivseim koht, kus toodet turule tuua*“. Samal ajal tunnustatakse üheselt, et loa saamine Euroopa turul tähendab tootele kindlat kvaliteedimärki ning tõstetakse esile usaldust Euroopa standardite vastu nii ettevõtjate kui ka tarbijate vaates. Viimaste jaoks on Euroopa turg selgelt turvalisim valik nii USA kui ka muu maailmaga võrreldes.

Eestis liha alternatiivsete tehnoloogiate arendamisel ja rakendamise potentsiaali hinnates tuleb arvesse võtta, et Eesti turg on ühene muu Euroopaga ja lubade saamine toimub samas tempos koos ülejäänud Euroopa Liiduga.

3. Tootmise skaleerimine

Liha alternatiivne suuremahuline tootmine on regulatsioonide kõrval enim mõjutatud skaleerimisega seonduvatest väljakutsetest. Nii on kultiveeritud liha ja mikroobsete alternatiivide puhul tarvilik kasutatavate bioreaktorite suurendamine ning optimeerimine. Selge ei ole, kas ja kuivõrd erinevad

⁹ Szejda, K., Bryant, C. J., & Urbanovich, T. (2021). US and UK Consumer Adoption of Cultivated Meat: A Segmentation Study. *Foods*, 10(5), 1050. MDPI AG.

¹⁰ Toit, mida ei ole Euroopa Liidus toiduna olulisel määral tarbitud enne 15. maid 1997. a

¹¹ Kõik aruandes esitatud tsitaadid pärinevalt projektis intervjuueeritud teadlastelt või ettevõtjatelt, kelle nimekiri on asutuse põhiselt toodud uuringu teisel leheküljel.

suurema mahu korral kasvutingimused ning efektiivsus; milline on rakkude elulemus suuremates reaktorites ning milline on kaasnev tervisemõju inimestele. Samal ajal tuleb silmas pidada kuluefektiivsust, sest juba praegu on reaktoritest kasutatavate söötmete ja kasvufaktorite kulud märkimisväärsed. Hetkel on suuremad kasutatavad bioreaktorid mahuga 20 000 liitrit, ent disainimisel on ka suurusjärgu võrra suuremad reaktorid. Võimalikuks lahenduseks on modulaarsete bioreaktorite kasutamine, mis seisneb eraldiseisvate väiksemate tootmisüksuste kasutamises, mida annab vajadusele vastavalt tootmise laiendamiseks ühendada. Modulaarsed reaktorid on siiski pigem varajases arengustaadiumis, kus lahendamist vajavad moodulsüsteemis rakukultuuri optimeerimine, toitainete manustamises ja jäätmete eemaldamisega seonduv.

Skaleerimisest on mõjutatud ka putukapõhised alternatiivid, kus proovikivi on putukate kasvatamise industrialiseerimine, mis on omakorda seotud maitseprobleemidega, tarbijate eelarvamuste ja kultuuriliste barjääridega. Suuremahuliseks kasvatamiseks on tarvilik ka temperatuuri-, niiskuse- ja muude kasvutingimuste optimeerimine, mis nõuab teadusuuringuid.

Eesti potentsiaal liha alternatiivsete tehnoloogiate skaleerimisvõimaluste juures võib avalduda eelkõige teadusuuringute vallas tehnoloogiate või tehniliste lahenduste loomisel ja patenteerimisel.

MÕJUTATUD VALDKONNAD

Keskkond ja rohepööre

Liha alternatiivse tootmise suurim efekt avaldub eelkõige tehnoloogiate väiksemas mõjus keskkonnale. Kui täna kasutab loomse valgu tootmine hinnanguliselt 80% kogu põllumajandusmaast, siis taimepõhised valguallikad on **märgatavalt väiksema maa- ja veekasutuse vajadusega**. Näiteks on hernestest valgu tootmiseks vaja vaid 1-2% ulatuses maad, võrreldes sama koguse veiseliha valgu tootmiseks vajaliku maa-alaga¹². Laiem üleminek taimepõhisele toidule võib vähendada ülemaailmset põllumajanduslikku maakasutust kuni 50% võrra¹³. Veelgi ulatuslikum on maakasutuse vähenemine kultiveeritud liha ja putukatest valmistatud alternatiivide puhul¹⁴.



Ülemaailmne keskkonnamõju vähenemine on alternatiivse lihatootmisega kaasnev suurim läbimurre. Drastiliselt vähenev maa- ja veekasutus toob kaasa kasvuhoogaaside vähenemise, väiksema pestitsiidide ja antibiootikumide kasutuse, mis aitab omakorda kaasa rahvatervise paranemisele.

Alternatiivse tootmisega otseselt seonduv ulatuslik mõju avaldub **kasvuhoonegaaside (KHG) heitekoguse vähendamises**. Traditsiooniline loomakasvatuse aitab oluliselt kaasa ülemaailmsele KHG heite vähenemisele, peamiselt mäletsejaliste soolestiku kääritamise, sõnnikukäitluse ja söödakultuuride kasvatamise ning metsade raiega seotud maakasutuse muutuste kaudu. Näiteks tekitab ühe kilogrammi putukapõhise valgu tootmine 1,3 kg CO₂-ekvivalenti, ent sama koguse valgu tootmine veiseliha 27,3 kg CO₂-ekvivalenti¹⁵. KHG vähenemise potentsiaal on veelgi suurem kultiveeritud liha tootmisel, kus täpne mõju sõltub tootmisel kasutatavatest energiaallikatest. Teisisõnu - määrav on, kui palju ning millist energiat kulub rakkude kasvuks vajalike kultiveerimistingimuste loomiseks.

Pestitsiidide kasutatakse põllukultuuride kaitsmiseks kahjurite ja haiguste eest, ent liigkasutamine võib põhjustada vee saastumist, pinnase degradeerumist, bioloogilise mitmekesisuse vähenemist ja kahju tolmeldajatele. Antibiootikumide kasutuse eesmärk loomakasvatuses on nakkuste ennetamine ning kasvu

¹² Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. Science (New York, N.Y.), 360(6392), 987–992

¹³ Jarmul, S., Dangour, A. D., Green, R., Liew, Z., Haines, A., & Scheelbeek, P. F. (2020). Climate change mitigation through dietary change: a systematic review of empirical and modelling studies on the environmental footprints and health effects of 'sustainable diets'

¹⁴ Mattick, C. S., Landis, A. E., Allenby, B. R., & Genovese, N. J. (2015). Anticipatory life cycle analysis of in vitro biomass cultivation for cultured meat production in the United States

¹⁵ Smetana, S., Mathys, A., Knoch, A., & Heinz, V. (2015). Meat alternatives: life cycle assessment of most known meat substitutes. The International Journal of Life Cycle Assessment, 20, 1254-1267.

edendamine. Nende ülemäärane kasutamine põhjustab antibiootikumidele resistentsete bakterite tekkimise, mis kujutab endast märkimisväärset ohtu rahvatervisele¹⁶. **Rakupõhine lihatootmine toimub steriilses keskkonnas, mis välistab antibiootikumide vajaduse**,¹⁷ taimsetel ja putukapõhistel lihalikudel põhinevaid alternatiive saab toota minimaalselt või üldse mitte antibiootikume kasutades.

Liha alternatiivse tootmisega on oodatav ka tootmisel ning tarbimisel tekkiv keskkonnamõju vähenemine, **võimaldades tootmisjäätmete kasutamist valguallikana**. Nii saab putukapõhises lihatootmise jäätmeid¹⁸ töödelda ja muuta kitosaaniks ehk biopolümeeriks, mida kasutatakse põllumajanduses, veepuhastuses ja biomeditsiinis¹⁹. Analoogselt saab taimepõhiste lihaalternatiivide tootmisel tekkivaid jäätmeid taaskasutada loomasöödana või kasutada väetisena, vähendades jäätmete hulka ja lisades tootmisprotsessile väärtust²⁰. Liha alternatiividega on oodatav ka säästvate ning komposteeruvate pakendilahenduste kasutuselevõtt, mille tagajärjeks on plastijäätmete koguse vähenemine.

Julgeolek

Liha tootmise alternatiivsed meetodid on tugevalt seotud ka **ülemaailmse toidujulgeoleku suurendamisega**. ÜRO Toidu- ja Põllumajandusorganisatsiooni uuringu kohaselt suureneb ülemaailmne nõudlus liha järele 2050. aastaks eeldatavasti 76%²¹. Ülemaailmne mõju on ka loomakasvatusega seotud pandeemiariski vähenemine. Enamik uusi nakkushaigusi inimestel, nagu linnugriip ja seagriip, on zoonootilise päritoluga ja neid saab seostada loomakasvatusega²². Seda sõltuvust vähendades aitavad alternatiivsed lihatootmismeetodid vähendada tulevaste pandeemiate ohtu, millel võivad olla laastavad tagajärjed ülemaailmsele toiduga kindlustatusele.

Arenenud riikides ja Eestis on toidujulgeoleku mõttes keskmes **asendusefekt**. Keskkonnanäesmärkidest lähtuvalt on traditsioonilise loomakasvatuse eesmärk maa- ja veekasvatuse vähendamine, mis toob kaasa toodetud liha koguste vähenemise. Kogunõudluse püsites on tarvilik loomse päritoluga liha asendamine samaväärsega, mida suudavadki täita alternatiivsed liha tootmise tehnoloogiad. Kariloomakasvatuse kasutusest vabanenud maad on võimalik kasutada muudel otstarvetel, näiteks metsa- või põllumaana.

Arengumaades võivad alternatiivsed lihatootmismeetodid toetada toiduga kindlustatust, mitmekesistades valguallikaid ja vähendades sõltuvust loomakasvatusest, mida sageli piiravad maa-, vee- ja muud ressursid. Kaasneb **ökosüsteemide väiksem surve** ning väheneb kliimamuutuste mõju toidutootmisele. Teisisõnu aitavad alternatiivsed valguallikad leevendada survet keskkonna- ja põllumajandusressurssidele, kus arengumaades kasvab nõudlus loomse valgu järele kiiresti²³.

Tervis

Lisaks **zoonootiliste riskide vähendamisele** ning **antibiootikumiresistentsuse probleemi leevendamisele** – mis on globaalne, kasvav ja märkimisväärne oht tervisele²⁴ – aitavad alternatiivsed lihatootmismeetodid arenenud maades kaasa paremale tervisele, kuna **väheneb loomse liha ületarbimine**. Punase ja töödeldud liha liigset tarbimist on seostatud arvukate terviseprobleemidega, sealhulgas südamehaiguste, teist tüüpi

¹⁶ Silbergeld, E. K., Graham, J., & Price, L. B. (2008). Industrial food animal production, antimicrobial resistance, and human health. *Annu. Rev. Public Health*, 29, 151-169.

¹⁷ Post, M. J. (2012). Cultured meat from stem cells: Challenges and prospects. *Meat science*, 92(3), 297-301.

¹⁸ Putukate eksoskeletid, mis sisaldavad rohkesti kitiini

¹⁹ Jayakumar, R., Prabakaran, M., & Muzzarelli, R. A. (Eds.). (2011). *Chitosan for biomaterials I* (Vol. 243). Springer.

²⁰ Schutyser, M. A. I., Pelgrom, P. J. M., Van der Goot, A. J., & Boom, R. M. (2015). Dry fractionation for sustainable production of functional legume protein concentrates. *Trends in Food Science & Technology*, 45(2), 327-335.

²¹ Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). *World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision*.

²² Jones, K. E., Patel, N. G., Levy, M. A., Storeygard, A., Balk, D., Gittleman, J. L., & Daszak, P. (2008). Global trends in emerging infectious diseases. *Nature*, 451(7181), 990-993.

²³ Ranganathan, J., Vennard, D., Waite, R., Searchinger, T., Dumas, P., & Lipinski, B. (2016). Shifting diets: Toward a sustainable food future.

²⁴ Van Boeckel, T. P., Brower, C., Gilbert, M., Grenfell, B. T., Levin, S. A., Robinson, T. P., ... & Laxminarayan, R. (2015). Global trends in antimicrobial use in food animals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(18)

diabeedi ja teatud tüüpi vähktõvega²⁵. Samuti võib punase ja töödeldud liha asendamine taimsete alternatiividega vähendada südame isheemiatõve riski²⁶.

Ületarbimise vähendamise ja üldise tervislikuma toitumisega seotud potentsiaal on relevantne ka Eestis, kui peaaegu kaks viiendikku kõigist surmadest Eestis on tingitud käitumuslikest riskiteguritest, sh 20% otseselt tasakaalustamata toitumisest. Viimastel aastatel valmistavadki üha suuremat muret ülekaalulisus ja rasvumine, kui iga viies Eesti täiskasvanu on rasvunud (KMI > 30) ning kümne aastaga on see osakaal suurenenud 10pp võrra²⁷.

Majandus

Tehnoloogiate jätkuva innovatsiooni korral on Eesti suurimad võimalused seotud eelkõige T&A arenduspotentsiaaliga, mis loob eeldused **tehnoloogiate litsentsimiseks**. Projekti käigus intervjueritud ekspertide sõnul on kohalik ettevõtluskeskkond ja TA rahastusvõimalused valdavalt eeskujulikud, tunnetatakse toetust biotehnoloogia arenduse ning ekspordivõimaluste leidmisel. Ehkki olemasolevate spetsialistide ekspertiis on tipptasemel, jääb vajaka oskusteabe hulgast, mille tõttu soovitakse selle sissetoomist välisriikidest. Ettevõtete endi sõnul saab alternatiivsetest liha tootmise tehnoloogiatest vähem tähelepanu kultiveeritud liha arendamine, samuti **tuuakse välja teadusasutuste vähest ambitsiooni ja aktiivsust tehnoloogiate patenteerimisel**, mis on tehnoloogia ekspordi aluseks. Nii mikroobsete alternatiivide kui kultiveeritud liha puhul **ei peeta realistlikuks suuremate tootmiskeskuste teket Eestis**. Potentsiaali suurendaks väga suures mahus investeringud rakubioloogiasse ning (modulaarsete) bioreaktorite tootmisse, kus vajaminevad investeringute suurusjärgud on kümnetes kuni sadades miljonites eurodes.

Sarnaselt teistele süvatehnoloogiatele, kaasneb liha alternatiivse tootmisega suurenev vajadus kõrgelt haritud tööjõu järgi. Lähima kahe kümnendi jooksul ei tähenda see põllumajandustöölise asendamist, vaid tegemist on pikemaajaliste muutustega, kus põllumeeste tegevus võib järjest enam olla loomakasvatuse asemel suunatud viljale ja taimedele. Kogu loomakasvatuse asendamine toimub ettevõtjate hinnangul omakorda oluliselt pikema ajalise perspektiivi jooksul.

ARENGUT TOETAVAD JA ARENGUST MÕJUTATUD TEHNOLOOGIAD

Tehnoloogiad, mille areng mõjutab alternatiivsete liha tootmise tehnoloogiate läbimurret:

- Tehisintellekt ja masinõpe – omavad läbivat mõju kõigile liha tootmise tehnoloogiatele, võimaldades suurte andmemahtude märgatavalt kiiremat analüüsi ning tootmisprotsesside optimeerimist.
- Rakutüvede digitaliseeritud arendamine – võimaldab sobivamate rakuliinide valimist alternatiivse liha tootmiseks. Kiirendab arendusprotsessi ning vähendab uudsete rakupõhiste lihatoodete loomiseks vajalikku aega ja kulusid. Suurendab rakkude elulemust suuremahulistes reaktorites.
- Bioreaktorite arendus – võimaldab rakupõhise liha suuremahulist tootmist madalamate kuludega. Kulutasuva tootmise jaoks on tervisemõju kontrollimise kõrval kriitiline bioreaktori tingimuste (toitainete ja hapnikuga varustamine, jäätmete eemaldamine) optimeerimine.
- Geenitehnoloogia ja sünteetiline bioloogia – sünteetiline bioloogia pakub vahendeid rakuliinide ja mikroorganismide väljatöötamiseks. Geenitehnoloogiat saab kasutada rakkude kasvu optimeerimiseks, valkude tootmise tõhustamiseks või lõpptoote maitse ja tekstuuri muutmiseks. Sünteetilist bioloogiat saab rakendada mikroobide kääritamisel põhinevate lihaalternatiivide väljatöötamisel – näiteks seente või vetikate abil toodetud alternatiivid.

²⁵ Bouvard, V., Loomis, D., Guyton, K. Z., Grosse, Y., El Ghissassi, F., Benbrahim-Tallaa, L., ... & Straif, K. (2015). Carcinogenicity of consumption of red and processed meat. *The Lancet Oncology*, 16(16), 1599-1600.

²⁶ Huang, T., Yang, B., Zheng, J., Li, G., Wahlqvist, M. L., & Li, D. (2012). Cardiovascular disease mortality and cancer incidence in vegetarians: a meta-analysis and systematic review. *Annals of nutrition and metabolism*, 60(4), 233-240.

²⁷ OECD/European Observatory on Health Systems and Policies (2021), Eesti riigi terviseprofiil 2021, State of Health in the EU, OECD Publishing, Paris/European Observatory on Health Systems and Policies, Brussels.

- Kihltisandustehnoloogiad – aitavad luua soovitud tekstuuri ja välimusega lihatooteid. Rakkude, valkude või muude koostisosade kihtide lisamise abil saab jäljendada tavapäraste lihatoodete keerukat struktuuri, mida on raske saavutada muude tootmismeetoditega.

Tehnoloogiad, mida mõjutab läbimurre alternatiivsetes liha tootmise tehnoloogiates:

- Geenitehnoloogia
- Bioreaktorite arendus valdkondade ülese perspektiiviga
- Toidu ekstrusioon (ingl. keeles *Food extrusion*)
- Vertikaalne põllumajandus (ingl. keeles *Vertical farming*)

TEHNOLOOGIASUUNAGA TEGELEVAD TÄHTSAMAD EESTI ETTEVÕTTED JA TEADUSASUTUSED:

- Gelatex Technologies OÜ – nanostruktuursetest kiududest struktuursed vormid kunstlihale
- Aktsiaselts Toidu- ja Fermentatsioonitehnoloogia Arenduskeskus (TFTAK) - bioloogiliste tootmisprotsesside optimeerimine ja toiduainete uurimine
- ÄiO Tech OÜ - mikroorganismide abil toodetud jätkusuutlikud asendused loomsetele rasvadele, palmi- ja kookosõlile
- Funki Foods OÜ – seenemütseeli valkudel põhinev kunstliha
- Mati ehk OÜ Future Food Now – seentel põhinevad lihaasendused
- Thormi ehk OÜ Vegestar – kaerast ja hernest toodetud valgurikas lihaasendus, mis sisaldab B-rühma vitamiine ja asendamatu aminosähteid
- Yook Production AS – vegan piima tootmine
- Tere AS – taimsed piimaasendustooted
- Bon Soya OÜ (Bon Vegan OÜ) – sojal põhinevad lihaasendustooted
- Peas Out OÜ – täistaimsete lihaasenduste tootmine
- TalTech – toidusüsteemide uurimisrühm jpt
- Eesti Maaülikool – toiduteaduste ja toiduainete biotehnoloogia õppetool



3. PUIDU BIORAFINEERIMINE

TEHNOLOOGIA LÜHIKIRJELDUS

Lignotselluloosilise biomassi biorafineerimise tehnoloogiad jagunevad:

- keemilisteks biorafineerimise protsessideks;
- ensümaatiliseks hüdrolyüsi tehnoloogiaks;
- pürolüüs kombineeritud gaasfermentatsiooni tehnoloogiaks;
- biomassi anaeroobse kääritamise protsessiks.

Kolm viimast on traditsioonilistest lahendustest uuemad, millel on potentsiaali edasiseks arenguks. Globaalses kontekstis ja süvatehnoloogia vaates on neist huvipakkuvaim ensümaatiline hüdrolyüs, mille arendus seostub tugevalt rakutüvede digitaalse arenduse ja masinõppega, sest ensüümide tootmiseks kasutatakse mikroorganisme.

Ensümaatiline hüdrolyüs on protsess, mis kasutab ensüüme tselluloosi, hemitselluloosi ja ligniini eraldamiseks. Lignotselluloosi süsivesikute komponentide lagundamine monomeerseteks suhkruteks, et neid hiljem biokütusteks kääritada on nüüdseks juba teise generatsiooni biorafineerimise protsess, mille põhiline saadus on suhkrud ja kõrvalsaaduseks ligniin. Suhkrutest toodetakse peamiselt etanooli ja ligniinist omakorda erinevaid kemikaale – fenoolid, tsükloalkaanid, tsüklilised alkoholid, vedelkütused, bituumen jne. Seega on biorafineerimine koos ligniini kasutamisega potentsiaalselt fossiilkütuste rafineerimistehaste asendamiseks sobilik tehnoloogia võimaldades puidumassist toota kõiki lähteaineid kaasaegsele ja ka tuleviku keemiatööstusele.²⁸

Tootegrupiti saab välja tuua järgneva loetelu materjalidest, mida on tänaseni suudetud ligniinist saada: plastifikaatoreid, sideaineid, monomeere polümeeridele, solvente, polüestereid, hüdrogeele, antioksüdante, kütuseid jne. Lisaks eelnevale saab puidust toota bioenergiat, valgupõhist sööta ja bioväetiseid. Kemikaalide tootmiseks kasutatakse vesinikuga töötlemist või termilist töötlemist katalüsaatorite manulusel. Viimast saab kasutada ka lignotselluloosse biomassi otseseks väärimiseks,

²⁸ *Energy Fuels* 2021, 35, 21, 16965–16994. [10.1021/acs.energyfuels.1c01651](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01651)

millisel juhul tselluloosi ja hemitselluloosi ensümaatilise lagundamine toimub peale ligniini eraldamist. Sellest protsessist saadakse ligniiniõli, mille edasine väärimine toimub katalüütilise vesinikutöötlemise teel.

Kolmanda generatsiooni biorafineerimine põhineb mikroorganismide kasutamisel CO₂ sidumiseks valguse toimet tootes seejuures erinevaid nn platvormkemikaale (nt lipiidid, suhkrud või valgud) keemia-, kosmeetika- ja farmaatsiatööstuse tarbeks.²⁹ Toodete nimistu erineb lignotselluloosse biomassi väärimisest, nii saadaksegi peamiselt alkohole, estreid ja lipiide. Kemikaalide eraldamisel jääb järgi valgurikas nn kook, mis leiab kasutust looma- või kalasöödana.

Lisaks lignotselluloosse biomassi väärimisele kasutatakse toormena suhkrurikkaid põllukultuure ja nende jääke. Esimesel juhul kasutatakse klassikalist mikrobioloogilist kääritamist ja peamiseks produktiks on etanool, mida saab kasutada nii toiduainetetööstuses kui ka biokütusena. Põllukultuuride jäätmete ja energiakultuuride puhul lagundatakse biomassi ensümaatiliselt ja protsess sarnaneb olulisel määral lignotselluloosse biomassi rafineerimisele põrkudes ka samadele väljakutsetele.

Biorafineerimise globaalne turumaht 2022. aastal oli 142 miljardit eurot.

MILLISE TÄNASE PROBLEEMI SÜVATEHNOLOOGIA LAHENDAB?

Täna on enamasti keemia-, kosmeetika- ja farmaatsiatööstuse toodangust naftapõhine, mis toob endaga kaasa suure süsinikdioksiidi emissiooni. Selle vältimiseks on üks suurima potentsiaaliga lahendus biorafineerimine, mille käigus kaob vajadus toota naftast kemikaale ja kõik nimetatud tööstused saaks üle viia jätkusuutlikule rajale eeldusel, et tööstuse energiavajaduse katmiseks kasutatakse taastuvatest allikatest pärit elektrit. Erinevalt naftatööstusest võimaldab biorafineerimine arendada kasulikeks toodeteks 99% toormaterjalist ning tööstusjäätgid on võimalik suunata koostootmisesse.



Puidupõhised biotooted on omadustelt suutelised asendama naftapõhised.

LÄBIMURDED JA NENDE EELDUSED

1. Eestis kasutatakse puidu rafineerimisel toorainena üksnes kaske, millest toodetakse ligniini, puidusuhkrut C₅- ja C₆ ning eritselluloosi. **Tooraine sortimendi laienemine** aitaks kaasa toodete mitmekesisumisele ning tagaks lähteaine varud. Tehnoloogia arengus ollakse hetkel nn surmaoru ületamise faasis ning läbimurre võib olla tõenäoline 5-10 aasta jooksul.
2. Läbimurde tekitaks **koostootmise³⁰ protsesside arendamine**. Suuremat tähelepanu pälvis maailmas toidujäätmete käitlemine ja väärtustamine, mis aitab kaasa jäätmevaba süsteemi väljatöötamisele. Lisaks on see vajalik kliimamuutuste, loodusvarade ja energiajulgeoleku seisukohast.

Arvestada tuleb, et hetkel ei sisalda naftatoodete hind keskkonnakulu, mistõttu on need saadaval madalama hinnaga kui biorafineerimise saadused. Seega saab lähitulevikus biorafineerimise tooteid kasutada kas segus sarnaste naftatoodetega või kõrge lisandväärtusega ja/või eksklusiivsetes toodetes. Läbimurre on tõenäoline 5-10 aasta jooksul.

3. **Puidupõhist biovesinikku** on võimalik toota taaskasutatavatest biojäätmest, biorafineerimisprotsessi jääkmaterjalist. Biokütuste füüsikalised ja keemilised omadused on paljuki sarnased olemasolevatele kütustele. Ohuallikaks võib pidada bioetanooli ja biodiisli ületootmist kui transport peaks üle minema elektri ja vesiniku kasutamisele. Eksklusiivselt sooja tootmiseks ei peaks biomassi kasutama. Läbimurre on tõenäoline lähima viie aasta jooksul.

Peamine takistus tehnoloogia läbilöögiks on tehnoloogia enda olemuslik puudulikkus. Kasutusel olev fossiilkütuste rafineerimistehas ei võimalda biorafineerimist ilma **tehnoloogia põhimõttelise**

²⁹ Liu, Z., Wang, K., Chen, Y. *et al.* Third-generation biorefineries as the means to produce fuels and chemicals from CO₂. *Nat Catal* 3, 274–288 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41929-019-0421-5>

³⁰ Erinevate kemikaalide (nt biokütus ja furfuraal) koostootmine ning termiliste protsesside korral ka jääksoojuse ära kasutamine.

ümberehitamiseta, mis on ajakulukas protsess. Samuti peavad biokütus, taastuvad kemikaalid ja muud tooted olema turunõudluse ja hinna poolest piisavalt konkurentsivõimelised – hinnaerinevused fossiilsete ja taastuvkütuste vahel ei võimalda toodangul rakendust leida. Biokütuse kontekstis peavad tal olema bensiini/diislikütuse/petrooleumi/maagaasi **keemilised omadused**, et seda saaks kasutada väljakujunenud infrastruktuuris või mootorites.

Puidu biorafineerimist vaadeldakse hetkel kui puidutööstusega komplementaarset tööstusharu, mis eeldab juba väljakujunenud puidutööstust piisava suure toorainemahuga. Nii on Saudi Araabias puidu biorafineerimine oluliselt ebatõhusam kui Brasiilias. Samuti on puidu korral potentsiaalne oht, et suurendatakse järsult metsamassiivide raiet rahuldumaks üleilmselt nõudlus biokemikaalide järele.

MÕJUTATUD VALDKONNAD

Keskkond ja rohepööre

Metsad neelavad atmosfäärist süsinikdioksiidi, talletades seda biomassi ning pinnasesse. Jätkusuutliku majandamise korral võivad metsad säilitada oma süsiniku sidumise võime, pakkudes samal ajal biorafineerimise protsesside jaoks biomassi³¹. Kasutades metsamajanduslike toimingute jääke, **aitab puitbiojäätmate rafineerimine säilitada tasakaalu kasvavate metsade süsiniku sidumise ja raiutud puittoodetest tulenevate süsiniku heitkoguste vahel**³². Nii võib puidujääkide kasutamine biojäätmate rafineerimisprotsessides takistada puidu lagunemist, mis vastasel juhul vabastaks tugevat kasvuhoonegaasi metaani. Lisaks tekib asendusefekt - kui puidupõhised biotooted, nagu biokütused, bioplastid ja biomaterjalid, asendavad fossiilseid tooteid, siis väheneb CO₂ ja muude kasvuhoonegaaside heitkogus. Näiteks võib puidu baasil toodetud etanool vähendada kasvuhoonegaaside heitkoguseid üle 60% võrreldes bensiiniga³³.

Samal ajal peab arvestama biorafineerimise enda otseste ja kaudsete heitekogustega. Biomassi muundamine biokütusteks, kemikaalideks ja materjalideks **toob töötlemisel kaasa kõrge energiatarbimise ja lenduvad heitkogused**³⁴. Heitkoguseid mõjutab kaudset ka puidu biomassi ning biotoodete transport ja levitamine, mida saab vähendada tõhusa logistika ning transpordis biokütuste kasutamise abil.

Potentsiaalseks riskiks on tehastes biomassi töötlemisel tekkivad heitveed, mis sisaldavad orgaanilisi aineid, hõljuvaid aineid, toitaineid ja tootmisprotsessis kasutatavaid kemikaale. Saasteainete eraldamist võivad aidata vähendada reovee töötlemise tehnoloogiad või veemajandusstrateegiad, nagu on suletud ringlussüsteemide kasutamine ja protsessivee taaskasutamine; proanaeroobne kääritamine ja töötlemine või membraanfiltrimine.³⁵

Seonduv väljakutse on maakasutuse ning bioloogilise mitmekesisuse säilitamine. Biorafineerimise tegelik mõju sõltub suures osas säästvast metsamajandusest. Nii võib puidujääkide kasutamine ja töötlemine aidata vältida otseseid maakasutuse muutusi (st uute metsade raiet) või minimeerida konkurentsi



Biorafineerimise mõju keskkonnale sõltub metsamajanduse säästlikkusest – kriitiline on säilitada tasakaal biomassi kasutamise ja metsa ökosüsteemi tervise vahel.

³¹ Gustavsson, Leif, et al. "Climate effects of bioenergy from forest residues in comparison to fossil energy." *Applied Energy* 138 (2015): 36-50.

³² Johansson, T., Malmer, N., Crill, P. M., Friborg, T., Åkerman, J. H., Mastepanov, M., & Christensen, T. R. (2006). Decadal vegetation changes in a northern peatland, greenhouse gas fluxes and net radiative forcing. *Global change biology*, 12(12), 2352-2369.

³³ Zanchi, G., Pena, N., & Bird, N. (2012). Is woody bioenergy carbon neutral? A comparative assessment of emissions from consumption of woody bioenergy and fossil fuel. *Gcb Bioenergy*, 4(6), 761-772.

³⁴ Cherubini, F., Bird, N. D., Cowie, A., Jungmeier, G., Schlamadinger, B., & Woess-Gallasch, S. (2009). Energy-and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources, conservation and recycling*, 53(8), 434-447.

³⁵ González-García, S., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2010). Comparative environmental performance of lignocellulosic ethanol from different feedstocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2077-2085.

maaressursside pärast teiste kasutusviisidega³⁶. Kriitiline on säilitada tasakaal biomassi kaevandamise ja metsa ökosüsteemi tervise vahel, et tagada bioloogilise mitmekesisuse ja muude ökosüsteemi teenuste säilimine. **Suur negatiivne keskkonnamõju looduslikule mitmekesisusele avaldub, kui tänasega võrreldes suurendatakse oluliselt majandusmetsade pindala.**

Julgeolek

Biokütuste tootmine puidujääkidest aitab vähendada riigi sõltuvust imporditud fossiilkütustest, **suurendades seeläbi riigi energiasõltumatust** ja vähendades sõltuvust maailma energiaturgude volatiilsusest³⁷. Lisaks võib energiaallikate mitmekesistamine suurendada riigi vastupanuvõimet tarnekatkestuste või geopoliitiliste konfliktide suhtes.

Metsaressursside säästva majandamise korral võib puidu rafineerimine toetada puiduressursside pikaajalist kättesaadavust, mis on omakorda mitmete tööstusharude jaoks hädavajalik. Loodusvarade säästva kasutamise ja majandamise tagamine on riigi julgeoleku oluline külg, kui ressursside nappus võib põhjustada konflikte ning sotsiaalseid rahutusi. Sama oluline on maandada tööstuse rajamisega tekkivaid võimalikke proteste ühiskonnas.



Puidu biorafineerimine on väga suure majandusliku kasuga ja aitab suurendada energiajulgeolekut. Suureks riskiks on keskkonnakoormus ning sotsiaalsete pingete tekkimine.

Sotsiaalse julgeolekuga on kaudselt seotud biorafineerimise tööstuse potentsiaal suurendada tööhõivet, majanduskasvu ja parandada taristut metsarikastes maapiirkondades, mis võib omakorda aidata kaasa regionaalarengule ning sotsiaalse sidususe paranemisele.³⁸ Lisaks võib biopõhise majanduse arendamine soodustada piirkondlikku ja rahvusvahelist koostööd ressursside säästva majandamise ja keskkonnakaitse valdkonnas, aidates kaasa turvalisemale ja stabiilsemale ülemaailmsele kogukonnale³⁹.

Kaaluda tuleb, et biorafineerimise tööstust saab pidada riigi elutähtsa taristu osaks, kuna see aitab kaasa energiatootmisele ning oluliste materjalide tarnimisele. Seetõttu on biorafineerimise tehaste turvalisus ja vastupidavus oluline tegur riigi julgeoleku seisukohast, **luues potentsiaalse sihtmärgi rajatiste ründeks**⁴⁰.

Tervis

Puidu biorafineerimise kasutamine biokütuste ja muude biopõhiste toodete tootmiseks võib asendusefekti korral viia fossiilsete kütuste kasutamise vähenemiseni, mis omakorda toob kaasa keskkonnas tahkete osakeste, lämmastikoksiidide ja vääveldioksiidide vähenemise⁴¹, mida seostatakse otseselt erinevate hingamisteede ja südame-veresoonkonna terviseprobleemidega⁴².

Puidupõhistel biorafineerimise protsessidel on potentsiaal toota ka biopõhiseid kemikaale, mis võivad asendada tavapärares tööstusprotsessides kasutatavaid ohtlikke kemikaale. Näiteks saab ligniini kasutada

³⁶ Lambin, E. F., & Meyfroidt, P. (2011). Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proceedings of the national academy of sciences*, 108(9), 3465-3472.

³⁷ Gnansounou, E., & Dauriat, A. (2010). Techno-economic analysis of lignocellulosic ethanol: a review. *Bioresource technology*, 101(13), 4980-4991.

³⁸ Pätäri, S., Tuppur, A., Toppinen, A., & Korhonen, J. (2016). Global sustainability megafactors in shaping the future of the European pulp and paper industry towards a bioeconomy. *Forest Policy and Economics*, 66, 38-46.

³⁹ Goh, C. S., & Gan, P. Y. (2016). A review on the global bioenergy development and the sustainability considerations. *Energy Procedia*, 100, 25-32.

⁴⁰ Kallis, G., Kiparsky, M., & Norgaard, R. (2009). Collaborative governance and adaptive management: Lessons from California's CALFED Water Program. *environmental science & policy*, 12(6), 631-643.

⁴¹ Balat, M., Balat, H., & Öz, C. (2008). Progress in bioethanol processing. *Progress in energy and combustion science*, 34(5), 551-573.

⁴² Landrigan, P. J., Fuller, R., Acosta, N. J., Adeyi, O., Arnold, R., Baldé, A. B., ... & Zhong, M. (2018). The Lancet Commission on pollution and health. *The lancet*, 391(10119), 462-512.

toorainena, et toota ohutumaid alternatiive naftapõhiste jaoks, liimidele ja muudele kemikaalidele⁴³, seehulgas uute ehitusmaterjalide⁴⁴ tootmisele, mis parandavad siseõhu kvaliteeti⁴⁵. Ligniini saadud polümeere on võimalik kasutada ka keskkonnasõbralike pinnakatete, värvide ja lakkide alusena⁴⁶. Nii avaldaks sellise tööstuse laienemine efektiivse majandamise kasutamise korral positiivset mõju rahvatervisele, aidates kaasa õhu puhtamaks muutmisele ja tervishoiukulude vähenemisele.

Potentsiaalina võib puidupõhine biorafineerimine toetada antibiootikumide biopõhiste lähteainete tootmist. Täpsemalt võivad puidupõhised biorafineerimisprotsessid muuta tselluloosist biomassi väärtuslikeks ühenditeks, mis võiksid olla alternatiivsed lähteained antibiootikumide tootmiseks, näiteks biopõhised platvormkemikaalid⁴⁷. Alternatiivsete lähteainete pakkumisega võib biorafineerimine toetada uute antimikroobsete ainete väljatöötamist, aidates seeläbi võidelda antimikroobse resistentsuse vastu ja tagada antibiootikumide ravi jätkuvat tõhusust⁴⁸. Täiendavalt on ligniinil kui puidu põhikomponendil antioksüdantsed, põletikuvastased ja antimikroobsed omadused, mis võiksid olla väärtuslikud uute ravimite või tervisetoodete väljatöötamisel⁴⁹.

Majandus

Puidupõhise biorafineerimise majanduslik mõju on seotud eelkõige vastava tehase rajamise ning töötamisega, mis toob kaasa ulatusliku majandusmõju ja töökohtade loomise nii maa- kui ka ümbritsevatesse linnapiirkondades. Mõju on suurem piirkondades, kus on rikkalikult puiduressursse. Eestis 2016. aastal kavandatud puidurafineerimistehas oleks Centari arvutuste kohaselt andnud otseselt tööd 200 inimesele. Mujale majandusse oleks lisandunud 600 - 700 Eesti keskmise palga saajat. Võttes arvesse nii otseseid, kaudseid kui indutseeritud efekte, hinnati puidurafineerimistehase ehitamisest lisanduvat töömahtu 3200 - 3800 inimtööaasta suuruseks.⁵⁰ Samas analüüsis leiti, et tehase käitamisest Eesti majanduses tekkiv täiendav lisandväärtus oleks 225 – 290 miljonit eurot aastas ehk ca 1,1-1,4% toonasest SKP-st.

Biorafineerimise protsessid tõstavad puidu biomassi lisandväärtust, sh biokütusteks, biokeemiatoodeteks ja biomaterjalideks. Mitmekesistamine aitab puidupõhistel tööstusharudel ja majandusel laiemalt muutuda vastupidavamaks turu kõikumiste suhtes, suurendades sidusust ning mitmekesistades tööstusega seotud sektoreid ja turge. Samuti võib toodete ekspordipotentsiaal aidata kaasa ringmajandusele, vähendades tööstuse keskkonnajalajälge.⁵¹

Majanduse elavnemist soodustab biokütuste (bioetanooli, biodiisel ja biogaas) tootmisvõimekus, mis omakorda võib soodustada üleminekut taastuvatele energiaallikatele. Viidatud Centari uuringu kohaselt toodaks planeeritud tehas pidevalt ja stabiilselt 25% rohkem taastuvenergiat, kui ise tarbib ja oleks 2015. aastal suurendanud taastuvenergia tootmisvõimsust 16-22% võrra. Taastuvenergiast toodetud elektri tarbimine oleks suurenenud 40 kuni 53%.

Puidupõhised biorafineerimise protsessid võivad aidata kaasa ringmajandusele, kasutades tõhusalt puiduressursse ja minimeerides jäätmeteket. See võib aidata vähendada tööstuste keskkonnajalajälge, luues

⁴³ El Mansouri, N. E., Yuan, Q., & Huang, F. (2011). Synthesis and characterization of kraft lignin-based epoxy resins. © BioResources, 2011, vol. 6, núm. 3, p. 2492-2503.

⁴⁴ Puitlaastplaat ja vineer kasutavad sageli sünteetilisi liime ja võivad eraldada lenduvaid ohtlike ühendeid.

⁴⁵ Meng, Y., Lu, J., Cheng, Y., Li, Q., & Wang, H. (2019). Lignin-based hydrogels: A review of preparation, properties, and application. International journal of biological macromolecules, 135, 1006-1019.

⁴⁶ Lora, J. H., & Glasser, W. G. (2002). Recent industrial applications of lignin: a sustainable alternative to nonrenewable materials. Journal of Polymers and the Environment, 10(1), 39-48.

⁴⁷ Weber, C., Farwick, A., Benisch, F., Brat, D., Dietz, H., Subtil, T., & Boles, E. (2010). Trends and challenges in the microbial production of lignocellulosic bioalcohol fuels. Applied microbiology and biotechnology, 87, 1303-1315.

⁴⁸ World Health Organization. (2021). Antimicrobial resistance. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/antimicrobial-resistance>

⁴⁹ Dizhbite, T., Telysheva, G., Jurkane, V., & Viesturs, U. (2004). Characterization of the radical scavenging activity of lignins—natural antioxidants. Bioresource technology, 95(3), 309-317.

⁵⁰ Eesti Rakendusuuringute Keskus Centar (2017). Puidurafineerimistehase sotsiaal-majanduslik mõju analüüs.

⁵¹ Mantau, U. (2012). Wood flows in Europe (EU27). Project report. Celle, 24.

samal ajal uusi ärivõimalusi jäätmekäitluse ja ringlussevõtu valdkonnas⁵². Ringmajanduse toodete ja teenuste ekspordipotentsiaal võib veelgi tugevdada biojäätmete töötlemise majanduslikku mõju.

Sotsiaalne mõju

Igasuguse puidurafineerimise tehase rajamisel peab Eesti kultuurilises taustas arvestama võimaliku negatiivse sotsiaalse ja kohaliku vastuseisuga ning negatiivse avaliku arvamusega. Lahendamist vajavad väljakutsed on seotud nii metsakeskkonna hävinemisega (hirmud metsade raadamise, bioloogilise mitmekesisuse vähenemise ja ökosüsteemide häirimisega); keskkonnareostusega (vee-, õhu- ja mürareostus); maakasutusega (konkurents maa ja maavarade pärast, looduskaitsealade seotus); kohalike kaasamisega (kas uued töökohad lähevad ka kohalikele, kuivõrd läbipaistvalt on kaasatud kohalik kogukond).

Sotsiaalsete küsimuste leevendamiseks on tarvis, et nii üldsus kui tööstused oleksid teadlikud ning aktsepteeriks säästvaid metsamajandustavasid. Varasemalt on leitud, et tehase rajamisse suhtuvad oluliselt soodsamalt kogukonnad, mis on juba seotud töötavate tehastega ning valdavalt eelistatakse uue tööstuse rajamist juba varem kasutuses olnud tehaste asemele⁵³. Samuti on USA mahukas uuringus leitud, et kui võrrelda üleriigilist arvamust tehasepiirkondades elavate inimeste arvamusega, tajutakse sarnaselt tööstuse positiivseid omadusi (enim hinnati tootmist säästvast ressursist ning kohaliku majandusarengut), kuid juba olemasolevate tööstuspiirkondade elanikud on taluvad rohkem võimaliku negatiivset mõju, nagu suurenenud liiklus, lõhna- või mürahäiringud ning õhu- ja veereostus⁵⁴.

ARENGUT TOETAVAD JA ARENGUST MÕJUTATUD TEHNOLOOGIAD

Tehnoloogiad, mille areng mõjutab puidu biorafineerimise tehnoloogia läbimurret:

- Biomassi konversiooniprotsess
- Katalüsaatorite täiustamine
- Sünteetiline bioloogia
- Bioinformaatika
- Tehisintellekt
- Materjalitehnoloogia

Tehnoloogiad, mida mõjutab läbimurre puidu biorafineerimise tehnoloogiates:

- Biomaterjalide tootmine, sh farmaatsia-, kosmeetika-, keemia- ja materjalitööstuses ning biokütuste valdkonnas
- Jäätmekäitluse tehnoloogiad

TEHNOLOOGIASUUNAGA TEGELEVAD TÄHTSAMAD EESTI ETTEVÕTTED JA TEADUSASUTUSED

- Fibenol OÜ – puidu ensümaatiline lagundamine
- AS Estonian Cell – Haavapuidu termomehaaniline väärindamine
- Horizon Tselluloosi ja Paberi AS – klassikalise pulpimistehase käitaja, kelle emaettevõttel on selge ülevaade globaalsest paberitootmisest, millele biorafineerimine võib tulevikus konkurentsipakkuda
- Tallinna Tehnikaülikool, Tiit Lukk – tegeleb lakkaaside uurimisega tselluloosi lagundamiseks
- Tartu Ülikool, Priit Väljamäe – tselluloosi ja kitiini ensümaatiline lagundamine
- Maaülikool, Timo Kikas – vetikatest lipiidide saamine

⁵² Mantau, U. (2012). Wood flows in Europe (EU27). Project report. Celle, 24.

⁵³ McGuire, J. B., Leahy, J. E., Marciano, J. A., Lilieholm, R. J., & Teisl, M. F. (2017). Social acceptability of establishing forest-based biorefineries in Maine, United States. *Biomass and Bioenergy*, 105, 155-163.

⁵⁴ Factors affecting public support for forest-based biorefineries: a comparison of mill towns and the general public in Maine, USA.



4. RAKUTÜVEDE DIGITALISEERITUD ARENDAMINE

TEHNOLOOGIA LÜHIKIRJELDUS

Rakutüvede digitaalne arendamine tähistab kõrge läbilaskvusega (automatiseeritud) rakkude ja ensüümide inseneerimist, kus kasutatakse sünteetilise ja süsteemide bioloogia tööriistu, et disainida ja konstrueerida parendatud või täiesti uute funktsionaalustega elavaid rakke. Selle tegevuse alla kuulub nii automatiseeritud suurandmete kogumine ja töötlemine kui ka rakkude pärilikkuse informatsiooni kandja (DNA) modifitseerimine, et muuta rakkude funktsionaalsust. Digitaliseeritud rakutüvede arendamine võimaldab salvestada ja konverteerida suurandmeid kontekstuaalseteks teadmisteks, kasutades tarkvaratehnika, arvutusbioloogia ja andmetehnika kombineeritud võimalusi.

Eeldatakse, et bioloogia digitaliseerimine ja biotehnoloogia automatiseeritud projekteerimise-ehitamise-testimise-õppimise (DBTL) tsüklid muudavad meie inimelu ja maailmamajanduse terveid sektoreid, lahendades globaalsed väljakutseid alates tervishoiust kuni biomaterjalide, toidu ja säästva energia tootmiseni. Globaalne teadus- ja arendustegevuse investeeringute hiljutine eksponentsiaalne kasv bioinseneeria ja bio-tootmise sektorites tuleneb:

- a) DNA lugemise ja kirjutamise tehnoloogiate odavnemisest,
- b) sünteetilise bioloogia edusammudest ja uute automatiseeritud genoomi redigeerimise tehnoloogiate ilmunisest,
- c) suure läbilaskevõimega fenotüübi kirjeldamise suurtest andmetest, sõel-uuringute ja keemilistest analüüsidesid mahtude kasvust,
- d) andmekaevandamise ja masinõppe ristumisest esimesega.

Üha suurem hulk biotehnoloogia ettevõtteid on saanud ajalooliselt suurimaid investeeringuid digitaliseerimisel põhinevatele biotootmisplatvormidele. Seega on ka Eestis tungiv vajadus arendada välja analoogsed ja veelgi arenenumad biotehnoloogia platvormid, et püsida ülemaailmses konkurents.

Hiljutised edusammud suure läbilaskevõimega tehnoloogiates loovad tohutul hulgal bioloogilisi andmeid eksponentsiaalse kiirusega. **See on oluliselt ületanud meie võimet genereeritud andmetest õppida ning bioloogiaalastel teadmistel on seega raske saadaolevate tohutute andmehulkadega sammu pidada.**

Digitaliseeritud platvormid integreerivad täiendavate andmete analüüsi ja ühendavad uudsed vaatlused ulatuslike bioloogilise teabe andmebaasidega. Seega peame kiirendama õppimisetappi läbi digitaliseerimise, kasutades tipptasemel informaatika lähenemisviise, et parimad automatiseerimise, analüütika ja tarkvara tööriistad saaksid sünkroonselt töötada. Sellega saame suure läbilaskevõimega DBTL-tsüklite kaudu ära kasutada massiivse kombinatoorse rakkude disainimise täieliku potentsiaali, mis võimaldab tohutult kiirendada uute efektiivsemate rakkude genereerimist. Teised bioteaduse sektorid saavad kasu digiteeritud andmete töövoogudest, mis integreerivad suurandmete analüüsitööriistu, andmekaeve ja masinõppe, tagades samal ajal korraliku annotatsiooni ja avalikkusega jagamise. Nagu AlphaFold hiljuti illustreeris, võib tehisintellekt aidata juhtida eksperimentaalset bioloogiat ja luua uusi, tööstusele sobivaid valke (nt järgmise põlvkonna ensüüme), täiendades seega käimasolevaid avastusi.



Rakutüvede digitaliseeritud disain on fundamentaalne ja horisontaalne tööriist, kus andmekaevandamine ning masinõppe ristuvad bio- ja geenitehnoloogia ning rakuinseneeria teadmiste ja andmekogudega.

„Digitaliseerimine“ võimaldab otsida tehisintellektiga mustreid, mille sees saab omakorda otsida põhjus-tagajärg seoseid.

MILLISE TÄNASE PROBLEEMI SÜVATEHNOLOOGIA LAHENDAB?

McKinsey hiljutine raport hindas, et kuni 60% maailmamajanduse füüsilisest sisendist saab toota bioloogiliste süsteemide kaudu, millel võib järgmise 20 aasta jooksul olla >4 triljoni dollari suurune majanduslik mõju⁵⁵. Et efektiivsete biotehnoloogiliste protsesside abil toota erinevaid materjale, ravimeid, kemikaale, kütuseid, toitu ja muud, vajame efektiivseid rakuvabrikuid või ensüüme – bioloogilisi katalüsaatoreid, mis konverteerivad orgaanilist materjali meile sobilikeks ühenditeks. Elusorganismide kasutamist uuritakse ka biosensoritena, aga ka andmete kui ka energia salvestamiseks.

Rakkude digitaliseeritud disain võimaldab:

- Uute bioloogiliste süsteemide disainimine - digitaalset rakukujundust saab kasutada bioloogiliste süsteemide kavandamiseks ja optimeerimiseks konkreetsete rakenduste jaoks, näiteks soovitud molekuli tootmiseks või konkreetse funktsiooni täitmiseks.
- Tõhususe suurendamine - digitaalne rakukujundus võib aidata optimeerida konstrueeritud organismide metaboolseid radu, mis võib parandada tõhusust ja vähendada jäätmeid.
- Katse-eksituse meetodite vähendamine - digitaalse elemendi disain võib vähendada katse-eksituse meetodil katsetamise vajadust, mis võib säästa aega ja ressursse.
- Prognoositavuse parandamine - digitaalse raku projekteerimine võib parandada bioloogiliste süsteemide prognoositavust, võimaldades simuleerida erinevaid stsenaariume ja tuvastada võimalikke probleeme enne süsteemi ehitamist.
- Kasvav keerukus - digitaalne rakukujundus võib aidata suurendada konstrueeritavate bioloogiliste süsteemide keerukust, võimaldades luua keerukamaid ja suurema funktsionaalsusega süsteeme.



Kogu edasise arengu võtmeks hüpoteeside püstitamine, mida on vaja nii rakenduslikul kui ka teaduslikul tasandil.

„Vastuseid on, aga küsijaid on vähe.“

Üldiselt on digitaalse raku disainil potentsiaal parandada sünteetiliste bioloogiasüsteemide tõhusust, prognoositavust ja keerukust, vähendades samal ajal vajadust katse-eksituse meetodil katsetamiseks. Sellel võib olla märkimisväärne mõju paljudele rakendustele, sealhulgas ravimite väljatöötamisele, biotootmisele ja keskkonna parandamisele.

LÄBIMURDED JA NENDE EELDUSED

- 1) **Bio-kemikaalide tootmine tööstusjääkidest** – digitaalset rakkude disaini saab kasutada metaboolsete radade tuvastamiseks mikroorganismides, mis võivad erinevaid jäätmematerjale kasulikeks kemikaalideks muuta, kuid ka optimeerida olemasolevate radade kasutamist. Näiteks selliste metaboolsete radade disainimiseks, mis muudavad lignotselluloosi sisaldava biomassi või tahkeid olmejäätmeid biokütusteks või muudeks kemikaalideks. See võib aidata lahendada jäätmekäitluse probleeme ja vähendada sõltuvust taastumatutest ressurssidest.
- 2) **Uudsete ravimite disain** – digitaliseeritud rakkude disaini saab kasutada uute ravimite väljatöötamiseks, konstrueerides rakke spetsiifiliste molekulide või valkude tootmiseks, mida saab kasutada erinevate haiguste raviks.
- 3) **Läbi sünteetilise bioloogia uudne lähenemine haiguste mehhanismidest aru saamiseks** - digitaliseeritud rakkude disaini saab kasutada haiguste mehhanismide paremaks mõistmiseks, luues bioloogiliste süsteemide lihtsustatud versioone, mida saab uurida kontrollitud keskkonnas. Siin on mõned viisid, kuidas sünteetilist bioloogiat haiguste uurimisel rakendada:
 - Raku- ja koetehnoloogia: sünteetilist bioloogiat saab kasutada haigete rakkude ja kudede omadusi jälgendavate rakkude ja kudede kujundamiseks. Seda saab kasutada haiguse progresseerumise uurimiseks ja võimalike ravimeetodite testimiseks.
 - Sünteetilise bioloogia vahendid geneetiliseks manipuleerimiseks: sünteetiline bioloogia pakub võimsaid vahendeid geneetiliseks manipuleerimiseks, nagu CRISPR-Cas9, mida saab kasutada haiguste geneetilise aluse uurimiseks. Seda saab kasutada haigustega seotud geenide tuvastamiseks ja nende geenide funktsiooni kontrollimiseks kontrollitud keskkonnas.
 - Biosensorid haiguste tuvastamiseks: sünteetilist bioloogiat saab kasutada biosensorite väljatöötamiseks, mis tuvastavad haiguse markerite olemasolu kehas. Seda saab kasutada varajaseks diagnoosimiseks ja haiguse progresseerumise jälgimiseks.
 - Ravimite avastamine ja arendamine: sünteetilist bioloogiat saab kasutada uute ravimite ja haiguste ravimeetodite väljatöötamiseks rakkude konstrueerimisel, et toota spetsiifilisi molekule või reageerida spetsiifilistele signaalidele. Seda saab kasutada uute ravimite tõhususe ja ohutuse testimiseks kontrollitud keskkonnas.
 - Haigusmehhanismide modelleerimine: sünteetilist bioloogiat saab kasutada haiguste, näiteks vähi või neurodegeneratiivsete haiguste mehhanismide modelleerimiseks. Seda saab kasutada potentsiaalsete terapeutiliste sihtmärkide tuvastamiseks ja potentsiaalsete ravimeetodite tõhususe testimiseks.

Üldiselt pakub digitaliseeritud rakkude disain võimsaid vahendeid haiguste mehhanismide uurimiseks, luues lihtsustatud bioloogilisi süsteeme, mida saab uurida kontrollitud keskkonnas. See võib aidata tuvastada uusi ravieesmärke ja töötada välja uusi ravimeetodeid paljude haiguste jaoks.

- 4) **Andmete salvestamine DNA-le** - andmete salvestamiseks DNA-le kasutavad sünteetilised bioloogid protsessi, mida nimetatakse DNA sünteesiks, mis hõlmab kohandatud DNA järjestuste loomist, mis kodeerivad digitaalset teavet. Need järjestused sisestatakse seejärel elusrakkudesse, kus neid saab paljundada ja pikka aega säilitada. Üks väljakutseid DNA kasutamisel andmete salvestamiseks on DNA sünteesiks ja sekveneerimiseks kuluv kulu ja aeg. Kuid sünteetilise bioloogia ja DNA sekveneerimistehnoloogiate areng on muutnud selle lähenemisviisi üha teostatavamaks ja

kuluefektiivsemaks. Üldiselt pakub sünteetiline bioloogia paljutöötavat lähenemisviisi andmete salvestamiseks, võimaldades DNA võimet suure hulga teabe salvestamiseks väga vastupidaval ja energiatõhusal viisil.

- 5) **CO₂ sidumise ja taaskasutamise tehnoloogia** (ingl. keeles *Carbon capture and utilisation* ehk CCU) - rakkude disain võimaldab välja arendada efektiivsemad mikroorganismid, mis suudava fikseerida süsinikdioksiidi ja süsinikoksiidi nii tööstuslikest heitgaasidest kui ka õhust ning konverteerida selle süsiniku meile vajalikeks kemikaalideks või materjalideks.
- 6) **Keskkonnasõbralikud alternatiivid põllumajandusväetistele** - rakkude digitaliseeritud disain võimaldab luua lämmastikku fikseerivaid mikroobe, mis kinnituvad taimede juurtee ning seeläbi võtavad vajaduse väetiste lisamiseks põllumajanduses.

Suurimad globaalsed takistused tehnoloogia laiemaks rakendamiseks on:

- sünteetilise bioloogia standardiseerimine;
- DNA kirjutamise hind ning sünteesitavate DNA ahelate pikkus;
- automatiseerimisplatvormide hind.

MÕJUTATUD VALDKONNAD

Keskkond ja rohepööre

Rakutüvede digitaliseeritud arendamise mõjud keskkonnale on võrreldes biomeditsiinilise uurimis- ja arendustegevuse muude valdkondadega pigem väikesed.

Positiivne on, et digiteeritud rakutüvede arendus võib vähendada vajadust füüsiliste katsete järele, mis võib vähendada laborijäätmete hulka ja see omakorda vähendada ressursside (nt energia, vee ja kemikaalide) kasutamist⁵⁶. Samuti võib kiirenenud arendusprotsessi ja võimalik olla rakupõhiste toodete kulutõhusamat tootmist. Rakutüvede digitaliseeritud arendamine võimaldab suuremat täpsust ja prognoositavust ning see muudab rakutüvede loomise protsessi sujuvamaks, vähendades ressursside (nt energia ja tooraine) tarbimist uurimis- ja arendusfaasis.

Rakutüvede digitaliseerimisega kaasneb jäätmete hulga vähenemine, näiteks jääb ebaõnnestunud rakutüvede kogus laborites vähemaks. See aitab vähendada jäätmete kõrvaldamise ja ohutustamisega seotud keskkonnamõjusid. Samuti väheneks katse-eksituse meetodite kasutamine, mis vähendaks ressursside tarbimist ja jäätmeteket veelgi.

Samas tuleks tähelepanu, et arendusprotsess võib olla küllaltki energiamahukas. Nimelt nõuab digitaalsete tööriistade ja arvutusmeetodite kasutamine rakutüvede digitaliseerimisel märkimisväärsel hulgal energiat, mis võib kaasa aidata süsinikdioksiidi heitkogustele ja kliimamuutustele. Digitaalse arenguga seotud energiatarbimine on aga tõenäoliselt palju väiksem kui traditsioonilisel katse-eksituse meetodil katsetamisel. Oluline on, et kogu digitaliseerimise protsess oleks läbi mõeldud, keskkonnasäästlik, ressursitõhus ja efektiivne.

Digitaalsete tööriistade ja seadmete kasutamine võib kaasa aidata elektroonikajäätmete, sealhulgas vananenud arvutite, serverite ja muu riistvara tekkele. E-jäätmete nõuetekohane kõrvaldamine on oluline keskkonna saastumise ja terviseriskide vältimiseks. Säästvate digitehnoloogiate ja -tavade arendamine, nagu taastuvenergia kasutamine ja elektroonikajäätmete ringlussevõtt, võib aidata leevendada digiteerimise negatiivseid keskkonnamõjusid.

Rakutüvede digiteeritud arendamise üheks võimalikuks eeliseks on loomkatsete vähenemine, mis võib olla vajalik rakukultuuri tingimuste optimeerimiseks. See võib vähendada biomeditsiiniliste uuringute mõju loomade heaolule ja keskkonnale⁵⁷.

⁵⁶ Scheper, Thomas, et al. "Digitalization and bioprocessing: promises and challenges." *Digital Twins: Tools and Concepts for Smart Biomanufacturing* (2021): 57-69.

⁵⁷ Thomas Luechtefeld, Dan Marsh, Craig Rowlands, Thomas Hartung, *Machine Learning of Toxicological Big Data Enables Read-Across Structure Activity Relationships (RASAR) Outperforming Animal Test Reproducibility*, *Toxicological Sciences*, Volume 165, Issue 1, September 2018, Pages 198–212, <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfy152>

Sõltuvalt sellest, mis suunas rakutüvede digitaliseerimisel minna, on võimalik välja töötada ka lahendusi, mis aitavad kaasa jätkusuutlikkusele ja keskkonnahoiule ka laiemalt. Rakendusi on mitmeid, alates keskkonnasaaste jälgimisest ja kõrvaldamisest⁵⁸, invasiivsete kahjurite ja patogeenide ohjamisest⁵⁹, ohustatud liikide taasestamisest kuni uute andmete salvestamise strateegiate võimaldamiseni⁶⁰.

Julgeolek

Digitaliseeritud rakutüvede tehnoloogia arendamine võib kaasa aidata riikliku julgeoleku paranemisele, võimaldades bioloogiliste ohtude vastaste vaktsiinide ja ravimite kiiret väljatöötamist ja tootmist. Suurem täpsus ja prognoositavus rakutüvede digitaliseerimisel võib kaasa tuua kiirema reageerimise esilekerkivatele nakkushaigustele või bioterrorismi vahejuhtumitele. Eesti kitsaskohad ravimite väljatöötamise juures on vajalikud mahus investeeringute puudumine.

Digitaliseeritud rakutüvede arendamisel on potentsiaali nii kasulikeks kui ka kahjulikeks rakendusteks. Negatiivseks võimalikuks mõjuks on väärkasutuse oht⁶¹. Juurdepääs patogeenide bioandmetele võib hõlbustada muudetud ja/või uute patogeenide sihipärast kasutamist⁶². Lihtne juurdepääs ja rakutüvede kiire areng võivad suurendada kuritarvitamise ohtu pahatahtlikel eesmärkidel, näiteks biorelvade või kahjulike geneetiliselt muundatud organismide loomiseks.

Kolmandaks mõõtmeks on inimeste elulooandmetega seotud risk: konkreetsete inimkahjude oht. Kuna rakutüvede digitaliseeritud arendamine põhineb andmete jagamisel ja koostööl, on potentsiaalne volitamata juurdepääsu oht tundlikule teabele. Samuti on võimalik tuvastada isikuid nende DNA osade põhjal⁶³.

Ohuks on samuti sünteetiliste organismide sattumine keskkonda, mis tekitab vajaduse korraliku järelevalve ning isoleerimissüsteemide järele⁶⁴. Nõuetekohaste bioohutusmeetmete, nagu isoleerimisrajatised ja ranged eeskirjad, tagamine võib aidata neid riske maandada ja säilitada riigi julgeolekut.

Tervis

Rakutüvede digitaliseerimine kujutab endast küllaltki võimekat tööriista koos väga suurte andmemahutudega. Selleks, et nendest andmetest kasu saada ja õige lahendus leida, on vajalik edasiviiva (uurimis)küsimuse esitamine ja kindlate eesmärkide püstitamine. Koostöö teadus- ja arendusasutuste ja ettevõtete vahel on esmatähtis, et kasutada maksimaalselt ära digitaliseeritud rakutüvede tehnoloogia potentsiaal. Ettevõtete ja tööstuse ülesanne on otsida välja sellised diagnoosid, kemikaalid või tooted, mis teevad nad kasumlikuks ning teadus- ja arendusasutustel on võimekus lahenduste leidmiseks. Ehk ettevõtetel on olemas visioon ning nad teavad sihtmärke, kuid neil on vaja ka teadusasutuste abi, et nende teadmistega edasi minna.

⁵⁸ De Lorenzo, Victor, et al. "The power of synthetic biology for bioproduction, remediation and pollution control: the UN's Sustainable Development Goals will inevitably require the application of molecular biology and biotechnology on a global scale." *EMBO reports* 19.4 (2018): e45658.

⁵⁹ Teem, John L., et al. "Genetic biocontrol for invasive species." *Frontiers in bioengineering and biotechnology* 8 (2020): 452.

⁶⁰ Lee, S. Y. DNA Data Storage Is Closer Than You Think (2019) <https://www.scientificamerican.com/article/dna-data-storage-is-closer-than-you-think/>

⁶¹ Collett MS. 2006. Impact of Synthetic Genomics on the Threat of Bioterrorism with Viral Agents. In: Working Papers for Synthetic Genomics: Risks and Benefits for Science and Society, pp. 83-103. Garfinkel MS, Endy D, Epstein GL, Friedman RM, editors. 2007.

⁶² Heam A (2017) There are things worse than death: can a cancer cure lead to a brutal bioweapons? *The guardian*

⁶³ Lippert, Christoph, et al. "Identification of individuals by trait prediction using whole-genome sequencing data." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114.38 (2017): 10166-10171.

⁶⁴ Schmidt, Markus, and Víctor de Lorenzo. "Synthetic constructs in/for the environment: managing the interplay between natural and engineered Biology." *FEBS letters* 586.15 (2012): 2199-2206.

Digitaaltehnooloogial on eeliseid farmaatsiaarenduses, sealhulgas võib see olla kiirem ja täpsem, kuid selle kasutuselevõtt kliinilises arenduses on olnud pigem aeglane⁶⁵. Eesti ekspert on välja toonud, et praegu nõuab prekliiniline ravimiarendus pigem vähe kapitali.

Üldiselt on rakutüvede digitaliseeritud arendamisel mitmeid võimalusi, kuidas tervishoidu paremaks ja tõhusamaks muuta: digitaliseeritud rakutüvede arendamine võimaldaks luua isikupärastatud ravi ja teraapiaid⁶⁶. Läbimurre võiks toimuda geeniteraapias, vähivastases võitluses. Digiteeritud rakutüvede tehnoloogia võimaldaks välja töötada täpsemaid ja esinduslikumaid haigusmudeleid, mis aitaks paremini mõista haiguse tekkemehhanisme ja seeläbi leida tõhusamaid ravimeetodeid⁶⁷. Lisaks võib selle tehnoloogia arendamine kaasa aidata regeneratiivse meditsiini arengule, näiteks koetehnoloogia elundite ja rakuteraapiate arendamisele. See võib potentsiaalselt muuta tervishoidu, pakkudes elundipuudulikkusega, krooniliste haiguste või vigastustega patsientidele uusi ravivõimalusi⁶⁸.

Majandus

Rakutüvede digitaliseerimise majanduslik potentsiaal on väga suur, aga see sõltub suuresti teadus- ja arendusasutuste ja tööstuste omavahelisest koostööst. Eestis oleks vajalik patenteeritud teaduse tegemise normaliseerimine, mis aitaks kaasa ka väärtusahela tekkimisele ja hoiaks ära selle, et suurettevõtted võtaks uurimistöö tulemused ise üle. Rakutüvede digitaliseerimine hõlmab tiipsemel tehnoloogiate kasutamist, nagu geenide redigeerimine ja tehisintellekt, mis nõuavad suuri investeeringuid teadus- ja arendustegevusse, mistõttu on patendid eriti olulised, kuna kaitsevad nende intellektuaalomandi õigusi, kes investeerivad uute tehnoloogiate väljatöötamisse.

Rakutüvede digitaliseeritud arendamise kontekstis on avaliku ja erasektori koostööl oluline roll valdkonna teadus- ja arendustegevuse edendamisel. Selle põhjuseks on asjaolu, et rakutüvede digitaliseeritud arendamine nõuab märkimisväärsed investeeringuid tehnoloogiasse, infrastruktuuri ja teadmistesse. Eraettevõtetega koostööd tehes saavad valitsused kasutada erasektori teadmisi ja ressursse, et arendada digitaalseid rakutüvesid tõhusamalt ja tulemuslikumalt. Avaliku ja erasektori partnerlus võib aidata ka kaasa teadusuuringute tulemuste turustamisele, kuna erasektori partnerid saavad aidata turule tuua uusi tehnoloogiaid.

Praktilisemal poolel on Eestis juba alustatud rakuvalikute arendamisega⁶⁹ eesmärgiga luua biokemikaale ja ravimeid tootvaid mikroobitüvesid, mis areneks uueks jätkusuutliku biotööstuse sektoriks ja annaks tulevikus suure panuse Eesti keemiatööstusele. Seeläbi soovitakse asendada praegune põlevkivil baseeruv keemiatööstus jätkusuutliku biotööstusega.

Muud relevantssed valdkonnad

Rakutüvede digitaliseerimine on horisontaalne teema ja fundamentaalne platvorm tööriist ning olenevalt sellest, kui laialdaselt seda rakendatakse, on sellel mõju rohketele erinevatele teaduse ja tehnoloogia valdkondadele. Rakuinseneria, fermentatsioon, biokeemia, tööstuslik biotehnoloogia (kõikvõimalike materjalide töötlemine genoomika abil) on võimalikud valdkonnad, kus digitaalsed rakutüved kasutust võivad leida. Valdkonna areng tõstatab olulisi eetilisi, õiguslikke ja sotsiaalseid küsimusi, sealhulgas küsimusi ohutuse, turvalisuse ja geneetilise teabe omandiõiguse kohta.

⁶⁵ Krishna, Rajesh. "The Emerging Role of Digital Technologies in Early Clinical Development." *Clinical Pharmacology & Therapeutics* 103 (2018)

⁶⁶ Brittain, Helen K., Richard Scott, and Ellen Thomas. "The rise of the genome and personalised medicine." *Clinical Medicine* 17.6 (2017): 545.

⁶⁷ Fang, Ye, and Richard M. Eglen. "Three-dimensional cell cultures in drug discovery and development." *SLAS discovery* 22.5 (2017): 456-472.

⁶⁸ Mason, Chris, and Peter Dunnill. "A brief definition of regenerative medicine." (2008): 1-5.

⁶⁹ <https://novaator.err.ee/258541/disainerrakkude-arendamiseks-loodud-keskusega-liitunud-teadlane-loob-rakuvabrikuid>

ARENGUT TOETAVAD JA ARENGUST MÕJUTATUD TEHNOLOOGIAD

Tehnoloogiad, mille areng mõjutab rakutüvede digitaliseeritud arendamise tehnoloogiate läbimurret:

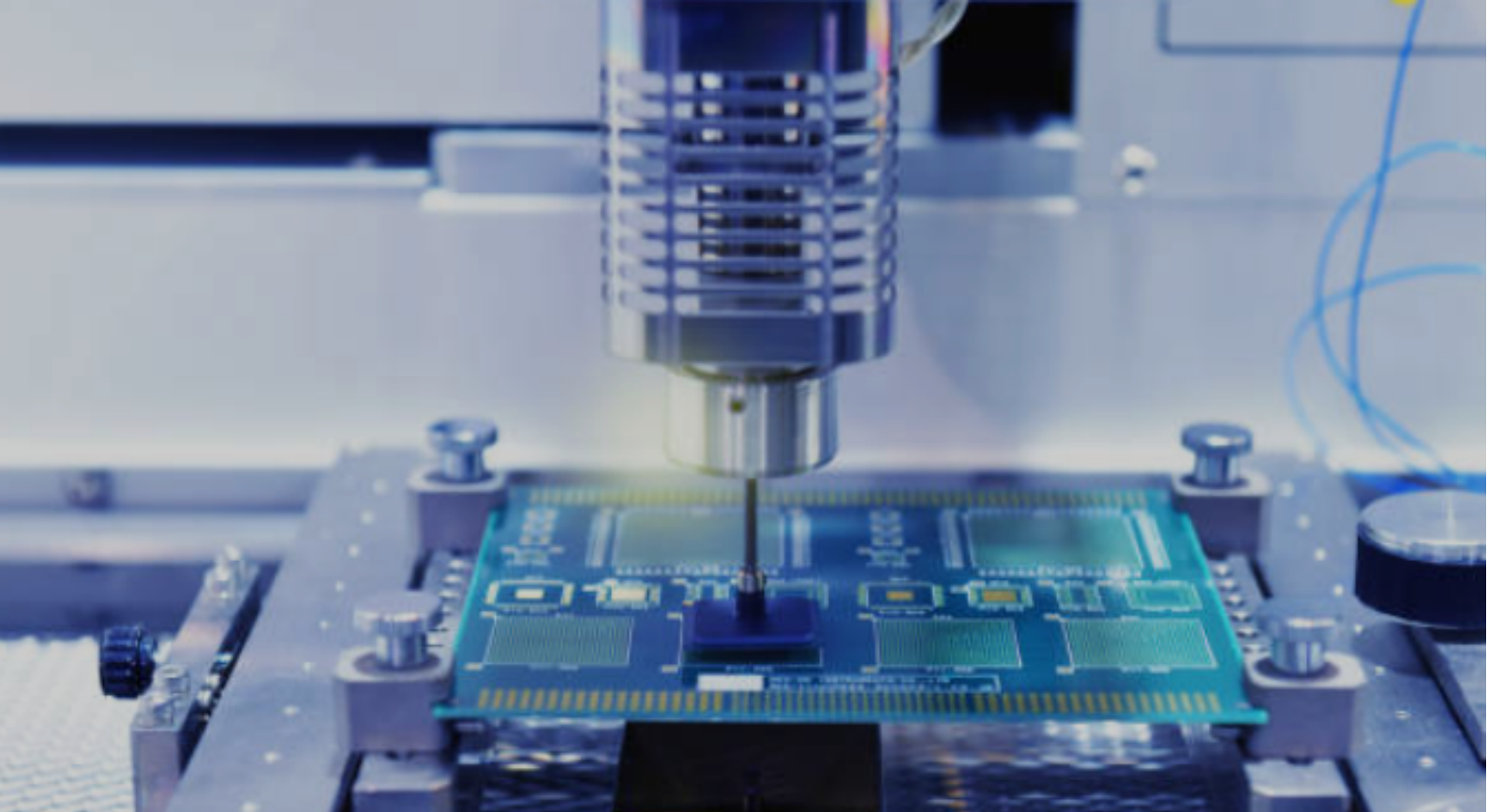
- Sünteetiline bioloogia
- Tehisintellekt
- Geeniredifeerimine/CRISPR
- Asjade internet (ingl. keeles *Internet of Things* ehk *IoT*) ja nanotehnoloogiad
- Robotika

Valdkonnad, mille tehnoloogiaid mõjutab läbimurre rakutüvede arendamise tehnoloogiates:

- Tervishoiu ja personaalmeditsiiniga seotud tehnoloogiad
- Keemiatööstus
- Toidutööstus
- Põllumajandustehnoloogiad
- Keskkonnakorraldus (sensorid)
- Ravimitööstus
- IT sektor
- Energiatööstus
- Jäätmekäitlus

TEHNOLOOGIASUUNAGA TEGELEVAD TÄHTSAMAD EESTI ETTEVÕTTED JA TEADUSASUTUSED

- Icosagen Cell Factory OÜ ja Icosagen AS – terapeutilised antikehad ja rekombinantsed valgud teadusuuringuteks ja diagnostikaks
- Solis BioDyne OÜ – stabiliseeritud valkude tootmine diagnostikaks ja teadusuuringuteks
- ÄiO Tech OÜ – mikroorganismide abil toodetud jätkusuutlikud asendused loomsetele rasvadele, palmi- ja kookosõlile
- TFTAK – bioloogiliste tootmisprotsesside optimeerimine ja toiduainete uurimine
- Gearbox BioSciences OÜ – valkude tootmine mikroorganismides antibiootikume kasutamata
- Tallinna Tehnikaülikool, Petri-Jaan Lahtvee – sünteetiline bioloogia, rakkude digitaalne disain
- Taru Ülikool, Mart Loog ja Andres Metspalu - sünteetiline bioloogia, geenitehnoloogia.



5. SARDSÜSTEEMID JA KIIBITEHNOLOOGIAD

TEHNOLOOGIA LÜHIKIRJELDUS

Nanokiibid on kaasaegsed pooljuhtmaterjalidest toodetavad mikroelektronikalülitused, mille üksikelementide (transistoride) suurus on kahanenud kümnetelt mikromeetritelt alla viie nanomeetri ning mille hulk on kasvanud näiteks maailma väärtuslikuima kiibitootja NVidia graafikaprotsessorites kaheksakümne miljardini. Võrdluseks võib tuua Apollo 11 kuumissiooni (1969), mille pardaarvuti koosnes 16500 transistorist ning kaasaegsed nutikellad, mille juhtmevabad sensorid sisaldavad suurusjärgus kümme miljonit transistorit. Miniaturiseerimine vähendab jätkuvalt Moore'i seadusele sarnaselt kiipide energiatarvet, mis võimaldab realiseerida järjest suurema töökiiruse ja arvutusvõimsusega kiipe. See on vajalik masinõppe ja tehisintellekti, asjade interneti (ingl. keeles *Internet of Things* ehk *IoT*), personaalmeditsiini ja kiire andmeedastuse rakendustes. Miniaturiseerimises on peatselt lähenemas aatomi mõõtmete ületamatu piir, mõõtmete vähenemisel avalduvad tugevamini kvantefektid segava müra kujul.

Ühisnimetajat sardseade ja sardsüsteem kannavad elektroonikaseadmed, mis töötavad spetsiifilises rakenduses ja on tavapäraselt ühendatud hajussüsteemi. Seoses globaalsest pilvarvutustehnoloogiast kiiremini kasvava energiat säästva ja sidekanalite töökindlusest sõltumatu servandmetöötlusega (ingl. keeles *edge computing*) kasvab vajadus spetsiifiliste kiipide nagu erineva jõudlusega masinõppeprotsessorid, energialõikusest (ingl. keeles *energy harvesting*) energiat ammutavate analoog- ja hübriidkiipide järele, mille arendamine on töömahukas, kuid mis on kõrge lisandväärtusega. Rakendusspetsiifilised kiibid, mida kasutatakse sardsüsteemides, on energiasäästlikumad kui tavapärased protsessorid ja mikrokontrollerid, mis on eriti oluline pika elueaga juhtmevabade seadmete puhul. Praktiliselt kõik uued mikrokontrollerid omavad masinõppetuge, kuid erinevad ülesanded nõuavad oluliselt erinevaid arhitektuurseid ja tehnoloogilisi lahendusi. Rakendusspetsiifiliste energiaefektiivsete nanokiipide näitena võiks esile tuua inimkõnes spetsiifiliste fraaside eristamise kiibid, mida kasutatakse kuularites, nutikellades, kõlarites tegevuskäskluste tuvastamiseks.

Pooljuhtseadmete tootmine on koondunud väikese arvu globaalsete tehnoloogiaettevõtete kätte - TSMC, Samsung, Global Foundries, Intel. Seoses kiipide keerukuse kasvuga on nende arendus järjest töömahukam, mis on väärtusloome nihutanud pooljuhtide tootmisettevõtelt nende arendus-

ettevõtetele. NVidia (turuväärtus ca 650 miljardit eurot) ei oma tootmisvõimekust ja kasutab TSMC (turuväärtus ca 250 miljardit) tehaseid. Euroopas, sealhulgas põhjamaades, on mitmeid tootmisvõimekuseta kiibiarendajaid, näiteks Nordic Semiconductor (Norra) asjade interneti valdkonnas, mille turukapitalisatsioon on ca 3 miljardit eurot 1200 töötaja puhul. Ettevõtte aastane kasv ületas enne COVID-19 põhjustatud kiibikriisi 100%. Kaasaegne kiibiarendus sarnaneb tarkvaraarendusele ehk ei vaja kulukat tootmisinfrastruktuuri ja on hetkel üks suurima töötaja lisandväärtusega IKT valdkondi maailmas. Valdonna töötajate keskmine aastasissetulek USAs on 170 000 dollarit, mis ületab vastavat mediaanpalka kolmekordselt⁷⁰.

Kiibikriisist ajendatud Aasiast sõltuvuse vähendamiseks investeerib Euroopa Liit piirkonna kiibitööstusesse lähiaastatel 43 miljardit eurot eesmärgiga saavutada tootmises globaalne turuosa 20%⁷¹. Kui keerukate protsessorkiipide tootmine nõuab investeeringuid mahus vähemalt 15 miljardit eurot ja investeeringud lihtsamate elektroonika komponentide täistootmisliinidesse on suurusjärgus 100-150 miljonit eurot, siis uudsete pooljuhtmaterjalide (SiC, GaN, kaugemas tulevikus tehisteemant) alusmaterjalide tootmine nõuab investeeringuid 5-10 miljonit eurot. Uudsetel pooljuhtmaterjalidel on kasvav globaalne nõudlus nende hea temperatuuri-, ping- ja radiatsioonitaluvusele tõttu ning laialdased kasutusvõimalused jõu-, side-, ja kosmoseelektroonikas. Galliumnitriid võimaldab ühel kiibil realiseerida nii elektroonika kui ka optikalülitusi, mis suurendab andmetöötluskiirusi suurusjärgudes. Teisalt kasvab ka pakkumine ja nõudlus ühekordse elektroonika vallas, mille näitena võib tuua ühekordsed nahale kleebitavad termomeetrid. Sellise orgaanilise elektroonika tootmine eeldab suuri tootmismahтусid.

Perspektiivseks võib pidada **bioühilduva** ja heade katalüütiliste omadustega grafeeni kombineerimist pooljuhtmaterjalidega, mis võimaldab realiseerida suure tundlikkusega (ühe aatomi registreerimise tasemel) bio- ja keemiasensoreid meditsiini (nahal kantavad sensorid, kiiplaborid, gaaside, sh vesiniku sensorid). Võib prognoosida uudsete mikro- ja nanosensorite arenduste jätkubuumi, mis toetab meditsiinitehnoloogia, keemiatööstuse ja energiasalvestuse valdkondi.

Efektiivne (mikro/nano)sensorika ja energiakorje on tõenäoliselt olulisimad aspektid asjade interneti ehk IoT valdkonnas ja loovad võimalusi nii kõrg- kui lihtsa (madal)tehnoloogia (ingl. keeles *low-tech*) arendajatele ja tootjatele globaalselt. Valdus ei oma kõrget sisenemisbarjääri ja on ka edaspidi sobiv T&A võimekusega väikeettevõtetele. Asjade interneti lahenduste kumulatiivne aastane kasvumäär aastani 2030 on hinnanguliselt 26%, mille tulemuseks on valdkonna rahaline maht üle 3 triljoni dollari⁷². Positiivse asjade interneti valdkonna ettevõtlusnäitena võib tuua 2020. aastal Taani teadlaste poolt loodud pooljuhtmaterjalitehnoloogia idufirma Lotus Microsystems, mis toodab kuuldeaparaatide, mobiiltelefonide jms akude juurde varasematest kompaktsmaid komponente. Ettevõttes on neli töötajat ja koos Euroopa Liidu rahastusega on kaasatud investeeringuid üle 2 miljoni euro.

Nanokiipide ja sardsüsteemide globaalne turumaht 2022. aastal oli 570 miljardit eurot.

MILLISE TÄNASE PROBLEEMI SÜVATEHNOLOOGIA LAHENDAB?

- **Kiipide kasvav energiatarve:** Jätkuv kiipide miniaturiseerimine võimaldab tõsta nende arvutusvõimsusi energiatarvet suurendamata või koguni vähendades. Miniaturiseerimine on võimalik ilma märkimisväärse tootmiskulu tõusuta va investeering tootmiseseadmetesse. Kiipide energiatarbe vähenemine võimaldab teatud juhtudel loobuda tavapärastest energiaallikatest ja kasutada energialõikust (valgus- ja termiline energia, raadiosignaalide energia, liikumisenergia) ehk realiseerida 10+ aastase tööeaga asjade interneti seadmeid eeskätt sensorrakendustes. Suurem arvutusvõimsus on oluline tehisintellekti ja pildituvastuse rakendustes. Suurem arvutusvõimsus andmete tekkekohas tagab energia kokkuhoiu ja töökindluse kasvu, mis on oluline tööstuses, autonoomsete transpordisüsteemide juures ning meditsiinsensorikas.

⁷⁰https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2022/11/2022_The-Growing-Challenge-of-Semiconductor-Design-Leadership_FINAL.pdf

⁷¹ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_729

⁷² <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/internet-of-things-iot-market-100307>

- **Vastupidavus:** Uudsete pooljuhtmaterjalide, peamiselt kõrge temperatuuritaluvusega ja nn laia keelutsooniga pooljuhtide kasutuselevõtt võimaldab realiseerida elektroonikalülitusi, mis töötavad laitmatult ka 100-150°C ja kõrgemal temperatuuril. See on oluline kompaksetes elektrimuundites, -sõidukites ja kõrge radiatsioonitasemega keskkonnas, näiteks kommertsidesatelliitides. Tavapäraselt valgusdiodides kasutatud leidva galliumnitriidi baasil on võimalik realiseerida optoelektronilisi kiipe, mis ühendavad endas elektroonilise andmetöötluse ja optilise andmeedastuse häid omadusi.
- **Kiipide hind ja taaskasutus:** Orgaanilise ja trükitava elektroonika masstootmine võimaldab kiipide omahinda vähendada 2-3 korda. Orgaanilised kiibid on lagunevad, samuti väheneb mingil määral elektrooniliste jäätmete hulk, mis praegu on globaalselt hinnanguliselt 50 miljonit tonni aastas kasvutrendiga 75 miljoni tonnini aastas. Uudsete materjalide rakendamine kiibitehnoloogias võimaldab ka realiseerida senisest selektiivsemaid keemiliste ühendite sensoreid ja usaldusväärseid elektriühendusi bioloogiliste kudedega.

LÄBIMURDED JA NENDE EELDUSED

1. Vabavaralistel tarkvarakomponentidel baseeruvate protsessorite ja mikrokontrollerite lai levik ja arendus.

Mikrokiipide projekteerimine on sarnane tarkvara loomisega, kasutades olemasolevaid digitaalseid komponente (*IP core*). Kuigi tarkvaralise vabavara osakaal on suur (näiteks Linux), on digitaalsete protsessorite turul olnud valitsevaks UK ettevõtte ARM poolt loodud ja litsentseeritud tehnoloogia. Pärast ARM-i ülevõtmist on rohkem tähelepanu suunatud vabavaralistele protsessorilahendustele, nagu RISC-V arhitektuur, mida kasutatakse Euroopa superarvutites ja mille arendamisse investeerib Euroopa Liit 250 miljonit eurot.

RISC-V arhitektuur on paindlik, mis võimaldab luua väga lihtsaid, väga keerukaid ja unikaalsete spetsiifiliste omadustega digitaalseid kiipe. See aitab vähendada energiatarbimist, mis on oluline asjade interneti mikrokontrollerite puhul, mille ülesanne on nn aeglase protsesside jälgimine (näiteks kliimamuutuste või konstruktsioonide vananemise monitooring). Vabavaraliste protsessorite levik toob omakorda turule odavamaid nanoprotsessoreid nii asjade interneti kui ka masinõppe superarvutite jaoks ja loob võimalusi väikestele kiibidisaini ettevõtetele. Vabavaralised komponendid toetavad ka uusi arhitektuure, nagu mäluarvutus ja hübriidandmetöötlus.

Vabavaralisi RISC-V mikrokontrollereid kasutatakse hetkel eksperthinnanguliselt 5% asjade interneti suunitlusega kiipides. Tehnoloogia üldine rakendatavus jääb ilmselt alla 1% turumahust, kuid selle aastane kumulatiivne kasvumäär aastaks 2027 ületab 33% 2021 aasta poolemiljardilise turumahu baasilt. Toimub aktiivne arendustöö, sh näiteks rangete töökindlusnõuetega kiipide arendamine autotööstuse tarbeks. Hetkel puuduvad vabavaralised kiibidisainid, mis suudaksid konkureerida suure arvutusvõimsusega laiatarbeprotsessorite segmendis ARMi ja Inteli litsentseeritavate toodetega.

Vabavaraliste kiibilahenduste levik on tõenäoline, seda eeskätt suurettevõtete tulevikukindluse perspektiividest lähtudes. Piiravaks on arendustööde väga suur maht ja tugev konkurentsipositsioon hetke turuliidritel (ARM, Apple, Intel). Kuna ARMi müük Nvidiale blokeeriti turu regulaatorite poolt, vähendas see sektori survet alternatiivsete (vabavaraliste) lahenduste kiireks rakendamiseks. Samuti on riikide toetus valdkonda ebapiisav (vaatamata Euroopa Liidu kiibiaktiga planeeritavale 43 miljardi euro suurusele toetusele), kuna hetkel kommertsinvesteeringud on veel ebapiisavad.

Vabavaraliste kiibikomponentide, eeskätt RISC-V, laiem levik on inkrementaalne protsess. Levik on üsna lai hinnakriitiliste asjade interneti komponentide hulgas, eeskätt Aasia toodangus (Hiina, Taiwan, ka Jaapan). Euroopa Liit panustab suure arvutusvõimsusega RISC-V kiipide arendusse eesmärgiga suurendada sõltumatust konkureerivatest piirkondadest. Arenduse keerukuse kasvu mahendab tehisintellektil baseeruvate kiibiarenduse tööriistade kasutuselevõtt, mis on käivitumas. Vabavaraliste protsessorikiibikomponentide massiline rakendamine on vääramatu ja toimub lähima viie aasta jooksul.

2. Uudsete pooljuhtstruktuuride tootmine ja rakendamine (3D kiibid, ingl. keeles *in-memory-computing*)

Monoliitsete 3D kiipide loomisega kinnitatakse ühele pooljuhtplaadile kasvatatakse mitu kihti lülitusi. Kihtide vahel on tihe vertikaalsete ühenduste võrk. Monoliitne 3D kiibitehnoloogia aitab üle saada miniaturiseerimisest tulenevatest piiridest. Näiteks luua keerukaid asjade interneti komponente, mida saab panna neelatavate ravimite sisse või muuta oluliselt kompaktsemaks suure arvutusvõimsuse kiipe, kasutades selleks kõrge temperatuuritaluvusega pooljuhte.

Mäluarvutuse (ingl. keeles *in-memory-computing*) rakendamine võimaldab lihtsustada tehismäluvõrkude realiseerimist kiipidel. Mäluarvutus on oluline andmeintensiivsete operatsioonide realiseerimisel nagu andmeanalüütika, masinõpe ja tehismälu. Sarnaselt bioloogilisele neuronile teeb mäluarvutussõlm ehk memristor ühe füüsilise struktuurielemendina nanokiibis korraga nii andmete salvestamist kui ka aritmeetikat. Erinevus on, et puudub vajaduseta andmeid mälu ja aritmeetikaseadme vahel transportida, st tehteid saab teha kiiresti ja energiaefektiivselt. Memristoride eduka realiseerumise korral paraneb TI kiipide arvutusvõimsuse ja energiatarbe suhe suurusjärgude võrra. Tekib võimalus masinõppeliste asjade interneti komponentide energiaga varustamine energialõikuse meetoditega.

Seetõttu on oluline investeerida algatustesse, mille eesmärk on uurida ja kasutada neuromorfsete kiipide potentsiaali, et rahuldada tööstuse 4.0 kasvavaid vajadusi. Selleks on vaja partnerlust meie valitsuse, akadeemiliste koolituskeskuste, uurimiskeskuste ja tööstuse vahel, et edendada innovatsiooni, kiirendada nende tehnoloogiate turustamist ja arendada välja tugev ökosüsteem selles valdkonnas. Neuromorfsete arvutid on spetsiaalselt kavandatud jälgendama aju toimimist, pakkudes paremat energiatõhusust, reaajas õppimis- ja töötlemisvõimet ning veakindlust. Selline lähenemisviis avab alternatiivseid väljavaateid tehismälu, neuroteaduse ja reaajas rakenduste jaoks, ilma piiranguteta, mis on seotud praeguste kvantarvutite keerukuse ja häiretundlikkusega.

Hübriidkomponentide arendamise ja tootmise valdkonnaga seondub grafeeni (ühe aatomi paksune süsinikkile) ja kvantttäppide (100 - 100 000 aatomit) integreerimine pooljuhtkiipidega. Kuna lisandi kogus on üliväike, on sellised struktuurid tundlikud välismõjutustele nagu vööraatomid (grafeen) ja footonid (kvantttäpp), võimaldades realiseerida olemasolevatest suurusjärgudes efektiivsemaid kiipsensoreid. Valdkonnaga haakub ka optiliste ja elektrooniliste komponentide integratsioon kiibil, mida vaadeldakse järgmises alamteemas.

Uudsete kiibiintegratsiooni lahenduste integratsioon on valdavalt arendusfaasis, TRL tasemetel 2-3. Lähimurrete realiseerumist takistavad hulk tehnoloogilisi probleeme – võrreldes vabavaraliste kiipide arendamisega on tarvis kõrgtehnoloogilist puhta ruumi laborivarustust ja märkimisväärsed investeeringuid katsetustesse. Monoliitsete 3D kiipide kasvatamist takistab hetkel tootmisprotsessi tehnoloogiline töökindlus ja lahendamata probleemid soojuse ärajuhtimisel. Hetkel on suureks piiranguks memristoride puhul madal maksimaalne ümberlülituste arv (ingl. keeles *endurance*). Grafeenil ja kvantttäppidel baseeruvad sensorelemendid on keerukad realiseerida. Takistused ületatakse järk-järguliselt 5-15 aasta jooksul. Esmast lähimurret võib loota mäluarvutuskomponentide vallas (<= 5 aastat).

Uudsed lahendused panustavad otseselt mikroelektronika, masinõppe, kiiplaborite, tuleviku andmeside (raadiovõrgud, optilised võrgud) st väljatöötusvaldkonnas. Vastavate komponentide tootmine Eestis on vähetõenäoline tootmisstruktuuride investeeringuvajaduse tõttu. Realistlik on panustamine spetsiifilistesse arendusse, näiteks sarnaselt müüonite detektori arendustöödesse.

3. Uudsete pooljuhtmaterjalide baasil keerukamate elektroonikakomponentide arendamine ja masstootmine – valgusside, orgaaniline elektroonika

Uudsete laia keelutsooniga ja kõrge töötemperatuuriga pooljuhtmaterjalide, eeskätt ränikarbiidi (SiC) ja galliumnitriidi (GaN) baasil toodetakse lihtsaid elektroonikaseadmeid nagu võimsuslülitid ja võimendid. Nimetatud materjalid on kõrge pinge-, radiatsiooni- ja temperatuuritaluvusega, mis teeb nad sobivaks jõuelektronikas kasutamiseks. GaN on ka kõrgsageduslik ehk sobib ülikõrgsagedussidesse. Kuna GaN-st valmistatakse valgusdioode, on materjal sobiv optiliste lülituste realiseerimiseks. Lähimurdeline on nende

materjalide baasil realiseerida keerukamaid elektroonikakomponente, mis võimaldab senisest lihtsamalt realiseerida jõu- ja sideelektroonikaseadmeid.

Erivaldkond on **orgaanilisest materjalist elektroonikakomponentide masstootmine**, mis on keskkonnasäästlik ja võimaldab kasutada üheksakordseid ja keskkonnasäästlikke asjade interneti sensoreid. Orgaanilise elektroonika komponentide tootmise omahind on ekspertarvamuse kohaselt umbes kolmandik ränikomponentide tootmise omast. Samuti on komponendid lühikese elueaga, mida võib esmarakendustes pidada kasulikuks. Prognoosida võib orgaanilise elektroonika komponentide kasutamist koos printitava elektroonika ja patareidega. Orgaanikal baseeruvaid elektroonikakomponente kasutatakse hetkel ekraanides, ent tehnoloogia laiem kasutamine on arendusfaasis (TRL 4-5).

SiC ja GaN kasutatakse diskreetsete elektroonikakomponentide tootmiseks. Toimub arendustöö, mille fookus on elektriautodes kasutatavad jõukomponendid (TRL 8+), kosmoseside ja muud ülikõrgsageduskomponendid (TRL 7+). Keerukad integraallülitused on mitterakendusliku arendustöö faasis (TRL 4-5), samuti GaN baasil hübriidlülitused (optika + elektroonika). Läbimurret SiC, GaN kiibi- ja sardseadmete valdkonnas võib oodata hetkel kui tehnoloogiliselt on võimalik toota kõrgema integratsioonitasemega komponente.

Läbimurret takistab töötlemise keerukus – SiC on teemanti järel kõvaduselt teine materjal, materjalid sulavad kõrgel temperatuuril. Seetõttu toodetakse tehnoloogilistel põhjustel vaid madala integratsioonitasemega peamiselt diskreetseid komponente. Samuti on tootmine on energia-, aja- ja ressursimahukas, kui GaN on oluliselt kallim ränist. Orgaanilise elektroonika puhul on läbimurde probleemiks toodete parameetrite hajuvus tootmistehnoloogilistel põhjustel. Orgaanilise elektroonika puhul on vajalik massiefekt, et tootmise hinnavahe pääseks mõjule. Orgaanilise elektroonika arendamist on tarvis tõenäoliselt globaalselt subsideerida keskkonnahoiu aspektidest lähtudes.

Tehnoloogiliste toodetavuse probleemide lahendamine madala integratsioonitasemega kõrgtemperatuuriliste kiipide osas 5 aasta perspektiivis on realistlik. Kõrgintegreeritud ja optoelektroniliste kiipide tootmisvalmidust võib loota 5-10 aasta perspektiivis. Orgaanilisest materjalist kiipide realiseerumist võiks eeldada 5-10 aasta perspektiivis.

Tehnoloogilised valmidusastmeks (TRL) võib grafeeni ja kvantttäppide puhul hinnata 2-3, kõrgintegreeritud SiC ja GaN puhul 5-6.

MÕJUTATUD VALDKONNAD

Keskond ja rohepööre

Sardsüsteemid ja kiibitehnoloogiate positiivne keskkonnamõju avaldub eelkõige läbi nende kasutamise energiaefektiivse ning nutika ja loodusteadliku ühiskonna suuremale saavutamisele sisuliselt kõigis valdkondades. Nii vabavaralised nanokiibid kui ka uudsed kõrgtundlikkusega sensorikiibid pakuvad **senisest soodsamaid, efektiivsemaid ja mitmekülgsemaid lahendusi sensorseadmetesse, keskkonda mõjutavatesse juhtimissüsteemidesse ning võimaldavad tõrkeenetust ehk varajast hoiatussüsteemi** energiatootmis-, tööstussüsteemides, transpordivahendites ja mujal. Kõrgtemperatuurilised kiibid on seevastu olulised eelkõige elektrisõidukites ja muundusseadmetes, kui nende kasutamine võimaldab oluliselt **vähendada päikeseenergia muundamise kadusid (10+%)** ning vähendada seadmete gabariite ja maksumust. Orgaanilise elektroonika tootmine ja kasutamine on tänasega võrreldes keskkonnasäästlikum ning **toetab ühtlasi massiivseid asjade interneti rakendusi**.

Hetkeseisuga võrreldes võib positiivset mõju avaldada kiipide pidev väiksemaks muutumine, mis toob kaasa **väiksema materjalikulu** ning käib ekspertide sõnul koos põhimõttega „ühes tükis **tooted elavad kauem**“.

Kiipide ja sardsüsteemides keskkonnamõju suurendab nende kasutuse jätkuv laienemine igapäevaelu teistesse valdkondadesse. Kiipide asutusvõimaluste ning efektiivsuse tõustes suureneb nõudlus, mis toob kaasa **andurite plahvatusliku leviku ja kasutamise**. See omakorda toob kaasa suureneva **nõudluse mittetaastuvatele või haruldastele maavaradele**, mille kaevandamine, transport ning töötlemine on väga suure negatiivse keskkonnamõjuga.

Teisisõnu – kiipide positiivne mõju keskkonna avaldub siis, kui neid sellel eesmärgil ka kasutatakse (keskkonnamonitooring, energiaefektiivsus), ent kasutusvõimaluste laienedes suureneb hüppeliselt ka kasutatavate kiipide arv.

Julgeolek

Kiibitehnoloogiate ja sardsüsteemides läbimurde mõju julgeolekule ei ole samuti ühene ning sõltub otseselt kasutusviivist. Sardsüsteemide ja nanokiipide arendamine võib sillutada teed autonoomsete kaitsesüsteemide, sh droonide, robotite ja muude mehitamata platvormide levikule, suurendades sõjalist võimekust ja **vähendades ohtu inimestele**. Eksperdid toovad välja ka kahesuunalise hüpoteetilise olukorra Eestisse tehtud suurte tehaste või teadusarenduskeskuste olemasolu korral – kui Eestis oleks midagi, mis on valdkonna suurinvestoritele äriiselt eluline (miljardiinvesteeringud, mida kaitsta), siis seistaks Eesti eest nii poliitiliselt kui ka majanduslikult rohkem. Samal ajal on tehased või teaduskeskused potentsiaalne sihtmärk küberrünnakuteks või sabotaažiks.

Vabavaraliste kiipide arendamine vähendaks **sõltuvust mitteeuroopa päritoluga riistvarast**, kui avatud lähtekoodil baseeruv riistavara on auditeeritav ja seega turvalisem. Uudsed kõrgtundlikkusega sensoriikibid võimaldavad kasutada keerukamaid masinõppekiipe ning **tuvastada efektiivsemalt küberrünnakuid kohtvõrkude** tasemel. Kõrgtemperatuursete pooljuhtide kasutamine on relevantne militaar- ja **kaheotstarbeliste seadmete** (radarid, sisedesadmed) **realiseerimisel**.

Kõrgtehnoloogiliste lahenduste laialdase kasutamisega seadmetes kaasneb julgeolekuvaldkonnas alati **reverse engineering** risk. See kujutab endast potentsiaalselt otsest ohtu riiklikule julgeolekule, kui võimaldab rünnakuid tark- ja riistvarale nn *hardware Trojans*⁷³ abil⁷⁴. Samuti tõstatab *reverse engineering* väga keerukaid probleeme ja **ohte intellektuaalomandi kaitsele** ja kasutamisele⁷⁵.

Nii akadeemiline kirjandus kui kaasatud eksperdid toovad üheselt välja nanokiipide ja asjade interneti levikuga suurenevad **privaatsus- ning andmekaitseriskid**^{76,77,78}. Samuti võivad eraelu puutumatusele olulist ohtu kujutada küberturbesüsteemid, mis on küll loodud julgeoleku suurendamise otstarbel, ent koguvad suurtes mahtudes isiklikke andmeid.

Tervis

Tervishoius on nanokiipide ja -süsteemidel potentsiaal olla revolutsiooniline, võimaldades reaalajas kaugseiret, vähendades potentsiaalselt tervishoiukulusid ja toetades krooniliste haiguste ja eakate patsientide koduhooldust⁷⁹.

Spetsialiseeritud kasutusotstarbega nanokiibid toetavad otseselt **personaalmehitsiiniga** seotud sensorite (kehasensorid)⁸⁰, täiturite (funktsionaalsed elektrilised stimulaatorid) arendamist ning **kuluefektiivset**

⁷³ Üldiselt püüavad troojalased (HT) turvasüsteemist mööda minna või selle välja lülitada. HT-d võivad ka kogu kiibi või selle komponente kahjustada või hävitada ehk sisuliselt on tegemist pahatahtliku riistvara moonutamisega, et kompromiteerida süsteemi või võimaldada keelatud ligipääse.

⁷⁴ Wallat, S., Fyrbiak, M., Schlögel, M., & Paar, C. (2017, July). A look at the dark side of hardware reverse engineering- a case study. In 2017 IEEE 2nd international verification and security workshop (IVSW) (pp. 95-100). IEEE.

⁷⁵ Botero, U. J., Wilson, R., Lu, H., Rahman, M. T., Mallaiyan, M. A., Ganji, F., ... & Forte, D. (2021). Hardware trust and assurance through reverse engineering: A tutorial and outlook from image analysis and machine learning perspectives. ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems (JETC), 17(4), 1-53.

⁷⁶ Ziegeldorf, J. H., Morchon, O. G., & Wehrle, K. (2014). Privacy in the Internet of Things: threats and challenges. Security and Communication Networks, 7(12), 2728-2742.

⁷⁷ Al-Sharekh, S. I., & Al-Shqeerat, K. H. (2020, February). An Overview of Privacy Issues in IoT Environments. In 2019 International Conference on Advances in the Emerging Computing Technologies (AECT) (pp. 1-6). IEEE.

⁷⁸ Abomhara, M., & Kõien, G. M. (2014, May). Security and privacy in the Internet of Things: Current status and open issues. In 2014 international conference on privacy and security in mobile systems (PRISMS) (pp. 1-8). IEEE.

⁷⁹ Islam, S. R., Kwak, D., Kabir, M. H., Hossain, M., & Kwak, K. S. (2015). The internet of things for health care: a comprehensive survey. IEEE access, 3, 678-708.

⁸⁰ Lin, B., & Wu, S. (2022). Digital transformation in personalized medicine with artificial intelligence and the internet of medical things. Omics: a journal of integrative biology, 26(2), 77-81.

rakendamist kliinilises meditsiinis, sotsiaalhoolekandeasutustes ja koduses jälgimises⁸¹. Samuti toetavad nanosensorid ja kiiplaborid otseselt infektsioonraviga seotud keemiliste ning bioloogiliste sensorite loomist, mis võimaldab **täpsemaid ravimite manustamissüsteeme**, tundlikke implantaate ja **sihipäraseid ravimeetodeid**, mis omakorda parandavad ravitulemusi ja **vähendavad kõrvaltoimeid**.

Kliinilises meditsiinis on ühekordsete kehasensorite näol suur kasutuspotentsiaal orgaanilisel elektroonikal näiteks praegu kasutatavate ränil baseeruvate temperatuurimõõteplaastrite asendajana, vere glükoositaseme mõõtjatena jpm⁸². Sensorite ja kiipide areng võib parandada ka **telemeditsiini ja kaughoolduse** võimalusi, võimaldades tervishoiutöötajatel jälgida ja ravida patsiente kaugelt, parandades **tervishoiuteenuste kättesaadavust**, eriti kaugetes või vähekasutatavates piirkondades. Sardüsteemid võivad soodustada suuremamahuliste meditsiiniliste andmete tõhusat töötlemist, toetades tehisintellekti integreerimist tervishoiusüsteemi, et parandada diagnoosimist ja ravi planeerimist.

Nanomaterjalide ohuks on nende põhjustatud **potentsiaalsed pikaajalised terviseriskid**⁸³, kuna materjalide pikaajalist mõju inimeste tervisele ei ole veel saavutanud teadusliku konsensust kontrollitud⁸⁴. Üksikud paneeluuringud viitavad siiski, et vähemalt nanomaterjalidega tööl püsivalt kokku puutuvatel inimestel ei ole avaldunud pikaajalisi tervisekahjustusi⁸⁵.

Majandus

Kiipide globaalne majanduslik mõju avaldub enim läbi elektroonika- ja energiatööstuse hüppelise arengu. Riskidena võivad avalduda väga ebavõrdne kasutuselevõtu kiirus ning nii ühiskondliku kui ka ettevõtete vahelise ebavõrdsuse suurenemine, kui kasu saavad eelkõige varajased tootjad ja rakendajad⁸⁶, kes on selles valdkonnas enamasti juba oligopoolses seisundis mastaapsed suurettevõtted. Ka akadeemiline kirjandus on varasemalt viidanud nanotehnoloogiate ühiskondlike ebavõrdsusi suurendavale mõjule^{87,88}, ent ka kommunikatsiooni tähtsusele ühiskonnas laiemalt nanotehnoloogiate kasutuse selgitamisel⁸⁹.

Eksperdid toovad välja ka sotsiaalse hirmukülvamise ohu, mis seisneb kartuses muutuste ning uute ja keeruliste tehnoloogiate ees. Samas hinnatakse tõenäolisemaks, et muutused ja kasutuselevõtt on sujuv ning praktikas ei saada tehnoloogia suuremast integreerumisest igapäevaellu aru. Samuti nõuab sardüsteemide ja nanokiipide tootmine nappide või taastumatute ressursside kasutamist, mis võib põhjustada tarneahela haavatavust ja majanduslikke riske nii riiklikul tasandil (haruldaste ressursside piiratud kättesaadavus võib põhjustada rahvusvahelisel tasemel vaidlusi) kui ka ettevõtete tasandil (nappide ressursside hinnakõikumine ja tarneahela ebastabiilsus).

Eesti tasandil peitub potentsiaal enim tehnoloogia arenduses ja litsentsimises, väiketootmise levikus ning tehnoloogiate kasutuselevõtus. Projekti käigus intervjueritud eksperdid välistavad kiibitehase loomise

⁸¹ Nguyen, H. H., Mirza, F., Naeem, M. A., & Nguyen, M. (2017, April). A review on IoT healthcare monitoring applications and a vision for transforming sensor data into real-time clinical feedback. In 2017 IEEE 21st International conference on computer supported cooperative work in design (CSCWD) (pp. 257-262). IEEE.

⁸² Dwivedi, P., & Singha, M. K. (2021). IoT based wearable healthcare system: post covid-19. The Impact of the COVID-19 Pandemic on Green Societies: Environmental Sustainability, 305-321.

⁸³ Elder, A., Lynch, I., Grieger, K., Chan-Remillard, S., Gatti, A., Gnewuch, H., ... & Shvedova, A. (2009). Human health risks of engineered nanomaterials: critical knowledge gaps in nanomaterials risk assessment. In Nanomaterials: risks and benefits (pp. 3-29). Springer Netherlands.

⁸⁴ Chaturvedi, S., & Dave, P. N. (2018). Nanomaterials: Environmental, human health risk. In Handbook of nanomaterials for industrial applications (pp. 1055-1062). Elsevier.

⁸⁵ Wu, W. T., Li, L. A., Tsou, T. C., Wang, S. L., Lee, H. L., Shih, T. S., & Liou, S. H. (2019). Longitudinal follow-up of health effects among workers handling engineered nanomaterials: a panel study. Environmental Health, 18(1), 1-17.

⁸⁶ Tokareva, M. S., Vishnevskiy, K. O., & Chikhun, L. P. (2018). The impact of the Internet of Things technologies on economy. Бизнес-информатика, (3 (45) eng), 62-78.

⁸⁷ Cozzens, S. E. (2011). Building equity and equality into nanotechnology. Nanotechnology and the challenges of Equity, Equality and Development, 433-446.

⁸⁸ Miller, G., & Scrininis, G. (2011). Nanotechnology and the extension and transformation of inequity. Nanotechnology and the Challenges of Equity, Equality and Development, 109-126.

⁸⁹ Babatunde, D. E., Denwigwe, I. H., Babatunde, O. M., Gbadamosi, S. L., Babalola, I. P., & Agboola, O. (2019). Environmental and societal impact of nanotechnology. IEEE Access, 8, 4640-4667.

Eestisse ülisuurte investeeringute mahu tõttu. Väiketootmise võimalusi nähakse tehnoloogiate lihtsustades – kui tehnoloogiad lihtsustuvad, on võimalik teha erilahendusi või väikeseeriaid. Väiketootmise võimekuse tekkides kaasnevad potentsiaalselt ka investeeringud, mis soodustavad ettevõtte sisest nn *in-house* väiketootmise võimekust. Potentsiaali nähakse Eesti IT riigi mainel ning olemasoleval elektroonikatööstusel kui ühel võimalikul osal tootmise tarneahelas. Ehkki TA tugistruktuuride viimaste aastate arengut tunnustatakse, kritiseeritakse siiski hindajate ja tugistruktuuride vähest riskitaluvust ja erialase ekspertiisi puudumist. Kuna ettevõtete investeerimisvõimekus on madal, oodatakse avalikult sektorilt senisest suuremat investeerimisriskide maandamist.

Eesti võimalusi toetaks täiendavalt vabavaraliste kiipide läbimurre, mille projekteerimine on tehtav väikeettevõtete poolt. See omakorda tähendab, et Eestis suudetakse finantseerida arendusi, mis on olulised **näiteks küberturvalisuse valdkonnas ja laiendavad Eesti konkurentsivõimet** kõrgtehnoloogilise IKT valdkonnas. Uudsete kiibitehnoloogiate arendus ise on siiski investeeringumahukas (laboriseadmestik 10+ miljonit eurot, pikaaegne tegevus), nõudes selget visiooni panustajatelt.

Majanduslikult realistlik on teostada teatud etappe uudsete kõrgtemperatuursete pooljuhtseadiste tootmisel. Sellised on näiteks aluskristallide tootmine (tootmisinvesteering alla kümne miljoni), mis rahuldab turu kiirelt kasvavat nõudlust ja laiendab Eesti konkurentsivõimet kasumliku kõrgtehnoloogilise tootmise valdkonnas. Ka orgaaniliste kiipide tootmine ise nõuab siiski väga mahukaid alginvesteeringuid ja tootmismahutusi, mis on Eesti kontekstis kättesaamatu.

Muud mõjutatud valdkonnad

- Kosmosetehnoloogia – tõhusamad ja usaldusväärsemad kosmosetehnoloogiad, näiteks kergemad ja vastupidavamad materjalide kosmosesõidukite jaoks.
- Riide- ja moetööstus – targad riided, temperatuuri reguleerimine ja biomeetriline jälgimine.
- Kriminallistika ja kohtuekspertiisi analüüs - Nanosensoreid ja nanoskaalalisi kujutamismeetodeid on võimalik kasutada kuriteopaigas esinevate DNA, keemiliste ühendite ja muude ainete jälgede tuvastamiseks. Sardüsteeme ja nanokiipe saab kasutada ka füüsiliste tõendite, näiteks sõrme- ja jalajälgede analüüsi parandamiseks. Nanoskaalal pildistamise meetodid võimaldavad tõenditest kõrgema resolutsiooniga pilte, mis omakorda võimaldab täpsemaid võrdlusi ja tuvastusi. Lisaks saab sardüsteemide ja nanokiipide abil arendada uusi materjale ja tehnoloogiaid, mida kasutatakse õigus- ja kohtuekspertiisi jaoks, näiteks täiustatud andureid keemiliste ja bioloogiliste mõjurite avastamiseks või uusi materjale kaitsevarustuses.
- Täielikult ühendatud transpordisüsteem – sardüsteeme ja nanokiipide abil saab luua tõhusaid ja ohutuid autonoomseid sõidukeid, mis suudavad ohutult liikuda keerulistes liiklusolukordades. Nanokiipide integreerimisega sõidukitesse oleks võimalik luua täielikult ühendatud transpordisüsteem, mis võiks oluliselt vähendada liiklusummikuid ja parandada liiklusohutust.

ARENGUT TOETAVAD JA ARENGUST MÕJUTATUD TEHNOLOOGIAD

Tehnoloogiad, mille areng mõjutab sardüsteemide ja kiibitehnoloogiate läbimurret:

- Masinõpe (mõlemasuunaline positiivne mõju)
- Pooljuhtkeemia

Valdkonnad ja tehnoloogiad, mida mõjutab läbimurre sardüsteemide ja kiibitehnoloogiates:

- Rakuinseneeria/geenitehnoloogia ja biorafineerimine
- Materjaliteadus
- Vesinikutehnoloogia
- Energeetika ja vesiniku tootmine
- Kriminallistika
- Tehisliha tootmine ja käitlemine

TEHNOLOGIASUUNAGA TEGELEVAD TÄHTSAMAD EESTI ETTEVÕTTED JA TEADUSASUTUSED

- Selfdiagnostics OÜ – meditsiiniliste kiiplaborite arendaja

- Analoogdisaini AS - mikroskeemide tellimuspõhine arendaja
- LightCode Photonics OÜ - 3D kaameratehnoloogia arendaja
- Testonica Lab OÜ- TalTechi irdettevõtte, tegeleb pooljuhtseadmete tarkvaralise testimisega
- GScan OÜ – osakeste sensortehnoloogia arendaja
- Evikon MCI OÜ – sensorseadmete arendaja
- Artec Design OÜ, Hedgehog OÜ, Superhands OÜ, Krakul OÜ, AS Bercman Technologies, Kõu Mobility OÜ, Rantelon OÜ - sardsüsteemide väljatöötajad koostude tasemel
- Ericsson Eesti AS, GPV Estonia AS, Eolane Tallinn AS, TTI Electronics OÜ (Teledyne), Note Pärnu OÜ - erinevaid kiipe kasutavad kohalikud elektroonikaseadmete tootjad
- Tallinna Tehnikaülikooli Arvutitehnika instituut – digitaalkiipide töökindlus (prof Jaan Raik), kloonimis- ja kopeerimisvastased tehnoloogiad (prof Samuel Pagliarini)
- Tallinna Tehnikaülikooli T.J. Seebecki nimeline elektroonikainstituut - kiipide ja sensorkomponentide instrumenteeritud katsetamine
- Tartu Ülikooli Arvutiteaduse instituut - hajussüsteemide õppetooli uurimisrühmad



6. TEHISINTELLEKT JA MASINÕPE

TEHNOLOOGIA LÜHIKIRJELDUS

Tehisintellekt (ingl. keeles *Artificial Intelligence* ehk AI) on inimintellekti protsesside simuleerimine masinate, peamiselt arvutisüsteemide abil. Masinõpe on tehisintellekti liik, mis tõstab arvutustulemuste prognoosimise täpsust, ilma et arvuteid oleks selleks spetsiaalselt programmeeritud. Masinõppe algoritmid kasutavad väljundväärtuste ennustamiseks varasemaid andmeid.

Olgugi, et nii AI kui masinõpe on tehnoloogiad, mida tuntakse aastakümneid, saabus esimene tõeline läbimurre viimasel kümnendil seoses nn süvamasinõppe ja süvanärvivõrkude, mis sisaldavad suurt arvu neuronite (tehisnärvirakkude) kihte, ilmumisega. Süvanärvivõrgud said reaalsuseks peamiselt tänu saadaval oleva arvutusvõimsuse tohutu kasvuga olles seega otseselt seotud kiibitehnoloogia arenguga. Jätkuarendused toimuvad nii tsentraliseeritud pilvepõhise tehisintellekti vallas kui ka tehisintellekti rakendamisel andmete tekkekohas (servarvutus ehk ingl. keeles *edge computing*; hajusarvutus ehk ingl. keeles *fog computing*), mis on energiasäästlikum, sageli töökindlam ning kasvab sektorina kiiremini⁹⁰.

Masinõppe ja tehisintellekti kasutamine on vältimatu suurandmete analüüsis, mille olulise näitena tuleb esile tuua populatsiooni tervise- ja geeniandmestikku, tegevuste planeerimisel ja anomaaliate käsitlemisel transpordi-, energeetika- ja tööstussektorites (Tööstus 4.0), pildituvastuses ja -töötuses sektorite üleselt (tervishoid, transport, tööstus, metsandus ja põllundus).

Tööstus 4.0 kasutuselevõtu toetamiseks on vaja tugevdada sidemeid teadusasutuste ja ettevõtete vahel, edendades koostööd, läbi viia ühiseid uurimisprojekte ja tööstusharude vajadustele kohandatud koolitusprogramme. Samuti on oluline toetada ettevõtteid nende digitaalsel ümberkujundamisel, pakkudes neile rahalisi stiimuleid, erikoolitust ja toetust kõrgtehnoloogiate kasutuselevõtuks.

Tehisintellekti algoritme on rakendatud väga laias hulgas rakendustes, nagu personaalne ostlemine, tehisintellekti-toega assistendid, pettuste tuvastus, häälabilised, isikupärastatud õpe, autonoomsed sõidukid, jne. Masinõpet kasutav pildianalüüs annab oma panuse toodete taaskasutusse, mis võimaldab

⁹⁰ <https://embeddedcomputing.com/technology/iot/edge-computing/edge-ai-is-overtaking-cloud-computing-for-deep-learning-applications>

kestvustoodete teise ja kolmanda ringi taaskasutust. Näiteks Eestis on laiatarbeelektronika seadmete taastamine 200 miljoni eurose käibega sektor. Masinõpe on oluline turvalduskonnas, mis ei piirdu ainult turvakaamerate salvestiste automaatanalüüsiga, vaid aitab tuvastada ka ründeid arvutivõrkudes. Hulk erinevaid rakendusi on piloteeritud Eesti Tehisintellekti- ja robotikakeskuse AIRE demoprojektides⁹¹.

Viimasel ajal on rakenduste ring pidevalt kasvanud ning hiljutised läbimurded suurendavad oluliselt tehisintellekti jaoks sobivate rakenduste ringi.

Masinõpe on oluline keeletehnoloogias, kus toimus viimase aasta jooksul keelemudelite ChatGPT 3.5 ja 4.0 loomise näol OpenAI arenduskeskuse poolt oluline läbimurre. Internetis sisalduva teksti baasil treenitud keelemudel kasutab süvamasinõppe algoritme loomuliku keele teksti mõistmiseks ja genereerimiseks. ChatGPT on loodud inimeste vestluse simuleerimiseks ja kasulike vastuste pakkumiseks, muutes selle kasulikuks tööriistaks mitmesuguste rakenduste jaoks nagu klienditeenindus, tõlge ja üldine teabeanalüüs.

Samal ajal ei saa antud uuringus intervjueritud teadlaste sõnul tehisintellekti puhul laiemalt rääkida ühest murrangust, vaid viiest-kuuest. 15 aasta jooksul nimetatakse ajalooliste andmete analüüsist ja prognoosimist, masintõlkeid, autonoomseid sõidukeid, pildi- ja videotöötlust, kõne muutmist tekstiks ning vestluseid ja keelemudeleid. Teisisõnu on väga arvestatav osa tehisintellektis jõudnud piisava küpsusastmeni, et seda saab rakendada horisontaalsetes valdkondades.

Eestil on ette näidata häid tulemusi väikekeelte töötamise (nii süntees kui kõnetuvastus) valdkonnas piiratud treeningandmestiku baasil⁹². Loomuliku kõne tuvastus on käesoleval hetkel oluline motivaator efektiivsete spetsialiseeritud masinõppekiipide ja algoritmide välja töötamisel. Samal ajal on arvestatav tehisintellekti võimekus (4-8 teraoperatsiooni e matemaatilist tehet, TOPS) kättesaadav praktiliselt igas kaasaegses mobiiltelefonis, mis võimaldab näiteks reaalajas videosignaali analüüsi.

Samas on tehisintellekti laiemal rakendamisel endiselt palju tehnilisi takistusi ning üldnimetatud läbimurded põhjustavad ka mitmeid uusi eetilisi ja juriidilisi probleeme, mille lahendamist koordineeritakse Euroopa Liidu tasandil⁹³. Lisaks vaevab võimsamaid masinõppe lahendusi aina kasvav vajadus ressursinälg, mis väljendub üha kasvavas ökoloogilises jalajäljes.

Tehisintellekti ja masinõppe globaalne turumaht 2022. aastal oli 150 miljardit eurot.

MILLISE TÄNASE PROBLEEMI SÜVATEHNOLOOGIA LAHENDAB?

Automatiseerimine ja tõhusus: Tehisintellekt toetab inimesi ja arvuteid otsuste tegemisel ning suurendab protsessi kiirust, täpsust ja tõhusust. Erinevalt traditsioonilisest arvutimudelist, mis toetub samm-sammuliste algoritmidele, töötavad masinõppe algoritmid sarnaselt inimese ajule, õppides ning tehes üldistusi suure hulga näidete põhjal. Ehk teisisõnu võimaldab masinõpe lahendada probleeme, mis „tavaarvuti“ jaoks on rasked, kuid inimese jaoks suhteliselt lihtsad. Samas on tehisintellekt seoses arvutustehnika jõudluse kasvuga muutunud mitmes rakenduses inimesest kiiremaks ja täpsemaks.

⁹¹ <https://aire-edih.eu/teenus/demoprojektid/>

⁹² Alumäe, Tanel, and Jiaming Kong. "Combining Hybrid and End-to-End Approaches for the OpenASR20 Challenge." In Interspeech, pp. 4349-4353. 2021.

⁹³ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/coordinated-plan-artificial-intelligence-2021-review>

Ülevaate enim rakendust leidvatest masinõppe arvutusmeetoditest võib leida tehnilisest raportist ISO/IEC TR 24372⁹⁴.

Andmeanalüüs ja mustrite tuvastamine: Populaarseimad süvamasinõpet teostavate süvanärvivõrkude hulka kuuluvad konvolutsioonilised närvivõrgud (ingl. keeles *Convolutional Neural Networks* ehk *CNN*) ning rekurrentsed närvivõrgud (ingl. keeles *Recurrent Neural Networks* ehk *RNN*). Konvolutsiooniliste võrkude peamiseks kasutusvaldkonnaks on pildituvastus, mida kasutatakse näotuvastuse, meditsiinilise pildianalüüsi, dokumentide analüüsi, autonoomsete sõidukite ja biomeetrilise autentimise puhul. Rekurrentne närvivõrk on tehisanärvivõrkude klass, mis võimaldab närvivõrgul ära tunda mustreid andmejadades. Seega on nende rakendusvaldkonnaks kõnetuvastus, masintõlge, anomaaliade tuvastus ajajadadest, meditsiiniliste signaalide analüüs, jne. Uuemate tehnoloogiate hulka kuuluvad hübriidsed AI lahendused, mis kombineerivad masinõpet näiteks reeglitega (ingl. keeles *neurosymbolic AI*), vms, mille tulemused on lihtsamini prognoositavad ja/või juhitavad.



Teadlased toovad tehisintellekti ning laiema veebitehnoloogia arengu juures paralleelsele 2000ndate alguse seisuga. Võrreldes toonasega ei ole Eestis välja töötatud arenemiseks vajalikku raamistikku, nagu oli tehtud X-tee ja interneti laiema kasutusele võtmise puhul.

Anomaaliade tuvastamine: Tehisintellekti kontekstis kasutatakse suurtes andmekogumites anomaaliade automaatseks tuvastamiseks sageli masinõppe algoritme. See on eriti kasulik valdkondades nagu finantsvaldkond, küberturvalisus, tööstuslike seadmete seisundi seire ja tervishoid, kus ebatavaliste mustrite tuvastamine võib aidata ennetada võimalikke probleeme, parandada süsteemi jõudlust ning tagada tegevuse turvalisust ja julgeolekut.

Isikupärastamine: Masinõppe algoritmid saavad tuvastada mustreid, anda soovitusi ja kohandada sisu või pakumisi dünaamiliselt vastavalt individuaalsetele eelistustele. Sellist lähenemisviisi kasutatakse juba täna laialdaselt veebipoodides, sisu soovitusüsteemid (nagu Netflix või Spotify) ja personaliseeritud turunduses, ent potentsiaal peitub ka suuremates valdkondades nagu personaalmeditsiin, tervisekäitumine või haridus ja õppeprotsessid.

LÄBIMURDED JA NENDE EELDUSED

Suuremad läbimurded süvanärvivõrkude ja uute, üldiste keelemudelite näol on juba eelnevalt lühidalt nimetatud. Samas on lahendamata hulk probleeme ja takistusi, mis hetkel tehisintellekti veelgi ulatuslikumat levikut piiravad. Peamised neist on kirjeldatud järgnevalt:

1) Seletav tehisintellekt (ingl. keeles *Explainable AI* ehk *XAI*), mis oleks suuteline selgitama enda langetatud otsuseid.

XAI laiendatud valdkond on juhitav tehisintellekt (ingl. keeles *Controllable AI*) ja positiivselt kallutatud tehisintellekt (ingl. keeles *positive machine learning alignment*), mille eesmärgiks on vältida ebasobivate õpitulemite tekkimine (ohtlikud ja vaenavad tulemused, plagiaat).

Seletav tehisintellekt tegeleb masinõppes rakendatavate nn „musta kasti“ algoritmide probleemiga. Selliste algoritmide puhul on kõik parameetrid ja ka algoritm teada, kuid pole võimalik intuiitselt mõista, kuidas antud tulemuseni jõuti. Õpetamisprotsessi käigus kohandatakse miljoneid parameetreid (närvivõrgu kaale), kuid neid ei suudeta suuremale pildile tagasi tuua. Seega ei saa enam selgitada seoseid selle vahel, miks kaaludel on teatud väärtused ja kuidas need üldiselt mudelisse panustavad. Seletava tehisintellekti peamine eesmärk on selgitada otsustusprotsessi lõpptarbijale tõstes sellega ennustusprotsessi usaldusväärsust. Välja on töötatud hulk erinevaid seletava tehisintellekti tehnoloogiaid, kuid piisavalt häid ja universaalseid lahendusi veel ei eksisteeri.

Tänaseks välja töötatud seletava tehisintellekti meetodid võib jagada olemuslikeks (ingl. keeles *intrinsic*) ja post-hoc meetoditeks. Neist esimesed tuletavad selgituse vahetult mudelist ning teised analüüsivad

⁹⁴ <https://www.evs.ee/et/iso-iec-tr-24372-2021>

modelit peale selle õpetamisprotsessi. Samuti võib eristada globaalseid meetodeid, mis kirjeldavad kogu mudeli käitumist ning lokaalseid meetodeid, mille objektideks on konkreetsed ennustused. Seletavat tehisintellekti on juba rakendatud mitmel alal, peamiselt meditsiini valdkonnas, kuid oluliseks probleemiks on asjaolu, et väljapakutud seletavaid meetodeid pole piisavalt valideeritud ega hinnatud ning seega puudub usaldus ja kindlus nende kvaliteedi suhtes⁹⁵. Seletatav tehisintellekt on kasutatav eelkõige väga struktureeritud andmete peal ning läbimurre saab tekkida struktureerimata andmete või piltide pealt.

Potentsiaalsed arengud võivad olla:

- algoritmilised – näiteks edasiarendatud mudelite tõlgendamismeetodites nagu SHAP;
- mudelite lihtsustused, mille eesmärk on vähendada tehisintellekti mudelite keerukust, ilma et see oluliselt kahjustaks nende jõudlust, muutes need kättesaadavamaks ja tõlgendatavamaks. See võib hõlmata lihtsamate arhitektuuride kavandamist, regulariseerimistehnikate kasutamist, et vältida liigset kohandamist, või mudelite destillatsioonimeetodite kasutamist, et suruda suuremad mudelid väiksemateks, paremini hallatavateks mudeliteks. Lihtsustatud mudelid säilitaksid ideaalis keerukate mudelite täpsuse, olles samas inimestele paremini mõistetavad ja tõlgendatavad.
- Inimese-tehisintellekti suhtlus, näiteks nn *human-in-the-loop* süsteemid ehk tehisintellekti süsteemid, mis sisaldavad inimese sisendit, tagasisidet või järelevalvet oma töö lahutamatu osana. Selle asemel, et ülesanne täielikult automatiseerida, on inimene kaasatud otsustusprotsessi, võimaldades tal tehisintellekti süsteemi väljundit korrigeerida, valideerida või anda sellele konteksti. Selline lähenemisviis aitab tagada, et tehisintellekti süsteemid jäävad vastutavaks, läbipaistvaks ja inimväärtustega kooskõlas olevaks. Inimese kasutatav süsteem võib olla eriti kasulik olukordades, kus tehisintellekti süsteemi väljund on ebakindel või kui käsitletav probleem nõuab inimese teadmisi või otsustusvõimet.

Seletatava tehisintellekti puhul on autonduse valdkonnas jõutud kuni tasemeni TRL 7.

2) “Roheline” tehisintellekt

Efektiivsed masinõppe lahendused nõuavad õppeks suuri andmemahute ja energiakulu, seda eeskätt loova tehisintellekti (ingl. keeles *Generative AI*) kontekstis. Edasise arengu eelduseks on jätkuv efektiivsemate andmemudelite ja meetodite loome. Üheks lahenduseks on ka väikeandmetel (ingl. keeles *small data learning, one-shot learning*) baseeruvate masinõppealgoritmide edukas realiseerimine. Tehnoloogia on kasulik servarvutuse kontekstis.

Tänapäeva võimsad süvamasinõppel põhinevad tehisintellekti meetodid kulutavad, eriti õppe- ja optimeerimisprotsesside käigus, märkimisväärsel hulgal elektrienergiat. ChatGPT-3 – mis on aruande seisuga viimasest neljandast mudelist selgelt vähem võimekas mudel – treeningprotsess kulutas umbes 400 keskmise Eesti majapidamise aastase elektri hulga.⁹⁶

Süvamasinõppel tuginevates rakendustes on toimunud andmemahu hüppeline suurenemine, mis on põhjustatud miljarditest servarvutusseadmetest (2025. aastaks kuni 30,9 miljardit seadet), mis on 2025. aastaks omakorda eeldatavasti loonud üle 175 ZB (1 ZB $\approx 10^{21}$ baiti) andmeid⁹⁷. Sellises mastaabis tehisintellekti mudelite kasutuselevõtt avaldab tohutut negatiivset mõju keskkonnale.

Viimasel ajal on populaarseks muutunud automaatsed süvanärvivõrkude genereerimise ja optimeerimise meetodid koondnimega võrguarhitektuuriotsing (ingl. keeles *Network Architecture Search ehk NAS*). Hinnanguliselt võib ühe tehisintellekti mudeli projekteerimine võrguarhitektuuriotsingu abil tekitada kuni 284 019 kg CO₂ heitkoguseid, mis on ligikaudu võrdne viie auto kogu eluea süsinikuheitega⁹⁸. Samuti on leitud, et automaatse kõnetuvastusseadmete tarkvara treenimine on efektiivsuse tõustes väga energiakulukas, kui *state-of-the-art* kõnetuvasti kulutas 50% treenimisele kulunud energiast, et saavutada

⁹⁵ AM Groen, et al. A systematic review on the use of explainability in deep learning systems for computer aided diagnosis in radiology: Limited use of explainable AI? - European Journal of Radiology, 2022

⁹⁶ <https://towardsdatascience.com/the-carbon-footprint-of-chatgpt-66932314627d>

⁹⁷ SAE, “Artificial intelligence in aviation,” SAE Standardization Committee G-34. [Online]. Available: <https://www.sae.org/works/committeeHome.do?comtID=TEAG34> [Accessed: July 15, 2020].

⁹⁸ EUROCAE, “Artificial Intelligence,” European Organisation for Civil Aviation Electronics, Working Group WG-114.

lõpliku veamäära 0,3% suurune vähenemine⁹⁹. Teisisõnu ollakse ekspertide sõnul hetkel veel väga kaugel tõhusate ja energia-efektiivsete tehisintellektilahenduste loomisest.

Ka projekti käigus intervjuueeritud teadlased tõid esile, et „roheline“ tehisintellekt on miski, mis saab juhtuda orgaaniliselt kogu tehnoloogia arengu hilisemas faasis ning mitte praegusel hetkel kiire arengufaasi käigus. Teisisõnu prognoositakse enne tehnoloogia sisulist edasiarendust ning alles seejärel tehisintellekti enda energiaefektiivsuse tõusu. Tarvilik on nii taastuvenergia jätkuv ja suurenev kasutus andmekeskustes, andmekeskuses, säästlikumad jahutussüsteemid ja -tehnoloogiad, läbimurded väikeandmetel baseeruv masinõppes, riistvara- ja tarkvarainnovatsioon algoritmiliste arengute läbi (näiteks SNN, sündmuspõhised õppimisalgoritmid¹⁰⁰, ingl. keeles *swarm intelligence models* jpm). Sellised tarkvaralahendused võivad olla näiteks lihtsustatud mudelite kasutamine, täiustatud tõlgendamismeetodid või andmete „hõredust“ arvestavad tehnikad. Rohelisema kasutusega käib kaudselt kaasas ka tehisintellekti sihtotstarbeline kasutamine, nagu oleks tehisintellektil tuginev LCA¹⁰¹, automatiseeritud süsinikjalajälje monitooring või tehisintellektil põhinev keskkonnajalajälje ennustamine.

Nagu näitavad eelpool toodud arvud, ollakse hetkel veel väga kaugel tõhusate ja energia-efektiivsete tehisintellektilahenduste loomisest, kuid arvestades rohepöörde olulisust, võib eeldada iteratiivset tehisintellekti arhitektuuride edasiarendust. Servarvutused, väikeandmetel baseeruv masinõpe ja *one-shot-learning* ja senisest kompaktsemate mudelite välja töötamine panustavad rohelise tehisintellekti arengusse.

3) Tehisintellekti rakendamine servarvutuses ja vastavate riist- ja tarkvarakomponentide masskasutus. Lähiaastatel on oodata servarvutusseadmete plahvatuslikku levikut. Näiteks tehisintellekti massiline rakendamine 5G/6G mobiilsidega kaasuv MEC (ingl. keeles *Multi-Access Edge Computing*) tehnoloogias, autonoomsetes sõidukites, personaalsetes tervise ja heaolu seadmetes. Nendele seadmetele on iseloomulik äärmiselt ranged nõudmised energiatarbele, mis on vastuolus süvamasinõppe äärmiselt energiakuluka lähenemisega.

Seega kasutatakse servarvutuses masinõppe jaoks sobivaid riistvaralisi akseleraatoreid nagu graafikaprotsessorid (GPU), Google'i tensorprotsessoreid (TPU) ning ka spetsiaalseid konkreetse võrguarhitektuuri jaoks projekteeritud kiipe. Lisaks rakendatakse mahu- ja energiaefektiivset arvude kodeerimist (nt kvantiseerimist ujupunkt arvude asemel). Valdonnas ei ole ilmselt oodata üht revolutsioonilist läbimurret vaid pigem pidevat evolutsiooni tehisintellekti akseleraatorite arhitektuuride edasiarendamisel. Tarvilik on siiski liitõppe ehk *federated learning*¹⁰² algoritmide jätkuv arengud, mis võimaldavad suurendada andmeturvalisust arvutusvõimsuses ja -täpsuses kaotamata¹⁰³.

Alatehnoloogia: Neuromorfsete jt mitteklassikaliste masinõppealgoritmide toetus mikrokiipidel (vt ka ptk 5 „Sardsüsteemid ja kiibitehnoloogiad“)

Sellised masinõppealgoritmid võimaldavad energiaefektiivsete masinõppelahenduste realiseerimist, näiteks asjade interneti rakendustesse. Samuti memristoride, analoog- ja hübriidtehnoloogias masinõpet teostavate kiipide realiseerumine, mis vähendab kiipide energiakulu hinnanguliselt kaks suurusjärku.

⁹⁹ Parcollet, T., & Ravanelli, M. (2021). The energy and carbon footprint of training end-to-end speech recognizers.

¹⁰⁰ SNN – *spiking neural networks*. Traditsioonilistes tehismärgivõrkudes töötlevad neuronid teavet pidevalt, edastades signaale teistele neuronitele. Seevastu SNN korral jälgendatakse bioloogiliste neuronite käitumist, edastades teavet diskreetsete impulsside kujul. Sündmuspõhised õpialgoritmid on loodud spetsiaalselt spiking-neuronvõrkude jaoks. Selle asemel, et töödelda teavet pidevalt, õpivad ja kohanevad need algoritmid diskreetsete sündmuste või sisendandmete muutuste alusel. Selline lähenemisviis võib viia tõhusama õppimiseni, kuna algoritmid töötlevad teavet ainult siis, kui see on vajalik, mitte ei uuenda seda pidevalt.

¹⁰¹ Elukaare hindamine

¹⁰² Liitõpe on hajutatud masinõppe lähenemine, mis võimaldab mudelite treenimist detsentraliseeritud andmetel ilma privaatselt teavet jagamata. See ei nõua andmevahetust kliendiseadmetest globaalsesse serveritesse. Selle asemel kasutatakse servarvutusseadmeid toorandmeid mudeli treenimiseks kohapeal, mis suurendab andmete privaatsust.

¹⁰³ Nilsson, A., Smith, S., Ulm, G., Gustavsson, E., & Jirstrand, M. (2018, December). A performance evaluation of federated learning algorithms. In Proceedings of the second workshop on distributed infrastructures for deep learning (pp. 1-8).

Neuromorfsete kiipide, eelkõige memristori, arendamine kiirendab digitaalset üleminekut tööstus 4.0 digitaalse ülemineku kiirendamiseks¹⁰⁴. Aju jäljendavad neuromorfsete kiibid pakuvad suuremat energiatõhusust ja paremat jõudlust, edendades seeläbi tehnoloogilist innovatsiooni. Seetõttu on oluline investeerida nendesse algatustesse, soodustades teadus- ja arendustegevust, et arendada välja kindel ökosüsteem. Neuromorfsete kiipide kasutusele võttes võiks tööstus 4.0 saada kasu kiiremate, arukamate ja vähem energiat tarbivate arvutisüsteemidest, mis oleks energiasäästlikumad. Need kiibid võimaldavad tihedamat integratsiooni arvutuste ja andmesalvestuse vahel, vältides protsessori ja mälu vahelisi kommunikatsiooni puudujääke, mis on iseloomulikud traditsioonilistele Von Neumanni arvutisarhitektuuridele. Neuromorfsete kiipide teadus- ja arendustegevuse edendamisega oleks võimalik stimuleerida tehnoloogilist innovatsiooni, edendada Eesti konkurentsivõimet tööstus 4.0 sektoris ning aidata kaasa üleminekule säästvamale ja energiatõhusamale majandusele. Neuromorfsete tehnoloogiatega juba tegelevate Euroopa juhtivate ettevõtete (Infineon Technologies AG, Robert Bosch GmbH, Imec, Magis Design) eeskujul tuleks Eestis edendada neuromorfsete kiipide valmistamist, mis põhineb MRAM- või spintroonikapõhistel püsimäludel.

Lisaks võib nimetada mittetehnoloogilisi takistusi, mis on peamiselt eetilist ja juriidilist laadi ning tehnoloogilisi, mis on seotud turvalisuse ja töökindluse (sertifitseeritavuse) aspektidega. Kõigis nimetatud punktides on tõenäoline saavutada läbimurre lähima 5-10 aasta perspektiivis.

MIS TAKISTAB LÄBIMURRET?

Tehnilise poole pealt pidurdab tehisintellekti veelgi suuremat läbimurret valdavalt rakendatavatel masinõppel põhinevate lahenduste piirangud nagu ala- ja üleaproksimeerimine ning vajadus suurte andmemahutude järele. Samuti on tehisintellekti lahendustel probleeme turvalisuse ja töökindluse aspektidega, mis takistavad näiteks nende sertifitseerimist ohutuskriitilistes rakendustes.

Samas tuleb tõdeda, et tehisintellekti peamised takistused on siiski paljuski eetilist ning juriidilist laadi ning on tingitud nende suhtelises hiljutises kasutuselevõtus. Sellest tulenevalt puuduvad Euroopa Liidus hetkel vajalikud regulatsioonid ja konventsioonid, mis oleksid hädavajalikud tehisintellekti tõhusamaks rakendamiseks mitmetes eluvaldkondades.

Nii valdkonna arenduspotentsiaali kui ärilises pooles rakendamise näol tuuakse esile tuuakse andmete sisulist kvaliteeti ja nende kättesaamise keerukust. Ärilise ja tööstuslikkuse küsimuses tõstatatakse ka organisatsioonikultuuri tähtsust, kui just juhtide tasemel on sagedasti tajutav tõrge tehisintellekti laiemaks kasutuselevõtuks.

Teatud takistused seletava ja juhitava tehisintellekti valdkonnas ületatakse suurel määral tõenäoliselt lähima 5-10 aasta jooksul. Ennustusprotsessi täpsuse ja energiakulukuse probleemide lahendamine vajavad ilmselt pikemat aega ning nõuavad põhimõtteliselt uute mudelite kasutuselevõttu.

Eesti kontekstis toovad teadlased tehisintellekti arengu juures paralleele laiema veebitehnoloogia kiire levikuga 2000ndate alguse seisuga. Erinevuseks peetakse, et võrreldes toonasega ei ole Eestis tehisintellekti puhul juba ennetavalt välja töötatud arenemiseks vajalikku regulatsioone, nagu oli tehtud X-tee, e-valitsemise ja veebirevolutsiooni puhul. Toonase edu üheks võtmeks oli raamistiku olemasolu, mille peale koostati müügiplaan. Eestile konkurentsieelise tekkimisel soovivad teadlased avalikul sektoril hoida laiemat pilti ja paindlikkust vs. panustada keskselt ühele läbimurdele. Keskse põhimõttena tähtsustatakse, et valdkonnad (näiteks tervishoid) saaks ise saaks otsustada, mis oleks nende valdkonnas suurema mõjuga investeering.

MÕJUTATUD VALDKONNAD

Tehisintellekti rakendatakse juba täna pea **kõigis eluvaldkondades**. Olulisemad ülesanded, mille puhul tehisintellekti ja masinõpet praegu rakendatakse on teenuste optimeerimine (27%), toodete ja nende funktsionaalsuse täiustamine (22%), ennustav teenindus ja sekkumine (18%), klienditeeninduse analüüs (17%), uute tehisintellekti-põhiste toodete (sh materjalide) arendamine (17%), klientide segmenteerimine

¹⁰⁴ S. Dos Santos and S. Furui, "A memristor based ultrasonic transducer: The memosducer," 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Tours, France, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ULTSYM.2016.7728885.

(16%), riskianalüüs (16%), pettuste ja võlgnevuste analüüs (14%).¹⁰⁵ Nagu eelpool kirjeldatud, kipub tehisintellekti rakendustel sageli olema märkimisväärne keskkonna jalajalg energiatarbe mõttes. Seega on oluline panustada nn energiasäästliku „roheline“ tehisintellekti arendamisse, eeskätt arvutusefektiivsete meetodite arendamise teel. Tehisintellekt tuleb muuta vähem ressursi-kulukaks ning samuti tuleb seda rakendada keskkonna probleemide uurimisel

Keskkond ja rohepööre

Tehisintellekti ja masinõppe kasutuselevõtul on suur potentsiaal vähendada keskkonnamõjusid, optimeerides energiatarbimist, parandades jäätmekäitlust ja võimaldades tõhusamaid transpordisüsteeme. Tehisintellekt võib märkimisväärselt edendada roheline innovatsiooni arengut ning keskkonnateadlike otsuste vastuvõtmise toetamist. Ressursside nappus toob kaasa masinõppe üha suurema kasutuse, et säästa energiat, aega ja ressursse ning vältida raiskamist.

Tehisintellekti saab kasutada, et edendada Euroopa roheleppe eesmäärke¹⁰⁶. Tehisintellekt ja masinõppe võivad aidata kaasa rohepöördele, parandades energiasüsteemide, transpordivõrkude ning muude tööstusharude tõhusust ja jätkusuutlikkust. Läbi erinevate optimeerimise protsesside vähenevad kasvuhoonegaaside heitkogused ja leevenevad negatiivsed keskkonnamõjud, mis muidu kaasneks.

Tehisintellektil ja masinõppel on oluline roll ressursitõhususe ja -efektiivsuse suurendamisel keskkonna seisukohast. Pakkudes reaajas andmeid ja prognoose, optimeerides logistikat ja transporti ning võimaldades prognoosida vajadusi hoolduse järele, võivad need tehnoloogiad aidata tootjatel ja teistel kasutajatel ressursse tõhusamalt kasutada, seeläbi vähendada jäätmeid ja minimeerida nende keskkonnamõju. Näiteks on välja töötatud tehisintellektil põhinev hindamismudel¹⁰⁷ taastuenergia ja energiatõhususe mõju prognoosimiseks. Kavandatud mudel võib aidata suurendada energiatõhusust 97%-ni ja samuti parandada taastuvate energiaallikate integreerimist. Samuti saab tehisintellekti kasutada energijaotusvõrkude tõhusamaks muutmiseks¹⁰⁸. Nimelt võib see aidata suurendada detsentraliseeritud energijaotusvõrkude töö tõhusust, optimeerides energijaotust anduritest ja muudest allikatest reaajas kogutud andmete põhjal. Näiteks saab masinõppe algoritme kasutada energianõudluse prognoosimiseks ja pakkumise vastavalt reguleerimiseks, tagades energia jaotamise sinna, kus ja millal seda kõige rohkem vaja on.

Energianõudluse prognoosimine hoonetes ja linnaosades on oluline komponent energiakasutuse optimeerimisel ja sellest tulenevalt kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamisel. Küttesüsteemide automatiseerimine hõlmab nutikate andurite ja seadmete kasutamist küttesüsteemide jälgimiseks ja reguleerimiseks reaajas kogutud andmete põhjal. Kasutades nende andmete analüüsimiseks tehisintellekti ja masinõppe algoritme, saab küttesüsteeme optimeerida energiatõhususe tagamiseks, vähendades mugava temperatuuri hoidmiseks vajalikku energiahulka. Näiteks saab masinõppe algoritme kasutada selleks, et ennustada, millal ruumid tõenäoliselt hõivatud on, ja reguleerida kütet vastavalt. Seeläbi tagatakse, et energiat kasutatakse ainult seal ja siis, kui seda vajatakse.

Tehisintellekt võimaldab suurendada tootmisprotsesside efektiivsust automatiseerides teatud ülesandeid, mistõttu suureneb täpsus ja võivad väheneda kulud. Täpsemalt saab masinõppe algoritme kasutada tootmisprotsesside suurte andmemahutude analüüsimiseks, mustrite ja kõrvalekallete tuvastamiseks ning prognoosimiseks. Seeläbi saavad tootjad optimeerida oma protsesse, parandada toodete kvaliteeti ja vähendada jäätmeid. Lisaks saab masinõppe algoritme kasutada energiatarbimise optimeerimiseks,

¹⁰⁵ <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/global-survey-the-state-of-ai-in-2021>

¹⁰⁶ https://www.researchgate.net/profile/Peter-Gailhofer/publication/351747124_The_role_of_Artificial_Intelligence_in_the_European_Green_Deal/links/60a76a8aa6fdcc6d6262ea58/The-role-of-Artificial-Intelligence-in-the-European-Green-Deal.pdf

¹⁰⁷ Chen, Cheng, et al. "Artificial intelligence on economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 47 (2021): 101358.

¹⁰⁸ K. Awahara, S. Izumi, T. Abe and T. Suganuma, "Autonomous Control Method Using AI Planning for Energy-Efficient Network Systems," 2013 Eighth International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications, Compiegne, France, 2013, pp. 628-633, doi: 10.1109/BWCCA.2013.111.

tuvastades energiasäästu võimalused ja kohandades automaatselt seadmete sätteid¹⁰⁹. Keskkonna seisukohast võivad tehisintellekt ja masinõpe aidata vähendada tootmise süsinikujalajälge. Masinõppe algoritmid võivad parandada tootlikkust ja töökindlust tootmisvaldkonnas kuni 41% võrreldes varasema määraga. Tehisintellekti pakutav suurem tõhusus ja optimeerimine võivad kaasa tuua jäätmete, energiatarbimise ja ressursitarbimise vähenemise. Sellel võib olla positiivne mõju keskkonnale, vähendades tootmisprotsesside süsiniku jalajälge.

Tehisintellekti saab nutikas põllumajanduses mitmel viisil rakendada, aidates põllumeestel suurendada saagikust, optimeerida nii vee kui pestitsiidide kasutamist, mis vähendab ühtaegu nii tootmiskulusid kui ka põllumajandamise ökoloogilist jalajälge. Tehisintellekti kasutatakse mulla niiskuse seireks, ilmaennustamiseks, taimede kasvu jälgimiseks, põllukultuuride fenotüüpimiseks, haiguste prognoosimiseks ja kariloomade majandamiseks¹¹⁰, samuti hüdropoonikas¹¹¹ ja aeropoonikas¹¹². Kõigi nende lahenduste rakendamisel kasutatakse erinevaid tööriistu, nagu masinõpe, süvaõpe, pilditöötlus, tehisevõrk ja arvutinägemine¹¹³. Tehisintellekt ja masinõpe võimaldavad ka täppispõllumajandust, mis hõlmab andurite, droonide ja muude tehnoloogiate kasutamist, et suunata ressursse, nagu vesi, väetised ja pestitsiidid, täpselt põllu konkreetsetele aladele. See võib vähendada vajaminevate ressursside koguhulka ning vähendada keskkonnamõju, vähendades äravoolu ja leostumist. Näiteks võiks roboteid kasutada rohimiseks, mis vähendaks keemilise umbrohutõrje vajadust. Tehisintellekti rakendamine mitte ainult ei võimalda väetisi ja pestitsiide tõhusamalt kasutada, vaid piiraks ka nende ainete kuhjumist pinnasesse ning põhjavee reostust. Täppispõllumajanduse lahendusi pakub Eestis näiteks John Deere¹¹⁴. Analüüsides anduritelt, ilmaprognoosidest ja muudest allikatest saadud andmeid, võivad need põllumeestel aidata teha teadlikke otsuseid külvamise, saagikoristuse ja muude põllukultuuride haldamise aspektide kohta, mis lõppkokkuvõttes toovad kaasa suurema saagikuse ja väiksema keskkonnamõju.

Jäätmetekke vähendamine ja käitluse optimeerimine on keskkonna seisukohalt ühed kesksemad teemad. Tehisintellekt saab optimeerida jäätmekäitlust, parandades jäätmete sorteerimise ja kõrvaldamise tõhusust ja täpsust, vähendades prügilasse suunatavate jäätmete hulka ning võimaldades säästvamaid jäätmekäitlustavasid. Üks viis, kuidas tehisintellekt ja masinõpe saavad jäätmekäitlust optimeerida, on anduritest ja kiipidest pärit andmete analüüsimine. See võib aidata jäätmekäitlusettevõtetel optimeerida oma marsruute ja graafikuid, vähendades jäätmete kogumiseks ning veoks kuluvat kütuse ja muude ressursside hulka. Näiteks Eestis on paigaldatud mõnda asulasse nutikad prügikastid ehk nutikastid¹¹⁵, mis räägivad, pressivad ise prügi kokku, loendavad kasti avamisi ja tühjendamisi ning saavad energia päikesest. Tehisintellekt ja masinõpe võimaldavad ka jäätmete täpsemat sorteerimist ja ringlussevõttu, analüüsides prügipilte ja muid andmeid, et tuvastada erinevat tüüpi materjale¹¹⁶. See aitab tagada, et taaskasutatavaid materjale sorteeritakse ja töödeldakse õigesti, vähendades prügilatesse suunatavate jäätmete hulka ja säästes lõpuks loodusvarasid.

Tehisintellekti rakendamine arukas liikluskorraldussüsteemis aitab vähendada liiklusummikuid, parandada õhukvaliteeti ja optimeerida liiklusvoogu¹¹⁷. Lisaks laieneb see ka pidevale järelevalvele ning inimeste

¹⁰⁹ Weichert, D., Link, P., Stoll, A. et al. A review of machine learning for the optimization of production processes. *Int J Adv Manuf Technol* 104, 1889–1902 (2019).

¹¹⁰ F. K. Shaikh, M. A. Memon, N. A. Mahoto, S. Zeadally and J. Nebhen, "Artificial Intelligence Best Practices in Smart Agriculture," in *IEEE Micro*, vol. 42, no. 1, pp. 17-24, 1 Jan.-Feb. 2022, doi: 10.1109/MM.2021.3121279.

¹¹¹ Hüdropoonika ehk vesiaiaandus on meetod taimede kasvatamiseks ilma mullata, kasutades selle asemel mineraalsete toitainete lahuseid.

¹¹² Aeropoonika on taimede kasvatamine õhu- või udukeskkonnas ilma mulla või agregaadiga kasutamiset.

¹¹³ Pathan, Misbah, et al. "Artificial cognition for applications in smart agriculture: A comprehensive review." *Artificial Intelligence in Agriculture* 4 (2020): 81-95.

¹¹⁴ <https://www.deere.ee/et/nutika-pollumajanduse-lahendused/automatiseerimissüsteemid/>

¹¹⁵ <https://rohe.geenius.ee/rubriik/rohetehnoloogia/keila-elanikud-viskavad-prugi-kastidesse-mis-raagivad-inimkeeli-ja-pressivad-jaatmed-ise-kokku/>

¹¹⁶ Gupta, P.K., Shree, V., Hiremath, L., Rajendran, S. (2019). The Use of Modern Technology in Smart Waste Management and Recycling: Artificial Intelligence and Machine Learning. In: Kumar, R., Wiil, U. (eds) *Recent Advances in Computational Intelligence. Studies in Computational Intelligence*, vol 823. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12500-4_11

¹¹⁷ Sukhadia, A., Upadhyay, K., Gundeti, M. et al. Optimization of Smart Traffic Governance System Using Artificial Intelligence. *Augment Hum Res* 5, 13 (2020).

turvalisuse ja ohutuse tagamisele¹¹⁸. Liiklusvoo optimeerimine aitab vähendada kütusekulu, minimeerida sõidukite liikluses tühikäigul veedetud aega ja seeläbi vähenevad heitkogused ja paraneb õhukvaliteet linnapiirkondades. Samuti kasutatakse nutikaid ülekäiguradasid ning liiklusmärke õnnetuste ennetamiseks.

Detailse ja korraliku olulusringi hindamise teostamine on kallid, aeganõudev ja selleks on vaja töödelda suur hulk andmeid¹¹⁹. Tehisintellekt aitaks läbi viia olulusringi hindamist, analüüsides tohutuid andmehulki keskkonnamõtjude kohta ja selgitades välja valdkonnad, kus oleks võimalik teha parandusi. On leitud, et masinõpe on kasulik tööriist olulusringi hindamise protsessi teatud aspektides, nagu optimeerimise stsenaariumite välja töötamine ja "mis oleks, kui" stsenaariumite genereerimine¹²⁰. Näiteks saab tehisintellekti kasutada tootmisprotsessi kõige olulisemate keskkonnamõtjude tuvastamiseks ning masinõpe võib aidata protsessi optimeerida, et neid mõjusid vähendada. Samamoodi saab tehisintellekti ja masinõpet kasutada ökoloogilise jalajälje leidmiseks, mis näitab üksikisiku mõju keskkonnale tema tarbimisharjumuste ja elustiili valikute põhjal. Analüüsides andmeid energiakasutuse, transpordi ja tarbimisharjumuste kohta, saab tehisintellekti ja masinõppe abil tuvastada valdkonnad, kus üksikisikud saavad oma keskkonnamõju vähendada, ning pakkuda personaalseid soovitusi säästvamate valikute tegemiseks.

Suures plaanis aitab tehisintellekt kaasa keskkonnahoiule, nutikate lahenduste kasutamisele, energia tõhususe saavutamisele ja jäätme tekke vältimisele läbi andmetöötluse ja erinevate protsesside optimeerimise, mille tulemusena väheneb nii õhu-, vee-, või pinnasereostus. Samuti avaldub positiivne mõju keskkonnale väiksema ressursikulu või tõhusama (taastuvate)ressursside kasutamise näol. Kuigi tehisintellekti ja masinõppe kasutamine toovad kaasa mitmeid pigem positiivseid tagajärgi, siis tuleb arvestada ka nende otsese keskkonnamõtjuga kasvuhooonegaaside emissioonide näol^{121,122}. Tehisintellekti ja masinõppe töökoormus on järsult tõusnud tänu arvutusvõimsuse ja andmemahutude tohutule kasvule, mis tekitab muret nende ökoloogiline jalajälje pärast. Samas prognoositakse, et kui kogu valdkond kasutaks parimaid tavasid, siis 2030. aastaks väheneks tehisintellekti ja masinõppe algoritmide koolitamisest tulenev CO₂ kogus¹²³.

Julgeolek

Turvalise tehisintellekti temaatika on järjest kasvav uurimissuund. Masinõppe algoritmid nõuavad pidevat isikuandmete voogu, mis toob kaasa privaatsusküsimusi, kuna kasutajad peavad tavaliselt jagama neid andmeid väljaspool oma territooriumi. Kuigi tehisintellektile mõeldes tulevad esimesena mõttesse erinevad võimalikud probleemid privaatsusega, siis teisalt on võimalik privaatsust läbi tehisintellekti ka suurendada. Privaatsuse tagamiseks on võimalik kasutada näiteks detsentraliseeritud platvorme, mis võimaldavad rakendada isikupärastatud tehisintellekti teenuseid kasutajaandmeid jagamata¹²⁴. Samuti on privaatsuse ja turvalisuse tagamise lahendusena välja pakutud tehisintellekti audiitoreid ja järelevalvet, kes esindaks tarbijate huve ning jälgiks uuesti tuvastamise või diskrimineerivate tulemuste esinemise tõenäosust teistes sarnastes tehisintellekti süsteemides¹²⁵. Seega võimalusi on palju, kuidas andmeprivaatsust suurendada, aga see nõuab veel arendamist ja ka seadusandliku poole järele jõudmist.

¹¹⁸ Rabby, Md Khurram Monir, Muhammad Mobaidul Islam, and Salman Monowar Imon. "A review of IoT application in a smart traffic management system." 2019 5th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE). IEEE, 2019.

¹¹⁹ Horne, Ralph, Tim Grant, and Karli Verghese. Life cycle assessment: principles, practice, and prospects. Csiro Publishing, 2009.

¹²⁰ Ghoroghi, A., Rezgui, Y., Petri, I. et al. Advances in application of machine learning to life cycle assessment: a literature review. Int J Life Cycle Assess 27, 433–456 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02030-3>

¹²¹ Rosaline, „A comparison of machine learning algorithms in manufacturing production process“, CommIT Journal 13(1), 17-23, 2019

¹²² <https://www.nature.com/articles/s42256-020-0219-9>

¹²³ <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Carbon-Footprint-of-Machine-Learning-Training-Patterson-Gonzalez/76cb108e37d9d2a06f5a49df04e993f5fb123c26>

¹²⁴ Christian Meurisch, Bekir Bayrak, and Max Mühlhäuser. 2020. Privacy-preserving AI Services Through Data Decentralization. In Proceedings of The Web Conference 2020 (WWW '20). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 190–200.

¹²⁵ Scripa, Andrea. "Artificial Intelligence as a Digital Privacy Protector." (2017).

Satelliidiandmete kasutamine koos tehisintellektiga pakub olulisi võimalusi julgeoleku suurendamiseks, kuid sellega kaasnevad ka turvariskid, millega tuleb tegeleda. Satelliidiandmed on juba oma olemuselt väga mahukad ning ilma masinõppeta ei ole võimalik kogu nende potentsiaali ära kasutada. Masinõppe algoritmid saavad analüüsida satelliidipilte, et tuvastada võimalikke julgeolekuohte, nagu ebatavaline liikumine või ebaseaduslik piiriületus ehk algoritme saab treenida ära tundma kõrvalekaldeid, mis võivad viidata potentsiaalsele ohule. Teine võimalus on looduskatastroofide või õnnetuste ennustamine, olgu selleks põlengud või üleujutused, mis on Eesti kontekstis tõenäolisemad kui maavärinad. Suurimaks turvariskiks on küberturvalisus ja privaatsuse tagamine.

Samuti nähakse küberturbe alal tehisintellektis nii suurt võimalust kui ka võimalikku ohtu¹²⁶. Arukad süsteemid võivad aidata märgata ja tõrjuda küberrünnakuid ja muid küberohte, tuginedes pidevale andmesisestusele, mis aitab kindlaks teha rünnakute struktuuri ja päritolu¹²⁷. AI-lahendused on juba praegu võimelised organisatsioonide kaitsevõimet tõstma, seda peamiselt automatiseerimise teel. Tehisintellekti on võimalik seadistada probleemidele ka automaatselt reageerima, näiteks lubada neil anomaalseid tegevusi ise blokeerida. Ehk hästi treenitud tehisintellekt on võimeline tuvastama, kui mõni süsteem on pahavaraga nakatunud.

Tehisintellekti abil on võimalik paljastada võltsuudiseid ja desinformatsiooni, kaevandades sotsiaalmeediast teavet, otsides sensatsioonilisi ja häirivaid sõnu ja tehes kindlaks, milliseid veebiallikaid peetakse autoriteetseks, ennetades nii ka kuritegevust. Kuritegevuse ennetamise osas saavad tulevikus näiteks posti- ja kullerfirmad hinnata tehisintellekti abil, kui tõenäoline on, et saadetised sisaldavad ebaseaduslikke kaupu. Kuritegevuse ennetamiseks sobivate algoritmide välja töötamise üheks riskiks on, et tehisintellekti põhjal saab teha kallutatud järeldusi selliste tegurite alusel nagu etniline kuuluvus, sugu ja vanus. Ettevõtted võivad kogeda vastuolu klientidelt, kes muretsnevad, et nende andmeid kuritarvitatakse või kasutatakse ära nende dokumentide ja tehingute veelgi andmemahukama jälgimise tõttu kui see muidu on¹²⁸.

Tervis

Tehisintellekti nähakse ka tervishoius pigem suure abilisena, mis pakub mitmeid arenguvõimalusi kiirendades hetkel toimivaid protsesse. Tehisintellekti toel on võimalik patsiente kiiremini vajalikule ravile suunata, testide tulemusi parandada, mudelite abil haiglates tuleviku ressursivajadusi ennustada või arstide tööjõudu rutiinsetest administratiivtegevustest tegeliku ravimise tarbeks vabastada. Tehisintellekt on võimeline analüüsima suurt hulka terviseandmeid, et leida seaduspärasid, mis võivad viia uute meditsiiniliste avastusteni ja parandada individuaalset diagnostikat. Kõigis ravimite väljatöötamise ja arendamise etappides on alustatud masinõppe algoritmide ja tarkvara kasutamist¹²⁹. Liitõpet (ingl. keeles *federated learning*) kasutatakse hajutatud ja tundlike meditsiiniandmete masinõppemudelite treenimiseks, ilma et oleks vaja andmeid ise jagada. See võib aidata parandada haiguste diagnoosimise, ravisoovituste ja ravimite avastamise täpsust ja tõhusust, säilitades samal ajal patsiendi privaatsuse. Näiteks on tehisintellekti abil võimalik südame-veresoonkonna haiguste riske hinnata silma võrkkesta vaatluse kaudu¹³⁰, mis on ka Eestis hetkel levinuim surma põhjus¹³¹.

¹²⁶ <https://www.ituudised.ee/uudised/2022/10/03/kas-tehisintellekt-juba-suudab-kuberturvalisust-tagada-suurnuhtlus-ja-voimas-tooriist-korraga>

¹²⁷ K. Bresniker, A. Gavrilovska, J. Holt, D. Milojicic and T. Tran, "Grand Challenge: Applying Artificial Intelligence and Machine Learning to Cybersecurity," in *Computer*, vol. 52, no. 12, pp. 45-52, Dec. 2019, doi: 10.1109/MC.2019.2942584.

¹²⁸ https://www.oliverwyman.com/content/dam/oliverwyman/v2/publications/2018/december/Risks_and_benefits_of_AI-RiskJournal2018.PDF

¹²⁹ Vamathevan, Jessica, Dominic Clark, Paul Czodrowski, Ian Dunham, Edgardo Ferran, George Lee, Bin Li, Anant Madabhushi, Parantu K. Shah, Michaela Spitzer and Shanrong Zhao. "Applications of machine learning in drug discovery and development." *Nature Reviews Drug Discovery* 18 (2019): 463 - 477.

¹³⁰ Rudnicka AR, Welikala R, Barman S, et al. Artificial intelligence-enabled retinal vasculometry for prediction of circulatory mortality, myocardial infarction and stroke. *British Journal of Ophthalmology* 2022;106:1722-1729

¹³¹ <https://www.stat.ee/et/avasta-statistikat/valdkonnad/rahvastik/surmad>

Meditsiini valdkonnas on tehisintellektil põhinev diagnoosimine praeguseks juba võrdne või edestamas arstidest eksperte, kuigi sageli on tegemist veel eksperimentaalse tarkvaraga, mis laialdaselt kliinilisse rakendusse ei ole jõudnud¹³². Edusamme on ette näidata radioloogias, oftalmoloogias, aga ka psühhiaatrias ning neuroteadustes (nt suitsiidide ennustamises)^{133,134}.

Tehisintellekt võib olla kasulik kõigile tervishoiutööstuse sidusrühmadele, kuid selle võimaluste ja piirangute täielikuks mõistmiseks on vaja rohkem uuringuid. Euroopa Parlament¹³⁵ on välja toonud seitse peamist tehisintellektiga seotud riski meditsiinis ja tervishoius:

- 1) kahju patsiendile tehisintellekti eksimuse tõttu;
- 2) meditsiiniliste tehisintellekti tööriistade väärkasutamine;
- 3) tehisintellekti kallutatus;
- 4) läbipaistvuse puudumine;
- 5) privaatsus- ja turvaprobleemid;
- 6) vastutuse lüngad;
- 7) takistused rakendamisel.

Majandus

Tehisintellekt on muutumas üha olulisemaks teguriks ka majanduses, sellel on võimekus edendada majandusarengut, sealhulgas tööjõu asendamine ja tööviljakuse tõstmine, tööstuse mõjuvõimu suurendamine ja tootmise efektiivsuse parandamine ning sotsiaalse heaolu parandamine¹³⁶. Tehisintellekti ja robotika areng viib lähimate aastakümnete jooksul murranguliste muutusteni kõikides tööstusharudes, loob täiesti uusi ning ühtlasi muudab ka paljud tänased tööd mõttetuks. Seejuures on tehisintellekti mõju haldamiseks vaja sobivat poliitikat ja vahendeid. Praegu juba käsitletakse tehisintellektiga seotud poliitikat ja strateegiaid, mis võivad aidata suurendada tootlikkuse kasvu ja leevendades samal ajal tehisintellekti negatiivseid mõjusid tööturule¹³⁷.

Automatiseerimine ja tehisintellekti laiem rakendamine kasvatab produktiivsust, millest ettevõtted saavad lõigata kasu. Eelkõige võivad mõned ametid ja tööstusharud hästi hakkama saada tehisintellekti pakutavate hüvedega, samas kui teised kogeavad tööturul probleeme.

Majanduse elavdamise üheks tehisintellekti rakenduseks on ka näiteks finantspettuste avastamine, mida on ka Eestis juba katsetatud¹³⁸. Samuti nähakse tehisintellekti kui abimeest finantspettuste läbiviimisel ja pettuste tuvastajal samal ajal¹³⁹.

Samuti leiab tehisintellekt laialdast kasutamist turunduses. Tehisintellekti saab turunduses kasutada korduvate turundusfunktsioonide automatiseerimiseks, andmete töötlemiseks otsuste tegemiseks, inimeste emotsioonide analüüsimiseks ning kvaliteetsete tulemuste ja kogemuste pakkumiseks. Eestis on

¹³² Loh E. Medicine and the rise of the robots: a qualitative review of recent advances of artificial intelligence in health. *BMJ Leader* 2018;2:59–63

¹³³ Walsh, CG, Ribeiro JD, Franklin JC. Predicting risk of suicide attempts over time through machine learning. *Clin Psychol Sci* 2017;5:1–12.

¹³⁴ Graham S, Depp C, Lee EE, et al. Artificial intelligence for mental health and mental illnesses: an overview. *Curr Psychiatry Rep* 2019;21:116

¹³⁵ https://www.addleshawgoddard.com/globalassets/insights/healthcare/eprs_stu2022729512_en.pdf

¹³⁶ Li, Boxun. "Dynamic Evaluation and System Coordination Degree of the Integration of Artificial Intelligence and Real Economy." *Complex*. 2021 (2021): 5539793:1-5539793:9.

¹³⁷ Furman, Jason, and Robert Seamans. "AI and the Economy." *Innovation policy and the economy* 19.1 (2019): 161-191.

¹³⁸ <https://raha.geenius.ee/rubriik/uudis/maksuamet-hakkab-tehisintellekti-abiga-umbrikupalga-maksjaid-leidma/>

¹³⁹ Yeoh, P. (2019), "Artificial intelligence: accelerator or panacea for financial crime?", *Journal of Financial Crime*, Vol. 26 No. 2, pp. 634-646. <https://doi.org/10.1108/JFC-08-2018-0077>

ka arutatud selle üle, kas tehisintellekt võiks tulevikus olla ka turundustiimi liige¹⁴⁰. Samuti on turul mitmeid tehisintellektil põhinevaid turundustööriistu¹⁴¹.

Üheks tehisintellekti laialdase leviku riskiks on ebavõrdsuse suurenemine selle ebaühtlase ühiskondliku kasutuse tõttu. Arvestades tehisintellekti ja masinõppe mõju inimeste eludele, on interdistsiplinaarne lähenemine nende arendamisel ja uurimisel eriti oluline, et vältida algoritmide kallutatust ja ühiskondlike eelarvamuste või ebavõrdsuse taastootmist¹⁴². Universaalne põhisissetulek (ingl. keeles *universal basic income*) on üheks välja pakutud lahenduseks ebavõrdsuse leevendamiseks¹⁴³.

Veelgi uuem kontseptsioon on andme dividend (ingl. keeles *data dividend*), mille pakkus 2019. aastal välja Gavin Newson, tuues välja, et see oleks parem alternatiiv universaalsele põhisissetulekule, et jaotada varandust, mis on kellegi andmetega saadud. Nimelt Google teenis 2018. aastal rohkem kui 30 miljardit dollarit, Facebook aga üle 22 miljardi dollari kasutajate andmete kogumisega reklaami eesmärgil, mis on kapitalismi kõige ekspluateerivam tehnoloogiline ärakasutamine lähiminevikus. Andmete dividendi kontseptsioon seisneb selles, et üksikisikud või kogukonnad peaksid saama osa nende isikuandmetest genereeritud majanduslikust väärtusest, mida ettevõtted koguvad ja kasutavad üha enam erinevatel eesmärkidel, sealhulgas tehisintellekti jaoks. Üks idee on see, et kui üksikisikutel ja kogukondadel on suurem kontroll oma andmete üle ja nad saavad neist väärtust ammutada, võivad nad olla valmis neid rohkem jagama, mis tooks kaasa suurema innovatsiooni ja majanduskasvu.

Haridus

Tehisintellekti kasutamise edu sõltub suurel määral selle kasutamise oskuslikkusest. Teisisõnu suureneb vajadus spetsialistide järele, kellel on tehnilist kompetentsi erinevaid mudeleid ehitada ja treenida ning hilisemas etapis ka mudeleid rakendada. Eestis on tugevad eeldused kõrgkvalifitseeritud tehisintellekti ning reaalarvade ekspertide ja teadlaste kasvatamiseks¹⁴⁴. Neid kutsutakse „prompt-insenerideks“: inimesteks, kes veedavad oma päeva sellega, et esitavad täpseid päringuid tehisintellektilt paremate tulemuste saavutamiseks ja aitavad ettevõtetel oma töötajaid töövahendite kasutamiseks koolitada.

Tehisintellektil on potentsiaali muuta haridust, rikastades õpilaste õppimist, täiendades õpetajate tööd ja suurendades hariduse isikupärastamist¹⁴⁵. Tehisintellekti areng võimaldab paremini rakendada personaalset ja kohandatavat õpiteed õpetaja koormust tõstmata. Samuti on tehisintellektil potentsiaal anda reaalarvade ülevaate, missuguste õppematerjalide kasutamine õpilaste puhul nende edenemist kõige rohkem kannustaks ning milliseid kohandusi on vaja materjalides teha.

Muud relevantssed valdkonnad

Tehisintellekt ja masinõppe avaldavad mõju pea kõigile valdkondadele, millega me igapäevaselt kokku puutume, olgu selleks kunst¹⁴⁶, sport¹⁴⁷, arhitektuur¹⁴⁸, kosmoseuuringud, katastroofiennetused või arheoloogia (näiteks artefaktide, keraamika jm morfoloogiline analüüs, et neid klassifitseerida ja dateerida; tekstianalüüs, mida saab rakendada üleskirjutiste peal). Lisaks on tehisintellekti edukalt rakendatud paljudes valdkondades ja ülesannetes lennunduses, panganduses ja rahanduses, biotehnoloogias,

¹⁴⁰ <https://www.aripaev.ee/saated/2023/03/28/kas-tehisintellekt-on-uus-turundustiimi-liige>

¹⁴¹ <https://ari.geenius.ee/blogi/salesforcei-blogi/leverup-toob-eesti-turule-tehisintellekti-juhitud-turunduslahenduse/>

¹⁴² Zajko, Mike. "Conservative AI and social inequality: conceptualizing alternatives to bias through social theory." *AI & SOCIETY* 36 (2020): 1047-1056.

¹⁴³ Yang, Andrew. *The war on normal people: The truth about America's disappearing jobs and why universal basic income is our future*. Hachette UK, 2018.

¹⁴⁴ <https://www.err.ee/980896/veljo-otsason-tehisintellekti-ajastul-on-haridus-parim-investeering>

¹⁴⁵ Reiss, Michael J.. "The use of AI in education: Practicalities and ethical considerations." *London Review of Education* (2021): n. pag.

¹⁴⁶ Cetinic, Eva, and James She. "Understanding and creating art with AI: review and outlook." *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM)* 18.2 (2022): 1-22.

¹⁴⁷ Araújo, Duarte, et al. *Artificial Intelligence in sport performance analysis*. Routledge, 2021.

¹⁴⁸ Chaillou, Stanislas. "AI and architecture: An experimental perspective." *The Routledge Companion to Artificial Intelligence in Architecture*. Routledge, 2021. 420-441.

hädaabiteenustes, õiguses, tootmisdisaini ja koostamise, sõjaväe, operatsioonide juhtimise, personalijuhtimise ja pakendite valdkonnas.

Genereeriv tehisintellekt muutub üha levinumaks paljudes rakendustes. Nende hulka kuuluvad realistlike piltide, muusika ja teksti genereerimine ning uute disainilahenduste ja ideede loomine. Kuigi genereeriv tehisintellekt on teinud muljetavaldavaid edusamme, ei ole see veel võimeline täielikult asendama inimese loovust ja intuitsiooni, loodetavasti on nii ka tulevikus. Need mudelid vajavad tõhusaks toimimiseks endiselt inimese panust ja järelevalvet ning neid piiravad andmed ja eelarvamused, mille alusel neid treenitakse.

ARENGUT TOETAVAD JA ARENGUST MÕJUTATUD TEHNOLOOGIAD

Tehnoloogiad, mille areng mõjutab tehisintellekti ja masinõppe läbimurret:

- Tehisintellekti tõhusust piirab suurel määral saadaval olev arvutusvõimsus ning (eriti masinõppe süsteemide õpetamiseks vajalik) võimsustarve.
- Seega aitaksid edusammud kiipide ja sardsüsteemide vallas ning energeetikas viia tehisintellekti võimekuse uuele tasemele ning soodustavad uusi läbimurdeid.

Tehnoloogiad, mida mõjutab läbimurre tehisintellekti ja masinõppe valdkonnas:

- Tehisintellekti rakendamine toetab horisontaalselt ja läbivalt pea **kõiki** teisi süvatehnoloogiaid ja valdkondi.

TEHNOLOOGIASUUNAGA TEGELEVAD TÄHTSAMAD EESTI ETTEVÕTTED JA TEADUSASUTSUED

- MindTitan OÜ – vestlusrobotite ja loomuliku kõne lahenduste arendaja
- FoxWay OÜ – visuaalsete defektide automaattuvastuse rakendaja ringmajanduses
- Proekspert AS – tööstusega seotud suurandmetöötlus ja pildiantmetöötlus, tehnoloogia arendaja
- EyeVi Technologies OÜ – visuaalandmete automaattöötluse lahenduste arendaja ehitus- ja transpordisektorisse
- R8 Technologies OÜ – ehitiste energiakasutuse optimeerimine masinõppe abil, teenusepakkuja
- Veriff OÜ – visuaalandmetöötlus ja mustrituvastus, tehnoloogia kasutaja
- Envelope OÜ – pildituvastuse lahenduste pakkuja jaekaubandusettevõtetele
- Cybernetica AS – tehisintellekti rakendamine e-valitsemisel
- Rantelon OÜ – raadiosignaalituvastuse rakendused
- Recona OÜ – automaatpildituvastus turvarakendustes, täislahenduse pakkuja
- DecSecIntel Solutions OÜ – automaatsed objektituvastuslahendused turvarakendustesse, täislahenduse pakkuja
- Nortal AS – andmeanalüüsi ja masinõppe integreerimine arendustöösse
- Flowbase OÜ – visuaalandmetöötlus manuaalsete tootmisprotsesside optimeerimisel, tehnoloogia arendaja
- Quretec OÜ – masinõppe rakenduste arendaja meditsiiniandmete töötlemisel
- Salv Technologies OÜ – masinõppe rakendamine finantsvaldkonnas, tehnoloogia arendaja
- Microsoft Estonia OÜ – andmeanalüüsi rakendaja ettevõtte teenustes
- STACC OÜ - masinõppe ja andmeteaduse ning vastavate rakenduste realiseerimisega tegelev T&A ettevõtte
- Tartu Teaduspark – tehisintellekti arendused
- Tehisintellekti ja Robootika keskus AIRE - Eesti ülikoolide, Tehnopol, Tartu Teaduspargi ühisettevõtte, mida toetab Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium ja Euroopa Liit ning mis vahendab teenusepakkujaid ja toetab tehisintellekti valdkonna pilootprojekte
- Tartu Ülikooli Arvutiteaduse instituudi andmeteaduse õppetool - bioinformaatika uurimisrühm (prof Jaak Vilo), masinõppe uurimisrühm (prof Meelis Kull, üldine masinõpe)
- Eesti Geenivaramu teaduskeskuse Bioinformaatika töögrupp (prof Reedik Mägi)

- Tallinna Tehnikaülikooli tarkvarateaduse instituut - rakendusliku tehismõistuse töörühm (prof Tanel Tammet, masinõppe ja loogikameetodite integratsioon), andmeteaduse töörühm (prof Sadok Ben Yahia, üldine masinõpe)
- Tallinna Tehnikaülikooli arvutisüsteemide instituut - usaldusväärsete arvutisüsteemide keskus (prof Masoud Daneshtalab, kiibirealisatsioonid ja algoritmide töökindlus)



7. VESINIKTEHNOLOOGIA

TEHNOLOOGIA LÜHIKIRJELDUS

Vesinikutehnoloogiad jagunevad süvatehnoloogia mõistes viite kategooriasse

1. Vesiniku tootmine
 2. Vesiniku salvestamine
 3. Nn vesinikuderivaatide tootmine
 4. Elektrokeemiline koosväärimine
 5. Vesinikust elektri tootmine
1. **Vesiniku tootmine** on üks võimalikke lahendusi taastuvenergia salvestamiseks pikemaks perioodiks. Tootmise tõhusus on oluline faktor vesinikumajanduse väärtusahelas. Vesinikku toodetakse vee elektrolüüsi teel kasutades eri tüüpi elektrolüüsereid, nt polümeermembraanidega eraldatud või tahkeoksiidseid elektrolüüsirakke. Kõrvalproduktina saadakse hapnikku, millele pole enamasti majanduslikult kasulikku rakendust leitud¹⁴⁹. Erisusena on välja tuua üks näide, kus Ahvenamaal kasutatakse vesiniku tootmisel tekkinud hapnikku kalakasvanduses sumpade hapnikuga rikastamiseks. Elektrolüüsi efektiivsus on u 70-90% sõltuvalt kasutustingimustest ja tehnoloogiast ning võimaldaks suures mahus energiat salvestada eeldusel, et ehitataks välja infrastruktuur torustike ja mahutite näol. Vesiniku tootmise globaalne turumaht 2022. aastal oli 140 miljardit eurot.
2. **Vesiniku salvestamiseks** kasutatakse surveanumaid või veeldatud vesiniku korral atmosfäärirõhul anumaid. Kui maapealsete mahutite puhul mahutite mass ei mängi olulist rolli, siis mobiilsete süsteemide nagu maapealne ja õhustransport, puhul on süsteemi mass väga oluline saavutamaks

¹⁴⁹ Hapniku puhastamine nõuab lisainvesteeringut ja selle transport on samamoodi kulukas nagu vesinikul. Teisisõnu ei tasu suurte mahtude ja torujuhtme puudumisel hapniku tootmist ära. Kui võtta näiteks hüpoteetiline kaasus, kus Hiiumaa praam on viidud üle vesinikule, siis tekkiva hapniku tootmiseks peaks tarbija ideaalsel juhul jääma Hiiumaa ja Läänemaa piiridesse. Hapniku puhastamine on otstarbekas suurtööstuses, kus seda ka tehakse, eriti Kesk-Euroopas. Hapnikuvajadus vesinikumajanduses on siiski kordades väiksem kui vesinikuvajadus.

mõistlikku sõidu- või lennuulatust. Selle probleemi lahendamiseks kasutatakse komposiitmaterjalidest vesinikupaake, mis on oluliselt kergemad metallist või vanema põlvkonna komposiitpaakidest.¹⁵⁰ Samuti kasutatakse nimetatud komposiitidest paakide mehaaniliste pingete reaalajas jälgimiseks kiudoptilisi andureid, mis võimaldavad tõsta süsteemi üldist ohutust ja koguda andmeid mahutite edasiseks arendamiseks.

Kirjeldatud mahuteid saab muuta efektiivsemaks või asendada kasutades uudsemaid tehnoloogiaid, millised kätkevad endas vesiniku keemilist või füüsilist sidumist. Keemilise sidumise näitena saab tuua polüdiühüdrosiloksaane¹⁵¹, vedelikke, kuhu on seotud gaasiline vesinik ja mis reaktsioonil veega vabastavad molekulaarse vesiniku või metallide hüdriide. Metallide hüdriidide puhul on kaks võimalust vesiniku kätte saamiseks - esiteks reaktsioon veega, mis muudab pöördumatult metalli oksiidiks ja hüdroksiidiks, teiseks – hüdriidi lagundamine temperatuuri toimetel (kuni 500 °C). Füüsilise sidumise näitena võib esitada metallorgaanilisi võrestruktuure jm poorseid materjale nagu boornitriidi. Siin saadakse vesinik kätte kas rõhu alandamise või temperatuuri tõstmise teel, seejuures metallorgaaniliste võrestruktuuride korral ei tohi temperatuur ületada 250 °C nimetatud ühendite madalama temperatuuritaluvuse tõttu. Siinkohal tuleb märkida, et mõned metallide hüdriidid seovad vesinikku samuti füüsiliselt ja mitte keemiliselt (nt Pt-hüdriid). Ülalnimetatud meetodid tõstavad märkimisväärselt vesinikupaakide mahutatavust (kuni kaks korda), kuid tõstavad samas ka süsteemi massi.

3. Lisaks eeltoodule kasutatakse ka nn **vesiniku derivaate**, mis tähendab vesiniku keemilist sidumist mõne muu aatomiga nagu süsiniku või lämmastikuga. Antud lähenemist liigitatakse kui „Power-to-X“ tehnoloogiat, mille tulemusena toodetakse metanooli, metaani, sipelghapet, ammoniaaki vm kemikaale ja kütuseid. Nimetatud kemikaale saab transportida ja kasutada olemasolevat taristut kasutades ja seega ei vaja olulisi taristuinvesteeringuid. Metanool, metaan ja ammoniaak on potentsiaalsed transpordikütused valdkondades, kus akud ja vesinik tänasel tasemel pole konkurentsivõimelised, peamiselt pikamaatransport laevanduses ja lennunduses. Viimase puhul räägitakse ka jätkusuutlikest lennukikütustest, kus lennukikütus toodetakse kas biomassist või vesinikust ja süsihappegaasist. Power-to-X tehnoloogiate puhul on süvatehnoloogia vaates olulisim katalüsaatorimaterjalide arendus ja uute materjalide loomine, mille töhustamiseks tuleb järjest enam kasutada digitaalseid abivahendeid materjaliomaduste mudeldamiseks ja tehnoloogiliste protsesside optimeerimiseks (suurandmete töötlemine). Samuti vajavad selliste tehnoloogiate arendused järjest suuremat hulka andureid andmetöötluseks vajalike andmemahutuste saavutamiseks.
4. **Vee ja CO₂ elektrokeemiline koosväärimine**, mille käigus saadakse süngaasi, millest omakorda saab toota erinevaid kemikaale, nt metanooli või sipelghapet, on uudsemaid viise toota kütuseid ja keemiatööstuse tooret. Antud lähenemisviisi teeb huvitavaks asjaolu, et süngaasist erinevate kütuste ja kemikaalide tootmiseks on tehnoloogia juba väljatöötatud (Fischer-Tropschi süntees) ning süngaasi elektrokeemilise tootmisega dekarboniseeritakse kogu tootmisahel. Olemuselt on süsteem väga sarnane vee elektrolüüsile, ainsa vahega, et süsteemi suunatakse vee kõrval ka CO₂.
5. Vesinikust elektri tootmiseks kasutatakse peamiselt kahe meetodit – vesiniku elektrokatalüütiline oküdatsioon kütuseelementides ja vesiniku otsene põletamine turbiinides. Esimene meetod võimalda vesinikku kasutada kütusena nii mobiilsetes kui ka statsionaarsetes süsteemides, nt autodes, rongides, tagavarageneraatorites. Kütuselement vajab tööks kahte sisendgaasi – vesinikku (kütust) ja oksüdeerijat (õhuhapnikku). Anoodil toimub vesiniku muundamine prootoniteks, mis läbivad membraani ja moodustavad katoodil hapnikuga reageerides vee. Teine meetod võimaldab toota elektrit suures skaalas, mis oleks võrreldav tänapäevase fossiilsetest kütustest toodetava elektri mahuga. Siin toimub vesiniku põletamine turbiini põlemiskambris sarnaselt maagaasiga. Põhiline murekoht on asjaolu, et

¹⁵⁰ <https://www.gtlcompany.com/what-we-do/composites/#BHL-Cryotanks>

¹⁵¹ <https://www.hysilabs.com/technology>

vesinik põleb kõrgemal temperatuuril kui maagaas, mistõttu turbiinide materjalid ja ehitus vajavad arendamist.

MILLISE TÄNASE PROBLEEMI SÜVATEHNOLOOGIA LAHENDAB?

Tänapäeval toodetakse enamuse vesinikust veeauruga reformimise teel, millega kaasneb oluline CO₂ heide. Seevastu tehnoloogia on hästi sisetöötatud ja optimeeritud ning laialdaselt kasutusel Haber-Boschi tehnoloogia (ammoniaagi tootmine) ja naftast kütuste ning kemikaalide tootmise juures. Erinevalt klassikalistest vesinikutootmise tehnoloogiatest võimaldab elektrolüüsi protsess toota vesinikku süsinikuvabalt eeldusel, et elektritootmine on samuti süsinikuvaba.

Kuna keemiatööstus sõltub tänapäeval samuti naftast ja tarbib samuti vesinikku, siis lisaks energiakandja funktsioonile tuleks vesinikku kasutada ka keemiatööstuse ja e-kütuste toormena. E-kütused on taastuvenergiast toodetud vesiniku ja CO₂ koosväärimisest saadud kütused. Kui keemiatööstuses on vesinikku vaja teatud baaskemikaalide tootmiseks nagu nt ammoniaak ja metanool, siis e-kütuste puhul keskendutakse tõenäoliselt lennukikütustele, sest muus osas loodetakse transport dekarboniseerida vesiniku ja akude abil. Lennunduse kõrval on murekohaks ka laevandus, kus samuti pikamaatranspordiks ei sobi vesinik ega akud ja kus plaanitakse laevakütustena kasutusele võtta kas ammoniaaki või metanooli.



Kohalik T&A tegevuse kõrge tase, meie teaduskeskuste rahvusvaheline võrgustik ja Eesti taristupotentsiaal loob soodsa olukorra nii tehnoloogia arendamiseks, tootmiseks kui ka laialdaseks kasutuselevõtuks.

Metallide hüdriidide ja adsorbentide kasutamine võimaldab samasse ruumalasse oluliselt suuremal hulgal vesinikku salvestada. Teisalt suurendab nimetatud materjalide kasutamine kogu süsteemi massi.

Kütuseelementide kasutamine võimaldab dekarboniseerida auto- ja rongitransporti ning väiketarbijaid (tagavarageneraatorid). Vesiniku kasutamine turbiinides võimaldab dekarboniseerida elektritootmist laiemalt.

„Euroopa Liit on hetkel ette näinud tootmise ja salvestamise mahud, mida teadlased ei pea realistlikuks.“ „„

LÄBIMURDED JA NENDE EELDUSED

Tänapäeval on elektrolüüserite peamiseks murekohaks kiire ja sagedase käivitamise ning sisendpinge muutuse kulutav mõju elektrolüüserite elektrodidele ja separaatoritele (membraanid, mis eraldavad anoodi ja katoodiruumi). Seega on **uued elektrodide ja membraanide materjalid** ülimalt olulised majanduslikult ja materiaalselt jätkusuutlikku vesinikumajanduse käivitamiseks.

Hetkel on tahkeoksiidsed elektrolüüserid kommertsialiseerimise algfaasis ja vajavad jätkuvalt olulist arendustööd. Teisalt on nad ka suurima potentsiaaliga pikemas perspektiivis, sest sisaldavad odavaid materjale ja on tänu materjalidele kompaktsema ehitusega kui alternatiivsed tehnoloogiad. Tahkeoksiidsete elektrolüüserite juures **on edusammudeni viinud haruldaste muldmetallide** kasutamine keraamilistes elektrodides.

Aluselise elektrolüüsi puhul on membraanide arenduses uudsed mineraalsed täiteained ZrO₂ asemel või eelnimetatule lisaks. Polümeerelektrolüütmembraane (PEM) kasutavate elektrolüüserite juures on arendustöö keskendunud polümeeride stabiilsusele ja **elektrodide efektiivsuse kasvatamisele**. PEM-i korral on elektrodide arendus suunatud väärismetallide kasutuse vähendamisele ja komposiitide loomisele ning membraanide korral on arenduse suunaks standardsetele materialidele odavamate asenduste otsimine (odavamad polümeerid) ja membraanide struktuurse stabiilsuse suurendamine erinevate mineraalsete oksiidide (nt SiO₂, TiO₂, WO₂ jm) lisamise teel.

Läbimurre tahkeoksiidsete elektrolüüserite puhul **seisab hetkel skaleerimise taga**. Tarvis oleks suurema võimsuse ja tootlikkusega elektrolüüsereid, et neid saaks näiteks tuuleparkide juures kasutada. Skaleerimine eeldab laboriskaalast (ca 1 cm²) oluliselt suurema pindalaga elektrolüüsirakkude tootmise võimekust (10-100 cm² ja enam), mis peavad olema samamoodi defektide vabad nagu laboratoorsed seadmed.

Kõikide elektrolüüseritehnoloogiate puhul on **probleemiks reaalarajas tuuleparkide juures katsetuste vähesus** või sootuks nende puudumine, mistõttu on raske hinnata elektrolüüserite eluiga looduslikes tingimustes, näiteks meretuulepargi külje all meres, rannikul või sisemaal.

Vesinikitehnoloogia küpsus TRL järgi on:

- TRL 2 poorsed adsorbendid – metallorgaanilised võrestruktuurid, boornitriid. Siin valdkonnas on näiteid tuua peamiselt laboratoorsete katsete näol, kuigi põhimõttelist rakendatavust on näidatud võrestruktuure kasutades. Kommertsiaalsed rakendused vesinikusalvestamisel puuduvad.
- TRL 2 vee ja CO₂ elektrokeemiline koosväärimine
- TRL 4-6 metallide hüdriidid ja polühüdrosiloksaanid
- TRL2-9 elektrolüüserite korral – aluseline elektrolüüs on juba pikalt kasutuses olnud, samuti PEM elektrolüüserid, seevastu tahkeoksiidsed elektrolüüserid on alles kommertsialiseerimise algaasis.
- TRL 2-9 kütuseelementide korral – autotööstuses on kasutusel kütuseelemendid kommertsiaalsetes toodetes, teisalt elektri suurtootmiseks sobilikke kütuselemente veel pole.
- TRL 2-4 vesinikuturbiinide puhul – väljatöötamisel on väiksemad turbiinid, samas maagaasi ja vesiniku seguga töötavad prototüübid on valmis

Eesti potentsiaal, kui läbimurre juhtub:

- Taristuinvesteeringud **päikese- ja tuuleparkide võrkude** arendamisse.
- Investeeringud **süvasadamatesse**, et tekitada neile võimekus vesiniku transportimiseks.
- Liitumine **Nordic Hydrogen Route'iga**, mille pikemaks eesmärgiks on 1000 km pikkuse vesinikutaristu rajame eelkõige Soome ja Rootsi vesinikuvajaduse katmiseks kogutarbega 65 TWh vesinikku aastaks 2050. Sellise koguse vesiniku tootmiseks tuulest on vajalik umbes 25 GWel tuuleparkide olemasolu. Projekt on osa suuremast üle-euroopalisest Hydrogen Backbone plaanist, milles ka Eestil on võimalus osa saada ja oma rikkaliku tuuleressursiga panustada. Ilma vesiniku infrastruktuurita pole võimalik Eestis realiseerida mere-tuule potentsiaali 7 GWel ja 24 TWhel aastatoodangut.
- **Eesti Vesinikoru** tervikliku arenduse ja tööplaani toetamine tootmisüksuste, vesiniku transpordi- ja ladustamistaristu (sh impordi ja ekspordi struktuur, tanklad ja ladustamise rajatised) arendamiseks.

MÕJUTATUD VALDKONNAD

„Vesinikitehnoloogia on teatud määral olemas, saavutanud töökindluse ja on tulnud, et jääda. Kogu maailm alates Jaapanist, USA-st ja Taanist on seda kasutamas. Seadmed on enamasti täiesti olemas.“ „„

Keskkond ja rohepööre

Vesinikitehnoloogia mõju keskkonnale sõltub suuresti sellest, kuidas vesinik toodetud on. Vesinik on keskkonnasõbralik ainult siis, kui see on toodetud kasutades taastuvaid energiaallikaid, sest fossiilkütustest toodetud vesinik soodustab globaalset soojenemist samal määral kui fossiilkütuste otse põletamine¹⁵².

¹⁵² Nowotny, Janusz, and T. Nejat Veziroglu. "Impact of hydrogen on the environment." International Journal of Hydrogen Energy 36.20 (2011): 13218-13224.

Paraku toodetakse hetkel suurem osa (99%) vesinikku endiselt kasutades fossiilkütuseid¹⁵³. Taastuvenergiast, näiteks päikeseenergiast, toodetud vesinik ehk roheline vesinik, mis saadakse veest, on üks keskkonna ja kliima sõbralikumaid energiaallikaid¹⁵⁴. Rohelise vesiniku puhul vesiniku tootmisel ja kasutamisel ei teki lämmastiku- ega väävlühendeid ei teki. Rohelise vesiniku kasutuselevõtt võib ulatuslikult vähendada kasvuhoonegaaside hulka tööstuses, transpordis ja energiatootmises, mis läbi paraneb ka õhukvaliteet.

Samuti on vesiniku tootmiseks vaja energiat, mistõttu ei ole vesinik energiaallikas vaid pigem energiakandja. Rohelise vesiniku tootmiseks vajaliku elektri tootmiseks võib taastuvate energiaallikate jaoks vaja minna suuri maa-alasid¹⁵⁵. See võib mõjutada kohalikke ökosüsteeme, (mets)loomade elupaiku ja põllumajandustavasid. Samuti on vesiniku tootmisprotsess küllaltki veemahukas, mis võib mõjutada kohalikke veevarusid.

Veel üks aspekt, mida silmas pidada on haruldaste muldmetallide kasutamine katalüsaatoritena vesiniku tootmise protsessi kiirendamisel. Esiteks on haruldaste muldmetallide kaevandamine ja tootmine tohutult energiamahukas ja keskkonnale kahjulik. Samas on uuritud alternatiivseid lahendusi, näiteks teiste metallide nagu mangaan ja koobalt kasutamist, mis küll vajavad veel katsetamist ja täiustamist, kuid esialgsed tulemused on paljulubavad¹⁵⁶.

Lisaks aitab vesinikutehnoloogia kasutuselevõtt ökoloogilist jalajälge vähendada teistes tootmisharudes. Näiteks saab vesinikku kasutada ammoniaagi tootmiseks, mis on paljude lämmastikväetiste põhikomponent. Seda protsessi nimetatakse "roheline ammoniaagi" tootmiseks¹⁵⁷.

Arvestades tuumaenergia tootmise tähtsust, on oluline uurida uusi tehnoloogilisi võimalusi ning rõhutada ohutust ja vastupidavust, mis on Eestis kasvava mittepurustava katsetamise (ingl. keeles *Non Destructive Testing*, NDT) valdkonna eriala¹⁵⁸. Uue põlvkonna tuumareaktorite uurimis- ja arendustegevus pakub võimalusi innovatsiooniks, eelkõige radioaktiivsete jäätmete vähendamise, suurema ohutuse ja jõudluse suurendamise osas. Investeeringuid nendesse tehnoloogiatesse tuleks soodustada, et tagada edukas energia üleminek ja säilitada Eesti juhtpositsioon vesiniku kasutamisega seotud kogukonna juhtpositsioon tehnoloogias¹⁵⁹.

Julgeolek

Kuna vesinikku saab toota erinevatest allikatest, sealhulgas taastuvatest energiaallikatest nagu tuule- ja päikeseenergia, aga ka fossiilkütustest, siis selline allikate mitmekesisus võib parandada energiajulgeolekut, vähendades sõltuvust kindlast energiaallikast või impordist¹⁶⁰. Seda muidugi juhul, kui vesiniku tootmise võimekus on endal olemas. Energiajulgeoleku tagamine imporditud energiast sõltuvuse määra võimalikult madalal hoidmine on muuhulgas ka üks riikliku energia- ja kliimakava eesmärke¹⁶¹.

Vesiniku tootmine, ladustamine ja transport nõuavad spetsiaalset infrastruktuuri. Infrastruktuuri arendades ja laiendades võib see tekitada uusi turvaprobleeme seoses infrastruktuuri kaitsega. Arutletud

¹⁵³ International Renewable Energy Agency <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen#:~:text=As%20at%20the%20end%20of,around%204%25%20comes%20from%20electrolysis>.

¹⁵⁴ Baykara, Sema Z. "Hydrogen: A brief overview on its sources, production and environmental impact." *International Journal of Hydrogen Energy* 43.23 (2018): 10605-10614.

¹⁵⁵ Acar, Canan, and Ibrahim Dincer. "Review and evaluation of hydrogen production options for better environment." *Journal of cleaner production* 218 (2019): 835-849.

¹⁵⁶ <https://www.mining.com/endangered-metals-not-needed-anymore-to-produce-hydrogen-from-water/>

¹⁵⁷ Zamfirescu, Calin and Ibrahim Dincer. "Ammonia as a green fuel and hydrogen source for vehicular applications." *Fuel Processing Technology* 90 (2009): 729-737.

¹⁵⁸ <https://www.tuv-nord.com/ee/et/katsetamine/mittepurustav-katsetamine-ndt/>

¹⁵⁹ Nuclear alliance aims for 150 GW of nuclear capacity in EU by 2050 – EURACTIV.com

¹⁶⁰ Ren, Jingzheng, Kristian Peter Andreasen, and Benjamin K. Sovacool. "Viability of hydrogen pathways that enhance energy security: a comparison of China and Denmark." *International journal of hydrogen energy* 39.28 (2014): 15320-15329.

¹⁶¹ <https://www.mkm.ee/energeetika-ja-maavarad/energiamaajandus/energia-ja-kliimakava>

on ka vesiniku tanklate ohutuse üle ja on leitud, et avalikkuse heakskiit saavutatakse, kui tankla on kavandatud sama ohutuks kui mis tahes bensiinijaam¹⁶².

Samas on vesinik ka väga tuleohtlik gaas, mis tähendab, et võivad esineda erinevad ohud ja lekkes selle tootmise, ladustamise ja transpordi käigus¹⁶³. Hädaabitöötajad vajavad spetsiaalset väljaõpet ja varustust, et reageerida vesinikuga seotud õnnetusjuhtumitele erinevates keskkondades.

Tervis

Üheks positiivseks mõjaks tervisele on transpordist ja tööstustest tuleneva õhusaaste vähenemine. Samas on kriitiline teha vahet, kas vesinik on toodetud kasutades fossiilkütuseid või taastuvaid energiaallikaid, sest fossiilkütustest vesinikutootmisel on suur ökoloogiline jalajälg¹⁶⁴.

Lisanduv positiivne külg on, et vesinikkütuseelemendid võivad pakkuda usaldusväärset ja katkematut toidet, mis võib olla kriitilise tähtsusega tervishoiuasutustes, kus isegi lühikesel elektrikatkestusel võivad olla tõsised tagajärjed. See võib aidata tagada, et kriitilised meditsiiniseadmed jäävad töökorda¹⁶⁵.

Mõned vesiniku tootmisel kasutatavad materjalid, nagu plaatina ja pallaadium, võivad olla mürgised, kui neid ei käsitleta õigesti. Nende materjalide sissehingamine või muu kokkupuude võib põhjustada hingamisprobleeme, nahaärritust ja muid pikaajalisi tervisemõjusid.

Majandus

Vesiniku tootmise potentsiaaliks Eestis on hinnatud 250 000 tonni rohelist vesinikku aastas¹⁶⁶, sõltuvalt elektri- ja vesinikuturgude arengust on roheline vesiniku tootmispotentsiaal 2030. aastaks vahemikus 2000–40 000 tonni aastas¹⁶⁷. Nähakse ka, et vesinikul on suur potentsiaal saada kaubandusartiklaks.

Ühiskondlik-majanduslikus plaanis tekiks juurde töökohti nii tootmise kui ka paigalduse ja hoolduse valdkonna igas sektoris, kuhu tuleb paigaldada vesinikutehnoloogiad ja neid edaspidi hooldada. Samuti on vajadus tuule- ja päikeseparkide rajamiseks ja teenindamiseks, et toota just rohelist vesinikku.

Üks kitsaskohti Eestis on vesinikkütuse pakkumise puudumine. Vesinikutankla rajamisest ning vesinikkütuse pakkumisest sõiduauto kütusena on huvitatud Alexela AS, seega oleks ka kogu transpordi ja selle võrgustiku teisenemine vajalik. Vesinikuga varustamist tootmise näol on valmis pakkuma Green Technologies Development OÜ planeeritavate vesiniku tootmisjaamadega Muuga ja Paldiski sadamas. Vesiniku infrastruktuuri rajamine sadamasse võimaldaks vesiniku kasutusele võtta ka teistes kasutusvaldkondades sadama lähistel (näiteks veokid, tõstukid). Sujuva vesiniku tarnimise tagamiseks tööstus-, hoonete- ja energiasektorile on vaja spetsiaalseid vesiniku torustikke, kaasaarvatud meretorustike väljaehitamist. Teada on, et Eestil on liitumise võimalus riikidevahelise Nordic Hydrogen Route vesinikutoru¹⁶⁸.

Lisaks võivad roheline vesinik ja selle derivaadid aidata asendada imporditavaid ning fossiilset päritolu energiakandjaid, kaupu ja materjale, kuid selle tingimuseks on täiesti uute tööstusvõimaluste teke (ammoniaak, metanool, väetised, sünteetilised kütused, polümeerid). Tööstussektoril on vesiniku mõistes kõige suurem potentsiaal rohelistele keemiatoodete tootmiseks vesinikuühendite baasil, kuna senise

¹⁶² Schjøberg, Ingrid, and Anne B. Østdahl. "Security and tolerable risk for hydrogen service stations." *Technology in Society* 30.1 (2008): 64-70.

¹⁶³ Dutta, Suman. "A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 20.4 (2014): 1148-1156.

¹⁶⁴ Suleman, F., I. Dincer, and M. J. I. J. O. H. E. Agelin-Chaab. "Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options." *International journal of hydrogen energy* 40.21 (2015): 6976-6987.

¹⁶⁵ Rosen, M.A., Koohi-Fayegh, S. The prospects for hydrogen as an energy carrier: an overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems. *Energ. Ecol. Environ.* 1, 10–29 (2016). <https://doi.org/10.1007/s40974-016-0005-z>

¹⁶⁶ <https://h2est.ee/vesinikumajandus/ressurss/>

¹⁶⁷ Eesti vesiniku teekaart 2023. <https://envir.ee/media/9265/download>

¹⁶⁸ Eesti Vesinikutehnoloogiatega Ühing. <https://h2est.ee/soome-rootsi-vesinikutoru/>

maagaasi asendamiseks ei olevat vesiniku põletamine eksperthinnangutest lähtudes ohtlike gaaside eraldumise tõttu mõistlik¹⁶⁹.

Muud relevantssed valdkonnad

Hetkel on leitud, et ammoniaagi- ja metanoolitööstus, transpordisektor (maantee-, raudtee- ja meretransport), ehitus- ja energiasektor peaksid olema vesiniku kasutusele võtmise peamised võimalikud valdkonnad¹⁶⁹. Kõige suurema potentsiaaliga valdkond vesiniku kasutamiseks on transpordivaldkond, kus ühelt poolt on võimalik tekitada suur nõudlus ning teisalt on ka tehnoloogia erinevate sõidukite puhul efektiivne. Teiseks suurimaks sektoriks vesinikupotentsiaali realiseerimisel on tööstussektor, kus seniselt imporditud fossiilpõhist ammoniaaki ja metanooli saaks asendada kohapeal toodetava rohelisel vesinikul põhineva ammoniaagi ja metanooliga aitamaks seeläbi vähendada selle senisel tootmisel ja transportimisel tekkivate kasvuhoonegaaside kogust. Lisaks kasutatakse vesinikku kosmosesõidukites tõukejõu- ja energiatootmissüsteemides¹⁷⁰.

ARENGUT TOETAVAD JA ARENGUST MÕJUTATUD TEHNOLOOGIAD

Tehnoloogiad, mille areng mõjutab läbimurret vesinikutehnoloogias:

- **Elektrolüüs** – Kõrgtemperatuuriline elektrolüüs võib näiteks suurendada tõhusust, kasutades teiste protsesside jäätmesoojust. Membraanide väljatootamine hõlmab tõhusamate, vastupidavamate ja kulutasuvamate membraanide loomist elektrolüsaatorites kasutamiseks, mis võib aidata vähendada vesiniku tootmise üldkulusid. Elektrolüüsisüsteemide energiatõhususe suurendamine võib veelgi aidata kaasa vesiniku tootmise kulude vähendamisele ja muuta selle konkurentsivõimelisemaks võrreldes traditsiooniliste energiaallikatega.
- **Taastuvenergia integreerimine** - Kasutades elektrolüüsil taastuvenergiat, võib saadud vesinikku pidada "roheliseks", kuna seda toodetakse ilma otseste kasvuhoonegaaside heitkogusteta. Võrguhalduse ja salvestamise lahenduste eesmärk on tagada elektrivõrgu stabiilsus, integreerides samal ajal katkendlikke taastuvaid energiaallikaid, kasutades potentsiaalselt vesinikku kui energiasalvestusvahendit.
- **Bioloogiline ja fotokatalüütiline tootmine** – Bioloogiline vesiniku tootmine hõlmab mikroorganismide või ensüümide kasutamist vesiniku tootmiseks erinevate ainevahetusradade, näiteks kääritamise või fotosünteesi abil. Lähenemisviis võib pakkuda säästvamaid ja kulutasuvamaid võimalusi vesiniku tootmiseks. Fotokatalüütiline tootmine seevastu hõlmab valguse kasutamist keemiliste reaktsioonide käivitamiseks, mis tekitavad vesinikku. Tehislik fotosüntees jäljendab looduslikku fotosünteesi, mille puhul päikeseenergia muundatakse keemiliseks energiaks vesiniku kujul. Ehkki need lähenemisviisid on veel arendusjärgus, on neil potentsiaali muuta vesiniku tootmise meetodeid.
- **Kihitlisandustehnoloogiad** – Elektrolüüserite ja teiste elektrokeemiliste rakkude elementide – elektroodide ja eraldusmembraanide tootmiseks kasutatakse erinevaid kihitlisandustehnoloogiaid, millede arendamine mõjutab otseselt elektrolüüsi raku kvaliteeti.
- **Power to X** - Vesinik elektrolüüsist võimaldab CO₂ vabalt toota erinevaid inimtegevuseks vajalikke kemikaale nagu ammoniaak (väetised, lõhkeained, ravimid) või metanool (keemiatööstuse baaskemikaal, mida saab muundada mitmeks teiseks oluliseks tooteks värvi-, polümeeri-, liimi- või ravimitööstuses).

Tehnoloogiad ja valdkonnad, mida mõjutab läbimurre vesinikutehnoloogiates:

- Energiasalvestamine
- Vee magestamistehnikad
- Materjaliteadus
- Biotehnoloogia
- Termotuumasüntees

¹⁶⁹ EESTI VESINIKURESSURSSIDE KASUTUSELEVÕTU ANALÜÜS. Civitta, SEI, KBFI. (2021)

¹⁷⁰ Frischauf, Norbert. "Hydrogen-fueled spacecraft and other space applications of hydrogen." (2016).

TEHNOLOGIASUUNAGA TEGELEVAD TÄHTSAMAD EESTI ETTEVÕTTED JA UURIMISÜKSUSED:

- H2Electro OÜ – uudne tehnoloogia (kõrgtemperatuurse tahkeoksiidsed elektrolüüserid) eristab neid oma konkurentidest loodetavat pikaajalist töökindlust lubavate materjalide poolest,
- Stargate Hydrogen Solutions OÜ – arendab aluselises keskkonnas toimuvat elektrolüüsi läbi uuenduste materjalides
- Elcogen AS – tahkeoksiid-kütuseelementide tootmine.
- PowerUP Fuel Cells OÜ, Ivar Kruusenberg – vesiniku kütuselementide arendus ja tootmine

TEHNOLOGIASUUNAGA TEGELEVAD TÄHTSAMAD EESTI UURIMISASUTUSED:

- Tartu Ülikool – Professor Enn Lustil ja tema uurimisrühm, kellel on üle nelja dekaadi ulatuv vesiniku kütuseelementide, hilisemal ajal ka elektrolüüseritele vajalike materjalide uurimisalane töökogemus
- Tallinna Tehnikaülikool, Sergei Bereznev ja Veroonika Shirokova – materjalid vesiniku kütuseelementide passiivseks jahutamiseks
- Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut (KBFI), Ivar Kruusenberg – vesiniku kütuseelementide materjalide arendus ja taaskäitluse uurimine
- TalTech Virumaa kolledž, VIDRIK, - mikrovõrgu ja vesinikutootmise demolabori arendus



8. TEHNOLOOGIATE POTENTSIAALIST PROBLEEMINI

8.1. IDEAALMAAILM

Aastaks 2050 on Eesti täielikult omaks võtnud süvatehnoloogiate võimalused ning on muutunud jõukaks ja innovaatiliseks ühiskonnaks.

Digitaliseeritud rakuliinide ja personaalmeditsiini arendamise ühendamine on võimaldanud teha revolutsiooni meditsiinis, muutes **personaalsed ravimeetodid kõigile kättesaadavaks**. Täiustatud geeniteraapia ja kohandatud ravimid on nüüdseks tavalised, mis on suunatud enneolematu täpsusega konkreetsetele haigustele ja seisunditele. Tervishoiusüsteem on **ennetavam, tõhusam ja tulemuslikum**, vähendades majanduslikku koormust ja parandades üldist rahvatervist.

Vesinikutehnoloogia laialdane kasutamine on toonud kaasa **kasvuhoonegaaside heitkoguste märkimisväärselt vähenemise**, mis on toonud Eestile juhtpositsiooni kliimamuutuste vastases võitluses. Kogu maailmas on **vesinikutehnoloogiast saanud energiaallikate kombinatsiooni keskne komponent**, mis pakub **puhast ja säästvat energiat** mitmesuguste rakenduste jaoks. Taastuvatest energiaallikatest toodetud roheline vesinik annab energiat transpordile, küttele ja tööstusele, vähendades oluliselt süsinikdioksiidi heitkoguseid ja õhusaastet. **Linnad on puhtamad ja vaiksemad**, tänavatel domineerivad vesinikkütuseelementidega töötavad elektrisõidukid.

Eesti on märkimisväärselt investeerinud alternatiivsesse lihatootmisse, mille tulemuseks on **jätkusuutlik ja keskkonnasõbralik toidusüsteem**. Maailmas on alternatiivne lihatootmine oluliselt vähendanud toiduainetööstuse ökoloogilist jalajälge. Laboris kasvatatud liha ja taimsed alternatiivid on muutunud normiks, rahuldades ülemaailmset nõudlust valkude järele **ilma intensiivse loomakasvatuse vajaduseta**. See on toonud kaasa kasvuhoonegaaside heitkoguste, metsade raadamise ja veereostuse olulise vähenemise. Lisaks on **tervislike ja säästvate toiduvalikute levik parandanud rahvatervist**, sest rasvumise, diabeedi ja südamehaiguste arv on vähenenud.

Edusammud sardsüsteemide ja nanokiipide vallas on võimaldanud arendada täielikult ühendatud ja turvalist transpordisüsteemi, mis on vähendanud ummikuid ja parandanud õhukvaliteeti. See on aidanud kaasa **arukate linnade arengule**, muutes linnaelu tõhusamaks, säästvamaks ja elanikele meeldivamaks.

Biorafineerimistehased on edukalt suunanud maailma ringmajandusele, muutes jäätmed ja biomassi väärtuslikeks materjalideks, kemikaalideks ja kütusteks. See on oluliselt vähendanud sõltuvust fossiilkütustest ja aidanud leevendada kliimamuutuste mõju. Biopõhiste toodete laialdane kasutuselevõtt on stimuleerinud **majanduskasvu ja töökohtade loomist maapiirkondades**, edendades säästvat arengut.

Tehisintellekti ja masinõppe vallas on läbimurded XAI ja rohelise tehisintellekti vallas **demokratiseerinud juurdepääsu kõrgtehnoloogiale**. Tehisintellektipõhised lahendused on muutnud **hariduse personaalsemaks** ja optimeerinud ressursside jaotamist kõikides sektorites. See on aidanud vähendada lõhet rikaste ja vaeste vahel, **edendades suuremat sotsiaalset võrdsust ja majanduslikke võimalusi** kõigile.

Süvatehnoloogiate teadmiste levik on toonud Eestis kaasa elava ja uuendusliku keskkonna, mis meelitab ligi inimesi ja investoreid kogu maailmast. Selle tulemusena on Eestist saanud **ülemaailmne tehnilise innovatsiooni keskus, mille eelised on tunda kogu riigis**. Valitsus on saavutanud tasakaalu majandusliku arengu ja sotsiaalse võrdsuse vahel, tagades, et **kõik elanikud saavad kasu tehnilisest arengust**.

Aastal 2050 on maailm täielikult omaks võtnud süvatehnoloogiate potentsiaali, muutes igapäevaelu, tervist, turvalisust, majandust ja keskkonda paremaks. Eestist on saanud jätkusuutliku majanduskasvu mudel, mis on saavutatud tänu nende tehnoloogiate tõhusale kasutuselevõtule, näidates innovatsiooni muutvat jõudu, **kui seda rakendatakse vastutustundlikult ja õiglaselt**.

- ChatGPT-4, 27.04.2023

8.2. VÄLJAKUTSED

ÜHISKONDLIK EBAVÕRDSUS

Süvatehnoloogiate potentsiaal süvendada olemasolevat ebavõrdsust nii eraisikute, ettevõtete kui ka riikide vahel on pakiline ja ennetavalt lahendamist vajav mure. Uuringus süvitsi käsitletud kuuest tehnoloogiast on see oht realistlik vähemalt nelja puhul. Nii on sardsüsteemid ja kiibitehnoloogiad, ent ka tehisintellekt, alternatiivsed lihatootmised ja rakutüvede digitaliseeritud arendamine kõik olulise mõjuga ühiskondliku ebavõrdsuse suurendamiseks või vähendamiseks.

Kiibitehnoloogiate ja sardsüsteemide puhul domineerivad nii tootmist kui ka uute arenduste patenteerimist üksikud oligopoolses seisundis mastaapsed globaallettevõtted. Kultiveeritud liha turule jõudmist ennustatakse esimesena rikastes riikides, kus toote kõrge hinna tõttu on esimesed tarbijad nende riikide jõukamad kodanikud. Tehisintellekti arengut on maailmas edasi viinud eelkõige üksikud suurettevõtted¹⁷¹ ja selle põhjustatav tööturu ümberjaotus¹⁷² toob kaasa madalama nõutud kvalifikatsiooniga töökohtade ebaproportsionaalselt kiire vähenemise, millega kaasneb omakorda sissetulekute ebavõrdsuse suurenemine¹⁷².

Kuigi iga tehnoloogia võib tekitada uusi kõrgtehnoloogilisi ning kõrgepalgalisi töökohti, suurendab mõjutatud töötajate hulk oluliselt majanduslikku ebavõrdsust, toimetulekuprobleeme ning omakorda tööpuudust. Tööpuuduse tõusu on korduvalt seotud sotsiaalsete pingete ja kuritegevuse suurenemisega^{173,174}. Selle vastu võitlemiseks tuleb rakendada konkreetseid poliitikameetmeid, mis keskenduvad võrdsele juurdepääsule haridusele ja tehnoloogiale, ent kiiremate meetmetena ka otsestele toimetuleku- ja töötutoetusele ning algatustele, mis aitavad tõsta ja ühtlustada kodanike digipädevust.

¹⁷¹ Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies. WW Norton & Company.

¹⁷² Frey, C. B., & Osborne, M. A. (2017). The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation?. Technological forecasting and social change, 114, 254-280.

¹⁷³ Jawadi, F., Mallick, S. K., Cheffou, A. I., & Augustine, A. (2021). Does higher unemployment lead to greater criminality? Revisiting the debate over the business cycle. Journal of Economic Behavior & Organization, 182, 448-471.

¹⁷⁴ Gallie, D., Paugam, S., & Jacobs, S. (2003). Unemployment, poverty and social isolation: Is there a vicious circle of social exclusion? European societies, 5(1), 1-32.

MÕJU MAJANDUSELE, RIIGIVALITSEMISELE JA DEMOKRAATIALE

Enamikke süvatehnoloogiad iseloomustab enneolematu kapitalimahukus. Mitmetel juhtudel – parimaks näiteks on kiibitehnoloogiad – on tootmine koondunud vaid üksikute globaalsete ettevõtete kätte ning keda lisaks iseloomustab kõrgem teadusvõimekus, kommertsialiseerimishuvi ja juriidiline pädevus. Nii on intervjueeritud ekspertide sõnul eriti USAle iseloomulik väga tugev tööstussektor, kes on paika pannud väärtusahelad, omades nii kapitalimahukaid laboreid, tippteadlasi, kommertsialiseerimishuviga teadustöötajaid, ent ka spetsialiste, kelle igapäevaseks tööks on kõige uuemate teadusuuringute skriining, eesmärgiga tuvastada patenteerimata avastused, mida üle võtta. Kasumlik tööstus investeerib ligi kolmveerandi kogu sektori T&A arendusest, mis on märgatavalt suurem Euroopa samast näitajast.

Äriliselt tähendab see, et maailmaturg soosib suuri tegijaid, kes kasvavad tehnoloogiate arenedes eksponentsiaalselt. Potentsiaalne oht on, et võimu koondumine nende ettevõtetele või isikute kätte, kes tehnoloogiad omavad või kontrollivad, võib põhjustada tasakaalustamatust hüvede ja otsustusõiguse jaotamisel. Lõpuks kujutab süvatehnoloogiasektori plutokraatia olulist ohtu demokraatlikele ideaalidele¹⁷⁵. Selle ohu ennetamiseks on oluline luua õiglast konkurentsi tagav, intellektuaalomandi õigusi kaitsev ning läbipaistvus ja vastutust edendav reguleeriv raamistik¹⁷⁶.

Eestis on kirjeldatud mured ja lahendused seotud patenteerimisega. See tähendab patenteerimisvõimekuse olulist suurendamist, panustamist vahendeid sinna, mida saab patenteerida. Senist patenteerimise vähesust Eestis seletatakse vahepealse praktika kadumisega, kui 90ndatel puudus patendiseadus. Põhjus võib olla ka tänase teadus-arendustegevuse süsteemse hindamise loogikas, kus patenteerimise mõju tähtsustatakse vähem kui publitseerimist ning grandid on seotud eelkõige viimasega. Samuti tõstavad teadlased esile patenteerimise kompetentsi liikumise ülikoolidest teadusparkidesse ja Ettevõtluse ja Innovatsiooni Sihtasutusse.

MÕJU KESKKONNALE

Ilma sihipärase ning nõuetekohase rakendamise ja haldamiseta võivad süvatehnoloogiad tahtmatult keskkonda kahjustada¹⁷⁷. Hädavajalikud on jätkusuutlikkust ning vastutustundlikku ressursikasutust esikohale seadvad õigusaktid ja suunised¹⁷⁸, et tagada tehnoloogiate väiksem keskkonnajalajalg ning vältida soovimatuid tagajärgi. Näiteks tuleb arvestada:

- Tehisintellekti treenimise ja andmekeskuste energiakuulus on hinnatud 2020. aastal üle 1,5%¹⁷⁹ - 4%¹⁸⁰ kogu globaalsest energiakasutusest ning eeldatakse nende mahtude jätkuvat ja kiiret suurenemist. Ainuüksi CHATGPT-3 mudeli ühekordne treenimine kulutas 1287 MWh, mis on võrreldav ühe USA majapidamise 120 aasta energiakuuluga. Seejuures on tegemist vaid ühe keelemudeliga – mis on tehisintellekti maailmas vaid üks võimalik alaliik – ning ka konkreetse toote puhul on juba olemas uuemad ja energiakuulukamad versioonid.
- Kiipide plahvatuslik kasutamisintensiivsuse tõus ja levik järjest enamates igapäevaelu seadmetes toob kaasa koormuse tõusu keskkonnale. Seeläbi suureneb kiipide arvukus ning nõudlus haruldastele ja suurema keskkonnamõjuga metallidele.
- Vesiniktehnoloogiaga seotud keskkonnariskid on seotud turvalisusega transpordis ja hoiustamisel, ent ka ulatusliku vesiniktaristu rajamise mõjuga maakasutusele.

¹⁷⁵ Pasquale, F. (2015). The black box society: The secret algorithms that control money and information. Harvard University Press.

¹⁷⁶ Stiglitz, J. (2019). People, power, and profits: Progressive capitalism for an age of discontent. Penguin UK.

¹⁷⁷ Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., ... & Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *nature*, 461(7263), 472-475.

¹⁷⁸ Oberle, B., Bringezu, S., Hatfield-Dodds, S., Hellweg, S., Schandl, H., & Clement, J. (2019). Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want: Summary for Policymakers. ETH Zurich.

¹⁷⁹ Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S., & Koomey, J. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*, 367(6481), 984-986.

¹⁸⁰ <https://www.engie.com/en/campaign/green-data-centers> [vaadatud 28.04.2023]

- Puidu biorafineerimiseks on vajalik ulatuslike tehaste rajamine, mis on energiamahukad, looduskeskkonda kulutavad ning potentsiaalse müra-, õhu-, lõhna- ja veereostus riski või häiringutega.

Lühidalt on iga uus tehnoloogia oma olemuselt energiakulukas, nõuab enamasti uute ressursside sisendit ja hankimist, võib kahjustada ökosüsteeme ja looduskeskkonda. Seega sõltub iga uue süvatehnoloogia konkreetne keskkonnamõju tegelikkuses tema otsesest kasutusest – kuivõrd on tehnoloogia otseselt suunatud keskkonnajalajälje vähendamisse nii arendamisel, tootmisel kui ka kasutamisel. Näiteks tuleb saavutada tasakaal arvutusmahtude tõusu ja energiaefektiivsuse suurendamise vahel tehisintellektis või prioritseerida kiipide kasutust keskkonnaseireks ning säästvate lahenduste leidmiseks reaalajas.

Eelnevale lisaks on järgmises tabelis kirjeldatud iga tehnoloogia võimalikud suurimad potentsiaalsed probleemid nende arendamisel ehk teisisõnu väljakutsed, mis võivad tehnoloogia arengut ja läbimurdeid ning efektiivset kasutuselevõttu pidurdada

TABEL 2. POTENTIAALSELT MÕJUKAIMAD PROBLEEMID TEHNOLOOGIATE RAKENDUMISEL

Tehnoloogia	Potentsiaalsed probleemid	Tõenäosus	Tõsidus	Järeldused	Võimalikud lahendused Eestis	Ajakriitilisus Eestile
Vesinik	Transport ja ladustamine	Keskmine	Suur	Kriitiline probleem, kuid seotud ka rahvusvaheliste arengutega.	Taristu ennetav arendamine.	Taristu arendamine on kriitiline. Suuremahulised ladustamise materjalide-tehnoloogiate areng sõltub globaalsetest teadusarendusest.
	Taristu valmisolek	Suur	Suur	Taristu valmisolek mõjutab ekspordivõimekust ning turule jõudmise kiirust, mis võib anda väga suure eelise lepingute näol. Taristu ehitust soosib vesinik-strateegia olemasolu.	Valitsuse toetus süvasadamate transportivaks muutmisele. Rahvusvaheline koostöö, et tagada liituda Nordic Hydrogen Route'iga. Päikese- ja tuuleparkide ning seonduva võrgu arendamine.	Väga suur. Sadamate puhul on ekspordipotentsiaal suur, kui lepingud saada enne põhjamaasid, kus mahud on kordades suuremad. Alustada planeerimise ja investeringutega esimesel võimalusel
Liha alternatiivne tootmine	Skaleeritavus	Suur	Suur	Lahendamist vajav probleem suuremahuliseks ning ohutuks tootmiseks	T&A investeringud ja rahvusvaheline teadlaste koostöö	Madal või keskmine. Suuremahuline tootmine ja tarbimine Eestis on ebarealistlik.
	Regulatiivne heakskiit	Keskmine	Keskmine	Toob tõenäoliselt kaasa viivitused kultiveeritud ja mikroobse liha turule jõudmisel. Väike mõju taimsetele alternatiividele, mis on juba turul	Surve T&A-l, et tagada EL regulatsioonidele vastavus.	Keskmine: vajalik proaktiivne koostöö regulaatoritega
Tehisintellekt ja masinõpe	Andmete turvalisus, eetika	Keskmine	Väga suur	Keskne probleem edasiseks läbimurdeks ja veelgi laiemaks levikuks .	Luua riiklikult õiguslik raamistik AI kasutamiseks. Rakendada UNESCO AI eetikaraamistikku Toetada EL tasandi regulatiivset koostööd.	Suur. Võimalusel alustada kohe, et luua sarnane raam kui oli veebitehnoloogiate arenguks 2000ndate algusel.
	Tööturu muutused	Suur	Väga suur	Väga oluline mõju tööturule, mis juhtub vältimatult. Ebavõrdsuse suurenemise risk	Riiklik strateegia AI kasutamiseks. Ettevõtete sisesed ümberkorraldused AI paremaks kasutuselevõtuks.	Keskmine kuni suur. Risk on ajas suurenev
Sardsüsteemid ja nanokiibid	Keskkonnamõju	Suur	Keskmine	Kiipide keskkonnamõju sõltub otseselt nende sihtotstarbelisest kasutamisest. Kiipide plahvatuslik levik tähendab keskkonnamõju	Rahvusvaheline T&A koostöö energiasäästlikumate kiipide ja sardsüsteemide väljatöötamiseks.	Madal. Mõju avaldub eelkõige läbi kiipide kasutamise ja tarbimise. Suuremahulist tootmist Eestis ei ole.

Tehnoloogia	Potentsiaalsed probleemid	Tõenäosus	Tõsidus	Järeldused	Võimalikud lahendused Eestis	Ajakriitilisus Eestile
				suurenemist ja nõudlust haruldastele metallidele.		
	Julgeolekuohud	Keskmine	Väga suur	<i>Reverse engineering</i> ja oht IP kaitsele on uute kiibitehnoloogiatega vältimatult kaasnevad riskid, nõudes riskivalmiduse tõusu igal tasandil.	Panustamine turvalisse kiibidisaini, kasutades olemasolevaid kompetentse IT ja küberturvalisusest.	Pigem ajakriitiline ning nõuab ennetavat valmisolekut nii kiibidisainis kui meetmeid juhaks kui oht on realiseerunud.
Biorafineerimine	Sotsiaalne heakskiit	Suur	Keskmine	Ühiskondlik vastuseis võib olla piisavalt suur, et survestada tehaste rajamisest loobuda	Kaaluda tehase rajamist varasematele tööstusaladele.	Suur. Nõuab ennetavaid tegevusi teadliku asukohavaliku ja varajase ning läbipaistva planeeringu ja mõju hindamise näol.
	Keskkonnamõju	Keskmine	Suur	Nii raiemahud kui tehase töötamisega kaasnev mõju vajab pidevat jälgimist ja leevendusstrateegiaid	Regulatiivsete nõuete kehtestamine ja rakendamine.	Keskmine. Keskkonnamõju leevendamine on planeerimisprotsessi loomulik osa
Rakutüvede digitaliseeritud arendamine	Intellektuaal-omand	Suur	Keskmine	Intellektuaalomandi kaitsmine nõuab õigusraamistikke, turvalist andmete jagamist ja koostööd tööstusega.	Suurendada oluliselt teadlaste tehnoloogiate patentimise kompetentse ja mahte	Suur. Intellektuaalomandi kaitsega tegelemine on kriitilise tähtsusega varakult
	Koostöö tööstusega	Keskmine	Suur	Kasumlikkuse võimalused tekivad koostöös tööstusega, ent risk on tehnoloogiate ülevõtmisel ja potentsiaalse turu võimaluste kadumisel.	Tarneahelate defineerimine ja patenteerimise väärtustamine	Keskmine kuni suur.

Allikas: autorite koostatud

Kuidas lugeda tabelit:

- Potentsiaalsed probleemid – väljakutsed, mis võivad tehnoloogia arengut ja läbimurdeid pidurdada ning efektiivset kasutuselevõttu aeglustada.
- Tõenäosus – probleemi juhtumise võimalus (väike, keskmine, suur)
- Tõsidus – probleemi ulatuse suurus selle realiseerumise korral.
- Järeldused – baseerub eelmisel kahel tulbal
- Võimalikud lahendused Eestis – kuidas riske ennetada või maandada
- Ajakriitilisus – kui ajakriitiline on probleemi ennetamine või sellega tegelemine Eestile.

Kuidas lugeda tabelit:

- Potentsiaalsed probleemid – väljakutsed, mis võivad tehnoloogia arengut ja läbimurdeid pidurdada ning efektiivset kasutuselevõttu aeglustada.
- Tõenäosus – probleemi juhtumise võimalus (väike, keskmine, suur)
- Tõsidus – probleemi ulatuse suurus selle realiseerumise korral.
- Järeldused – baseerub eelmisel kahel tulbal
- Võimalikud lahendused Eestis – kuidas riske ennetada või maandada
- Ajakriitilisus – kui ajakriitiline on probleemi ennetamine või sellega tegelemine Eestile.



9. AVALIKU SEKTORI OTSUSTUSKOHAD

Peatükis keskendutakse süvatehnoloogiate arengutega seotud Eesti võimalustele ja valikutele. Selle jaoks eristatakse murdepunkte, Eesti ekspordipotentsiaali ning kahe eelmise koosmõjul esile kerkivaid otsustuskohti. Peatükk toetub tehnoloogilise innovatsiooni ja süsteemiteooria seostele¹⁸¹.

Peatüki struktuur ja lugemist toetavad selgitused on järgnevad:

Murdepunkt - Koht kompleksete süsteemide teoorias, mille ületamisel toimub süsteemi arengus sageli pöördumatu muutus¹⁸². Süvatehnoloogiate kontekstis on need mõistetavad kui tehnoloogia või ümbritseva keskkonna murrangulised arengud, mida Eesti ei saa oluliselt mõjutada või muuta.

Eesti potentsiaal - Eesti potentsiaal tehnoloogia arendamisel ja teabe või toote ekspordil, eristades etappidena T&A tegevust, tootmist ning laiemat kommersiaalset levikut.

Otsustuskoht - Kõige tähtsamad küsimused ja valikud, mis tuleb Eestil iga tehnoloogia puhul kahe eelneva punkti põhjal püstitada või lahendada. Otsustuskohad on Eesti avaliku sektori enda mõjutada ning nendest sõltub enim tehnoloogia kohalik läbilöögivõime, majanduslik potentsiaal ja valdkondlik mõju Eestile.

Joonised - Esitatud joonised (tehnoloogiainnovatsiooni ja -leviku protsess) näitavad tehnoloogiliste arengute paiknemist ajajoonel:

- Must kast koos tehnoloogia või selle arenguga (näiteks kultiveeritud liha) iseloomustab tehnoloogia tänast paiknemist arendus-üleminek-tootmine-levik skaalal.
- Kastiga seotud sinised nooled näitavad aega süvatehnoloogia liikumisele viidatud tasemele, mis on joonisel näidatud noole otspunktiga. Näiteks – kultiveeritud liha puhul võtab kasvufaasi ja tootmise skaleerimisse jõudmine aega 20 aastat. Oluline on rõhutada, et esitatud ajaperioodid on valdavalt hinnangulised ning keskenduda tuleks suurusjärgule. Ühene teaduslik konsensus valdavalt puudub.

¹⁸¹ Frenken, Koen. (2006). Technological innovation and complexity theory. *Economics of Innovation and New Technology*. 15. 137-155. 10.1080/10438590500141453.

¹⁸² Reeglina on murdepunktid seotud arvukate tingimustega, mis on vajalikud murdepunkti tekkimiseks: mittelineaarsus, ringloogika (multiplikaatorid), heterogeensus, mõõdukas säilenõtlikkus ja kriitiline lävi.

- Joonise alaosas olevad oranžid kastid tähistavad olulisemaid (ja mitte kõiki) tehnoloogiaga seotud murdepunkte ning nende vastavat paiknemist arendus-üleminek-tootmine-levik skaalal.

Joonisele järgnevad selgitused keskenduvad eelkõige Eesti (eksporti-)potentsiaalile.

Tulemuste tõlgendamisel tasub arvestada tehnoloogiate ülekandemõjuga (ingl. keeles *spillover effect*) ehk protsessiga, kus ühe ettevõtte või valdkonna tehnoloogilised uuendused ja teadmised mõjutavad positiivselt teisi ettevõtteid või sektoreid. See tähendab, et investeringud teadus- ja arendustegevusse ühes valdkonnas võivad kaasa tuua kasu ja tehnoloogilise arengu teistes valdkondades, isegi kui need pole otseselt seotud, aidates kaasa majanduskasvule, tootlikkuse paranemisele ja üldisele tehnoloogilisele arengule.

Peatüki lõpus (alapeatükk 9.7) on olulisemad otsustuskohad kõigi süvatehnoloogiate kohta võetud kokku tabelina.

9.1. LIHA ALTERNATIIVNE TOOTMINE

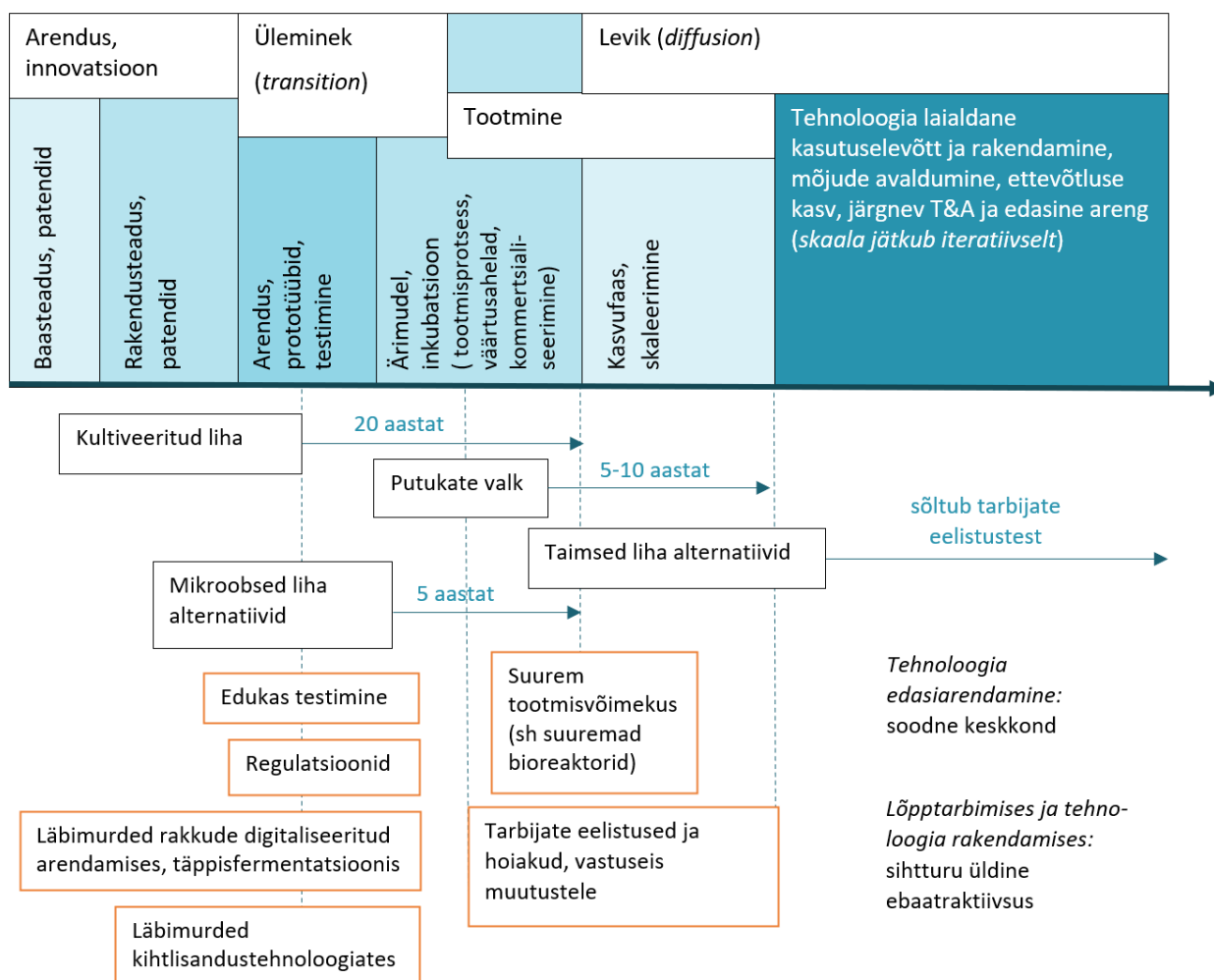
Peamised murdepunktid liha alternatiivse tootmise juures on seotud testimise edukusega (tervisemõjud ning õige konsistents ja maitse), regulatsioonidega, läbimurretega erinevates sidustehnoloogiates, suurema tootmisvõimekuse saavutamise ja tarbija hoiakute muutumisega. Nagu on kujutatud järgneval joonisel (vt Joonis 1), siis kõik nimetatud murdepunktid mõjutavad kultiveeritud liha ning mikroobseid liha alternatiive. Putukate valk kui liha alternatiiv on faasis, kus toimub veel prototüüpimine ja testimine, kuid murdepunktid on seotud ärimudeli kujundamisega, sealhulgas suurema tootmisvõimekuse ning tarbijate positiivse hoiaku saavutamise. Taimsed liha alternatiivid ja seenerakkudel põhinevad alternatiivid on turul, kuid ei ole intervjueritud ekspertide sõnul saavutanud loodetud turuosa – siin on murdepunktiks tarbijate eelistuste muutumine, kuid samas arendatakse seda suunda toidutehnoloogiates jõudsalt edasi (järgnev T&A tegevus), mis võib viia uute lahendusteni.

Hinnanguliselt kulub 20 aastat, et kultiveeritud liha jõuaks masstootmisse ning viis aastat, et mikroobsed alternatiivid jõuaksid kasvufaasini. Liha taimsed alternatiivid on tänaseks küll laialdase leviku faasis, ent turuosa ei ole suurenenud prognoositud kiirusega ehk hetkel on taimsete alternatiivide turuosa liialt väike, et positiivne mõju oleks realiseerunud loodetud määral. Veelgi kiirem levik seisab eelkõige tarbijate eelistuste muutumise taga, mille muutumise kiirus või isegi juhtumine ei ole selge.

Süvatehnoloogiat arendatakse hajutatult globaalsel tasandil ning Eestil ei ole siin olulisi võimalusi murdepunkte mõjutada. Samas on Eesti taristu soodne nii tehnoloogia arendamiseks kui ka tootmiseks. Intervjuudes toodi välja Eesti head T&A tegevuse taustsüsteemi, paindlikkust ja kiiret kohanemisvõimet. Peamise sihtturuna on Eesti ja Euroopa Liit pigem ebaatraktiivsed (vt peatükk 2), kuid toodete vastavust Euroopa Liidu nõuetele peetakse samaaegselt ka kvaliteedimärgiks. Ülevaade Eesti potentsiaalset kultiveeritud liha osas on koondatud tabelisse 3.

„Eesti ettevõtluskeskkonna puhul on biotehnoloogia lähenemise toetamine suurepärase.“

„Ettevõtjale on [turule tulek – toim.] keeruliseks tehtud, aga tarbijale on EL turg selgelt kõige turvalisem valik. Usaldus on tugev, sealhulgas ka ettevõtjatel.“

JOONIS 1. LIHA ALTERNATIIVNE TOOTMINE TEHNOLOOGIAINNOVATSIOONI JA -LEVIKU PROTSESSIS¹⁸³

Allikas: autorite koostatud

Turul tegutsejad tunnevad puudust piloteerimis-tootmisvõimalustest, mis oleksid vajadusel ka skaleeritavad, seadmetest, samuti välise ekspertide kaasamise soodustamisest ja lihtsustamisest. Nagu teistegi süvatehnoloogiate puhul, rõhutati ka siin kvalifitseeritud tööjõu ja seeläbi ka haridussüsteemi tähtsust, sealhulgas vajadust tutvustada õpilastele erinevaid tehnoloogiaid ja nendega seotud võimalusi senisest varasemas kooliastmes.

Lisaks kultiveeritud lihale, siis teiste liha alternatiivse tootmise alakategooriate/tehnoloogiate (putukate valk, mikroobsed või taimsed liha alternatiivid) puhul on Eesti võimalused üldjoontes sarnased: fookus on rohkem teadus- ja arendustegevustel (mh täppisfermentatsiooni arendamisel), tootmisel ning vähem levikul. Skaleerides on eksport vältimatu.

¹⁸³ Joonise komponendid iseloomustavad protsessi üldiselt ega ole seetõttu ajaliselt võrreldavad ega suhestatavad.

TABEL 3. EESTI POTENTSIAAL KULTIVEERITUD LIHA KUI SÜVATEHNOLOOGIA ARENDAMISEL

Tehnoloogiainnovatsiooni ja -leviku protsessi üldkirjeldus		Eesti potentsiaal kultiveeritud liha kui süvatehnoloogia arendamisel
Teadus ja arendus	Baasteadus, patendid	teadustöö, patendid
	Rakendusteadus, patendid	- seadmed (bioreaktorid), seadmekomponendid ja litsentsid - rakusöötmed (retseptid), rakukasvustraadid - uuringud ja T&A ettevõtetele
Üleminek	Arendus, prototüübid, testimine Ärimudel, inkubatsioon	reguleerida testimine -> testlabor, muuhulgas tuginev terviseandmetele ja tervisetehnoloogiatele degusteerimine, messid
Levik	Tootmine	Kasvufaas, skaleerimine
		- seadmekomponendid, disain - rakusöötmed (retseptid) ja rakukasvustraadid - sadamate kasutamine ekspordiks
		Laialdane kasutuselevõtt ja edasine areng
		tehnoloogia arenduse ja tootmise levik ning klasterdumine

Allikas: autorite koostatud

Peamised otsustuskohad Eesti jaoks on:

- Kas tootmine peab olema Eestis?
 - Teoreetiliselt on tootmispotentsiaal peidus nii mikroobsetes alternatiivides (Eesti kõrge T&A tegevuse tase ja seni paljuski täitmata nišš ka globaalsel tasandil), taimsetes alternatiivides (liha alternatiivsetest tootmisviisidest on Eestis enim just selle tehnoloogiaga tegelevaid ettevõtteid) kui ka laiemalt seadmekomponentide tootmine ja disainis.
 - Samas, kui kultiveeritud liha ja suuremahulised bioreaktorid nõuavad ressursse ja panustamist ühele nišile mahus, mis on Eestile ebaotstarbekas, on praktikas mõistlik soosida ka teiste tehnoloogiaga seotud äriühingute reliseerumist (vt eelnev tabel), mis omakorda soodustab iteratiivselt ka tiptasemel teaduse arengut.
- Millisel määral ja kuidas panustada tarbija eelistuste muutumisse nii, et (1) ärimudel toimiks ja kasv oleks võimalik; (2) suurendada positiivset keskkonna- ja tervise mõju?
 - Alternatiiv A: Avalik sektor võib korraldada intensiivse nügimis- ja teavituskampaania, et alata avalik diskussioon nii laboris kasvatatud liha kui ka muudest liha tootmise alternatiivide eelistest. See peab hõlmama esmalt kohaliku turu rakendusühtsusi tarbijakäitumisest ning -eelistustest, et seejärel rakendada käitumisteadustel põhinevaid märke ja/või otsesemaid mõjutusvahendeid maksu- või muude seadusmuudatuste näol.
 - Alternatiiv B: Võimaldada turujõududel ja erasektoril suurendada üldsuse teadlikkust ja liha alternatiivide heakskiitu. See nõuab vähem valitsuse või ministeeriumite sekkumist, ent muutused võivad olla aeglasemad.

9.2. PUIDU BIORAFINEERIMINE

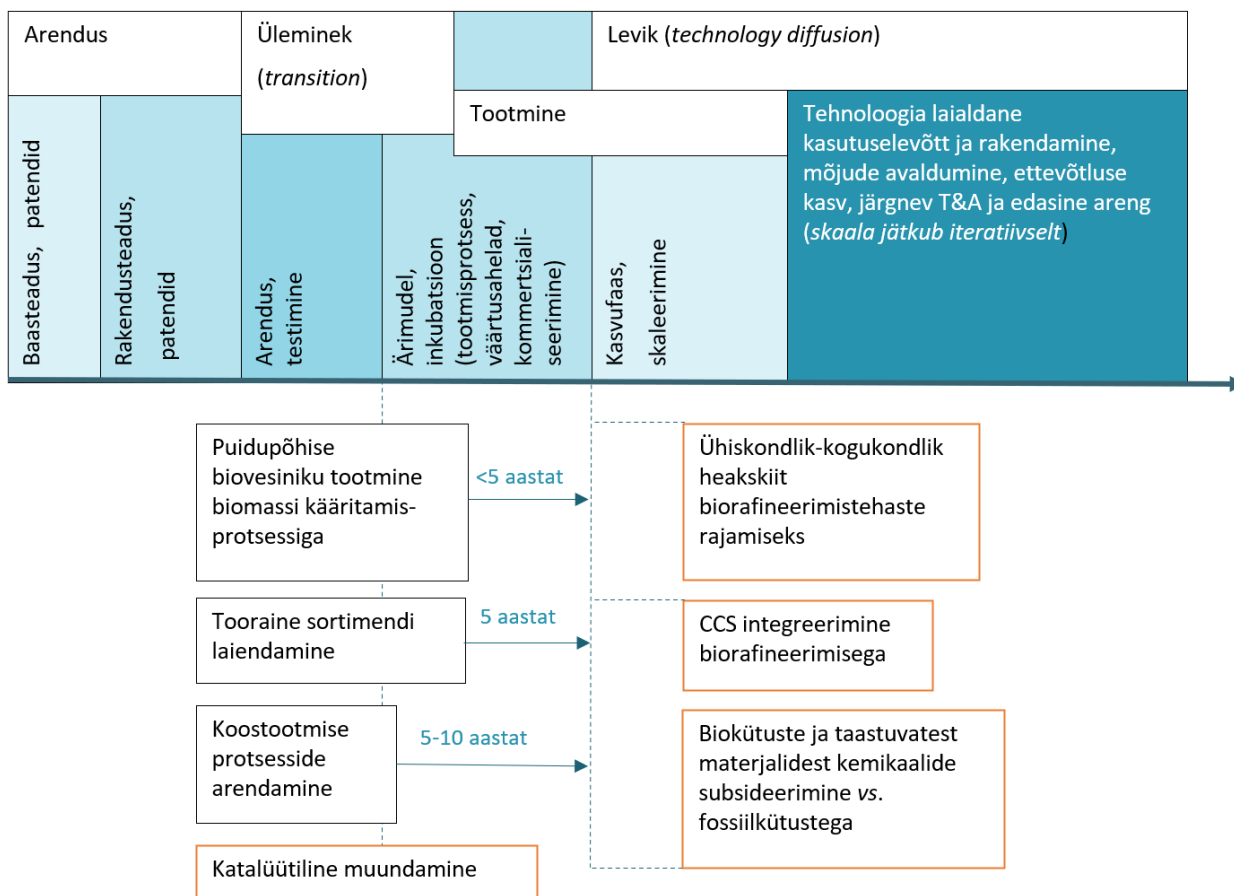
Biorafineerimine võimaldab asendada täna laialt kasutatud fossiilset päritolu kütused, kemikaalid ning materjalid bio-põhiste alternatiividega, mille omadused ja funktsionaalsus on varasemaga võrreldes paremad või vähemalt analoogsed. Biorafineerimine võimaldab kasutusele võtta mitmed tänapäeva tööstuslikud jäägid ja kõrvalsaadused ning anda neile kõrgem väärtus ringmajanduse kontekstis

Süvatehnoloogina hõlmab biorafineerimine erinevaid fookusvaldkondi, mis on oma arengus erinevatel tehnoloogia valmiduse tasemetel. Näiteks on esimese ja teise põlvkonna bioetanooli tootmine küpsed tehnoloogiad (TRL 9 ja 7-8), mis kasutatakse suhkrust, tärklisest või lignotsellululoosist biomassist bioetanooli

tootmiseks. TRL tasemega 6-7 on biomassist bioplastide tootmine, tasemega 4-6 näiteks biovesiniku tootmine puidust ja vahemikku TRL 3-5 jääb ligniini kasutamine erinevate keemiatoodete allikana.

Mitmetest teistest siin aruandes süvitsi käsitletud süvatehnoloogiaga võrreldes – näiteks tehisintellekt või kiibitehnoloogiate arendamine – ei ole biorafineerimise puhul tegemist väga horisontaalse tehnoloogiaga, mille areng mõjutaks arvukate teiste tehnoloogiate arengut, kui samas omab laiemat mõju energiatõhususe saavutamisele. Nii on (puidupõhise) biorafineerimise murdepunktid seotud ennekõike tehnoloogia enda tootmisvõimaluste laiendamisega, kus valdav osa arengutest on eri moel seotud tooraine sortimendi laiendamise või koostootmisprotsesside arendamisega.

JOONIS 2. BIORAFINEERIMINE TEHNOLOOGIAINNOVATSIOONI JA -LEVIKU PROTSESSIS



Allikas: autorite koostatud

Biorafineerimisega seotud Eesti potentsiaali võib liigitada katusmõtte alla, et puidu eksport väärindamata kujul jätab kasutamata suure majandusliku potentsiaali. Nii asetub Eesti võimalus sarnaselt teistele riikidele eelkõige kohaliku toorme väärindamises ja kõrgema lisandväärtusega toodete ekspordis. Unikaalsust lisab ettevõtete ka maailma mõistes uuenduslike tehnoloogiate ja katsetehaste kasutuselevõtt, mis võimaldab pikemas ajaskaalas toota toorainesisendit farmaatsia, kosmeetika ning keemia- ja materjalitööstusele, mis asendaks naftasaadustel põhinevat tootmist. Majanduslikult optimaalne lähenemine näeb ette, et esimeses järjekorras võetakse toormest välja maksimaalselt kõrge väärtusega ained ja seejärel järjest madalama väärtusega ühendid-materjalid.

Üks keskne biorafineerimise tehnoloogia arengu võti on puidu enda tooraine laiendamine. Kui hetkel kasutatakse Eestis puidu rafineerimisel toorainena üksnes kaske, millest toodetakse ligniini, puidusuhkrut C5- ja C6 ning eritselluloosi, siis katsetused on pooleli ka lelapõhise toormega.



Biorafineerimise väärtus ja võimalus seisneb puidu- või selle tootmisel tekkinud jäätuste väärdamises ja ekspordis. Suurim arenduse võimalus võib peituda puidupõhiste farmaatsia- või keemiatoodete tootmisel, mis võiks asendada toorainena naftat.

Võimalus keskkonnajalajälge vähendamiseks on märkimisväärne, ent on potentsiaalne oht, et suurendatakse järsult metsamassiivide raiet, rahuldumaks üleilmselt nõudlust biokemikaalide järele.

Rohkem võimalusi Eesti kontekstis on toodud järgnevas tabelis 4.

TABEL 4. EESTI POTENTSIAAL BIORAFINEERIMISE KUI SÜVATEHNOLOOGIA ARENDAMISEL

Tehnoloogiainnovatsiooni ja -leviku protsessi üldkirjeldus		Eesti potentsiaal rakutüvede digitaliseeritud arendamise kui süvatehnoloogia arendamisel
Teadus ja arendus	Baasteadus, patendid	Alusteaduse uuringud ligniini struktuuri ja omaduste kohta keemiliste reaktsioonides
	Rakendusteadus, patendid	Koostöö materjaliteaduse valdkonnas sh biopõhine nailon
Üleminek	Arendus, prototüübid, testimine Ärimudel, inkubatsioon	Keskkonnasäästlik tselluloosist tekstiilkiu valmistamine Pilottehaste edasine rajamine ja nende koostöö ülikoolidena Tooraine materjali- ja keemiatööstusele. Tselluloosisuhkrute laiem kasutamine nii ehituses, farmaatsias kui ka toiduainetööstuses
		Tooraine sortimendi laiendamine Imavere katsetehase rahvusvaheline rakendamine.
Levik	Tootmine	Kasvufaas, skaleerimine Puidu biorafineerimistehase rajamine/tööstusliku tehase rajamine. Biokütuste ja biopõhise toorme subsideerimine vs. naftapõhisega
		Laialdane kasutuselevõtt ja edasine areng Riiklik energiasõltumatuse suurendamine. Tööstuse toel omavalitsuse tasandil majanduse oluline ehituskivi.

Allikas: autorite koostatud

Peamised otsustuskohad Eesti jaoks on:

- Milline peab olema tasakaal tootmise, puidu ekspordi ja metsade säilitamise vahel? Kui suurt osa metsast võib kasutada tootmismetsana? Kui palju tooret võib kasutada biotööstusele ilma metsade metsade elurikkust negatiivselt mõjutamata?
 - Kohaliku tootmise suurendamine praeguste ekspordimahtude juures tähendab metsaraie ja majandusmetsade osakaalu suurenemist. Praeguste raiemahtude säilitamine tähendaks uute puidurafineerimise võimekuste rajamisel seega laevaekspordi vähenemist. Samal ajal tuleb arvestada, et avalik surve metsade säilitamisele ei ole aastate jooksul vähenenud ning rohepöörde kontekstis võib pigem kasvada surve raiemahtude languseks.
- Kuidas suurendada kohalikku konkurentsi ja soodustada Eestis olemasolevate biorafineerimise tehnoloogiate ülevõtmist ja tootearendust? Mil moel vähendada sisenemisbarjääride, et soodustada konkurentsi?
 - Olemasolevate üksikute turuliidrite mastaabisääst ja võrgustiku mõju loovad märkimisväärseid tõkkeid uutele osalistele turule sisenemiseks, mis seega raskendab uute ettevõtete konkureerimist praegustega. See tähendab, et paljudel tehnoloogiaturgudel –

nagu ka biorafineerimise valdkonnas Eestis – domineerivad üksikud suured ettevõtted, kes saavad endale lubada suuri alginvesteeringuid (kasu mastaabisäästust) ja kes meelitavad ligi toodete väärtuse kasvades rohkem kasutajaid (võrguefektid). Pikemas plaanis võib see viia monopolide või oligopolide tekkeni, mis ei soodusta innovatsiooni.

- Poliitikakujundajatele on kaalutluskohaks, kuidas toetada võimalikult suurel määral praeguste tippettevõtete tehnoloogiainnovatsiooni ja globaalseid püüdluseid, ent samal ajal soodustada ka uute kohalike konkurentide ja uute väikearendajate teket.

9.3. RAKUTÜVEDE DIGITALISEERITUD ARENDAMINE

Rakutüvede digitaliseeritud arendamisel rakendatakse tehisintellekti ja masinõpet (peamiselt andmetöötluse võtmes) bioloogias, oomikate uurimisel - hõlmab genoomikat, epigenoomikat, transkriptoomikat, proteoomikat ja metabooloomikat.

„Tüvede digitaliseerimine ise on horisontaalne ja fundamentaalne tööriist - platvorm, mille peale saab ehitada. See võimaldab korraga palju teha, kuid ise peame andmebaasid koostama ja sellele tähenduse andma. Püstitama hüpoteese.“

„Andmetöötlus ja andmete kogumine osutub järjest rohkem võimaluseks. [...] Kasvu ei ole toinud andmepõhisus, see on lihtsalt vahend, millel on oma roll. Tegelikult selle taga on meditsiini baasteaduse uuringud – nt bioloogilised ravimid on väga võimsad. Neid saab ainult rakuliinidega.“

„[Viimase viie aasta jooksul – toim.] on toimunud hüpe andmeanalüüsi pealt andmeteaduse peale. Kasutusvõimalused ei ole ennast ammendanud.“

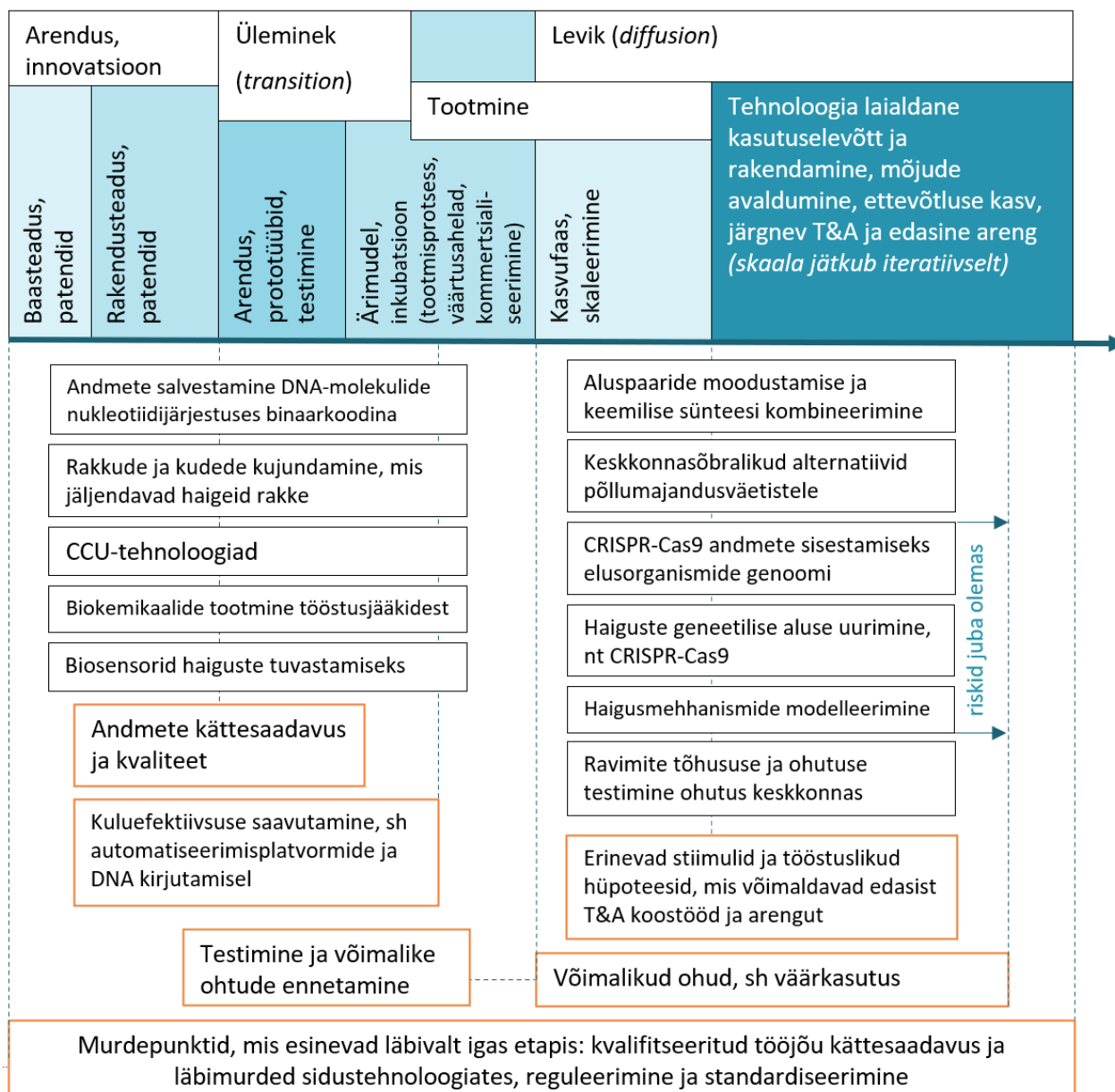
Peamised alateemad rakutüvede digitaliseeritud arendamise juures jagunevad väga üldjoontes¹⁸⁴ kaheks, olenevalt sellest, mida täpsemalt nende all silmas pidada – varasemas arengufaasis (T&A ning üleminek) olevateks ning kasvu- ja levikufaasis olevateks suundadeks. Üldiselt on kõik suunad kasvu- ja levikufaasis, kuid mõnede puhul eristuvad tõenäolisemad uuemad läbimurded (vt peatükk 4). Teiste suundade puhul toimub täiendav teadus- ja arendustöö, kuid väiksemaid, konkreetsemaid ja ajastatavaid läbimurdeid on palju.

Murdepunktid (vt joonis 3) on seotud andmete kättesaadavuse ja kvaliteediga, kuluefektiivsuse saavutamise, testimise ohtude ennetamise võimalustega (nt andmekaitse andmete salvestamisel DNA-le), erinevate stiimulite ja tööstuslike hüpoteesidega (nõudlusest juhitud innovatsioon) ning võimaliku väärkasutuse jt ohtudega, mis tehnoloogia levikul ette tulevad. Läbivalt on oodatavateks murdepunktideks muutused kvalifitseeritud tööjõu kättesaadavuses, reguleerimine ja standardiseerimine, läbimurded sidustehnoloogiates ja tehnoloogiavaldkondades nagu sünteetiline bioloogia, tehisintellekt ja masinõpe, geeni redifeerimine, nanotehnoloogiad. Murdepunktid on seega seotud erinevate tehnoloogia kasutusalaadega, sh sünteetilise bioloogia võimalustega.

Rakutüvede digitaliseeritud arendamise puhul on tegemist horisontaalse ja kompleksse tehnoloogiaga, mis teeb läbimurrete hindamise keerukaks. Suurem pikaajaline läbimurre – täielikult tehisliku ja iseseisva raku loomine, võib juhtuda lähima 20 aasta jooksul juhul, kui teadus- ja arendustegevus jätkub praeguses tempos.

¹⁸⁴ Detailsem jaotus sõltub konkreetsest tehnoloogiasuunast ja võimalikest täpsematest läbimurretest.

JOONIS 3. RAKUTÜVEDE DIGITALISEERITUD ARENDAMINE TEHNOLOOGIAINNOVATSIOONI JA -LEVIKU PROTSESSIS¹⁸⁵



Allikas: autorite koostatud

Olenemata sellest, et Eestis on mitmeid antud tehnoloogia innovatsiooniga tegelevaid ettevõtteid ja uurimisrühmi, tuleb edasi arendada taristut seoses intellektuaalomandi ja tootmisvõimekusega nii üldises oomika kui ka ravimite valdkonnas. Tehnoloogia on teadusliku plahvatuse faasis ning digitaliseerimise võimekus on Eestil olemas, tehisintellekti abil on võimalik mustreid otsida, mille baasilt edasi arendustööd teha. Kohalikul tasandil on võimalik omandada kaasaegne rakubioloogia-alane haridus.

Nii on Eestil potentsiaali luua soodne ettevõtluskeskkond rakutüvede digitaalseks arendamiseks, meelitades investeringuid ja toetades koostööd rahvusvaheliste kõrgtehnoloogiliste ettevõtetega biotehnoloogia sektoris. Oluliselt tuleb tugevdada patenteerimise kultuuri ja teadusavastuste ärilist kasutuselevõttu ning soodustada valdkondlikku koostööd teadusasutuste, tööstuse ja riigiasutuste vahel.

¹⁸⁵ Joonise komponendid iseloomustavad protsessi üldiselt ega ole seetõttu ajaliselt võrreldavad ega suhestatavad.

Toetusstruktuuride tugevdamine, nagu avaliku ja erasektori partnerlused ja rahastamismehhanismid soodustavad koostööd ning teadus- ja arendusprojektide elluviimist biotehnoloogia ja farmaatsiatööstuse valdkonnas.

„Võidavad need riigid, kus on suhteliselt palju mingi valdkonna hüpoteesidega teadlasi. Näiteks, et kas see signaalirada on seotud selle-või-sellega. Kui on seotud, siis liiguks teemaga edasi. Otsiks AI abil, et millega seda signaalirada sihtida [ravimid] ja juba tekivad rakendused.“

TABEL 5. EESTI POTENTSIAAL RAKUTÜVEDE ARENDAMISE KUI SÜVATEHNOLOOGIA ARENDAMISEL

Tehnoloogiainnovatsiooni ja -leviku protsessi üldkirjeldus		Eesti potentsiaal rakutüvede digitaliseeritud arendamise kui süvatehnoloogia arendamisel
Teadus ja arendus	Baasteadus, patendid	- patentide suurem väärtustamine - mitme olemasoleva uurimissuuna eelisarendamine, kuid üleüldiselt lai kompetentsibaas - innovatsioonigrantide pakkumine juba baasteaduses
	Rakendusteadus, patendid	- patentide suurem väärtustamine - prekliiniline ravimiarendus - mitme kindla uurimissuuna eelisarendamine, kuid üleüldiselt lai kompetentsibaas - nt geeniteraapia, biorafineerimine jne - rahvastiku põhised olemasolevad andmed ja andmebaasid
Üleminek	Arendus, prototüübid, testimine Ärimudel, inkubatsioon	- riiklik (nt Tervisekassa) tellimus kui T&A ülemineku võimendaja - tehnoloogiaspetsiifilise tarkvara või labori kaugautomaatika arendamine* - personaalmeditsiin
Levik	Tootmine	Kasvufaas, skaleerimine
		- pandlikkus rahvusvahelisel koostööl ja üldine AI võimekus
		Laialdane kasutuselevõtt ja edasine areng
		- Tervisekassa (vm riiklik) tellimus kui leviku võimendaja sarnaselt IKT arengule

Allikas: autorite koostatud

* - remote lab automation

Rahastamise prioriteet saab olla kõrgtehnoloogilistes teadus- ja arendustegevuse ettevõtetes, kellel on potentsiaali patenteerimiseks ning selle äriliseks kasutuselevõtuks. Eesti suuremad võimalused on seotud biomassi ja toiduainetööstuse väärdamisega ning personaalmeditsiiniga seotud tööstuse loomisega. Lisaks on võimalus suunata investeringuid tugeva eelkliinilise väärtustahela loomisele ravimite arendamiseks, keskendudes eriti geneetilisele teraapiale ja personaalmeditsiinile. Pikemat potentsiaali pakub ennetava personaalmeditsiini rakendamine ja integreerimine Tervisekassa igapäevasesse tegevusse ning teadusuuringute tellimisse.

„Piisava leitudasemega teadus – see on teaduse ülesanne. Tööstuse ülesanne on otsida välja need diagnoosid või kemikaalid või tooted, mida tasub homme toota, mis teevad nad kasumlikuks. Keegi teine ei saa siin elegantselt vastata. [...] [Riigi poolt] peab olema ülene rakendusmehhanism, public-private-partnership, ministriumid ja

ETAg. ELis on lihtne, seal kõik olemas. Suured eraldatud rahastusmeetmed, et rakendusprojekte käima saada. USAs on tööstus ise kaasa tulnud.“

Peamised otsustuskohad Eesti jaoks on:

- Kuidas tugevdada patenteerimisega seotud kompetentse? Millised ümberkorraldused on teadussüsteemis realistlikud, et toetada teadlaste motivatsiooni publitseerimise kõrval ka patenteerida?
 - Ellu tuleks kutsuda otsesed toetused ja vahendid, et lihtsustada patenteerimisprotsessi. Need hõlmavad spetsiaalseid patendinõustajaid teadusasutustes, koolitusi intellektuaalomandi õiguste ja patendiõiguse kohta ning rahalist toetust patenditaotluste esitamiseks. Lähenemisviis nõuaks investeringuid inimressurssidesse.
 - Välja tuleks töötada stiimulite süsteemid, mis tunnustaksid patenteerimistegevust koos avaldamisega. Eelkõige tähendab see akadeemilise edutamise kriteeriumide muutmist, et väärtustada nii patente kui ka publikatsioone, või riiklike rahalisi preemiaid teadlastele, kes tagavad patente. Meetmed peavad olema suunatud akadeemilise kultuuri muutmisele selliselt, et senisest rohkem hinnatakse teadustöö praktilist rakendamist, mis võiks julgustada rohkem teadlasi patenteerimisprotsessis osalema. Lähenemisviis vajaks siiski hoolikat juhtimist, et tagada, et see ei vähendaks stiimulit alusuuringute suhtes, millel ei ole kohe nähtavaid otseseid ärirakendusi.
- Milline lähenemine valida seoses intellektuaalomandi õigustega? Kuidas ennetada andmete väärkasutamist?
 - Eelistada innovatsiooni stimuleerimiseks tugevaid intellektuaalomandi õigusi, mis võib tuua patendiomanikele märkimisväärset majanduslikku kasu, kuid võib piirata tehnoloogia kiiremat arengut ja kasutuselevõttu.
 - Avatud lähtekoodiga mudelid võivad teoreetiliselt kiirendada innovatsiooni tempot, võimaldades teadlastel üksteise tööd ristskasutada. Kuid samas võib vähendada üksikute uurijate või uurimisrühmade majanduslik kasu.
- Milline avaliku sektori asutus või võrgustik on kesksena vastutav valdkonna edendamise ja ülikoolide ning ettevõtete toetamise eest?
 - Vastutava asutuse valik mõjutab tõenäoliselt kõrgemalt poolt seatavaid prioriteete nii tehnoloogia arendamisel kui ka riigi ja ettevõtete koostöös. Samuti määratleb see rahvusvaheliste partnerluskõneluste jõujooned, kus koostöö otsimisel on lähtekohana tarvilik kapitalimahukus ning eelis on suurematel asutustel, kes suudavad samas säilitada paindlikkuse. Võimalik on nii tervisesuuna tähtsustamine (eelkõige Tervisekassa, Tervise Arengu Instituudi ja Terviseameti toel), majandusvaldkonna esiletõstmine (Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, Ettevõtluse ja Innovatsiooni Sihtasutus jt), teaduskeskne lähenemine (Eesti Teadusagentuur) või jätta tehnoloogia arenguga seotu ülikoolide uurimisrühmadele ilma riigipoolse vastutava organita. Võimalik on ka võrgustikupõhine juhtimismudel.

9.4. TEHISINTELLEKT JA MASINÕPE

Tehisintellekt on süvatehnoloogiate seas tänaseks **kõige horisontaalsem** süvatehnoloogia, mille mõju on arvukate varasemate läbimurrete tõttu kiiresti avaldumas üha enamates igapäevaelu valdkondades. Ka edasise arengu osas rõhutavad eksperdid, et see toimub eelkõige tehnoloogia laiemal rakendamisel ning ei sõltu ja ei ole ühe suure läbimurde ootuses.

„Läbimurded ei ole olnud ühekordsed, vaid neid on olnud mitu. Ennustused [15 aastat tagasi], masintõlge [10], kõne muundamine tekstiks [15], vestlused ja keelemudelid [2-3 aastat tagasi]. Tõeline läbimurre on siis, kui tehnoloogia muutub reaalselt kasutatavaks. See ei ole ainult üks idee, mis muudab kõike.“

Kitsamad alatehnoloogiad jaotuvad üle kogu tehnoloogiainnovatsiooni ja -leviku protsessi skaala. Leidub mitmeid laiemat kommertsialiseerimise lähedal olevaid protsesse või alamtehnoloogiad, kui on oodata tehisintellekti kasutamise plahvatuslikku levikut servervutusseadmetes (autonoomsed sõidukid, personaalsed tervise- ja heaoluseadmed, keskkonnaseirega seotud seadmed jpt). Väljakutseks on seadmetele iseloomulikud äärmiselt ranged nõudmised energiatarbele, mis on vastuolus süvamasinõppe energiakuluka lähenemisega. Pidevad algoritmilised arengud võimaldavad järkjärguliselt kiiremat andmetöötlust andmeanomaaliade tuvastamist, mõneti kaugemal on mustrite ning seoste otsimine struktureerimata andmetest.

„[Edasine] areng ei ole tohutu revolutsioon, vaid pidev tehnoloogia kasutuselevõtt. Evolutsioon, mitte revolutsioon“

„Pigem oleks targem hoida laiemat pilti, kui ühes suunas investeerida ja kujutada ette, et oled targem kui teised. Spread the bets. Laseme valdkondadel ise otsustada, mis nende valdkonnas suurima mõjuga investering oleks.“

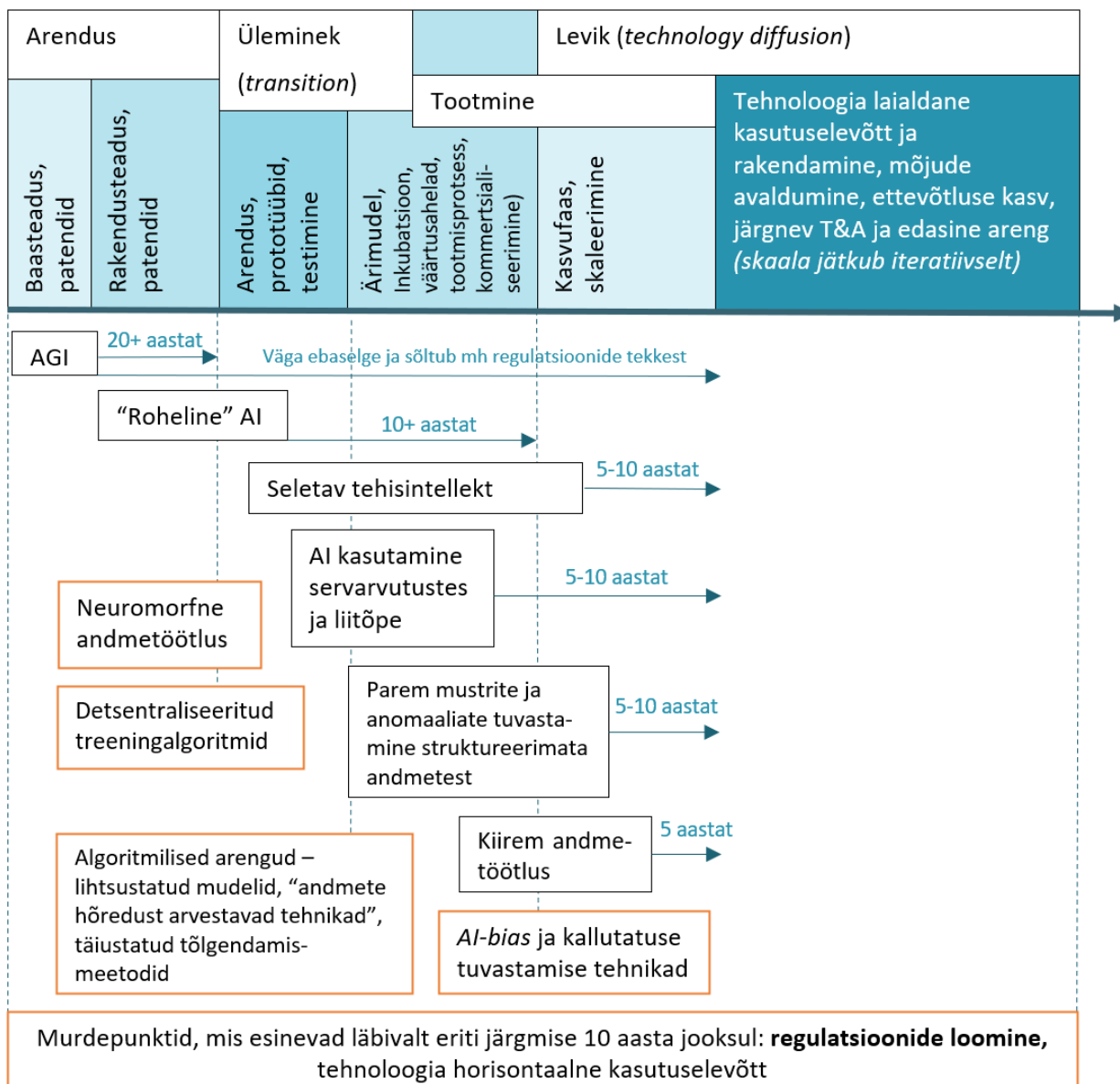
„[Esimesena on vaja] Inimesed. Arvutusressursid on suuresti olemas. Andmetega on nii ja naa, aga andmetike tegemiseks on jällegi vaja inimesi.“

Tehisintellekti arendamisega tegeletakse ülemaailmselt, ent Eestil oleks võimalus saavutada konkurentsieelis, kui seda hakataks ka võimalikult kiiresti võimalikult paljudes valdkondades päriselt rakendada. See eeldab lähtekohana tehisintellekti ja masinõppega seotud **seadusandluse** loomist, et tagada selle vastutustundlik ja eetiline tehnoloogia kasutamine ühes nende parimal võimalikul viisil kasutamisega. Seadusandluse olemasolu annaks rakendajatele raamistiku sellega tegutsemiseks, kehtestades läbipaistvuse, kvaliteedi ja riskide haldamisega seotud kohustused. Teisalt oleneks seadusandlusest, kas tehnoloogiaga seotud regulatsioonid oleksid pigem juhtumipõhised või ennetavad-ette määratud.

Maailma ja Euroopa kontekstis on Eestis kõrge digitaalse kirjaoskuse tase ning arenenud IT sektor, mis teevad Eestist soodsa keskkonna ja võimaldavad olla pioneer tehnoloogiate rakendamisel riigi juhtimises ja hariduses. Võimalikud valdkonnad hõlmavad loomuliku keele töötlemist ning tehisintellekti rakendusi erinevates sektorites, nagu küberjulgeolek, e-valitsemise edasiarendused ja eksport ning bioinformaatika. Selleks peaksid investeeringud olema suunatud meetmetesse või otsustesse, mis suurendavad Eesti valmisolekut tehisintellekti kasutuselevõtuks. Taustal on kriitiline investeerida taristusse, sealhulgas andmekeskuste ja pilvandmetöötluse võimekuse arendamisse. Teised toetusprogrammid peavad aitama riigiasutustel, ettevõtetel ja teadlastel rakendada tehisintellekti ja masinõpet oma tegevustes maksimaalsel määral.

Teisisõnu on Eestil on potentsiaali olla uute arengute ühiskondlikuks katsetusplatvormiks.

JOONIS 4. TEHISINTELLEKT TEHNOLOOGIAINNOVATSIOONI JA -LEVIKU PROTSESSIS



Allikas: autorite koostatud

TABEL 6. EESTI POTENTSIAAL TEHISINTELLEKTI JA MASINÖPPE KUI SÜVATEHNOLOOGIA ARENDAMISEL

Tehnoloogiainnovatsiooni ja -leviku protsessi üldkirjeldus		Eesti potentsiaal AI kui süvatehnoloogia arendamisel
Teadus ja arendus	Baasteadus, patendid	AGI, AI bioinformaatikas ja geenitehnoloogias
	Rakendusteadus, patendid	AI laiem kasutamine riigivalitsemises: AI põhine prognoosiv analüüs avaliku sektori poliitikakujundamisel olemasolevaid registreid ja andmeid kasutades; otsustusvahendid avalike teenuste kujundamisel; AI kasutamine personaalmeditsiinis
Üleminek	Arendus, prototüübid, testimine	NLP, eesti keele põhine AI, tervishoiu registreid kasutav AI haigusriskide tuvastamiseks;

Levik	Tootmine	Ärimudel, inkubatsioon	Eesti kui ülemaailmne autonoomsete sõidukite katsetusplatvorm
			Personaalmehediin, prekliinilised ravimid, küberturvalisus; telemeditsiini platvormid; AI-ga seotud õiguslik regulatsioon
		Kasvufaas, skaleerimine	Ühenduse tugevdamine AI ekspertisiga ülikooli lõpetavate tudengite ja tööturu vahel. E-valitsemise edasiarendamine ja eksport
		Laialdane kasutuselevõtt ja edasine areng	AI üldine rakendamine võimalikult laialt, sh eelkõige avaliku sektori haldusalades: riigivalitsemine, tervishoid, haridus, julgeolek, keskkonnakaitse.

Allikas: autorite koostatud

Eesti võimekus ja potentsiaal tehisintellekti ning masinõppe rakendamiseks on laialdane, mida mõjutavad arvukad tegurid.

1. **Oskuste olemasolu ja ühiskonna vastuvõtlikkus:** Eesti on alates 2000-ndate algusest riikliku tellimusega välja kujundanud IT spetsialistide põlvkonna, kes on võimelised rakendama tehisintellekti ja masinõppetehnoloogiaid. Jätkata tuleb investeeringuid ümber- ja täiendõppesse ning koolitustesse, et kindlustada vajalike oskustega tööjõu kasv ka teistes valdkondades. Ühiskonna laialdane digivahendite kasutamine aitab kaasa tehnoloogiatega laialdasemale rakendamisele, ent tehnoloogia keerukuse jätkuval suurenemisel tuleb suurendada ühiskonna vastuvõtlikkust nende uute suhtes, mis võivad tekitada kasutamisel hirme või umbusk.
2. **Andmete kättesaadavus:** Eesti on e-riigi teenuste ja registrite toel loonud ja korrastanud suure hulga digitaalset andmeid, mida saab kasutada tehisintellekti-alaste innovatsioonide toetamiseks nii riigivalitsemisel kui koostöös era- ja teadussektoriga. Väljakutseks on eestikeelsete korrastamata andmete kogumine ning kasutamine.
3. **Õigusraamistik:** Tehisintellekti ja masinõppe rakendamine eeldab selget ja tugevat õigusraamistikku, mis peab tagama isikuandmete kaitse, andmekasutuse läbipaistvuse ja vastavuse rahvusvahelistele standarditele. Eesti võimalus on olla tehisintellektialase õiguse pioneer, ent ka valida reaktiivne lähenemine.
4. **Avaliku sektori valmisolek:** Avaliku sektori valmisolek ja avatus tehisintellekti kasutuselevõtuks avalike teenuste osutamisel on kriitilise tähtsusega üldise ühiskonna vastuvõtu tagamiseks. Tehisintellekti integreerimine e-riigivalitsemisse võimaldab kiirel tegutsemisel võimalusi Eesti e-riigi ekspordi jätkuvat laienemist nii Euroopa riikidesse kui ka ülemaailmselt.

Peamised otsustuskohad Eesti jaoks on:

- Kus on Eesti jaoks tasakaalupunkt ja kompromiss tehisintellekti rakendamise laiuse ja sügavuse vahel?
 - Eesti suurim võimalus tehisintellekti kasu maksimeerimises peitub ekspertide sõnul selle väga kiire horisontaalses kasutamises ehk integreerimises võimalikult paljudesse ühiskonnaelu valdkondadesse. Samal ajal peab jätkuma Eesti panus ja arendustegevused nii praegustes suuremates niššides (nt bioinformaatika, visuaalsete tuvastus ja töötus, tehisintellekti rakendamine e-valitsemises) ning vältimatu on koostöö ka valdkonna kõlavamates teemades ehk XAI ning „roheline“ tehisintellekti arendamine.
 - Tehisintellekti sektorite ülene rakendamine tähendab prioriteetide seadmist üldise tehisintellekti-alase pädevuse arendamisele nii tervishoiu, hariduses, tootmises, logistikas kui ka avalikes teenustes ning e-valitsemises. Eestil on võimalus tehisintellektiga integreerituks ühiskonnaks muutudes positsioneerida end tehisintellekti lahenduste laborivälise-reaalsete katsekeskonnana, mis meelitab ligi rahvusvahelisi koostööprojekte ja investeeringuid.
 - Eelnev valik nõuab märkimisväärsed investeeringud haridus- ja koolitusprogrammidesse, reguleerivate raamistike loomist ja ajakohastamist ning tehisintellekti-taristu pidevat

arendamist. Laiapõhjaline strateegia võib ohustada ressursside hajutamist paljudes sektorites selmet koondada need konkreetsetesse arendustesse ja tootmisse, kust otsida Eestile konkurentsieelist.

- Kas Eesti soovib olla tehisintellekti-alase õiguse ja eetika eestvedaja?
 - Eesti kui proaktiivne digipioneer – valida ennetav lähenemine, asudes koheselt välja töötama terviklikke (nii avaliku sektori, eraettevõtete ja ülikoolide kui ka üksikisikute tasemel) tehisintellekti eetilisi suunised ja eeskirju, mis võiksid olla eeskujuks teistele Euroopa Liidu riikidele ning soodustada koostööd rahvusvaheliste ettevõtete ja teadlastega, kes ootavad töös selgeid eetilisi suuniseid.
 - Võtta vastu reaktiivsem lähenemisviis, luues küll üldised suunised, ent võimaldades tehnoloogia arenedes konkreetsemate eeskirjade väljatöötamist.
- Mil määral ja millise kiirusega rakendada tehisintellekti haridussüsteemis ning tööjõu täiend- ja ümberõppes?
 - Investeerida hariduses tehisintellekti rakendamisse kõikidel tasanditel, alates algkoolidest kuni ülikoolideni. See hõlmaks nii eraldiseisvaid kursusi kui tehisintellekti integreerimist põhiõppekavasse horisontaalselt. Selline lähenemisviis oleks pikaajaline investeering Eesti tööjõu tulevikku ja selle eesmärk oleks muuta riik juhtivaks tehisintellekti andekate inimeste keskuseks.
 - Keskenduda tiptasemel tehisintellekti spetsialistide arendamisele, fookusega kõrgharidusele ja kutseõppele. See tähendab kõrgtehnoloogiliste teadusprogrammide rahastamist ülikoolides, stipendiumide pakkumist tehisintellekti õpinguteks ja välismaiste tehisintellekti ekspertide motiveerimist Eestis töötamiseks. Lähenemisviis pakub kiiremaid tulemusi teadustulemuste ja tehnoloogiliste edusammude osas, ent võib tähendada laiemat tööjõu tehisintellekti-alase kirjaoskuse unarusse jätmist.

9.5. SARDSÜSTEEMID JA KIIBITEHNOLOOGIAD

Kiipide ja sardsüsteemide suurimaks trendiks on kõige laiemas mõttes olnud miniaturiseerimine ja suurema võimsuse taotlemine. Viimane tähendab ka võimsuse suurenemist vattides, mis on jäänud pidama mõne gigaherti juurde, kuna suuremate sageduste juures kaasneks sisuliselt kiibi läbipõlemine. Seetõttu tekkis alates 2005. aastast uus paradigma, kus ühe võimsa kiibiprotsessori leiutamise asemel hakati ühele kiibile aina rohkem (vähem võimsaid) protsessorituumasid pakkima. Samal ajal on miniaturiseerimises lähenemas aatomi mõõtmete piir, millest allapoole liikumine on sisuliselt võimatu. Nii on järgmiste läbimurrete saavutamiseks paralleelselt käigus mitu arengusuunda, kus murdepunktide hulka kuuluvad:

- **Monoliitsed 3D pooljuht-tehnoloogiad**, kus ühele räniplaadile kasvatatakse mitu kihti lülitusi. Monoliitne 3D aitab üle saada miniaturiseerimisest tulenevatest piiridest. Peamiseks probleemiks on soojuste ärajuhtimine sisemistest lülituste kihtidest ning tootmisprotsessi töökindlus.
- **Mäluarvutuse** (ingl. keeles *in-memory computing*) **laialdane rakendamine** mikrokiipides, näiteks memristoride kasutuselevõtt, mis võimaldab ühe füüsilise struktuurielemendiga teostada andmete salvestamist ja aritmeetilisi tehteid kiiresti ja energiaefektiivselt. Hetkel on suureks piiranguks memristoride madal maksimaalne ümberlülituste arv (ingl. keeles *endurance*).
- **Kvantilinguid kasutavad kiibid** ja integreeritud sensorid, näiteks kvantpunktid (ingl. keeles *quantum dots*).
- **Sardsüsteemide komponentide jätkuv energiatarbe vähendamine**, mis on praegu pigem ooteseisundis.
- **Orgaanilistel materjalidel baseeruvate pooljuhtide laialdane rakendamine**, mis võimaldab kiipide ja sardsüsteemsete lahenduste omahinda vähendada suurusjärgu võrra.

- **Uutel pooljuhtmaterjalidel (SiC, GaAs) baseeruvate kiipide laialdane rakendamine**, mis võimaldab elektronlülituste energiatihedust ja talitluskiirusi suurendada kordades, mis on oluline autoelektronika ja sidesüsteemide puhul.
- **Valgusside kiipidel ja kiipide vahel**, mis võimaldab suurendada kohalikku andmeedastuskiirust suurusjärgudes.
- **Mikromehaaniliste kiibi tasemel energiakorjelahenduste** (ingl. keeles *energy harvesting*) tehnoloogiline levik, näiteks muutuva mahtuvusega energiakorje asjade interneti seadmetele.
- **Vabavaraliste kiibiarhitektuuride väljatöötamine**. Heaks näiteks on siin vabavaraline RISC-V arhitektuur, mis on saavutamas üha laiemat tuge. Hetkel domineerivad turgu globaalsete suurfirmade (Apple, ARM, Qualcomm, Nvidia) ning väiksematel ettevõtetel on olnud raske oma kiibiprojektidega välja tulla.

Tehnoloogiliste toomisprobleemide lahendamine madala integratsioonitasemega kõrgtemperatuuriliste kiipide osas on realistlik 5 aasta perspektiivis. Kõrgintegreeritud ja optoelektroniliste kiipide tootmisvalmidust võib loota 5-10 aasta perspektiivis. Orgaanilisest materjalist kiipide realiseerumist võiks eeldada 5-10 aasta perspektiivis. Tehnoloogilised valmidusastmeks (TRL) võib grafeeni ja kvanttäppide puhul hinnata 2-3, kõrgintegreeritud SiC ja GaN puhul 5-6.

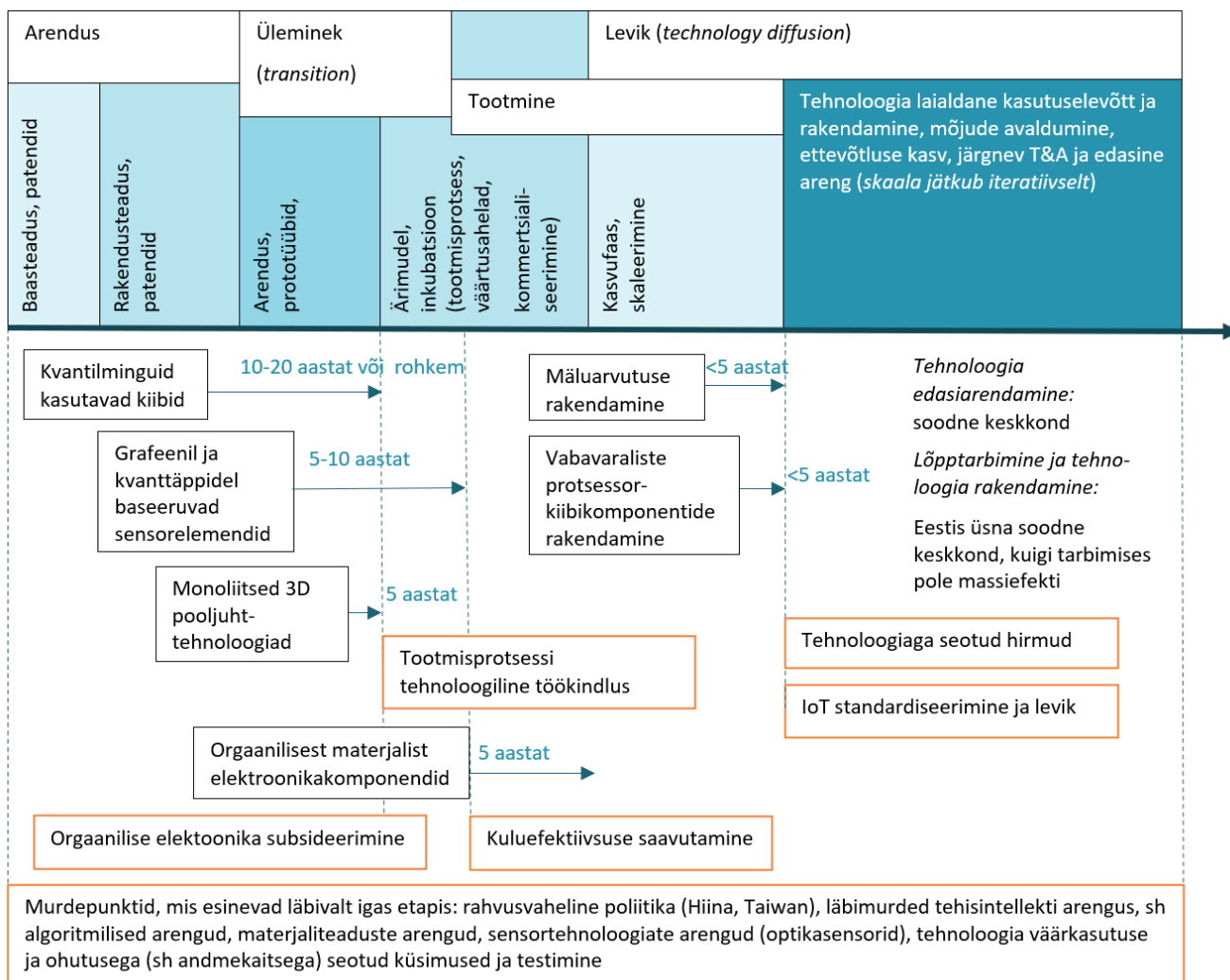
Ehkki ekspertide sõnul toovad kõik nimetatud murdepunktid kaasa sardsüsteemide ja kiibitehnoloogiate jätkuva kiire arengu, ei peeta neid valdavalt põhimõttelist muutust kaasa toovateks, vaid ennekõike järjekindlalt jutuvateks eraldiseisvateks innovatsioonideks. Erandiks on kvantilinguid ja -tehnoloogiaid kasutavad süsteemid, mille väljatöötamine toob kaasa muutused kogu arvutusmaailmas. Teisisõnu oodatakse kiipide ning sardsüsteemide valdkonnas küll pidevat arengut, ent mitte revolutsiooni.

[Läbimurretest] „Keegi ei leiuta ratast uuesti, pigem üksikud pidevad innovaatilised leiutised. Ühte konkreetset asja ei ole.“

„Viis aastat tagasi ei olnud kommunikatsioonistandardit, mis lubaks seadmetel andmeid ise võrku saata.“

„Fotomaskimine on juba tehtud odavaks. Ränitehnoloogia on veel väga-väga kallis.“

JOONIS 5. SARDSÜSTEEMID JA KIIBITEHNOLOOGIAD TEHNOLOOGIAINNOVATSIOONI JA -LEVIKU PROTSESSIS



Allikas: autorite koostatud

Midaarenenuma murdepunktiga on tegemist, seda enam tuleb arvestada kaasnevate sotsiaalsete hirmudega. Nanokiipide ja manussüsteemide keerukus muudab need paljude inimeste jaoks raskesti mõistetavaks, mis loob tõenäoliselt takistusi nende laiemaks kasutuseks. Inimesed üldiselt kardavad seda, mida nad ei mõista¹⁸⁶. Kui võimalike ohukohtade varajane märkamine üleüldiselt aitab kaasa testimisele ja arendamisele, siis põhjendamatuid hirme võivad omakorda ära kasutada need, kes püüavad kahtlusi või väärteavet külvata. Ka nanotehnoloogiatega seotud metauuringust leiti, et kuigi pooled inimesed on nanotehnoloogiaga mõnevõrra kursis, on 44% inimestest nende suhtes endiselt ebakindlad. Suurem teadlikkus tehnoloogiast korreleerub positiivsete arusaamadega ning hirme mõjutavad nii psühhomeetrilised¹⁸⁷ muutujad, usaldus avalike institutsioonide vastu ning demograafilised ja kultuurilised tegurid.¹⁸⁸

¹⁸⁶ Carleton, R. N. (2016). Fear of the unknown: One fear to rule them all?. Journal of anxiety disorders, 41, 5-21.

¹⁸⁷ Psühhomeetria tegeleb oskuste, teadmiste, võimete, hoiakute, isiksuseomaduste ja õpitulemuste võimalikult objektiivse mõõtmisega

¹⁸⁸ Satterfield, T., Kandlikar, M., Beaudrie, C. E., Conti, J., & Herr Harthorn, B. (2009). Anticipating the perceived risk of nanotechnologies. Nature nanotechnology, 4(11), 752-758.

„Sotsiaalne surve on peal – inimestele ei meeldi muutus. Mida vähem aru saadakse, seda rohkem ollakse vastu. Nanotehnoloogiatest on väga raske aru saada ja hirmukülvamise risk on suur. Samas on raske vastu olla, kuna muutused on sujuvad ja neist tegelikult ei saada arugi.“



Kiibitehnoloogiad on kiiresti muutumas kogu maailma majanduse südameks. Taiwani ettevõtet TSMC võib pidada maailma mõjukaimaks ettevõtteks.

Asjade interneti standardiseerimise ja leviku osas prognoositakse, et 2030. aastaks Euroopa Liidu nõudlus kiipide järele kahekordistub ning tööstusharu muutub veelgi olulisemaks, muuhulgas ka majandusturvalisuse seisukohast.¹⁸⁹ Jaapani majandus-, kaubandus- ja tööstusminister Koichi Hagiuda väidab: "Mikrokiibid on iga tööstusharu aju. Kiipide stabiilse varustamise tagamine on oluline rahvusliku julgeoleku seisukohast." Mikrokiipide ekspert Scott Kennedy Washingtoni Strateegiliste ja Rahvusvaheliste Uuringute Keskusest sõnul on TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company) "tõenäoliselt kõige olulisem ettevõtte planeedil". Kui Taiwani ja Hiina vahelised pinged suurenevad, on TSMC keskne roll globaalses mikrokiipide tarneahelas kerkinud üheks suurimaks riskiks maailmamajandusele.¹⁹⁰

Eestis kiipe ei toodeta ning laiaulatuslikku kiibitootmist ei peeta ekspertide sõnul ka mõistlikuks. Kiibitootmisele tehtavad investeeringud Eestisse on ebatõenäolised muuhulgas ka Eesti geopoliitilise asukoha tõttu Venemaa kõrval.

„Kiibitehast meile kunagi püsti ei panda, selleks vajaminev suurusjärg on riigi aastane eelarve. Parim võimalus on panustada, et siin oleks rohkem tarku inimesi ja realiseerida seda [erinevaid tootmis- jt võimekusi] koostöös naaberriikidega.“

*„Kiibitehase rajamisel ma mõtet ei näe, see ei ole tõenäoliselt ka kapitalimahukuselt teostatav. Tööstusel, kus tegeletakse kiipide projekteerimise ja disainivahendite loomise teenustega, on kindlasti perspektiivi. Ütleksin, et see on lausa möödapääsmatu, kui Eesti tahab tehnoloogilise riigi mõõtu välja anda“*¹⁹¹

Intervjueeritud ekspertide sõnul on kiipide tootmise suurendamine mujal Euroopas realistlik, peamisteks põhjusteks tootmise järk-järguline tagasitoomine Hiinast ning Taiwani investeeringud Euroopa Liidu kiibitootmisse. 2023. aasta märtsis teatas Intel, et investeerib järgmise 10 aasta jooksul Euroopasse 80 miljardit eurot (88 miljardit USA dollarit) ning ehitab tehase Saksamaal, Magdeburgis. On oodata, et TSMC teatab peagi tehase ehitamisest Dresdenis. Need arengud on hinnatud positiivseteks, kuid mitte piisavaks, et nii lühi- kui ka pikaajalisi probleeme lahendada, eriti kõrgtehnoloogiliste kiipide (<10nm) tootmise osas.¹⁹¹

Euroopa Liidu tasandil menetletakse Euroopa kiibimäärust, mille eesmärk on luua Euroopas ühiselt tipptasemel kiipide ökosüsteem. Euroopa osakaal kiipide tootmisturul on aastakümneid vähenenud, kuid

¹⁸⁹ https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-chips-act_et

¹⁹⁰ <https://www.asiafinancial.com/china-risk-sees-taiwans-tsmc-moving-chip-fabs-overseas>

¹⁹¹ <http://www.businesskorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=113179>;

<https://techmonitor.ai/technology/intel-announces-new-european-factory-as-part-of-e80bn-chip-investment>;

<https://www.politico.eu/article/europe-microchip-intel-investment-magdeburg-commission-technology/>

seda osakaalu plaanitakse järgmise kümnendi jooksul kahekordistada 20%-ni.¹⁹² Euroopa kiibialgatustele on planeeritud vähemalt 43 miljardi eurot. Initsiatiivi eesmärkide hulka kuuluvad tegevused ja investeeringud pakuvad võimalusi ka Eestile.¹⁹³

Kuigi kiibitootmist Eestis mõistlikuks ei peeta, on naaberriik Leedu astunud samme just oma võimekuse suurendamiseks. Nii kavatseb Leedu tehnoloogiaettevõtte Teltonika kaudu käivitada 2027. aastaks kodumaise pooljuhtide tootmise, kasutades Taiwanis tehnoloogiat. See algatus on osa koostöölepingust Taiwanis tööstustehnoloogia uurimisinstituudiga, mille väärtus on 14 miljonit eurot ja mis sisaldab Taiwanis välisministeeriumi 10 miljoni euro suurust toetust.



Eesti lähiriikidest näitab oma ambitsiooni ja riskivalmidust Leedu, kes on investeerinud suuri summasid ning teinud kokkuleppeid Taiwaniga kodumaise pooljuhtide tööstuse arendamiseks.

Teltonika pooljuhtide tööstuse plaanid hõlmavad pooljuhtide kiipide projekteerimist, valmistamist, montaaži ja testimist, samuti energiamoodulite tootmist. Ettevõtte on määratlenud oma pooljuht-tehnoloogiate fookusvaldkonnad, sh taastuenergia, elektrisõidukid ja muud tööstuslikud energiamoodulite lahendused. Samuti kavatsevad nad pakkuda pooljuhtkiipide projekteerimise, monteeringu ja testimise teenuseid.

Teltonika plaanib järgmise kümne aasta jooksul Leedus rakendada 14 kõrgetasemelist projekti, mis nõuavad 3,7 miljardi euro suurust investeeringut. Nende hulka kuuluvad elektroonika montaažitehas ja kontorikompleks, plastosade tootmise tehas ja trükkplaatide tehas ning pooljuhitööstuse rajamine Vilniuse piirkonnas. Pooljuhtide plaanid hõlmavad pooljuhtide kiipide arenduslaborite, andmekeskuse, pooljuhtide kiipide koostetehase ja pooljuhtide kiipide tehase ehitamist, eesmärgiga viia need projektid lõpule 2030. aastaks.¹⁹⁴ Ehkki kogurahastuse osas veel küsimusi, on esimene etapp - pooljuhtide kiipide arenduslabori ehitamine 2026. aastaks - hinnatud 100 miljonile eurole, mis on saavutatavam kui hinnanguline kogusumma. Leedu koostöö Taiwaniga on põhjustanud pingeid suhetes Hiinaga, mida riik on tänaseks ületamas.¹⁹⁵

Eestis rõhutavad eksperdid kiibitootmise potentsiaali väike- ja seeriatootmise ning erilahenduste võimalusi arvesse võttes. Elektroonikatööstust, mis on tehnoloogia n-ö lõpptootja, on Eestis palju ja see on oluline ekspordiüksus. Sardsüsteemide fookuses on praegu toiteallikate pikaajalisus, aga ka kiipidega seotud rahvusvahelised tarneprobleemid. Lisaks soovitakse ettevõtete poolt rohkem võimalusi innovaatilisi tooteid välja arendada.

„Kiibitehas ei ole täna võimalik, vajalikud on erilahendused väikese investeeringuga. Oskusteavet meil on.“

„Väiketootmise võimalus – kui tehnoloogiad lähevad lihtsaks, on võimalik teha erilahendusi või väikeseeriaid. Arendusvõimekus on olemas, seega kui tekib väiketootmise võimekus, siis tulevad ka investeeringud, et saada in-house väiketootmise võimekus. Praegu on kaugelt tootmine probleem, kuna ükski suurem tehastest ei tee väikeseeriaid. Keegi ei tärni 500 kiipi, vaid pigem 50 miljonit.“

¹⁹² https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-chips-act_et

¹⁹³ *Ibid*; <https://diplomaatia.ee/mikk-raud-eestil-on-aeg-oma-kiibipotentsiaal-ellu-aratada/>

¹⁹⁴ <https://www.lrt.lt/en/news-in-english/19/1869857/lithuania-and-taiwan-sign-deal-on-semiconductor-technology-sharing>;

<https://www.lrt.lt/en/news-in-english/19/1873767/taiwan-chip-deal-is-golden-goose-for-lithuania-interview>

¹⁹⁵ <https://sundries.com.ua/en/lithuania-will-create-its-own-chip-production-taiwan-will-help-it-in-this/#:~:text=The%20Teltonika%20technology%20company%20intends,operational%20as%20early%20as%202027>

„Riskide vältimiseks ja selleks, et olla konkurentsivõimeline, peaksid tehnoloogia lõpptootjad projekteerima või tellima oma tegevusspetsiifikale vastav kiibi just täpselt oma vajadustele vastava. Võib-olla esimeste prototüüpide ja arenduste jaoks saab leppida leti pealt ostetud kiipidel baseeruvate lahendustega, kuid tootmise jätkusuutlikusk laiendamiseks ei jätku seda pidu kauaks.“¹⁹⁶

TABEL 7. EESTI POTENTSIAAL SARDSÜSTEEMIDE JA KIIBITEHNOLOOGIATE SÜVATEHNOLOOGIANA ARENDAMISEL

Tehnoloogiainnovatsiooni ja -leviku protsessi üldkirjeldus		Eesti potentsiaal sardsüsteemide ja kiibitehnoloogiate arendamisel
Teadus ja arendus	Baasteadus, patendid	- orgaaniliste pooljuhtide uuringud
	Rakendusteadus, patendid	- rahvusvahelise (EL) tipptasemel uurimiskeskuse filiaali avamine Eestis, nt pehmete nanokiipide suunal - interdistsiplinaarse soodustamine (sardsüsteemid) - ettevõtte sisene ehk nn <i>in-house</i> kiipide väiketootmine ja erilahendused, mis tuginevad arendusvõimekusele - kiibidisain, kiipide verifitseerimine ja turvalisus
Üleminek	Arendus, prototüübid, testimine Ärimudel, inkubatsioon	- katse või pilootkeskused rakendustele ja uutele mudelitele - kiibidisain, kiipide verifitseerimine ja turvalisus - olemasoleva IT-võimekuse suunamine ja rakendamine kiibitehnoloogiates ja sardsüsteemides - interdistsiplinaarse soodustamine (sardsüsteemid)
Levik	Tootmine	Kasvufaas, skaleerimine
		- ettevõtte sisene ehk <i>in-house</i> väiketootmine ja erilahendused, mis tuginevad arendusvõimekusele
		Laialdane kasutuselevõtt ja edasine areng
		- <i>Smart City</i> taristu laiendamine

Allikas: autorite koostatud

Läbivalt on Eesti seisukohast oluline kiipide ja sardsüsteemide maailmapoliitikas orienteerumine ning Euroopa Liidu pakutavate vahendite ja võimaluste oskuslik rakendamine (või rakendamise toetamine), et tulevikus paikneda kiipide tarneahelas strateegiliselt heas positsioonis. Uuringus osalenud eksperdid pidasid Eesti tugevusteks head teaduslikku kompetentsi, IT tausta ja elektroonikatööstust, reaktsioonikiirust, sh lihtsust ja läbipaistvust; üleüldiselt intelligentset ja tugevate baasväärtustega ühiskonda ja madalat bürokraatiat – kuigi siin tunnetati kohati arendusprojektide hindamisega seotud vormilise korrektsuse eelistamist sisulisele panusele. Välja toodi ka välispoliitilist kompetentsi, mis tugineb avatud ja demokraatliku digiriigi mainele.

Varasemalt on Eesti potentsiaalselt rahvusvaheliseks tugevusteks hinnatud eelkõige tarneahela tippu ehk kiipide testimist, verifitseerimist ning turvalisuse hindamist, mis on vähemalt Euroopas väheste tegijatega valdkond. Nii peetakse potentsiaalikaks avatud lähtekoodiga kiibi RISC-V tarkvaral põhinevate kiipide testimist ning turvalisemaks muutmist.¹⁹⁷

Peamised otsustuskohad Eesti jaoks on:

- Milline on Eesti lähenemine küberturvalisuse tagamisele ja regulatsioonidele, arvestades sardsüsteemide laialdast levikut elutähtsas taristus ning võimalikku mõju eraelu puutumatusse?
 - Juhtumipõhine ja paindlik lähenemine, mis prioritseerib koostööd tööstuse sidusrühmade ja rahvusvaheliste partneritega. Tehnoloogiatööstust suunatakse välja töötama ja

¹⁹⁶<https://www.sirp.ee/s1-artiklid/c21-teadus/nahtamatud-hiiglased/>

¹⁹⁷ <https://diplomaatia.ee/mikk-raud-eestil-on-aeg-oma-kiibipotentsiaal-ellu-aratada/>

jõustama oma turvastandardeid, julgustades innovatsiooni. Avaliku sektori roll on eelkõige järelevalve ja sekkumine ebaõnnestumise korral.

- Ennetav küberturvalisuse reguleerimine. Avalik sektor juhib koostööd akadeemia ning tööstuse vahel, et tagada tõhus ja rakendatav regulatiivne raamistik turvastandardite väljatöötamisel enne kiipide/sardsüsteemide plahvatuslikku levikut üksikseadmetes. Prioriteetide hulgas on RISC-V arhitektuuri kasutamine.
- Kuidas muuta ettevõtte sisene ehk nn *in-house* väiketootmine ja ASIC (ingl. keeles *application-specific integrated circuit*, rakendusspetsiifiline integraallülitus) realistlikuks?
 - Valimislahendused ei pruugi toetada ulatuslikke tootmisprotsesse. Konkurentsivõime säilitamiseks ja riskide maandamiseks peaksid tehnoloogiatootjad kujundama või tellima rakendusspetsiifilised integraallülitused (ASIC), mis vastavad nende vajadustele. Arvestades Eesti kõrget innovatsioonitaset, võib kohandatud kiibilahenduste puudumine muutuda edasises arengus kiiresti oluliseks takistuseks, mis potentsiaalselt võib kahjustada nende globaalset konkurentsivõimet.
- Kuidas tekitada parem sünergia Eesti elektroonikatööstuse ja IKT vahel sardsüsteemide/ kiibi-tehnoloogiate arengu osas?
 - Suurem sünergia on vajalik nii tehnoloogiate kasutuselevõtu, tööjõu liikuvuse kui ka arendusvõimekuse suurendamise osas. Näiteks on võimalik suunata IT-töötajate või teiste valdkonna inseneride täiendõpet, suurendada elektroonikatööstuse paindlikkust, võimendada veelgi teadusasutuste ja ettevõtete vahelist koostööd jne.

Kiibitehnoloogiatega seonduvad võimalikud otsustuskohad ei ole seotud ainult Eesti eripärade, eeliste ja potentsiaaliga. Tehnoloogiaga seotud tööstuses võivad tulevikuks vajaliku eelise anda ka otsused, mis on ambitsioonikamad, aga palju riskantsemad, näiteks nagu kiibi- või kiibikomponentide tootmine üleüldiselt. Selliste otsuste ja eesmärgistatud tegevuse eelduseks on Eesti oma kiibistrateegia, mille vajalikkust on ka varasemalt rõhutatud.¹⁹⁸

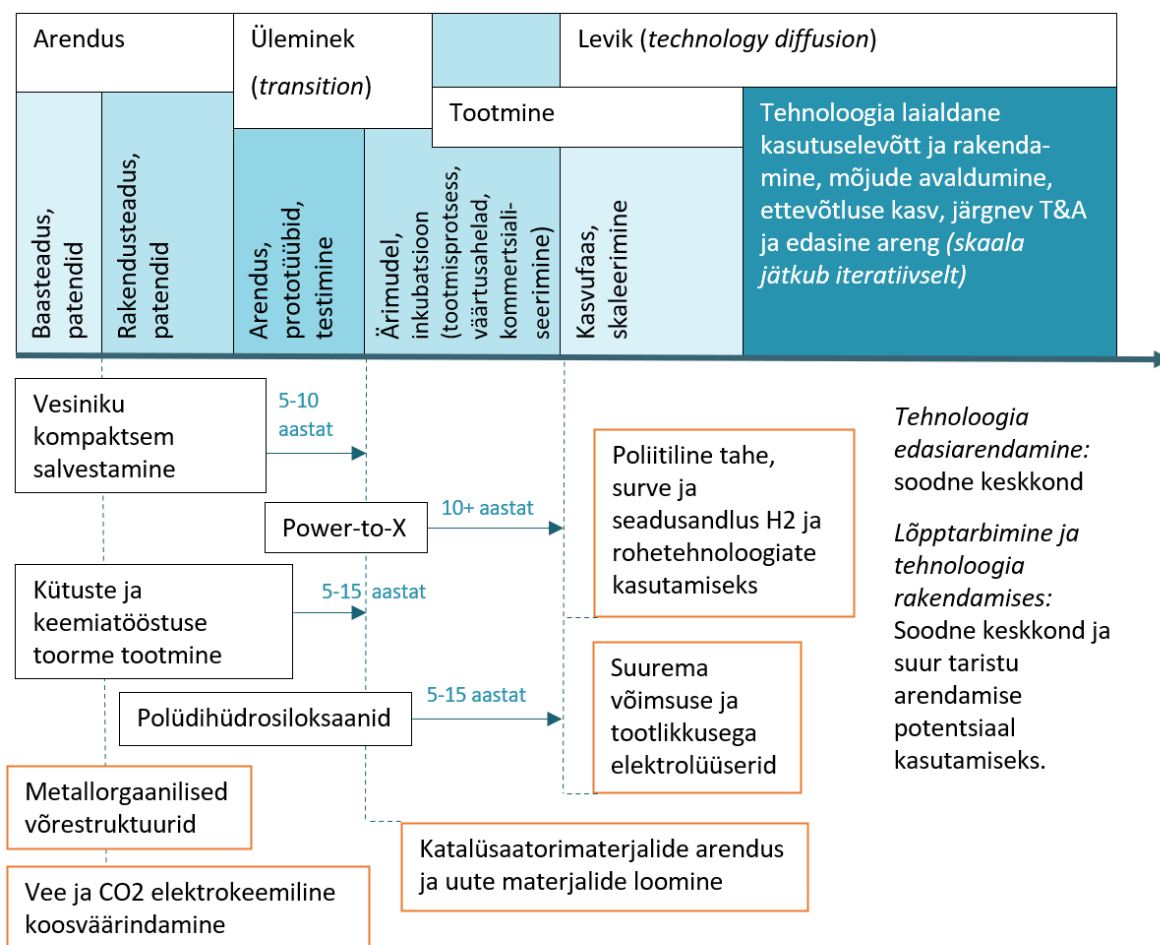
9.6. VESINIKTEHNOLOOGIA

Kui teiste süvatehnoloogiate potentsiaal Eestis seisneb sagedamini teadus-arenduses (näiteks rakutüvede digitaliseeritud arendamine ja tehnoloogiate patentimine) ja/või tehnoloogia nutikas kasutamises (tehisintellekti või sardsüsteemide puhul), siis vesiniktehnoloogia kasutamist iseloomustab tema potentsiaal läbilöögiks korraga kõigis kolmes tehnoloogia staadiumis ehk arenduses, tootmises ning levikus. Nii on võimalusi näiteks:

- T&A tegevus: efektiivsema ja odavama elektrolüüsi teadustöö, mis keskendub kõrghõõrtemperatuurilisele elektrolüüsile või membraanide materjalide arendamisele;
- T&A tegevus: vee ja CO₂ elektrokeemiline koosväärimine;
- Tootmine: vesiniktaristu rajamine, et siduda Eesti Põhjamaid ja Euroopat ühendava rajatava vesinikvõrgustikuga, mis võimaldab vesiniku eksporti Saksamaale;
- Tootmine: päikese- ja tuuleparkide võrkude rajamine võimekusega elektrit ülejäägi korral vesinikuna salvestada;
- Tarbimine: vesinikupõhine transport;
- Tarbimine: vesinikupõhised küttelahendused.

¹⁹⁸ <https://www.err.ee/1608825706/jaan-raik-muutidest-eesti-elektroonikatoostuse-valjavaadete-umber>;
<https://diplomaatia.ee/mikk-raud-eestil-on-aeg-oma-kiibipotentsiaal-ellu-aratada/>

JOONIS 6. VESINIKTEHNOLOOGIA - TEHNOLOOGIAINNOVATSIOONI JA -LEVIKU PROTSESSIS



Allikas: autorite koostatud

Kuigi vesinik- kui süvatehnoloogia arendamine on globaalne, on Eestil võimalusi mitmete murdepunktide mõjutamiseks. Kohalik T&A tegevuse tase, meie teaduskeskuste rahvusvaheline võrgustik ja Eesti taristupotentsiaal loob soodsa olukorra nii tehnoloogia arendamiseks, tootmiseks kui ka laialdaseks kasutuselevõtuks. Ekspertide sõnul on märkimisväärne areng toimunud viimasel kümnendil ning seda tänu nii ülikoolide rahvusvahelise võrgustumisele kui ka Eesti ettevõtete arendustegevusele (nt Elcogen, Stargate Hydrogen Solutions, Skeleton). Ülikoolide potentsiaali laiendaks veelgi suurem koostöö globaalsete tootmisettevõtete ja vesiniku salvestamise ning efektiivsema elektrolüüsi uurimisvaldkonnas. Mõneti kiiremat reageerimist oodatati väiksemahuliste tootmisprojektide toetamisega avalikult sektorilt.

„Kui vaadata seda, kus Eesti oli viis aastat tagasi oma vesinikarendustegevusega, on areng meeletu. Kaks Eesti ettevõtet on saanud EL innovatsiooniahindu [...] Saame öelda, et Eesti on kõrgtehnoloogilises arendustegevuses päris hästi esindatud [...] Eraettevõtted ja omavalitsused on hästi aktiivsed.

„Kõige suurem oli ametnike üllatus siis, kui kuulutati välja rahvusvaheline IPCEI projektide taotlus, kuhu esitati 21 projekti ja [...] kolm Eesti ettevõtet said väga arvestatava tulemuse.“

„Eestile heidetakse ette, et me magasime maha õige aja, kui oli vaja teha väikseid demoprojekte [...] Kui me oleks saanud 5-7 aastat tagasi riigipoolseid osalise toetusega projekte hakata tegema, oleksime väiketootmisega palju kaugemal.“

Otseselt suurendab vesiniku tootmist ja ekspordipotentsiaali sadamate ja tuule- ning päikseparkide olemasolu. Suurimad ootused avalikule sektorile ning T&A tugistruktuuridele seisnevad päikseparkide võrkude rajamise toetamises ja laiemas vesiniktaristu rajamises. Nii on võimaluseks näiteks eksperimentaalne demo-energiatootmiskompleks ehk nn „targa asumi“ rajamine, kus integreeritud on päiksepaneelid, vesiniksalvestus, elektrolüüs ning taastootmine. Keskus lahendaks küsimuse, kuivõrd on Eestis võimalikud suured lokaalse energiatoomise kompleksid.

Avaliku sektori potentsiaali nähakse ka investeringutes Eesti süvasadamatesse, et tekitada võimekus vesiniku transportimiseks. Oluline on luua eeldused Euroopa taristuga ühendumiseks ning Saksamaa kaudu Nordic Hydrogen Route'iga liitumiseks. Koostöös IT sektoriga peituvad võimalused ka vesiniku tootmis- ja ladustamisrajatiste juhtimissüsteemide arendamises ja ekspordis.

„Kõige olulisem teema on see, et saaksime käima oma tuule- ja päiksepargid ja et me ei teeks neid lihtsalt elektritootjateks, vaid paneksime nad vesinikuna salvestama. Ja vesinik on mitte ainult transpordikütus ning mitte ainult elektri taastootmine [...] vaid ka tsentraalküttemajanduse lahendused.“

Eesti (ekspordi-) potentsiaal laiemas kasutuses on pikema mõjuga ning võib ilmneda mitmekümne aasta jooksul, kui suudetakse ellu viia üleminek elektri tootmises põlevkivist vesinikupõhisele tuule- ja päikeseenergiale. See hõlmab maismaatransporditaristu uuendamisest ja ka Eesti sadamate muutmist vesinikukütuse sõlmpunktideks.

Ülevaade Eesti potentsiaalset vesinikutehnoloogia osas on koondatud tabelisse 8.

TABEL 8. EESTI POTENTIAAL VESINIKTEHNOLOOGIA KUI SÜVATEHNOLOOGIA ARENDAMISEL

Tehnoloogiainnovatsiooni ja -leviku protsessi üldkirjeldus		Eesti potentsiaal vesinikutehnoloogia kui süvatehnoloogia arendamisel
Teadus ja arendus	Baasteadus, patendid	Eksperimentaalteadus, patendid, taastuvenergeetika spetsialistide ettevalmistamine
	Rakendusteadus, patendid	EL tasandil koostöö – COST-ACTION, DE, FR, UK, JP jt. Power-to-X tehnoloogiad
Üleminek	Arendus, prototüübid, testimine Ärimudel, inkubatsioon	Energiasüsteemide integratsioon ja nn „targa asumi“ arendamine Vesinikuga töötlemisel toodetud raua põhine (süsinikuvaba) tööstus Projekteerida ja arendada tuule- ja päikseelektri (PV) tootmise väljad, luua ühendused alalisvoolu elektrivõrguga ja vesinikutrassidega

Levik	Tootmine		Vesiniku salvestamise võimalus meretuuleparkide elektrist
			Elektrolüüserite, kütuseelementide ja vesiniku salvestamise tootmise tehased
		Kasvufaas, skaleerimine	Taristu arendamine: Süvasadamate muutmine vesinikku transportivateks Nordic Hydrogen Route'iga liitumine
		Laialdane kasutuselevõtt ja edasine areng	Tsentraalküttemajanduse lahendused ehk vesiniku kasutamine elamufondi kütusena Vesinikupõhine (ühis)transport

Allikas: autorite koostatud

Peamised otsustuskohad Eesti jaoks on:

- Kuivõrd suur on ettevõtete ja riigi riskivalmidus investeerida eksperimentaallahendustesse ja -teadusesse? Millisel skaalal liikuda edasi taristu arendamisega? Millised investeeringud on vajalikud vesiniktaristu edendamiseks ja kuidas neid ressursse jaotada?
 - PPP (jagatud riskid ja kasu, rahvusvaheliste ettevõtete investeeringu potentsiaal) vs. riigi juhitud investeeringud (stabiilne, riigi juhitud ja kooskõlas riiklike ja EL poliitikatega, ent väga ressursinõudlik ning bürokraatlik).
 - Väikesel skaalal piloot-/demoprojektid vs. üleriiklikud vesinikjaamad ning maagaasi taristu moderniseerimine.
- Millist poliitikat võiks rakendada vesinikutehnoloogiate kasutuselevõtu soodustamiseks kooskõlas ülemaailmsete rohelse energia algatustega?
 - Otsesed stiimulid maksusoodustuste või toetuste näol ettevõtetele ja tarbijatele, kes võtavad kasutusele vesinikutehnoloogia.
 - Regulaatiivsed meetmed – luua poliitikad ja eeskirjad, mis kohustavad kasutama keskkonnahoidlikke tehnoloogiaid, sh vähemalt valikuna vesiniku kasutamist. Paratamatu on ettevõtete ja üksikisikute vastuseis, ent pikas perspektiivis võib viia laialdasema kasutuselevõtni.
 - Reaktiivne – oodata tehnoloogia arenemist, hindade langust ning suuremat kasutuselevõttu ELis ja Eesti suuremates partnerriikides. Valik on riskivaba, nõuab vähem tegevusi ja pakub vähem tulusid. N-ö valede investeeringute risk on minimeeritud, olles riigina tehnoloogia leviku korral selle kasutuselevõtja, ent mitte varajane kasutaja.
- Milline on tuumaenergia kui vesiniku peamise alternatiivi tulevik? Kuivõrd liikuda Eestis edasi mõlemaga paralleelselt? Kas Eestis on suured lokaalsed energiatoomise kompleksid võimalikud ja tasuvad? Kas kompleksis on samal ajal võimalik õpetamine ning koolitamine? Kas spetsialiseeruda tootmises vaid kindlale nišile? Kellest saavad peamised strateegilised partnerid ning millist partnerlust prioritseerida?
 - Jaapan ja Saksamaa kui juhtivad riigid vesinikutehnoloogiate kasutamisel ja arendamisel. Fookuses kiirem ligipääs uutele tipp- ja ekspertimentaaltehnoloogiad ning maailma ekspertiisile., tsentraalküttelahenduste kasutamine, eksport Saksamaale ning vastava transporditaristu loomine,
 - Balti- ja Põhjamaad, fookusega kohalikule julgeolekule ning energiaturvalisusele, ekspordile ja keskkonna jätkusuutlikkusele.

9.7. PRIORITEETSED OTSUSTUSKOHAD

Tabelisse on eelneva aruande põhjal koondatud iga süvatehnoloogia kohta üks autorite hinnangul prioriteetne otsustuskohad, koos selle ületatavuse, konteksti, plusside-miinuste ning selle olemasolul võimaliku soovitusena. Mitme tehnoloogia puhul on otsustuskohaga seotud soovitus jäetud teadlikult lahtiseks.

TABEL 4. AVALIKU SEKTORI OTSUSTUSKOHAD

TEHNOLOOGIA	OTSUSTUSKOHT	KONTEKST	LIHTSUS/TAKISTUS(T)E ÜLETATAVUS	EELDATAVA KASU JA VÕIMALIK RISK	VÕIMALIK LAHENDUS
Liha alternatiivne tootmine	Kas tootmine peab olema Eestis? Kuivõrd investeerida omaenda suuremahuliste bioreaktorite tootmisse ja arendamisse?	Lisaks regulatsioonidele on tehisliha tootmise suurim takistus selle skaleerimine, kui tänased suurimad bioreaktorid (20 000 l) lubavad liha toota vaid marginaalsetes kogustes. Suurte reaktorite tehnoloogiline arendamine võimaldab luua suure turueelise kas tehnoloogia enda patentimise või reaktori kasutamise näol. Alternatiiviks on ka modulaarsete bioreaktorite ehk eraldiseivate väiksemate tootmisüksuste loomine, mida annab vajadusel tootmise laiendamiseks ühendada. Eesti enda turg on tarbimiseks marginaalne ning tegemist oleks puhtalt ekspordile suunatud arendusega.	Nõutav investeeringu-maht on väga suur, ulatudes kuni sadadesse miljonitesse. Tarvilik on ka inimkapital ning taristu, mis Eestil praegu suurriikidega võrreldavas mahu puudub.	+ Lisaks otsesele toodete ekspordivõimekusele tekiks võimalus ka tehnoloogia litsentsimiseks. - Töenäoline on paralleelsete arenduste levik USAs või mujal suurriikides, kus eeliseks on oluliselt suuremad rahalised vahendid ja suurem turg, mis on süvatehnoloogiate edu puhul määravad.	Suuremahulised bioreaktorid nõuavad ressursse ja panustamist ühele nišile mahu, mis on riigile ebaotstarbekas. Praktikas on suurema tuluga panustamine modulaarsetesse bioreaktoritesse, mis on skaleeritavad, vähem ressursimahukad ning võimaldavad säilitada suurema majandusliku pindlikkuse
Puidu biorafineerimine	Kuidas suurendada kohalikku konkurentsi ja soodustada Eestis praeguste biorafineerimise tehnoloogiate riigisest	Puidu väärindamine võib Eestis koos säästliku metsamajandamisega pikaajaliselt asendada naftapõhist toodangut ning	Väga keeruline. Takistuseks on leida kompromiss raie-mahu, tipptegijate toetamise ja kogu valdkonna ettevõtluse	+ Võimalik kasu ulatub regionaalarengu kiirenemisest ülemaailmse tehnoloogia	Lahtine küsimus, mis vajab jätkusuutliku majandamise kontekstis avaliku sektori tasemel seisukohta.

TEHNOLOOGIA	OTSUSTUSKOHT	KONTEKST	LIHTSUS/TAKISTUS(T)E ÜLETATAVUS	EELDATAVA KASU JA VÕIMALIK RISK	VÕIMALIK LAHENDUS
	ülevõtmist, ilma et kaasneks metsade pindala vähenemine.	tuua riigile ulatusliku majandusliku kasu, vähendades seeläbi keskkonnakoormust ja olles suure positiivse regionaalse mõjuga. Läbivaks väljakutseks on NIMBY ning hirmud metsaraie hoogustumise ja liigirikkuse vähenemise osas. Tehnoloogiliselt on Eestis kasutusele võtmisel tehnoloogia tiptase, pikaajaline areng juhtub harva vaid ühe-kahe ettevõtte vedamisel. Proovikiviks on toetada korraga tippettevõtete innovatsiooni, ent tagada ka kohalike konkurentide teke.	arendamise ning tehnoloogilise ajakohastamise vahel.	innovatsiooni vedamiseni. - Riskid avalduvad valikute äärmuses - metsade üleraie vs. igasuguste riiklike initsiatiivide ning otsuste puudumine valdkonna innovatiivse ettevõtluse soodustamiseks.	
Rakutüvede digitaliseeritud arendamidne	Kuidas tugevdada patenteerimisega seotud kompetentse? Millised ümberkorraldused on teadussüsteemis realistlikud, et toetada teadlaste motivatsiooni publitseerimise kõrval ka patenteerima?	Rakutüvede digitaliseeritud arendamise edu võti peitub hüpoteeside püstitamises ning teadusavastuste patenteerimises. Ekspertide sõnul on Eesti vajakajäämised eelkõige viimases. Patenteerimiskompetentsi tugevdamisel on valikus nii otsesed toetused ja vahendid, et lihtsustada patenteerimisprotsessi kui ka stiimulite süsteimid, mis tunnustaks patenteerimistegevust koos avaldamisega.	Pigem lihtne, aga põhimõtteline. Sisuliselt on valikus rahaline motiveerimine vs. T&A publitseerimissüsteemi ümberkujundamine, seades publikatsioonide arvu kõrval prioriteetseks patentide registreerimise.	+ Mõõdetav rahaline kasu Eesti uurimisrühmadele. - Otsesed miinused puuduvad, tegu on tänase miinuse eemaldamisega. Kee-rukused võivad ilmned eelkõige T&A hindamis-süsteemi kriteeriumite ümberkujundamisel.	Patenteerimise kompetentside arendamine on tarvilik niipea kui võimalik teadusasutuste, Eesti Teadusagentuuri, Haridus- ja Teadusministeeriumi ja Majandus- ja Kommunikatsiooni-ministeeriumi koostöös. Otseseid miinuseid selle suuna arendamiseks tegelemiseks ei ole.
Tehisintellekt ja masinõpe	Mil määral rakendada tehisintellekti	Tehisintellekt on tulnud, et jääda, ent selle tehnoloogiline	Tarvilik on nn +	Mitmete avalike teenuste pakkumise personaliseeritus ja	Tegemist on mahult niivõrd horisontaalse tehnoloogiaga,

TEHNOLOOGIA	OTSUSTUSKOHT	KONTEKST	LIHTSUS/TAKISTUS(T)E ÜLETATAVUS	EELDATAVA KASU JA VÕIMALIK RISK	VÕIMALIK LAHENDUS
	riigivalitsemises, haridussüsteemis ning tööjõu ümber- ja täiendõppes? Kes vastutab protsessi vedamise eest?	arendamine toimub ülemaailmselt. Eesti unikaalseks võimaluseks on tehisintellekti kiire horisontaalne rakendamine, kus varasema kompetentsi ja maailma mõistes väga heal tasemel riiklike registrite toel on Eestil eelis tehisintellekti kasutamisel riigivalitsemises ning poliitikakujundamises. Avaliku sektori juhtimisel oleks seejärel kriitiline võimalikult kiire õigus-raamistiku loomine ning ülalt-alla integreerimine.	tegevuskava tegemine, millest pannakse paika seadusandluse loomine ning eesmärgistatakse kiire tehisintellekti kompetentsidega inimeste palkamine. Vaja on vastutavat kesksest asutust näiteks Riigikantselei näol, kus tegevuskava sisustavad valdkondade esindajad ise.	kiirus, 24/7 kättesaadavus. Uued võimalused e-valitsemise eksportimiseks. Lai ühiskondlik valmisolek tehisintellekti edasisteks arenguteks. - Andmeturvalisus. Võimalik AI bias. Väga suur ajaline surve seadusandluse ajakohastamiseks.	et selle arenedes on praktiline panuste hajutamine. Tehisintellekti kiire kasutuselevõtt riigiasutustes ning poliitikakujundamises on maailmas unikaalsust pakkuv võimalus. Tarvilik on leida keskne vastutav organ, ent jätta sõnaõigus esemärkide ja vahendite kujundamisel valdkondadele endile.
Sardsüsteemid ja nanokiibid	Milline on Eesti lähenemine küber-turvalisuse tagamisele ja regulatsioonide tegemisele, arvestades sardsüsteemide laialdast levikut elutähtsas taristus ning võimalikku mõju eraelu puutumatusse?	Sardsüsteemid ja nanokiibid on nii tähtsusest kui mahult muutumas maailma majanduse veduriks. Küberturvalisuse osas on valikuks kas joonduda rahvusvahelistest standarditest või asuda riigina vedama õigusloomet ja kiipide turvalisuse testimist. Valikuks on ka juhtumipõhine ja paindlik lähenemine, mis prioritseerib koostööd tööstuse sidusrühmade ja rahvusvaheliste partneritega vs. ennetav avaliku sektori juhitud küberturvalisuse tänasest rangem reguleerimine nii Eesti siseselt kui Euroopa Liidu üleselt.	Kiibitehnoloogiate turvalisuse ja õiguse vedamine seostuks osaliselt riigi tänaste tehnoloogiliste kompetentsidega ning toetaks Eesti mainet tehnoloogia-innovatiivsest riigist.	+ Rahvusvaheline maine. Väga suur majanduslik potentsiaal testimise ja turvalisuse vallas. - Valdkonna ääretult suur ressursimahukus võib viia olukorrani, kus isegi Eesti mõistes väga suurte investeeringute tegemine ei pruugi tagada kliendibaasi, kes eelistab suuremaid tegijaid.	Turvalisuse osas on soovitatav konservatiivne lähenemine. Nii võibki nišš olla uute tehnoloogiliste avastuste tegemise asemel olla maailmatasemel tehnoloogiate turvalisuse testimine ning turvastandardite kehtestamine.

TEHNOLOOGIA	OTSUSTUSKOHT	KONTEKST	LIHTSUS/TAKISTUS(T)E ÜLETATAVUS	EELDATAVA KASU JA VÕIMALIK RISK	VÕIMALIK LAHENDUS
Vesinik-tehnoloogia	Millisel skaalal ja millise mudeliga liikuda edasi vesiniktaristu arendamisega?	PPP (jagatud riskid ja kasu, rahvusvaheliste ettevõtete investeeringu potentsiaal) vs. riigi juhitud investeeringud (stabiilne, riigi juhitud ja kooskõlas riiklike ja EL poliitikatega, ent avalikute sektorile väga ressursinõudlik ning bürokraatilik). Väikesel skaalal piloot-/demoprojektid vs. üleriiklikud vesinikjaamad ning maagaasi taristu moderniseerimine.	Nii suurel skaalal taristu moderniseerimine kui pilootprojektid on pigem teostatavad. PPP on praktikas osutunud mitmetes suuremahulistes taristu-projektides kokkuvõttes kulukamaks ja keerukamaks valikuks, ent initsiatiiv Eestis on selleks täna olemas.	+ Tehnoloogia jätkuvate läbimurrete korral võimaldab efektiivne ja varakult väljaehitatud vesiniktaristu Eestit siduda nii põhjamaade kui Euroopaga, mille mõju võib majanduslikult ulatuda miljarditesse. - Otsesed riskid peale kapitalimahukuse puuduvad.	Vesiniku transportimine ja sellega seotud taristu (nt sadamad, torud) abil Euroopaga võrgustumine võiks olla Eesti suur majanduslik võimalus, võimaldades sidumist nii Saksamaa suure nõudluse kui ka põhjamaade suurtootjatega.

Allikas: Autorite koostatud

CIVITTA Estonia

info.ee@civitta.com

+372 646 448 8

www.civitta.ee

CIVITTA Latvia

info.lv@civitta.com

+371 277 055 85

www.civitta.lv

CIVITTA Lithuania

info.lt@civitta.com

+370 685 266 80

www.civitta.lt

CIVITTA Finland

info.fi@civitta.com

+358 505 261 694

www.civitta.fi

CIVITTA Denmark

info.dk@civitta.com

+452 762 80 83

www.civitta.com

CIVITTA Poland

info.pl@civitta.com

+48 690 001 286

www.civitta.pl

CIVITTA Slovakia

info.sk@civitta.com

+421 901 700 574

www.civitta.sk

CIVITTA Ukraine

info.ua@civitta.com

+380 442 270 140

www.civitta.com.ua

CIVITTA Belarus

info.by@civitta.com

+375 296 018 517

www.civitta.by

CIVITTA Moldova

info.md@civitta.com

+373 797 550 99

www.civitta.md

CIVITTA Armenia

info.am@civitta.com

+374 10 546 434

www.civitta.am

CIVITTA Serbia

info.rs@civitta.com

+381 11 2435 489

www.civitta.rs

CIVITTA Bulgaria

info.bg@civitta.com

+359 884 076 576

www.civitta.bg

CIVITTA North

Macedonia

info.mk@civitta.com

+389 71 391 957

CIVITTA Kosovo

info.ks@civitta.com

+383 493 380 55

www.civitta.com

CIVITTA Sweden

info.se@civitta.com

www.civitta.com

CIVITTA Georgia

info.ge@civitta.com

www.civitta.com