



**TALLINNA**  
**TEHNIKA KÕRGGKOO**  
TTK UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

**TALLINNA TEHNIKAKÕRGGKOOLI  
TOIMETISED NR 24**



**2019**



**TALLINNA**  
**TEHNIKA KÕRGGKOO**  
TTK UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

# **TALLINNA TEHNIKAKÕRGGKOOLI TOIMETISED NR 24**

**2019**

Koostaja ja toimetaja: Anne Kraav

Tehniline toimetaja: Mari-Leen Treimann

Väljaandja: Tallinna Tehnikakõrgkool

Pärnu mnt 62

10135 Tallinn

ISSN 1406-7641

## SAATEKS

TTK toimetised nr 24 annab ülevaate uurimistöde rühmade teostatud uuringutest. Kõik artiklid on uurimistöde rühmade juhtide vastastikku retsenseeritud.

Egert-Ronald Parts, Karin Lellep ja Martti Kiisa on artiklis käsitletud visualiseerimistarkvarade kasutamisel esinevaid probleeme, mis on tingitud nii piiratud funktsionaalsusest, visualiseerimise kvaliteedist kui ka kasutusmugavusest.

Ada Traumann, Teele Peets, Margit Kuusk ja Jane Kivistik on seadnud oma artiklis käsitletava uuringu eesmärgiks analüüsida mõõtmistulemusi vastavalt rahvusvaheliselt ühilduvatele antropomeetrilistele andmebaasidele ja NATO riikide suurustabelitele.

Peter Šverns käsitleb oma artiklis koordinaatmõõtemasinate rakendamist tööstuses.

Rein Kochi ja Leena Paapi artikkel annab ülevaate maapinnaõhu radoonikontsentratsiooni võrdlusmõõtmistest, mille eesmärgiks on TTKs väljaarendatava radoonilabori loomine, et tulevikus teostada radoonimõõteaparatuuri võrdlusmõõtmisi teistele organisatsioonidele ja pakkuda ka laiemalt radoonimõõtmise ja spetsialistide koolitamise teenust.

Tõnis Hintsov, Jelizaveta Janno ja Kati Nõuakas on artiklis selgitanud võimalusi Eesti transpordisektori kasvuhoonegaaside vähendamiseks.

Koostaja  
Anne Kraav  
arendusprorektor

## FOREWORD

*The Proceedings of TTK University of Applied Sciences* no 24 gives an overview of the applied research conducted at TTK UAS. All the articles have been peer-reviewed by the research group leaders of TTK UAS.

The article *Visualisation of Building Information Models in Virtual Reality* focuses on various problems occurring while using visualisation software, caused by limited functionality, visualisation quality and the level of user friendliness.

In the article *The Analysis of Estonian Defence Forces Uniform Sizes Based on Measurements Data of 3D Bodyscanner*, the authors Ada Traumann, Teele Peets, Margit Kuusk and Jane Kivistik analyse the collected data in comparison with international anthropometric databases and the measurement tables of the NATO countries.

The article by Peter Šverns focuses on the implementation of coordinate measuring machines in industry.

The article by Rein Koch and Leena Paap *Report of TTK UAS' Participation in the 14th International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping in Prague, and of the International Comparative Measurements of Radon Concentrations in Surface Air* focuses on the measurements of radon concentrations in surface air. The future aim of the authors is to develop a radon laboratory at TTK

UAS, in order to offer radon measurements to other organizations in Estonia and to start general and specific training programmes of radon measurements.

The article by Tõnis Hintsov, Jelizaveta Janno and Kati Nõuakas focuses on the possibilities of reducing greenhouse gases in the Estonian transport sector.

Anne Kraav  
Vice Rector for Development

## SISUKORD

<b>Saateks</b> .....	<b>3</b>
<b>Foreword</b> .....	<b>3</b>
<i>Egert-Ronald Parts</i> (MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor)	
<i>Karin Lellep</i> (MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor)	
<i>Martti Kiisa</i> (PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli professor)	
<b>Ehitusinfo mudelite visualiseerimine virtuaalreaalsuses</b> .....	<b>6</b>
<b>Visualization of Building Information Models in Virtual Reality</b> .....	<b>22</b>
<i>Ada Traumann</i> (PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli professor)	
<i>Teele Peets</i> (MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor)	
<i>Margit Kuusk</i> (MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor)	
<i>Jane Kivistik</i> (Tallinna Tehnikakõrgkooli laboriinsener)	
<b>Eesti Kaitseväge vormipükste suuruste analüüs 3D-kehaskanneriga möödetud tulemuste baasil</b> .....	<b>24</b>
<b>The Analysis of Estonian Defence Forces Uniform Sizes Based on Measurements Data of 3D Bodyscanner</b> .....	<b>29</b>
<i>Peter Šverns</i> (Tallinna Tehnikakõrgkooli assistent)	
<b>Koordinaatmõõtemasinate rakendamine tööstuses</b> .....	<b>31</b>
<b>Implementation of Coordinate Measuring Machines in Industry</b> .....	<b>39</b>
<i>Rein Koch</i> (PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli dotsent)	
<i>Leena Paap</i> (MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor)	
<b>TTK esinduse osavõtt Prahast toimunud seminarist 14<sup>th</sup> International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping ning kaasnenud rahvusvahelisest maapinnaõhu radoonikontsentratsiooni võrdlusmõõtmistest</b> .....	<b>40</b>
<b>Report of TTK UAS´ Participation in the 14th International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping in Prague, and of the International Comparative Measurements of Radon Concentrations in Surface Air</b> .....	<b>45</b>
<i>Tõnis Hintsov</i> (MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor)	
<i>Jelizaveta Janno</i> (PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor)	
<i>Kati Nõuakas</i> (MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor)	
<b>Eesti transpordisektori kasvuhoonegaaside vähendusvõimalused</b> .....	<b>47</b>
<b>Possibilities of Reducing Greenhouse Gases in the Estonian Transport Sector</b> .....	<b>55</b>

## **EHITUSINFO MUDELITE VISUALISEERIMINE VIRTUAALREAALSUSES**

*Egert-Ronald Parts, MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor*

*Karin Lellep, MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor*

*Martti Kiisa, PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli professor*

### **Sissejuhatus**

Virtuaalreaalsusel on suhteliselt pikk ajalugu, kuid alles viimase paari dekaadi tehnoloogilised arengud on teinud sellest professionaalse ja kättesaadava abivahendi paljude valdkondade jaoks. Viimaste aastatega on järjest enam kõlapinda saanud virtuaalreaalsus, peamiselt tänu võimekate VR-prillide turuletulekule ja neile loodavatele keskkondadele. Virtuaalreaalsus ei ole enam pelgalt meelelahutuslik tehnoloogia, vaid aitab senisest oluliselt kiiremini, efektiivsemalt ja usaldusväärsemalt läbi viia tõsiseid tööoperatsioone kõikmõeldavates eluvaldkondades. Seeläbi on oodata virtuaalreaalsuse seadmete jõulisemat arengut, mistõttu on suur potentsiaal neid kasutada ka ehitusvaldkonnas. [1], [2], [3], [4]

Aasta-aastalt suureneb ehitusvaldkonnas ehitusinfo mudelite kasutamine ja lisandub viise selle informatsiooni visualiseerimiseks. Olemasolevad virtuaalreaalsuse (edaspidi: VR) süsteemid on tõestanud, kuidas tajutavama visualiseerimise kaudu paraneb otsustajate ja hoone kavandajate vaheline suhtlus ning seeläbi soovitud lõpptulemuse saavutamine. Ehitusinfo mudelid on andmemahukad ja need on vastavalt tarkvarale salvestatud eri formaatides. Enamjaolt kasutatakse osamudelite kokkütõstmisel avatud standardile vastavat .ifc-formaati. Virtuaalreaalsuses visualiseeringu tegemiseks on mitmeid tarkvarasid ning sõltuvalt modelleerimistarkvarast ja selle failiformaadist tulenevatest iseärasustest, tuleb visualiseeringu teostamiseks kasutada eri lähenemisi.

2018. a esimeses pooles viis Tallinna Tehnikakõrgkool Riigi Kinnisvara ASi tellimusel läbi rakendusuuringu „Ehitusinfo mudelite visualiseerimine virtuaalreaalsuses“ [5], mille kokkuvõtlikke tulemusi käesolevas artiklis kajastatakse. Uuringu eesmärgiks oli hinnata VR-prillide ja visualiseerimistarkvarade toimivust ehitusinfomudelite vaatlemisel VR-keskkonnas. Artiklis võrreldakse toodete toimivust ning markeeritakse puudused, eelised ja omavahelised erinevused. Lõpptulemusena pakutakse lahendusi, mis lihtsustavad ja kiirendavad mudelite visualiseerimist. Töös keskendutakse virtuaalreaalsuse peakomplektidele ja nn AEC (*architecture, engineering and construction*) tarbeks arendatud visualiseerimistarkvaradele ning eesmärgiks on testida neid eri keerukuse ja mahuga ehitusinfo mudelite peal. Seejuures hinnatakse nii funktsionaalsust kui ka kasutuskogemust ning antakse soovitusi töövoogude ja -protsesside osas. Võimalikult palju on kirjeldatud katsetustel kogetud probleeme, et teised kasutajad teaksid nendega juba varakult arvestada. Tööd lugedes tuleb meeles pidada, et virtuaalreaalsus tervikuna on pidevas ja üsna kiires arengufaasis – uusi seadmeid ning tarkvarasid (ja nende uuendusi) lisandub pea iganädalaselt, mistõttu töös esitatud informatsioon on fikseeritud uuringu teostamise perioodiga ning vajab hilisemalt pidevat uuendamist.

## 1. Virtuaalreaalsuse ülevaade

### 1.1. Virtuaalreaalsuse olemus

Virtuaalreaalsus on arvuti abil loodud digitaalne keskkond, milles kasutaja tajub intuitiivselt keskkonna proportsioone. Võimalikult realistlik kohalolekutunne virtuaalruumis oleneb VR-seadme kvaliteedist, tehnoloogiast ja tehismaailma detailsusest. Kõige realistlikuma tehismaailma puhul puudub kasutajal piiritunnetus ning pärismaailma lõpu ja virtuaalreaalsuse alguse tunnetamine on raske kui mitte võimatu. Üheks kõige levinumaks virtuaalreaalsuse tooteks on VR-peakomplekt.

Peamised aspektid, mis on vajalikud VR-seadmete tööks [6].

- Arvutis, mängukonsoolis või telefonis asuv riistvara loob, töötleb ja edastab andmeid, mis moodustavad digitaalmaailma.
- Juhtimisseadmed, mis lihtsamate VR-peakomplektide puhul võimaldavad tavalist keskkonnas liikumist ning suhtlemist ainult mõne peakomplektil asuva nupuga. Rohkem arendatud peakomplektid on varustatud käes hoitavate juhtimisseadmetega.
- Pilt jõuab kasutajani ekraani abil. On olemas erinevaid ekraanitüüpe. Parematel prillidel kasutatakse kahte eraldi ekraani. Odavamad peakomplektid kasutavad nutitelefoniga ekraani või üksikut OLED-ekraani.
- Peakomplektid sisaldavad läätsesid, mis aitavad silmadel fokuseerida ekraanile. See võimaldab virtuaalreaalsusel töötada üksikutel ekraanidel nagu nutitelefonide ekraanid. Arendatumad peakomplektid võimaldavad läätsede kohandamist ja tagavad kasutajale parema kasutuskogemuse.
- Kasutaja kohalolekutunde suurendamiseks kasutatakse peamiselt 100- kuni 120-kraadiseid vaatevälju. Inimese horisontaalne vaateväli on keskmiselt 210 kraadi.
- Mida kõrgem on kaadrisagedus, seda parem on süüve. Üldiselt loetakse rahuldavaks kaadrisageduseks vahemikku 60 kuni 120 kaadrit sekundis (edaspidi: FPS *frames per second*). Mida väiksem on kaadrisagedus, seda suurem on tõenäosus süüve kadumiseks ja enesetunde halvenemiseks.
- Jälgimisandurid võimaldavad peakomplektil mõista, millal kasutaja liigutab oma pead, käsi ning keha. Selle alusel liigutatakse sisuvoogusid. Peakomplektidel on olemas liikumisandurid ning PlayStation VRi, Oculus Rifti ja HTC Vive'i puhul on need olemas lisaseadmetel, mis positsioneerivad kasutaja ruumis.
- Heliga varustamine toimub kas peakomplekti siseselt või eraldi lisakõlaritega.

### 1.2. Kasutamine ehitusvaldkonnas

Ehitusinformatsiooni modelleerimine ja juhtimine (edaspidi: BIM) on olnud juba aastaid üks põhilisemaid ehitusvaldkonna arengusuundasid. BIM on ehitusinformatsiooni mudel ehk tark mudel ehitisest, mis koosneb BIM-elementidest, milles on olemas ehitise, ehituse ja korrashoiuks vajalik informatsioon [7]. BIMi kasutamine annab ehitise elutsükli vältel võimaluse osaleda protsessis kõikidel osapooltel – arhitektil, konstruktoril, tehnosüsteemide projekteerijal, arendajal, ehitajal, omanikul, kasutajal ja haldajal. Kõigil neil on võimalus integreerida ühte mudelisse enda jaoks vajalik informatsioon ning kontrollida olemasolevat teavet [8].



Mudelprojekteerimise kasutamine pakub uusi ja paremaid võimalusi alternatiivsete projektlahenduste võrdlemiseks ja omavaheliseks koordineerimiseks. Olgu siinkohal esitatud mõned tähtsamad virtuaalreaalsuse kasutamisega seotud aspektid.

- Virtuaalreaalsuse ja modelleerimise kasutamine ehituses aitab vältida vigu, mis võivad välja tulla alles ehitamise käigus või lõpus. Virtuaalkeskonnas avastatud probleemide ennetav lahendamine on oluliselt odavam ja vähem ajamahukas.
- Virtuaalreaalsuse kasutamine annab võimaluse näha ja mõista projekti kõikidel osapooltel ühtemoodi. Tänu keskkonna sügavuse ja ruumilisuse tunnetamisele tekib ehitisest suhteliselt tõetruu ettekujutus ning tänu õigele mastaabile ka realistlik ruumitunnetus. Eriti tähtis on see neile, kes ei ole ehitusala spetsialistid (sageli on selleks tellija või ehitise hilisem kasutaja).
- Ühe mudeli samaaegne vaatlemine mitme kasutaja poolt võimaldab kõikidel osapooltel korraga tulemust analüüsida. Virtuaalreaalsuse peakomplekti olemasolul ei pea koosolekutel osalejad viibima samas ruumis. Teineteisega on mudelis võimalik suhelda näiteks hääle abil, jätta video- või audiosõnumeid, markeerida probleemseid kohti või kirjutada kommentaare.
- Erinevate simulatsioonide (nt hinnata päikese liikumist ja tunnetada selle tagajärgi) läbiviimine tundub kasutajale realistlik ja vahetu, kuna paiknetakse n-ö mudelis sees.
- Ehitajal on võimalik keeruliste sõlmede ja konstruktsioonidega eelnevalt põhjalikult tutvuda, saades niimoodi väga hea ettekujutuse lõpptulemusest.

## 2. Virtuaalreaalsuse riistvara

Tabelis 1 on antud ülevaade nendest seadmetest, mida võiks potentsiaalselt ehitussektoris kasutada. Käesolevas uuringus on testitavateks seadmeteks valitud HTC Vive [9], Oculus Rift [10] ja Acer Windows Mixed Reality Headset [11]. Neist kaks esimest on senise kasutuskogemuse ja ülevaadete põhjal osutunud ehitussektoris sobivaimateks ning Acer oli ainus kättesaadav peakomplekt Windows Mixed Reality seeriast.

Üldjuhul on VR-prillid ühendatud arvutiga kaabli abil, kuid osadele peakomplektidele on välja töötatud ka juhtmevabad ühendused. Need küll oluliselt suurendavad liikumisvabadust, kuid nende esmane seadistamine on suhteliselt aeganõudev (nt kaabelduse ühendamine, arvuti ja prillide vahelise ühenduse loomine jne) ning komplekt vajab akude laadimist. Käesolevas uuringus kasutati TPCASTi juhtmevaba ühendust HTC Vive'i peakomplektiga.

Kasutaja asukoha määramiseks virtuaalkeskonnas kasutatakse erinevaid jälgimise meetodeid. Eristatakse süsteeme, kus keskkond jälgib prille ehk *outside-in* (nt Oculus Rift) või kus prillid jälgivad keskkonda ehk *inside-out* (Windows Mixed Reality). Esimesel juhul on vaja eraldiseisvaid andureid (nt Oculus Rifti baasjaamad), mis jälgivad peakomplekti ja juhtpulte. Teisel juhul on VR-prillidel sisseehitatud kaamerad, mis jälgivad juhtpultide asukohti ja asendit. Kõik süsteemid, kus keskkond jälgib VR-prille, vajavad kasutamise piirkonna määramist (*roomscale*). Selle toiminguga käigus fikseeritakse ruumi piirkond, kus VR-prillid on kasutatavad – eesmärgiks tagada kasutaja ohutus. Seejuures on tähtis, et määratav piirkond jääks tootjapoolse soovitusliku ala piiridesse, sõltudes baasjaamade tüübist ja asukohast. VR-prille on võimalik kasutada ka ilma *roomscale*’ita, kuid sellisel juhul puudub kasutajal ruumis

liikumise võimalus (*standing* või *seated*). Käesoleva uuringu raames kasutasid *roomscale*’i HTC Vive ja Windows Mixed Reality Acer peakomplektid ning *standing mode*’i Oculus Rift.

Uuringus kasutati arvuteid, mis ületavad tarkvara- ja VR-prillide tootjate poolt riistvarale esitatud soovituslikke nõudeid.

**Tabel 1. Uuringus kasutatud VR-prillide spetsifikatsioon**

Parameeter	HTC Vive	Oculus Rift	Acer headset
<b>Resolutsioon</b>	2160×1200 (1080×1200 silma kohta)	2160×1200 (1080×1200 silma kohta)	2880×1440 (1440×1440 silma kohta)
<b>Värskendussagedus</b>	90 Hz	90 Hz	90 Hz
<b>Ekraani tüüp</b>	PenTile OLED	PenTile OLED	LCD
<b>Vaateväli</b>	110°	110°	~105°
<b>Kasutaja asukoha jälgimisviis</b>	Vive baasjaamad	Oculuse sensorid	Pultide jälgimine prillide kaameraga
<b>Ruumipõhine jälgimine (<i>room scale</i>)</b>	Jah	Jah, aga vajab kolmandat andurit	Jah
<b>Kaal</b>	468 g	470 g	350 g
<b>Integreeritud kõrvaklapid</b>	Ainult valikuliste Deluxe Audio Strap lisadega	Jah	Ei
<b>Sissehitatud mikrofoni</b>	Jah	Jah	Ei
<b>Väline kaamera</b>	Jah	Ei	Jah, 2 tk
<b>Juhtpuldid</b>	Vive juhtpuldid	Xbox One, Oculus ja Oculus Touch juhtpuldid	Microsofti juhtpuldid
<b>Platvorm</b>	SteamVR, HTC VivePort	Oculus Store, SteamVR	Windows Store, SteamVR
<b>Väljalaskeaeg</b>	Aprill 2016	Märts 2016	Oktoober 2017
<b>Hind Eestis</b>	629 € (komplekt)	583 € (komplekt)	433 € (komplekt)

### 3. Mudelid

#### 3.1. Kasutatud projekteerimistarkvarad

Käesolevas uuringus on kasutatud tarkvarasid Autodesk Revit 2018 (edaspidi Revit), Graphisoft ARCHICAD 21 (edaspidi ARCHICAD) ja Trimble SketchUp Pro 2018 (edaspidi SketchUp). Neist kaks esimest on meie regioonis laialt kasutatavad parameetrilised modelleerimistarkvarad. Viimane on eelkõige valitud põhjusel, et seda toetavad peaaegu kõik visualiseerimistarkvarad.

Revit on Autodesk Inc. toode ning selle puhul on tegemist täislahendusega, mis hõlmab nii arhitektuuri, konstruktsioonide, tehnosüsteemide kui ka ehituses vajaminevaid funktsioone ja lahendusi. Luuakse võimalus hallata kogu projektinformatsiooni, koordineeritud tegevusi ja mudelipõhiseid lahendusi. [12]

ARCHICAD on arhitektuurne BIM-tarkvara, mille loojaks on Ungari firma Graphisoft. ARCHICADi tunnustatakse kui esimest CADi toodet personaalarvutile, mis on võimeline looma nii 2D- kui ka 3D-geomeetriaid, samuti kui esimest BIM-toodet personaalarvutile. [13]

Trimble SketchUp, endise nimega Google SketchUp, on sobilik hulgale rakendusalaadele, nagu arhitektuur, sisekujundus, maastikuarhitektuur, ehitus ning filmide ja videomängude disain. SketchUp on saadaval veebipõhise rakendusena

SketchUp Free, vabavaralise versioonina SketchUp Make ja tasulise versioonina SketchUp Pro. [14]

### 3.2. Kasutatud mudelid

BIM-mudelite vaatlemisel virtuaalreaalsuses tuleb alati arvestada mudeli mahuga, s.o peamiselt mudeli polügoonide arv ja tekstuuride kasutamise puhul nende kvaliteet. Mida rohkem on mudelis polügoone, seda nõudlikum on visualiseering riistvara suhtes. Edasiste tarkvarade katsetamiseks on valitud neli hoonet, mille andmemahud ja elementide arv on näidatud tabelis 2.

**Tabel 2. Mudelite mahud ja polügoonide arvud**

Mudeli nimi	Maht, MB	Kolmnurksete polügoonide arv, tk	Elementide arv, tk	Polügoonide arv elemendi kohta, tk
Reviti näidismaja	17	432 000	496	871
KODA moodulmaja	730	2 175 000	1970	1104
Viimsi riigigümnaasium	757	5 535 000	46 093	120
Kohtumaja (Archicad)	398	5 200 000	125 868	41
Kohtumaja (3DS MAX)	1780	34 000 000	290 660	117

#### 3.2.1. Reviti näidismaja

Reviti eramu on näidismudel, mis on olnud Reviti kasutusvõimaluste näidiseks kõikidel viimastel Reviti versioonidel. Tegu on levinud ja tuntud mudeliga, mis on vaikimisi kaasas Reviti tarkvaraga ning mida saab alla laadida Autodeski kodulehelt [15].

Näidismaja koosneb ühest Reviti formaadis mudelist, mis sisaldab hoone arhitektuuri (sh sisearhitektuuri) ja maastikku (joonised 1 ja 2). Visuaalsest küljest on määratud elementide materjal ja värv ning osade elementide puhul ka nende tekstuur (nt välisseinad). Sisearhitektuuri osas on hoone sisustatud mööbliga (nt lauad, toolid, köögiseadmed) ning sinna on lisatud ka inimesed. Maapinnale on määratud muru kujutav tekstuur. Lisaks paikneb krundil kolm puud, auto, tuulegeneraatorid ja päikesepaneelid. Mudeli ülesehitus on tehtud vastavalt Reviti elementide perekondadele (*Family*), mis annab võimaluse visualiseerimistarkvaras testida kihtidega manipuleerimise võimalusi. Tegu on andmemahult lihtsa hoonega, kuid on piisavalt detailne, et olla visualiseerimistarkvarade katsetamise esmaseks mudeliks.



**Joonis 1. Vaade Reviti näidismajale**



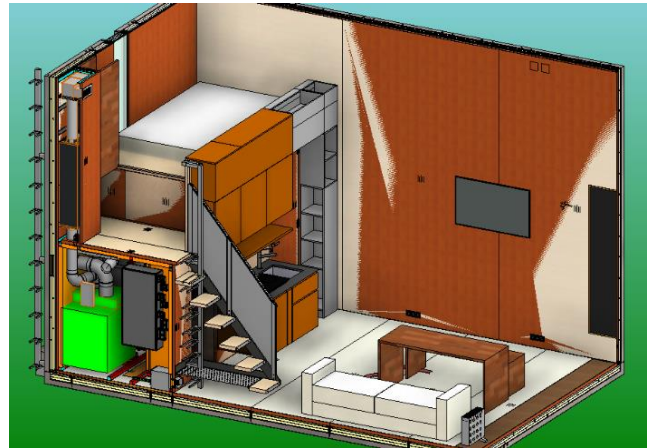
**Joonis 2. Reviti näidismaja sisevaade**

### 3.2.2. KODA moodulmaja

KODA on PLN OÜ projekteeritud moodulmaja (joonised 3 ja 4), mille kõik osamudelid on projekteeritud tarkvaras Revit, mis seetõttu lihtsustab visualiseerimist, sest enamik VR-tarkvarasid toetavad Reviti mudeli formaati. Kaheksast osamudelist kolm on arhitektuursed, neli on tehnosüsteemide ja üks konstruktsiooni osamudel. Arhitektuursed osamudelid sisaldavad lisaks materjalide värvidele ka tekstuure. Osamudelite elemendid on modelleeritud neile omaste perekondadega. KODA mudeli testimise eesmärgiks on saada teada, kuidas toimib reaalse mudelprojekteerimise protsessi käigus valminud väikesemahulise hoone visualiseerimine virtuaalreaalsuses.



Joonis 3. Vaade KODA moodulmajale



Joonis 4. KODA moodulmaja sisevaade

### 3.2.3. Viimsi Riigigümnaasium

Uuringus kasutatav Viimsi Riigigümnaasiumi (edaspidi VRG) suuremahuline BIM-mudel (joonised 5 ja 6) koosneb 12 detailsest osamudelist. Katsetatava mudeli eripäraks on tema märgatavalt suurem maht võrreldes eespool kirjeldatud mudelitega ning kasutatavad osamudelite formaadid. Arhitektuursed osamudelid on projekteeritud tarkvaras Graphisoft ARCHICAD (formaadis .pln) ning teised osamudelid (hoone konstruktsioon ja tehnosüsteemid) on salvestatud eri projekteerimistarkvaradest .ifc-formaati. Viimsi Riigigümnaasiumi mudeli katsetamise eesmärgiks on leida viis, kuidas viia eri formaatides mudelid visualiseerimistarkvarasse ning selgitada välja, kas arhitektuurse osamudeli formaadi ümbersalvestamise tõttu jäävad elemendid ja nende omadused (nt tekstuudid, värvid) alles.



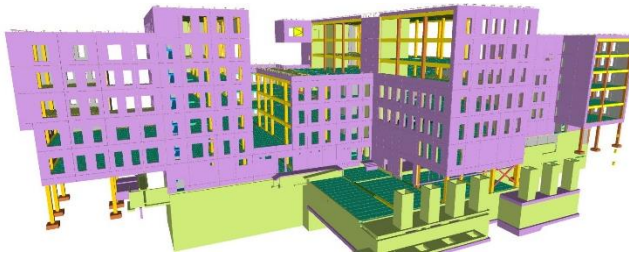
Joonis 5. Vaade VRG-mudelile



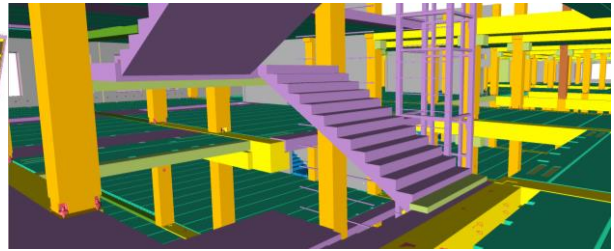
Joonis 6. VRG-mudeli lõige

### 3.2.4. Kohtumaja

Kohtumaja mudel on tööprojekti staadiumis valmistatud .ifc-formaadis konstruktsioonimudel (joonised 7 ja 8), mis on katsetatavatest mudelitest mahult ja elementide arvult kõige suurem. Selle mudeli katsetamise eesmärgiks on näha, kuidas saavad visualiseerimistarkvarad hakkama nii suure mudeli töötlemise ja visualiseerimisega ning milline on sellise mudeli kasutuskogemus. Selle mudeli puhul hinnatakse konstruktiivsete elementide kuvamist ning kontrollitakse, kas VR-tarkvara on kuvanud kõik elemendid.



**Joonis 7. Kohtumaja konstruktiivne mudel**



**Joonis 8. Kohtumaja konstruktiivne mudel**

## 4. Virtuaalreaalsuse tarkvarad

Projekteerimistarkvaras koostatud mudeli vaatlemiseks on VR-prillides vaja kasutada visualiseerimistarkvara ning nende koosluses on võimalik tekitada suhteliselt realistlik kohalolekutunne. Visualiseerimistarkvara töötleb projekteerimistarkvaras koostatud mudeli VR-keskkonna visualiseeringu jaoks sobivaks. Seejuures võib sõltuvalt mudeli ülekandmise meetodist (kasutatud tarkvarast, formaadist jne) esineda olulisi pinnatekstuuride, värvitoonide ja harvem ka geomeetriliste parameetrite muutusi.

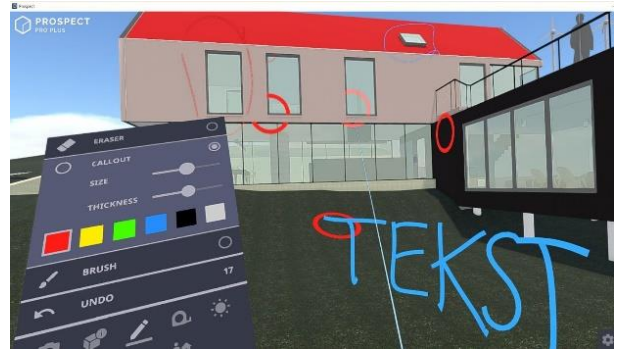
Erinevad visualiseerimistarkvarade tootjad on välja arendanud eraldi tarkvara ja/või liidese olemasoleva projekteerimistarkvara juurde. Sellest sõltub oluliselt mudeli projekteerimistarkvarast visualiseerimistarkvarasse viimise mugavus, kiirus ja visualiseeringu funktsionaalsus.

Visualiseerimistarkvarade arv on suhteliselt suur ja käesolevas töös on põhjalikumalt neist vaadeldud viite:

- IrisVR Prospect 2.1.1 (edaspidi IrisVR Prospect) – joonised 9 ja 10;
- VRcollab 0.9.2 (edaspidi VRcollab) – joonised 11 ja 12;
- Enscape 2.2.3 (edaspidi Enscape) – joonised 13 ja 14;
- Autodesk Revit Live 2.1.781 (edaspidi Revit Live) – joonised 15 ja 16;
- Fuzor 2018 4.0 (edaspidi Fuzor) – joonised 17 ja 18.



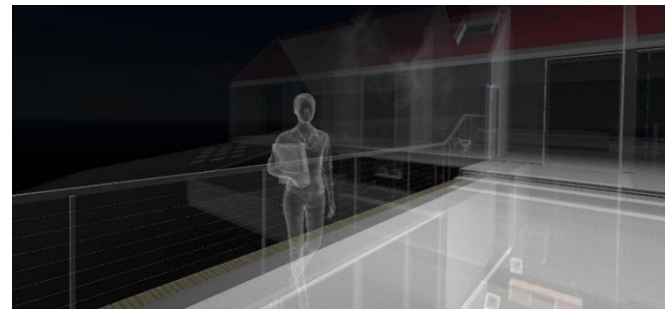
**Joonis 9. Reviti näidismaja sisevaade (IrisVR)**



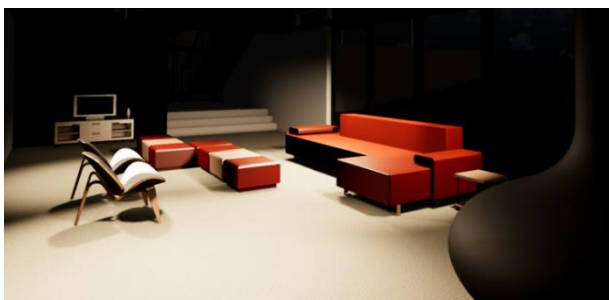
**Joonis 10. Markeerimine (IrisVR)**



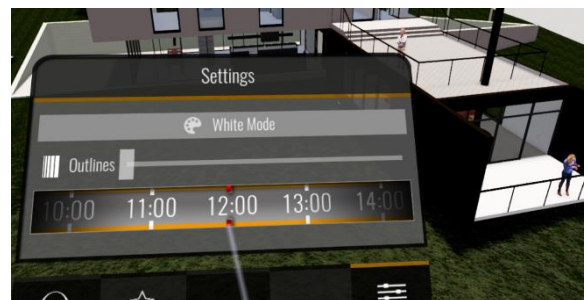
**Joonis 11. Inimese fotorealistlik kuvamine (VRcollab)**



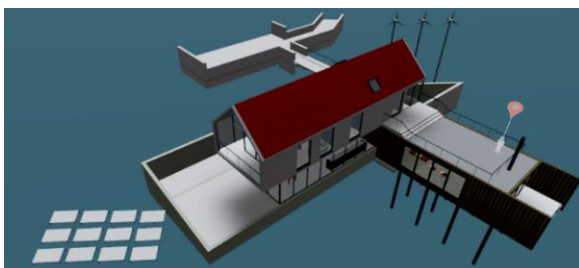
**Joonis 12. Röntgenvaade (VRcollab)**



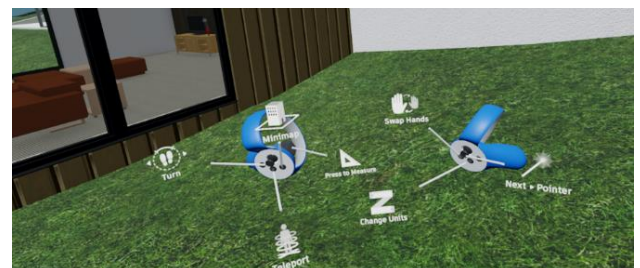
**Joonis 13. Reviti näidismaja sisevaade (Enscape)**



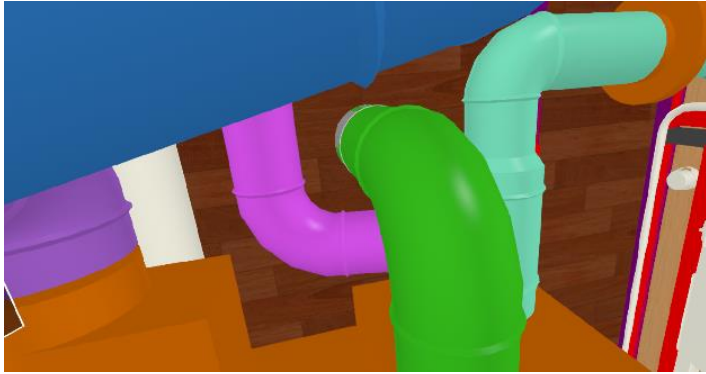
**Joonis 14. Kellaaja valimine (Enscape)**



**Joonis 15. Maketivaade (Revit Live)**



**Joonis 16. Juhtpultide funktsioonide kuvamine (Revit Live)**



**Joonis 17. Tehnosüsteemide kuvamine (Fuzor)**



**Joonis 18. Päevaaja muutmine (Fuzor)**

#### 4.1. IrisVR Prospect 2.1.1

Tarkvara toetab levinumaid VR-prille, nagu HTC Vive, Oculus Rift ja Windows Mixed Reality VR. Tarkvara arendamisel on palju tähelepanu pööratud kasutajate vahelise suhtluse lihtsustamiseks. Selle jaoks on välja töötatud failiformaadid .ivz ja .ivm, mida saab vaadata külaliskasutaja (*Guest*) abil läbi IrisVR Prospecti teegi. Seejuures on tähtis, et .ivz-faili korral saab mudelit vaadelda üks kasutaja korraga, kuid .ivm-faili abil on võimalik ühte mudelit vaadelda kuni 12 kasutajal (edaspidi *multiuser*). [16]

Plussid:

- + tarkvara saab lihtsalt ja kiirelt hakkama väikeste mudelite (nagu Reviti näidismaja ja KODA moodulmaja) töötlemise ning kuvamisega – nendes oli mugav ringi liikuda ning mudelis oli võimalik viibida ka pikemaajaliselt;
- + mudeli viimine visualiseerimistarkvarasse on lihtne ja toimiv protsess, kui saab kasutada projekteerimistarkvara liidest või visualiseerimistarkvara soovitatud failiformaati;
- + tarkvara pakutavad navigeerimisviisid on mitmekülgsed ja mugavad ning võimaldavad liikuda peaaegu kõikjale;
- + tarkvara võimaldab lihtsalt failide jagamist läbi .ivz- ja .ivm-formaatide;
- + mitme kasutajaga samas mudelis viibimine toimib suurepäraselt ja võimaldab kasutajatel omavahel mugavalt suhelda;
- + suudab kuvada detaileid ja mahukaid mudeleid;
- + võimaldab lisaks mudelivaatele ka kasutajasõbralikku maketivaadet ning sealjuures teha lõikeid;
- + tarkvara funktsionaalsus on piisav, et kasutaja saaks ülevaate, millest hoone koosneb ja soovi korral teostada mõõdistusi, teha märkmeid, lülitada kihte sisse ja välja ning simuleerida päikese liikumist.

Miinused:

- Viimsi Riigigümnaasiumi ja Kohtumaja hooned olid mahult märgatavalt suuremad ja see avaldas tuntuvat mõju visualiseerimise kaadrisagedusele ja seetõttu ka enesetundele;
- tuleb arvestada, et .ifc-formaadis olevad mudelid ei pruugi olla korrektselt kuvatud (enim esines probleeme Revitisse viidud .ifc-osamudelitega);
- visualiseeritud keskkond näeb välja pigem tuhm ja elutu, kuna ei kuvata läikeid;

- puudub lennurežiimis liikumise võimalus;
- elementide info on ebapiisav, võimaldades vaadata vaid elemendi kihti, nime ja materjali.

#### 4.2. VRcollab 0.9.2

VRcollab on VRcollab Pte Ltd arendatud visualiseerimistarkvara, mille esimene versioon jõudis turule 2016. a. Tarkvara toetab HTC Vive'i, Oculus Rifti ja Windows Mixed Reality VR-prille. Tarkvara kodulehel on öeldud, et see toetab *multiuser*-funktsiooni, VR-keskkonnas kommentaaride lisamist, mõõtude võtmist ning läbivaatuse tulemuste koondraporti moodustamist. VRcollabil on olemas Reviti liides, mille kaudu saab käivitada Revitisse imporditud mudeleid ning teek, kuhu on võimalik laadida .skp või VRcollabi välja arendatud .vrcollab-formaadis faile. [17]

Plussid:

- + lennurežiim töötab väga hästi ja seda on mugav kasutada;
- + konstruktsioonide sisse on mugav vaadata ja neist läbi minna, sest tarkvara tekitab pinna sisse vaatamiseks vaateava;
- + automaatse raporti koostamise võimalus;
- + korraga saavad mudelis liikuda nii VR-prillide kui ka arvuti töölaua kasutaja;
- + VR-keskkonnas on mugav objekte valikusse võtta ning esitatud on kõik elemendile määratud parameetrid;
- + visualiseeringu kvaliteet on hea.

Miinused:

- maketivaates ei ole võimalik mudelit liigutada, suurendada ega pöörata;
- kuvatõmmiste kvaliteet on kehv;
- VR-keskkonnas puudub funktsioon, mis võimaldaks puldi abil vaatesuunda pöörata;
- tarkvarasse ei ole võimalik üles laadida mahukat .skp-faili;
- VR-vaatluse käigus lakkavad aeg-ajalt töötamast kõik funktsioonid peale lendamise ja objektide valikusse võtmise;
- kõnest teksti tegemise funktsioon kommentaari lisamisel ei tööta;
- *multiuser*-funktsiooni ei saadud testimisel tööle, kuigi tootja sõnul on see võimalik;
- .ifc-failidest koosneva mudeli kõik elemendid on halli värvi ning osad on puudu või nihkunud;
- tootja kodulehel olev info on aegunud ja kohati ebapiisav;
- tarkvaraarendaja kodulehel puudub info, kuidas valmistada .vrcollab-formaati ja milleks seda saab kasutada.

#### 4.3. Enscape 2.2.3

Enscape on tänu reaajas renderdamisele väga hea visualiseerimise kvaliteediga tarkvara. Liides on olemas tarkvaradele Autodesk Revit, Trimble SketchUp ja Rhinoceros, mis võimaldab mudelit visualiseerida lihtsalt ja kiirelt. Tänu liidesele on projekteerimistarkvaras võimalik mudelit vaatlemisega samaaegselt muuta. Tarkvara põhirõhk on suunatud keskkonna visualiseerimise kvaliteedile ning selles keskkonnas liikumisele. Enscape võimaldab visualiseeritud mudelit hõlpsalt jagada, võimaldades liidese kaudu luua mudeli visualiseeringust eraldiseisvat .exe-faili. [18]



#### Plussid:

- + muudatuste tegemine modelleerimiskeskkonnas kajastub kohe ka VR-keskkonnas, kuid on mugavalt kasutatav ainult väiksema mahuga mudelite korral;
- + väga hea renderdamise kvaliteet;
- + lendamise ja kõndimise režiime on mugav ja lihtne kasutada ning need toimivad väga hästi;
- + inimeste ja puude maketid on automaatselt asendatud tõetruude RPC- (*Rich Photorealistic Content*) kujudega;
- + kõik olemasolevad funktsioonid töötavad väga hästi;
- + võimalus salvestada mudelist eraldiseisev .exe-fail;
- + .ifc-failide korral esines vaid üksikuid probleeme elementide kuvamisel (nt torupõlvede värvid olid muutunud);
- + renderdamise kvaliteeti saab muuta, mis aitab vältida enesetunde halvenemist ka suuremate mudelite vaatlemisel.

#### Miinused:

- vaate pööramine juhtpuldi abil on ebamugav;
- VR-keskkonnas võiks olla ka kuvatõmmise tegemise võimalus, nagu on töölaua vaates;
- VR-keskkonna pildikvaliteet on halvem kui töölaua ekraanipildil;
- puudub võimalus võtta elemente valikusse ning vaadelda nende parameetreid;
- VR-keskkonnas ei ole võimalik mudeli kihte välja lülitada, kuid seda saab teha modelleerimistarkvara kaudu;
- ei sobi konstruktsioonide sisse vaatamiseks, kuna kuvatav pilt ei ole selge.

#### 4.4. Autodesk Revit Live 2.1.781

Autodesk Revit Live on Autodeski visualiseerimistarkvara, mida on võimalik hankida ainult koos tarkvarapaketiga Architecture, Engineering & Construction Collection. Autodeski kodulehel on tarkvara nimi Revit Live, kuid peale paigaldamist on selle nimeks Autodesk Live (edaspidi kasutatakse siiski nimetust Revit Live). Tarkvara võimaldab arvuti vaates näha mudeli BIM-infot, seadistada kuupäeva ja kellaaega ning lülitada tööle tulesid. VR-vaates on tarkvara funktsionaalsus märksa väiksem, ringi saab liikuda vaid teleporteerudes ning VR-keskkonna funktsionaalsusena on võimalik kontrollida pindade vahekauguseid. Mudeli visualiseeringuid saab Revit Live'i tarkvara kaudu salvestada .exe-formaati. [19]

#### Plussid:

- + tuleb tasuta kaasa Autodeski tarkvarapaketiga *Architecture, Engineering & Construction Collection*;
- + visualiseerimise kvaliteet on tänu tekstuurile, inimeste ning taimedele kujutistele piisavalt hea;
- + ukSED kaovad vaatest, kui nende ligidale teleporteeruda;
- + funktsioonid, mis on VR-osas, töötavad hästi.

#### Miinused:

- ei ole võimalik liikuda lennurežiimis ning ei pääse liikuma mudeli kõikidesse soovitud kohtadesse;
- ei ole võimalik läbi pindade liikuda;
- keskkond on hämar isegi kõige valgemaal päeval;

- mudeli töötlemise protsess võib olla väga pikk ja lõppeda ka ebaõnnestumisega;
- minimaalne funktsionaalsus VR-keskkonnas (arvuti vaates olev funktsionaalsus võiks olla ka VR-keskkonnas);
- .ifc-formaadist tulnud mudelite elementide pinnad muutuvad osaliselt läbipaistvaks ning elemendid võivad mudelist kaduda;
- mõõtude võtmine on piiratud;
- *Publish*-funktsiooniga valmistatud .exe-fail ei tööta;
- ei sobi mahukate mudelite visualiseerimiseks, sest kasutamine tekitab iiveldustunnet;
- kui hoone koosneb mitmest osamudelist, mis ei ole Reviti formaadis, siis tuleb esmalt salvestada need kõik Reviti formaati, et neid oleks võimalik pilves töödelda.

#### 4.5. Fuzor 2018 Educational 4.0

Fuzor on visualiseerimistarkvara, mis toetab üldlevinud 3D- ja BIM-failiformaate läbi projekteerimistarkvarasse paigaldatava liidese või võimalusega importida failiformaati otse Fuzori keskkonda. Fuzori funktsionaalsus on väga lai, võimaldades muuta keskkonda laetud elemente (liigutada, kopeerida, muuta materjale) ja samal ajal olla ühendatud modelleerimistarkvaras oleva mudeliga, et muudatused kajastuksid koheselt Fuzoris olevas mudelis. Fuzor võimaldab mängida läbi eri stsenaariume, mida võib hoone ehituse käigus ette tulla, nt ehitusmasinate paiknemine ning liikumine ehitusplatsil või tööohutuse tagamine ehitamise ajal (Fuzoril on selle jaoks välja arendatud spetsiaalsed elemendid ja funktsionaalsused). Lisaks on osapooltel võimalik osaleda mudeli vaatlemisel ning selle käigus lisada ka kommentaare. Fuzor võimaldab ühildada faile projekteerimistarkvaradest ilma, et neid oleks vaja teisendada ning sellega säilitatakse mudelisse lisatud BIM-informatsioon. [20]

Plussid:

- + keskkond näeb *Realistic* renderduse sättega väga hea välja;
- + animeeritud ja fotorealistlikud objektid, valgustus, ööpäeva simulatsioon ning ilmastikunähtuste seadistamise võimalus muudavad keskkonna väga realistlikuks ja elavaks;
- + renderdamise kvaliteeti saab muuta vastavalt vajadusele;
- + tarkvara funktsionaalsus on mitmekülgne mudelist info saamiseks;
- + mudelis olevate elementide ümberpaigutamine, kopeerimine ja pinnaomaduste muutmine on lihtne ja mugav.

Miinused:

- lennurežiimis võiks liikumissuuna juhtimine olla prillivaate asemel juhitav puldi abil;
- juhtpulti kasutades võiks teleporteerumis- ja lennurežiimi vahetamine olla lihtsam;
- esines elemente, mille osad pinnad olid läbipaistvad;
- kasutajat tähistava VR-avatari mõõtmed on *roomscalé*'i lahenduse puhul liiga suured, mis tekitasid elementidele (nt laud) lähenedes nende peale hüppamise;
- juhtpultide funktsioonide paigutus võiks olla käepärasem;
- HTC Vive'i juhtpulte kasutades ei ole kasutajal võimalik vaadet pöörata.

## 5. Mudelite üleviimine modelleerimistarkvarast visualiseerimistarkvarasse

Mudelite viimiseks modelleerimistarkvarast visualiseerimistarkvarasse on mitmeid viise, millest paljud osutavad katsetamise käigus problemaatilisteks (mõned näited on esitatud joonisel 19). Näiteks võib mudeli üleviimise käigus elemente kaotsi minna või muudavad need oma asukohta ja seetõttu ei ole lõpptulemus praktikas kasutatav. Samuti esines rohkelt probleeme värvide ja pinnatekstuuride muutumise näol. Uuringu käigus prooviti kõiki tehniliselt võimalikke meetodeid, kuid ainult osa neist viisid vähemalt rahuldava lõpptulemuseni. Tabelis 3 on esitatud kokkuvõtlikult need meetodid, mida uuringu autorid soovitsid kasutada. Seejuures võib siiski tekkida mõningaid probleeme, mida on lähemalt kirjeldatud ja illustreeritud uuringu vastavates peatükkides.

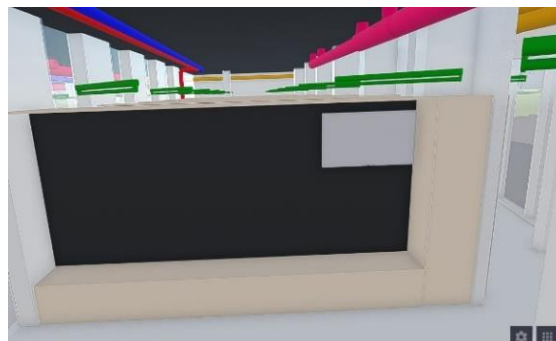
**Tabel 3. Soovituslikud meetodid mudelite üleviimiseks modelleerimistarkvarast visualiseerimistarkvarasse**

Modelleerimis-tarkvara	Mudeli formaat	Faili ümbersalvestamine	Mudeli üleviimise viis	Protsess mudeli visualiseerimis-tarkvarasse viimiseks	Visualiseerimis-tarkvara	
Revit	.rvt	–	liides	liidese kaudu laadimine	IrisVR VRcollab InsiteVR	
	.ifc	–				
ARCHICAD	.pln	salvestada .skp-formaati	SketchUp (Pro)	teeki importimine		
	.ifc		SketchUp Pro			
SketchUp (Pro)	.skp	–				
	.ifc	salvestada .skp-formaati				
Revit	.rvt	–	liides	liidese kaudu laadimine		Enscape
	.ifc	–				
ARCHICAD	.pln	salvestada .skp-formaati	SketchUp (Pro)			
	.ifc					
SketchUp (Pro)	.skp	–	liides			
	.ifc	salvestada .skp-formaati				
Revit	.rvt	–	liides	liidese kaudu laadimine	Revit Live	
	.ifc	–				
ARCHICAD	.pln	salvestada .ifc-formaati	Revit			
	.ifc	–				
SketchUp Pro	.skp	salvestada .ifc-formaati				
	.ifc	–				

Modelleerimis- tarkvara	Mudeli formaat	Faili ümbersalvestamine	Mudeli üleviimise viis	Protsess mudeli visualiseerimis- tarkvarasse viimiseks	Visualiseerimis- tarkvara
Revit	.rvt	–	liides	liidese kaudu laadimine	Fuzor
	.ifc				
ARCHICAD	.pln	–			
	.ifc				
Nawisworks Manage	.nwc	–			
	.ifc				
SketchUp (Pro)	.skp	–	tarkvarasse importimine		
	.ifc	salvestada .skp-formaati			
Revit	.rvt	–	liides	liidese kaudu laadimine	Twinmotion
	.ifc				
ARCHICAD	.pln	–	liides		
	.ifc				
SketchUp (Pro)	.skp	–	tarkvarasse importimine		
	.ifc	salvestada .skp-formaati			
Revit	.rvt	rvt2skp liidese abil salvestada .skp- formaati	tarkvarasse importimine	SYMMETRY alpha	
	.ifc				
ARCHICAD	.pln	salvestada .skp- formaati			SketchUp (Pro)
	.ifc				
SketchUp (Pro)	.skp				
	.ifc	salvestada .skp-formaati			

Märkused:

- 1) .ifc-formaadi puhul tuleb arvestada, et tekstuurid ei kandu üle ja nende kuvamisel visualiseerimistarkvaras võib olla probleeme puudevate, paigast nihkunud ning läbipaistvaks muutunud elementidega.
- 2) Alati on soovitatav eelistada visualiseerimistarkvarasse viimisel modelleerimistarkvara põhiformaadis mudelit.
- 3) SketchUp (Pro) – tähistab nii SketchUpi kui ka SketchUp Pro-d.



**Joonis 19. VRG-visualiseering ebasoovitava protsessi korral – vasakpoolsel joonisel on garderoobikapid puudu ning puud on nihkunud tупpa (parempoolsel joonisel on näidatud tegelik korrektne olukord)**

## Kokkuvõte

Kõikide uuringus katsetatud visualiseerimistarkvarade korral esines probleeme, mis on tingitud nii piiratud funktsionaalsusest, visualiseerimise kvaliteedist kui ka kasutusmugavusest. Suurim sisuline probleem oli seotud .ifc-formaadis mudelitega. Uuringu tegemise vältel oli näha, et tarkvaraarendustega tegeletakse aktiivselt – esines tarkvarasid, kus mõnekuuse vahega tulid uuendused, mis laiendasid tarkvara funktsionaalsust, parandasid visuaalset poolt või töökindlust.

VR-tarkvara valimisel tuleb otsustada, mis on selle kasutamise eesmärk, kellele saab see olema suunatud ning millised on kasutatavad projekteerimistarkvarad. Tarkvaraks, mis renderdab keskkonda väga hea kvaliteediga ja on samas ka väga laia funktsionaalsusega, on Fuzor. Kui tellijat (mudeli kasutajat) huvitab ainult võimalikult realistliku kasutuskogemuse saamine, siis tuleks eelistada Enscape'i või Fuzorit. Kui esmatähtis on visualiseerimistarkvara funktsionaalsus, võib soovitada Fuzorit või IrisVRi. VRcollab on kõikides näitajates tugev keskmik, millel on tehnilistest probleemidest vabanemisel palju potentsiaali. Revit Live küll erilisel silma ei torka, kuid tegemist on tarkvaraga, mis on Reviti kui projekteerimistarkvara kasutajatel tasuta olemas. Kõikide uuringus vaadeldud mudelite visualiseerimisega said hakkama vaid IrisVR ja Enscape.

On oluline märkida, et mitte ükski vaadeldud visualiseerimistarkvara ei ole tervikuna nii halb, et selle kasutamist peaks vältima. Uuringu autorite subjektiivne koondhinnang on esitatud tabelis 4.

**Tabel 4. Uuringus vaadeldud visualiseerimistarkvarade koondhinnang**

Visualiseerimistarkvara	Funktsionaalsus	Visualiseering	Kasutusmugavus
IrisVR	Hea	Rahuldav	Hea
VRcollab	Hea	Hea	Hea
Enscape	Hea	Rahuldav	Hea
Revit Live	Rahuldav	Hea	Rahuldav
Fuzor	Hea	Hea	Hea

Värvide selgitus:

Suurepärase	Hea	Rahuldav
-------------	-----	----------

VR-prillidest olid HTC Vive ja Oculus Rift nii kvaliteedilt kui ka kasutusmugavuselt võrreldavad. HTC Vive'i eeliseks võib lugeda *roomscale*'i ning kasutaja asukoha väga täpset määramist. Oculus Rift oli parem juhtpultide kasutusmugavuse poolest. Acer Headset peakomplekti koostekvaliteet ja kasutusmugavus jääb eespool mainitutele mõnevõrra alla, kuid eeliseks on portatiivsus ning lihtne seadistamine. Praegusel ajal saadaval olevatest prillidest võib soovitada HTC Vive Pro'd, millel on paari aasta vanuste mudelitega võrreldes parem funktsionaalsus ja kvaliteet. Võimalusel tuleks eelistada juhtmevaba ühendust, kuna see on mugavam ja kasutamisel ohutum.

Soovitused ja tähelepanekud.

- .ifc-mudelite kasutamisel visualiseerimiskeskkonnas tuleb arvestada, et võib esineda elementide kadumist, nihkumist või muutumist.
- Mida mahukamaks ja detailsemaks muutub mudel, seda nõudlikum on see arvuti riistvara suhtes. Ka arvutid, mis vastavad tarkvaratootjate soovitatud nõuetele, jäävad kõige mahukamate mudelite korral hätta. Sellises olukorras võib soovitada

nt eemaldada mudelist need elemendid või kihid, mida visualiseerimise jaoks ei vajata.

- Mudeli hea vaatluskogemus sõltub riistvara jõudlusest, mudeli polügoonide ja tekstuuride arvust, peaseadme *trackimise* viisist ning visualiseerimistarkvara võimekusest. Faili andmemahu ei saa hinnangu andmiseks üldjuhul kasutada. Seetõttu on ühtset soovitus raske anda. Edasised soovitused on tehtud, võttes aluseks eeldused, et kasutatakse i7 protsessorit ning vähemalt GTX 1080 graafikakaarti (või võrdväärset). Seejuures tuleb arvestada, et polügoonide hulk, mida näitab BIM-tarkvara, muutub visualiseerimistarkvarasse viimise käigus mudeli ümbertöötlemise protsessi tõttu. Mudeli maksimaalne soovituslik polügoonide arv BIM-tarkvaras on suurepärase vaatluskogemuse jaoks orienteeruvalt 1–2 miljonit ja visualiseerimistarkvaras 3–4 miljonit polügooni. Seejuures tuleb rõhutada, et visualiseerimistarkvaras kasutatava mudeli soovituslik maksimaalne polügoonide arv võib tarkvarast lähtuvalt märgatavalt erineda.
- Kõige töökindlama visualiseerimistulemuse annavad failiformaadid, mida visualiseerimistarkvara arendaja on soovitanud. Seejuures oli kõige kiiremaks ja mugavamaks mudeli projekteerimistarkvarast visualiseerimistarkvarasse üleviimise viisiks liidese kasutamine.
- Paljudel visualiseerimistarkvaradel puudus võimekus mahukaid mudeleid käivitada või oli lõpptulemus kasutuskõlbmatu.
- Mudelite vaatlemisel tuleb erilist tähelepanu pöörata võimalikule enesetunde halvenemisele. Inimesed taluvad VR-keskkonnas olemist erinevalt, kuid peamisteks sümptomiteks on iiveldustunne ja koordinatsioonihäired. Enesetunde halvenemine on seotud VR-keskkonna töötamise sujuvuse ja kvaliteediga.
- Kõik vaadeldud VR-tarkvarad toetasid sellise failiformaadi salvestamist, mille hilisemaks avamiseks ei ole vaja tasulist tarkvara.
- Visualiseerimistarkvarade kvaliteet tervikuna on selline, mis lubab VR-keskkonnas viibides teostada vastuolude kontrolli ja läbi viia mitme kasutajaga koosolekuid.

### Viidatud allikad

1. „2017 Construction Technology Report,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://jbknowledge.com/ct-formsubmitted>. [Kasutatud 03. november, 2018].
2. „Unit shipments of virtual reality (VR) devices worldwide from 2017 to 2018 (in millions), by vendor” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.statista.com/statistics/671403/global-virtual-reality-device-shipments-by-vendor/>. [Kasutatud 03. november, 2018].
3. „IDC: VR and AR headset sales expected to jump over 50% annually, hit 68.9 million in 2022” [Võrgumaterjal]. Available: <https://venturebeat.com/2018/03/19/idc-vr-and-ar-headset-sales-expected-to-jump-over-50-annually-hit-68-9-million-in-2022/>. [Kasutatud 03. november, 2018].
4. „Number of active virtual reality users worldwide from 2014 to 2018 (in millions)” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.statista.com/statistics/426469/active-virtual-reality-users-worldwide/>. [Kasutatud 03. november, 2018].
5. E.-R. Parts, K. Lellep, M. Kiisa, C. Algo, Ehitusinfo mudelite visualiseerimine virtuaalreaalsuses, Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool, 2018, 83 lk.

6. „What is VR?“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.digitaltrends.com/computing/what-is-vr-all-the-basics-of-virtual-reality/>. [Kasutatud 05. november, 2018].
7. „BIM definitsoon“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.gravicon.ee/BIMest.html>. [Kasutatud 05. november, 2018].
8. „Ehitusinformatsiooni juhtimine (BIM)“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.rkas.ee/kasulik-info/bim>. [Kasutatud 05. november, 2018].
9. „A viveport subscription is the best way to experience over 330 vr apps and games“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.vive.com/eu/product/>. [Kasutatud 06. november, 2018].
10. „Oculus Rift“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.oculus.com/rift/#oui-csl-rift-games=mages-tale>. [Kasutatud 06. november, 2018].
11. „Immerse yourself in a new reality“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/windows/windows-mixed-reality>. [Kasutatud 06. november, 2018].
12. „Revit. Built for Building Information Modeling“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.autodesk.com/products/revit/overview>. [Kasutatud 06. november, 2018].
13. „ARCHICAD 22 - BIM inside and out“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.graphisoft.com/archicad/>. [Kasutatud 06. november, 2018].
14. „Think in 3D. Draw in 3D“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sketchup.com/>. [Kasutatud 06. november, 2018].
15. „“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ENU/Revit-GetStarted/files/GUID-61EF2F22-3A1F-4317-B925-1E85F138BE88-htm.html>. [Kasutatud 06. november, 2018].
16. „Revit Sample Project Files“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://irisvr.com/>. [Kasutatud 06. november, 2018].
17. „BIM and VDC Coordination in Virtual Reality“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://vrcollab.com/>. [Kasutatud 06. november, 2018].
18. „Real-time rendering plugin. Live link from bim to virtual walkthrough“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://enscape3d.com/>. [Kasutatud 06. november, 2018].
19. „Revit Live“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.autodesk.com/products/revit-live/overview>. [Kasutatud 06. november, 2018].
20. „Fuzor 2019“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.kalloctech.com/>. [Kasutatud 06. november, 2018].

## Summary

### *Visualization of Building Information Models in Virtual Reality*

The paper describes an applied research of how to use virtual reality headsets in building information modelling. In this case three different headsets were tested – HTC Vive, Oculus Rift and Acer Windows Mixed Reality Headset. The main purpose of the research was to analyse how to import different building information models to headsets without losing any important information. The biggest problem is that there are several different modelling softwares in use (Autodesk Revit, Graphisoft

ARCHICAD, Trimble SketchUp etc.) and most of these softwares need different algorithms to be used in headsets.

For that three building information models were used which had very different parameters. Research team tested five transitional softwares (IrisVR Prospect 2.1.1, VRcollab 0.9.2, Enscape 2.2.3, Autodesk Revit Live 2.1.781 and Fuzor 2018 4.0) to analyse the final results. Tests showed that not all of available methods and softwares were functional enough to use them as professional tools. But some of them showed excellent results. These best solutions were selected and described comprehensively to get the best visualizations.



# EESTI KAITSEVÄE VORMIPÜKSTE SUURUSTE ANALÜÜS 3D-KEHASKANNERIGA MÕÖDETUD TULEMUSTE BAASIL

*Ada Traumann, PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli professor*

*Teele Peets, MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor*

*Margit Kuusk, MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor*

*Jane Kivistik, Tallinna Tehnikakõrgkooli laboriinsener*

## Sissejuhatus

Käesolevas uuringus viidi läbi mees- ja naissoost Eesti kaitsevaelaste antropomeetrilised mõõtmised 3D-kehaskanneriga, et analüüsida militaarrõivaste suurusnumbrite andmebaasi kandjate tegelikest kehamõõtudest lähtuvalt.

Digitaalsed mõõtmismeetodid on kiiremad ja täpsemad kui mõõdulindiga tehtud mõõtmised. Skaneeritud salvestatud kujutis võimaldab täiendavate mõõtmiste teostamist ja andmete analüüsi mistahes ajal. Keha skaneerimise tehnoloogia võimaldab koguda ligikaudu 300 000 andmepunkti inimkehal xyz-koordinaatidega, mida saab kasutada lineaarmõõtude, lõikepindala, pindala ja mahu arvutamiseks. Võrreldes ühemõõtmeliste mõõtmistega on rõivaste sobivuse probleemide kvalitatiivseks ja kvantitatiivseks hindamiseks saadav näitajate kogum palju informatiivsem. [1]

Varasemates uuringutes on erirõivaste disainile ja kandmismugavusele pööratud suurt tähelepanu, kuna inimesed puutuvad tööülesandeid täites igapäevaselt kokku eri tegevustega, nagu põlvitamine, ronimine, kummardamine jne. Seepärast on oluline, et rõivad ei takista kandjat vajalike liigutuste tegemisel. Äärmuslikes tingimustes võib erirõivaste disain olla ka ohutuse tagamisel määravaks teguriks. Näiteks võivad avarad või rippuvate detailidega tööriided jääda masina vahele ning põhjustada tööõnnetusi. [2]

Eelnevates uuringutes tuletõrjajate vormi analüüsimisel on esitatud naiste ja meeste pükste lõikelised probleemid. Selgus, et naistuletõrjajate pükste sammuõmbelse pikkus ja jala pikkus ei olnud naiste kehatüüpidega vastavuses. Üle 10% uuringus osalejatest teatasid, et pükste jalgevahe asus liiga madalal, mis piiras liikumisvabadust tööülesannetes, nagu ronimine, astumine üle takistuste ja põlvitamine. [3]

NATO töörühm HFM-RTG-266 tegeleb projektiga „3D-skaneerimise võimalused rõivaste sobivuse ja logistiliste varude hindamiseks“, mille tulemusena töötatakse välja soovitud sõjaväe lahingurõivaste suuruse ja sobivuse kohta. Rõivast loetakse sobivaks, kui ta tagab kandjale toote korrektse istuvuse, liikumisvabaduse ja mugavustunde. Liikumisvabaduse probleemid võivad ilmneda ka siis, kui rõivas on kandjale kitsas või vastupidi, kui ta on kandjale liiga suur. Rõiva mitesobivus ei tekita mitte ainult ebamugavustunnet, vaid võib otseselt mõjutada kandjate ohutust.

Selle uuringu eesmärgiks on kaitseväge pükste disaini hindamine, lähtudes standardmõõtudest. Nagu eespool selgitatud, siis õige suurusega pükste kandmine on eriolukordades väga oluline. Pükste istuvuse hindamiseks on oluline kõigepealt teada inimese kasvu ja standardmõõtmelid, nagu vööümbermõõt, vööjoone pikkus, sammupikkus, istmiku kõrgus ja küljepikkus [4]. Vastavalt Euroopa standarditele

määratakse rõiva suurustähistus kindlaksmääratud suurustunnuste järgi. Näiteks pükstel kasutatakse erinevat piktogrammi, võrreldes ülerõivaga, kus suurustunnusteks on vööübermööõt ja kasv.

Vastavalt rahvusvahelistele standarditele on antropomeetriliste mõõtmiste meetoodika esitatud ISO 7250 esimeses osas, mida saab kasutada elanikkonna mõõtmiste läbiviimiseks ja tulemuste kasutamiseks rõivaste tehnilises disainis [5]. Pükste peamisteks suurusmõõtudeks on antud kasv, sammuõmbluse pikkus ja vööübermööõt. Istmiku kõrgust ei ole suurusmööõduna eraldi välja toodud, küll aga saab selle arvutada küljepikkuse ja sammupikkuse vahena. Vastavalt varem mainitud dokumendile on pükste standardsed suurusmööõtmed vööübermööõt ja kasv, sammupikkust kasutatakse toodete projekteerimisel, kuid ei kajastata kodeerimisel.

Eesti militaarpükste suurusüsteemi aluseks on standardis STANAG 2335 esitatud militaarsete rõivaste suuruse tähistus [6]. Ideaalne oleks, et minimaalne arv suurusnumbreid vastab enamikule Eesti kaitseväes olevate isikute kehamööõtudele. Aja jooksul on erirõiva tootjad eri riikides välja töötanud oma möõtude tabelid. Jaki ja pükste suurusnumbri määramisel on põhimööõdud vöö- ja rinnaübermööõt. Varasemalt on kolmandaks põhimööõduks olnud inimese kasv. Kuid pärast 3D-kehaskanneriga möõtmist ja tulemuste analüüsi, saab väita, et pükste istuvuse puhul on väga oluline möõõt sammupikkus.

Oluline on pidevalt kontrollida ja uuendada olemasolevat möõdutabelit, sest aegade jooksul elanikkonna kehaehitus muutub. Mida rohkem suudetakse läbi viia eri kehatüüpide möõtmisi, seda rohkem saame koguda andmeid oma riigi elanikkonna möõtude kohta. 3D-skanneri kasutamine võimaldab kehamööõtude süsteemi uuendamist ja korrastamist väga professionaalsel tasemel.

### **Mööõtmise meetoodika**

Uuringus möõdeti 300 isikut 3D-kehaskanneriga, mis võimaldas hinnata digitaalseid möõtmisi, andmete efektiivsust ja praktiliste protseduuride kehtestamist enne skaneerimist, selle ajal ja pärast seda. Kõik uuritavad olid möõtmise ajal seisvas asendis A, kus pea asend vastab Frankfurti horisontaalile, jalalabad on 200 mm kaugusel üksteisest, käed on tõstetud 20° nurga all külgedelt [7]. 3D-skaneerimine võimaldab figuurilt ligi 150 parameetri möõtmist 10 sekundi jooksul. Vigade minimeerimiseks on oluline, et möõtmisi viib läbi vastava ala spetsialist, kes tunneb antropomeetria ja rõivaste tehnilist disaini.

Mööõtmistulemused imporditi Human Solutions XFit programmi ning analüüsiti statistiliselt suurusnumbrile vastavate möõtude järgi, kasutades NATO lahingurõivaste standardit STANAG 2335. Põhimööõdud suurusnumbri määramiseks on sammuõmbluse pikkus, vööübermööõt ja kasv (tabel 1). STANAG 2335 järgi on sammuõmbluse pikkuse intervall eri suuruste vahel 5 cm. Siinkohal on oluline märkida, et NATO riikidel ei ole ühest suurusnumbrite süsteemi [6]. Eesti kasutab sama möõdusüsteemi, mida Suurbritannia, kus möõdutabelis on esitatud ka rinnaübermööõt.

**Tabel 1. Eesti lahingurõivaste baassuuruse mõõdud ja tähistus**

Riik	Sammuõmblus mõõdutabelis, cm	Sammuõmblus tootmises, cm	Vöö-ümbermõõt, cm	Rinna-ümbermõõt, cm	Kasv, cm	Baassuuruse tähistus
Eesti (EST)	80	83	88	104	180	80/88/104
Mõõduvahemik	77,5–82,5	80,5–85,5	86–90	102–106	175–185	
Intervall	5	5	4	4	10	–

\*STANAG 2335 [6]

3D-kehaskanneriga (Vitus Smart XXL) on võimalik visualiseerida 3D-skaneeringuid, kasutades kaheksat andurit, optilist triangulatsiooniprotsessi ja spetsiaalset tarkvara Anthroscan 2016 (3.4.0). Skanner võimaldab mõõta ligi 150 kehaparameetrit täpsusega 1 mm 10–12 sekundi jooksul. Andmeid saab eksportida BSF-, BTR-, OBJ-, ASCII-, DXF-, STL- (ASCII), STL- (Binary), JPG-, PNG- või AVI-formaadis. Joonisel 1 on esitatud üks analüüsi võimalus valitud kehatüüpide (n = 6) eestvaates nägemiseks ja parema jala sammupikkuse võrdlemiseks vööümbermõõduga.



Measure	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Waistband	79,3	83,2	84,5	85,5	87,2	90,1
Inseam right	85,6	85	84,9	86	84,9	83,9

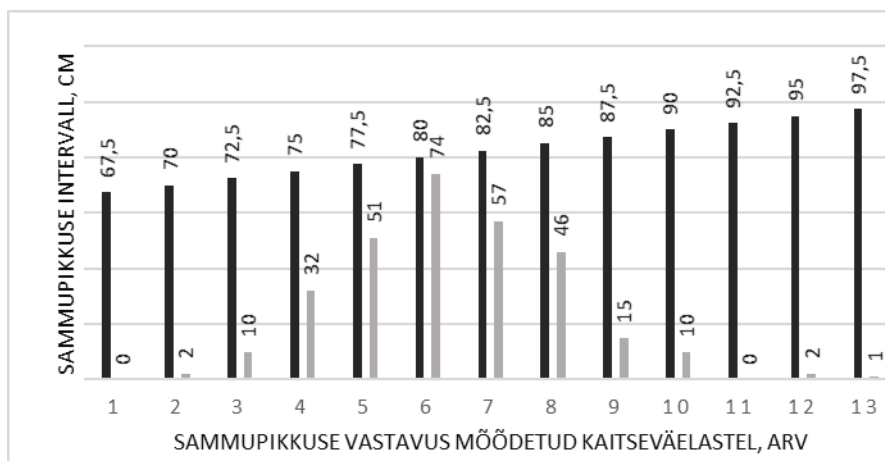
**Joonis 1. Sarnaste kehatüüpide võrdlemine sammupikkuse järgi**

Skaneeritava keha õige asend kogu mõõtmisprotsessi vältel on aluseks usaldusväärsete andmete saamisele, mida saab kasutada antropomeetriselises andmebaasis. Samuti on oluline, et objekt hoiab asendit kogu skaneerimisprotsessi jooksul. Mõõtmise ajal tuleb hingata rahulikult, õlad peavad olema sirged ja lihased ei tohi olla pinges. [7]

Selle tehnoloogia abil saadud mõõtmised on täpsemad ja andmed reprodutseeritavad, erinevalt traditsioonilise füüsilise mõõtmise käigus saadud tulemustest [8]. Kui isiku mõõtmistulemused asuvad vastavates andmebaasides, saab mõõtmisandmeid igal ajal uuendada ja vajadusel muuta. Logistilistel eesmärkidel annavad isikute pidevad kehamõõtmised täpsema ülevaate vormirõivaste suurusnumbrite vajadusest, vähendades seeläbi kulusid ladudes.

## Tulemused ja arutelu

Statistilise analüüsi aluseks oli suurusmõõtude tabelis olevate mõõtude võrdlus uuritavate isikute tegelike mõõtmega. Nagu eespool kirjeldatud, siis pükste suuruse hindamiseks on kõige täpsem sammupikkuse mõõt. Mõõdetud Eesti kaitseväelastel (n = 300) oli see mõõt keskmiselt 81,0 cm. Andmeid võrreldi STANAG 2335 suurustabeliga, kus sammupikkuse intervall on 5,0 cm. Joonisel 2 on näha mõõdetud sõjaväelaste sammupikkuse vastavust STANAG 2335 suurustabelis esitatud sammupikkuse vahemikega.



### Joonis 2. Sammupikkuse vastavus suurusdiagrammiga mõõdetud kaitseväelastel

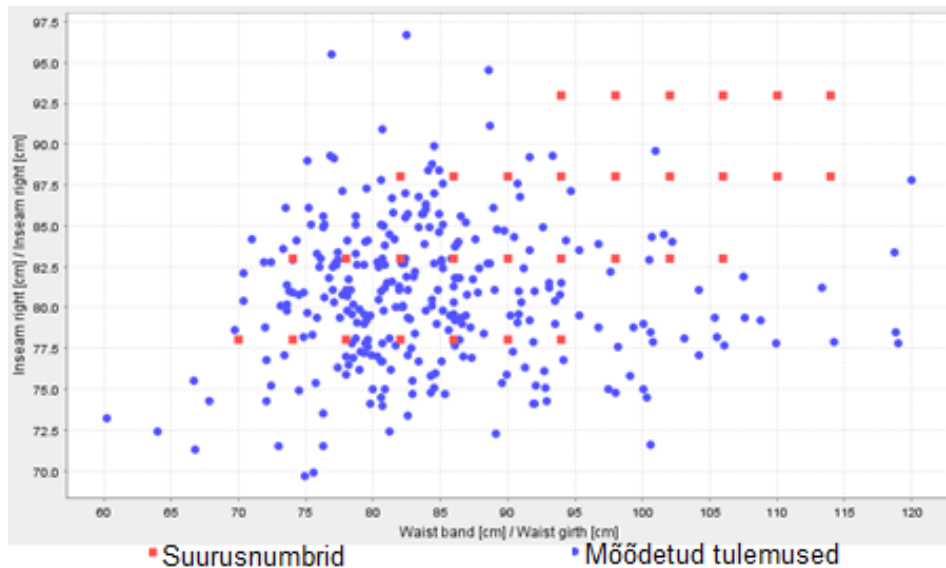
Jooniselt 2 on näha, et ligikaudu 25% (n = 74) kõigist mõõdetavatest kehadest vastab baassuuruse sammupikkusele 80 cm, vt tabelit 1. STANAG 2335 suurustabeli järgi on sammupikkused järgmised: 70 cm, 75 cm, 80 cm, 85 cm ja 90 cm. Võttes arvesse, et tootmises arvestatakse baassuuruse sammupikkuseks 80,5–85,5 cm, siis sellele mõõduvahemikule vastab 59% (n = 177) kõigist mõõdetud kaitseväelastest. Oleks ideaalne, kui võimalikult väike suurusnumbrite arv kaitseväe rõivatooteid vastaks enamikule mõõdetud isikutest kaitseväes. Pikaajalise praktika ja kogemuste baasil on rõivatootjad välja töötanud suurustabeli, mis võetakse tootmises aluseks. Näiteks vormipükse toodetakse 31 suurusnumbris, mis tabelis 2 on näidatud helehallina.

**Tabel 2. Kaitseväe vormipükste suurusnumbrite tabel**

Sammu-	Vööübermõõt/rinnaübermõõt											
pikkus*	68/	72/	76/	80/	84/	<b>88/</b>	92/	96/	100/	104/	108/	112/
	84	88	92	96	100	<b>104</b>	108	112	116	120	124	128
70	73	73	73	73	73	73	73	73	73	73	73	73
75	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78
<b>80</b>	83	83	83	83	83	<b>83</b>	83	83	83	83	83	83
85	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88
90	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93

\*STANAG 2335 [6]

Joonisel 3 on näha Anthroscan tarkvaraga (3.4.0) analüüsitud tulemust, kus mõõdetavate kaitsevaelaste põhimõõte, nagu sammupikkus ja vööümberrõõ, on võrreldud tootmises kasutatavate suurusnumbritega. Sinised punktid näitavad mõõdetud andmeid ja punased punktid tähistavad 31 kasutusel olevat suurusnumbrit. Analüüsist lähtudes võib suurstabelisse teha järgmised muudatused: suurused 78/96/112 ja 78/100/116 on soovitatav lisada tootmises kasutatavasse suurstabelisse (vt tabelist 2, tumehallid ruudud). Viis järgnevat suurst: 88/108/124, 88/112/128, 93/104/120, 93/108/124 ja 93/112/128 on mõttekas eemaldada tootmises kasutatavast suurstabelist (vt tabelist 2, diagonaaliga ruudud).



**Joonis 3. Mõõdetud kaitsevaelaste andmed, võrreldes tootmises kasutatavate suurusnumbritega**

### Järeldused ja kokkuvõte

Käesoleva uuringu eesmärgiks oli analüüsida 3D-skaneerimise teel saadud mõõtmistulemusi vastavalt rahvusvaheliselt ühilduvatele antropomeetrilistele andmebaasidele ja NATO riikide suurstabelitele. Uuringu käigus uuriti põhiparameetreid, nagu sammupikkus ja vööümberrõõ. Pükste kandjamugavuse määrab suurel määral sammupikkus, mis tagab kandja liikuvuse kõikides olukordades, eriti seoses sõjalise tegevusega. Mõõdetud kaitsevaelaste parameetreid võrreldi NATO riikide suurstabeli ja mõõtetudega. Kui hindamise aluseks võtta STANAG 2335 esitatud sammupikkuse vahemik 70–90 cm, on tootmises kasutusel olev suurstabel igati usaldusväärne, sest 98% mõõdetud isikute sammupikkus jäi samasse vahemikku. Tuleb aga märkida, et tootmises arvestatakse sammupikkus pikemaks, kui see STANAG 2335 järgselt peaks olema (vt tabelit 1).

Ideaalis tuleks mõõta kõiki kaitsevaelasi, ja eelistatuna 3D-skanneriga, mis on kiirem ja täpsem. Mõõdetud andmete põhjal saab toota kaitsevaelastele sobiva suurusega rõivad ja määrata logistilised vajadused, st milliseid suurusnumbreid on tegelikult vajalik laovarudesse toota.

Selle uuringu tulemustest saame järeldada, et 31 suuruse asemel piisab 28 suurusest. Siiski on vaja lisada kaks suurust, mida praegu ei toodeta: 78/96/112 ja 78/100/116.

300 Eesti kaitseväelase mõõtmiste tulemusena saame järeldada, et need viis suurust ei ole vajalikud: 88/108/124, 88/112/128, 93/104/120, 93/108/124 ja 93/112/128. Lõpliku järelduse tegemiseks on vajalik suurema hulga kaitseväelaste mõõtmine. Nagu eespool öeldud, on soovitatav mõõta kõiki ajateenijaid ja tegevväelasi Eesti kaitseväes.

## **Tunnustus**

Uurimistöö on läbi viidud tänu Euroopa Liidu regionaalarenduse programmi INTERREG BSR rahastusele projekti SWW (#R006) raames. Autorid on tänulikud NATO RTO HFM-266 töögrupile, mis arendab oma tegevusega sõjaväelise rõivastuse disaini ja kandmismugavust.

## **Viidatud allikad**

1. Loker, S., Ashdown, S., Schoenfelder, K. (2005), Size-specific Analysis of Body Scan Data to Improve Apparel Fit, *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, Vol. 4, Issue 4.
2. Gupta, D. (2014), Anthropometry and the design and production of apparel: an overview, *Anthropometry, Apparel Sizing and Design*, pp. 34–66.
3. Park, H., Hahn, K.H.Y, (2014), Perception of firefighters' turnout ensemble and level of satisfaction by body movement, *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 7:2, pp. 85–95.
4. EN 13402-1:2001. Size designation of clothes – Part 1: Terms, definitions and body measurement procedure (ISO 3635:1981 modified).
5. EVS-EN ISO 7250-1:2010. Basic human body measurements for technological design – Part 1: Body measurement definitions and landmarks.
6. STANAG 2335. Interchangeability combat clothing sizes Edition 3, NATO, Brussels, 2012.
7. EVS-EN ISO 20685:2010. 3-D scanning methodologies for internationally compatible anthropometric databases, European Committee for Standardization, 2010.
8. Apeageyi, P. R. (2010). Application of 3D body scanning technology to human measurement for clothing Fit, *International Journal of Digital Content Technology and its Applications* Volume 4, Number 7.

## **Summary**

*The Analysis of Estonian Defence Forces Uniform Sizes Based on Measurements Data of 3D Bodyscanner*

The aim of this paper was to characterise and analyse several measurements of soldiers to provide a reference for military combat clothing, particularly trousers design. 3D scanning methodology was used according to internationally compatible anthropometric databases. More than 300 young soldiers were examined in this study using Human Solution 3D scanner. Fit and comfort of trousers are mainly related to the following dimensions: waist girth, buttock girth, leg inseam, anthropometric waist and waistband. Present parameters play a significant role in the

quality of trousers, to ensure the wearer`s mobility in all situations, particularly concerning the activities of soldiers. Correlating measurements and calculations for accuracy from standard are made to offer recommendations for the manufacturer.

# Koordinaatmõõtemasinate rakendamine tööstuses

*Peter Šverns, Tallinna Tehnikakõrgkooli assistent*

## Sissejuhatus

Maailmamajanduse globaliseerumise tagajärjel on tekkinud olukord, kus üle maailma asuvad ettevõtted konkureerivad kõik ühisel suurel rahvusvahelisel turul. Masinaehituse ja tehnika valdkonna ettevõtete jaoks tähendab see ennekõike seda, et neilt nõutakse järjest suuremat efektiivsust olukorras, kus valmistatavate toodete täpsusnõuded muutuvad üha rangemaks. Konkurentsipüsimine eeldab moodsate tootmisseadmete ning -tarkvara kasutamist kõikides tootmise etappides ja vastavate süsteemide integreerimist. Kaasaegse tootmise viimases etapis, kus kontrollitakse valmistatud toodete vastavust geomeetrilistele nõutele, omavad kandvat rolli koordinaatmõõtemasinate (ingl *coordinate measurement machine*, lühend CMM). Eesti tööstuses, kus küll CNC-töötluskeskused ja tootmisrobotid on muutunud tavapäraseks, on CMMid kasutusel vähestes ettevõtetes ja seda hoolimata faktist, et esimesed CMMid jõudsid läänes turule juba viiekümnendatel.

Käesolevas artiklis antakse ülevaade sellest, milliseid tehnoloogilisi võimalusi kaasaegsed koordinaatmõõtemasinate pakuvad ja kuidas on neid võimalik rakendada tootmisprotsessis. Lisaks annab artikkel lühiülevaate valdkonna koolituse hetkeseisust ning tulevikuplaanidest Tallinna Tehnikakõrgkoolis.



**Sele 1. Arvjuhtimisega koordinaatmõõtemasin [2]**

## Koordinaatmõõtemasinate

Koordinaatmõõtemasinate (CMM) on seadmed (sele 1), millega on võimalik mõõta sisuliselt kõiki geomeetrilisi elemente (punktid, sirged, ringid, tasapinnad, silindrid jne), mis moodustavad tervikliku detaili. Välimuselt sarnanevad CMMid vertikaalsete freespinkidega, kus tööriista asemel on mõõtepea (sele 2). Mõõtepea küljes on mõõtesond ning selle külge on kinnitatud mõõteotsak. Mõõtepead saab



reeglina liigutada vähemalt kolmel teljel (X, Y, Z). Telgede võimalikult sujuva ja stabiilse liikumise saavutamiseks on kasutusel õhklaagrid; tüüpiline õhupilu laagri ja juhtpinna vahel on 6...8 µm (tavamõõtmetega CMMid) [1, p. 317]. Mõõtemasinate töölauad peavad olema kõrgsiledad ning tasapinnalised, et tagada mõõdetava detaili võimalikult stabiilne ning korratav paigaldus. Töölauad valmistatakse mustast graniidist, mis on kõva, struktuurselt stabiilne ning mittemagneetuv.

Käitamise põhjal jagunevad CMMid kahte suurde gruppi: manuaalsed, mille puhul mõõtepead liigutab operaator käte abil, ning DCC (ingl *direct computer control*) ehk arvjuhtimisega CMMid. Tuues jällegi paralleeli freespinkidega, siis DCC CMM on analoogne CNC-freespingiga, mida juhib CAMis (ingl *computer aided machining*) koostatud programm. Kui üldjuhul on CMMi telgede tööulatused suurusjärgus ca 400...1000 mm, siis suurimate seadmete puhul võivad need olla 20 000 mm või enam (suuregabariidiliste toodete mõõtmiseks). Lisaks sellele, et CMM võimaldab mõõta äärmiselt keeruka geomeetriaga detaile, iseloomustab seda ka suur mõõtetäpsus. Mõõtemasinate pikkuse mõõtmise täpsuse kvantitatiivseks hindamiseks kasutatakse põhiliselt parameetrit  $E_{0, MPE}$  (ingl *maximum permissible error*) [3], mis antakse kujul  $\pm(A + BL)$ . Nii võib tootja CMMi täpsuse deklaratsioon olla nt:

$$E_{0, MPE} = \pm(3,8 + 3L/1000)\mu\text{m} ,$$

kus L on mõõdetavate punktide vaheline kaugus (mõõtetulemus). Mõõtes antud CMMiga võlli pikkuse (kahe punkti kaugus) ja saades tulemuseks näiteks 200,023 mm, tuleb antud mõõtetulemuse mõõtemääramatuseks:

$$E_{0, MPE} = \pm(3,8 + 3 * 200,023/1000) = \pm 4,4 \mu\text{m}.$$

Valemist on näha, et mida suurem on mõõdetavate punktide vaheline kaugus, seda suuremaks muutub paramatult ka mõõtemääramatus. Loomulikult tuleb antud parameetri puhul pidada silmas asjaolu, et väärtus kehtib juhul, kui mõõtmine toimub nominaalsel temperatuuril 20 °C, nagu näeb ette GPSi standard ISO 1.

Detaili mõne elemendi mõõtmisel viiakse mõõtesondi otsak kontakti mõõdetava elemendi pinnaga, mille peale masin salvestab antud punkti asukoha kolmemõõtmelises ruumis. Kõige täpsema mõõtetulemuse saamiseks peab mõõteotsaku telg olema mõõdetava pinnaga võimalikult paralleelne ning otsak liikuma pinnaga kontakti pinnanormaali sihis (pinnaga võimalikult risti oleval trajektoorigil). Seetõttu on kallimatel seadmetel lisaks peatelgedele (X, Y, Z) kasutusel mõõtepea motoriseeritud indekseerimine kahes teljes (nt 7,5° sammuga). See tähendab, et mõõteotsakut on võimalik keerata optimaalsesse asendisse mõõdetava detaili pinna suhtes. Kõige keerukamatel seadmetel (nn viieteljelised CMMid) toimub mõõtepea lisatelgede liikumine sujuvalt, ehk siis sisuliselt on mõõteotsakul võimalik kasutada lõpmatu arv positsioone.

Mõõtesondid võivad erineda nii mõõtmete kui ka tööpõhimõtte poolest. Seni on olnud kõige laialdasemalt kasutusel füüsilised nn *touch-trigger* sondid, mis saavad info masina kontrollerisse peale seda, kui sondi mõõteotsak on läinud kontakti detaili pinnaga. Seda tüüpi sondide suurimaks puuduseks on see, et tulenevalt ajalistest piirangutest võetakse mõõdetavatelt pindadelt reeglina liiga väike arv punkte, mis ei taga tegelikust geomeetriast piisavat ülevaadet. Parema katvuse saamiseks, eriti just keeruliste kujupindade täpsel mõõtmisel, on välja töötatud nn analoogsondid.

Analoogsondid liiguvad üle pinna, olles pinnaga pidevas kontaktis ja genereerides seeläbi tihedad punktipilved (*ca* mõni tuhat punkti sekundis). Sondi nimetus tuleneb sellest, et mõõteotsaku ja detaili pinna puutel tekitatakse analoogsignaali, mis on võrdeline mõõteotsaku ärapainde nurgaga (lihtsamate *touch-trigger*-sondide puhul on kasutusel digitaalne signaal – kas puude toimus või mitte).



**Sele 2. CMMi mõõtepead [4]**

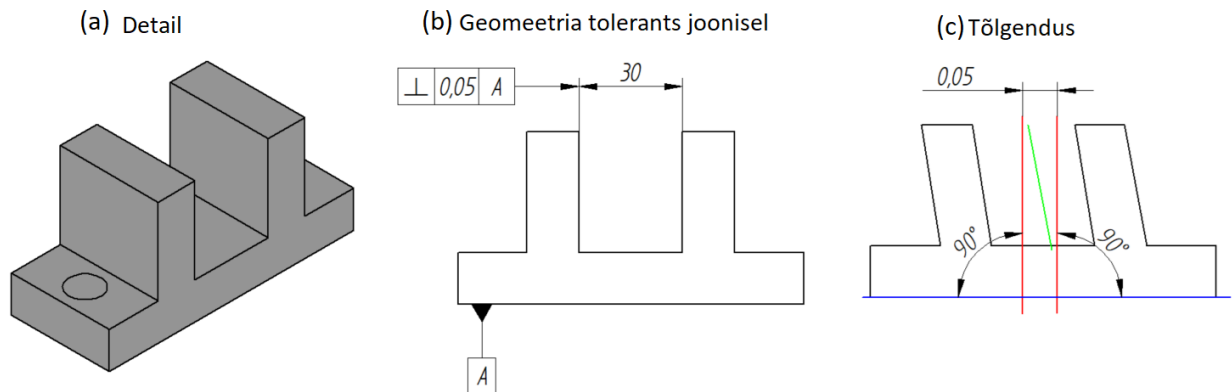
Viimasel kümnendil on aina suuremal määral võetud kasutusse nn puutevabad sondid, eriti just lasersondid. Lihtsustatult võttes saadab lasersond välja laserimplusi ja mõõdab ära aja, mis kulub selle tagasipeegeldumiseks detaili pinnalt, võimaldades nii välja arvutada läbitud teekonna pikkuse. Lasersondide suureks eeliseks on asjaolu, et laserskaneerimisega saab ära mõõta detaili kogu pinna ja seejuures teha seda väga kiiresti. Teisalt on lasersondi kasutamine problemaatiline siis, kui mõõdetav pind juhtub olema läikiv, sest läikivad pinnad võivad tekitada optilisi hälbeid. Ühe lahendusena kasutatakse siin pindade katmist spetsiaalsete pulbrite või spreidega, mis muudavad pinna matiks, kuid samal ajal moodustavad sellele ka kihi, mille paksust tuleb arvesse võtta, ja seega suureneb tulemuse mõõtemääramatus. Lisaks räägib füüsiliste sondide kasuks praegu veel ka nende ligi suurusjärgu võrra suurem täpsus (sama tüüpi CMMil kasutades). Parima tulemuse saamiseks kasutatakse väga vastutusrikaste detailide puhul füüsilist ja lasersondi paralleelselt, seejuures mõõdetakse füüsilise sondiga detaili kõige kriitilisemad ja kõige väiksema tolerantsiga elemendid.

## **Koordinaatmõõtemasina eelised**

### *Keeruliste nõuete kontrollimine*

Eesti ettevõtted, kes allhanke korras detaile valmistavad, puutuvad aina rohkem kokku joonistega, millel on kasutusel geomeetria tolerantsid (kirjeldatud standardis ISO 1101) – tolerantsid, millega ohjatakse elementide (nt pindade, telgede, avade jne) kuju ja asendi hälbeid. Geomeetriliste tolerantsidega tolereeritakse tihtipeale detaili elemente, mis on mõttelised, ehk teisisõnu neid füüsilisel kujul ei eksisteeri (teljed, sümmeetriatasapinnad). Antud asjaolu muudab vastavate nõuete kontrollimise tavaliste käsimõõteriistadega väga keeruliseks (või kohati isegi võimatuks). Näitena on seel 3 näidatud detail (a), mille tööjoonisel (b) olev geomeetria tolerants nõuab, et detaili 30 mm laiuse soone sümmeetriatasapinna ristseisu hälve alumise baaspinna suhtes ei tohi ületada 0,05 mm. Ehk teisisõnu 30 mm laiuse soone sümmeetriatasapind (roheline) peab ära mahtuma kahe

mõttelise ideaalselt paralleelse tasapinna vahele (punased), mis on omakorda ideaalse täisnurga all baaspinna (sinine) suhtes (c). Kuna soone sümmeetriatasapind on mõtteline tasapind, mis on ekvidistantne soone siseseintest, siis selle asendi mõõtmine baaspinna suhtes on komplitseeritud. Koordinaatmõõtemasinas on antud nõude kontrollimine aga suhteliselt lihtne. Esimese sammuna mõõdetakse üles alumine baaspind, seejärel mõlemad soone siseseinad, kokku kolm tasapinda. Viimase kahe tasapinna asendi alusel konstrueerib CMMi tarkvara soone sümmeetriatasapinna ja seejärel näitab ära selle asendi baaspinna suhtes.



**Sele 3. Geomeetria tolerantsi ristseis**

Näide on üks lihtsamatest juhtudest, kuid annab edasi CMMi selge eelise klassikaliste mõõtemetodite ees. Praktikas võivad joonisel antud nõuded olla tundvalt keerukamad ja komplekssemad ning seega on CMMi kasutamine usaldusväärse tulemuse saamiseks kohati sisuliselt möödapääsmatu.

#### *Mõõtmisprotsessi automatiseerimine*

Arvjuhtimisega koordinaatmõõtemasinaid (DCC CMM) võimaldavad mõõteprotsessi automatiseerimist. Automaatse mõõteprotsessi loomise eelduseks on mõõterakis, mis tagab detaili korratava paigalduse ning vastav mõõteprogramm. Sõltuvalt mõõdetava detaili ja selle täpsusenõuete keerukusest peab rakise ja programmi koostama kas CMMi insener või CMMi tehnik. Kui rakis ja mõõteprogramm on olemas, saab mõõtmist läbi viia juba ka minimaalse ettevalmistusega kvaliteeditehnik. Tema ülesandeks jääb vaid detailide vahetamine, programmi käivitamine ning tulemuste protokollimine.

Veel suurema automatiseerimistaseme saavutamiseks on võimalik kasutada robotit. Näitena võib esitada tootmismooduli (sele 4), mis koosneb CNC-treipingist, CMMist ning robotist. Robot võtab töödeldud detaili CNC-treipingi padrunist ja asetab selle CMMi töölauale olevale rakisele. Kui detaili mõõtmisel CMM tuvastab kõrvalekaldeid lubatud tolerantsidest, saadab see info otse treipinki, kus tehakse vastavad korrektuurid tööriistade *offset*-väärtustes, või annab häire (nt treiteriku purunemise tõttu on detaili mingi mõõde suuresti tolerantsist väljas ja treiterik tuleb vahetada). Selliselt on võimalik tootmismoodulit hoida töös sisuliselt tehniku sekkumiseta. Tehniku roll on olla protsessi ülevaataja ja ta jõuab nii hallata mitut tootmismoodulit korraga.



**Sele 4. Tootismoodulisse integreeritud CMM [5]**

Turul on olemas ka spetsiaalsed CMMid, mis on mõeldud töötama tootmisliini osana. Need on oma ehituselt kompaktsemad kui tava CMMid ning asuvad kas ühes või mitmes tootmisliini kriitilisemas positsioonis. Ei ole harvad olukorrad, kus terved partiid detaile arvatakse praaki, kuna mittevastavused avastatakse liiga hilja. Ka siin võib toomisprotsessi integreeritud mõõtemasin anda märgatava efekti, kuna mittevastavused tuvastatakse jooksvalt ja sellele reageeritakse kohe. Ettevõtte jaoks tähendab see raha ja aja kokkuhoidu ning ettevõtte klientidele sisestab see kindlustunnet, et toodete kvaliteedikontroll on järjepidev ja usaldusväärne.

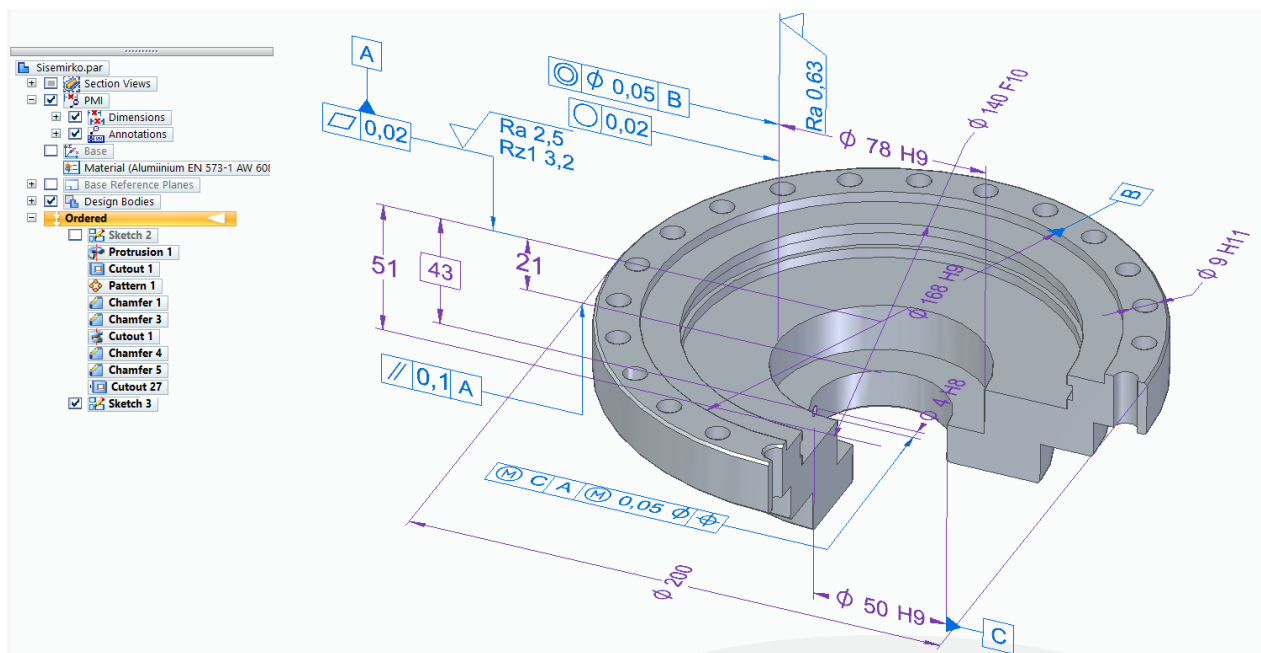
#### *Mõõtetulemuste korduvus ja korratavus*

DCC CMMi kolmandaks eeliseks tuleb lugeda asjaolu, et mõõtetulemused on korduvad ja korratavad. Lihtsustatult tähendab see, et mõõtes ühte ja sama detaili mitmel korral, saadakse väga sarnased tulemused ning seda ka siis, kui sama detaili mõõdavad erinevad tehnikud. Kuigi see võib tunduda esmapilgul triviaalse ja loomulikuna, siis mõõtetehnika seisukohalt on korduvus ja korratavus usaldusväärse mõõteprotsessi aluseks. Madal korratavus võib ilmned a iseäranis just käsimõõteriistade puhul, kus iga tehnik käsitseb mõõteriista pisut erinevalt ja seega saadakse sama detaili mõõtmisel küllaltki erinevad tulemused. Paratamatult tekib küsimus – milline tulemus on õige? Loomulikult võib ka CMMi puhul tekkida korduvuse ja korratavusega probleeme, kui kasutatakse valesid töövõtteid (nt mõõteotsaku kalibreerimata jätmine või valesti kalibreerimine), kuid see risk on pädevate tehnikute puhul pigem madal.

#### *MBE*

Seoses tootmisprotsessi automatiseerimise ja digitaliseerimisega on tekkinud uus tootmisparadigma, mida tähistatakse ingliskeelse akronüümiga MBE – *model based engineering* (või MBD – *model based design*). Sisuliselt tähendab see tootmisprotsessi kujundamist selliseks, et kogu toote (nt üksikdetaili) valmistamise info liigub ühest tööfaasist teise 3D-mudeli ja sellega kaasas oleva info kujul. Puudub vajadus paberjooniste ja dokumentatsiooni tekitamiseks ning haldamiseks, mis omakorda aitab muuta tootmisprotsessi sujuvamaks, efektiivsemaks ning seeläbi

kiiremaks. Detaili 3D-mudel is on olemas ka kogu detaili valmistamistolerantse puudutav informatsioon (sele 4). Seda arengut silmas pidades on kasutatumates CMM-tarkvarades arendamisel (ja osaliselt juba kasutuses) moodulid, mis automaatselt konverteerivad detaili 3D-mudel is olevad täpsusnõuded mõõteprogrammiks. Kuigi üldjuhul eeldavad ka sellised automaatselt koostatud programmid teatud määral inimese sekkumist ja käsitööd, muudab see sellegipoolest programmi koostamise kordades kiiremaks. Seejuures väheneb võimalus, et tehnik on detaili täpsusnõudeid valesti mõistnud ja koostanud puuduliku või väär a mõõteprogrammi. Praegu on MBE kasutuselevõtt tööstuses alles algusfaasis, peamise pidurdava tegurina puudub ühtne kõikide tarkvara tootjate aktsepteeritav failiformaat, mis suudaks lisaks 3D-mudelile ka kogu toote valmistamise infot edasi kanda.



**Sele 4. Tolerantsid 3D-mudel is (SolidEdge ST10)**

## **CMMide kasutuselevõttu piiravad tegurid**

### *Hind*

Peamine tegur, mis pärsib mõõtemasinate laialdast soetamist ja kasutamist (Eesti tööstuses, on esialgne investeringu suurus. Jättes konkreetsed numbrid kõrvale, saab öelda, et maksumuselt on CMMid võrreldavad CNC-tööstluskeskustega. Riistvarale (mõõtemasin, mõõtepea ja -sond) lisandub tarkvara, mis võib moodustada ca veerandi kuni kolmandiku koguhinnast. Kuigi turul liigub ka mõningaid vabavaralisi programme, on kõik levinumad programmid tasulised.

### *Kasutamise keerukus*

Kui võrrelda mõõtemasinaid CNC-tööstluskeskustega, siis kasutamise seisukohalt on viimased mõnevõrra lihtsamad, seda eriti õppimisprotsessi algetapis. Üheks põhjuseks on siin asjaolu, et CMM-programmi koostamine nõuab üsna häid teoreetilisi teadmisi mõõtmise ja tolereerimise valdkonnas. Et mõõtemasinaga mõõta, peab esmalt aru saama, mida joonisel nõutakse ja mis on nõude praktiline väljendus. Ettevõtetal tekib siinkohal kohe probleem – kuigi olemas võib olla reaalne vajadus

CMMi järele ja soetamiseks rahaline ressurss, siis on vaja leida inimene (või inimesed), kes suudaks seadet kasutada.

### *Ettevõtte profiil*

Sarnaselt kõikide teiste automatiseerimislahendustega (CNC-töötluskeskused, robotid jne) ei ole koordinaatmõõtemasina kasutamine tingimata mõttekas sellistes ettevõtetes, kus toodetakse kas üksikuid detaile või väikeseeriaid ning toodete sortiment tihti muutub. Sellises olukorras kulub ebaproportsionaalselt palju aega rakiste ja programmide koostamisele, kuigi mõõta on vaja ainult mõni üksik detail. Ühe suure erandina saab välja tuua valuvorme tootvad ettevõtted, kus küll iga vorm võib olla erinev, kuid samas on vaja mõõta vormide puhul tavapäraseid keerukaid kujupindu. Sellisel juhul võib CMM olla ainukeseks võimaluseks jälgitava mõõtmistulemuse saamiseks.

### **CMMide koolitus**

Praegu ei ole eraldi CMMide kasutamise ja programmeerimise kursust ühegi Eesti haridusasutuse õppekavas ja see on tinginud olukorra, kus CMMi omavad ettevõtted peavad koolitama oma tehnikuid majasiseselt. Tulenevalt Eesti ettevõtete arengust on selge, et CMMide kasutamine ajapikku suureneb ja sellega koos ka koolituse vajadus.

Tallinna Tehnikakõrgkooli mõõtetehnika laboris on kaks koordinaatmõõtemasinat (sele 5), üks manuaalne ja teine arvjuhtimisega. Õppetöös on kasutusel manuaalne CMM, kuid seni minimaalsel määral. Põhjuseid on siin peamiselt kaks – juba eelnevalt mainitud seadmete suhteline keerukus ning hea teoreetilise baasi vajadus. Küll on kõrgkooli tehnikainstituudis võetud sihiks CMMi osakaalu suurendamine õppetöös. Eesmärgiks on eraldi kursuse loomine, mis keskenduks ainult CMMiga mõõtmisele ja programmide loomisele. Selle eelduseks on CMMi tarkvara õppekohtade hankimine ning töö selles suunas käib. Teoreetilise põhja tugevdamiseks on tolereerimise ja mõõtetehnika kursuses järk-järgult suurendatud geomeetria tolerantside osatähtsust.

CMMi simulatsioonitarkvaraks on kõrgkool praegu planeerinud Hexagoni pakutava PC-DMISE. PC-DMISE tugevusteks on kasutajasõbralikkus ning suur kasutajate arv. Paljude kasutajate hinnangul on PC-DMIS üks lihtsamini omandatavaid CMMi programme ja kahtlemata on see väga oluline just üliõpilaste koolituse seisukohalt. Suure (ülemaailmse) kasutajate arvu tõestuseks on laia kasutajate baasiga interneti foorum. Foorumist leiab asjatundlikku infot enamiku CMMe ja PC-DMISi puudutavate küsimuste osas, sest foorumi aktiivseteks liikmeteks on teiste seas ka metroloogia valdkonna tippspetsialistid.

CMMide toomine õppekavasse on oluline ka kõrgkooli tehnikainstituudi õppekavade terviklikkuse jaoks. Tänapäevane masinaehituslik tootmistsükkel koosneb kolmest suurest etapist – tootearendus (CAD, CAE), tootmine (CAM) ja kvaliteedikontroll. Hetkel on kõrgkoolis kaks esimest selgelt esindatud, kuid just viimane jäänud tagaplaanile. CMMide toomine õppekavasse kahtlemata tõstaks oluliselt ka selle viimase ja väga olulise etapi esindatust ja annaks seega üliõpilastele terviklikuma ülevaate tootmisprotsessist. Soodustavaks teguriks CMMidega seonduva õpetamiseks TTKs on asjaolu, et peamiselt masinaehituse üliõpilased puutuvad õppetöös laialdaselt kokku CAD- ja CAM-programmidega ning peavad ka praktiliselt töötama CNC-seadmetega. CAD-, CAM- ja CMM-tarkvarad omavad mitmeid ühiseid jooni

(nt kasutavad kõik Descartes'i koordinaatsüsteemi, analoogseid failitüüpe jne) ja olles omandanud juba ühe programmi, on teiste omandamine märgatavalt lihtsam. Juba eespool kirjeldatud sarnasused CNC-töötluskeskuste ning CMMide riistvara ja tööpõhimõtete vahel aitavad lihtsamini õppida ka mõõtemasinade käsitlemist.



**Sele 5. CMMid TTK mõõtetehnika laboris**

Kõrgkooli eesmärgiks ei ole kindlasti pakkuda ettevõtetele n-ö valmis mõõtetehnika insenere, vaid tekitada tugev baas, mille põhjal oleks ettevõtetel oluliselt lihtsam juba vastavalt ettevõtte profiilile ja vajadustele koolitust jätkata.

### **Viidatud allikad**

1. N. Suga, Metrology Handbook. The Science of Measurement., Tokyo: Lamport Gilbert Limited, 2016.
2. HexagonMI, „HexagonMI,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.hexagonmi.com/products/coordinate-measuring-machines/bridge-cmms>. [Kasutatud 12. november, 2018].
3. ISO 10360-2:2009 GPS-Acceptance and verification tests of coordinate measuring machines (CMM)-Part2. CMMs used for measuring linear dimensions, Geneva: International Organization for Standardization, 2009.
4. Renishaw plc, „Renishaw,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.renishaw.com/en/hardware--31248>. [Kasutatud 15. november, 2018].
5. Carl Zeiss AG, „Zeiss,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines.html>. [Kasutatud 6. november, 2018].

## **Summary**

### *Implementation of Coordinate Measuring Machines in Industry*

As a result of globalization of the world economy companies from different regions all compete in one big global market. Thus especially in the field of mechanical engineering and manufacturing companies have to invest heavily into modern manufacturing hardware and software to keep pace with the competition. Coordinate measuring machines (CMM) are the most advanced type of equipment used in quality control of manufactured parts and assemblies. Coupled with powerful software packages they allow to measure all geometrical properties of a part or assembly with high level of precision and repeatability. Direct computer control (DCC) CMM-s like CNC machining centers are highly automated and can drastically increase the efficiency and throughput of quality control.

The article studies the field of CMM-s and introduces the design and different applications of the machines. These applications include inspection of complex requirements (e.g. geometrical tolerances), automation of measuring process and integration with MBE (model based engineering) manufacturing paradigm. Additionally the article looks into CMM training in University of Applied Sciences Tallinn covering the current situation and also plans for the future.



# TTK ESINDUSE OSAVÖTT PRAHAS TOIMUNUD SEMINARIST 14<sup>TH</sup> INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE GEOLOGICAL ASPECTS OF RADON RISK MAPPING NING KAASNENUD RAHVUSVAHELISEST MAAPINNAÕHU RADOONIKONTSENTRATSIOONI VÕRDLUSMÕÖTMISTEST

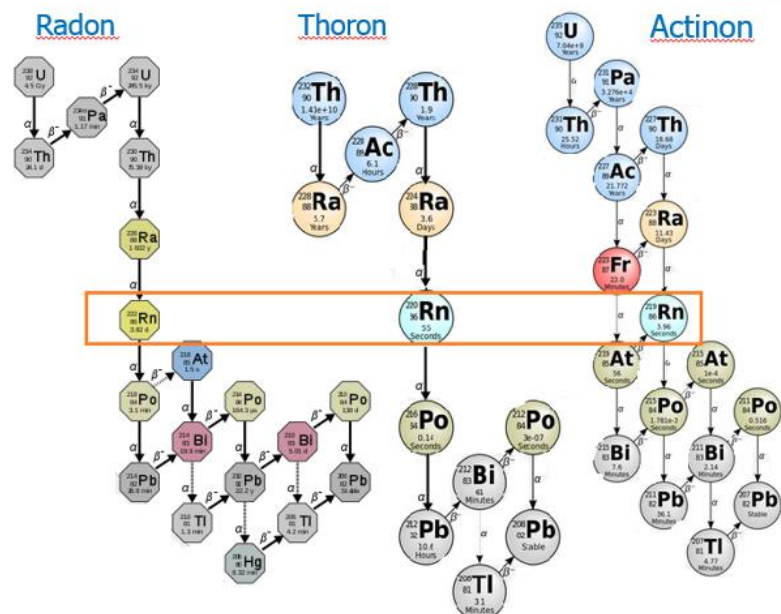
*Rein Koch, PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli dotsent  
Leena Paap, MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor*

16. septembrist kuni 21. septembrini 2018. a toimus Prahhas (Tšehhi Vabariik), rahvusvaheline töötuba: „14<sup>th</sup> International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping“, millest võttis osa ka Tallinna Tehnikakõrgkooli esindus. Töötoa üheks osaks olid maapinna õhus sisalduva radooni kontsentratsiooni võrdluspõhised. Võrdluspõhiste esindatus oli soliidne – 23 rühma oma mõõtetehnikaga. Lisaks TTK esindusele olid Eestist veel Eesti Geoloogiateenistusest (Krista Täht-Kok ja Valle Raidla) ning ettevõtlusest vennad Priit ja Lauri Kasemaa KSM OÜst. Korraldajatele mõõteprotokollis esitanud 22 rühmast kvalifitseerus 15, sh TTK esindus, koosseisus dotsent Rein Koch tehnikainstituudist, lektor Leena Paap ehitusinstituudist ning magistrant Anne Serv Tartu Ülikoolist.

TTK eesmärk sellel sündmusel oligi peamiselt võrdluspõhistel osalemise – TTK ostis sel aastal tippkvaliteediga mitmekülgsete võimalustega radoonimõõteseadme AlphaGuard DF2000, mille kasutamise meetodika vajas valideerimist. Seminari töökoosolekul esineti posterettekandega radoonimõõtmistest Põlvas (autorid Anne Serv ja Rein Koch).

## Radoonist selgituseks

Radon (Rn-222)  $\tau_{1/2} = 3,8$  d  
 Thoron (Rn-220)  $\tau_{1/2} = 54,5$  s  
 Actinon (Rn-219)  $\tau_{1/2} = 3,92$  s



**Joonis 1. Radooni tekkimine U-238, Th-232 ja U-235 lagunemisriidades**

Radoon tekib looduslike radionukliidide uraani ja toriumi lagunemisrea vaheproduktidena radiumist. Radoon on vääriskaaside rühma kuuluv kõige raskem

gaas, mille tihedus on õhu tihedusest ligi kaheksa korda suurem ning mis ise on radioaktiivne (poolestusaeg on 3,8 päeva). Joonisel 1 on esitatud U-238 lagunemisrida, Th-232 lagunemisrida ning U-235 lagunemisrida, milles esinevaid radooni isotoope kutsutakse vastavalt radooniks (Rn-222), torooniks (Rn-220) ja aktinoniks (Rn-219). Kuna tavalistes tingimustes annab uraan saadavast kiirgusdoosist ligi 95%, siis on regulatiivselt käsitletud radooniisotoopidest ainult radooni.

Radooni kui elemendi avastas 1900. a Saksa teadlane F. E. Dorn.

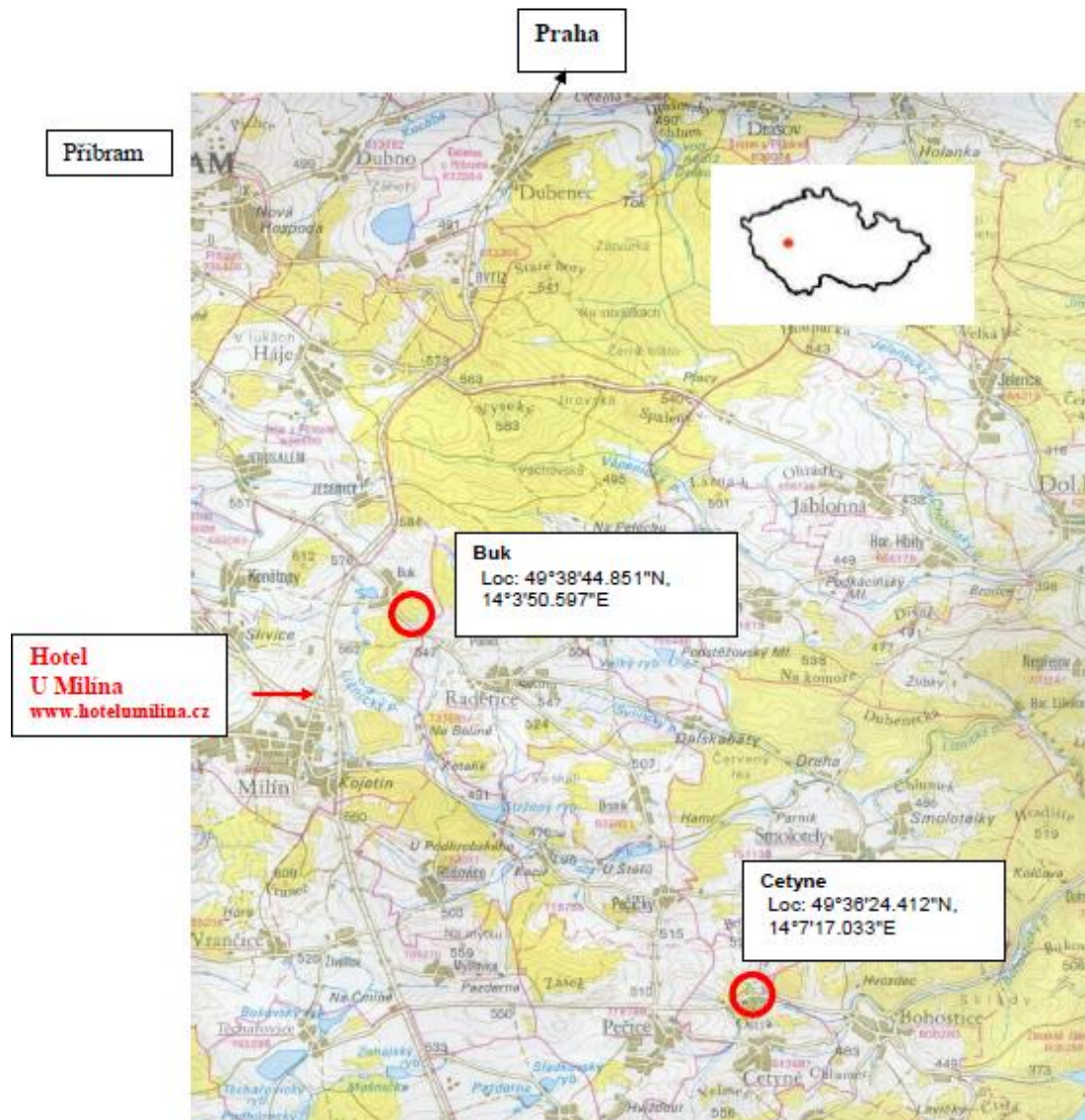
Meid ümbritsevas keskkonnas pärineb radoon maapinnast ja ka ehitusmaterjalides ning põhjavees leiduva uraani/raadiumi lagunemisest. Põhja-Eestis on põhilised radooni allikad uraani sisaldav diktüoneemakilt ehk diktüoneemaargilliit ehk graptoliitargilliit ja fosforiit. Lõuna-Eestis tekkib radoon viimasel jääajal siia kantud uraani sisaldavates setetes. Radoon annab enam kui poole inimese saadavast looduslikust kiirgusdoosist, kusjuures märkimisväärse kiirguskoormuse annavad just radooni lühiealised tütarisotoobid. Radooni peetakse suitsetamise järel olulisemaks kopsuvähi tekkimise riskiteguriks. Euroopa Nõukogu jõustas 3.12.2013 direktiivi 2013/59/EURATOM, millega kehtestati põhilised ohutusstandardid kaitseks ioniseeriva kiirgusega kiiritamise ohtude eest ning milles on võrdsustatud loodusliku radioaktiivsuse allikad kõigi teiste kiirgusallikatega ning neile kõigile rakendatakse samad nõuded. Direktiivi kohaselt tuli direktiivis esitatud nõuded liikmesriikidel oma seadusandlusse kohandada hiljemalt 6. veebruaril 2018. 30.07.2018 võeti vastu ning 6.08.2018 jõustus Eesti Keskkonnaministeeriumi määrus nr 28: „Tööruumide õhu radoonisisalduse viitetas, õhu radoonisisalduse mõõtmise kord ja tööandja kohustused kõrgendatud radooniriskiga töökohtadel“, milles on öeldud, et hiljemalt 1. juuliks 2023 peavad 37 Eesti omavalitsuses tegutsevad tööandjad mõõtma ära radooni aktiivsuskontsentratsiooni töökohtades. Eestis kehtestatud radooni kontsentratsiooni viitetasemeks on kehtestatud 300 Bq/m<sup>3</sup>. (1 bekerell [Bq] on selline radioaktiivsuse ühik, mil ühe sekundi jooksul laguneb vaadeldavas proovis üks aatomituum).

Lisaks radooni tervist kahjustavatele mõjudele on radoonihul ka majanduslik aspekt: hoonete projekteerimisel peab arvesse võtma ka piirkonna radooniohtlikkust ning lähtudes saadud andmetest, optimeerima ehitise/ehitiste maksumust, arvestades võimaluse korral ka ehitamiseks alternatiivseid asukohti ja vajaduse korral veel ka radoonitõrjemeetmete täiendavat maksumust.

### **Võrdlusmõõtmiste tulemuse selgitamine**

Lähtudes eespool kirjeldatust otsustati TTKs asuda radoonilabori loomisele. Ostetud on professionaalne paljude võimalustega radoonimonitor AlphaGuard DF2000, mis võimaldab mõõta radooni ja torooni kontsentratsiooni nii siseruumide õhus kui ka radooni kontsentratsiooni pinnaseõhus, radooni pind- ja massekshalatsiooni kiirust, aga ka mõõtmisega paralleelselt kaasnevaid keskkonnaparametreid.

Kõrgkvaliteetse mõõteriista kasutamise meetodikat tuli kontrollida võrdlusmõõtmistega, milleks andis võimaluse Prahast korraldatud seminari programm. Võrdlusmõõtmisteks oli korraldajal Prahast ca 80 km kagu suunas ette valmistatud kaks mõõteväljakut: Cetyne ja Buk.



**Joonis 2. Mõõteväljakute asukohad kaardil**

Eelnevalt olid end võrdlusmõõtmistele registreerinud 23 mõõterühma, sh kolm rühma Eestist. Korraldajad Praha Karli Ülikoolist olid märkinud maastikul mõlemal väljal kümme katsekohta ning iga koha ümbruses igale osavõtjale konkreetse mõõtepunkti, milles tuli 80 cm sügavusel määrata pinnaseõhu radoonikontsentratsioon. Kummalgi väljal igas mõõdetud punktis saadud tulemused koos määramatustega protokollis mõõtev rühm ning esitas korraldajale analüüsimiseks. Korraldaja analüüsi põhjal saadud tagasiside alusel osutus TTK esindus oma mõõtetulemustega kuuluvaks 15 kvalifitseerunud rühma hulka 23-st.

Meie tulemused olid järgmised: Cetyne'i mõõteväljakul oli meie mõõdetud keskmine maapinnaõhu radooni kontsentratsiooni väärtus  $28,6 \pm 8,6 \text{ Bq/m}^3$  (kõigi osavõtjate tehtud mõõtmiste keskmine väärtus:  $30,9 \pm 10,6 \text{ Bq/m}^3$ ). Buk'i väljal oli meie saadud tulemus  $78,6 \pm 2,2 \text{ Bq/m}^3$  (kõigi osavõtjate tehtud mõõtmiste keskmine väärtus:  $91,8 \pm 27,2 \text{ Bq/m}^3$ ).



**Joonis 3. Cetyne'i mõõteväli, (foto: Anne Serv)**



**Joonis 4. Buk'i mõõteväli. Maapinnal olevad paberid tähistavad radooni mõõtepunkte, (foto: Anne Serv)**

Mõõtmisprotseduur oli järgmine: osutatud punktis tuli õõnes vai lüüa 80 cm sügavusele, avada vaia otsas olev ava ning imeda selle kaudu pinnaseõhu proov mõõteseadme mõõtekambrisse, kus seda analüüsiti. Seejuures tuli vältida välisõhu segunemist analüüsitava pinnaseõhuga. Teiseks pidi arvestama võimaliku torooni lisandiga võetud proovis (torooni ja radooni signaalide eraldamine ionisatsioonikambriga mõõteseadmes on väga keeruline). Üldine põhimõte on siin rajatud torooni ja radooni eluigade suurele erinevusele (3,8 päeva ja 56 sekundit), kuid kõrgete torooni tasemete juures säilib lühiajaliselt ikkagi mingi torooni jääkkontsentratsioon, mille väärtus lisandub radooni kontsentratsiooni väärtusele.

Korraldaja hinnangul esines TTK mõõtetulemustes mõlemal mõõteväljal radoonikontsentratsiooni mõningane alahindamine. Tõenäoliseks põhjuseks oli liiga pikk proovivõtmise tsükkel, mis võimaldas vaia ja maapinna vahelise ebatiheduse kaudu välisõhul meie vaia tipu kaudu imetavaid proove lahjendada. Teiselt poolt aga õnnestus meil vältida radooniga pinnaseõhust koos sisseimetava torooni mõju mõõtetulemustele. Mõõteväljakutelt kogutud pinnaseproovide gammaspetsimeetiline mõõtmine näitas mõlemal väljal natuke kõrgemaid eU ja eTh kontsentratsioone, kui seda on maailma keskmine väärtus. (Cetyne'i väli: U-238 sisaldus 2,78 ppm ja Th-232 sisaldus 12,27 ppm ning Buk'i väli: U-238 sisaldus 5,23 ppm ja Th-232 sisaldus 19,14 ppm).



**Joonis 5. TTK rühma liige lektor Leena Paap mullaproovi kogumas, (foto: Anne Serv)**

### **TTK eesmärk**

TTKs väljaarendatava radoonilabori eesmärk on toetada üliõpilaste väljaõpet, teostada ehitusmaterjalide mass- ja pindekshalatsiooni mõõtmisi, teostada radoonimõõteaparatuuri võrdlusmõõtmisi teistele organisatsioonidele ja ka pakkuda laiemalt radoonimõõtmise ja spetsialistide koolitamise teenust.

## Kokkuvõte

Euroopa Nõukogu jõustas 3.12.2013 direktiivi 2013/59/EURATOM (Basic safety standards – BSS), millega kehtestati põhilised ohutusstandardid kaitseks ioniseeriva kiirgusega kiiritamise ohtude eest ning milles on võrdsustatud loodusliku radioaktiivsuse allikad kõigi teiste kiirgusallikatega, kusjuures neile kõigile rakenduvad samad ohutusnõuded. Need nõuded tuli liikmesriikidel oma seadusandlusse kohandada hiljemalt 6. veebruariks 2018. Eesti Keskkonnaministeerium võttis 30.07.2018 vastu määruse nr 28, mis avaldati „Riigi Teatajas“ 6. augustil 2018: „Tööruumide õhu radoonisisalduse viitetase, õhu radoonisisalduse mõõtmise kord ja tööandja kohustused kõrgendatud radooniriskiga töökohtadel“. Määruses on sätestatud, et hiljemalt 1. juuliks 2023 peavad kõik 37 Eesti omavalitsuses tegutsevad tööandjad mõõtma ära radoonitasemed tööruumides. TTK hakkas juba varakult valmistuma BSSis kehtestatud nõuete täitmiseks – on koostatud koolituskava, soetatud tippkvaliteediga mõõteaparatuur, loomisel on mõõteriistade võrdlemist ja ehitusmaterjalide radooni ekshalatsiooni mõõtmisi võimaldav laboratoorium. 16.–21. septembrini 2018 toimus Prahas 14. rahvusvaheline seminar „14<sup>th</sup> International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping“, millega paralleelselt ja mille käigus toimusid valitud mõõteväljakutel pinnaseõhus radooni võrdlusmõõtmised RIM 2018. Kuna TTK alustas sel aastal sisuliselt radoonilabori rajamist ning selleks otstarbeks oli soetatud juba tipptasemel professionaalne mõõteaparatuur radooni monitor AlphaGuard DF200 baasil, siis oma mõõtemetoodika valideerimiseks osaleski TTK nendel maapinna õhus radooni aktiivsuskontsentratsiooni võrdlusmõõtmistel. TTK esindus osutus oma mõõtetulemustega kuuluvaks 15 kvalifitseerunud rühma hulka 23-st. Toetudes saavutatud tunnustusele ning aparatuursele võimalusele pakub TTK nüüd ka teenusena radooni mõõtmisteenust nii siseruumide kui ka pinnase õhus ja radoonimõõtmise koolitust.

## Viidatud allikad

1. EUROOPA NÕUKOGU DIREKTIIV 2013/59/EURATOM, 17.01.2014.
2. Tööruumide õhu radoonisisalduse viitetase, õhu radoonisisalduse mõõtmise kord ja tööandja kohustused kõrgendatud radooniriskiga töökohtadel. RT I, 03.08.2018, 4.
3. EVS 840:2017 Juhised radoonikaitse meetmete kasutamiseks uutes ja olemasolevates hoonetes.
4. EVS 11665-11. Radioaktiivsuse mõõtmine keskkonnas. Õhk: radoon-222 – Osa 11: Pinnaseõhu kontrollimeetod proovivõtuga sügavusest.
5. UNSCEAR 2000 REPORT Vol. 1. Annex B.

## Summary

*Report of TTK UAS 'Participation in the 14<sup>th</sup> International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping in Prague, and of the International Comparative Measurements of Radon Concentrations in Surface Air*

On 3.12.2013, the Council of Europe adopted the Directive 2013/59 / EURATOM (Basic safety standards - BSS) which introduced basic safety standards for the protection against the risks of radiation from ionizing radiation, which equates the sources of natural radioactivity with all other sources of radiation, (all of them

subject to the same requirements). These requirements had to be adapted by the Member States in their legislation no later than 6 February 2018. On July 30, 2018, the Estonian Ministry of the Environment Regulation No. 28, published on August 3, 2018 "The reference level for radionuclide air in the workplace, the measurement of airborne concentration and employer's obligations in jobs with high radon risk", which states that by the 1st of July 2023, all the employers operating in Estonian 37 municipalities will have to measure the radon levels on the premises. TTK University of Applied Sciences began preparing for BSS early - a training plan has been developed, a high quality instrumentation has been acquired, and a laboratory that allows comparisons of measuring instruments and radon exhalation rate from building materials is being created. From 16 to 21 September, the 14th International Seminar "14th International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping-GARRM" was held in Prague, in parallel with and during which the radon reference measurements of RIM 2018 took place. Since TTK University of Applied Sciences started elaborating a Radon Laboratory in essence and for that state-of-the-art professional instrumentation based on the AlphaGuard DF200 Radon Monitor had already been acquired, the TTK University of Applied Sciences participated in the airborne monitoring of radon activity concentration measurements in the ground air. The TTK University of Applied Sciences team qualified among 15 qualifying groups from 23 of them. Based on the attained recognition and the instrumental capability, the TTK University of Applied Sciences now offers radon measurements as well.

# EESTI TRANSPORDISEKTORI KASVUHOONEGAASIDE VÄHENDUSVÕIMALUSED

*Tõnis Hintsov, MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor  
Jelizaveta Janno, PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor  
Kati Nõuakas, MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor*

## Lühikokkuvõte

2014. a võttis Euroopa Liit vastu siduva kõiki majandussektoreid hõlmava eesmärgi, mille fookuses on järgmised punktid:

- vähendada ühiselt kasvuhoonegaaside heitkoguseid 2030. aastaks vähemalt 40% võrreldes 1990. a tasemega;
- kindlustada vähemalt 27% energia tootmist taastuvenergiaallikatest;
- suurendada energiatõhusust vähemalt 27%.

Olemasolev meetmepakett sisaldab iga-aastaseid siduvaid kasvuhoonegaaside vähendamise eesmärgi, mis hõlmavad tegevusi aastatel 2021–2030, sh transpordisektoris. Eestile on seatud eesmärgiks vähendada nimetatud tähtjaks heitkoguseid 13% (Euroopa Komisjoni esindus Eestis, 2016).

Artikli raames tuvastatakse hinnanguid CO<sub>2</sub> (süsihappegaas ehk süsinikdioksiid) emissiooni võimalikus muutumises eri meetmete rakendamisel siseriiklikul reisijate- ja kaubaveol, eesmärgiga vähendada üldist kasvuhoonegaaside heitkogust Eesti transpordisektoris. CO<sub>2</sub> on põhiline kasvuhoonegaas, mis on iseenesest kõige tavalisem põlemisprotsessi kaasprodukt. Seega on võetud hinnangute andmisel ja meetmete rakendamise hindamisel aluseks just CO<sub>2</sub> emissioon.

Lahendusena on esitatud tehnilised ning käitumuslikud ettepanekud CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamiseks. Edasised uurimissuunad, mis on seotud CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamisega transpordisektoris, peavad keskenduma transpordiprotsessi efektiivsuse suurendamisele ja alternatiivsete tehnoloogiate arendamisele ning kasutamisele. Seejuures on edasistes uuringutes oluline hinnata ka uute tehnoloogiate arendamise ja rakendamise seonduvaid kulusid ning teostada investeeringute tasuvusanalüüs.

Artikli aluseks on 2017. a Maailma Energeetikakomitee Eesti Rahvuskomitee MTÜ tellimusel Tallinna Tehnikakõrgkooli logistikainstituudi teostatud samanimeline uurimus.

## Sissejuhatus

2014. a võttis Euroopa Liit siduva kõiki majandussektoreid hõlmava eesmärgi vähendada ühiselt kasvuhoonegaaside heitkoguseid 2030. aastaks vähemalt 40%, võrreldes 1990. a tasemega. Esitatud tabel iseloomustab Eesti, Läti, Leedu ja Soome kasvuhoonegaaside emissiooni muutusi aastatel 1990–2015. Vastavalt ELi energia- ja kliimapoliitika energiaraamistiku eesmärgile 2030. aastaks on vastavate riikide eesmärgid seoses kasvuhoonegaaside emissiooni vähendamisega järgmised (Euroopa Komisjoni esindus Eestis, 2016; Latvijas Sabiedriskie Mediji, 2016; Znutienė, 2013; Rocha *et al.*, 2016):

- Eesti – vähendada kasvuhoonegaaside heitkoguseid 13%, võrreldes 2005. a tasemega;



- Läti – vähendada kasvuhoonegaaside heitkoguseid 6%, võrreldes 2005. a tasemega;
- Leedu – vähendada kasvuhoonegaaside heitkoguseid 40%, võrreldes 1990. a tasemega;
- Soome – vähendada kasvuhoonegaaside heitkoguseid 60%, võrreldes 1990. a tasemega.

**Tabel 1. Kasvuhoonegaaside emissioon riigiti (mln tonni CO<sub>2</sub> ekvivalenti), (Eurostat Statistics Explained, 2017)**

Aasta Riik	1990	1995	2000	2005	2010	2015	Eesmärk 2030
Eesti	40,5	20,3	17,4	19,3	21,3	18,1	16,8
Läti	26,4	12,8	10,4	11,5	12,6	11,6	10,8
Leedu	48,4	22,4	19,7	23,2	20,9	20,3	29,0
Soome	72,3	72,7	71,1	70,9	77,3	57,3	50,6

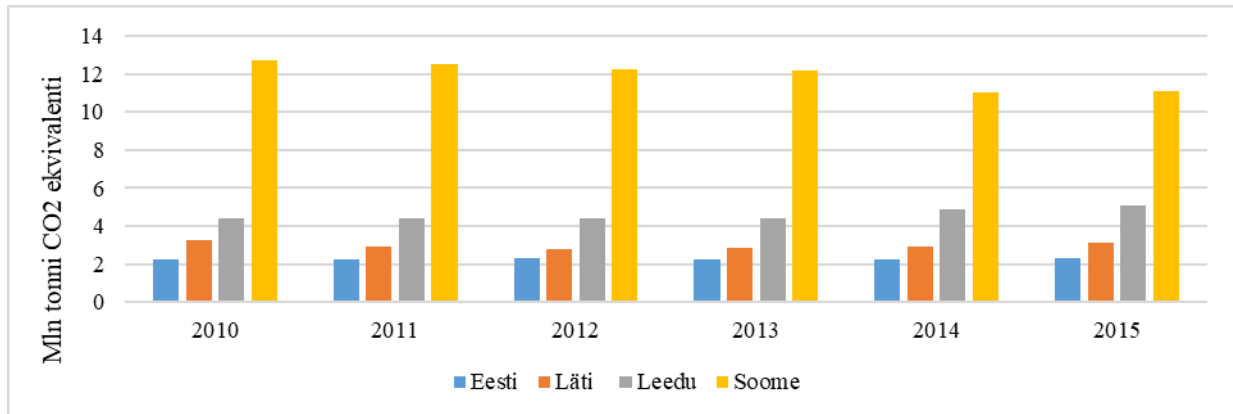
Käesoleva artikli uurimisobjekt on Eesti transpordisektori tegevusest tulenev CO<sub>2</sub> emissioon. Seejuures on uurimusse kaasatud siseriiklik reisijatevedu; siseriiklik ja rahvusvaheline kaubavedu maanteel, raudteel ja mereveol Tallinn–Helsingi suunal *Ro-Ro*-tüüpi laevadel. Tuginedes olemasolevale kvantitatiivsele statistikale ei ole praegu teada CO<sub>2</sub> emissiooni muutuste detailset mõju transpordiliikide, -tehnoloogiate ja kasutatavate kütuste lõikes. Selleks, et uurimisprobleem lahendada, tuleb hinnata CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamise võimalusi transpordiliikide, -tehnoloogiate ja kasutatavate kütuste lõikes. Probleemi lahendamiseks on kajastatud CO<sub>2</sub> emissiooni arvestamist, mida ja kuidas tehakse Eestis praegu. Seejärel on läbi viidud süvaintervjuud valdkonna spetsialistidega, et kaardistada Eesti transpordisektori hetkeolukord ja edasised arenguvõimalused. Seejuures saadi intervjueeritavatel olulist informatsiooni ka teiste riikide praktikate ning arengusuundade kohta.

Peamiste CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamise võimalustena tuuakse uurimuses välja tehnilised ja käitumuslikud lahendused. Tehniliste lahendustena esitatakse muuhulgas näiteks mootorite ökonoomsemaks muutmist ja alternatiivsete kütuste kasutamist (alternatiivid diislikütusele ja bensiinile). Käitumuslike mõjuritena on esitatud näiteks säästlikuma sõidustiili juurutamine, ühistranspordi eelistamine ja sõidujagamisteenuste arendamine. Uurimuse tulemusena on esitatud soovitusel ning hinnangud, kui palju konkreetset meetmeid ja abinõud aitaksid Eesti transpordisektori kasvuhoonegaaside emissiooni vähendamiseks.

### **Taustinformatsioon ja probleemi põhjendus**

Kasvuhoonegaaside suur emissioon on probleemiks kogu Euroopas, üha enam mõeldakse nende vähendamise võimalustele. Vaadates statistilisi näitajaid, võib võrdlusena esitada asjaolu, et Eestis on transpordisektoris CO<sub>2</sub> emissioon võrreldes Lääne-Euroopa riikidega küll väiksem, kuid liidus tervikuna on probleem siiski oluline ning iga liikmesriik peaks andma panuse keskkonnasäästlike eesmärkide saavutamisse. Joonisel 1 kajastub CO<sub>2</sub> emissioon transpordisektoris Eesti, Lätis, Leedus ja Soomes. Baltikumis on transpordisektori põhjustatud kasvuhoonegaaside õhku paiskumine oluliselt väiksem kui mujal Euroopas. Praegu ei saa ükski riik väita,

et kasvuhoonegaaside emissioon ei oleks probleem või emissiooni vähendamise võimaluste otsimine poleks aktuaalne teema.



**Joonis 1. Kasvuhoonegaaside emissioon riigiti (mln tonni CO<sub>2</sub> ekvivalenti), (Eurostat, 2016; autorite kohandatud)**

Võttes arvesse, et transpordisektor on oluline valdkond, mis põhjustab suures koguses CO<sub>2</sub> emissiooni, on riikidel oluline leida võimalusi õhku paiskava kasvuhoonegaasi vähendamiseks. Eelnevates tabelites on näha, et Eestis on 2015. a olnud emissioon viimaste aastate kõige kõrgemal tasemel. Sarnane trend iseloomustab ka Lätit ja Leedut. Soomes on seevastu suudetud CO<sub>2</sub> emissiooni vähendada.

Arvestades, et maanteetranspordis kasutatakse enamjaolt diiselmootoriga veovahendeid ja ka raudteetranspordis on praegu Eestis oluline roll just diiselmootoritel, siis kasvuhoonegaaside (sh CO<sub>2</sub>) õhku paiskumine tekib eelkõige diislikütuse põlemisest. Oluline roll on ka autobensiinil, mille tarbimise võib seostada eelkõige eratarbimisega. Seega on maanteetranspordis kaubaveo puhul võimalik saavutada CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamine, vähendades diislikütuse põlemist. Eratarbimises toimuvate muutustega väheneks ka kütuse tarbimine ja seeläbi ka kasvuhoonegaaside emissioon.

### Uurimismetoodika valik ja kitsendused

Õhusaastest põhjustatud kulud on väliskulud, mis on tingitud transpordis tekkivatest saasteainetest, milleks on peamiselt CO<sub>2</sub>, peenosakesed, lämmastikoksiidid (NO<sub>x</sub>), vääveldioksiid (SO<sub>2</sub>), lenduvad orgaanilised ühendid (*Volatile Organic Compound – VOC*) ning sekundaarse saasteainena tekkiv osoon (O<sub>3</sub>) (Jüssi *et al.*, 2008). Õhusaastega seotud väliskulud on üks enim rahvusvaheliselt uuritud valdkondasid.

*Impact Pathway* (IPA) meetod lähtub esimese etapina väliskulude empiirilisel hindamisel saaste mõjude määratlemisest. Selle meetoodika põhietapid seisnevad esiteks mõju tuvastamises ning selle hindamises inimeste tervisele ja teiseks kulu tegeliku väärtuse tuvastamises rahalise väärtuse määramise kaudu. Sõltumata ebakindlustest mõju tagajärgede määramisel, peetakse mitmel pool IPA-meetodit kõige usaldusväärsemaks viisiks määratleda väliskulusid. Vaadeldava uurimuse raames (CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamise võimalusi hinnates) piirduakse mõju hindamise faasiga.

Lisaks terviklikule strateegiale väliskulude kajastamisel, kasutatakse uuringus keske meetodina transpordi väliskulude hindamiseks COPERT-mudelit. Mudel arvutab ainult

kütuse põlemisega seotud emissioone ja seega ei anna see maanteeliikluses tekkivaid muid heitkoguseid (*Non-Exhaust Emissions* ehk sõidukite rehvide, pidurite ja teepinna kulumisel tekkivad peenosakeste heitkogused – neid uurimuses ei käsitleta). Võttes arvesse, et uuringu eesmärk on tuvastada CO<sub>2</sub> emissiooni muutus teatud konkreetsete muudatuste sisseviimisel Eesti transpordisektoris tervikult, taandatakse teatud lihtsustustega COPERT-mudeli põhimõtet ka teistele uuringusse kaasatud transpordiliikidele (intermodaalsed lahendused).

Selleks, et hinnata adekvaatselt CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamise võimalusi transpordiviiside, -tehnoloogiate ja kasutatavate kütuste lõikes, on esmalt oluline need tuvastada ning kaardistada, sest kõikvõimalikud tehnilised ja tegevustel põhinevad muudatused transpordis omavad transpordiliigiti erinevat dünaamikat. Intervjuude eesmärgiks oli saada kinnitus teoorias esinevatele ning maailmapraktikas toimuvatele trendidele CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamiseks.

### **CO<sub>2</sub> emissiooni muutuse tuvastamine, vähendamise võimaluste hindamine ja selgitamine**

Intervjuude märksõnadest on eristuvad olemuslikult kahte tüüpi CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamise võimalused. Need jagunevad tehnilisteks ja käitumuslikeks lahendusteks. Kõigi transpordiliikide ühisosana võib välja tuua kaks tehnilist aspekti. Esimene neist on kasutada olemasolevaid vahendeid võimalikult efektiivselt või täiustada mootoreid selliselt, et kütuse tarbimine oleks väiksem. Teiseks võib välja tuua asjaolu, et alternatiivsete kütuste kasutamises ei ole võimalik mööda vaadata ühegi transpordiliigi puhul. Meretranspordis on esitatud näitaja 40% efektiivsuse tõusu ehk kütuse kokkuhoidu, see tähendab ühtlasi ka väiksemat CO<sub>2</sub> emissiooni, sest mida väiksem on põlemine, seda väiksem on sellest tingitud kasvuhoonegaaside emissioon. Kui tehnilised vahendid on sellised, et nende arendamise või täiustamisega suudetakse vähendada kütuste tarbimist, on võimalik jõuda ka emissiooni vähendamiseni soovitud hulgal. Uute alternatiivsete kütuste kaasamise osas tuleb arvestada tarbijaga, sest tehnoloogia leiab kasutust siis, kui tarbija on nõus seda ostma ja rakendama.

Uute tehniliste vahendite kasutamine on omakorda aga käitumusliku (valikulise) iseloomuga emissiooni vähendamise võimalus. Käitumuslikud lahendused CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamiseks Eesti transpordisektoris ning hinnang nende rakendamise võimalikkusele tulenevalt hoiakutest ühiskonnas ja üldisest valmisolekust, on järgmised.

- Ökonoomsete sõidukite eelistamine.
- Elektri- või vesiniktehnoloogial põhinevate sõidukite soetamine ja kasutamine.
- Elektri- või vesiniktehnoloogial põhinevate sõidukite soetamine ja kasutamine.
- Sõidujagamine ja ühistranspordi eelistamine.
- *Platooning*, planeerimine, koostöö.
- Säästliku sõidu juurutamine.
- Pikkade autorongide lubamine maanteedele.

Süvaintervjuude põhjal sõnastatud meetmed CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamiseks on põhjendatud aluseks mõõdetava emissiooni suuruse muutuse tuvastamiseks. Need kujutavad endast selgeid tehnilisi või käitumuslikke meetmeid, mille kasutusele võtmisel on Eesti transpordisektoris võimalik saavutada CO<sub>2</sub> emissiooni vähenemine.

Tabelis 2 on esitatud kokkuvõtlikult olemasolev olukord CO<sub>2</sub> emissiooni puhul seoses tehnilis-käitumuslike meetmetega konkreetse transpordiliigi lõikes (nn nullolukord) ning selle tingimused. Kõrvutavalt on esitatud tulemused seoses CO<sub>2</sub> emissiooni muutusega alternatiivsete tehnilis-käitumuslike meetmete rakendamisel samadel tingimustel. Konkreetsete arvutuste tegemise aluseks on võetud Eesti tingimustesse ning käesoleva uurimuse raamistikku sobitatud COPERT-mudel.

**Tabel 2. Hetkeolukord ja võimalikud alternatiivide rakendamise tulemused CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamiseks, (autorite koostatud)**

Hetkeolukord, kasutusel-olev tehnoloogia	Alternatiivide rakendamine, võimalused CO <sub>2</sub> emissiooni vähendamiseks	CO <sub>2</sub> emissiooni vähenemine muudatuse rakendamisel	Tingimused, kommentaarid
Diiselveður	Veduri mootori ümberehitamine	Kuni 40%	Praktikas testitud, aga mastaapi arvestades ebaolulise tähtsusega CO <sub>2</sub> emissiooni vähenemisel kogu transpordisektori seisukohast.
	Raudtee elektrifitseerimine	100%	Otstarbekas, kui kasutatakse nn taastuvenergiat. Praktikas tõestatud väga kallis lahendus (Eesti oludes).
Autorong (18,75 m)	CNG/LNG	15%	Vähendamise maksimaalne suurus on esitatud Scania Eesti ASI uuringu andmetele tuginedes.
	Biogaas	Kuni 90%	
	HVO	Kuni 90%	
	Biodiiseli	Kuni 66%	
	Etaanol	Kuni 90%	
	Hübriid	Kuni 92%	
MGO-l töötav alus merel	LNG kütusena	15%	Vähendamine on esitatud ASI Tallink andmetele tuginedes.
	Laevakere ümberehitamine ja suuruse muutmise	24%	
Sisepõlemis-mootoriga sõiduauto	Vesinik	100%	Sõiduautode puhul on võimalik vähendada CO <sub>2</sub> emissiooni kuni 100%. Seejuures on aga oluline, et nt elektri tootmine ei tekitaks keskkonnakahju.
	Elekter	100%	

Tuginedes tabelis esitatud informatsioonile ja kogutud andmetele on esitatud tabel 3, milles kajastatakse CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamise võimalusi eri tegevuste lõikes, andes seejuures ekspert hinnangu muudatuste/meetmete prioriteetsusele ja rakendatavusele. Prioriteetsuse iseloomustamiseks on kasutatud kolme värviga tähistamist. Näiteks on rohelise märke saanud võimalused ja nende rakendamiseks vajalikud muudatused, mis on prioriteetsed ja annaksid suhteliselt kiiresti suure efekti.

**Tabel 3. CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamise võimalused, tegevused selleks ja hinnang nende prioriteetsusele/teostatavusele**

<b>Teostatavus</b>	Keeruliselt ja aeglaselt elluviidav	Teostatav keskmise kiirusega	Kiiresti teostatav, hetkel rakenduses
<b>Saavutatav efekt CO<sub>2</sub> vähendamisest</b>	Vähene/mitteoluline mõju	Keskmine mõju	Oluline mõju

Võimalused	Muudatus	CO <sub>2</sub> emissiooni vähenemine, %	Märkused	Teostatus	Saavutatav efekt CO <sub>2</sub> vähendamisest
<b>Raudteetransport Eestis</b>					
Diiselmootorite vahetamine moderniseeritud ja kaasaegsete vastu	Ümberehitatud mootoriga vedur	40	Moderniseerimist vajavaid vedureid on üsna vähe, saavutatav koguefekt seega väike.		
Raudtee-võrgustiku elektrifitseerimine	Elektrifitseeritud raudtee	100	Eesti oludes kallis, kuid praktikas juba rakendatud ja teostatav.		
Veduripargi üleviimine alternatiivkütusele	Näiteks vesinik-tehnoloogia	100	Vesiniku tootmise keerulisus ja kõrged kulud.		
<b>Maanteetransport Eestis (kaubavedu)</b>					
Alternatiivsete kütuste kasutamine	CNG/LNG	15	Tehnoloogiad olemas, kasutamine sõltub turu valmisolekust ja laadimis-võrgustike loomisest ning arendamisest.		
	Biogaas	90			
	HVO	90			
	Biodiisel	66			
	Etaanool	90			
	Hübriid	92			
	Vesinik	100			
Seadusandlikud meetmed: lubada teedele pikemad autorongid	25,25- ja 30,4-meetriste autorongide kasutamine kaubaveol	>15	Põhjamaadel on olemas positiivsed kogemused, meetmed oleksid kohe ka Eestis rakendatavad, mistõttu suureneks Eesti transpordiettevõtete konkurentsivõime.		
<b>Meretransport Eestis</b>					
Lähimerevedudel kasutada kütusena LNGd	LNG-kütusel sõitev alus	15	Juba osaliselt rakendatud.		
Laevakere ümberehitamine	Muudetud kere ja suurusega alused	24	Olemas ja rakendatud osaliselt (MegaStar).		
<b>Käitumuslikud muudatused ja ühistransport Eestis</b>					
Säästlik sõit	Säästliku sõidustiili juurutamine (nt kaubaveol veokijuhtide seas)	10	Võimalik efekt saavutatav väikese ajakuluga.		
Sõidujagamine	Sõiduauto täituvuse suurendamine	Sõltub täituvuse suurendamise	Võimalik efekt saavutatav väikese ajakuluga, kuid tuleb muuta inimeste		

Võimalused	Muudatus	CO <sub>2</sub> emissiooni vähenemine, %	Märkused	Teostatavus	Saavutatav efekt CO <sub>2</sub> vähendamisest
		ulatusest (reaalne 10–20%)	harjumusi, mis võib osutada võrdlemisi keerukaks.		
Ühistranspordi eelistamine	Inimeste harjumuste muutmine ja ühistranspordi vahendite täituvuse suurendamine	Sõltub täituvuse suurendamise ulatusest (reaalne 10–15%)	Harjumuste muutmine keeruline, eeldab ka ühistranspordi arendamist avaliku sektori poolt.		

Allikas: Autorite koostatud

Eri võimaluste rakendamise koosmõjul peavad uurimuse autorid realistlikuks võimalust vähendada Eesti transpordisektori CO<sub>2</sub> emissiooni aastaks 2030 kuni 35% ja aastaks 2050 ligikaudu kuni 56%.

### Järeldused ja ettepanekud CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamiseks

Uuringu tulemustele tuginedes esitatakse järgnevalt järeldused ja ettepanekud, mis võimaldaksid vähendada CO<sub>2</sub> emissiooni Eesti transpordisektoris. Seejuures on esitatud ka riiklikul tasandil vajalikud sammud ja soovitusel. Ettepanekud on täiendatud autorite hinnangutega, kui palju aitaks konkreetne soovitus Eesti transpordisektori CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamiseks. Hinnangute andmisel on lähtealuseks prognoositud CO<sub>2</sub> emissiooni võimalik kokkuhoid. Võttes aluseks läbi viidud empiirilise uurimuse tulemusi, on autorite ettepanekud järgmised.

1. Vaadata üle elektriaktsiisipoliitika. Ettepanek vabastada elektriaktsiisist laevad (peamiselt kruisilaevad), mis sadamas kasutavad kaldaelektri asemel laevaelektrit.
2. Vaadata üle aktsiisipoliitika ning see regionaalselt ühtlustada, eesmärgiga võimaldada efektiivne keskkonnapoliitika elluviimine.
3. Lubada Eesti põhimaanteedele (sarnaselt Põhjamaadega) pikemad autorongid (25,25- ja 30,4-meetrised). Sellega suureneks Eesti ettevõtete konkurentsivõime ning transpordil kulutatakse kaubaühiku kohta vähem kütust, millest tuleneks oluline CO<sub>2</sub> emissiooni vähenemine.
4. Motiveerida ettevõtteid kasutama säästlikumaid ja keskkonnasõbralikumaid veokeid ning tagada põhjalikum tehniline kontroll, et kaubavedu toimuks tehniliselt korras veokitega, mille puhul CO<sub>2</sub> emissioon on väiksem.
5. Motiveerida elektrimootoriga autode kasutuselevõttu. Samas on vaja leida alternatiive elektriautode laadimisvõrgustikule, sest reaalne probleem on laadimisvõrgustiku või elektrivõrgu võimalik ülekoormatus. Kiirlaadimise vähendamiseks luua võimalused kortermajade juures elektriautode laadimiseks (ettepanek kehtestada vastavad nõuded ehitusseadustikus).
6. Analüüsida ja soodustada akuvahetuspunktide ja vesiniktanklate võrgustiku rajamist, mis võiksid olla peamised alternatiivid elektrimootoriga autode kiirlaadimisele.
7. Vaadata üle ühistranspordi graafikud ja sõiduplaanid ning kombineerida neid jagamismajanduse lahendustega. Seejuures on võimalik hoida kokku aega ja

raha. Ühiskond on valmis kasutama ühistransporti oluliselt rohkem, kuid eeldusel, et teenus on piisavalt mugav, paindlik ja kiire.

8. Soodustada laevade moderniseerimist ning alternatiivkütuste kasutamist.
9. Analüüsida ja soodustada alternatiivsete kütuste kasutamist ühistranspordis (vesinik, biogaas).
10. Olemasoleva raudtee elektrifitseerimine annaks küll olulise CO<sub>2</sub> emissiooni vähenemise, kuid on praeguste ning prognoositavate kaubaveo mahtude juures põhjendamatult kallis.

## **Kokkuvõte**

Uurimuse eesmärgiks oli selgitada CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamise võimalusi Eesti transpordisektoris. Selleks viidi läbi intervjuud valdkonna ekspertidega, tuginedes metoodilistele valemitele teostati arvutused, pakuti eksperthinnangutele tuginevad lahendused ning koondati peamised prioriteetsed lahendused, mida saaks hakata kohe või teatud aja möödudes rakendama.

Peamiste CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamise võimalustena on esitatud tehnilised ja käitumuslikud lahendused. Tehniliste lahendustena esitatakse muuhulgas näiteks mootorite ökonoomsemaks muutmine ja alternatiivsete kütuste kasutamine (alternatiivid diislikütusele ja bensiinile). Selleks vajalik tehnoloogia on praegu enamjaolt olemas, ehk suuri arenduskulusid enam teha ei oleks vaja. Küll aga nõuab näiteks laadimisvõrgustike rajamine investeringuid. Käitumuslike mõjuritena on esitatud näiteks säästlikuma sõidustiili juurutamine, ühistranspordi eelistamine ja sõidujagamisteenuste arendamine. Käitumuslikud muutused on need, mis annaksid kohe võimalikult suure efekti, kuid mille kohene rakendumine ei saa toimuda 100%-liselt.

Ainuüksi 30,4-meetrise autorongide teedele lubamisega oleks võimalik saavutada oluline CO<sub>2</sub> emissiooni vähenemine. See lahendus ei nõuaks muud kui seadusandluse ümbertöötamist. Samas on olemas Põhjamaade praktika, mis näitab sammu mõistlikkust. Palju sõltub ka ühiskonnas levinud käitumismustritest.

Ühistranspordi kasutamise suurenemine viiks Eesti teedelt teatud osa erasõiduautosid. Kui ühistransport viia alternatiivkütustele, oleks saavutatav efekt märkimisväärne. See eeldaks aga muudatusi inimeste harjumustes.

Uurimuse käigus kerkis esile mitmeid edasisi küsimusi ja uurimissuundi, millega praegu tegeleda tuleks. Näiteks hinnata vesiniktanklate võrgustiku loomise efektiivsust. Vesiniktehnoloogial töötavad sõidukid on maailmas olemas, kuid nende kasutamine taandub puuduvale tankimisvõimalusele. Eestis on olemas suhteliselt hea elektriautode laadimisvõrgustik, kuid lisaks elektrile võiks mõelda ka muudele alternatiividele. Elektriautode laadimisvõrgustikuga seondub probleem – kui elektriautode kasutamine suureneks, võib tekkida võrgustiku ülekoormatus. Eestlane on muutumas keskkonnateadlikumaks ning valmis soetama ka hübriid- või elektrimootoriga sõidukeid. Septembris 2017 müüdi Eestis üle saja hübriidmootoriga sõiduauto. Seega ollakse valmis ka muude alternatiivide kasutamiseks.

## Viidatud allikad

1. Euroopa Komisjoni esindus Eestis. (2016). Euroopa Komisjon seadis liikmesriikidele eesmärgid kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamiseks transpordi-, põllumajandus-, hoonehaldus- ja jäätmekäitlussektoris. Avaldatud: [https://ec.europa.eu/estonia/node/355\\_et](https://ec.europa.eu/estonia/node/355_et) (08.08.2017).
2. Eurostat. (2016). Greenhouse Gas Emissions from Transport, million tonnes CO2 equivalent. Eurostat: Code tsdtr410. Avaldatud: <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/mapToolClosed.do?tab=map&init=1&plugin=1&language=en&pcode=tsdtr410&toolbox=types#> (10.08.2017).
3. Eurostat Statistics Explained. (2017). Greenhouse gas emission statistics. Avaldatud [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse\\_gas\\_emission\\_statistics](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse_gas_emission_statistics) (20.10.2017).
4. Jüssi, M.; Anspal, S.; Kallaste, E. (2008). Transpordi väliskulude hindamine: hindamismetoodika ja sisendandmete kaardistus. Uuringuraport Majandus- ja kommunikatsiooniministeeriumile. Avaldatud: [http://seit.ee/et/projektid?project\\_id=251](http://seit.ee/et/projektid?project_id=251) (20.07.2017).
5. Latvijas Sabiedriskie Mediji. (2016). К 2030 году Латвия должна будет на 6% сократить выброс парниковых газов. Avaldatud: <http://rus.lsm.lv/statja/novosti/ekonomika/k-2030-godu-latvija-dolzha-budet-na-6-sokratit-vibros-parnikovih-gazov.a192918/> (09.10.2017).
6. Rocha, M., Sferra, F., Schaeffer, M., Roming, N., Ancygier, A., Parra, P., Cantzler, J., Coimbra, A., Hare, B. (2016). What does the Paris Climate Agreement mean for Finland and the European Union? Technical Report, June 2016. Climate Analytics gGmbH. Avaldatud: [https://media.sitra.fi/2017/02/28142626/What\\_does\\_the\\_Paris\\_climate\\_agreement\\_mean\\_for\\_Finland\\_and\\_the\\_European\\_Union.pdf](https://media.sitra.fi/2017/02/28142626/What_does_the_Paris_climate_agreement_mean_for_Finland_and_the_European_Union.pdf) (01.10.2017).
7. Znutienė, S. (2013). Lithuanian Climate Change Management Policy and Its Implementation. Policy Division Pollution Prevention Department. Tallinn, October, 2013. Avaldatud: [https://www.norden.ee/images/rohemajandus/info/climate\\_oct2013/Stasile\\_Znutiene\\_climate\\_23-24oct13.pdf](https://www.norden.ee/images/rohemajandus/info/climate_oct2013/Stasile_Znutiene_climate_23-24oct13.pdf) (24.10.2017).

## Summary

### *Possibilities of Reducing Greenhouse Gases in the Estonian Transport Sector*

The purpose of this study was to explain the possibilities of reducing CO2 emissions in the Estonian transport sector. For this, interviews were conducted with experts in this field, predictions based on the methodological formulas were made, solutions based on expert assessments were suggested, and finally, answers that could be applied immediately or after a certain period were summarised.

Technological and behavioural solutions are outlined as the main ways of reducing CO2 emissions. Technical solutions include, for example, making engines more economical and using alternative fuels (alternatives to diesel and petrol). The technology needed for this is mainly available today, perhaps no more development costs would be required. However, for example, charging networks require investment. Behavioural factors include, for example, introducing a more sustainable driving style, favouring public transport and developing driving services. Behavioural



changes are those that give immediate effect as high as possible but can not be immediately triggered by 100%.

Only a 30.4-meter long carriageway would allow a significant reduction in CO2 emissions. This solution would not require any reform of the law. However, there is a Nordic practice that shows the reasonableness of this step. A lot depends on the behavioural patterns that are common in society.

An increase in the use of public transport would lead to a cut in the proportion of private cars on Estonian roads. If public transportation is to be delivered to alternative fuels, the resultant effect would be significant. However, this would require changes in people's habits.

During the research, some further questions and research directions were raised that should be addressed today — for example, the evaluation of the effectiveness of creating a network of hydrogen banks. Hydrogen-powered vehicles are available today in the world, but their use is reduced to the lack of refuelling. Estonia has a relatively good electric charging network, but in addition to electricity, other alternatives could also be considered. The problem with the electric car charging network is that if the use of electric cars increases, then there may be overloading of the net. Estonians are becoming more environmentally conscious and are also ready to purchase vehicles with hybrid or electric motors. In September 2017 more than 100 hybrid cars were sold in Estonia. Therefore, it is also prepared to use other alternatives.